

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
61102**

Première édition
First edition
1991-11

**Mesurage et caractérisation des champs
ultrasonores à l'aide d'hydrophones dans
la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz**

**Measurement and characterisation of ultrasonic
fields using hydrophones in the frequency range
0,5 MHz to 15 MHz**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61102: 1991

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* (IEV).

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
61102

Première édition
First edition
1991-11

**Mesurage et caractérisation des champs
ultrasonores à l'aide d'hydrophones dans
la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz**

**Measurement and characterisation of ultrasonic
fields using hydrophones in the frequency range
0,5 MHz to 15 MHz**

© IEC 1991 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 XA

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	8
 Articles	
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives	10
3 Définitions	12
4 Table des symboles	32
5 Prescriptions de mesurage	36
5.1 Prescriptions pour les hydrophones et amplificateurs	36
5.1.1 Généralités	36
5.1.2 Sensibilité d'un hydrophone	36
5.1.3 Réponse directionnelle d'un hydrophone	38
5.1.4 Rayon apparent d'un élément actif d'hydrophone	38
5.1.5 Choix de la taille de l'élément actif d'un hydrophone	40
5.1.6 Largeur de bande	42
5.1.7 Linéarité	42
5.1.8 Amplificateur de signal d'hydrophone	42
5.2 Conditions de positionnement des ensembles et cuves à eau	44
5.2.1 Systèmes de positionnement	44
5.2.2 Cuve à eau	46
5.3 Prescriptions pour les ensembles de mesurage	48
5.4 Prescriptions concernant l'équipement ultrasonore à caractériser	50
6 Spécification des caractéristiques de fonctionnement des hydrophones et amplificateurs	50
6.1 Sensibilité	50
6.2 Rayon apparent	52
6.3 Linéarité de l'hydrophone	52
6.4 Amplificateurs d'hydrophone	52
7 Procédures de mesurage	52
7.1 Préparation et alignement	52
7.1.1 Préparation	52
7.1.2 Alignement d'un hydrophone	52
7.1.3 Alignement d'un transducteur ultrasonore et d'un hydrophone	54

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
INTRODUCTION	9
Clause	
1 Scope	11
2 Normative references	11
3 Definitions	13
4 List of symbols	33
5 Measurement requirements	37
5.1 Requirements for hydrophones and amplifiers	37
5.1.1 General	37
5.1.2 Sensitivity of a hydrophone	37
5.1.3 Directional response of a hydrophone	39
5.1.4 Effective radius of a hydrophone active element	39
5.1.5 Choice of the size of a hydrophone active element	41
5.1.6 Bandwidth	43
5.1.7 Linearity	43
5.1.8 Hydrophone signal amplifier	43
5.2 Requirements for positioning systems and water baths	45
5.2.1 Positioning systems	45
5.2.2 Water bath	47
5.3 Requirements for measurement systems	49
5.4 Recommendations for ultrasonic equipment being characterised	51
6 Specification of performance for hydrophones and amplifiers	51
6.1 Sensitivity	51
6.2 Effective radius	53
6.3 Hydrophone linearity	53
6.4 Hydrophone amplifiers	53
7 Measurement procedures	53
7.1 Preparation and alignment	53
7.1.1 Preparation	53
7.1.2 Aligning a hydrophone	53
7.1.3 Aligning an ultrasonic transducer and hydrophone	55

Articles	Pages
8 Caractérisation du faisceau	56
8.1 Paramètres primaires de pression	56
8.1.1 Pression acoustique positive crête et négative crête	58
8.1.2 Pression acoustique moyenne sur l'impulsion	58
8.1.3 Pression acoustique crête spatiale moyenne sur l'impulsion	58
8.1.4 Pression acoustique efficace crête spatiale	58
8.1.5 Pression acoustique moyenne sur le faisceau et sur l'impulsion	60
8.1.6 Pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau	62
8.1.7 Pression acoustique moyenne spatiale et sur l'impulsion	62
8.1.8 Pression acoustique efficace moyenne spatiale	62
8.1.9 Paramètres de propagation non linéaire	62
8.2 Paramètres d'intensité dérivés	64
8.3 Paramètres d'intégrale d'intensité sur l'impulsion dérivés	66
9 Spécification et marquage de la puissance acoustique émise	66
 Annexes	
A (informative)	70
A.1 Hydrophones	70
A.1.1 Considérations de charge électrique	70
A.1.2 Amplificateur de signal d'hydrophone	72
A.1.3 Alignement des hydrophones	74
A.1.4 Types d'hydrophones	74
A.1.4.1 Hydrophones à sonde céramique	74
A.1.4.2 Hydrophones à sonde PVDF	76
A.1.4.3 Hydrophones à membrane PVDF	76
A.1.4.4 Comparaison de fonctionnement des différents types	76
A.1.5 Exemples de spécifications pour les hydrophones	78
B (informative)	80
B.1 Pression acoustique et intensité	80
C (informative)	82
C.1 Systèmes de positionnement des transducteurs et hydrophones	82
D (informative)	84
Justificatif	84
Bibliographie	90
Figures	92

Clause	Page
8 Beam characterisation	57
8.1 Primary pressure parameters	57
8.1.1 Peak-positive and peak-negative acoustic pressure	59
8.1.2 Pulse acoustic pressure	59
8.1.3 Spatial-peak pulse acoustic pressure	59
8.1.4 Spatial-peak r.m.s. acoustic pressure	59
8.1.5 Beam-average pulse acoustic pressure	61
8.1.6 Beam-average r.m.s. acoustic pressure	63
8.1.7 Spatial-average pulse acoustic pressure	63
8.1.8 Spatial-average r.m.s. acoustic pressure	63
8.1.9 Nonlinear propagation parameter	63
8.2 Derived intensity parameters	65
8.3 Derived pulse-intensity integral parameters	67
9 Acoustic output specification and labelling	67
Annexes	
A (informative)	71
A.1 Hydrophones	71
A.1.1 Electrical loading considerations	71
A.1.2 Hydrophone signal amplifier	73
A.1.3 Alignment of hydrophones	75
A.1.4 Types of hydrophone	75
A.1.4.1 Ceramic probe hydrophones	75
A.1.4.2 PVDF probe hydrophones	77
A.1.4.3 PVDF membrane hydrophones	77
A.1.4.4 Relative performance of different types	77
A.1.5 Typical specification data for hydrophones	79
B (informative)	81
B.1 Acoustic pressure and intensity	81
C (informative)	83
C.1 Transducer and hydrophone positioning systems	83
D (informative)	85
Rationale	85
Bibliography	90
Figures	93

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MESURAGE ET CARACTÉRISATION DES CHAMPS ULTRASONORES À L'AIDE D'HYDROPHONES DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES DE 0,5 MHz À 15 MHz

AVANT-PROPOS

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

La présente Norme internationale a été établie par le Comité d'Etudes n° 87 de la CEI: Ultrasons.

Le texte de cette Norme internationale est issu du document suivant:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
87(BC)6	87(BC)8

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette Norme internationale prescrit des caractéristiques de fonctionnement additionnelles à celles existantes dans le document CEI 866.

Les annexes n'ont qu'un caractère informatif.

Dans la présente norme, les caractères d'imprimerie suivants sont employés:

- prescriptions et définitions: caractères romains;
- NOTES: petits caractères romains;
- conformité: caractères italiques;
- termes définis à l'article 3 et utilisés dans toute cette norme: caractères gras romains minuscules.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENT AND CHARACTERISATION OF
ULTRASONIC FIELDS USING HYDROPHONES IN THE
FREQUENCY RANGE 0,5 MHz TO 15 MHz****FOREWORD**

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

This International Standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 87: Ultrasonics.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting
87(CO)6	87(CO)8

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the Voting Report indicated in the above table.

This International Standard sets out requirements for the performance of ultrasonic hydrophones in addition to those given in IEC 866.

All annexes are informative.

In this standard, the following print types are used:

- requirements and definitions: in roman type;
- NOTES: in smaller roman type;
- *compliance*: in italic type;
- terms used throughout this standard which have been defined in clause 3: small case roman bold type.

INTRODUCTION

L'objectif principal de la présente Norme internationale est de définir divers paramètres acoustiques susceptibles d'être utilisés en vue de spécifier et de caractériser les champs ultrasonores se propageant dans les fluides, et en particulier dans l'eau, à l'aide d'hydrophones. Des procédures de mesurage sont décrites qui peuvent être utilisées pour définir ces paramètres. La présente Norme internationale et la Norme de Sécurité AIUM/NEMA [1] comportent de nombreux éléments communs. Toutefois, bien que l'on se soit efforcé de maintenir la cohérence la plus complète avec cette dernière norme, il existe des différences conceptuelles fondamentales.

La philosophie à l'origine de la présente Norme internationale consiste à spécifier le champ acoustique sous forme de paramètres de pression acoustique, cette dernière constituant la grandeur mesurable la plus importante lorsque l'on utilise des hydrophones pour caractériser le champ. Si d'autres dispositifs de mesurage doivent être utilisés à l'avenir, une nouvelle norme devra, certes, être élaborée avec des définitions et procédures complémentaires. Des thermistors ou thermocouples sont des exemples de tels dispositifs.

Des paramètres d'intensité similaires à ceux qui sont donnés en [1] sont spécifiés dans la présente norme, mais ils sont considérés comme des quantités dérivées qui n'ont de signification que dans le cadre de certaines hypothèses associées au champ ultrasonore mesuré.

Les méthodes simplifiées alternatives qui pourraient être utilisées dans les conditions qui nécessitent moins d'exactitude, seront données dans un guide de la CEI (à l'étude).

IECNORM.COM: Click to view full document

INTRODUCTION

The main purpose of this International Standard is to define various acoustic parameters which can be used to specify and characterise ultrasonic fields propagating in liquids, and in particular water, using hydrophones. Measurement procedures are outlined which may be used to determine these parameters. There is much in common between this International Standard and the AIUM/NEMA Safety Standard [1]. However, whilst every effort has been made to try to maintain consistency with the AIUM/NEMA Standard, there are fundamental differences in approach.

The philosophy behind this International Standard is the specification of the acoustic field in terms of acoustic pressure parameters, acoustic pressure being the primary measurement quantity when hydrophones are used to characterise the field. Of course, if other measurement devices come into use in the future, a new International Standard with additional definitions and procedures will be necessary. Examples of such devices would be thermistors or thermocouples.

Intensity parameters similar to those given in [1] are specified in this International Standard, but these are regarded as derived quantities which are meaningful only under certain assumptions related to the ultrasonic field being measured.

Alternative simplified procedures that may be used when less accuracy is required will be given in an IEC Guidance Document (in preparation).

MESURAGE ET CARACTÉRISATION DES CHAMPS ULTRASONOORES À L'AIDE D'HYDROPHONES DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES DE 0,5 MHz À 15 MHz

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique à l'utilisation d'hydrophones piézoélectriques étalonnés pour le mesurage dans les liquides des champs acoustiques produits par du matériel médical ultrasonore fonctionnant dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz.

L'objet de cette Norme internationale est de :

- Définir un groupe de paramètres acoustiques pouvant être mesurés physiquement de manière adéquate.
- Définir un second groupe de paramètres pouvant être déduits, sous certaines hypothèses, de ces mesurages et appelés paramètres d'intensité dérivés.
- Définir une procédure de mesurage pouvant être utilisée en vue de définir des paramètres de pression acoustique.
- Définir les conditions dans lesquelles les mesurages des paramètres acoustiques peuvent être effectués dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz à l'aide d'hydrophones piézoélectriques étalonnés.

NOTE - Les unités SI normalisées sont utilisées dans l'ensemble de la présente norme. Il peut s'avérer commode d'employer d'autres unités pour la définition de certains paramètres tels que les aires du faisceau et intensités. Par exemple, l'aire du faisceau peut être indiquée en cm^2 et les intensités en W/cm^2 ou mW/cm^2 .

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur cette Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 50(801): *Vocabulaire Electrotechnique International VEI, Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique (1984)*.

CEI 469-1: 1987, *Technique des impulsions et appareils - Première partie: Termes et définitions concernant les impulsions*.

CEI 854: 1986, *Méthode de mesure des caractéristiques des appareils à impulsions ultrasonores utilisés pour le diagnostic*.

CEI 866: 1987, *Caractéristiques et étalonnage des hydrophones fonctionnant dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz*.

MEASUREMENT AND CHARACTERISATION OF ULTRASONIC FIELDS USING HYDROPHONES IN THE FREQUENCY RANGE 0,5 MHz TO 15 MHz

1 Scope

This International Standard specifies the methods of use of calibrated piezoelectric hydrophones for the measurement in liquids of acoustic fields generated by ultrasonic medical equipment operating in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz.

The objectives of this International Standard are

- To define a group of acoustic parameters which can be measured on a physically sound basis.
- To define a second group of parameters which can be derived under certain assumptions from these measurements, and called derived intensity parameters.
- To define a measurement procedure which may be used for the determination of acoustic pressure parameters.
- To define the conditions under which the measurements of acoustic parameters can be made in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz using calibrated piezoelectric hydrophones.

NOTE - Throughout this International Standard SI units are used. In the specification of certain parameters, such as beam-areas and intensities, it may be convenient to use other units. For example, beam-area may be specified in cm^2 and intensities in W/cm^2 or mW/cm^2 .

2 Normative references

The following standards contains provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 50(801): *International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 801: Acoustics and electro-acoustics* (1984).

IEC 469-1: 1987, *Pulse techniques and apparatus - Part 1: Pulse terms and definitions*.

IEC 854: 1986, *Methods of measuring the performance of ultrasonic pulse-echo diagnostic equipment*.

IEC 866: 1987, *Characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*.

3 Définitions

Pour le besoin de la présente Norme Internationale, les définitions suivantes s'appliquent:

3.1 facteur acoustique de crête: Rapport de la pression acoustique crête spatiale crête temporelle à la pression acoustique efficace à la position correspondant à la pression acoustique crête spatiale crête temporelle dans un champ acoustique. La pression acoustique efficace est calculée sur le cycle d'impulsion de crête.

3.2 forme d'onde d'impulsion acoustique: Forme d'onde temporelle de la pression acoustique instantanée en un point spécifié du champ acoustique, visualisée sur une période suffisamment longue pour comporter toute l'information acoustique importante dans une impulsion ou une salve sonore unique ou encore une ou plusieurs alternances d'une onde entretenue. Se reporter au 2.3.1 de la CEI 469-1.

3.3 période de répétition acoustique: Égale à la période de répétition d'impulsion pour les ensembles à balayage non automatique et à la période de répétition de balayage pour les ensembles à balayage automatique, est aussi égale à la période pour une onde entretenue.

Unité: seconde, s.

3.4 fréquence de fonctionnement acoustique (awf): Fréquence d'un signal acoustique basé sur l'observation de la sortie d'un hydrophone placé dans un champ acoustique au point correspondant à la pression acoustique crête spatiale crête temporelle. Le signal est analysé soit à l'aide de la «méthode de passage à zéro», soit par l'analyse spectrale. Les fréquences acoustiques de fonctionnement sont spécifiées ci-dessous.

