

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60866

Première édition
First edition
1987-05

**Caractéristiques et étalonnage des hydrophones
fonctionnant dans la gamme des fréquences
de 0,5 MHz à 15 MHz**

**Characteristics and calibration of hydrophones
for operation in the frequency range 0.5 MHz to
15 MHz**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60866: 1987

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

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

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
60866**

Première édition
First edition
1987-05

**Caractéristiques et étalonnage des hydrophones
fonctionnant dans la gamme des fréquences
de 0,5 MHz à 15 MHz**

**Characteristics and calibration of hydrophones
for operation in the frequency range 0.5 MHz to
15 MHz**

© IEC 1987 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

U

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
LISTE DES SYMBOLES	6
Articles	
1. Domaine d'application	8
2. Objet	8
3. Définitions	8
3.1 Champ libre	8
3.2 Champ lointain	8
3.3 Centre acoustique	8
3.4 Hydrophone (ou récepteur)	8
3.5 Transducteur réversible	10
3.6 Transducteur réciproque	10
3.7 Tension en circuit ouvert d'un hydrophone	10
3.8 Sensibilité en champ libre d'un hydrophone	10
3.9 Niveau de sensibilité en champ libre	10
3.10 Réponse à l'émission en courant d'un projecteur	10
3.11 Coefficient de réciprocité	12
3.12 Réponse directionnelle d'un hydrophone	12
3.13 Résistance de fuite en bout de câble	12
3.14 Facteur de qualité Q mécanique d'un hydrophone	12
4. Introduction générale	12
4.1 Choix de la méthode de mesure	12
4.2 Fondement des recommandations	14
4.3 Effets de la taille réduite des hydrophones	14
4.4 Etalonnage de l'hydrophone	14
5. Caractéristiques d'un hydrophone	14
5.1 Sensibilité	16
5.2 Directivité	18
5.3 Caractéristiques électriques	20
5.4 Caractéristiques mécaniques	20
6. Spécification du fonctionnement d'un hydrophone	24
6.1 Sensibilité en champ libre	24
6.2 Directivité	24
6.3 Aspects électriques	24
6.4 Aspects mécaniques et milieu	24
7. Etalonnage d'un hydrophone	26
7.1 Techniques de réciprocité	26
7.2 Principe de la méthode à deux transducteurs	28
7.3 Conditions des mesures pour l'étalonnage	30
7.4 Méthode expérimentale	34
7.5 Calcul des résultats	34
7.6 Précision	38
ANNEXE A — Raisonement à l'appui de la méthode d'étalonnage par réciprocité	40
ANNEXE B — Réciprocité des ondes planes	44
ANNEXE C — Détails des méthodes expérimentales recommandées	48
ANNEXE D — Evaluation du facteur de correction, <i>k</i>	52
ANNEXE E — Bibliographie	54
FIGURES	55

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
LIST OF SYMBOLS	7
 Clause	
1. Scope	9
2. Object	9
3. Definitions	9
3.1 Free field	9
3.2 Far field	9
3.3 Acoustic centre	9
3.4 Hydrophone (or receiver)	9
3.5 Reversible transducer	11
3.6 Reciprocal transducer	11
3.7 Open-circuit voltage at a hydrophone	11
3.8 Free-field sensitivity of a hydrophone	11
3.9 Free-field sensitivity level	11
3.10 Transmitting response to current of a projector	11
3.11 Reciprocity coefficient	13
3.12 Directional response of a hydrophone	13
3.13 End-of-cable leakage resistance	13
3.14 Mechanical Q of hydrophone element	13
4. General introduction	13
4.1 Choice of measurement method	13
4.2 Basis of recommendations	15
4.3 Effect of the finite size of hydrophones	15
4.4 Hydrophone calibration	15
5. Hydrophone characteristics	15
5.1 Sensitivity	17
5.2 Directivity	19
5.3 Electrical characteristics	21
5.4 Mechanical characteristics	21
6. Specification of performance of a hydrophone	25
6.1 Free-field voltage sensitivity	25
6.2 Directivity	25
6.3 Electrical aspects	25
6.4 Mechanical and environmental aspects	25
7. Hydrophone calibration	27
7.1 Reciprocity techniques	27
7.2 Principle of the two-transducer reciprocity method	29
7.3 Calibration measurement conditions	31
7.4 Experimental method	35
7.5 Calculation of results	35
7.6 Accuracy	39
APPENDIX A — Rationale for the reciprocity procedure	41
APPENDIX B — Plane wave reciprocity	45
APPENDIX C — Details of the recommended experimental procedures	49
APPENDIX D — Evaluation of the correction factor, k	53
APPENDIX E — Bibliography	54
FIGURES	55

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CARACTÉRISTIQUES ET ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES
FONCTIONNANT DANS LA GAMME DES FRÉQUENCES
DE 0,5 MHz À 15 MHz**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la C E I 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 C E I exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la C E I, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la C E I et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

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

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
29D(BC)19	29D(BC)22

Pour de plus amples renseignements, consulter le rapport de vote mentionné dans le tableau ci-dessus.

Les publications suivantes de la C E I sont citées dans la présente norme:

- Publications n°s 500 (1974): Hydrophone étalon C E I.
565 (1977): Etalonnage des hydrophones.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CHARACTERISTICS AND CALIBRATION OF HYDROPHONES
FOR OPERATION IN THE FREQUENCY RANGE
0.5 MHz TO 15 MHz**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the I E C 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 I E C expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the I E C recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the I E C 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 I E C Technical Committee No. 29: Electroacoustics.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
29D(CO)19	29D(CO)22

Further information can be found in the Report on Voting indicated in the table above.

The following I E C publications are quoted in this standard:

Publications Nos. 500 (1974): I E C Standard Hydrophone.
565 (1977): Calibration of Hydrophones.

CARACTÉRISTIQUES ET ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES FONCTIONNANT DANS LA GAMME DES FRÉQUENCES DE 0,5 MHz À 15 MHz

LISTE DES SYMBOLES

A_1	Aire utile du transducteur auxiliaire
a	Rayon utile de l'hydrophone
a_1	Rayon utile du transducteur auxiliaire
a_u	Facteur dont la tension de référence U_{ref} doit être réduite pour être égale à la tension U
a_{u1}	Facteur dont la tension de référence U_{ref} doit être réduite pour être égale à la tension U_1
a_{11}	Facteur dont la tension de référence U_{ref} doit être réduite pour faire passer un courant I_1 au travers de l'impédance R_0
c	Vitesse du son dans l'eau
d	Distance entre hydrophone et réflecteur
d_1	Distance entre transducteur auxiliaire et réflecteur
G_1	Facteur de correction des pertes par diffraction dues au transducteur auxiliaire seul
G_2	Facteur de correction des pertes par diffraction dues au transducteur auxiliaire et à l'hydrophone
G_c	Facteur de correction combinant G_1 et G_2 , applicable seulement dans certaines conditions de mesure
I_1	Courant à travers le transducteur auxiliaire
I_k	Courant à travers le court-circuit provoqué en remplacement du transducteur auxiliaire
J	Coefficient de réciprocité
J_p	$\{ = 2 A/\rho c \}$ Coefficient de réciprocité pour les ondes planes
k_{u1}	Correction à la tension en circuit ouvert pour le transducteur auxiliaire
k_u	Correction à la tension en circuit ouvert pour l'hydrophone
M	Sensibilité en champ libre d'un hydrophone
M^*	Sensibilité en champ libre apparente d'un hydrophone, dans des conditions présumées idéales de mesure des ondes planes
N	Distance du champ proche
p	Pression acoustique
p_1	Pression acoustique dans une onde plane émise par le transducteur auxiliaire
R_0	Impédance d'une charge étalon égale à l'impédance caractéristique de l'atténuateur de précision
R_L	Résistance de fuite en fin de câble d'un hydrophone
r	Coefficient de réflexion en amplitude à l'interface du réflecteur et de l'eau
s	$\{ = (d_1 + d) \lambda / a_1^2 \}$ Distance normalisée entre le transducteur auxiliaire et l'hydrophone
S	Réponse à l'émission en courant d'un projecteur
S_1	Réponse à l'émission en courant d'un transducteur auxiliaire
S_1^*	Réponse apparente à l'émission en courant d'un transducteur auxiliaire, dans des conditions idéales pour la mesure des ondes planes
U	Tension en circuit ouvert d'un hydrophone
U_1	Tension en circuit ouvert d'un transducteur auxiliaire
U_{ref}	Tension de référence
v	Vitesse de la surface rayonnante du transducteur
z	Distance le long de l'axe acoustique à partir du transducteur
α'	Coefficient d'affaiblissement de l'amplitude du son dans l'eau
λ	Longueur d'onde du son dans l'eau
ρ	Masse volumique de l'eau

CHARACTERISTICS AND CALIBRATION OF HYDROPHONES FOR OPERATION IN THE FREQUENCY RANGE 0.5 MHz TO 15 MHz

LIST OF SYMBOLS

A_1	Effective area of auxiliary transducer
a	Effective radius of the hydrophone
a_1	Effective radius of auxiliary transducer
a_u	Factor by which the reference voltage U_{ref} must be reduced to make it equal to voltage U
a_{u1}	Factor by which the reference voltage U_{ref} must be reduced to make it equal to voltage U_1
a_{11}	Factor by which the reference voltage U_{ref} must be reduced in order to drive a current I_1 through the impedance R_0
c	Speed of sound in water
d	Distance between hydrophone and reflector
d_1	Distance between auxiliary transducer and reflector
G_1	Correction factor for diffraction loss with auxiliary transducer alone
G_2	Correction factor for diffraction loss with auxiliary transducer and hydrophone
G_c	Correction factor combining G_1 and G_2 , applicable only under certain measurement conditions
I_1	Current through auxiliary transducer
I_k	Current through short circuit introduced in place of the auxiliary transducer
J	Reciprocity coefficient
J_p	$\{ = 2 A/\rho c \}$ Reciprocity coefficient for plane waves
k_{u1}	Correction to open-circuit voltage for the auxiliary transducer
k_u	Correction to open-circuit voltage at a hydrophone
M	Free-field sensitivity of a hydrophone
M^*	Apparent free-field sensitivity of a hydrophone, assuming ideal plane wave measurement conditions
N	Near field distance
p	Sound pressure
p_1	Sound pressure in plane wave omitted by auxiliary transducer
R_0	Impedance of standard load equal to the characteristic impedance of the precision attenuator
R_L	End-of-cable leakage resistance of hydrophone
r	Amplitude reflection coefficient for the reflector/water interface
s	$\{ = (d_1 + d) \lambda / a_1^2 \}$ Normalized distance from auxiliary transducer to hydrophone
S	Transmitting response to current of a projector
S_1	Transmitting response to current of auxiliary transducer
S_1^*	Apparent transmitting response to current of auxiliary transducer, assuming ideal plane wave measurement conditions
U	Open-circuit voltage at a hydrophone
U_1	Open-circuit voltage for auxiliary transducer
U_{ref}	Reference voltage
v	Velocity of the radiating surface of the transducer
z	Distance along the acoustic axis from the transducer
α'	Amplitude attenuation coefficient for sound in water
λ	Wavelength of sound in water
ρ	Density of water

1. Domaine d'application

La présente norme concerne les hydrophones à éléments sensibles piézoélectriques, conçus pour la mesure des champs ultrasonores pulsés et à ondes entretenues, produits par du matériel médical ultrasonique fonctionnant dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz. Elle vise la conception, le fonctionnement et les spécifications des hydrophone étalons et décrit une méthode normale de mesure de leur sensibilité.

Notes 1. – Ces recommandations ne visent pas les hydrophones conçus spécialement ou exclusivement pour la détection des impulsions et des salves de signaux sinusoïdaux ultrasonores.

2. – Les hydrophones fonctionnant dans la gamme des fréquences de 1 Hz à 1 MHz sont visés par la Publication 500 de la CEI: Hydrophone étalon CEI, et par la Publication 565 de la CEI: Etalonnage des hydrophones.

2. Objet

- 2.1. Définir les caractéristiques de fonctionnement requises des hydrophones devant être utilisés pour des applications précises dans la gamme des fréquences allant de 0,5 MHz à 15 MHz, notamment celles qui sont liées à la mesure des champs ultrasonores, pulsés ou à ondes entretenues, utilisés pour le diagnostic.
- 2.2. Etablir un programme pour la spécification du fonctionnement de ces hydrophones.
- 2.3. Décrire un procédé normalisé d'étalonnage des hydrophones.

3. Définitions

Le cas échéant, les définitions suivantes sont identiques à celles qui sont utilisées dans la Publication 565 de la CEI.

3.1 *Champ libre*

Champ acoustique se développant dans un milieu homogène et isotrope dans lequel les effets des limites sont négligeables (Publication 565 de la CEI, paragraphe 3.1); voir également VEI 801-03-28.

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 (Publication 565 de la CEI, paragraphe 3.2); voir aussi VEI 801-03-30.

Note. – 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.

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 (Publication 565 de la CEI, paragraphe 3.3); voir aussi VEI 801-05 (à l'étude).

3.4 *Hydrophone (ou récepteur)*

Transducteur qui produit un signal électrique sous l'effet de signaux acoustiques transmis dans l'eau (Publication 565 de la CEI, paragraphe 3.4); voir aussi VEI 801-12-26.

1. Scope

This standard relates to hydrophones, employing piezoelectric sensor elements, designed to measure the pulsed and continuous-wave ultrasonic fields generated by ultrasonic medical equipment operating in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz. It covers the design and performance requirements of standard hydrophones and the data required to specify their characteristics, and defines a standard method for the measurement of the sensitivity of such hydrophones.

Notes 1. – These recommendations are not intended to cover hydrophones designed specifically and/or exclusively for the detection of ultrasonic pulses or bursts.

2. – Hydrophones for operation in the frequency range from 1 Hz to 1 MHz are covered by IEC Publication 500: IEC Standard Hydrophone, and IEC Publication 565: Calibration of Hydrophones.

2. Object

- 2.1 To define the performance characteristics that are required of hydrophones intended for use in a specified range of applications over the frequency band from 0.5 MHz to 15 MHz, particularly those associated with the measurement of pulsed and continuous-wave ultrasonic fields used in medical diagnosis.
- 2.2 To establish a scheme for the specification of the performance of these hydrophones.
- 2.3 To describe a standardized procedure for their calibration.

3. Definitions

Where indicated the following definitions are as used in IEC Publication 565.

3.1 *Free field*

A sound field in a homogeneous and isotropic medium in which the effects of boundaries are negligible (IEC Publication 565, Sub-clause 3.1), see also IEC 801-03-28.

3.2 *Far field*

The sound field at a distance from the source where the instantaneous values of the sound pressure and particle velocity are substantially in phase (IEC Publication 565, Sub-clause 3.2), see also IEC 801-03-30.

Note. – 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 the source.

3.3 *Acoustic centre*

The point on or near a transducer from which the spherically divergent sound waves emitted by the transducer and observable at remote points, appear to diverge (IEC Publication 565, Sub-clause 3.3), see also IEC 801-05 (under consideration).

3.4 *Hydrophone (or receiver)*

A transducer that produces electrical signals in response to waterborne acoustic signals (IEC Publication 565, Sub-clause 3.4), see also IEC 801-12-26.

Note. – Les hydrophones utilisés pour mesurer les champs ultrasonores à haute fréquence sont en général constitués d'un petit élément piézoélectrique de faible épaisseur, souvent installé dans la pointe d'une sonde en forme d'aiguille. L'élément actif, en général, n'a pas plus de 1,0 mm de diamètre. C'est ce type d'hydrophone miniature dont il est question dans la présente norme et que le mot «hydrophone», utilisé seul, désigne. S'il est nécessaire de désigner un transducteur de taille plus importante utilisé comme hydrophone, le terme «récepteur» est utilisé.

3.5 *Transducteur réversible*

Transducteur pouvant fonctionner aussi bien comme hydrophone que comme projecteur, ce dernier étant un dispositif qui transforme les signaux électriques en son (Publication 565 de la C E I, paragraphe 3.6); voir également VEI 801-05 (à l'étude).

3.6 *Transducteur réciproque*

Transducteur linéaire, passif et réversible (Publication 565 de la C E I, paragraphe 3.7).

3.7 *Tension en circuit ouvert d'un hydrophone*

Tension apparaissant aux bornes électriques d'un hydrophone non chargé électriquement (Publication 565 de la C E I, paragraphe 3.8).

Symbole: U

Unité: volt, V

Note. – Dans cette norme, tous les courants, tensions et pressions acoustiques sont exprimés en valeurs efficaces, sauf indication contraire.

3.8 *Sensibilité en champ libre d'un hydrophone*

Rapport de la tension en circuit ouvert aux bornes d'un hydrophone, à la pression acoustique dans le champ libre non perturbé d'une onde plane qui existerait à l'emplacement du centre acoustique de l'hydrophone si ce dernier était retiré (Publication 565 de la C E I, paragraphe 3.9).

Symbole: M

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.

3.9 *Niveau de sensibilité en champ libre*

Vingt fois le logarithme à base 10 du rapport de la sensibilité en champ libre M à la sensibilité de référence M_{ref} (Publication 565 de la C E I, paragraphe 3.9.1).

Unité: décibel, dB

Note. – M_{ref} est égal à 1 V/ μ Pa.

3.10 *Réponse à l'émission en courant d'un projecteur*

Pour une fréquence donnée, le rapport de la pression acoustique de l'onde sonore, en un point qui doit être précisé, en l'absence d'effets d'interférence, au courant traversant les bornes électriques.

Symbole: S

Unité: pascal par ampère, Pa/A

Note. – Hydrophones used to measure high frequency ultrasonic fields usually consist of a small, thin piezoelectric element, often mounted on the tip of a needle-like probe. The active element is generally no more than 1.0 mm in diameter. It is this type of miniature hydrophone that is being considered throughout this standard and to which the word “hydrophone”, used alone, will be held to apply. Whenever it is necessary to refer to a larger transducer being used as a hydrophone, the term “receiver” will be used.

3.5 *Reversible transducer*

A transducer capable of acting as a hydrophone and as a projector, the latter being a device which converts electrical signals into sound (I E C Publication 565, Sub-clause 3.6), see also IEV 801-05 (under consideration).

