

NORME INTERNATIONALE INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
866

Première édition
First edition
1987



Commission Electrotechnique Internationale

International Electrotechnical Commission

Международная Электротехническая Комиссия

**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**

NORME INTERNATIONALE INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
866

Première édition
First edition
1987



Commission Electrotechnique Internationale

International Electrotechnical Commission

Международная Электротехническая Комиссия

**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**

© CEI 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse

Code prix 36
Price code

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 — Raisonnement 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, <i>k</i>	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
a'	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	$\{ = 2A/\rho c \}$ 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 IEV 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 IEV 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 IEV 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 IEV 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 (IEC Publication 565, Sub-clause 3.6), see also IEC 801-05 (under consideration).

3.6 *Reciprocal transducer*

A linear, passive and reversible transducer (IEC 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 (IEC 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 (IEC 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} (IEC Publication 565, Sub-clause 3.9.1).

Unit: decibel, dB

Note. – M_{ref} is equal to 1 V/ μ Pa.

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 μ s, 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.