3.4.1 Fréquence acoustique de fonctionnement par passage au zéro

La fréquence par passage au zéro est définie conformément aux procédures décrites dans la CEI 854.

En cas d'utilisation de la méthode de l'analyse de spectre, la pression acoustique est représentée comme une fonction de la fréquence. Trois méthodes différentes existent pour évaluer la fréquence acoustique de fonctionnement (les méthodes sont explicitées en figure 1) :

3.4.2 Méthode de la moyenne arithmétique

La fréquence de fonctionnement, en valeur arithmétique moyenne, est égale à la valeur de la moyenne arithmétique des valeurs des fréquences f_1 et f_2 du spectre pour lesquelles l'amplitude de pression acoustique a une valeur inférieure de 3 dB à sa valeur de crête.

3.4.3 Méthode de la moyenne géométrique

La valeur de la fréquence de fonctionnement est la moyenne géométrique des valeurs des fréquences f_1 et f_2 définies comme ci-dessus.

3.4.4 Méthode de la valeur modale

La valeur de la fréquence de fonctionnement est celle de la fréquence correspondant à l'amplitude maximale dans le spectre de pression acoustique.

3 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply.

3.1 acoustic pulse crest factor: Ratio of the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure to the r.m.s. acoustic pressure calculated over the pulse-peak cycle. Both pressures are measured at the position in the acoustic field corresponding to the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure.

3.2 acoustic pulse waveform: Temporal waveform of the instantaneous acoustic pressure at a specified position in an acoustic field and displayed over a period sufficiently long to include all significant acoustic information in a single pulse or tone-burst, or one or more cycles in a continuous wave. See 2.3.1 of IEC 609-1

3.3 acoustic repetition period: Pulse repetition period for non-automatic scanning systems and the scan repetition period for automatic scanning systems. Equal to the time interval between consecutive cycles for continuous-wave systems.

Unit: second, s.

3.4 acoustic-working frequency (awf): Frequency of an acoustic signal based on the observation of the output of a hydrophone placed in an acoustic field at the position corresponding to the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure. The signal is analysed either using the zero-crossing frequency technique or using a spectrum analysis method. The following acoustic-working frequencies are defined:

3.4.1 Zero-crossing acoustic-working frequency

This is determined according to the procedure described in IEC 854.

For the spectral analysis method the acoustic pressure versus frequency is displayed and there are three different methods of deriving the acoustic-working frequency which, referring to figure 1, are:

3.4.2 Arithmetic-mean acoustic-working frequency

The arithmetic mean of the frequencies f_1 and f_2 at which the amplitude of the acoustic pressure spectrum is 3 dB below the peak amplitude.

3.4.3 Geometric-mean acoustic-working frequency

The geometrical mean of the frequencies f_1 and f_2 .

3.4.4 Modal acoustic-working frequency

The frequency corresponding to the maximum amplitude in the acoustic pressure spectrum.

NOTE - La fréquence acoustique de fonctionnement (en valeur moyenne arithmétique) équivaut à la fréquence centrale du document [1].

Symbol: f_{awf}
Unité: hertz, Hz.

3.5 axe d'alignement du faisceau: Cette notion est utilisée exclusivement aux fins d'alignement et correspond à une ligne droite reliant deux points de **pression acoustique crête spatiale crête temporelle** sur deux surfaces hémisphériques dont les centres sont approximativement au centre géométrique d'un **transducteur ultrasonore ou d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores**. Un hémisphère a un rayon de courbure d'environ $A_g/\pi\lambda$, formule dans laquelle A_g est l'aire géométrique du transducteur ultrasonore ou du groupe d'éléments transducteurs ultrasonores et λ est la longueur d'onde acoustique correspondant à la fréquence nominale. Le second hémisphère a un rayon de courbure soit de $2A_g/\pi\lambda$, soit de $A_g/3\pi\lambda$, la plus adéquate de ces deux formules étant retenue. Aux fins d'alignement, cette ligne peut être projetée sur la face du transducteur ultrasonore ou du groupe d'éléments transducteurs ultrasonores.

Pour la plupart des applications pratiques, on utilise deux surfaces planes perpendiculaires à la direction de propagation des ultrasons. Lorsqu'il n'y a pas un point unique de valeur crête sur une surface hémisphérique, une autre surface hémisphérique est choisie, avec un rayon de courbure différent donnant un point unique. (Voir figure 2.)

3.6 aire du faisceau: L'aire du faisceau est la mesure de la surface, mesurée dans un plan spécifié perpendiculaire à l'axe d'alignement du faisceau, contenant tous les points pour lesquels l'intégrale sur l'impulsion du carré de la pression acoustique est supérieure à une fraction spécifiée de la valeur maximale de l'intégrale sur l'impulsion du carré de la pression acoustique dans ce plan. Si la position du plan n'est pas spécifiée, c'est le plan passant par le point de **pression acoustique crête spatiale crête temporelle** pour l'ensemble du champ acoustique qui est considéré.

Le niveau spécifié est de 0,25 et 0,01 pour les aires du faisceau à -6 dB et -20 dB respectivement.

NOTE - L'aire du faisceau peut être constituée de plusieurs surfaces élémentaires.

Symbol: A_b
Unité: mètre carré, m^2 .

3.7 pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion: Pression acoustique moyenne sur l'impulsion d'un transducteur ultrasonore ou d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores moyennée sur une aire du faisceau à -6 dB dans un plan spécifié ou dans un plan contenant la **pression acoustique crête spatiale crête temporelle** pour le transducteur ultrasonore ou le groupe d'éléments transducteurs ultrasonores concerné.

NOTE - On utilise couramment une aire du faisceau à -6 dB. Toutefois, d'autres aires du faisceau peuvent être utilisées (voir 3.6).

Symbol: P_{bap}
Unité: pascal, Pa.

NOTE - Arithmetic-mean acoustic-working frequency is equivalent to center frequency in [1].

Symbol: f_{awf}
Unit: hertz, Hz.

3.5 beam-alignment axis: Used for alignment purposes only, beam-alignment axis is a straight line joining two points of spatial-peak temporal-peak acoustic pressure on two hemispherical surfaces whose centres are at the approximate geometrical centre of an ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group. One hemisphere has a radius of curvature of approximately $A_g/\pi\lambda$, where A_g is the geometrical area of the ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group and λ is the wavelength of the ultrasound corresponding to the nominal frequency. The second hemisphere has a radius of curvature either $2A_g/\pi\lambda$, or $A_g/3\pi\lambda$, whichever is the more appropriate. For the purposes of alignment, this line may be projected to the face of the ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group.

For most practical applications, two plane surfaces perpendicular to the direction of propagation of the ultrasound are used. In cases where a unique peak is not located on a hemispherical surface, another hemispherical surface is chosen with a different radius of curvature yielding a unique peak. (See figure 2.)

3.6 beam-area: Area in a specified plane perpendicular to the beam alignment axis consisting of all points at which the pulse-pressure-squared integral is greater than a specified fraction of the maximum value of the pulse-pressure-squared integral in that plane. If the position of the plane is not specified, it is the plane passing through the point of spatial-peak temporal-peak acoustic pressure in the whole acoustic field.

The specified levels are 0,25 and 0,01 for the –6 dB and –20 dB beam-areas respectively.

NOTE - The beam-area may be composed of several sections.

Symbol: A_b
Unit: metre squared, m^2 .

3.7 beam-average pulse acoustic pressure: Pulse acoustic pressure from one ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group averaged over the –6 dB beam-area in a specified plane or in a plane containing the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure for that particular ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group.

NOTE - –6 dB beam-area is commonly used. However, other beam-areas may be used (see 3.6).

Symbol: p_{bap}
Unit: pascal, Pa.

3.8 intensité moyenne sur le faisceau moyen sur l'impulsion: intensité moyenne sur l'impulsion d'un transducteur ultrasonore ou d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores moyennée sur l'aire du faisceau à -6 dB dans un plan spécifié ou dans un plan contenant la pression acoustique crête spatiale crête temporelle pour le transducteur ultrasonore ou le groupe d'éléments transducteurs ultrasonores concerné.

NOTE - On utilise couramment une aire du faisceau à -6 dB. Toutefois, d'autres aires peuvent être utilisées (voir 3.6).

Symbol: I_{bapa}

Unité: watt par mètre carré, W/m^2 .

3.9 pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau: Pression acoustique efficace d'un transducteur ultrasonore ou d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores moyennée sur une aire du faisceau à -6 dB dans un plan spécifié ou dans un plan contenant la pression acoustique crête spatiale crête temporelle pour le transducteur ultrasonore ou le groupe d'éléments transducteurs ultrasonores concerné.

NOTE - Une aire du faisceau à -6 dB est couramment utilisée. Toutefois, d'autres aires du faisceau peuvent l'être également (voir 3.6).

Symbol: P_{bar}

Unité: pascal, Pa.

3.10 intensité moyenne sur le faisceau moyen temporelle: Intensité moyenne temporelle d'un transducteur ultrasonore ou d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores moyennée sur l'aire du faisceau à -6 dB dans un plan spécifié ou dans un plan contenant la pression acoustique crête spatiale crête temporelle pour le transducteur ultrasonore ou le groupe d'éléments transducteurs ultrasonores concerné.

NOTE - L'aire du faisceau à -6 dB est couramment utilisée. Toutefois, d'autres aires du faisceau peuvent l'être également (voir 3.6).

Symbol: I_{bata}

Unité: watt par mètre carré, W/m^2 .

3.11 axe de balayage: Ligne de balayage ultrasonore la plus proche de l'axe de symétrie du plan de balayage pour les systèmes à exploration automatique.

3.12 surface apparente d'un transducteur ultrasonore: Surface d'un transducteur ultrasonore parfait fonctionnant en piston dont la répartition de pression acoustique axiale prévue équivaut approximativement à la répartition de pression acoustique axiale observée sur une distance axiale limitée, se reporter à la CEI 866.

Symbol: A_1

Unité: mètre carré, m^2 .

3.13 rayon apparent de l'élément actif d'un hydrophone (a): Rayon actif d'un hydrophone récepteur constitué d'un disque rigide ayant une fonction de réponse directionnelle théorique d'ouverture angulaire égale à l'ouverture angulaire observée. L'ouverture angulaire est établie pour un niveau spécifié en-dessous de la valeur de crête de la fonction de réponse directionnelle.

3.8 beam-average pulse-average intensity: Pulse-average intensity from one ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group averaged over the –6 dB beam-area in a specified plane or in a plane containing the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure for that particular ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group.

NOTE - –6 dB beam-area is commonly used. However, other beam-areas may be used (see 3.6).

Symbol: I_{bapa}

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.9 beam-average r.m.s. acoustic pressure: R.M.S. acoustic pressure from one ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group averaged over the –6 dB beam-area in a specified plane or in a plane containing the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure for that particular ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group.

NOTE - –6 dB beam-area is commonly used. However, other beam-areas may be used (see 3.6).

Symbol: p_{bar}

Unit: pascal, Pa.

3.10 beam-average temporal-average intensity: Temporal-average intensity from one ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group averaged over the –6 dB beam-area in a specified plane or in a plane containing the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure for that particular ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group.

NOTE - –6 dB beam-area is commonly used. However, other beam-areas may be used (see 3.6).

Symbol: I_{bata}

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.11 central scan line: For automatic scanning systems, the ultrasonic scan line closest to the symmetry axis of the scan plane.

3.12 effective area of an ultrasonic transducer: Area of a perfect piston-like ultrasonic transducer which has a predicted axial acoustic pressure distribution approximately equivalent to the observed axial acoustic pressure distribution over a limited axial distance, see IEC 866.

Symbol: A_1

Unit: metre squared, m^2 .

3.13 effective radius of a hydrophone active element: Radius of a stiff disc receiver hydrophone which has a predicted directional response function with an angular width equal to the observed angular width. The angular width is determined at a specified level below the peak of the directional response function.

Pour les niveaux spécifiés à 3 dB et 6 dB, les rayons portent respectivement les symboles a_3 et a_6 .

Symbole: a, a_3, a_6
Unité: mètre, m.

3.14 sensibilité en bout de câble d'un hydrophone: Rapport de la tension à l'extrémité d'un câble intégral quelconque ou connecteur d'un hydrophone, relié à une impédance électrique d'entrée spécifiée, à la pression acoustique instantanée du champ libre non perturbé d'une onde plane présente à la position du centre acoustique de l'hydrophone, celui-ci ayant été ôté.

Symbole: M_L
Unité: volt par pascal, V/Pa.

3.15 sensibilité en circuit ouvert en bout de câble d'un hydrophone: Rapport de la tension en circuit ouvert à l'extrémité de tout câble intégral ou connecteur d'un hydrophone à la pression acoustique instantanée dans le champ libre non perturbé d'une onde plane présente à la position du centre acoustique de l'hydrophone, celui-ci ayant été ôté. (Voir la CEI 866.)

NOTE - Cette définition diffère de celle qui a été donnée au 3.8 de la CEI 866 car cette dernière se réfère à un hydrophone ne comportant pas de câble intégral.

Symbole: M_c
Unité: volt par pascal, V/Pa.

3.16 champ lointain: Champ acoustique (sonoïde) situé à distance du transducteur ultrasonore dans lequel les valeurs de la pression acoustique instantanée et la vitesse des particules du fluide sont pratiquement en phase, voir également 801-03-30 de la CEI 50(801)

Dans le cadre de la présente norme, bien qu'elle concerne strictement les transducteurs ultrasonores plans, le champ lointain est à une distance supérieure à $A_1/\pi\lambda$, formule dans laquelle A_1 est la surface apparente du transducteur ultrasonore ou du groupe d'éléments transducteurs ultrasonores, et λ est la longueur d'onde acoustique correspondant à la fréquence acoustique de fonctionnement.

3.17 aire géométrique d'un transducteur ultrasonore: Aire définie par les dimensions d'un transducteur ultrasonore ou par celles d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores.

Symbole: A_g
Unité: mètre carré, m^2 .

3.18 rayon géométrique d'un élément actif d'un hydrophone (a_g): Rayon défini par les dimensions de l'élément actif d'un hydrophone.

Symbole: a_g
Unité: mètre, m.

For the specified levels of 3 dB and 6 dB, the radii are denoted by a_3 and a_6 respectively.

Symbols: a , a_3 , a_6
Unit: metre, m.

3.14 end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone: Ratio of the voltage at the end of any integral cable or connector of a hydrophone, when connected to a specified electrical input impedance, to the instantaneous acoustic pressure in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the acoustic centre of the hydrophone if the hydrophone were removed.

Symbol: M_L
Unit: volt per pascal, V/Pa.

3.15 end-of-cable open-circuit sensitivity of a hydrophone: Ratio of the open-circuit voltage at the end of any integral cable or connector of a hydrophone to the instantaneous acoustic pressure in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the acoustic centre of the hydrophone if the hydrophone were removed, see IEC 866.