3.6 *Reciprocal transducer*

A linear, passive and reversible transducer (I E C Publication 565, Sub-clause 3.7).

3.7 *Open-circuit voltage at a hydrophone*

The voltage appearing at the electrical terminals of a hydrophone when no current passes through the terminals (I E C Publication 565, Sub-clause 3.8).

Symbol: U

Unit: volt, V

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

3.8 *Free-field sensitivity of a hydrophone*

The ratio of the open-circuit voltage at the output terminals of a hydrophone to the sound pressure in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the acoustic centre of the hydrophone if the hydrophones were removed (I E C Publication 565, Sub-clause 3.9).

Symbol: M

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 should be specified.

3.9 *Free-field sensitivity level*

Twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the free-field sensitivity M to a reference sensitivity M_{ref} (I E C Publication 565, Sub-clause 3.9.1).

Unit: decibel, dB

Note. – M_{ref} is equal to 1 V/μPa.

3.10 *Transmitting response to current of a projector*

At a given frequency, the ratio of the acoustic pressure in the sound wave, at a point to be specified, in the absence of interference effects, to the current flowing through the electrical terminals.

Symbol: S

Unit: pascal per ampere, Pa/A

3.11 Coefficient de réciprocité

Pour un système quelconque dans lequel un transducteur réciproque fonctionne comme projecteur et comme récepteur, le coefficient de réciprocité J est défini comme étant le rapport de la sensibilité en champ libre du transducteur M , à sa réponse à l'émission en courant S .

Quand les ondes acoustiques propagées sont voisines d'ondes planes, le coefficient de réciprocité tend vers $2A/\rho c$; il est alors dénommé «coefficient de réciprocité en onde plane».

Note. – Le coefficient de réciprocité en ondes planes dont il est question ici s'applique à la propagation des ondes planes, comme c'est le cas dans le champ lointain d'un transducteur; mais des conditions parfaites de champ lointain ne sont pas utilisées dans la méthode décrite au paragraphe 7.3.6. Pour contourner cette difficulté, un facteur de correction, décrit au paragraphe 7.2.3, tient compte des écarts par rapport aux conditions idéales de propagation des ondes planes.

Symbole: J

Unité: watt par pascal au carré, W/Pa^2

3.12 Réponse directionnelle d'un hydrophone

Description, généralement sous forme de diagramme, de la réponse d'un hydrophone en fonction de la direction de propagation de l'onde acoustique plane incidente, dans un plan défini passant par le centre acoustique et à une fréquence donnée (Publication 565 de la C E I, paragraphe 3.19).

3.13 Résistance de fuite en bout de câble

Rapport de la tension aux bornes électriques situées à l'extrémité du câble de l'hydrophone, au courant continu traversant ces bornes.

Symbole: R_L

Unité: ohm, Ω

Note. – La valeur de la tension utilisée pour le calcul de R_L devra être précisée.

3.14 Facteur de qualité Q mécanique d'un hydrophone

Le rapport de la fréquence de résonance à la largeur de bande délimitée par les deux fréquences dont l'impédance cinétique de l'hydrophone vaut $1/\sqrt{2}$ fois cette résistance au point de résonance, comme l'indique la figure 1, page 55.

4. Introduction générale

La présente norme traite de la mesure des champs ultrasonores à haute fréquence dans des liquides, notamment de la mesure de la répartition, dans l'espace et dans le temps, de la pression à l'intérieur des champs émis par des transducteurs ultrasonores utilisés à des fins médicales, dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz.

4.1 Choix de la méthode de mesure

Il existe un certain nombre de méthodes physiques bien connues et documentées pour la caractérisation quantitative des champs produits par les transducteurs à haute fréquence utilisés dans le matériel ultrasonore médical. En général, ces méthodes exigent que des mesures soient faites sur des champs ultrasonores émis par des transducteurs dans une cuve d'essai remplie d'eau; elles fournissent les valeurs locales ou moyennes (intégration spatiale) de divers paramètres du

3.11 *Reciprocity coefficient*

For any system in which a reciprocal transducer acts as a projector and receiver, the reciprocity coefficient J is defined as the ratio of the free-field voltage sensitivity of the transducer, M , to its transmitting response to current, S .

Where the transmitted sound waves approximate plane waves, the reciprocity coefficient approaches $2A/\rho c$ and is called the plane wave reciprocity coefficient.

Note. – The plane wave reciprocity coefficient applies to plane wave propagation, as realized in the far field of a transducer, but pure far field conditions are not used in the procedure described in Sub-clause 7.3.6. To cope with this, a correction factor is described in Sub-clause 7.2.3. which includes an allowance for deviations from plane wave conditions.

Symbol: J

Unit: watts per pascal squared, W/Pa^2

3.12 *Directional response of a hydrophone*

A description, generally presented graphically, of the response of a hydrophone, as a function of direction of propagation of the incident plane sound wave, in a specified plane through the acoustic centre and at a specified frequency (IEC Publication 565, Sub-clause 3.19).

3.13 *End-of-cable leakage resistance*

The ratio of the voltage across the electrical terminals at the end of the hydrophone cable to the direct current flowing through these terminals.

Symbol: R_L

Unit: ohm, Ω

Note. – The value of the voltage used during the determination of R_L should be stated.

3.14 *Mechanical Q of hydrophone element*

The ratio of the resonance frequency to the bandwidth between the two frequencies at which the motional impedance of the hydrophone is $1/\sqrt{2}$ times that at resonance, as indicated in Figure 1, page 55.

4. General introduction

This standard is concerned with the measurement of high-frequency ultrasonic fields in liquids, particularly measurement of the spatial and temporal pressure distribution within the fields emitted by medical ultrasonic transducers, covering the frequency range from 0.5 MHz to 15 MHz.

4.1 *Choice of measurement method*

A number of well-known and documented physical methods exist for the quantitative characterization of the fields generated by the high-frequency transducers used in medical ultrasonic equipment. These methods generally require that measurements are carried out on the ultrasonic fields emitted by the transducers into a water-filled test tank, and provide a measure in absolute terms of the local or spatially integrated values of particular parameters of the ultrasonic field

champ ultrasonore (par exemple l'intensité, la vitesse des particules ou l'amplitude de pression). En d'autres termes, elles permettent de faire des mesures en ne prenant pour références que des grandeurs fondamentales universelles tels la masse, le temps, la longueur. Notamment, elles mesurent la force de radiation acoustique, exploitent certains effets acoustico-optiques et utilisent la calorimétrie et les techniques de réciprocité. Pour caractériser parfaitement un champ ultrasonore, les mesures doivent être suffisamment précises, dans l'espace et dans le temps, pour permettre une description détaillée de la structure du champ. Pour les champs comprenant des fréquences jusqu'à 15 MHz, cela exige une résolution de l'ordre de 0,1 mm et 0,06 µs, pour les mesures spatiales et temporelles respectivement.

Voir les références [1] et [2] dans l'annexe E.

4.2 *Fondement des recommandations*

La présente norme recommande que les champs ultrasonores utilisés en médecine soient quantifiés au moyen d'hydrophones qui permettent la mesure de la pression acoustique instantanée en n'importe quel point du champ. De tels hydrophones constituent à l'heure actuelle le moyen le plus commode et le plus souple de mesurer le comportement spatial et temporel des champs ultrasonores et ont une résolution proche de celle qui est nécessaire pour obtenir une caractérisation complète du champ.

4.3 *Effets de la taille réduite des hydrophones*

L'élément actif d'un hydrophone produit une tension entre ses électrodes, proportionnelle à la pression acoustique moyenne sur sa surface. Par conséquent, pour obtenir le maximum de résolution spatiale, il faut que la sonde soit de petite taille par rapport à l'échelle des variations spatiales de la pression et donc, en pratique, de petite taille par rapport à la longueur d'onde de la fréquence la plus élevée contenue dans les champs ultrasonores à mesurer. En outre, la pression acoustique réelle sur la surface sensible de l'hydrophone est conditionnée par la diffraction de l'hydrophone lui-même.

Note. – Si la sonde est conçue de manière à avoir une surface active connue et bien définie, les effets du moyennage pour l'ensemble de la surface de la sonde et de la diffraction peuvent être éliminés des données, pour une longueur d'onde donnée, par déconvolution basée sur les dimensions connues de l'élément actif. La technique de la déconvolution est particulièrement importante à l'extrémité supérieure de la gamme des fréquences envisagée ici, lorsque la longueur d'onde acoustique dans l'eau (0,1 mm à 15 MHz) a toutes les chances d'être plus petite que l'élément de l'hydrophone.

Voir la référence [3] dans l'annexe E.

4.4 *Étalonnage de l'hydrophone*

Pour des applications quantitatives, les hydrophones doivent être étalonnés, soit en mesurant leur tension de sortie lorsqu'ils sont placés dans un champ acoustique connu, soit par la méthode de réciprocité. La méthode d'étalonnage recommandée ici prévoit de placer les hydrophones dans un champ acoustique connu, produit par un transducteur auxiliaire, lui-même étalonné par la méthode de l'«auto-réciprocité».

Voir les références [4], [5], [6] et [7] dans l'annexe E.

5. *Caractéristiques d'un hydrophone*

Un hydrophone se caractérise par sa sensibilité en champ libre et sa réponse directionnelle, ces deux paramètres étant en général variables en fonction de la fréquence. Puisque les hydrophones sont utilisés pour de nombreux types de mesures, il n'est pas nécessaire d'exiger les plus hautes

(e.g. intensity, particle velocity or pressure amplitude). That is to say, these methods permit measurements to be made by reference only to independently established fundamental quantities such as mass, time and length. These methods include the measurement of acoustic radiation force, the use of certain acousto-optical effects, calorimetry and measurement by reciprocity techniques. For the complete characterization of an ultrasonic field, measurements are required with sufficient resolution in both the space and time domains to allow the detailed structure of the field to be recorded. For fields with component frequencies up to 15 MHz, this requires spatial and temporal measurement resolutions of the order of 0.1 mm and 0.06 μ s respectively.

See references [1] and [2] of Appendix E.

4.2 *Basis of recommendations*

This standard recommends that medical ultrasonic fields should be quantified by means of hydrophones which allow the instantaneous acoustic pressure to be measured at any point within the field. Such hydrophones provide the most convenient and versatile method of measuring the spatial and temporal behaviour of ultrasonic fields available at this time, and offer resolutions approaching those required for a complete field determination.

4.3 *Effect of the finite size of hydrophones*

The active element of a hydrophone generates a voltage across its electrodes proportional to the average acoustic pressure over its surface. If full spatial resolution is to be achieved, therefore, it is necessary that the probe be small compared with the scale of spatial variations in pressure, and hence, in practice, small compared with the wavelength of the highest frequency component in the ultrasonic fields to be measured. Furthermore, the actual acoustic pressure on the hydrophone's sensitive surface is influenced by the diffraction of the hydrophone itself.

Note. – If the probe is carefully designed to have a known and well-defined active surface, it may be possible to remove the effects of probe averaging and diffraction from the data, at a given wavelength, by deconvolution based on the known dimensions of the active element. The deconvolution technique is of particular importance at the high end of the frequency range being considered here where the acoustic wavelength in water (0.1 mm at 15 MHz) is most likely to be small compared with the dimensions of the hydrophone element.

See reference [3] of Appendix E.

4.4 *Hydrophone calibration*

For quantitative use, the hydrophones must be calibrated, either by noting their output voltage when they are placed in a known acoustic field, or by the method of reciprocity. The calibration method recommended here is one in which the hydrophones are placed in a known acoustic field produced by an auxiliary transducer, which has itself been calibrated by the method of self-reciprocity.

See references [4], [5], [6] and [7] of Appendix E.

5. *Hydrophone characteristics*

A hydrophone is characterized by its free-field voltage sensitivity and by its directional response, both of which in general will vary with frequency. Since hydrophones are used for many different types of measurement, it is not necessary to demand the highest performance specifi-

performances au niveau de ces deux caractéristiques pour chaque dispositif étalon. Deux classes d'hydrophones, utilisables à des fins de mesures normalisées, seront par conséquent spécifiées, ces classes étant définies en fonction de leurs principales applications.

Classe A

Cette classe comprend les hydrophones étalonnés, de précision, nécessaires pour une caractérisation quantitative complète de champs ultrasonores comprenant des fréquences allant jusqu'à 15 MHz. Ces hydrophones fournissent le moyen de mesurer la pression acoustique instantanée en un point donné, quelles que soient les conditions du champ qu'on puisse trouver à l'intérieur ou à proximité de la zone focale de la plupart des types de transducteurs utilisés en médecine.

Classe B

Cette classe comprend les hydrophones de mesure ordinaires, conçus pour être utilisés lorsque des mesures seulement relatives, plutôt que quantitatives, sont nécessaires, par exemple pour la détermination des caractéristiques spatiales d'un champ.

Pour obtenir une définition et un contrôle adéquats du fonctionnement, la conception électrique et mécanique des hydrophones doit répondre à certaines exigences. Les normes de fonctionnement et de construction applicables aux deux classes sont définies plus loin, sous quatre rubriques.

Note. – La fabrication d'hydrophones conformes aux normes de fonctionnement de la classe A rencontrera probablement, du moins au début, des difficultés considérables. Néanmoins, la fabrication de ces hydrophones est nécessaire et devrait être possible dans un avenir rapproché. Entre-temps, l'indication, par les fabricants d'hydrophones de classe B, des caractéristiques pour lesquelles leurs produits sont conformes à la norme de classe A, pourrait être utile.

5.1 *Sensibilité*

Les hydrophones étalons doivent être conformes aux spécifications suivantes en ce qui concerne la sensibilité en champ libre, *M*:

5.1.1 *Niveau de sensibilité*

Le niveau de sensibilité en champ libre des hydrophones des classes A et B doit permettre la mesure des pressions acoustiques égales ou supérieures à $3 \cdot 10^3$ Pa avec un rapport signal sur bruit d'au moins 6 dB.

Note. – La sensibilité de tension en champ libre est affectée par la dimension des éléments actifs de l'hydrophone, par le modèle et par la longueur du câble de raccordement; enfin, par l'impédance d'entrée de l'électronique connexe.

Voir paragraphe 5.3 et référence [8] dans l'annexe E.

5.1.2 *Linéarité*

Dans la gamme dynamique de $3 \cdot 10^3$ Pa à $3 \cdot 10^5$ Pa, la tension de sortie de l'hydrophone doit être proportionnelle à la pression acoustique en champ libre avec une tolérance de $\pm 10\%$ pour dispositifs des classes A et B. Cette exigence est respectée lorsque, sur un graphique de la tension de sortie en fonction de la pression acoustique en champ libre, la droite qui joint l'origine à la tension correspondant à une pression de $3 \cdot 10^4$ Pa représente les valeurs de la tension à toutes les autres pressions à l'intérieur de la gamme dynamique sans que l'écart par rapport aux valeurs mesurées soit supérieur au pourcentage mentionné (voir figure 2, page 55). Cela doit être valable pour toutes les fréquences contenues dans la largeur de bande annoncée pour cet hydrophone. Si le dispositif maintient sa linéarité, au sens entendu plus haut, pour des pressions supérieures à la limite de $3 \cdot 10^5$ Pa, la limite supérieure réelle de linéarité doit être précisée.

cations in terms of these characteristics for every standard device. Two classes of hydrophones to be used for standardized measurement purposes will therefore be specified, the classes being defined by reference to their principal applications.

Class A

This covers calibrated precision hydrophones, required for the full quantitative characterization of ultrasonic fields with component frequencies up to 15 MHz. They are intended to provide a means of measuring instantaneous acoustic pressure at a point under any field conditions likely to be found at or near the focal zone of most types of medical transducers.

Class B

This covers ordinary measuring hydrophones, intended for use when only relative, rather than quantitative, measurements are required, for example in the determination of the spatial characteristics of a field.

For adequate definition and control of performance, certain requirements must be imposed on both the electrical and mechanical design of hydrophones. The standards of performance and construction required of the two separate classes are defined below, under four headings.

Note. – Considerable difficulty is likely to be encountered, at least initially, in attempting to construct hydrophones to Class A performance standards. Nevertheless, the development of hydrophones to meet this standard is necessary and should be possible within the near future. In the interim period it may be useful if manufacturers of Class B hydrophones identified those characteristics for which their products meet the Class A standard.

5.1 *Sensitivity*

Standard hydrophones shall meet the following specifications in respect of free-field sensitivity, M :

5.1.1 *Sensitivity level*

The free-field voltage sensitivity level of both Class A and Class B hydrophones shall be sufficient to allow acoustic pressures of $3 \cdot 10^3$ Pa and above to be measured with a signal-to-noise ratio of at least 6 dB.

Note. – The free-field voltage sensitivity level is affected by the hydrophone active element dimensions, the type and length of the connection cable employed and associated electronics input impedance.

See Sub-clause 5.3 and reference [8] of Appendix E.

5.1.2 *Linearity*

Within the dynamic range $3 \cdot 10^3$ Pa to $3 \cdot 10^5$ Pa, the output voltage of the hydrophone shall be linear with free-field acoustic pressure within a tolerance of $\pm 10\%$ for both Class A and Class B devices. This condition is satisfied if, on a plot of output voltage against free-field acoustic pressure, the straight line joining the origin to the voltage corresponding to a pressure of $3 \cdot 10^4$ Pa represents values of the voltage at all other pressures within the dynamic range which do not differ from those actually measured by more than the stated percentage. (See Figure 2, page 55.) This shall be the case for any frequency within the bandwidth claimed for the hydrophone. If the device remains linear, in the above sense, for pressures above the limit of $3 \cdot 10^5$ Pa, the actual upper limit of linearity shall be stated.

Note. – La mesure de la pression acoustique au-delà de $3 \cdot 10^5$ Pa peut être influencée par les effets non linéaires du milieu de propagation.

5.1.3 Influence de la fréquence

Le niveau de sensibilité en champ libre doit être constant pour une largeur de bande annoncée d'au moins deux octaves et demie dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz, avec une tolérance de ± 2 dB pour la classe A et de ± 4 dB pour la classe B. En outre, il ne doit pas varier de plus de $\pm 0,5$ dB (classe A) et de ± 1 dB (classe B) à l'intérieur de chaque tranche de fréquences de 100 kHz dans la largeur de bande annoncée.