NOTE - This definition differs from that given in 3.8 of IEC 866 as the latter refers to a hydrophone excluding any integral cable.

Symbol: M_c
Unit: volt per pascal, V/Pa.

3.16 far field: Acoustic (sound) field at distances from an ultrasonic transducer where the values of the instantaneous acoustic pressure and particle velocity are substantially in phase, see also 801-03-30 of IEC 50(801).

For the purposes of this International Standard, although strictly for planar ultrasonic transducers, the far field is at a distance greater than $A_1/\pi\lambda$, where A_1 is the effective area of the ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group and λ is the wavelength of the ultrasound corresponding to the acoustic-working frequency.

3.17 geometrical area of an ultrasonic transducer: Area defined by the ultrasonic transducer dimensions or ultrasonic transducer element group dimensions.

Symbol: A_g
Unit: metre squared, m^2 .

3.18 geometrical radius of a hydrophone active element: Radius defined by the dimensions of the active element of a hydrophone.

Symbol: a_g
Unit: metre, m.

3.19 hydrophone: Transducteur produisant des signaux électriques en réponse à des signaux acoustiques transmis dans l'eau, voir 801-12-26 de la Publication CEI 50(801) et également la CEI 866.

3.20 pression acoustique instantanée: Valeur de l'amplitude de pression moins la pression ambiante à l'instant défini et en un point particulier d'un champ acoustique (voir également 801-01-19 de la Publication CEI 50(801)).

Symbol: p

Unité: pascal, Pa.

3.21 intensité instantanée: Energie acoustique transmise par unité de temps dans le sens de la propagation de l'onde acoustique par unité de surface normale à cette direction à un instant défini et en un point particulier du champ acoustique.

On ne peut établir l'intensité instantanée vraie. Toutefois, pour des raisons historiques, il est préférable, dans la présente norme, de déduire certains paramètres d'intensité des mesurages par hydrophone. Par conséquent, pour les mesures évoqués dans la présente norme, et si l'on peut raisonnablement supposer l'existence de conditions de champ lointain, l'intensité instantanée I s'exprime par la formule suivante:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

où:

p est la pression acoustique instantanée;

ρ est la densité du milieu;

c est la vitesse du son dans ce milieu.

Symbol: I

Unité: watt par mètre carré, W/m².

3.22 pression acoustique moyenne sur le cycle de crête: Moyenne arithmétique de la pression acoustique instantanée maximale positive et du module de la pression négative maximale en valeur absolue au cours d'un cycle crête d'impulsion.

Symbol: P_m

Unité: pascal, Pa.

3.23 champ proche: Dans le cadre de la présente norme, le champ proche est la région du champ acoustique proche du transducteur ultrasonore dans laquelle la phase relative de la pression acoustique instantanée et de la vitesse de particules varie de façon continue avec la position dans le champ acoustique.

Pour les transducteurs plans, il se situe à une distance inférieure à $A_1/\pi\lambda$, formule dans laquelle A_1 est l'aire apparente du transducteur ultrasonore ou du groupe d'éléments transducteurs ultrasonores et λ est la longueur d'onde acoustique correspondant à la fréquence acoustique de fonctionnement.

3.24 fréquence nominale: Fréquence ultrasonore de fonctionnement d'un transducteur ultrasonore ou d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores indiquée par le concepteur ou le fabricant. (Voir CEI 854.)

3.19 hydrophone: Transducer that produces electrical signals in response to waterborne acoustic signals, see also 801-12-26 of IEC 50(801) and also IEC 866.

3.20 instantaneous acoustic pressure; instantaneous sound pressure: Pressure amplitude minus the ambient pressure at a particular instant in time and at a particular point in an acoustic field, see also 801-01-19 of IEC 50(801).

Symbol: p

Unit: pascal, Pa.

3.21 Instantaneous Intensity: Acoustic energy transmitted per unit time in the direction of acoustic wave propagation per unit area normal to this direction at a particular instant in time and at a particular point in an acoustic field.

It is not possible to measure the true instantaneous intensity. However, for historical reasons, it is preferable in this International Standard to derive certain intensity parameters from hydrophone measurements. Therefore, for the measurement purposes referred to in this International Standard, and if it is reasonable to assume far field conditions, the instantaneous intensity, I is expressed as

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

where:

p is the instantaneous acoustic pressure;

ρ is the density of the medium;

c is the velocity of sound in the medium.

Symbol: I

Unit: watt per metre squared, W/m².

3.22 mean-peak-cycle acoustic pressure: Arithmetic mean of the maximum positive and modulus of the maximum negative instantaneous acoustic pressure during a pulse-peak cycle.

Symbol: p_m

Unit: pascal, Pa.

3.23 near field: For the purposes of this International Standard, the region of the acoustic (sound) near field an ultrasonic transducer where the relative phase of the instantaneous acoustic pressure and the particle velocity is continually changing with position in the acoustic (sound) field.

For planar transducers, this is at a distance less than $A_1/\pi\lambda$, where A_1 is the effective area of the ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group and λ is the wavelength of the ultrasound corresponding to the acoustic-working frequency.

3.24 nominal frequency: Ultrasonic frequency of operation of an ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group quoted by the designer or manufacturer, see IEC 854.

3.25 paramètre de propagation non linéaire: Indice permettant de prédire la distorsion non linéaire des ultrasons pour un transducteur ultrasonore particulier, et donné par σ_m dans la formule suivante:

$$\sigma_m = \frac{\beta \omega l_1}{\rho c^3} p_m \frac{1}{(F_g - 1)^{1/2}} \ln ((F_g - 1)^{1/2} + F_g^{1/2})$$

où:

β est le paramètre de non-linéarité ($\beta = 1 + B/2A = 3,5$ pour l'eau pure à 20 °C [2]);

ω est la fréquence angulaire ($\omega = 2\pi f_{awf}$ dans laquelle f_{awf} est la fréquence acoustique de fonctionnement);

l_1 est la distance de la face du transducteur ultrasonore au plan contenant le point de pression acoustique crête spatiale crête temporelle;

F_g est égal à 0,69 fois le rapport de l'aire géométrique du transducteur ultrasonore à l'aire du faisceau à -6 dB;

p_m est la pression acoustique moyenne sur le cycle de crête au point du champ acoustique correspondant à la pression acoustique crête spatiale crête temporelle.

Symbol: σ_m

NOTE - L'équation donnée ci-dessus s'applique aux champs ultrasonores dans lesquels $F_g > 2,1$. La spécification d'un indice correspondant à $F_g \leq 2,1$ est à l'étude.

3.26 pression acoustique négative de crête; dépression acoustique de crête: Maximum du module de la pression acoustique instantanée négative dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié au cours d'une période de répétition acoustique. La pression acoustique négative de crête s'exprime par un nombre positif.

Symbol: p_- (ou p_r)
Unité: pascal, Pa.

3.27 pression acoustique positive de crête; compression acoustique de crête: pression acoustique instantanée positive maximale dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié au cours d'une période de répétition acoustique.

Symbol: p_+ (ou p_c)
Unité: pascal, Pa.

3.28 pression acoustique moyenne sur l'impulsion: Racine carrée du rapport de l'intégrale sur l'impulsion du carré de la pression acoustique à la durée d'impulsion en un point particulier d'un champ acoustique.

Symbol: p_p
Unité: pascal, Pa.

3.29 intensité moyenne sur l'impulsion: Rapport de l'intégrale sur l'impulsion de l'intensité acoustique à la durée d'impulsion en un point particulier d'un champ acoustique.

Unité: watt par mètre carré, W/m².

3.25 nonlinear propagation parameter: Index which permits the prediction of nonlinear distortion of ultrasound for a specific ultrasonic transducer, and is given by σ_m from:

$$\sigma_m = \frac{\beta \omega l_1}{\rho c^3} \quad p_m \frac{1}{(F_g - 1)^{1/2}} \quad \ln ((F_g - 1)^{1/2} + F_g^{1/2})$$

where:

β is the nonlinearity parameter ($\beta = 1 + B/2A = 3,5$ for pure water at 20 °C [2]);

ω is the angular frequency ($\omega = 2\pi f_{awf}$ where f_{awf} is the acoustic-working frequency);

l_1 is the distance from the face of the ultrasonic transducer to the plane containing the point of spatial-peak temporal-peak acoustic pressure;

F_g is 0,69 times the ratio of the geometrical area of the ultrasonic transducer to the -6 dB beam-area;

p_m is the mean-peak-cycle acoustic pressure at the point in the acoustic field corresponding to the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure.

Symbol: σ_m

NOTE - The equation given above is applicable to ultrasonic fields in which $F_g > 2,1$. The specification of an index to cover $F_g \leq 2,1$ is under consideration.

3.26 peak-negative acoustic pressure; peak-rarefactional acoustic pressure: Maximum of the modulus of the negative instantaneous acoustic pressure in an acoustic field or in a specified plane during an acoustic repetition period. Peak-negative acoustic pressure is expressed as a positive number.

Symbol: p_- (or p_r)

Unit: pascal, Pa.

3.27 peak-positive acoustic pressure; peak-compressional acoustic pressure: Maximum positive instantaneous acoustic pressure in an acoustic field or in a specified plane during an acoustic repetition period.

Symbol: p_+ (or p_c)

Unit: pascal, Pa.

3.28 pulse acoustic pressure: Square root of the ratio of the pulse-pressure-squared integral to the pulse duration at a particular point in an acoustic field.

Symbol: p_p

Unit: pascal, Pa.

3.29 pulse-average Intensity: Ratio of the pulse-Intensity integral to the pulse duration at a particular point in an acoustic field.

Unit: watt per metre squared, W/m².

3.30 durée d'impulsion: Égale à 1,25 fois l'intervalle entre l'instant où l'intégrale sur le temps du carré de la pression acoustique instantanée atteint 10 % et l'instant où cette intégrale vaut 90 % de sa valeur finale. Cette valeur finale de l'intégrale sur le temps du carré de la pression acoustique instantanée est celle de l'intégrale sur l'impulsion du carré de la pression.

Symbol: t_d
Unité: seconde, s.

3.31 intégrale sur l'impulsion de l'intensité: Intégrale sur le temps de l'intensité instantanée en un point particulier d'un champ acoustique intégrée sur la forme d'onde de l'impulsion acoustique.

NOTE - Pour tout mesurage évoqué dans la présente Norme internationale, l'intégrale sur l'impulsion de l'intensité est proportionnelle à l'intégrale sur l'impulsion du carré de la pression.

Symbol: I_{pi}
Unité: Joule par mètre carré, J/m².

3.32 cycle de crête de l'impulsion: Cycle unique d'une forme d'onde de l'impulsion acoustique entre deux points de pression acoustique instantanée nulle. Ce cycle unique est constitué du demi-cycle contenant la pression acoustique crête temporelle et de celui des deux demi-cycles voisins qui contient la pression acoustique instantanée de crête la plus importante.

3.33 intégrale sur l'impulsion du carré de la pression: Intégrale sur le temps du carré de la pression acoustique instantanée en un point particulier d'un champ acoustique intégré sur la forme d'onde de l'impulsion acoustique.

Symbol: P_i
Unité: pascal au carré seconde, Pa².s.

3.34 période de répétition de l'impulsion: Intervalle de temps entre deux impulsions successives ou salves sonores. Elle s'applique à des ensembles à balayage non automatique à élément unique et à des ensembles à balayage automatique. Voir également le 5.3.2.1 de la CEI 469-1.

Unité: seconde, s.

3.35 fréquence de répétition (p.r.r.): Inverse de la période de répétition. Voir également le 5.3.2.2 de la CEI 469-1.

Symbol: prr
Unité: Hertz, Hz.

3.36 pression acoustique efficace: Moyenne quadratique de la pression acoustique instantanée en un point particulier d'un champ acoustique. La moyenne doit être prise sur un nombre entier de périodes de répétition acoustique, sauf indications contraires.

Symbol: P_{rms}
Unité: pascal, Pa.

3.30 pulse duration: 1,25 times the interval between the time when the time integral of the square of the instantaneous acoustic pressure reaches 10 per cent and 90 per cent of its final value. The final value of the time integral of the square of the instantaneous acoustic pressure is the pulse-pressure-squared integral.

Symbol: t_d
Unit: second, s.

3.31 pulse-intensity integral: Time integral of the instantaneous intensity at a particular point in an acoustic field integrated over the acoustic pulse waveform.

NOTE - For many measurement purposes referred to in this International Standard, pulse-intensity integral is proportional to pulse-pressure-squared integral.

Symbol: I_{pi}
Unit: joule per metre squared, J/m².

3.32 pulse-peak cycle: Single cycle of an acoustic pulse waveform between two points of zero instantaneous acoustic pressure. This single cycle is composed of the half cycle containing the temporal-peak acoustic pressure and whichever of the two adjacent half cycles contains the larger peak instantaneous acoustic pressure.

3.33 pulse-pressure-squared integral: Time integral of the square of the instantaneous acoustic pressure at a particular point in an acoustic field integrated over the acoustic pulse waveform.

Symbol: p_i
Unit: pascal squared second, Pa²s.

3.34 pulse repetition period: Time interval between two successive pulses or tone-bursts. This applies to single element non-automatic scanning systems and automatic scanning systems. See also 5.3.2.1 of IEC 469-1.

Unit: second, s.

3.35 pulse repetition rate (p.r.r.): Inverse of the pulse repetition period. See also 5.3.2.2 of IEC 469-1.

Symbol: prr
Unit: hertz, Hz.

3.36 R.M.S. acoustic pressure: Root mean square (r.m.s.) of the instantaneous acoustic pressure at a particular point in an acoustic field. The mean should be taken over an integral number of acoustic repetition periods unless otherwise specified.

Symbol: p_{rms}
Unit: pascal, Pa.

3.37 aire balayée: Pour les ensembles à balayage automatique, aire de la partie de la surface considérée constituée de tous les points de tout faisceau traversant cette surface au cours de la période de répétition de balayage.

Symbol: A_s
Unité: mètre carré, m^2 .

3.38 plan de balayage: Pour les ensembles à balayage automatique, plan contenant toutes les lignes de balayage ultrasonore.

3.39 période de répétition de balayage: Intervalle de temps entre les points identiques de deux images, secteurs ou balayages successifs. Cette période s'applique exclusivement aux systèmes à balayage automatique.

Unité: seconde, s.

3.40 fréquence de répétition de balayage (s.r.r.): Inverse de la période de répétition de balayage.

Unité: Hertz, Hz.

3.41 pression acoustique moyenne spatiale et sur l'impulsion: Pour les ensembles à balayage non automatique, elle est égale à la pression acoustique moyenne sur le faisceau moyenne sur l'impulsion.

NOTE - La pression acoustique moyenne spatiale et sur l'impulsion ne s'applique pas aux ensembles à balayage automatique, seule la pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion s'applique.