Notes 1. – Bien qu'un hydrophone de classe A soit nécessaire pour obtenir une caractérisation quantitative complète d'un champ pulsé, des résultats quantitatifs satisfaisants peuvent être obtenus, dans le cas d'un champ d'ondes entretenues, à l'aide d'un hydrophone qui n'est pas conforme aux exigences de classe A en ce qui concerne l'influence de la fréquence, à condition que cet hydrophone soit conforme à toutes les autres exigences de classe A.

2. – En pratique, la présence de fluctuations dans la réponse en fréquence doit faire l'objet d'une analyse spectrale. L'amplitude de toute fluctuation constatée doit ensuite être déterminée au moyen de la méthode d'étalonnage décrite plus haut.

5.1.4 Stabilité thermique

Entre les températures de 16 °C et 30 °C, le niveau de sensibilité d'un hydrophone de classe A ne doit pas s'écarter de plus de ± 1 dB de sa valeur à 23 °C, et entre les températures de 30 °C et 40 °C, il ne doit pas s'écarter de plus de ± 2 dB de cette même valeur.

5.1.5 Stabilité dans le temps

La stabilité dans le temps d'un hydrophone de classe A doit être telle que son niveau de sensibilité ne varie pas plus de ± 2 dB sur une période d'un an, pourvu que l'hydrophone soit utilisé dans des conditions énoncées conformes à celles qui sont précisées dans la présente norme. Il s'ensuit que l'hydrophone doit être réétalonné à des intervalles qui ne dépassent pas un an.

Note. – Une stabilité dans le temps supérieure peut à l'occasion être souhaitable, mais il n'est pas toujours possible, en pratique, de procéder à un étalonnage précis à des intervalles inférieurs à un an.

5.2 Directivité

Les conditions suivantes doivent être réalisées en ce qui concerne la réponse directionnelle d'un hydrophone étalon.

Note. – La sensibilité des hydrophones dont il est question dans la présente norme est en général fortement directive, le maximum de sensibilité se trouvant dans la direction perpendiculaire au plan de la face du transducteur.

5.2.1 Symétrie

La symétrie de la réponse directionnelle d'un hydrophone de classe A ou B, aux limites inférieure et supérieure de sa bande de fréquence annoncée, doit être telle que si un niveau de sensibilité normalisé de -6 dB se rencontre dans une direction quelconque sous-tendant un angle θ par rapport à la direction de la sensibilité maximale (0 dB), le niveau de sensibilité mesuré dans toutes les autres directions sous-tendant le même angle se situe dans la gamme de -6 ± 3 dB.

Note. – Il est normal et admissible de choisir la «direction de sensibilité maximale» de manière à réduire au maximum les variations de la sensibilité dans ce cône de demi-angle θ .

5.2.2 Angle solide effectif

La réponse directionnelle d'un hydrophone de classe A ou de classe B dont la sensibilité est maximale dans la direction perpendiculaire à sa surface sensible doit être telle que, lorsqu'elle est

Note. – Measurements of acoustic pressure in the range above $3 \cdot 10^5$ Pa may be affected by non-linear effects in the propagation medium.

5.1.3 Frequency dependence

The free-field sensitivity level shall be constant, over a stated bandwidth of at least two and a half octaves in the frequency range from 0.5 MHz to 15 MHz, within a tolerance of ± 2 dB for Class A and ± 4 dB for Class B. In addition, it shall not vary by more than ± 0.5 dB (Class A) and ± 1 dB (Class B) within any frequency increment of 100 kHz falling inside the stated bandwidth.

Notes 1. – Although a Class A hydrophone is necessary for the full quantitative characterization of a pulsed field, satisfactory quantitative results may be obtained for a continuous wave field with a hydrophone which fails to meet the Class A requirement on frequency dependence, provided it meets all other Class A requirements.

2. – In practice the presence of fluctuations in frequency response will need to be investigated by a spectral analysis method. The amplitude of any observed fluctuations should then be determined by the above calibration procedure.

5.1.4 Temperature stability

Between the temperature of 16 °C and 30 °C, the sensitivity level of a Class A hydrophone shall deviate by not more than ± 1 dB from the value at 23 °C, and between the temperatures of 30 °C and 40 °C by not more than ± 2 dB from the value at 23 °C.

5.1.5 Temporal stability

The temporal stability of a Class A hydrophone shall be such that its sensitivity level will not vary by more than ± 2 dB over a period of 1 year, provided the hydrophone is used under stated conditions consistent with those listed in this standard. It follows that the hydrophone should be recalibrated at intervals of not greater than 1 year.

Note. – Better temporal stability may sometimes be desirable but it will not always be practicable to carry out accurate calibrations at intervals of less than 1 year.

5.2 Directivity

The following conditions shall be satisfied with respect to the directional response of a standard hydrophone.

Note. – The sensitivity of hydrophones considered in this standard is generally strongly directional with the maximum sensitivity occurring in the direction normal to the plane of the transducer face.

5.2.1 Symmetry

The symmetry of the directional response of a Class A or Class B hydrophone, at both the upper and lower limits of its claimed frequency band, shall be such that if a normalized sensitivity level of -6 dB occurs for some particular direction subtending an angle of θ to the direction of maximum sensitivity (0 dB), then the sensitivity level measured in all other directions subtending the same angle shall be within the range -6 ± 3 dB.

Note. – It is normal and permissible to select the “direction of maximum sensitivity” such as to minimize the sensitivity variations over this cone of half-angle θ .

5.2.2 Effective solid angle

The directional response of a Class A or Class B hydrophone whose sensitivity is a maximum in the direction perpendicular to its sensitive surface shall be such that, when measured at the highest

mesurée à la plus haute fréquence de sa bande de fréquences spécifiées dans un plan contenant la direction de sensibilité maximale, la valeur moyenne des deux angles formés avec la direction de sensibilité maximale et dans lesquels la sensibilité normalisée est de –6 dB ne soit pas inférieure à 15°.

Voir la référence [9] dans l'annexe E.

5.3 Caractéristiques électriques

La sensibilité en champ libre M d'un hydrophone ayant une capacité C entre ses électrodes est réduite à la valeur en bout de câble M_c par la capacité C_c du câble blindé qui relie l'hydrophone à l'amplificateur électronique, de telle sorte que:

$$M_c = \frac{M C}{(C + C_c)}$$

Pour un hydrophone ayant un élément piézoélectrique en céramique, la gamme typique des valeurs de C se situe entre 10 pF et 150 pF, tandis que pour un élément fait de plastique piézoélectrique la gamme des valeurs est de 1 pF à 5 pF. Une valeur typique pour C_c est de $(100 L)$ pF, où L est la longueur du câble en mètres.

De même, la charge présentée par l'impédance d'entrée d'un amplificateur quelconque relié à l'hydrophone diminue la sensibilité utile; pour obtenir des mesures précises, il est nécessaire de préciser les composantes réelles et imaginaires de cette impédance à l'extrémité du câble, et d'en tenir compte. Cette dépendance de la sensibilité utile envers les circuits électroniques reliés au câble est d'une importance particulière pour les hydrophones dans lesquels la capacité est faible par rapport aux capacités d'entrée du câble et de l'amplificateur, par exemple ceux qui utilisent un plastique piézoélectrique comme élément de détection de la pression.

Voir la référence [8] dans l'annexe E.

En outre, aux fréquences supérieures à 10 MHz, le câble n'a pas, en général, une longueur totale négligeable par rapport à la longueur d'onde électrique le traversant. Pour éviter les perturbations provoquées par la transformation de l'impédance électrique à ces hautes fréquences, des câbles courts devraient toujours être utilisés.

Les deux classes d'hydrophones étalons doivent respecter les exigences électriques suivantes:

5.3.1 Longueur du câble de liaison

La longueur du câble reliant l'élément de l'hydrophone au premier étage d'amplification électronique doit être conforme à la spécification du constructeur mais ne doit pas dépasser 1,5 m.

5.3.2 Parties métalliques exposées

Les parties métalliques exposées du boîtier de l'hydrophone et du blindage électrostatique doivent être reliées à la surface métallisée du câble.

5.3.3 Résistance de fuite

La résistance de fuite en bout de câble doit être supérieure à 100 kΩ.

5.4 Caractéristiques mécaniques

Un hydrophone typique utilisé dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz comprend un disque cylindrique fait de matériau piézoélectrique, d'un diamètre inférieur à 1 mm et d'une

frequency of its stated frequency band over a plane containing the direction of maximum sensitivity, the mean value of the two angles with the direction of maximum sensitivity at which the normalized sensitivity is –6 dB shall not be less than 15°.

See reference [9] of Appendix E.

5.3 *Electrical characteristics*

The free-field sensitivity M of a hydrophone with a capacitance C between its electrodes is reduced to the end-of-cable value M_c by the capacitance C_c of the shielded cable connecting the hydrophone to the electronic amplifier, such that:

$$M_c = \frac{M C}{(C + C_c)}$$

A typical range of values for C is 10 pF to 150 pF for a hydrophone with a piezoelectric ceramic element, and 1 pF to 5 pF for one constructed from piezoelectric plastic. A typical value for C_c is (100 L) pF, where L is the length of the cable in metres.

Similarly the load presented by the input impedance of any amplifier connected to the hydrophone will reduce the effective sensitivity, and for precise measurements it will be necessary to specify and allow for the real and imaginary parts of this cable termination impedance. This dependence of effective sensitivity on the electronic circuits connected to the cable is of particular importance for hydrophones in which the capacitance C is small compared with cable and amplifier input capacitances; for example those employing a piezoelectric plastic as the pressure sensing element.

See reference [8] of Appendix E.

Further, at frequencies above 10 MHz the total cable length will not in general be negligibly small compared to the electrical wavelength in that cable. To avoid disturbances due to the transformation of electrical impedance at these high frequencies, short cables should always be used.

Both classes of standard hydrophones shall meet the following electrical requirements:

5.3.1 *Length of connecting cable*

The length of cable connecting the hydrophone element to the first stage of electronic amplification shall be according to the manufacturer's specification but shall not exceed 1.5 m.

5.3.2 *Exposed metal parts*

Exposed metal parts of the hydrophone housing and electrostatic shield shall be connected to the cable screen.

5.3.3 *Leakage resistance*

The end-of-cable leakage resistance shall be greater than 100 kΩ.

5.4 *Mechanical characteristics*

A typical hydrophone for use in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz comprises a cylindrical disk of piezoelectric material with a diameter of less than 1 mm, and thickness of less than

épaisseur inférieure à 0,15 mm. Ce disque est en général suivi d'un morceau de matériau absorbant les ultrasons et est monté sur la pointe d'un tube, d'une tige ou d'un cône étroits, faits de métal ou de plastique.

Les exigences suivantes doivent être respectées par les hydrophones étalons des classes A et B en ce qui concerne la structure mécanique et le fonctionnement.

5.4.1 *Rigidité acoustique*

L'hydrophone doit être acoustiquement rigide par rapport à son milieu (c'est-à-dire que sa compliance élastique ne doit pas être supérieure à celle d'un volume équivalent d'eau) pour constituer un instrument sensible à la pression.

5.4.2 *Mouillage*

La surface de l'hydrophone doit être lisse et non poreuse pour assurer un mouillage complet après immersion; et aucune pellicule ou bulle d'air ne doit être piégée à sa surface.

Note. – Avant d'utiliser un hydrophone à des fins de mesure normalisée, il convient de le nettoyer et de l'immerger dans de l'eau récemment dégazée pendant au moins 10 min, afin d'assurer un mouillage optimal et uniforme de la surface.

5.4.3 *Résistance à la corrosion*

Toutes les parties d'un hydrophone exposées au liquide doivent être faites de matériaux compatibles et résistants à la corrosion. En particulier, l'utilisation de métaux différents dans les parties exposées doit être évitée pour empêcher l'éventualité d'une corrosion galvanique.

5.4.4 *Aire réfléchissante*

L'élément actif et le boîtier d'un hydrophone tendent à réfléchir les ultrasons vers le champ incident. Pour réduire au maximum les effets d'interférence et la distorsion du champ qui en résultent, l'hydrophone doit être construit de telle manière que toutes les surfaces réfléchissant plus de 20% de l'énergie d'une onde plane incidente (se déplaçant dans la direction de la sensibilité maximale de l'hydrophone) *a*) aient des normales formant un angle non inférieur à 20° avec la direction de la sensibilité maximale ou *b*) soient contenues dans un cercle d'un rayon inférieur à 1 mm.

5.4.5 *Réverbérations acoustiques internes*

La structure d'un hydrophone, notamment celle du support acoustique, doit être telle que tout signal (tension) parasite retardé dû aux réverbérations à l'intérieur d'un hydrophone soit à un niveau d'au moins 20 dB inférieur au signal direct produit par une impulsion acoustique incidente comprenant un seul cycle ayant une fréquence se situant à l'intérieur de la gamme de fréquence spécifiée de l'hydrophone.

5.4.6 *Résonance fondamentale de la vibration en épaisseur*

La résonance fondamentale de la vibration en épaisseur d'un élément piézoélectrique monté doit se produire à une fréquence qui dépasse de deux fois la fréquence limite supérieure annoncée de l'hydrophone et doit avoir un facteur de qualité *Q* qui ne soit pas supérieure à 6.

Note. – Cette condition est nécessaire pour éviter la possibilité d'une réponse excessive de l'hydrophone à la fréquence de résonance fondamentale, réponse qui provoquerait une déformation sérieuse de la forme mesurée d'une impulsion ultrasonore contenant une proportion relativement faible de composantes dont les fréquences dépassent la limite supérieure annoncée de l'hydrophone.

0.15 mm. It is in general backed by a piece of sound-absorbing material and mounted on the tip of a thin tube, rod or cone made from metal or plastic.

The following requirements shall be met by a Class A or Class B standard hydrophone with respect to its mechanical construction and performance.

5.4.1 *Acoustic stiffness*

The hydrophone shall be acoustically stiff relative to its environment (i.e., its volume compliance shall not be greater than that of an equivalent volume of water) in order to provide a pressure sensitive instrument.

5.4.2 *Wettability*

A smooth and non-porous hydrophone surface is required to ensure that the device is wetted fully on immersion in water, and that no air film or air bubbles are entrapped on its surface.

Note. – Before a hydrophone is used for standardized measurement purposes, it should be cleaned and immersed in freshly degassed water for at least 10 min, to ensure optimum and consistent wetting of the surface.

5.4.3 *Corrosion resistance*

All parts of the hydrophone exposed to the liquid shall be made from corrosion-compatible and corrosion-resistant materials. In particular, the use of different metals for exposed components shall be avoided to avert the possible occurrence of galvanic corrosion.

5.4.4 *Reflecting area*

The active element and surrounding body of hydrophone will tend to reflect ultrasound back into the incident field. To minimize the resulting field distortion and interference effects, the hydrophone shall be constructed in such a way that all surfaces reflecting more than 20% of the energy in an incident plane wave (travelling in the direction of maximum hydrophone sensitivity) shall *a*) have their normals at an angle of not less than 20° to the direction of maximum sensitivity, or *b*) shall be contained within a circle of radius less than 1 mm.

5.4.5 *Internal acoustic reverberations*

The construction of the hydrophone, in particular that of the acoustic backing, shall be such that any spurious, delayed voltage signals due to reverberations within the hydrophone itself are at a level at least 20 dB lower than the direct signal produced by an incident acoustic pulse consisting of a single cycle having a frequency within the overall frequency range specified for the hydrophone.

5.4.6 *Fundamental thickness mode resonance*

The fundamental thickness mode resonance of the mounted piezoelectric element shall occur at a frequency greater than twice the upper frequency limit claimed for the hydrophone, and shall have a Q factor no greater than 6.

Note. – This condition is required to avoid the possibility of an excessive hydrophone response at the fundamental resonance frequency severely distorting the measured shape of an ultrasonic pulse containing a relatively small proportion of components with frequencies beyond the upper limit claimed for the hydrophone.

6. Spécification du fonctionnement d'un hydrophone

Le constructeur d'un hydrophone étalon de classe A ou de classe B doit fournir les données suivantes sur les caractéristiques de son appareil:

6.1 Sensibilité en champ libre

6.1.1 La bande des fréquences dans laquelle le niveau de sensibilité en champ libre de l'hydrophone est constant à ± 2 dB (classe A) ou ± 4 dB (classe B).

6.1.2 La courbe de la réponse en fréquence de la sensibilité en bout de câble de l'hydrophone, sur l'ensemble de la bande de fréquence annoncée. La sensibilité mentionnée doit être d'une valeur appropriée pour la mesure d'une amplitude de pression acoustique de $3 \cdot 10^4$ Pa. Lorsque la sensibilité est précisée pour diverses fréquences discrètes, ces fréquences doivent être à des intervalles pour lesquels la sensibilité ne varie pas plus de $\pm 1,5$ dB.

6.1.3 Le coefficient de température de la sensibilité en champ libre.

6.2 Directivité

6.2.1 Angle sous-tendu

L'angle moyen sous-tendu entre deux directions situées dans le même plan que la direction de la sensibilité maximale, au-delà desquelles la sensibilité, par rapport à la valeur maximale mesurée à la limite supérieure de la bande de fréquence annoncée, est inférieure à -6 dB.

6.2.2 Déviation de l'axe

La différence angulaire, avec une précision de $\pm 3^\circ$, entre la direction de l'axe géométrique de l'hydrophone et la direction de sa sensibilité maximale.

Note. – La réponse directionnelle d'un hydrophone peut être déterminée de la façon suivante:

L'hydrophone à l'essai est placé dans le champ lointain d'un transducteur ultrasonore et tourné autour d'un axe qui passe au travers de l'élément actif et est perpendiculaire à la direction de la sensibilité maximale. La tension de sortie de l'hydrophone est mesurée en fonction de l'angle de rotation.

6.3 Aspects électriques

6.3.1 La valeur calculée de la capacité de l'élément sensible à une température située entre 16°C et 40°C .

6.3.2 Les liaisons par câble, sous forme de diagrammes.

6.3.3 La capacité en bout de câble.

6.3.4 La résistance de fuite en bout de câble.

6.3.5 Les limites de l'excitation électrique qui peut être appliquée à un hydrophone s'il est utilisé comme projecteur, y compris la tension maximale crête à crête et le rapport cyclique.

6.4 Aspects mécaniques et milieu

6.4.1 Le matériau de l'élément sensible.

6.4.2 Les principales dimensions de l'élément sensible et de l'hydrophone.

6.4.3 La fréquence de la résonance fondamentale de la vibration en épaisseur de l'élément sensible monté.

6.4.4 Les types de matériaux exposés (par exemple métal, caoutchouc, résine de coulage, etc.).

6. Specification of performance of a hydrophone

The manufacturer of a standard Class A or Class B hydrophone shall give the following data on its characteristics:

6.1 *Free-field voltage sensitivity*

6.1.1 Frequency band over which the hydrophone's free-field sensitivity level is constant within ± 2 dB (Class A) or ± 4 dB (Class B).

6.1.2 Frequency response curve of the hydrophone's end-of-cable sensitivity over the stated frequency band. The sensitivity quoted shall be that appropriate to measurements of an acoustic pressure amplitude of $3 \cdot 10^4$ Pa. Where the sensitivity is defined at discrete frequency points, these shall be at intervals over which the sensitivity does not vary by more than ± 1.5 dB.

6.1.3 Temperature coefficient of free-field voltage sensitivity.

6.2 *Directivity*

6.2.1 *Subtended angle*

The mean angle subtended between two directions, coplanar with the direction of maximum sensitivity, beyond which the sensitivity relative to the maximum value measured at the upper limit of the stated frequency band is less than -6 dB.

6.2.2 *Deviation of axis*

The angular difference, to an accuracy of $\pm 3^\circ$, between the direction of the geometrical axis of the hydrophone and its direction of maximum sensitivity.

Note. – The directional response of a hydrophone can be determined in the following way:

The hydrophone under test is placed in the far field of an ultrasonic transducer and rotated around an axis which goes through the active element and is perpendicular to the direction of maximum sensitivity. The output voltage of the hydrophone is measured as a function of the rotation angle.

6.3 *Electrical aspects*

6.3.1 The calculated value of capacitance of the sensor element at a temperature between 16°C and 40°C .

6.3.2 Cable connections in diagrammatic form.

6.3.3 End-of-cable capacitance.

6.3.4 End-of-cable leakage resistance.

6.3.5 Limitations on the electrical excitation which may be applied to the hydrophone if it is used as a projector, including maximum peak-to-peak voltage and duty cycle.

6.4 *Mechanical and environmental aspects*

6.4.1 The material of the sensor element.

6.4.2 The principal dimensions of the sensor element and of the hydrophone.

6.4.3 Frequency of the fundamental thickness mode resonance of the mounted hydrophone element.

6.4.4 Types of exposed materials (e.g. metal, rubber, casting resin, etc.).

- 6.4.5 La durée de l'immersion dans l'eau (à 37 °C) pendant laquelle aucune détérioration significative du fonctionnement n'est constatée.
- 6.4.6 Les limitations en ce qui concerne les matériaux non compatibles (par exemple liquides, solutés).
- 6.4.7 Les limitations en ce qui concerne les contraintes mécaniques, notamment celles qui s'appliquent à la conception de méthodes de montage appropriées pour un hydrophone.

7. Etalonnage d'un hydrophone

Il est recommandé que les hydrophones étalons devant être utilisés dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz soient étalonnés au moyen d'un transducteur auxiliaire qui a lui-même été étalonné au moyen d'une technique d'autoréciprocité. Cette méthode offre une précision correspondant au niveau de fonctionnement exigé de l'hydrophone, tout en ne nécessitant qu'un minimum de matériel spécialisé (voir annexe A).

7.1 Techniques de réciprocité

Pour un transducteur électroacoustique linéaire, passif et réversible, il existe un lien bien défini entre la sensibilité en champ libre M comme détecteur et sa réponse à l'émission en courant S . Ce lien est exprimé, pour une disposition particulière des composantes d'un système de transducteurs, par la définition du coefficient de réciprocité J (voir annexe B).

Tous les étalonnages fondés sur le principe de la réciprocité exigent l'emploi d'un transducteur réciproque comme émetteur et comme récepteur. A condition que les changements qui interviennent dans le champ acoustique entre l'émission et la réception soient connus, la réponse à l'émission et la sensibilité en réception du transducteur peuvent être déterminées directement en mesurant le courant d'excitation et la tension du signal reçu. Cette méthode présente un avantage évident: les paramètres acoustiques nécessaires sont déterminés par la mesure de grandeurs électriques seulement.

7.1.1 Méthode d'étalonnage par réciprocité à trois transducteurs

Les étalonnages fondés sur le principe de la réciprocité peuvent, dans la pratique, prendre plusieurs formes. Une méthode couramment utilisée dans les applications maritimes prévoit l'utilisation de trois transducteurs (voir Publication 565 de la CEI).

Cette méthode peut cependant être difficile à mettre en pratique aux fréquences élevées par suite de la nécessité d'une précision supérieure dans le réglage de la position et de l'orientation du transducteur, et par suite de la complexité des caractéristiques de la réponse directionnelle des transducteurs utilisés à des fréquences de quelques mégahertz.

7.1.2 Autoréciprocité

L'étalonnage par autoréciprocité, qui n'utilise que le transducteur à l'essai et un réflecteur, exige la réalisation d'un minimum de réglages géométriques. Cependant cette technique n'est pas généralement applicable aux hydrophones à haute fréquence qui, par suite de leur taille, ont une puissance acoustique de sortie insuffisante pour obtenir un rapport signal sur bruit adéquat dans le signal reçu (le diamètre minimal pour un projecteur pratique est d'environ 2 mm).

7.1.3 Méthode à deux transducteurs

Il est par conséquent recommandé que les hydrophones soient étalonnés à l'aide de la méthode à deux transducteurs, dans laquelle un hydrophone est étalonné dans le champ connu provenant d'un transducteur auxiliaire, champ qui a été quantifié auparavant par des procédés d'auto-

- 6.4.5 Maximum duration of water immersion (at 37 °C) for which no significant deterioration of performance occurs.
- 6.4.6 Limitations in respect of incompatible materials (e.g. liquids, solutes).
- 6.4.7 Limitations in respect of mechanical stress, particularly those relevant to the design of suitable mounting arrangements for the hydrophone.

7. Hydrophone calibration

It is recommended that standard hydrophones for use in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz be calibrated by means of an auxiliary transducer that has itself been calibrated by means of a self-reciprocity technique. This method offers an accuracy consistent with the required hydrophone performance, while requiring a minimum amount of specialized equipment (see Appendix A).

7.1 *Reciprocity techniques*

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

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

7.1.1 *Three-transducer reciprocity method*

Calibrations based on the principle of reciprocity can in practice take several forms. A procedure commonly used for applications in marine acoustics involves the use of three transducers (see IEC Publication 565).

This method can be difficult to implement at higher frequencies, however, because of the need for greater accuracy in the adjustment of transducer position and orientation, and because of the complex nature of the directional response characteristics of transducers used at frequencies of a few megahertz.

7.1.2 *Self-reciprocity*

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

7.1.3 *Two-transducer method*

It is therefore recommended that standard hydrophones be calibrated by the two-transducer method in which the hydrophone is calibrated in the known field from an auxiliary transducer; a field which has been quantified previously by self-reciprocity procedures. This technique is

réciprocité. Cette technique peut fournir des données d'étalonnage dont la précision est conforme aux spécifications de fonctionnement fixées pour l'hydrophone étalon, mais n'exige pas de réglages aussi critiques des positions et des orientations des éléments que la méthode à trois transducteurs.

Note. – Les techniques d'étalonnage décrites ici utilisent des salves de signaux sinusoïdaux de fréquence unique, essentiellement. Les données d'étalonnage obtenues ne concernent par conséquent que cette seule fréquence, et une courbe de réponse en fréquence complète doit être obtenue point par point.

7.2 Principe de la méthode à deux transducteurs

La méthode d'étalonnage recommandée est fondée sur les principes suivants:

7.2.1 Réponse à l'émission en courant, par autorécaprocité

Un transducteur plan réciproque (les paramètres qui le concernent seront signalés par le suffixe 1) est d'abord étalonné au moyen de la méthode par autorécaprocité (voir annexe B). Sa réponse apparente à l'émission en courant dans des conditions présumées idéales de mesure d'une onde plane, S_1^* , est obtenue en mesurant le courant d'excitation I_1 et la tension du signal reçu, U_1 , au moyen de la relation suivante (équation 7 de l'annexe B):

$$S_1^* = \frac{p_1}{I_1} = \left(\frac{U_1}{I_1 J_p} \right)^{1/2} \quad (1)$$

et

$$J_p = \frac{2 A_1}{\rho c}$$

où:

p_1 est la pression acoustique dans l'onde plane émise par le transducteur 1

J_p est le coefficient de récaprocité pour les ondes planes

A_1 est l'aire utile de la surface du transducteur 1

ρ est la masse volumique du milieu de propagation (l'eau)

c est la vitesse du son dans ce milieu

La pression acoustique dans le champ d'une onde plane émise par le transducteur 1 est donc connue comme fonction du courant d'excitation.

7.2.2 Sensibilité en tension en champ libre, par substitution

L'hydrophone à étalonner est immergé dans le champ acoustique connu produit par le transducteur 1, et sa tension de sortie en circuit ouvert U est déterminée. La sensibilité apparente en tension en champ libre, dans des conditions présumées idéales de mesure des ondes planes, M^* , est ensuite donné par:

$$M^* = \frac{U}{p_1} = \frac{U}{I_1} \left(\frac{I_1 J_p}{U_1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

7.2.3 Correction pour des conditions d'ondes non planes

Il n'est pas, en général, possible de créer des conditions de récaprocité pour les ondes planes (ou sphériques), aux fréquences ultrasonores dont il est question ici, par suite de la grande taille des transducteurs disponibles par rapport aux longueurs d'ondes des ondes acoustiques, et par suite de l'absorption acoustique relativement élevée dans l'eau à ces fréquences. En pratique, on utilise des conditions intermédiaires et on tient compte des changements qui dépendent de la fréquence,

capable of providing calibration data of an accuracy consistent with the performance specifications laid down for the standard hydrophone, but does not involve such critical adjustment of component positions and orientations as the three-transducer method.

Note. – The calibration techniques described here use tone bursts of radiation of essentially one frequency. The calibration data yielded, therefore, relate only to that one frequency, and a full frequency response curve must be obtained point by point.

7.2 Principle of the two-transducer reciprocity method

The recommended calibration procedure is based on the following principles:

7.2.1 Transmitting current response by self-reciprocity

A plane, reciprocal transducer (parameters relating to which will be identified by the suffix 1) is first calibrated by the self-reciprocity method (see Appendix B). Its apparent transmitting current response assuming ideal plane wave measurement conditions, S_1^* , is determined by measuring the current, I_1 , and the received signal voltage, U_1 , by means of the following relationship (Equation 7 of Appendix B):

$$S_1^* = \frac{p_1}{I_1} = \left(\frac{U_1}{I_1 J_p} \right)^{1/2} \quad (1)$$

and

$$J_p = \frac{2 A_1}{\rho c}$$

where:

- p_1 is the acoustic pressure in the plane wave emitted by transducer 1
- J_p is the reciprocity coefficient for plane waves
- A_1 is the effective area of the surface of transducer 1
- ρ is the density of the propagation medium (water)
- c is the speed of sound in the propagation medium

The acoustic pressure in the plane wave field transmitted by transducer 1 is then known as a function of the current.

7.2.2 Free-field voltage sensitivity by substitution

The hydrophone to be calibrated is immersed in the known sound field generated by transducer 1, and its output open-circuit voltage U determined. The apparent free-field voltage sensitivity, assuming ideal plane wave measurement conditions, M^* , is then given by:

$$M^* = \frac{U}{p_1} = \frac{U}{I_1} \left(\frac{I_1 J_p}{U_1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

7.2.3 Correction for non-plane wave conditions

It is not generally possible to realize either plane (or spherical) wave reciprocity conditions at the ultrasonic frequencies being considered here, because of the size of available, practical transducers compared with the wavelengths of the acoustic waves, and because of the relatively high acoustic absorption in water at these frequencies. In practice, an intermediate condition is used and allowance made for the frequency-dependent changes, such as diffraction and attenuation, which

comme la diffraction et l'affaiblissement, qui influent sur l'onde acoustique pendant sa propagation entre le projecteur et le récepteur. Cette prise en considération prend la forme d'un facteur de correction, k , appliqué pendant le calcul des résultats d'étalonnage, de sorte que $M = M^*k$. Ce facteur de correction est fondé essentiellement sur le modèle théorique de la distribution de la pression dans le champ émis par une source plane, circulaire, se comportant comme un piston, dans lequel la vitesse à tout moment est identique sur tous les points de la surface rayonnante (voir annexe D).

Note. – La théorie de la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs a été décrite en détail (voir la référence [11] dans l'annexe E).

7.3 Conditions des mesures pour l'étalonnage

7.3.1 Disposition générale de l'expérience

La figure 3, page 56, montre la disposition expérimentale nécessaire pour cette forme d'étalonnage et la figure 4, page 57, montre les circuits électriques connexes dans leur forme la plus simple. Le transducteur auxiliaire 1 émet des salves répétées de signaux sinusoïdaux d'entre 10 et 20 cycles dans une cuve d'eau, où elles sont réfléchies par un réflecteur épais d'acier inoxydable. Pour l'étalonnage par autorécaprocité du transducteur auxiliaire, ce dernier est positionné de telle façon que l'axe du faisceau ultrasonore émis soit perpendiculaire à la surface réfléchissante; pour la deuxième étape, l'étalonnage de l'hydrophone, le réflecteur est incliné de manière à placer l'hydrophone au centre du champ acoustique réfléchi. Le transducteur et l'hydrophone devraient être disposés de telle manière que l'angle de réflexion utilisé lors de la deuxième étape soit inférieur à 10° , pour éviter un écart important entre la valeur mesurée du coefficient de réflexion et sa valeur sous incidence normale.

7.3.2 Le transducteur auxiliaire

Le transducteur auxiliaire devrait avoir une face active plane et circulaire d'un diamètre d'au moins dix fois la longueur d'onde du son dans l'eau à la fréquence pour laquelle il doit être utilisé, et être conforme aux exigences établies au paragraphe 7.3.4 concernant son utilité pour l'étalonnage par réciprocité. En outre le transducteur doit normalement être choisi en fonction de son aptitude à émettre un champ qui soit le plus conforme possible aux prévisions théoriques concernant une source plane se déplaçant comme un piston.

Note. – Lorsqu'il s'agit de choisir des transducteurs auxiliaires appropriés, il est recommandé que la valeur expérimentalement établie du rayon utile, a_1 (voir paragraphe 7.3.3), ne s'écarte pas du rayon réel (physique) de l'élément actif d'un transducteur quelconque de plus de +2% à -5%.

Bien qu'un transducteur auxiliaire soit capable de fonctionner de façon satisfaisante dans une gamme de fréquences limitée, un ensemble de plusieurs transducteurs est en général nécessaire pour couvrir la totalité de la largeur de bande d'étalonnage.

7.3.3 Rayon utile du transducteur auxiliaire

Le rayon utile du transducteur auxiliaire, a_1 , est le rayon de la source équivalente fonctionnant comme un piston, pour laquelle la distribution dans l'espace de l'amplitude de la pression acoustique dans le champ lointain est la plus proche de celle du transducteur lui-même. Le rayon utile est obtenu à l'aide d'une courbe donnant l'amplitude de la pression acoustique en fonction de la position le long de l'axe du faisceau, cette courbe étant constituée au moyen d'un hydrophone (les détails concernant la méthode expérimentale recommandée pour la détermination du rayon utile sont fournis dans l'annexe C).

affect the acoustic wave during its propagation between projector and receiver. This allowance takes the form of a correction factor, k , applied during the calculation of the calibration results, where $M = M^*k$. The correction factor is based largely on the theoretical model of the pressure distribution in the field emitted by a plane, circular piston-like source, in which the velocity at any time is identical at all points on the radiating surface (see Appendix D).

Note. – The theory of the two-transducer reciprocity method has been described in detail in reference [11] of Appendix E.

7.3 Calibration measurement conditions

7.3.1 Overall experimental arrangement

Figure 3, page 56, illustrates the experimental arrangement required for this form of calibration, and Figure 4, page 57, shows the associated electrical circuits in their simplest form. The auxiliary transducer 1 radiates repetitive tone bursts of between 10 and 20 cycles into a water tank, where they are reflected by a thick stainless steel reflector. For the self-reciprocity calibration of the auxiliary transducer, the transducer is adjusted to a position in which the axis of the emitted ultrasonic beam is perpendicular to the reflecting surface; and for the second stage, the calibration of the hydrophone, the reflector is inclined so as to bring the hydrophone into the centre of the reflected acoustic field. The transducer and hydrophone should be arranged so that the angle of reflection used in the second stage is less than 10° to avoid significant departure in the value of the reflection coefficient from that at normal incidence.

7.3.2 The auxiliary transducer

The auxiliary transducer should have a plane, circular active face of diameter at least ten times the wavelength of sound in water at the frequency for which the transducer will be used, and should satisfy the conditions laid down in Sub-clause 7.3.4 as to its suitability for use in reciprocity calibration procedures. Furthermore, the transducer should be chosen for its ability to radiate a field which conforms closely with that predicted theoretically for a plane, piston-like source.

Note. – As a guide to the selection of suitable auxiliary transducers, it is recommended that the experimentally determined value of effective radius, a_1 (see Sub-clause 7.3.3), should not differ from the true, physical radius of the active element of any chosen transducer by more than +2% to –5%.

Although one auxiliary transducer may be capable of satisfactory operation over a limited range of frequencies, a set of transducers will in general be required to cover the full calibration bandwidth.

7.3.3 The effective radius of the auxiliary transducer

The effective radius of the auxiliary transducer, a_1 , is the radius of the equivalent piston-like source for which the spatial distribution of acoustic pressure amplitude in the far field most closely resembles that from the transducer itself. The effective radius is determined from a plot of acoustic pressure amplitude as a function of position along the beam axis, obtained by means of a hydrophone (details of the experimental method recommended for the determination of the effective radius are covered in Appendix C).