Symbol: p_{sap}
Unité: pascal, Pa.

3.42 intensité moyenne spatiale moyenne sur l'impulsion: Pour les systèmes à balayage non automatique, elle est égale à l'intensité moyenne sur le faisceau moyenne sur l'impulsion.

NOTE - L'intensité moyenne spatiale moyenne sur l'impulsion ne s'applique pas aux ensembles à balayage automatique, seule l'intensité moyenne sur le faisceau moyenne sur l'impulsion s'applique.

Symbol: I_{sapa}
Unité: watt par mètre carré, W/m^2 .

3.43 pression acoustique efficace moyenne spatiale: Pour les ensembles à balayage non automatique, elle est égale à la pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau. Pour les ensembles à balayage automatique, elle est égale à la pression acoustique efficace moyennée sur l'aire balayée, lorsque la pression acoustique efficace est prise sur la période de répétition de balayage.

Symbol: P_{sar}
Unité: pascal, Pa.

3.37 scan-area: For automatic scanning systems, the area on the surface considered consisting of all points within the beam-area of any beam passing through the surface during the scan repetition period.

Symbol: A_s
Unit: metre squared, m^2 .

3.38 scan plane: For automatic scanning systems, a plane containing all the ultrasonic scan lines.

3.39 scan repetition period: Time interval between identical points on two successive frames, sectors or scans. This applies to automatic scanning systems only.

Unit: second, s.

3.40 scan repetition rate (s.r.r.): Inverse of the scan repetition period.

Unit: hertz, Hz.

3.41 spatial-average pulse acoustic pressure: For non-automatic scanning systems, the beam-average pulse acoustic pressure.

NOTE - Spatial-average pulse acoustic pressure does not apply to automatic scanning systems, beam-average pulse acoustic pressure applies only.

Symbol: p_{sap}
Unit: pascal, Pa.

3.42 spatial-average pulse-average intensity: For non-automatic scanning systems, the beam-average pulse-average intensity.

NOTE - Spatial-average pulse-average intensity does not apply to automatic scanning systems, beam-average pulse-average intensity applies only.

Symbol: I_{sap}
Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.43 spatial-average r.m.s. acoustic pressure: For non-automatic scanning systems, the beam-average r.m.s. acoustic pressure. For automatic scanning systems, equal to the r.m.s. acoustic pressure averaged over the scan-area, where the r.m.s. acoustic pressure is taken over the scan repetition period.

Symbol: p_{sar}
Unit: pascal, Pa.

3.44 intensité moyenne spatiale moyenne temporelle: Pour les systèmes à balayage non automatique, elle est égale à l'intensité moyenne sur le faisceau moyenne temporelle. Pour les ensembles à balayage automatique, elle est égale à l'intensité moyenne temporelle moyennée sur l'aire balayée lorsque l'intensité moyenne temporelle est prise sur la période de répétition de balayage.

Symbole: I_{sata}

Unité: watt par mètre carré, W/m^2 .

3.45 intensité crête spatiale moyenne sur l'impulsion: Valeur maximale de l'intensité moyenne sur l'impulsion dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié.

Symbole: I_{sppa}

Unité: watt par mètre carré, W/m^2 .

3.46 intégrale sur l'impulsion de l'intensité crête spatiale: Valeur maximale de l'intégrale sur l'impulsion de l'intensité dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié.

Symbole: I_{sppi}

Unité: joule par mètre carré, J/m^2 .

3.47 pression acoustique crête spatiale moyenne sur l'impulsion: Valeur maximale de la pression acoustique sur l'impulsion dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié.

Symbole: P_{spp}

Unité: pascal, Pa.

3.48 pression acoustique efficace crête spatiale: Valeur maximale de la pression acoustique efficace dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié.

Symbole: P_{spr}

Unité: pascal, Pa.

3.49 intensité crête spatiale moyenne temporelle: Valeur maximale de l'intensité moyenne temporelle dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié.

Symbole: I_{spta}

Unité: watt par mètre carré, W/m^2 .

3.50 pression acoustique crête spatiale crête temporelle (ou pression sonore de crête): La plus grande des deux valeurs suivantes: pression acoustique positive de crête ou pression acoustique négative de crête.

Symbole: P_{sptp}

Unité: pascal, Pa.

3.51 intensité crête spatiale crête temporelle: Valeur maximale de l'intensité crête temporelle dans un champ acoustique ou dans un plan spécifié.

Symbole: I_{sptp}

Unité: watt par mètre carré, W/m^2 .

3.44 spatial-average temporal-average intensity: For non-automatic scanning systems, the beam-average temporal-average intensity. For automatic scanning systems, equal to the temporal-average intensity averaged over the scan-area where the temporal-average intensity is taken over the scan repetition period.

Symbol: I_{sata}

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.45 spatial-peak pulse-average intensity: Maximum value of the pulse-average intensity in an acoustic field or in a specified plane.

Symbol: I_{sppa}

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.46 spatial-peak pulse-intensity integral: Maximum value of the pulse-intensity integral in an acoustic field or in a specified plane.

Symbol: I_{sppi}

Unit: joule per metre squared, J/m^2 .

3.47 spatial-peak pulse acoustic pressure: Maximum value of the pulse acoustic pressure in an acoustic field or in a specified plane.

Symbol: p_{spp}

Unit: pascal, Pa.

3.48 spatial-peak r.m.s. acoustic pressure: Maximum value of the r.m.s. acoustic pressure in an acoustic field or in a specified plane.

Symbol: p_{spr}

Unit: pascal, Pa.

3.49 spatial-peak temporal-average intensity: Maximum value of the temporal-average intensity in an acoustic field or in a specified plane.

Symbol: I_{spta}

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.50 spatial-peak temporal-peak acoustic pressure; peak sound pressure: Larger of the peak-positive acoustic pressure or the peak-negative acoustic pressure.

Symbol: p_{sptp}

Unit: pascal, Pa.

3.51 spatial-peak temporal-peak intensity: Maximum value of the temporal-peak intensity in an acoustic field or in a specified plane.

Symbol: I_{sptp}

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.52 axe de symétrie du plan de balayage: Ligne imaginaire dans le plan de balayage de part et d'autre de laquelle se compte un nombre égal de lignes de balayage ultrasonore.

3.53 intensité moyenne temporelle: Moyenne sur le temps de l'intensité instantanée en un point particulier d'un champ acoustique. La moyenne sur le temps est prise sur un nombre entier de périodes de répétition acoustique, sauf dispositions contraires.

Unité: watt par mètre carré, W/m².

3.54 pression acoustique crête temporelle: Valeur maximale du module de la pression acoustique instantanée en un point particulier d'un champ acoustique.

Symbol: p_0

Unité: pascal, Pa.

3.55 intensité crête temporelle: Valeur maximale de l'intensité instantanée en un point particulier d'un champ acoustique.

Unité: watt par mètre carré, W/m².

3.56 ligne de balayage ultrasonore: Pour les ensembles à balayage automatique, axe d'alignement du faisceau pour un groupe particulier d'éléments transducteurs ultrasonores ou, pour une excitation particulière d'un transducteur ultrasonore ou d'un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores.

3.57 séparation de lignes de balayage ultrasonore: Pour les ensembles à balayage automatique, distance entre les points d'intersection de deux lignes de balayage ultrasonore consécutives du même type avec un plan spécifié.

Symbol: s_s

Unité: mètre, m.

3.58 transducteur ultrasonore: Dispositif permettant de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique dans la gamme de fréquences ultrasonores et/ou réciproquement de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

3.59 dimensions d'un transducteur ultrasonore: Dimensions de la surface de l'élément ou des éléments d'un transducteur ultrasonore.

Unité: mètre, m.

3.60 groupe d'éléments transducteurs ultrasonores: Groupe d'éléments d'un transducteur ultrasonore excités ensemble afin d'engendrer une impulsion acoustique unique.

3.61 dimensions de groupe d'éléments transducteurs ultrasonores: Dimensions de la surface du groupe d'éléments d'un groupe d'éléments d'un transducteur ultrasonore, distance entre les éléments comprise, représentant par conséquent les dimensions hors tout.

Unité: mètre, m.

3.52 symmetry axis of the scan plane: Imaginary line in the scan plane on each side of which an equal number of ultrasonic scan lines occur.

3.53 temporal-average intensity: Time-average of the instantaneous intensity at a particular point in an acoustic field. The time-average is taken over an integral number of acoustic repetition periods, unless otherwise specified.

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.54 temporal-peak acoustic pressure: Maximum value of the modulus of the instantaneous acoustic pressure at a particular point in an acoustic field.

Symbol: p_0
Unit: pascal, Pa.

3.55 temporal-peak intensity: Maximum value of the instantaneous intensity at a particular point in an acoustic field.

Unit: watt per metre squared, W/m^2 .

3.56 ultrasonic scan line: For automatic scanning systems, the beam alignment axis for a particular ultrasonic transducer element group, or for a particular excitation of an ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group.

3.57 ultrasonic scan line separation: For automatic scanning systems, the distance between the points of intersection of two consecutive ultrasonic scan lines of the same type and a specified plane.

Symbol: s_s
Unit: metre, m.

3.58 ultrasonic transducer: Device capable of converting electrical energy to mechanical energy within the ultrasonic frequency range and/or reciprocally of converting mechanical energy to electrical energy.

3.59 ultrasonic transducer dimensions: Dimensions of the surface of the element or elements of an ultrasonic transducer.

Unit: metre, m.

3.60 ultrasonic transducer element group: Group of elements of an ultrasonic transducer which are excited together in order to produce a single acoustic pulse.

3.61 ultrasonic transducer element group dimensions: Dimensions of the surface of the group of elements of an ultrasonic transducer element group which includes the distance between the elements, hence representing the overall dimensions.

Unit: metre, m.

4 Table des symboles

- a Rayon apparent de l'élément actif de l'hydrophone.
- a_g Rayon géométrique d'un élément actif d'un hydrophone.
- a_1 Rayon apparent d'un transducteur ultrasonore.
- a_3, a_6 Rayons apparents de l'élément actif d'un hydrophone, déterminés à partir des mesurages de réponse directionnelle aux niveaux –3 dB et –6 dB.
- a_{\max} Rayon maximum apparent pour une application d'hydrophone spécifique.
- A_1 Aire apparente d'un transducteur ultrasonore.
- A_b Aire du faisceau.
- A_g Aire géométrique d'un transducteur ultrasonore.
- A_s Aire balayée.
- c Vitesse du son dans un liquide (généralement l'eau).
- C Capacité en bout de câble d'un hydrophone.
- C_{el} Capacité d'entrée parallèle d'une charge électrique.
- f_{awf} Fréquence acoustique de fonctionnement.
- F_g = $0,69 \cdot A_g$ / (aire du faisceau à –6 dB).
- I Intensité instantanée.
- I_{bapa} Intensité moyenne sur le faisceau et moyenne sur l'impulsion.
- I_{bata} Intensité moyenne sur le faisceau moyenne temporelle.
- I_{pi} Intégrale d'intensité sur l'impulsion.
- I_{sapa} Intensité moyenne spatiale moyenne sur l'impulsion.
- I_{sata} Intensité moyenne spatiale moyenne temporelle.
- I_{sppa} Intensité crête spatiale moyenne sur l'impulsion.
- I_{sppi} Intégrale sur l'impulsion de l'intensité crête spatiale.
- I_{spta} Intensité crête spatiale moyenne temporelle.

4 List of symbols

- a Effective radius of a hydrophone active element.
- a_g Geometrical radius of a hydrophone active element.
- a_1 Effective radius of an ultrasonic transducer.
- a_3, a_6 Effective radii of the active element of a hydrophone, determined from directional response measurements, at the –3 dB and –6 dB levels.
- a_{\max} Maximum effective radius for a specific hydrophone application.
- A_1 Effective area of an ultrasonic transducer.
- A_b Beam-area.
- A_g Geometrical area of an ultrasonic transducer.
- A_s Scan-area.
- c Velocity of sound in a liquid (usually water).
- C End-of-cable capacitance of a hydrophone.
- C_{el} Parallel input capacitance of an electrical load.
- f_{awf} Acoustic-working frequency.
- F_g = $0,69 \cdot A_g / (-6 \text{ dB beam-area})$.
- I Instantaneous intensity.
- I_{bapa} Beam-average pulse-average intensity.
- I_{bata} Beam-average temporal-average intensity.
- I_{pi} Pulse-intensity integral.
- I_{sapa} Spatial-average pulse-average intensity.
- I_{sata} Spatial-average temporal-average intensity.
- I_{sppa} Spatial-peak pulse-average intensity.
- I_{sppi} Spatial-peak pulse-intensity integral.
- I_{spta} Spatial-peak temporal-average intensity.

I_{sptp}	Intensité crête spatiale crête temporelle.
k	$= 2\pi/\lambda$.
l	Distance entre un hydrophone et un transducteur ultrasonore.
l_1	Distance entre la face d'un transducteur ultrasonore et le plan contenant la pression acoustique crête spatiale crête temporelle.
M_c	Sensibilité au circuit ouvert en bout de câble d'un hydrophone.
M_L	Sensibilité en bout de câble d'un hydrophone.
p	Pression acoustique instantanée.
p_{bar}	Pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau.
p_{bap}	Pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion.
p_i	Intégrale du carré de la pression sur l'impulsion.
p_m	Pression acoustique moyenne sur le cycle de crête.
p_o	Pression acoustique crête temporelle.
prr	Fréquence de récurrence.
P_{sap}	Pression acoustique moyenne spatiale et sur l'impulsion.
p_{sar}	Pression acoustique efficace moyenne spatiale.
p_{spp}	Pression acoustique crête spatiale moyenne sur l'impulsion.
p_{spr}	Pression acoustique efficace crête spatiale.
p_{sptp}	Pression acoustique crête spatiale crête temporelle.
p_p	Pression acoustique moyenne sur l'impulsion.
p_{rms}	Pression acoustique efficace.
$p_+(p_c)$	Pression acoustique positive de crête.
$p_-(p_r)$	Pression acoustique négative de crête.
R_{el}	Résistance d'entrée parallèle d'une charge électrique.
s_s	Séparation entre lignes de balayage ultrasonore dans le plan considéré.

- I_{sptp} Spatial-peak temporal-peak intensity.
- k = $2\pi/\lambda$.
- l Distance between a hydrophone and an ultrasonic transducer.
- l_1 Distance between an ultrasonic transducer face and the plane containing the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure.
- M_c End-of-cable open-circuit sensitivity of a hydrophone.
- M_L End-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone.
- p Instantaneous acoustic pressure.
- p_{bar} Beam-average r.m.s. acoustic pressure.
- p_{bap} Beam-average pulse acoustic pressure.
- p_i Pulse-pressure-squared integral.
- p_m Mean-peak-cycle acoustic pressure.
- p_o Temporal-peak acoustic pressure.
- prr Pulse repetition rate.
- p_{sap} Spatial-average pulse acoustic pressure.
- p_{sar} Spatial-average r.m.s. acoustic pressure.
- p_{spp} Spatial-peak pulse acoustic pressure.
- p_{spr} Spatial-peak r.m.s. acoustic pressure.
- p_{sptp} Spatial-peak temporal-peak acoustic pressure.
- p_p Pulse acoustic pressure.
- p_{rms} R.M.S. acoustic pressure.
- $p_+(p_c)$ Peak-positive acoustic pressure.
- $p_-(p_r)$ Peak-negative acoustic pressure.
- R_{el} Parallel input resistance of an electrical load.
- s_s Separation between ultrasonic scan lines in the plane considered.

- t_d Durée d'impulsion.
- U_L Tension en bout de câble pour un hydrophone.
- v Vitesse de particule instantanée.
- Z Impédance complexe d'un hydrophone.
- Z_{el} Impédance complexe d'une charge électrique.
- β Paramètre de non-linéarité.
- θ_3, θ_6 Demi-angles pour la réponse directionnelle aux niveaux –3 dB et –6 dB.
- λ Longueur d'onde acoustique dans un liquide.
- ρ Densité du liquide (généralement l'eau).
- σ_m Paramètre de propagation non-linéaire.
- ω Fréquence angulaire ($2\pi f$).

5 Prescriptions de mesure

5.1 Prescriptions pour les hydrophones et amplificateurs

Les prescriptions relatives aux caractéristiques des hydrophones du présent article viennent s'ajouter à ou remplacent celles relatives aux hydrophones de classe A dans la publication CEI 866.

5.1.1 Généralités

La présente norme pose le principe selon lequel un hydrophone est un dispositif qui donne une tension de sortie de réponse proportionnelle à la pression des ondes acoustiques (801-12-26 de la Publication CEI 50(801)). Si M_L est la sensibilité en bout de câble de l'hydrophone (voir 3.15), la pression acoustique instantanée $p(t)$ est associée à la tension en bout de câble mesurée $U_L(t)$ par la formule suivante:

$$p(t) = U_L(t) / M_L$$

5.1.2 Sensibilité d'un hydrophone

La sensibilité en bout de câble d'un hydrophone doit être établie pour les conditions de charge électrique particulières. La méthode définie en A.1.1 de l'annexe A peut être utilisée pour déterminer la sensibilité en bout de câble en supposant connue la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de l'hydrophone.

NOTE - Au cours de l'étalonnage d'un hydrophone (voir CEI 866), celui-ci est relié à une charge électrique d'impédance connue. Il est par conséquent souvent commode d'indiquer la sensibilité de l'hydrophone avec la charge spécifiée. Toutefois, il peut être nécessaire de relier l'hydrophone à une charge électrique d'impédance différente, la sensibilité de l'hydrophone étant alors différente en pareil cas. Il est plus commode de spécifier la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de l'hydrophone et d'établir cette sensibilité en bout de câble lorsque l'hydrophone est relié à une charge électrique spécifiée.

t_d	Pulse duration.
U_L	End-of-cable voltage for a hydrophone.
v	Instantaneous particle velocity.
Z	Complex impedance of a hydrophone.
Z_{el}	Complex input impedance of an electrical load.
β	Nonlinearity parameter.
θ_3, θ_6	Half angles for the directional response at –3 dB and –6 dB levels.
λ	Acoustic wavelength in a liquid.
ρ	Density of liquid (usually water).
σ_m	Nonlinear propagation parameter.
ω	$(2\pi f)$ Angular frequency.

5 Measurement requirements

5.1 Requirements for hydrophones and amplifiers

Requirements for hydrophone performance in this Clause are either in addition to or supersede those for Class A hydrophones in IEC 866.

5.1.1 General

It is assumed throughout this International Standard that a hydrophone is a device which responds to acoustic waves (see 801-12-26 of IEC 50(801)) in such a way that the output voltage is proportional to the acoustic pressure. If M_L is the end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone (see 3.15), the instantaneous acoustic pressure $p(t)$ is related to the measured end-of-cable voltage $U_L(t)$ by

$$p(t) = U_L(t) / M_L$$

5.1.2 Sensitivity of a hydrophone

The end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone shall be determined for the particular electrical loading conditions. The method outlined in A.1.1 of Annex A may be used for the determination of end-of-cable loaded sensitivity assuming the end-of-cable open-circuit sensitivity of the hydrophone is known.

NOTE - During the calibration of a hydrophone (see IEC 866), the hydrophone is connected to an electrical load of known electrical impedance. Hence, it is often convenient to specify the sensitivity of the hydrophone into this specified load. However, it may be necessary to connect the hydrophone to an electrical load of different electrical impedance, and under these conditions, the sensitivity of the hydrophone will be different. It is most convenient to specify the end-of-cable open-circuit sensitivity of the hydrophone, and to determine the end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone when connected to a specified electrical load.

5.1.3 Réponse directionnelle d'un hydrophone

La réponse directionnelle d'un hydrophone doit être établie pour deux raisons. En premier lieu, elle peut être nécessaire dans le cadre des procédures de caractérisation de champ décrites aux articles 7 et 8, auxquels cas la réponse directionnelle devrait être établie à la fréquence acoustique de fonctionnement adéquate. En second lieu, la réponse directionnelle doit être utilisée pour déduire le rayon apparent de l'élément actif de l'hydrophone. Dans ce cas, les mesurages doivent être effectués à une fréquence donnée par la formule suivante:

$3/a_g$ MHz ou 10 MHz, la plus faible de ces deux valeurs étant retenue,

formule dans laquelle a_g est le rayon géométrique de l'élément actif en millimètres.

NOTE - Cette fréquence est choisie afin de vérifier que la fonction de réponse directionnelle montre une crête unique importante.

La symétrie de la réponse directionnelle doit être conforme aux dispositions du 5.2.1 de la CEI 866.

La réponse directionnelle doit être déterminée selon la procédure suivante:

L'hydrophone est placé dans son support selon la procédure définie au 7.1.2 et positionné dans le champ lointain d'un transducteur ultrasonore circulaire à élément unique excité par des trains d'ondes sinusoïdales à la fréquence pour laquelle la réponse directionnelle est exigée. L'hydrophone est aligné pour la réception du signal maximal par translation normale à l'axe d'alignement du faisceau, ainsi que par rotation autour des deux axes traversant le plan de l'élément sensible de celui-ci, approximativement parallèle à l'axe d'alignement du faisceau.

Les mesurages du signal reçu en fonction de la rotation angulaire θ de l'hydrophone sont effectués selon l'un des deux axes de rotation qui traversent le plan de l'élément actif. La réponse directionnelle est déterminée en divisant le signal reçu sous un angle particulier par le signal maximal reçu.

5.1.4 Rayon apparent d'un élément actif d'hydrophone

Le rayon apparent de l'élément actif d'un hydrophone doit être déterminé de la façon suivante à partir des mesurages de la réponse directionnelle de l'hydrophone.

La réponse directionnelle est déterminée selon la procédure définie au 5.1.3 à la fréquence établie à partir des critères donnés dans ce même paragraphe. On suppose alors que l'élément actif de l'hydrophone est circulaire et que sa réponse directionnelle, en fonction de l'angle θ , peut être approchée par celle d'une fonction de réponse directionnelle des récepteurs à disque «rigide» qui est donnée par la formule suivante:

$$\frac{2 J_1 (k a \sin \theta)}{k a \sin \theta}$$

où:

J_1 est la fonction de Bessel du premier ordre de la première espèce;

a est le rayon du disque;

$k = 2\pi/\lambda$;

λ est la longueur d'onde acoustique correspondant à la fréquence appropriée.

5.1.3 Directional response of a hydrophone

There are two reasons for the determination of the directional response of a hydrophone. Firstly, it may be necessary as part of the field characterisation procedures described in Clauses 7 and 8, in which case the directional response should be determined at the appropriate acoustic-working frequency. Secondly, the directional response shall be used to derive the effective radius of the active element of the hydrophone. In this case, measurements shall be made at a frequency given by:

$$3/a_g \text{ MHz or } 10 \text{ MHz whichever is the lower,}$$

where a_g is the geometrical radius of the active element in millimetres.

NOTE - This frequency is chosen to ensure that the directional response function consists of a single major peak.

Symmetry of the directional response shall conform to 5.2.1 of IEC 866.

Directional response of a hydrophone shall be determined according to the following procedure:

The hydrophone is set up in its mount according to the procedure described in 7.1.2 and positioned in the far field of a single element circular ultrasonic transducer operated with gated sinusoidal excitation at the appropriate frequency at which the directional response is required. The hydrophone is aligned for maximum received signal by translation normal to the beam alignment axis and also by rotation about the two axes passing through the plane of the active element of the hydrophone while maintaining the normal to the sensitive element of the hydrophone approximately parallel to the beam alignment axis.

Measurements of the received signal as a function of angular rotation, θ , of the hydrophone are made using one of the two rotation axes which pass through the plane of the active element. The directional response is determined by dividing the received signal at a particular angle by the maximum received signal.

5.1.4 Effective radius of a hydrophone active element

The effective radius of the active element of a hydrophone shall be determined in the following manner from measurements of the directional response of the hydrophone.

The directional response is determined according to the procedure outlined in 5.1.3 at the frequency determined from the criteria given in 5.1.3. It is then assumed that the hydrophone active element is circular and that its directional response, as a function of angle θ , can be approximated to that of a 'stiff' disc receiver directional response function, which is given by:

$$\frac{2 J_1 (k a \sin \theta)}{k a \sin \theta}$$

where:

J_1 is the first order Bessel function of the first kind;

a is the radius of the disc;

$k = 2\pi/\lambda$;

λ is the acoustic wavelength corresponding to the appropriate frequency.

Aux niveaux -3 dB et -6 dB de la valeur de crête, les valeurs de $k \sin \theta$ sont $1,62$ et $2,22$ respectivement. Ainsi, en mesurant les demi-angles θ_3 et θ_6 aux niveaux -3 dB et -6 dB de la crête centrale de la réponse directionnelle mesurée, les deux valeurs a_3 et a_6 du rayon apparent sont déterminées à l'aide de la formule:

$$a_3 = \frac{1,62}{k \sin \theta_3}$$

$$a_6 = \frac{2,22}{k \sin \theta_6}$$

La valeur du rayon apparent de l'hydrophone est déterminée à partir de la moyenne arithmétique de a_3 et de a_6 .

Dans le cas d'un hydrophone comportant un élément actif non circulaire, il est toujours possible de déterminer à l'aide de cette procédure sa dimension apparente approximative dans toute direction spécifiée. En pareil cas, l'axe de rotation utilisé pour les mesurages de réponse directionnelle serait normal à la direction intéressée. Bien que la fonction de réponse directionnelle théorique s'applique strictement aux éléments circulaires, l'erreur due à son application à d'autres formes physiques devrait être inférieure à 20% .

5.1.5 Choix de la taille de l'élément actif d'un hydrophone

Le choix du rayon apparent de l'élément actif d'un hydrophone pour une application particulière doit être fait en tenant compte des éléments suivants:

- 1) Le rayon apparent de l'élément doit idéalement être comparable ou inférieur à un quart de la longueur d'onde acoustique, de façon que les variations de phase et d'amplitude ne contribuent pas de manière importante aux incertitudes de la mesure.

Il est impossible, du fait de la diversité des types de transducteurs ultrasonores, d'établir une relation simple entre la taille apparente optimale de l'élément actif de l'hydrophone et des paramètres tels que la dimension du transducteur ultrasonore, la longueur d'onde acoustique et la distance par rapport à ce transducteur. Toutefois, il est raisonnable, dans le champ lointain, de rendre moins rigoureux le critère ci-dessus. Pour les transducteurs ultrasonores circulaires, le critère suivant peut être utilisé comme guide de détermination du rayon apparent maximum a_{\max} d'un élément actif d'hydrophone. Si la distance entre l'hydrophone et la face du transducteur ultrasonore est l , a_{\max} est alors donné par la formule suivante [3] :

$$a_{\max} = \frac{\lambda}{8a_1} (l^2 + a_1^2)^{1/2}$$

où:

a_1 est le rayon apparent du transducteur ultrasonore;

λ est la longueur d'onde acoustique correspondant à la fréquence acoustique de fonctionnement.

Se reporter à [3] et [4].

Pour un transducteur ultrasonore à élément non circulaire, la relation ci-dessus peut encore convenir en remplaçant a_1 par la moitié de la dimension maximale du transducteur ultrasonore ou du groupe d'éléments transducteurs ultrasonores.

At the –3 dB and –6 dB levels from the peak, the values of $k a \sin \theta$ are 1,62 and 2,22 respectively. Thus by measuring the half angles θ_3 and θ_6 at the –3 dB and –6 dB levels from the central peak of the measured directional response, two values a_3 and a_6 for the effective radius are determined from:

$$a_3 = \frac{1,62}{k \sin \theta_3}$$

$$a_6 = \frac{2,22}{k \sin \theta_6}$$

The value for the effective radius of the hydrophone is determined from the arithmetic mean of a_3 and a_6 .

In the case of a hydrophone which is constructed such that it has an active element which is non-circular, it is still possible using this procedure to determine its approximate effective dimension in any specified direction. In this case, the rotational axis used for the directional response measurements would be normal to the direction of interest. Although the theoretical directional response function is strictly applicable to circular elements, the error incurred in applying it to other physical shapes should be less than 20 %.

5.1.5 Choice of the size of a hydrophone active element

The choice of the effective radius of the active element of a hydrophone for a specific application shall be determined by consideration of the following:

- 1) The effective radius of the element should ideally be comparable with or smaller than one quarter of the acoustic wavelength, so that phase and amplitude variations do not contribute significantly to measurement uncertainties.

It is not possible, because of the large range of types of ultrasonic transducers, to establish a simple relationship between the optimum effective element size of the hydrophone and parameters such as the ultrasonic transducer dimension, the acoustic wavelength and the distance from the ultrasonic transducer. However, in the far field it is reasonable to relax the above criterion. For circular ultrasonic transducers the following criterion may be used as a guide to the determination of the maximum effective radius a_{\max} of a hydrophone active element. If the distance between the hydrophone and the ultrasonic transducer face is l , then a_{\max} is given by [3]:

$$a_{\max} = \frac{\lambda}{8a_1} (l^2 + a_1^2)^{1/2}$$

where:

a_1 is the effective radius of the ultrasonic transducer;

λ is the acoustic wavelength corresponding to the acoustic-working frequency.

See [3] and [4].

For an ultrasonic transducer with a non-circular element the above relationship may still be used by replacing a_1 by one half the maximum ultrasonic transducer dimension or ultrasonic transducer element group dimension.