7.3.4 Contrôle de l'utilité d'un transducteur dans les méthodes exploitant la réciprocité

En pratique, il suffit de contrôler la convenance de certains transducteurs aux méthodes d'étalonnage par réciprocité, de la façon suivante. Les transducteurs sont contrôlés par paires, l'un étant utilisé comme projecteur et l'autre comme récepteur. Le rapport entre la tension de sortie en circuit ouvert du récepteur et le courant d'entrée d'un projecteur est comparé au même rapport lorsque les fonctions de projection et de réception sont inversées, sans changer la position des transducteurs. L'écart entre les deux valeurs ne doit pas dépasser 10%; dans le cas contraire, au moins un des transducteurs ne fonctionne pas de façon satisfaisante. La comparaison des deux transducteurs utilisés avec un troisième transducteur réversible révèle en général lequel est défectueux.

Note. – Si les transducteurs sont de constitution identique, ils peuvent être linéaires ou non linéaires au même degré et pourtant paraître réciproques d'après les essais décrits plus haut. Par conséquent, ces essais doivent être réalisés en utilisant plusieurs types différents comme deuxième transducteur avant que le premier soit considéré convenable à des fins d'étalonnage par réciprocité. Voir la référence [7] dans l'annexe E.

7.3.5 Le réflecteur

Le réflecteur doit comprendre un disque d'acier inoxydable de diamètre suffisamment important pour contenir la totalité du faisceau ultrasonore provenant d'un transducteur auxiliaire quelconque à une distance, mesurée de la surface du transducteur, d'au moins 1,5 fois la distance du champ proche, donnée par $N_1 = a_1^2/\lambda$, où a_1 est le rayon utile du transducteur et λ la longueur d'onde acoustique dans l'eau à la fréquence de fonctionnement. L'épaisseur du réflecteur doit être telle que la première réflexion de la surface arrière ne crée pas d'interférence avec celle qui arrive directement de la surface avant, lorsque la fréquence de la salve de signaux sinusoïdaux est la plus basse utilisable. Le réflecteur doit également être plat à $\pm 10 \mu\text{m}$, sa surface étant polie avec une tolérance de $\pm 5 \mu\text{m}$.

7.3.6 Parcours acoustique

Pendant l'étalonnage, il est recommandé que la longueur totale (aller et retour) du parcours acoustique entre le transducteur et le réflecteur ($2d$ dans la figure 3, page 56) et entre le transducteur et l'hydrophone ($d + d_1$), soit d'entre 1,5 et 3 fois la distance du champ proche N_1 pour le transducteur auxiliaire utilisé.

Note. – Une longueur de parcours totale d'entre $1,5 N_1$ et $3 N_1$ est considérée comme très commode pour la détermination du facteur de correction (voir paragraphe 7.2.3). L'utilisation de distances de mesure supérieures, surtout aux fréquences supérieures à 5 MHz, nécessiterait l'application d'une correction importante aux résultats obtenus, pour tenir compte de l'affaiblissement dans le liquide de propagation, et les mesures effectuées en deçà de la distance du champ proche ont une incertitude considérable du fait de la complexité des interférences dans le champ acoustique.

7.3.7 La cuve d'essai

La cuve d'essai doit être suffisamment grande pour que la distance entre le transducteur auxiliaire et le réflecteur puisse être fixée à une valeur égale à au moins 1,5 fois la distance du champ proche pour n'importe lequel des transducteurs envisagés. Les parois de la cuve et la surface de l'eau doivent se trouver à une distance suffisante du transducteur et de l'hydrophone pour assurer que tout signal résultant de réflexions sur ces surfaces soit retardé, par rapport au signal principal direct, d'au moins l'équivalent de la durée de la salve de signaux sinusoïdaux ayant la plus basse fréquence utilisée. En outre, si possible, ces surfaces doivent être recouvertes de matériaux insonorisants tels le caoutchouc ou un tapis de laine à poils serrés, et disposées à un angle d'au moins 10° par rapport au plan du réflecteur proprement dit.

7.3.4 *Checking the suitability of a transducer for use in reciprocity procedures*

In practice, it is sufficient to check the applicability of particular transducers to reciprocity calibration procedures as follows. The transducers are checked in pairs, one being used as a projector and the other as a receiver. A comparison is made between the ratios of the open-circuit output voltage of the receiver to the input current of the projector when the functions of the projector and receiver are interchanged without changing their positions. These two values should not differ by more than 10%. If the difference is larger, at least one of the transducers is not performing satisfactorily. Comparison of both transducers with a third reversible transducer will in general reveal which one is at fault.

Note. – If the transducers are identical in construction they can be linear or non-linear to the same extent and yet seem reciprocal by the tests outlined above. Therefore these tests should be performed using several different types for the second transducer before the first can be assumed to be suitable for use in reciprocity calibration procedures. See reference [7] of Appendix E.

7.3.5 *The reflector*

The reflector should comprise a stainless steel disk of sufficient diameter to encompass the entire ultrasonic beam from any of the auxiliary transducers at a distance from its surface of at least 1.5 times the near-field distance, given by $N_1 = a_1^2/\lambda$, where a_1 is the effective radius of the transducer, and λ the acoustic wavelength in water at its frequency of operation. The thickness of the reflector should be such that the first reflection from the rear surface will not interfere with that directly from the front surface for the lowest frequency tone burst to be used. The reflector should also be flat to $\pm 10\ \mu\text{m}$, with a surface finish good to $\pm 5\ \mu\text{m}$.

7.3.6 *Sound path*

During the calibration procedures, it is recommended that the total length of the sound path from the transducer back to the transducer via the reflector ($2d$ in Figure 3, page 56), and from the transducer to the hydrophone ($d + d_1$), should lie between 1.5 and 3 times the near-field distance N_1 for the particular auxiliary transducer in use.

Note. – A total path length of between $1.5 N_1$ and $3 N_1$ is found to be most convenient for the determination of the correction factor (see Sub-clause 7.2.3). The use of larger measuring distances, particularly at frequencies above 5 MHz, would require a significant correction to be applied to the results obtained to take account of attenuation in the propagation liquid, and measurements carried out within the near-field distance are subject to considerable uncertainty arising from complicated interference structure in the sound field.

7.3.7 *The test tank*

The test tank should be sufficiently large to allow the distance between the auxiliary transducer and the reflector to be set at a value equal to at least 1.5 times the near-field distance for any of the transducers to be used. The walls of the tank and water surface should be at a sufficient distance from the transducer and hydrophone to ensure that any signal resulting from reflections at these surfaces will be delayed with respect to the principal, direct signal by a time at least equivalent to the duration of the lowest frequency tone burst to be used. Furthermore, where possible, such surfaces should be lined with acoustically absorbent materials such as rubber or thick-pile, woollen carpet, and set at an angle of at least 10° to the plane of the reflector itself.

La cuve doit être remplie d'une eau récemment distillée ou dégazée qui, à cause de l'absorption continue d'air de l'atmosphère, doit être remplacée à des intervalles ne dépassant pas 48 h.

Note. – L'eau peut être dégazée par exposition à l'air à une pression réduite à 2 000 Pa maximum, ou par chauffage à environ 80°C pendant 1 h.

7.3.8 Alignement

Le positionnement et l'orientation précis du transducteur, de l'hydrophone et du réflecteur sont essentiels; par conséquent, ces éléments devraient être montés sur des supports stables et rigides permettant de faire les réglages nécessaires. Il est recommandé que l'hydrophone et le transducteur soient dotés d'un mécanisme permettant de fixer leurs positions latérales avec une précision de $\pm 0,1$ mm, et que le réglage indépendant de leur orientation autour de leur centre acoustique soit possible avec une précision de $\pm 0,05^\circ$ ou mieux. Le réflecteur doit pouvoir tourner dans un angle d'environ 10° autour d'un axe parallèle à sa surface et perpendiculaire à la ligne joignant les centres acoustiques de l'hydrophone et du transducteur auxiliaire (voir figure 3, page 56).

7.4 Méthode expérimentale

7.4.1 Mesure des grandeurs électriques nécessaires

Pour éviter l'emploi de voltmètres ou d'ampèremètres étalonnés, qui ne peuvent en général être utilisés directement pour la mesure des salves de signaux sinusoïdaux, il est recommandé que I_1 , U_1 et U soient mesurés par rapport à une tension de référence U_{ref} et une résistance connue R_0 , au moyen d'un atténuateur de haute précision ayant une impédance de sortie égale à R_0 . On a alors:

$$U_1 = a_{u1} U_{\text{ref}} \quad (3a)$$

$$U = a_u U_{\text{ref}} \quad (3b)$$

$$I_1 = \frac{a_{I1} U_{\text{ref}}}{R_0} \quad (3c)$$

où:

a_{u1} , a_u et a_{I1} sont les constantes de proportionnalité

La substitution de (3) en (2) donne:

$$M^* = \frac{a_u}{a_{I1}} \left(\frac{R_0 a_{I1} J_p}{a_{u1}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

de sorte que la valeur absolue de la sensibilité en champ libre de l'hydrophone peut être déterminée sans connaître U_{ref} , pourvu que U_{ref} reste constant pendant la période de mesure, et pourvu que la valeur absolue de R_0 soit connue. Il est recommandé que la valeur de R_0 soit connue avec une précision de $\pm 1\%$ pour toute la gamme des fréquences auxquelles elle doit être utilisée.

Les détails concernant les méthodes expérimentales recommandées pour la détermination de a_{u1} , a_u et a_{I1} sont fournis dans l'annexe C.

7.5 Calcul des résultats

7.5.1 Le facteur de correction k

Pour calculer les résultats des mesures d'étalonnage, il faut tenir compte de toutes les différences entre les conditions limites présumées idéales lors de la dérivation de l'équation (4) et celles qui existent en pratique. Comme cela est décrit au paragraphe 7.2.3, ce résultat peut être obtenu en introduisant un facteur de correction k , la sensibilité réelle en champ libre de l'hydrophone étant alors donnée par M^*k .

The tank should be filled with freshly distilled or degassed water which, because of the continuous absorption of air from the atmosphere, should be replaced at intervals not exceeding 48 h.

Note. – Water may be degassed by exposure to an atmosphere of air at a pressure reduced to no more than 2 000 Pa, or by heating to approximately 80°C for 1 h.

7.3.8 Alignment

Precise positioning and orientation of the transducer, hydrophone and reflector are required and these components, therefore, should be mounted in stable, rigid supports which allow the appropriate adjustments to be made. It is recommended that the hydrophone and transducer be equipped with a means of setting their lateral positions to an accuracy of ± 0.1 mm, and that independent adjustment of their orientations about their acoustic centres be possible to an accuracy of $\pm 0.05^\circ$ or better. The reflector is required to rotate through an angle of approximately 10° about an axis parallel to its surface and perpendicular to the line joining the acoustic centres of the hydrophones and auxiliary transducer (see Figure 3, page 56).

7.4 Experimental method

7.4.1 Measurement of the required electrical quantities

To avoid the use of calibrated voltage and current meters, which cannot in general be applied directly to the measurement of tone burst signals, it is recommended that I_1 , U_1 and U are measured in terms of a reference voltage, U_{ref} , and a known resistance, R_0 , by means of a precision attenuator of output impedance equal to R_0 . Then:

$$U_1 = a_{u1} U_{\text{ref}} \quad (3a)$$

$$U = a_u U_{\text{ref}} \quad (3b)$$

$$I_1 = \frac{a_{I1} U_{\text{ref}}}{R_0} \quad (3c)$$

where:

a_{u1} , a_u and a_{I1} are the proportionality constants

Substitution of (3) in (2) yields:

$$M^* = \frac{a_u}{a_{I1}} \left(\frac{R_0 a_{I1} J_p}{a_{u1}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

so that the absolute value of the free-field sensitivity of the hydrophone can be determined without a knowledge of U_{ref} , provided U_{ref} remains constant during the period of the measurement, and provided the absolute value of R_0 is known. It is recommended that the value of R_0 should be known to $\pm 1\%$ over the frequency range for which it is to be used.

Details of the experimental procedures recommended for the determination of a_{u1} , a_u and a_{I1} are given in Appendix C.

7.5 Calculation of results

7.5.1 The correction factor, k

In calculating the results of the calibration measurements, allowance must be made for any differences between the ideal boundary conditions assumed in the derivation of equation (4) and those used in practice. As described in Sub-clause 7.2.3, this may be achieved by the introduction of a correction factor, k , where the true free-field sensitivity of the hydrophone is given by M^*k .

Le facteur de correction fait l'objet d'une analyse exhaustive dans l'annexe D. Cependant, pour certaines conditions particulières, conformes aux méthodes d'étalonnage recommandées dans la présente norme, une simplification importante peut être réalisée. Ces conditions sont les suivantes:

- a) le rapport du diamètre du transducteur auxiliaire à celui de l'hydrophone doit être supérieur à 5, et
- b) toutes les mesures doivent être faites à des longueurs de parcours acoustique situées entre 1,5 et 3 fois la distance du champ proche du transducteur auxiliaire.

En définissant une distance normalisée, s , comme étant le quotient de la longueur du parcours acoustique entre le transducteur auxiliaire et l'hydrophone, par la distance du champ proche, la condition b) peut être résumée comme suit:

$$1,5 < \frac{2d_1\lambda}{a_1^2} < 3$$

et

$$1,5 < s < 3$$

$$\text{où: } s = (d_1 + d) \lambda / a_1^2$$

Dans ces conditions, k peut être déterminé à partir de l'expression:

$$k = G_c \frac{k_{u1}^{1/2}}{k_u} \cdot e^{\alpha' d}$$

où:

G_c (fonction de s seulement) tient compte des changements provoqués dans le signal reçu par les effets de diffraction survenant au cours de la propagation des ultrasons sous forme de faisceau plutôt que sous forme d'onde plane infinie. Ces effets constituent l'écart du système réel par rapport aux conditions idéales d'ondes planes présumées lors de la dérivation de J_p et $J_p G_c^2$ peut être considéré comme le coefficient de réciprocité dans les conditions intermédiaires utilisées pour l'ensemble des mesures d'étalonnage. La valeur de G_c en fonction de s est présentée graphiquement dans la figure 5, page 57.

α' est le coefficient d'affaiblissement de l'amplitude pour des ultrasons dans de l'eau pure dégazée, et prend la valeur:

$$\alpha' = 2,2 \cdot 10^{-14} \left(\frac{f}{\text{Hz}} \right)^2 \text{ m}^{-1}$$

à une température de 23°C.

k_{u1} est le facteur par lequel la tension produite par le transducteur auxiliaire, lorsqu'il sert de récepteur, doit être multipliée pour donner la tension équivalente en circuit ouvert. Si la nature de la charge électrique (par exemple l'impédance de sortie du générateur de salves de signaux sinusoïdaux) ne change pas entre la transmission et la réception, la valeur de k_{u1} peut être déterminée en mesurant le courant I_k traversant le circuit lorsque le transducteur est remplacé par une liaison créant un court-circuit. On a alors:

$$k_{u1} = \frac{I_1}{I_k}$$

Note. – Si une porte électronique est fournie pour isoler le générateur du transducteur immédiatement après l'émission de la salve et si un circuit de détection à haute impédance est utilisé, la valeur de k_{u1} peut être prise pour l'unité.

k_u est le facteur par lequel la tension produite par l'hydrophone doit être multipliée pour donner la valeur équivalente en circuit ouvert. En général l'hydrophone est étalonné à l'aide de la charge électrique qui sera présente pendant son utilisation ultérieure et la correction de la sensibilité en tension en circuit ouvert est superflue.

Voir les références [12] à [18] dans l'annexe E.

A full evaluation of the correction factor is described in Appendix D. However, under certain specific conditions, consistent with the calibration procedures recommended in this standard, a significant simplification can be achieved. These conditions are:

- a) that the ratio of the diameter of the auxiliary transducer to that of the hydrophone is greater than 5, and
- b) that all measurements are performed at total acoustic path lengths between 1.5 and 3 times the near-field distance of the auxiliary transducer.

By defining a normalized distance, s , as the acoustic path length between the auxiliary transducer and hydrophone divided by the near-field distance, condition b) may be summarized as:

$$1.5 < \frac{2d_1\lambda}{a_1^2} < 3$$

and

$$1.5 < s < 3$$

Where: $s = (d_1 + d) \lambda / a_1^2$

Under these conditions, k may be evaluated from the expression:

$$k = G_c \frac{k_{u1}^{1/2}}{k_u} \cdot e^{\alpha' d}$$

where:

G_c (a function of s only) allows for the changes in received signal due to diffraction effects occurring during propagation of the ultrasound as a beam rather than as an infinite, plane wave. These effects represent the departure of the real system from the plane wave conditions assumed in the derivation of J_p , and $J_p G_c^2$ may be regarded as the reciprocity coefficient for the intermediate conditions used throughout the calibration measurements. The value of G_c as a function of s is plotted in Figure 5, page 57.

α' is the amplitude attenuation coefficient for ultrasound in pure, degassed water, and has the value:

$$\alpha' = 2.2 \cdot 10^{-14} \left(\frac{f}{\text{Hz}} \right)^2 \text{ m}^{-1}$$

at a temperature of 23°C.

k_{u1} is the factor by which the signal voltage produced by the auxiliary transducer when acting as a receiver must be multiplied to give the equivalent open-circuit voltage. If the electrical load conditions (e.g., tone burst generator output impedance) are unchanged between transmission and reception, the value of k_{u1} may be determined by measuring the current, I_k , through the circuit when the transducer is replaced by a short-circuit link. Then clearly:

$$k_{u1} = \frac{I_1}{I_k}$$

Note. – If an electric gate is provided to isolate the generator from the transducer immediately after the tone burst is transmitted, and a high impedance detection circuit is used, the value of k_{u1} may be taken as unity.

k_u is the factor by which the voltage produced by the hydrophone must be multiplied to give the equivalent open-circuit value. In general, the hydrophone will be calibrated with the electrical loading to be used during the hydrophone's subsequent application, and the correction to open-circuit voltage sensitivity will be unnecessary.

See references [12] to [18] of Appendix E.

7.6 Précision

La méthode d'étalonnage recommandée et le facteur de correction simplifié permettent d'étalonner les hydrophones dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz avec une incertitude générale (de tout l'ensemble) inférieure à $\pm 1,5$ dB pour le niveau de sensibilité en tension. Cette technique peut donner ces incertitudes statistiques dans les mesures qui sont nettement inférieures à $\pm 1,5$ dB.

Voir la référence [10] dans l'annexe E.