2) L'exigence dans la pratique d'un rapport signal/bruit adéquat ou d'autres considérations peuvent aboutir à l'utilisation d'un hydrophone comportant des dimensions d'éléments supérieures à celles qui sont recommandées ci-dessus. Dans ce cas, des précautions devront être prises pour l'interprétation des mesurages, du fait qu'un hydrophone piézoélectrique intègre la pression acoustique sur son élément actif. Des corrections de moyennage spatial peuvent être effectuées à l'aide de la procédure de déconvolution mais la fiabilité de cette méthode devrait être évaluée en fonction de la variation du signal reçu par rapport à la position de l'hydrophone. Le critère suivant devrait être appliqué :

Lorsque l'hydrophone est déplacé, depuis la position de réception de signal maximal, en toute direction normale à l'axe d'alignement du faisceau d'une valeur égale au rayon de l'élément actif, la décroissance du signal doit être inférieure à 1 dB. En pareil cas, les corrections de moyennage spatial doivent être suffisamment précises pour satisfaire à la plupart des conditions. Des corrections de diffraction peuvent améliorer le résultat. Voir la Publication CEI 866 [3-6].

5.1.6 *Largeur de bande*

Si la valeur du paramètre de propagation non linéaire est supérieure à 0,5 (voir 8.1.9), la sensibilité en bout de câble de l'hydrophone doit varier de moins de ± 6 dB sur la gamme de fréquences allant jusqu'à 3 octaves au-dessus de la fréquence acoustique de fonctionnement, ou 40 MHz, la plus faible de ces deux valeurs étant retenue, pour les hydrophones de Classe A et de Classe B (voir 5.1.3 de la Publication CEI 866).

5.1.7 *Linéarité*

Pour les mesurages effectués sur la plupart des transducteurs ultrasonores à usage de diagnostic, la pression acoustique crête spatiale crête temporelle dépasse considérablement la dynamique spécifiée pour la linéarité selon la Publication CEI 866, c'est-à-dire 0,3 MPa. Toutefois, les méthodes de détermination de la linéarité d'un hydrophone sont fréquemment limitées par la présence d'effets non linéaires soit dans le transducteur ultrasonore, soit dans la propagation dans l'eau (voir [1] et la Publication CEI 866). En pratique, une limite supérieure se situant entre 1 MPa et 2 MPa s'applique à la plupart des technologies.

La réponse linéaire, définie au 5.1.2 de la Publication CEI 866, doit atteindre 5 MPa.

5.1.8 *Amplificateur de signal d'hydrophone*

Les amplificateurs d'hydrophone doivent satisfaire aux exigences de fonctionnement suivantes.

Pour tous les amplificateurs:

Le gain de l'ensemble constitué par l'hydrophone et le préamplificateur doit varier de moins de ± 6 dB sur la gamme de fréquences s'étendant d'un octave en dessous à trois octaves au-dessus de la fréquence acoustique de fonctionnement (a.w.f.).

La sensibilité globale de l'hydrophone associé à son préamplificateur doit varier de moins de $\pm 0,5$ dB pour la classe A et ± 1 dB pour la classe B sur toute plage de 100 kHz tombant dans la bande passante revendiquée.

La linéarité pour un signal d'entrée ayant une dynamique de 50 dB doit être de $\pm 0,3$ dB.

2) The practical requirement of an adequate signal-to-noise ratio or other considerations may lead to the use of a hydrophone with an element size greater than that recommended above. In this case, care should be taken in interpreting measurements as a piezoelectric hydrophone integrates the acoustic pressure over its active element. Corrections for spatial averaging can be made using a deconvolution procedure but the reliability of this approach should be assessed on the basis of the variation of the received signal with position of the hydrophone. The following criterion should be applied:

When the hydrophone is translated from the position of maximum received signal in any direction normal to the beam alignment axis by an amount equal to the radius of the active element, the decrease in signal should be less than 1 dB. Under these conditions, spatial averaging corrections should be sufficiently accurate for most purposes. Improved corrections can be made using diffraction corrections. See IEC 866, [3-6].

5.1.6 Bandwidth

If the value of the nonlinear propagation parameter exceeds 0,5 (see 8.1.9), then the end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone or hydrophone-amplifier combination shall vary by less than ± 6 dB over a frequency range up to 3 octaves above the acoustic-working frequency, or 40 MHz whichever is the lesser, for both Class A and Class B hydrophones (see 5.1.3 of IEC 866).

5.1.7 Linearity

For measurements on most diagnostic ultrasonic transducers, the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure far exceeds the dynamic range specified for linearity purposes in IEC 866, namely 0,3 MPa. However, methods for the determination of linearity of a hydrophone are often limited by the presence of nonlinear effects in either the ultrasonic transducer or in the propagation through the water path (see [1] and IEC 866). In practice an upper limit of between 1 MPa and 2 MPa is applicable to most techniques.

Linear response, as defined in 5.1.2 of IEC 866 should extend to 5 MPa.

5.1.8 Hydrophone signal amplifier

Hydrophone amplifiers shall meet the following performance requirements.

For all amplifiers:

The hydrophone-amplifier combination gain shall change by less than ± 6 dB over the range from one octave below to three octaves above the acoustic-working frequency (a.w.f.).

The overall sensitivity of the hydrophone and amplifier combination shall vary by less than $\pm 0,5$ dB (Class A) and ± 1 dB (Class B) within any frequency increment of 100 kHz falling inside the stated bandwidth.

The linearity with input signal over a dynamic range of 50 dB shall be $\pm 0,3$ dB.

L'impédance résistive d'entrée doit introduire une correction inférieure à 0,3 dB à la sensibilité de l'hydrophone sur la gamme s'étendant d'un octave en-dessous à trois octaves au-dessus de l'a.w.f. (se reporter au A.1.1 de l'annexe A).

L'impédance capacitive d'entrée doit apporter une correction inférieure à 2 dB à la sensibilité de l'hydrophone sur la gamme s'étendant d'un octave en-dessous à trois octaves au-dessus de l'a.w.f. (se reporter au A.1.1 de l'annexe A).

L'impédance de sortie doit être adaptée à un câble coaxial.

Le bruit spectral mesuré à l'aide de l'hydrophone doit être suffisamment faible pour permettre d'effectuer les mesurages avec un rapport signal/bruit adéquat pour toute fréquence se situant dans la bande passante considérée.

Conditions complémentaires pour les amplificateurs différentiels:

Les conditions d'impédance données ci-dessus doivent s'appliquer, excepté que l'impédance est mesurée entre les deux entrées actives.

La réjection en mode commun doit être au minimum de 40 dB (par rapport à la valeur nominale du signal d'entrée) sur la gamme de fréquence s'étendant d'un octave en-dessous à deux octaves au-dessus de l'a.w.f. (voir [7]).

5.2 Conditions de positionnement des ensembles et cuves à eau

Plusieurs systèmes peuvent être utilisés pour monter le transducteur ultrasonore et l'hydrophone, dont des exemples sont donnés à l'annexe C. Les conditions générales de fonctionnement de ces systèmes sont décrites dans le présent document et sont considérées comme optimales pour les besoins de la présente Norme internationale. D'autres systèmes de positionnement peuvent être utilisés dans la mesure où leur équivalence à ceux qui sont évoqués dans la présente partie est démontrée.

La figure 4 présente une configuration simple de réservoir, de transducteur et d'hydrophone indiquant seulement les axes de coordonnées et degrés de liberté évoqués dans ce texte.

5.2.1 Systèmes de positionnement

5.2.1.1 Système de positionnement de transducteur

Le transducteur ultrasonore testé doit être monté sur un système de positionnement de façon que sa face soit entièrement immergée dans la cuve à eau, et qu'elle se trouve à une certaine distance de toute surface voisine, telle que l'interface eau/air si l'axe d'alignement du faisceau est horizontal, afin que l'onde ultrasonore réfléchie par cette surface n'interfère pas avec le signal principal reçu. Pour le cas où la surface est parallèle à l'axe d'alignement du faisceau, le critère suivant doit être satisfait.

Si l est la séparation entre l'élément actif d'un hydrophone et la face d'un transducteur ultrasonore, t étant l'intervalle de temps pendant lequel les mesurages doivent être faits, la distance minimale h entre l'axe d'alignement du faisceau et la surface doit être déterminée à l'aide de la formule

$$((l^2 + 4h^2)^{1/2} - l)/c > t$$

The resistive input impedance shall introduce a correction of less than 0,3 dB to the sensitivity of the hydrophone over the range from one octave below to three octaves above the a.w.f. (see A.1.1 of Annex A).

The capacitative input impedance shall introduce a correction of less than 2 dB to the sensitivity of the hydrophone over the range from one octave below to three octaves above the a.w.f. (see A.1.1 of Annex A).

The output impedance shall be suitable for driving a coaxial cable.

The spectral noise measured with the hydrophone shall be sufficiently low to allow measurements to be performed with an adequate signal-to-noise ratio for any frequency within the bandwidth considered.

Additional requirements for differential amplifiers:

The impedance requirements given above shall apply except that the impedance is measured between the two active inputs.

The common mode rejection shall be at least 40 dB (referred to the input) over the frequency range one octave below to two octaves above the a.w.f. See [7].

5.2 Requirements for positioning systems and water baths

There are various possible systems which may be used to mount the ultrasonic transducer and hydrophone, examples of which are shown in Annex C. The general performance requirements for such systems are outlined here, and these are considered as optimum for the purposes of this International Standard. Alternative positioning systems may be used providing equivalence with those described in this section is demonstrated.

Figure 4 shows a simple configuration of tank, transducer and hydrophone intended to show only the co-ordinate axes and degrees of freedom referred to in the text.

5.2.1 Positioning systems

5.2.1.1 Transducer positioning system

The ultrasonic transducer under test should be supported using a positioning system such that its face is fully immersed in the water bath and at a distance from any adjacent surface, for instance a water/air interface if the beam alignment axis is horizontal, such that reflected ultrasound from this surface does not interfere with the main received signal. For the situation when the surface is parallel to the beam alignment axis, the following criterion shall be satisfied.

If l is the separation between the active element of a hydrophone and the face of an ultrasonic transducer and t is the time interval during which measurements are to be made, then the minimum distance, h , between the beam alignment axis and the surface shall be determined from:

$$((l^2 + 4h^2)^{1/2} - l)/c > t$$

Des membranes ne doivent pas être interposées entre la face du transducteur ultrasonore et la cuve à eau. Toutefois, si une membrane est nécessaire, elle devra être aussi mince que possible et maintenue aussi près de la surface frontale du transducteur ultrasonore que possible. Un couplage acoustique étroit devrait être assuré à l'aide d'un agent de couplage à base d'eau, en prenant soin d'éliminer les bulles d'air. Les mesurages de paramètres acoustiques devraient être corrigés de la perte de transmission de la membrane, si elle est importante.

Le transducteur ultrasonore devrait présenter les degrés de liberté suivants:

Réglage en rotation autour de trois axes orthogonaux, dont l'un devrait être approximativement parallèle à l'axe d'alignement du faisceau.

Bien que les degrés de liberté continûment variables en translation ne soient pas essentiels, il peut être nécessaire d'assurer un certain mouvement afin de pouvoir positionner le transducteur ultrasonore en différents points de la cuve.

5.2.1.2 Système de positionnement de l'hydrophone

L'hydrophone doit être maintenu dans un système de micropositionnement présentant les degrés de liberté suivants:

Translation autour de trois axes orthogonaux (x , y et z de la figure 4), l'un d'eux (appelé axe des x) étant perpendiculaire à l'élément actif.

NOTE 1 - Après l'alignement, l'axe des x serait parallèle à l'axe d'alignement du faisceau du transducteur ultrasonore.

Pour la caractérisation des systèmes à balayage automatique, l'un des deux autres axes de translation de l'hydrophone (appelé axe z) devrait être perpendiculaire au plan de balayage. Le troisième axe est appelé l'axe y .

Deux degrés de liberté en rotation devraient être prévus. Les deux axes de rotation devraient être normaux à la direction de sensibilité maximale de l'hydrophone et devraient traverser de préférence l'élément actif. L'un des axes de rotation devrait être parallèle à l'axe z et l'autre parallèle à l'axe y .

Tous les systèmes de translation et de rotation devraient être équipés d'indicateurs de position.

La reproductibilité du positionnement est d'une importance capitale aux fréquences ultrasonores élevées, $\pm 0,01$ mm à 15 MHz convenant pour la plupart des applications.

NOTE 2 - Bien que l'hydrophone soit considéré ici et ultérieurement être l'élément déplacé dans tout le champ acoustique, il est possible, pour certains types de mesurages effectués sur des transducteurs ultrasonores à élément unique, de faire tourner ou déplacer ces derniers plutôt que l'hydrophone.

5.2.2 Cuve à eau

La taille de la cuve à eau devrait permettre de déplacer le transducteur ultrasonore et l'hydrophone l'un par rapport à l'autre et suffisamment pour permettre de positionner l'élément actif de l'hydrophone en un point quelconque du champ acoustique auquel les mesurages doivent être faits. La paroi de la cuve à eau devrait être à une distance du transducteur ultrasonore sensiblement supérieure (de 30 % à 100 %) à la distance maximale de séparation entre le transducteur ultrasonore et l'hydrophone, dans une

Membranes should not be used between the face of the ultrasonic transducer and the water bath. If, however, a membrane is needed, then the membrane should be as thin as practicable and should be kept as close to the front surface of the ultrasonic transducer as is possible. Close acoustic coupling should be ensured by using a water-based coupling agent, taking care to exclude bubbles of air. Measurements of acoustic parameters should be corrected for transmission loss of the membrane, if significant.

The following degrees of freedom should be provided for the ultrasonic transducer:

Rotational adjustment about three orthogonal axes, one of which should be approximately parallel to the beam alignment axis.

Although continuously variable translational degrees of freedom are not essential, it may be necessary to provide some movement in order to position the ultrasonic transducer at different places in the tank.

5.2.1.2 *Hydrophone positioning system*

The hydrophone should be supported from a micropositioning system with the following degrees of freedom:

Translation about three orthogonal axes (*x*, *y* and *z* in figure 4), one (designated the *x*-axis) being perpendicular to the active element.

NOTE 1 - After alignment, the *x*-axis would be parallel to the beam alignment axis of the ultrasonic transducer.

For the characterisation of automatic scanning systems, one of the other two hydrophone translation axes (designated the *z*-axis) should be perpendicular to the scan plane. The third axis is designated the *y*-axis.

Two rotation degrees of freedom should be provided. Both rotation axes should be normal to the direction of maximum sensitivity of the hydrophone and preferably pass through the active element. One rotational axis should be parallel to the *z*-axis and the other parallel to the *y*-axis.

All translation and rotation systems should be provided with position indicators.

Reproducibility of positioning is most important at the high ultrasonic frequencies, and for most applications $\pm 0,01$ mm at 15 MHz is adequate.

NOTE 2 - Although the hydrophone is considered here and subsequently as the element which is scanned throughout the acoustic field, it is possible for certain types of measurements on single element ultrasonic transducers to translate/rotate the ultrasonic transducer instead of the hydrophone.