7.6 Accuracy

The recommended calibration procedure and simplified correction factor provide a method of calibrating hydrophones in the 0.5 MHz to 15 MHz frequency band with an overall systematic uncertainty of less than ± 1.5 dB in voltage sensitivity level. The technique is capable of yielding statistical uncertainties in the measurements, which are significantly less than ± 1.5 dB.

See reference [10] of Appendix E.

ANNEXE A

RAISONNEMENT À L'APPUI DE LA MÉTHODE D'ÉTALONNAGE PAR RÉCIPROCITÉ

L'étalonnage d'un hydrophone est en général réalisé en le plaçant dans un champ acoustique, en un point pour lequel la valeur absolue de l'un des paramètres de ce champ, par exemple l'amplitude de pression acoustique, a été déterminée au préalable.

Nombre de techniques ont été décrites par divers auteurs pour la détermination absolue des paramètres du champ acoustique. Certaines, comme la calorimétrie ou la mesure de la pression de radiation totale au moyen d'une balance sensible, exigent la détermination de grandeurs physiques moyennées dans le temps et pour l'ensemble (ou une partie importante) du faisceau acoustique. D'autres, comme l'interférométrie et la mesure de la pression de radiation exercée sur des cibles sphériques de petite taille, fournissent des valeurs relatives à des grandeurs physiques résolues de manière spatiale. Dans ces exemples, un paramètre du champ est déterminé en mesurant l'effet du champ créé par un transducteur ultrasonore sur un élément sensible d'un autre type. Cependant, une méthode, la réciprocité, implique la mesure de l'effet du champ sur un deuxième transducteur, ou même sur le transducteur même qui produit le champ.

Il existe donc une large gamme de techniques de mesure absolues diverses, fournissant un nombre de paramètres différents du champ acoustique. Sous réserve de certaines hypothèses concernant le mécanisme de propagation du champ, ces paramètres peuvent tous être interdépendants. Cela peut n'exiger d'autre chose que l'application d'un modèle théorique, ou peut-être la réalisation de mesure du champ d'une nature relative plutôt qu'absolue. Les communications écrites et les travaux des laboratoires de normalisation tendent progressivement à démontrer que les paramètres déterminés par des moyens différents sont en réalité équivalents.

La détermination dans l'absolu de l'amplitude de pression acoustique en un point d'un champ pour l'étalonnage d'un hydrophone peut donc être accomplie par l'une de plusieurs techniques expérimentales différentes, et le choix d'une technique appropriée peut être fait sur la base de son potentiel de précision et de sa facilité d'application. L'interférométrie constitue peut-être la méthode la plus prometteuse et la plus directe, mais c'est une technique exigeante, difficile à mettre au point et à éprouver, et qui n'est pas encore généralement disponible. Parmi les autres méthodes, celles qui rallient le plus de suffrages sont la réciprocité et la mesure de la puissance acoustique totale combinée à la détermination du profil du faisceau acoustique en utilisant un hydrophone. Pour justifier le choix de la réciprocité comme base de la présente norme, il est utile de considérer les caractéristiques principales de ces deux méthodes.

La puissance totale de sortie moyenne dans le temps peut être déterminée en utilisant soit un radiomètre acoustique (voir la référence [19] dans l'annexe E) soit un calorimètre (voir la référence [20] dans l'annexe E). Le radiomètre acoustique est fondé sur le principe suivant: la force exercée sur une cible réfléchissante ou absorbante placée à l'intérieur d'un champ ultrasonore peut être mise en relation avec la puissance acoustique totale moyenne dans le temps dans la partie du faisceau qui touche la cible. Des systèmes nombreux divers ont été mis au point, qui utilisent divers types de cibles et diverses méthodes de mesure de cette force. Le niveau de précision réalisable dépend de la conception et du mode de fonctionnement mais, à titre d'exemple, les niveaux de puissance totale moyennée dans le temps supérieurs à 10 mV peuvent être déterminés avec une incertitude totale de $\pm 5\%$. La technique de la pression de radiation présente l'avantage d'être indépendante de la fréquence du faisceau ultrasonore, pourvu qu'une correction appropriée soit apportée pour tenir compte de l'absorption dans le parcours acoustique entre la face du transducteur et la cible. Elle a un inconvénient expérimental majeur: les forces en présence sont faibles et exigent des systèmes de mesure très sensibles, qui peuvent être influencés par les conditions du milieu comme la variation de la température et les vibrations.

APPENDIX A

RATIONALE FOR THE RECIPROCITY PROCEDURE

The calibration of a hydrophone is usually accomplished by placing it in an acoustic field at a point at which the absolute value of one of the parameters of that field, such as its acoustic pressure amplitude, has previously been determined.

Many techniques have been described in the literature for the absolute determination of acoustic field parameters. Some, such as calorimetry or the measurement of total radiation pressure by means of a sensitive balance, involve the determination of physical quantities averaged over time and over all (or substantial part of) the acoustic beam. Others, such as interferometry and the measurement of the radiation pressure exerted on small, spherical ball targets, yield values of spatially resolved physical quantities. In these examples, a field parameter is determined by measuring the effect of the field generated by an ultrasonic transducer on some other form of sensing element. However, one method, the reciprocity technique, involves measurement of the effect of the field on a second transducer, or even back on the transducer which is itself generating the field.

There is therefore a wide variety of absolute measurement techniques available, yielding a number of different acoustic field parameters. Subject to certain assumptions about the way in which the field propagates, these parameters may all be interrelated. This may involve no more than the application of a theoretical model, or perhaps further measurements on the field of a relative rather than an absolute nature. There is an increasing body of evidence in the literature and in the work of standards laboratories to suggest that the parameters determined in different ways are in fact equivalent.

The absolute determination of acoustic pressure amplitude at one point in a field for hydrophone calibration may consequently be accomplished by one of many different experimental techniques, and the choice may be made in terms of the potential accuracy and convenience of the method. Interferometry possibly represents the most promising and direct method, but it is a demanding technique, difficult to establish and prove, and not yet widely available. Of the other methods, the two which have found most favour are reciprocity, and the measurement of total output power combined with a determination of the acoustic beam profile using a hydrophone. To explain the choice of reciprocity as the basis of this standard, it is worth considering the major features of both these alternative approaches.

Total time averaged output may be determined by means of either a radiation pressure balance (see reference [19] of Appendix E) or a calorimeter (see reference [20] of Appendix E). The principle underlying the radiation pressure balance is that the force exerted on a reflecting or absorbing target placed within an ultrasonic field can be related to the total time averaged acoustic power in that part of the beam impinging on the target. A wide variety of systems have been developed employing different types of target and different methods of measuring the force. Accuracies attainable depend on the design and mode of operation but, as a guide, total time averaged power levels above 10 mW may be determined with a total uncertainty of less than $\pm 5\%$. An advantage of the radiation pressure technique is that it is independent of the frequency of the ultrasonic beam, provided an appropriate correction is made for absorption in the acoustic path between the transducer face and the target. A major experimental disadvantage is that the forces involved are small and require very sensitive measurement systems which may well be affected by environmental conditions, such as temperature variation and vibration.

Il faut par conséquent disposer d'un matériel spécialisé qui exige des efforts importants pour sa mise au point et la démonstration de son efficacité, et qui doit être maintenu comme base de l'installation d'étalonnage.

La calorimétrie est une autre méthode de détermination de la puissance moyennée dans le temps, et a été utilisée avec succès par nombre d'équipes de recherche. Cette technique est fondée sur un principe simple: la conversion de l'énergie acoustique en chaleur, qui peut ensuite être mesurée de façon absolue par des techniques calorimétriques conventionnelles. Des incertitudes de $\pm 7\%$ ont pu être obtenues. Les inconvénients de cette technique sont la longueur des temps de stabilisation nécessaires avant d'effectuer les mesures et la complexité des calorimètres qui, eux aussi, exigent une mise au point et un entretien considérables s'ils doivent être utilisés comme base d'une installation d'étalonnage.

Pour appliquer la mesure de la puissance totale moyennée dans le temps, fournie par un transducteur, à l'étalonnage d'un hydrophone, il est évidemment nécessaire d'intégrer l'intensité relative du champ acoustique produit par le transducteur dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Cela permet de déterminer la valeur absolue de l'intensité acoustique en un point particulier du champ. Le point d'intensité maximale est normalement choisi, puisqu'il peut être retrouvé à volonté, et le plan de balayage utilisé se trouve dans le champ lointain, où les fluctuations de la vitesse et de la masse volumique sont en phase. Le balayage du champ n'exige qu'une mesure relative; donc, un hydrophone de classe B, qui dans des conditions idéales est de taille petite par rapport à la longueur d'onde acoustique, peut être utilisé. En théorie, la représentation graphique du faisceau doit couvrir la totalité du plan perpendiculaire à la direction de propagation. Cependant, lorsque l'hypothèse d'une symétrie cylindrique du champ à partir du transducteur est admise, un diagramme du faisceau peut être obtenu par balayage unidimensionnel. Les installations expérimentales capables de décrire graphiquement le faisceau assurent un positionnement précis de l'hydrophone dans le champ et une dynamique de mesure supérieure à 40 dB.

Lorsque l'hydrophone à étalonner est placé dans le champ, il faut apporter une correction pour tenir compte de la possibilité d'un moyennage dans l'espace provoqué par la taille finie de l'hydrophone balayeur et de l'hydrophone à étalonner; la puissance de sortie et la forme du faisceau venant du transducteur doivent rester stables pendant toute la durée des mesures. Cette technique permet d'obtenir des incertitudes de l'ordre de $\pm 12\%$ lors de l'étalonnage final d'un hydrophone.

Par contre, la réciprocité exige une installation expérimentale simple comparée à celle que nous avons décrite plus haut, et n'implique pas de méthodes de mesures complexes (voir la méthode décrite dans l'annexe B). Toutes les mesures en cause sont de nature électrique et la technique peut par conséquent être rendue absolue. Néanmoins, des corrections électriques et acoustiques doivent être apportées aux données et l'analyse des résultats est relativement compliquée. Les transducteurs utilisés doivent se comporter pratiquement comme des pistons, pour permettre une approximation suffisamment précise des facteurs de correction acoustique, et doivent produire des champs stables et reproductibles pendant la durée des mesures. Les incertitudes finales sont en général plus importantes que celles que donne la technique combinant la représentation graphique du faisceau et le moyennage de la puissance dans le temps, à des fréquences supérieures à 5 MHz, principalement à cause des lacunes des transducteurs au niveau du fonctionnement, tandis qu'au-dessous de 5 MHz les incertitudes sont comparables. Avec l'amélioration espérée des performances des transducteurs, la situation pourrait changer à l'avenir.

Pour conclure, la réciprocité est une technique absolue et peut fournir un niveau de précision comparable à celui des autres méthodes. Elle offre l'avantage de la simplicité et peut être mise sur pied par n'importe quel laboratoire équipé pour les mesures ultrasonores courantes.

There is a need, therefore, for specialized and dedicated equipment which requires significant effort to develop and prove, and which must be maintained as the basis of the calibration facility.

Calorimetry is an alternative method for determining time averaged output power, and has been successfully used in a number of research groups. The principle of this technique is simple: the conversion of acoustic energy into heat, which can then be determined absolutely by conventional calorimetric techniques. It has been shown that uncertainties of $\pm 7\%$ can be achieved. The disadvantages of this technique are that settling times for measurements can be long and that the calorimeters are rather complex devices which again require considerable development and maintenance if they are to be used as the basis of calibration facilities.

To apply the measurement of total time averaged output power from a transducer to the calibration of a hydrophone, it is of course necessary to integrate the relative intensity of the acoustic field produced by the transducer in a plane normal to the direction of propagation. This permits the absolute value of acoustic intensity to be determined at a particular point in the field. The point of maximum intensity is normally chosen as it can be found repeatedly, and the scanning plane used is in the far field where the velocity and density fluctuations are in phase. The scan of the field requires only a relative measurement and a Class B hydrophone can therefore be used, ideally one which is small compared with the acoustic wavelength. In theory, the beam plotting should cover the whole plane perpendicular to the direction of propagation. However, where it is possible to assume cylindrical symmetry in the field from the transducer, the beam plot can be reduced to a one dimensional scan. The experimental facilities to perform beam plotting require accurate positioning of the hydrophone in the field and a dynamic measurement range in excess of 40 dB.

When the hydrophone to be calibrated is placed in the field, correction must be made for possible spatial averaging introduced by the finite size of both the scanning hydrophone and the one to be calibrated, and the transducer output power and beam shape must remain stable throughout the measurements. Uncertainties in the final hydrophone calibration of the order of $\pm 12\%$ can be achieved with this technique.

Reciprocity, on the other hand, requires a simple experimental facility compared with those described above, and does not involve complex measurement procedures. See the method described in Appendix B. All the measurements involved are electrical and the technique therefore can be made absolute. Nevertheless, electrical and acoustical corrections must be made to the data, and the analysis of results is rather complicated. The transducers used must behave in a near piston-like manner, to enable the acoustic correction factors to be estimated with sufficient accuracy, and must produce stable and reproducible fields over the period of the measurements. Final uncertainties are usually rather larger than those for the time averaged power/beam plotting technique at frequencies above 5 MHz, mainly because of inadequacies in transducer performance, while below 5 MHz the uncertainties are comparable. With the expected improvement in transducer performance, this may well not be the case in the future.

In conclusion, therefore, reciprocity is an absolute technique and can lead to accuracies which are comparable with other methods. It has the advantage of being a simple and straightforward experimental method which can be established in any laboratory equipped for routine ultrasonic measurements.

ANNEXE B

RÉCIPROCITÉ DES ONDES PLANES

Un transducteur réciproque est un transducteur qui satisfait à la condition de la réciprocité électro-mécanique:

$$\left| \frac{v}{I} \right| = \left| \frac{U}{F} \right| \quad (1)$$

où: (en émission) v est la vitesse uniforme de la surface rayonnante du transducteur pour un courant d'entrée I et (en réception) U est la tension en circuit ouvert produite par une force F agissant sur le transducteur, présumé rigide dans ce cas.

D'après les définitions de la réponse à l'émission en courant d'un projecteur (voir le paragraphe 3.10) et de la sensibilité en champ libre d'un récepteur (voir le paragraphe 3.8), on a:

$$S = \left| \frac{p_{tr}}{I} \right| \text{ et } M = \left| \frac{U}{p_{rec}} \right| \quad (2)$$

où:

p_{tr} est la pression acoustique dans l'onde sonore, immédiatement devant le projecteur et en l'absence d'effet d'interférence, pour un courant d'entrée I

p_{rec} est la pression acoustique dans le champ libre non perturbé d'une onde plane à la position du centre acoustique du récepteur (après retrait de ce dernier), qui donne une tension en circuit ouvert U

Pour une onde plane, la pression devant le projecteur est liée à la vitesse uniforme de la surface par la relation:

$$p_{tr} = \rho c v \quad (3)$$

où:

ρ est la masse volumique du milieu de propagation

c est la vitesse du son dans ce milieu

Si l'on suppose ensuite que l'onde acoustique se propage, entre la transmission et la réception, sans perte ou effets de diffraction, comme une onde plane infinie se déplaçant dans un milieu idéal sans perte,

$$p_{tr} = p_{rec} = p \quad (4)$$

La force exercée sur la surface du récepteur, d'aire A , est par conséquent donnée par:

$$F = 2 A p \quad (5)$$

Donc, dans les conditions limites présumées pour les ondes planes, le rapport

$$\frac{M}{S} = \frac{U I}{p^2} = \frac{2 A}{\rho c} = J_p \quad (6)$$

ne dépend que de l'aire du transducteur, et est reconnu comme étant le paramètre de réciprocité des ondes planes, J_p . Une fois J_p connu, la mesure de U et I mène directement à la détermination de p , et par conséquent de S et de M .

Note. – Si I_1 et U_1 sont le courant d'excitation et la tension reçue pour un transducteur réel émettant et recevant une salve unique de signaux sinusoïdaux dans l'eau, réfléchi par une interface plane eau-métal, on a alors:

APPENDIX B

PLANE WAVE RECIPROCITY

A reciprocal transducer is one which satisfies the electromechanical reciprocity condition:

$$\left| \frac{v}{I} \right| = \left| \frac{U}{F} \right| \quad (1)$$

where: (in transmission) v is the uniform velocity of the radiating surface of the transducer for an input current I and (in reception) U is the open-circuit voltage produced by a force F acting on the transducer, assumed in this case to be rigid.

From the definitions of the transmitting response to current of a projector (see Sub-clause 3.10) and the free-field sensitivity of a receiver (see Sub-clause 3.8):

$$S = \left| \frac{p_{tr}}{I} \right| \text{ and } M = \left| \frac{U}{p_{rec}} \right| \quad (2)$$

where:

p_{tr} is the acoustic pressure in the sound wave immediately in front of the projector, in the absence of interference effects, for an input current I

p_{rec} is the acoustic pressure in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the acoustic centre of the receiver, if it were removed, which gives an open-circuit voltage U

For a plane wave, the pressure in front of the projector is related to the uniform surface velocity by the relationship:

$$p_{tr} = \rho c v \quad (3)$$

where:

ρ is the density of the propagation medium

c is the speed of sound in the medium

If it is now assumed that the acoustic wave propagates between transmission and reception without loss or diffraction effects, as for example in an infinite plane wave travelling in a loss-free medium,

$$p_{tr} = p_{rec} = p \quad (4)$$

The force exerted on the surface of the receiver, area A , is therefore given by:

$$F = 2 A p \quad (5)$$

Hence, under the assumed plane wave boundary conditions, the ratio

$$\frac{M}{S} = \frac{U I}{p^2} = \frac{2 A}{\rho c} = J_p \quad (6)$$

depends only on the area of the transducer, and is identified as the plane wave reciprocity parameter J_p . With J_p known, a measurement of U and I leads directly to the determination of p , and thus S and M .