5.2.2 *Water bath*

The size of the water bath should be such that the ultrasonic transducer and hydrophone can be moved relative to each other by an amount large enough to permit the active element of the hydrophone to be positioned at any point in the acoustic field at which measurements are required. In a direction parallel to the beam alignment axis for non-automatic scanning systems or the symmetry axis of the scan plane for automatic scanning systems, the wall of the water bath should be at a distance from the ultrasonic

direction parallèle à l'axe d'alignement du faisceau pour les systèmes à balayage non automatique ou à l'axe de symétrie du plan de balayage pour les systèmes à balayage automatique. La paroi du bain devrait être à une distance du transducteur ultrasonore sensiblement supérieure (de 30 % à 100 %) à la distance maximale de l'hydrophone de l'axe d'alignement du faisceau en cas de systèmes à balayage non-automatique, ou d'une ligne de balayage extrême dans le cas des systèmes à balayage automatique, dans une direction perpendiculaire à l'axe d'alignement du faisceau pour les systèmes à balayage non automatique ou à l'axe de symétrie du plan de balayage pour les systèmes à balayage automatique. Il doit également être tenu compte de la taille de l'hydrophone: pour les hydrophones à membrane, une largeur supplémentaire dans la direction perpendiculaire à l'axe d'alignement du faisceau peut être exigée.

NOTE - Les critères de choix des dimensions de la cuve à eau évoqués ci-dessus conviennent pour des durées d'impulsion inférieures à 10 µs. Pour les durées plus longues, se reporter au 5.2.1.1 et à la référence [7].

Dans le cas de transducteurs ultrasonores excités en onde entretenue, des absorbants acoustiques devraient être disposés de manière à intercepter les ondes ultrasonores incidentes sur les parois de la cuve à eau dans toute la mesure du possible. Pour les transducteurs ultrasonores pulsés et lorsque les méthodes utilisant des portes sont employées pour la détection du signal d'hydrophone, l'utilisation des absorbants n'est pas essentielle. Toutefois, il est fréquemment conseillé de disposer ceux-ci sur les parois de la cuve à eau en des points auxquels ils interceptent le champ acoustique incident principal du transducteur ultrasonore.

Les essais suivants peuvent être effectués pour décider si les absorbants sont ou non nécessaires:

Le critère que l'on peut appliquer est que les absorbants devraient être utilisés si les ultrasons réfléchis augmentent uniformément le niveau de bruit de fond général du signal de l'hydrophone ou si des signaux parasites de celui-ci sont détectés à proximité du signal principal reçu. Pour tester la présence de signaux parasites, il est commode de déplacer le transducteur ultrasonore par rapport à la cuve à eau et à l'hydrophone dans la direction x, en observant le signal à l'aide d'un oscilloscope. Les signaux parasites apparaissent comme se déplaçant au minimum deux fois plus vite que le signal reçu directement. Cet essai n'est possible que sur les ensembles pulsés. Avec une excitation en onde entretenue, il convient d'observer les variations de phase et la distorsion du signal principal lorsque l'on déplace le transducteur ultrasonore.

L'eau devrait être distillée ou désionisée à une température connue. Dans le second cas, la conductivité électrique devrait être inférieure à 5 µS. Pour les mesurages effectués sur des transducteurs ultrasonores excités par onde entretenue à puissance élevée, les effets de cavitation peuvent être importants et, dans ce cas, de l'eau dégazée devrait être utilisée (se reporter à la CEI 854).

5.3 Prescriptions pour les ensembles de mesurage

Le signal provenant de l'hydrophone ou de l'amplificateur de signal d'hydrophone doit être mesuré à l'aide d'un oscilloscope, d'un numériseur ou de tout autre système approprié, avec une bande passante et une sensibilité suffisantes. Ce système doit pouvoir explorer le signal tant du point de vue de ses variations d'amplitude que dans le temps.

transducer which is significantly greater (30 % to 100 %) than the maximum separation distance between the ultrasonic transducer and the hydrophone. In a direction perpendicular to the beam alignment axis for non-automatic scanning systems or the symmetry axis of the scan plane for automatic scanning systems, the wall of the water bath should be at a distance which is significantly greater (30 % to 100 %) than the maximum distance of the hydrophone from the beam alignment axis in the case of non-automatic scanning systems, or from an extreme scan line in the case of automatic scanning systems. The size of the hydrophone must also be considered; for membrane hydrophones extra width in the direction perpendicular to the beam alignment axis may be required.

NOTE - The criteria for the choice of the size of the water bath referred to above is adequate for pulse durations less than 10 µs. For longer pulse durations, refer to 5.2.1.1 and reference [1].

In the case of ultrasonic transducers excited under continuous wave conditions, acoustic absorbers should be placed to intercept as much of the ultrasound incident on the walls of the water bath as is possible. For pulsed ultrasonic transducers and when techniques using gated signals are employed for detection of the hydrophone signal, it is not essential to use absorbers. However, it is often advisable to place absorbers on the walls of the water bath at positions such that they intercept the main incident acoustic field from the ultrasonic transducer.

The following tests may be used to determine the necessity for absorbers:

The criterion that may be applied is that absorbers should be used if reflected ultrasound increases the general background noise level of the hydrophone signal uniformly or if spurious hydrophone signals are detected in the vicinity of the main received signal. A convenient test for the presence of spurious signals consists of translating the ultrasonic transducer relative to the water bath and the hydrophone in the x direction, and observing the signal with an oscilloscope. Spurious signals are observed to move at least twice the speed of the directly received signal. This test is possible only on pulsed systems. With continuous wave excitation, it is necessary to observe phase changes and distortion of the main signal when the ultrasonic transducer is moved.

The water should be distilled or deionised water at a known temperature. For deionised water, the electrical conductivity should be less than 5 µS. For measurements on high power continuous wave excited ultrasonic transducers, cavitation effects can be significant, and in this case, degassed water should be used (see IEC 854).

5.3 Requirements for measurement systems

The signal from the hydrophone or the hydrophone signal amplifier shall be measured with the aid of an oscilloscope, digitiser or any other appropriate system with sufficient bandwidth and sensitivity. The system shall be capable of investigating the signal with respect to both amplitude and temporal variations.

5.4 Prescriptions concernant l'équipement ultrasonore à caractériser

Pour déclencher le dispositif de mesure, un signal électrique devrait être engendré, synchronisé sur l'excitation du transducteur ultrasonore ou de chaque groupe d'éléments transducteurs ultrasonores.

Pour les systèmes à balayage automatique, un signal de déclenchement complémentaire devrait être fourni, synchronisé sur chaque période de répétition acoustique. Ces signaux de déclenchement devraient être utilisés pour permettre l'observation du signal reçu par l'hydrophone et provenant de toute ligne de balayage ultrasonore choisie.

De même, si l'on peut «geler» le balayage des ensembles à balayage automatique, un signal de déclenchement devrait être fourni pour la ligne de balayage ultrasonore choisie. Toutefois, dans ce cas, des essais doivent être effectués pour vérifier qu'il n'y a pas de variation importante entre un faisceau «gelé» et un faisceau mobile. Cette vérification n'est pas inutile et dépend du type de système de balayage. De surcroît, la détermination vraie des paramètres de moyenne temporelle n'est pas possible pour un faisceau «gelé».

NOTE - Pour la séparation de lignes Doppler et de balayages entrelacés, dans certains types de systèmes à balayage automatique Duplex, il est utile de visualiser les signaux de déclenchement sur un oscilloscope séparé disposant d'une base de temps retardée et d'une sortie correspondante. Cette sortie peut être utilisée pour déclencher le système de mesure.

Si un signal synchrone de l'excitation du transducteur ou d'un groupe d'éléments transducteurs n'est pas disponible, d'autres méthodes peuvent être utilisées pour obtenir un signal synchrone. Un capteur inductif magnétique ou un transducteur acoustique auxiliaire sont des exemples de telles méthodes de substitution. Voir [8-10].

6 Spécification des caractéristiques de fonctionnement des hydrophones et amplificateurs

La CEI 866 s'applique sauf en ce qui concerne les dispositions spécifiées ci-dessous.

6.1 Sensibilité

NOTE - La sensibilité en champ libre d'un hydrophone, telle qu'elle est définie dans la CEI 866, concerne l'élément actif et exclut tout câble intégré. Cette terminologie n'est par conséquent pas utilisée dans la présente norme.

Le 6.1 de la CEI 866 s'applique et les paramètres suivants doivent être spécifiés de surcroît en fonction de la fréquence:

Soit: La sensibilité en circuit ouvert en bout de câble

ou: La sensibilité en bout de câble avec une charge électrique spécifiée

plus: L'impédance électrique complexe de l'hydrophone

Lorsque l'impédance de l'hydrophone est purement capacitive, la capacité en bout de câble et la longueur de tout câble intégré doivent être spécifiées.

De surcroît, pour les hydrophones utilisés avec des amplificateurs incorporés:

- Le gain de l'amplificateur
- L'impédance électrique de sortie de l'amplificateur

NOTE - Se reporter au A.1.5 de l'annexe A, qui présente sous forme de tableaux des exemples de paramètres de spécification.

5.4 Recommendations for ultrasonic equipment being characterised

To trigger the measurement system, an electrical signal should be provided synchronised to the excitation of the ultrasonic transducer or each ultrasonic transducer element group.

For automatic scanning systems, an additional trigger signal should be provided synchronised to each acoustic repetition period. These trigger signals should be used to permit the observation of the received signal at the hydrophone from any chosen ultrasonic scan line.

Alternatively, if the scanning in automatic scanning systems can be 'frozen', a trigger signal for the chosen ultrasonic scan line should be provided. However, in this case, tests shall be undertaken to ensure that there is no significant variation between a 'frozen' beam and a scanning beam. This exercise is not trivial and depends on the type of scanning system. Also, true determination of temporal average parameters is not possible for a 'frozen' beam.

NOTE - For the separation of interlaced Doppler and scan lines in certain types of Duplex automatic scanning systems, it is useful to display the trigger signals on a separate oscilloscope which has a delayed timebase and delayed timebase output facility. This output may be used to trigger the measurement system.

If an electrical signal synchronised to the excitation of the ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group is not available, alternative methods may be used to obtain such a trigger signal. Such alternative methods include the use of an external electromagnetic pick-up coil or an auxiliary acoustic sensor placed in the ultrasonic field. See [8-10].

6 Specification of performance for hydrophones and amplifiers

IEC 866 applies except as follows:

6.1 Sensitivity

NOTE - The free-field sensitivity of a hydrophone as defined in IEC 866 refers to the active element and excludes any integral cable. This terminology is, therefore, not used in this International Standard.

6.1 of IEC 866 applies and additionally the following parameters shall be specified as a function of frequency:

Either: The end-of-cable open-circuit sensitivity

or: The end-of-cable loaded sensitivity into a specified electrical load

plus: The complex electrical impedance of the hydrophone

When a hydrophone impedance is purely capacitative, the end-of-cable capacitance and the length of any integral cable shall be specified.

In addition, for hydrophones used with integral amplifiers:

– The gain of the amplifier

– The electrical output impedance of the amplifier

NOTE - See A.1.5 of Annex A for tabulated examples of specification parameters.

6.2 Rayon apparent

Le rayon apparent de l'élément actif doit être spécifié, ainsi que la fréquence à laquelle il a été déterminé.

6.3 Linéarité de l'hydrophone

La limite supérieure de réponse linéaire connue doit être annoncée, en particulier si elle est inférieure à 5 MPa.

6.4 Amplificateurs d'hydrophone

Les paramètres suivants de fonctionnement doivent être spécifiés:

- Le gain en fonction de la fréquence
- L'impédance d'entrée en fonction de la fréquence, soit les composantes réelles et imaginaires, soit les composantes résistives et capacitatives parallèles équivalentes
- L'impédance de sortie

7 Procédures de mesure

Les procédures décrites dans le présent article et dans l'article 8 sont considérées comme particulièrement adaptées à la caractérisation des champs ultrasonores à l'aide d'hydrophones piézoélectriques. D'autres procédures basées sur l'emploi d'hydrophones piézoélectriques peuvent être utilisées dans la mesure où leur équivalence avec les méthodes décrites dans la première partie est démontrée.

7.1 Préparation et alignement

7.1.1 Préparation

Il peut s'avérer nécessaire de rendre étanches différentes parties du transducteur ultrasonore pour éviter la pénétration de l'eau, en particulier autour du point d'entrée du câble si l'ensemble du dispositif est immergé. Le fabricant devra être consulté à ce propos.

Avant l'utilisation, les surfaces du transducteur ultrasonore et de l'hydrophone devraient être vérifiées pour y rechercher toute trace de souillure. Si l'on en découvre, ces surfaces doivent être nettoyées selon les instructions du fabricant. Des précautions particulières devraient être prises pour utiliser de manière fiable les hydrophones ou transducteurs, conformément aux instructions du fabricant ou selon qu'elles se sont avérées nécessaires pour l'utilisation, telles que l'immersion d'un hydrophone pendant un certain temps avant utilisation.

Lors de l'immersion du transducteur ultrasonore et de l'hydrophone dans l'eau, des précautions devraient être prises afin d'éliminer toutes les bulles d'air des faces actives. Des vérifications devraient être faites afin d'éliminer toutes les bulles d'air des faces actives pendant l'exécution des mesurages.

7.1.2 Alignement d'un hydrophone

L'hydrophone devrait être repositionné dans son montage de façon que les deux axes de rotation traversent le plan de l'élément actif. Le support de l'hydrophone devrait donc être muni de systèmes de réglage complémentaires permettant de le positionner par rapport à son support.

6.2 Effective radius

The effective radius of the active element shall be specified together with the frequency at which it was determined.

6.3 Hydrophone linearity

The upper limit of known linear response shall be stated, in particular if below 5 MPa.

6.4 Hydrophone amplifiers

The following performance parameters shall be specified:

- The gain as a function of frequency
- The input impedance as a function of frequency, either the real and imaginary components, or the equivalent parallel resistive and capacitative components
- The output impedance

7 Measurement procedures

The procedures described in this Clause and in Clause 8 are believed to be those which are particularly suitable for the characterisation of ultrasonic fields using piezoelectric hydrophones. Other procedures based on the use of piezoelectric hydrophones may be employed provided equivalence with the techniques described in this section is demonstrated.

7.1 Preparation and alignment

7.1.1 Preparation

It may be necessary to seal various parts of the ultrasonic transducer to prevent ingress of water, especially around the cable entry point if the whole of the device is immersed. Manufacturer's advice should be sought.

Prior to use, the surfaces of the ultrasonic transducer and the hydrophone should be checked for contamination. If this is present, the surfaces should be cleaned according to the manufacturer's instructions. Any special precautions should be followed for the reliable use of hydrophones or transducers which may be specified by the manufacturer or which may have been found necessary by the user, such as immersion of a hydrophone for a certain time before use.

On insertion of both the ultrasonic transducer and the hydrophone in the water, care should be taken to ensure that all air bubbles are removed from the active faces. Checks should be made during the course of the measurements to ensure bubbles do not appear.