Note. – If I_1 and U_1 are the input current and received voltage for a real transducer transmitting and receiving a tone burst signal in water, reflected by a plane water/metal interface, then:

$$\frac{M_1^*}{S_1^*} = \frac{U_1 I_1}{p^2} = J_p \quad (6a)$$

où:

M_1^* et S_1^* sont les valeurs apparentes de la sensibilité en tension en champ libre et de la réponse à l'émission en courant du transducteur, en supposant que les conditions de mesure des ondes planes soient idéales

En prenant les équations (2) et (6a), on obtient:

$$S_1^* = \left(\frac{U_1}{IJ_p} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Dans tout programme de mesure pratique et aux fréquences envisagées ici, des conditions parfaites pour les ondes planes ne peuvent être réalisées, et il faut tenir compte de la différence entre p_{tr} et la valeur de p_{rec} moyennée pour l'ensemble de la surface active du récepteur.

$$\frac{M_1^*}{S_1^*} = \frac{U_1 I_1}{p^2} = J_p \quad (6a)$$

where:

M_1^* and S_1^* are the apparent values of the free-field voltage sensitivity and transmitting response to current of the transducer assuming ideal plane wave measurement conditions

Hence from equations (2) and (6a):

$$S_1^* = \left(\frac{U_1}{IJ_p} \right)^{1/2} \quad (7)$$

In any practical measurement scheme at the frequencies under consideration here, true plane wave conditions cannot be realized, and allowance must be made for the difference between p_{tr} and the value of p_{rec} averaged over the active surface of the receiver.

ANNEXE C

DÉTAILS DES MÉTHODES EXPÉRIMENTALES RECOMMANDÉES

C1. Evaluation du rayon utile du transducteur auxiliaire

Le rayon utile, a_1 , du transducteur auxiliaire est déterminé à partir d'une représentation graphique de la variation de l'amplitude de la pression acoustique, en fonction de la distance le long de l'axe acoustique, lorsque le transducteur fonctionne en mode entretenu. Cette variation peut être mesurée à l'aide d'un hydrophone non étalonné dans le champ d'une salve de signaux sinusoïdaux, à condition que le diamètre de l'élément actif de l'hydrophone soit au moins dix fois plus petit que celui du transducteur auxiliaire, et que la salve ait une durée suffisamment longue pour permettre l'établissement de conditions de régime permanent. La distribution acoustique déterminée expérimentalement est comparée à celle qui est prévue pour une source se comportant comme un piston parfait, c'est-à-dire une source dont la surface rayonnante se déplace à une vitesse uniforme dans l'espace, v . Le rayon a_1 de la source théorique est ensuite ajusté pour obtenir une concordance optimale entre les données expérimentales et le modèle du champ. La distribution théorique pour une source se comportant comme un piston est donnée par l'expression

$$\frac{p}{p_{tr}} = 2 \left| \sin \frac{\pi}{\lambda} \left[(z^2 + a_1^2)^{1/2} - z \right] e^{-\alpha' z} \right|$$

où:

p est l'amplitude de la pression acoustique à une distance z le long de l'axe acoustique à partir du transducteur

p_{tr} est l'amplitude de pression d'une onde plane donnée par $p_{tr} = \rho c v$

λ est la longueur d'onde acoustique

a_1 le rayon de la source

α' le coefficient d'affaiblissement de l'amplitude (c'est-à-dire $2,2 \times 10^{-14} \left(\frac{f}{\text{Hz}}\right)^2 \text{m}^{-1}$ pour de l'eau à 23 °C)

En pratique, les valeurs de p_{tr} et a_1 sont ajustées de manière à obtenir une concordance optimale entre les données expérimentales et les données théoriques.

Note. – Le National Physical Laboratory du Royaume-Uni réalise actuellement cet ajustement par la méthode suivante: si $Y_i(z_i)$ est défini comme ayant la valeur $20 \log_{10} V_i$, V_i étant l'amplitude de la tension du signal produite par l'hydrophone à une distance z_i du transducteur, et si $Y'_i(z_i)$ est défini comme étant:

$$20 \log_{10} \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} \left[(z_i^2 + a_1^2)^{1/2} - z_i \right] e^{-\alpha' z_i} \right|$$

alors le paramètre

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_i^2$$

$$\text{dans lequel } X_i = Y_i(z_i) - Y'_i(z_i) - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{i=n} Y_i(z_i) - \sum_{i=1}^{i=n} Y'_i(z_i) \right]$$

est réduit au minimum par rapport à a_1 . Cet ajustement n'est appliqué qu'à des données pour lesquelles z se trouve entre $1,5 z_m$ et $3 z_m$, z_m étant la valeur de z à la position du maximum de pression le plus éloigné de la surface du transducteur. Ayant ainsi déterminé a_1 , on vérifie l'utilité du modèle comme représentation du champ réel en évaluant $X_m(z_m)$. Si $X_m(z_m)$ a une ampleur inférieure à 0,5 dB, on en conclut que le modèle est satisfaisant.

APPENDIX C

DETAILS OF THE RECOMMENDED EXPERIMENTAL PROCEDURES

C1. Evaluation of the effective radius of the auxiliary transducer

The effective radius, a_1 , of the auxiliary transducer is determined from a plot of the variation in acoustic pressure amplitude against distance along the acoustic axis, when the transducer is operating in a continuous wave mode. This variation may be measured with an uncalibrated hydrophone in a tone burst field, provided the active element diameter of the hydrophone is at least a factor of ten less than that of the auxiliary transducer, and the tone burst is sufficiently long to allow steady-state conditions to be established. The experimentally determined acoustic distribution is compared with that predicted for a perfect piston-like source, that is, one in which the radiating surface moves with spatially uniform velocity, v . The radius of the theoretical source, a_1 , is then adjusted for optimum agreement between the experimental data and the field model. The theoretical distribution for a piston-like source is given by the expression:

$$\frac{p}{p_{tr}} = 2 \left| \sin \frac{\pi}{\lambda} \left[(z^2 + a_1^2)^{1/2} - z \right] e^{-\alpha' z} \right|$$

where:

p is the acoustic pressure amplitude at a distance z along the acoustic axis from the transducer

p_{tr} is the plane wave pressure amplitude given by $p_{tr} = \rho c v$

λ is the acoustic wavelength

a_1 is the radius of the source, and

α' is the amplitude attenuation coefficient ($= 2.2 \times 10^{-14} \left(\frac{f}{\text{Hz}} \right)^2 \text{m}^{-1}$ for water at 23°C)

In practice the values of both p_{tr} and a_1 are adjusted for the optimum fit between the experimental and theoretical data.

Note. – One method of obtaining this fit (currently used at the National Physical Laboratory in the United Kingdom) is as follows: If $Y_i(z_i)$ is defined as $20 \log_{10} V_i$, where V_i is the amplitude of the signal voltage produced by the hydrophone at a distance z_i from the transducer and $Y'_i(z_i)$ is defined as:

$$20 \log_{10} \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} \left[(z_i^2 + a_1^2)^{1/2} - z_i \right] e^{-\alpha' z_i} \right|$$

then the parameter

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_i^2$$

$$\text{where } X_i = Y_i(z_i) - Y'_i(z_i) - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{i=n} Y_i(z_i) - \sum_{i=1}^{i=n} Y'_i(z_i) \right]$$

is minimized with respect to a_1 . This fitting procedure is applied only to data for which z lies between $1.5 z_m$ and $3 z_m$, where z_m is the value of z at the position of the pressure maximum furthest from the transducer surface. Having thus determined a_1 , a check is made on the success of the model as a representation of the true field by evaluating $X_m(z_m)$. A magnitude of $X_m(z_m)$ less than 0.5 dB is taken to indicate that the model is satisfactory.

C2. Evaluation des facteurs de réduction de la tension

Les facteurs de réduction de la tension a_{ul} , a_u et a_{11} sont tous déterminés au moyen d'un atténuateur de haute précision unique, placé entre la source de la tension de référence et sa charge normale connue R_0 (voir figure 4, page 57).

Pour a_{ul} , la chute de tension en R_0 est affichée par alternance avec U_1 sur un oscilloscope, et l'atténuateur est réglé, par inspection, à la valeur pour laquelle les signaux sont d'une amplitude égale. De cette manière, le réglage de l'atténuateur fournit une mesure directe de a_{ul} . De même, a_u est déterminé par comparaison de la tension en R_0 et de U .

La valeur de a_{11} est également déterminée par le réglage de l'atténuateur mais, dans ce cas les deux signaux qui doivent être comparés et rendus égaux par ce réglage sont le courant atteignant le transducteur et le courant traversant R_0 . On contrôle ces courants en les faisant traverser tour à tour la même sonde (de courant), dont la sortie est affichée sur l'oscilloscope. Un étalonnage absolu de la sonde n'est pas nécessaire, évidemment.

Note. – Dans le circuit simple de la figure 4, le même générateur de salves de signaux sinusoïdaux est utilisé pour exciter le transducteur et fournir U_{ref} . Si l'on utilise en pratique cette disposition, on trouvera commode de placer un deuxième atténuateur entre le commutateur SW A et le transducteur, pour permettre le réglage du courant d'excitation indépendamment de U_{ref} .

Voici, dans le détail, la description des méthodes expérimentales nécessaires lorsqu'on utilise la configuration de circuit que montre la figure 4:

- i) Le réflecteur étant réglé pour renvoyer la salve de signaux sinusoïdaux émise au transducteur auxiliaire et, les commutateurs SW B et SW C étant tous les deux en position 1, a_{11} est déterminé en réglant l'atténuateur pour obtenir des tensions égales aux deux positions du commutateur SW A.
- ii) Le réflecteur et le commutateur SW B étant réglés de la même manière qu'au point i), SW C est ensuite commuté à la position 2 et a_{u1} est déterminé en réglant de nouveau l'atténuateur pour obtenir des signaux d'égale valeur aux deux positions du commutateur SW A.

Note. – Dans ce cas, le signal contrôlé à la position 1 est U_1 , et il est bien sûr retardé, par rapport au moment du déclenchement de la salve de signaux sinusoïdaux, d'une durée égale au temps de propagation de l'impulsion dans la cuve d'eau. Un déclencheur à retard approprié est donc nécessaire.

- iii) Le réflecteur étant réglé de manière à diriger le centre du champ réfléchi vers l'hydrophone, les méthodes décrites aux points i) et ii) ci-dessus sont répétées. Cela donne une deuxième mesure de a_{11} et une valeur correspondante de a_u . En utilisant cette valeur de a_{11} dans le terme à racine carrée de l'équation (4) du paragraphe 7.4, il devient superflu de maintenir à une valeur constante la tension de référence U_{ref} pendant le réglage du réflecteur.

Pour faire en sorte que le faisceau réfléchi soit centré sur le transducteur, pour les points i) et ii), ou sur l'hydrophone, pour le point iii), il importe de régler la position de ces éléments avec soin pour obtenir un signal détecté maximal. Il faut régler les positions des dispositifs dans les plans perpendiculaires à la direction de propagation des ondes acoustiques incidentes, et leurs orientations par rapport à leurs centres acoustiques. Il importe que ces réglages soient faits avec une précision d'au moins une longueur d'onde acoustique et de $0,05^\circ$ respectivement.

C2. Evaluation of the voltage reduction factors

The voltage reduction factors a_{ul} , a_u and a_{1l} are all determined by means of a single precision attenuator, used between the reference voltage source and its known standard load R_0 . (See Figure 4, page 57.)

For a_{ul} , the voltage dropped across R_0 is displayed alternately with U_l on an oscilloscope, and the attenuator is set by inspection to that value for which the signals are of equal amplitude. By such means the attenuator setting provides a direct measure of a_{ul} . Similarly a_u is determined by comparing the voltage across R_0 with U .

The value of a_{1l} is also determined by setting the attenuator, but in this case the two signals to be compared and equated by this adjustment are the current into the transducer and the current through R_0 . These are monitored by arranging for them to pass alternately through the same current probe, the output of which is displayed on the oscilloscope. An absolute calibration of the current probe is, of course, not required.

Note. — In the simple circuit shown in Figure 4, the same tone burst generator is used to drive the transducer and to provide U_{ref} . If this arrangement is used in practice, it will be found convenient to place a second attenuator between switch SW A and the transducer to allow the drive current to be adjusted independently of U_{ref} .

The detailed experimental procedures necessary when making use of the circuit configuration illustrated in Figure 4 is as follows:

- i) With the reflector set to return the transmitted tone burst to the auxiliary transducer and switches SW B and SW C both in position 1, a_{1l} is determined by setting the attenuator for equal signal voltages monitored at the two positions of switch SW A.
- ii) With the reflector and switch SW B set as for Item i), SW C is then switched to position 2 and a_{ul} determined by again setting the attenuator for equal signals at the two positions of switch SW A.

Note. — In this case, the signal monitored in position 1 is U_l , and this will of course be delayed with respect to the time of the source tone burst by an amount equal to the transit time of the acoustic pulse in the water tank. A suitably delayed trigger will therefore be required.

- iii) With the reflector adjusted to direct the centre of the reflected field towards the hydrophone, the procedures detailed in Items i) and ii) above are repeated. This provides a second measurement of a_{1l} and a corresponding value of a_u . By using this value of a_{1l} in the square root term of equation (4), as given in Sub-clause 7.4, it is not necessary for the reference voltage U_{ref} to be held constant during the adjustment of the reflector.

To ensure that the reflected beam is centred on either the transducer, for Items i) and ii), or on the hydrophone, for Item iii), it is important to adjust the positions of these components carefully for a maximum detected signal. Adjustment should be made both of the positions of the devices in the planes perpendicular to the direction of propagation of the incident acoustic waves, and of their orientations about their acoustic centres. It is important that these adjustments be made to an accuracy of at least the acoustic wavelength and 0.05° respectively.

ANNEXE D

ÉVALUATION DU FACTEUR DE CORRECTION, k

Un facteur de correction d'emploi plus général que celui qui est décrit au paragraphe 7.5 est fourni par l'expression:

$$k = \left(\frac{k_{ul} G_1}{r} \right)^{1/2} \cdot \frac{e^{\alpha d}}{k_u G_2}$$

où:

- G_1 est la correction nécessaire pour tenir compte des changements intervenus dans l'onde acoustique entre la transmission et la réception au cours de l'étalonnage par autoréciprocité du transducteur auxiliaire
- G_2 est la correction nécessaire pour tenir compte des changements équivalents pendant l'étalonnage de l'hydrophone dans le champ connu produit par le transducteur auxiliaire
- r est le coefficient d'amplitude de la réflexion pour l'interface du réflecteur et de l'eau et les autres paramètres sont tels que définis au paragraphe 7.5

La valeur de G_1 ou G_2 qui convient dans un système expérimental quelconque est égale au rapport de la pression acoustique moyennée sur la surface du réflecteur (ou hydrophone), à la pression acoustique dans l'onde plane immédiatement devant l'émetteur (en absence d'interférences) en fonction de la longueur du parcours acoustique. Une courbe logarithmique de ce rapport, $|p/p_0|$, en fonction de la distance normalisée obtenue par des moyens théoriques pour divers rapports entre le diamètre du récepteur et celui de l'émetteur, a été fournie pour une source se comportant comme un piston idéal par Fay. (Voir la référence [15] dans l'annexe E.) Ces résultats sont indiqués dans la figure 6, page 58. (La distance normalisée est le quotient de la distance mesurée à partir de la surface du transducteur, par la distance du champ proche.) La valeur de G_1 est liée au transducteur auxiliaire qui est utilisé comme émetteur et récepteur et peut être obtenue en consultant la courbe, puisqu'elle correspond à un rapport des diamètres égal à l'unité. G_2 concerne l'onde émise par le transducteur auxiliaire et reçue par l'hydrophone, et le graphique correspondant au rapport des diamètres appropriés doit être utilisé. Si les recommandations de la présente norme sont suivies, ce rapport sera dans tous les cas inférieur à 0,2.

La valeur de (l/r) pour une interface eau-acier inoxydable est de 1,033.

Les autres termes utilisés pour le facteur de correction sont décrits au paragraphe 7.5.

Notes 1. – La figure 6 donne le rapport $|p/p_0|$ en décibels.

2. – Dans les applications où l'hydrophone est utilisé dans un milieu autre que celui dans lequel il a été étalonné, un terme de correction supplémentaire peut être nécessaire.

APPENDIX D

EVALUATION OF THE CORRECTION FACTOR, k

A more general correction factor than that described in Sub-clause 7.5 is given by the expression:

$$k = \left(\frac{k_{ul} G_1}{r} \right)^{1/2} \cdot \frac{e^{\alpha' d}}{k_u G_2}$$

where:

- G_1 is the correction necessary to take account of changes in the acoustic wave between transmission and reception during the self-reciprocity calibration of the auxiliary transducer
- G_2 is the correction necessary to take account of equivalent changes during calibration of the hydrophone in the known field generated by the auxiliary transducer
- r is the amplitude reflection coefficient for the reflector/water interface, and the other parameters are as defined in Sub-clause 7.5

The value of G_1 or G_2 appropriate to any experimental system is equal to the ratio of the acoustic pressure averaged over the surface of the receiver (or hydrophone) to that in the plane wave immediately in front of the transmitter (in the absence of interference) as a function of the acoustic path length. A logarithmic plot of this ratio, $|p/p_0|$, against the normalized distance derived theoretically for various receiver/transmitter diameter ratios was given for an ideal piston-like source by Fay (see reference [15] of Appendix E). These results are shown in Figure 6, page 58. (The normalized distance is the distance from the transducer surface divided by the near-field distance.) The value of G_1 relates to the auxiliary transducer in use as both a transmitter and receiver, and is obtained from the plot corresponding to a diameter ratio of unity. G_2 relates to the wave transmitted by the auxiliary transducer and received by the hydrophone, and the plot corresponding to the appropriate diameter ratio must be used. If the recommendations in this standard are followed, then this ratio will in all cases be less than 0.2.

The value of (l/r) for a water/stainless steel interface is 1.033.

Other terms used in the correction factor are covered in Sub-clause 7.5.

Notes 1. – Figure 6 gives the ratio $|p/p_0|$ in decibels.

- 2. – For applications in which the hydrophone is used in a medium other than that in which it is calibrated, an additional correction term may be necessary.

ANNEXE E — APPENDIX E

BIBLIOGRAPHIE — BIBLIOGRAPHY

- [1] Wells, P. N. T.: *Biomedical Ultrasonics*, Academic Press, London, 1977.
- [2] Bobber, R. J.: *Underwater Electroacoustic Measurements*, Naval Research Laboratories, Washington D.C., 1970.
- [3] Miller, E. B., Eitzen, D. G.: *Ultrasonic Transducer Characterization at the NBS*, IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics SU-26 28, 1979.
- [4] Reid, J. M.: *Self-reciprocity Calibration of Echo Ranging Transducers*. J. Acoust. Soc. Amer. 55, 862, 1974.
- [5] Rhyne, T. L.: *Acoustic Instrumentation and Characterization of Lung Tissue*, Research Studies Press, Forest Grove, 1977.
- [6] Koppelman, J., Brendel, K., Wolf, J.: *Kalibrierung von Wasserschallwandlern im Frequenzbereich von 75 kHz bis 2 MHz*, Acustica 25, 73, 1971.
- [7] Brendel, K., Ludwig, G.: *Calibration of Ultrasonic Standard Probe Transducers*, Acustica 36, 203, 1976.
- [8] Chivers, R. C., Lewin, P. A.: *The Voltage Sensitivity of Miniature Piezoelectric Plastic Ultrasonic Probes*. Ultrasonics 20, 279-281, 1982.
- [9] Shombert, D. G., Smith, S. W., Harris, G. R.: *Angular Response of Miniature Ultrasonic Hydrophones*. Med. Phys. 9 (4), 484-492, 1982.
- [10] Gloersen, W. B., Harris, G. R., Stewart, H. F., Lewin, P. A.: *A Comparison of Two Calibration Methods for Ultrasonic Hydrophones*. Ultrasound Med. Biol. 8, 545-548, 1982.
- [11] Beissner, K.: *Free-field Reciprocity Calibration in the Transition Range between Near Field and Far Field*, Acustica 46, 162, 1980.
- [12] Yaghjian, A. D.: *Generalized or Adjoint Reciprocity Relations for Electroacoustic Transducers*, J. Res. Nat. Bur. Stand. (U.S.) 79B, 17, 1975.
- [13] Brendel, K., Ludwig, G.: *Korrekturen bei der Kalibrierung von Ultraschall-Sondenmikrophonen*, Fortschritte der Akustik, DAGA '76; VDI — Verlag Düsseldorf, 393, 1976.
- [14] Gitis, M. B., Khimunin, A. S.: *Diffraction Effects in Ultrasonic Measurements* (Review), Sov. Phys.-Acoust. 14, 413, 1969.
- [15] Fay, B.: *Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern*, Acustica 36, 209, 1976.
- [16] Khimunin, A. S.: *Numerical Calculation of the Diffraction Corrections for the Precise Measurement of Ultrasound Absorption*, Acustica 27, 173, 1972.
- [17] Brendel, K., Ludwig, G.: *Measurement of Ultrasonic Diffraction Loss for Circular Transducers*, Acustica 32, 110, 1975.
- [18] Pinkerton, J. M. M.: *A Pulse Method for the Measurement of Ultrasonic Absorption in Liquids: Results for Water*, Nature 160, 128, 1947.
- [19] Greenspan, M., Breckenridge, F. R., Tschiegg, C. E.: *Ultrasonic transducer power output by modulated radiation*, J. Acoust. Soc. Amer. 63, 1031, 1978.
- [20] Zapf, T. L., Harvey, M. E., Larsen, N. T., Stoltenberg, R. E.: *Ultrasonic calorimeter for beam power measurements*, Washington: U.S. Government Printing Office, NBS Tech. Note 686, 1976.

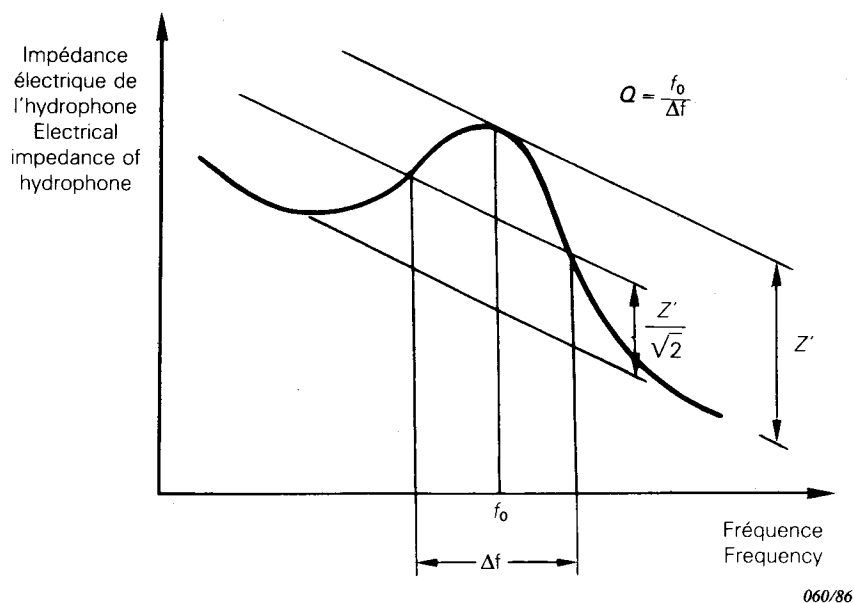


FIG. 1. — Détermination du «Q» mécanique de l'élément actif à partir de l'impédance électrique mesurée de l'hydrophone.
Determination of the mechanical "Q" of the active element from the measured electrical impedance of the hydrophone.

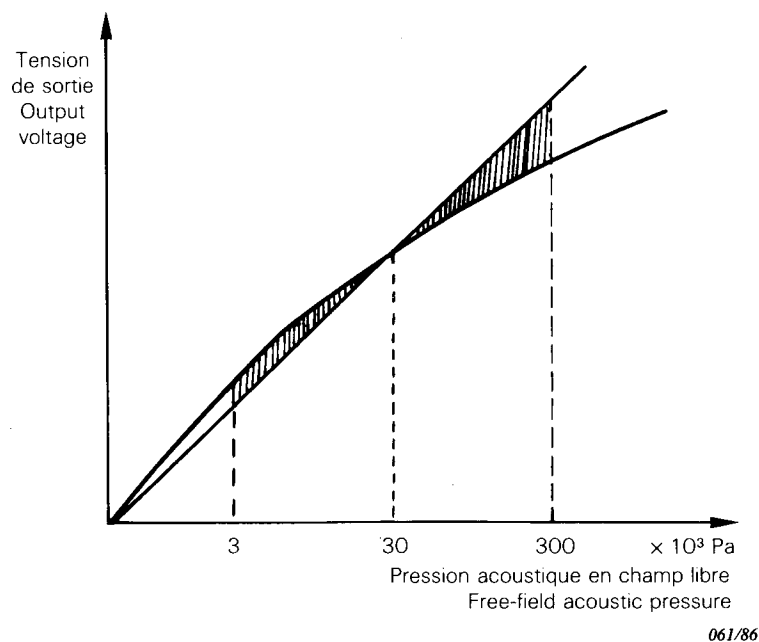


FIG. 2. — Graphique de la tension de sortie en fonction de la pression acoustique en champ libre, utilisé pour évaluer la linéarité de l'hydrophone.
Plot of output voltage against free-field acoustic pressure used to assess the linearity of the hydrophone.

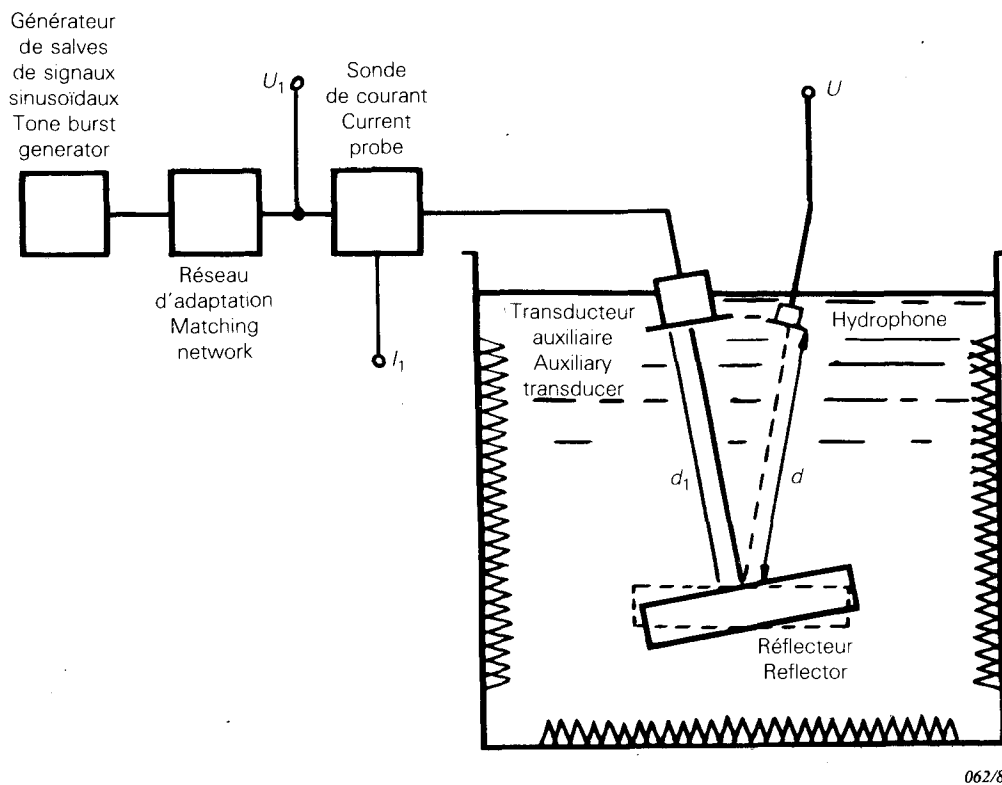


FIG. 3. — Disposition des éléments pour la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs.

Experimental arrangement for the two-transducer reciprocity calibration method.

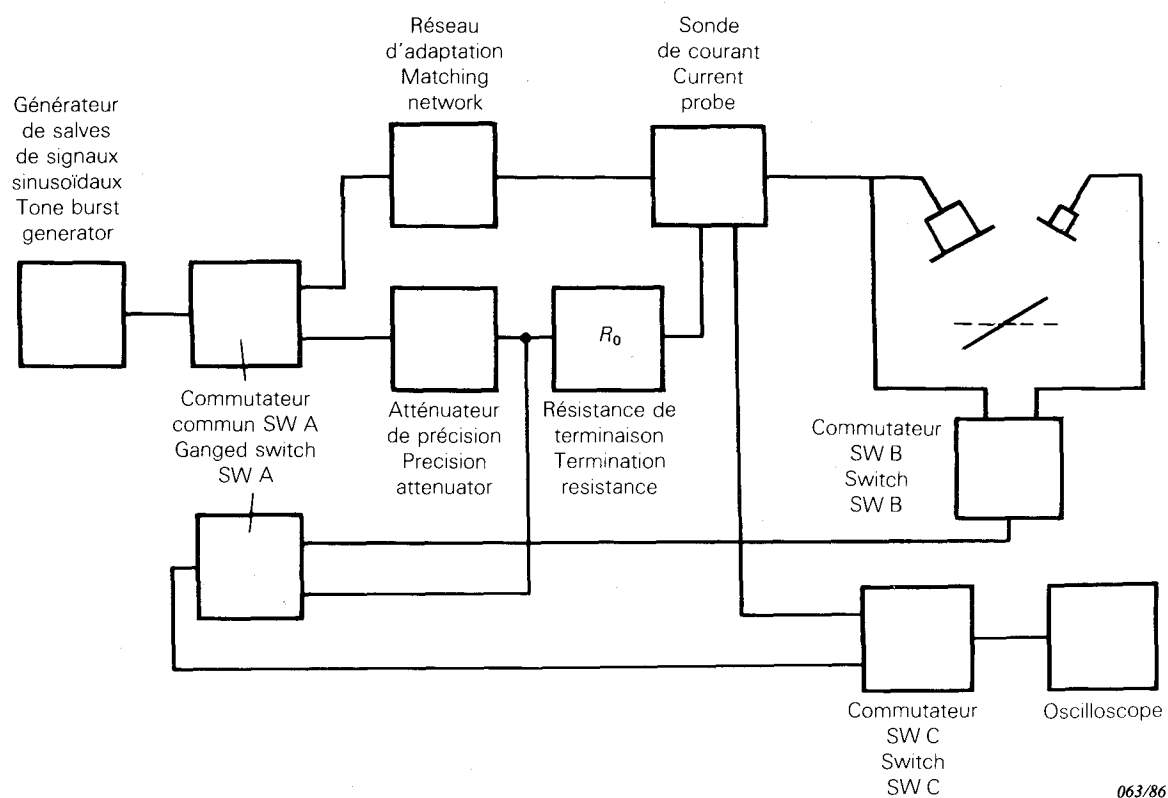


FIG. 4. — Schéma du circuit électrique utilisé pour la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs.

Block diagram of the electrical circuit for the two-transducer reciprocity calibration method.

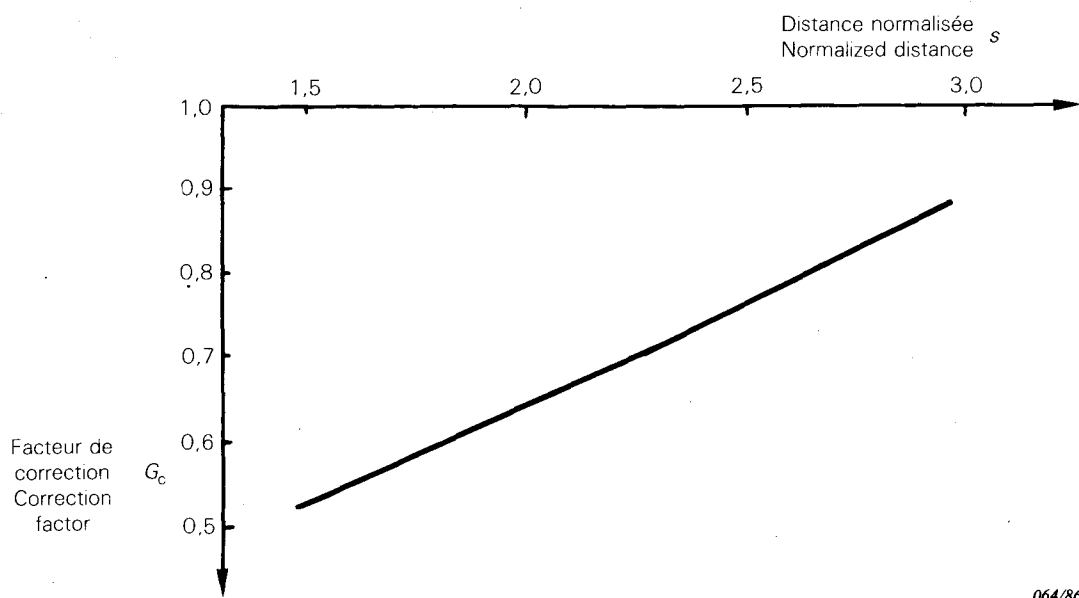


FIG. 5. — Courbe de la valeur du terme G_c (élément du facteur de correction k) en fonction de la distance normalisée.

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

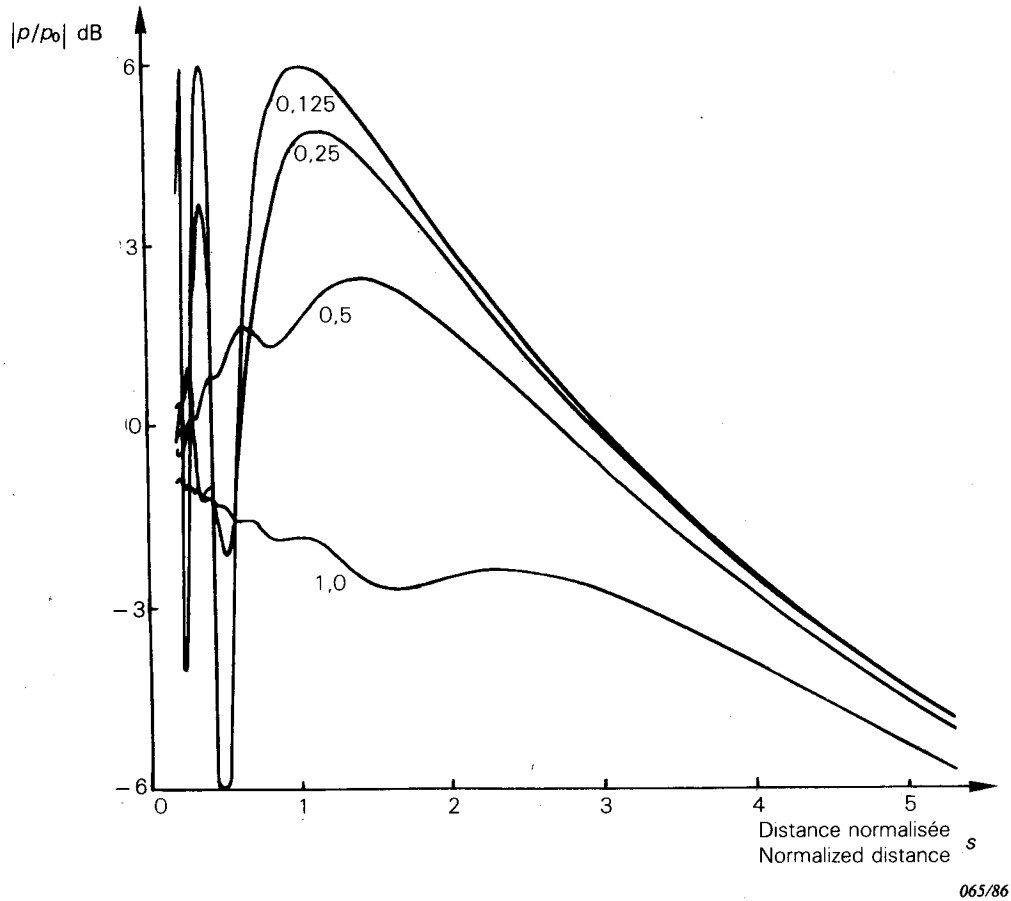


FIG. 6. — Graphique de la pression moyenne en fonction de la distance normalisée pour des transducteurs de taille différente. Le paramètre utilisé est le rapport entre le diamètre du récepteur et celui de l'émetteur (d'après Fay, voir référence [15] dans l'annexe E).

Average pressure plotted against normalized distance for transducers of different size. Parameter is the ratio receiver/transmitter diameter (according to Fay, see reference [15] of Appendix E).

ICS 17.140.50