7.1.2 Aligning a hydrophone

The hydrophone should be positioned in its mount such that the two rotational axes pass through the plane of the active element. It is therefore necessary that the hydrophone mount should be provided with additional adjustment facilities which enable the hydrophone to be positioned relative to its mount.

La procédure d'alignement de l'élément actif avec les axes de rotation dépend du type et de la construction de l'hydrophone. Le A.1.3 de l'annexe A indique les procédures d'alignement qui peuvent être utilisées.

Pour les besoins de la caractérisation du champ, il faut connaître la réponse directionnelle de l'hydrophone qui est déterminée selon le 5.1.3. Cette procédure doit être entreprise pour l'hydrophone monté selon la même orientation et autour des mêmes axes de rotation que ceux qui sont utilisés dans les mesurages de caractérisation de faisceau (article 8).

Si la direction de sensibilité maximale n'est pas parallèle à l'axe x du système de positionnement de l'hydrophone, il est essentiel que l'hydrophone soit orienté de façon à obtenir ce parallélisme.

7.1.3 Alignement d'un transducteur ultrasonore et d'un hydrophone

Pour obtenir une caractérisation fiable des champs acoustiques, il peut s'avérer nécessaire d'aligner l'axe d'alignement du faisceau du transducteur ultrasonore de façon qu'il soit parallèle à l'axe x de l'hydrophone, qui est lui-même parallèle à la direction de sensibilité maximale. La procédure suivante peut être utilisée.

Le transducteur ultrasonore et l'hydrophone étant montés sur leurs systèmes de micro-positionnement dans la cuve de balayage selon la description qui en est donnée en 5.2.1, 5.2.2 et 7.1.2, le signal de l'hydrophone est observé avec l'hydrophone positionné immédiatement au-delà de la région du champ proche.

Ce signal est maximisé par la translation de l'hydrophone dans les deux directions normales à l'axe d'alignement de faisceau (les axes y et z) et les positions de translation sont notées. L'hydrophone est ensuite déplacé en direction opposée au transducteur ultrasonore (axe x) soit de l'ordre de 150 mm, soit aussi loin que possible tout en conservant la possibilité de mesurer le signal acoustique avec un rapport signal/bruit adéquat. Le positionnement de l'hydrophone est optimisé à nouveau dans les directions y et z pour le signal maximum reçu, et les indications de position sont notées. Si ces indications sont différentes, cela signifie que l'axe d'alignement de faisceau n'est pas parallèle à l'axe x de l'hydrophone. Une connaissance de la différence entre les indications de translation dans les directions y et z combinée à la distance connue entre les plans de balayage proche et lointain, permet d'estimer la correction requise à apporter à la rotation du transducteur ultrasonore. Des mesurages correctifs sont pris et on recommence la procédure de manière itérative jusqu'à ce que l'axe d'alignement du faisceau soit parallèle à l'axe x de l'hydrophone dans les limites d'incertitude du mesurage.

Une autre procédure peut être utilisée qui consiste à faire tourner le transducteur ultrasonore pour obtenir le signal maximum lorsque l'hydrophone se trouve à la position du plan de balayage lointain, puis déplacé pour obtenir le signal maximum lorsqu'il est rapproché du transducteur ultrasonore. Des procédures par itération sont également utilisées pour obtenir l'alignement final.

Pour les systèmes à balayage automatique, la procédure décrite est identique en remplaçant partout l'expression «axe d'alignement du faisceau» par «axe de symétrie du plan de balayage», et une ligne de balayage centrale est choisie pour la procédure. Également, l'expression «dimension du transducteur ultrasonore» est remplacée par «dimension du groupe d'éléments du transducteur ultrasonore» si cela convient.

The procedure for aligning the active element with the rotation axes depends on the type and construction of the hydrophone. A.1.3 of Annex A gives possible alignment procedures which may be used.

For the purposes of field characterisation, it is necessary to know the directional response of the hydrophone which is determined according to 5.1.3. This procedure shall be undertaken for the hydrophone mounted in the same orientation and about the same rotation axes as used in the beam characterisation measurements (Clause 8).

If the direction of maximum sensitivity is not parallel to the x-axis of the hydrophone positioning system, it is essential that the hydrophone is oriented such that this is achieved.

7.1.3 Aligning an ultrasonic transducer and hydrophone

For reliable characterisation of acoustic fields it may be necessary to align the beam alignment axis of the ultrasonic transducer such that it is parallel to the x-axis of the hydrophone which itself is parallel to the direction of maximum sensitivity. The following procedure may be used.

With the ultrasonic transducer and hydrophone mounted from their micropositioning systems in the scanning tank, as described in 5.2.1, 5.2.2 and 7.1.2, the signal at the hydrophone is observed with the hydrophone positioned just beyond the near field region.

The signal is maximised by translation of the hydrophone in the two directions normal to the beam alignment axis (the y- and z-axes), and the translation positions noted. The hydrophone is then moved in the direction away from the ultrasonic transducer (x-axis) either, say 150 mm, or as far as possible while still being able to measure the acoustic signal with adequate signal-to-noise ratio. The hydrophone is again optimised in the y and z directions for maximum received signal, and the position readings noted. If these readings differ, then this indicates that the beam alignment axis is not parallel to the x-axis of the hydrophone. A knowledge of the difference between the translational readings in both the y and z directions combined with the known distance between the near and far scan planes is used to estimate the necessary correction to the rotation of the ultrasonic transducer. Corrective measures are taken, and the procedure is repeated iteratively until the beam alignment axis is parallel to the hydrophone x-axis within the measurement uncertainties.

An alternative procedure may be used in which the ultrasonic transducer is rotated for maximum signal when the hydrophone is at the far scan plane position and then the hydrophone is translated for maximum signal when brought close to the ultrasonic transducer. Again, iterative procedures are used to obtain final alignment.

For automatic scanning systems, the procedure outlined is identical but everywhere the term 'beam alignment axis' is replaced by 'symmetry axis of the scan plane', and a central scan line is selected for the procedure. Also, the term 'ultrasonic transducer dimension' is replaced by 'ultrasonic transducer element group dimension', if appropriate.

Pour les ensembles à balayage automatique, l'une des directions de balayage de l'hydrophone, par exemple l'axe y , doit être alignée pour être parallèle au plan de balayage du transducteur ultrasonore. La procédure suivante peut être utilisée pour l'obtenir.

Une ligne extrême de balayage ultrasonore est choisie et l'hydrophone est positionné pour obtenir le signal maximum dans le plan $y-z$. La position z de l'hydrophone dans le plan $y-z$ est notée. L'autre ligne extrême de balayage ultrasonore est choisie, puis on recommence la procédure. Dans les deux cas, la distance de l'hydrophone au transducteur ultrasonore (axe x) est maintenue constante et à une distance à laquelle les mesurages peuvent être faits avec un rapport signal/bruit adéquat. La rotation du transducteur ultrasonore autour d'un axe parallèle à l'axe de symétrie du plan de balayage est ensuite réglée et la procédure est recommandée jusqu'à ce que les deux positions de l'hydrophone dans la direction z soient les mêmes en ayant recours à nouveau à des méthodes itératives.

8 Caractérisation du faisceau

8.1 Paramètres primaires de pression

Le transducteur ultrasonore et l'hydrophone étant montés conformément aux dispositions de 5.2.1, 5.2.2 et 7.1, les paramètres acoustiques suivants peuvent être déterminés. Dans le cas de mesurages effectués dans un plan spécifié, la position du plan par rapport à la face du transducteur ultrasonore doit être spécifiée, sinon les paramètres concernent l'ensemble du champ ultrasonore.

- Pression acoustique positive de crête
- Pression acoustique négative de crête
- Pression acoustique efficace crête spatiale
- Pression acoustique crête spatiale moyenne sur l'impulsion
- Pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau, le cas échéant
- Pression acoustique moyenne faisceau moyen sur l'impulsion, le cas échéant
- Pression acoustique efficace moyenne spatiale
- Pression acoustique moyenne spatiale et sur l'impulsion, le cas échéant
- Facteur de crête acoustique
- Aire du faisceau à -20 dB
- Aire du faisceau à -6 dB
- Aire balayée, le cas échéant
- Paramètre de propagation non linéaire
- Forme d'onde de l'impulsion acoustique
- Position de la pression acoustique crête spatiale crête temporelle
- Fréquence de répétition de l'impulsion
- Fréquence de répétition de balayage, le cas échéant
- Fréquence acoustique de fonctionnement (moyenne arithmétique)
- Séparation de ligne de balayage ultrasonore, le cas échéant
- Dimensions du transducteur ultrasonore
- Dimensions du groupe d'éléments du transducteur ultrasonore

For automatic scanning systems, it is also necessary to align one of the hydrophone scan directions, say the *y*-axis, to be parallel to the scan plane of the ultrasonic transducer. The following procedure may be used to achieve this.

One extreme ultrasonic scan line is selected and the hydrophone positioned for maximum signal in the *y-z* plane. The *z*-position of the hydrophone in the *y-z* plane is noted. The other extreme ultrasonic scan line is selected and the procedure repeated. In both cases the distance of the hydrophone from the ultrasonic transducer (*x*-axis) is kept constant and at a distance at which measurements can be made with adequate signal-to-noise ratio. The rotation of the ultrasonic transducer about an axis parallel to the symmetry axis of the scan plane is then adjusted and the procedure repeated until the two positions of the hydrophone in the *z* direction are the same, again using iterative techniques.

8 Beam characterisation

8.1 Primary pressure parameters

With the ultrasonic transducer and hydrophone mounted in accordance with 5.2.1, 5.2.2 and 7.1, the following acoustic parameters may be determined. In the case of measurements made in a specified plane, the position of the plane from the face of the ultrasonic transducer shall be stated, and the parameters shall be described as representing peaks, minima, averages, as appropriate, with that plane only.

- Peak-positive acoustic pressure
- Peak-negative acoustic pressure
- Spatial-peak r.m.s. acoustic pressure
- Spatial-peak pulse acoustic pressure
- Beam-average r.m.s. acoustic pressure, if appropriate
- Beam-average pulse acoustic pressure, if appropriate
- Spatial-average r.m.s. acoustic pressure
- Spatial-average pulse acoustic pressure, if appropriate
- Acoustic crest factor
- -20 dB beam-area
- -6 dB beam-area
- Scan-area, if appropriate
- Nonlinear propagation parameter
- Acoustic pulse waveform
- Location of the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure
- Pulse repetition rate
- Scan repetition rate, if appropriate
- Arithmetic-mean acoustic-working frequency
- Ultrasonic scan line separation, if appropriate
- Ultrasonic transducer dimensions
- Ultrasonic transducer element group dimensions

Si les positions des pressions acoustiques positives de crête et négatives de crête diffèrent, les deux positions doivent être spécifiées.

Les parties suivantes traitent de la détermination de certains de ces paramètres. Se reporter aux figures 3, 5, 6 et 7, qui donnent des représentations schématiques de certains des paramètres sur l'impulsion.

NOTE - La fréquence acoustique de fonctionnement (moyenne arithmétique) est équivalente à la fréquence centrale de la référence [1].

8.1.1 *Pression acoustique positive crête et négative crête*

Une recherche systématique doit être effectuée pour localiser le ou les points de pression acoustique positive de crête et négative de crête. La pression acoustique crête spatiale crête temporelle est la plus élevée de ces deux valeurs.

Dans le cas d'ensembles à balayage automatique, il est essentiel de sélectionner tour à tour chaque ligne de balayage ultrasonore en optimisant l'hydrophone pour obtenir le signal maximum dans chaque cas. Cette sélection s'effectue à l'aide du signal de déclenchement pour chaque ligne de balayage ultrasonore, selon les dispositions du paragraphe 5.4. De surcroît, dans le cas d'appareils à balayage par déphasage (phased array) et à balayage sectoriel, il est essentiel d'optimiser la rotation de l'hydrophone ou du transducteur ultrasonore de façon que la direction de sensibilité maximale de l'hydrophone soit parallèle à l'axe d'alignement du faisceau pour la ligne de balayage ultrasonore choisie.

Si la pression acoustique crête spatiale crête temporelle est déterminée dans un plan spécifié, la recherche systématique doit être limitée au plan spécifié.

8.1.2 *Pression acoustique moyenne sur l'impulsion*

La pression acoustique moyenne sur l'impulsion est déterminée en un point spécifique du champ acoustique en calculant la racine carrée du rapport de l'intégrale du carré de la pression sur l'impulsion à la durée de l'impulsion.

8.1.3 *Pression acoustique crête spatiale moyenne sur l'impulsion*

Une recherche systématique est effectuée pour localiser le point où se trouve la crête spatiale de la pression acoustique moyenne sur l'impulsion.

8.1.4 *Pression acoustique efficace crête spatiale*

Une recherche systématique est effectuée pour trouver la valeur crête spatiale de la pression acoustique efficace.

Les mesurages doivent être faits sur un nombre entier de périodes de répétition acoustique et doivent comporter toutes les contributions importantes.

Dans le cas de systèmes à balayage automatique, afin de déterminer la pression acoustique efficace sur la période de répétition de balayage, il est essentiel de mesurer le signal reçu des lignes de balayage ultrasonore consécutives. Ceci correspond aux excitations provenant des groupes d'éléments transducteurs ultrasonores consécutifs dans le cas de transducteurs ultrasonores en rotation dans le cas d'appareils à balayage sectoriel ou par déphasage (phased array). Si la forme d'onde d'impulsion acoustique provenant de lignes consécutives de balayage ultrasonore ne varie pas de manière importante (voir [12] et [13]), une correction pour la contribution à la pression

If the locations of the peak-positive acoustic pressure and peak-negative acoustic pressure differ, both locations shall be specified.

The following sections deal with the determination of some of these parameters. Refer to figures 3, 5, 6 and 7 for schematic representations of some of the pulse parameters.

NOTE - Arithmetic-mean acoustic-working frequency is equivalent to center frequency in reference [1].

8.1.1 *Peak-positive and peak-negative acoustic pressure*

A systematic search shall be made to locate the point or points of peak-positive acoustic pressure and peak-negative acoustic pressure. The spatial-peak temporal-peak acoustic pressure is the maximum of these two values.

In the case of automatic scanning systems, it is essential to select each ultrasonic scan line in turn, optimising the hydrophone for maximum signal in each case. The selection is achieved by using the trigger signal for each ultrasonic scan line as referred to in 5.4. Additionally, in the case of phased-array and sector scanners, it is essential to optimise the rotation of the hydrophone or the ultrasonic transducer such that the direction of maximum sensitivity of the hydrophone is parallel to the beam alignment axis for the chosen ultrasonic scan line.

If the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure is determined in a specified plane, then the systematic search shall be restricted to that plane.

8.1.2 *Pulse acoustic pressure*

The pulse acoustic pressure is determined at a specific point in the acoustic field by determining the square root of the ratio of the pulse-pressure-squared integral to the pulse duration.

8.1.3 *Spatial-peak pulse acoustic pressure*

A systematic search shall be made to locate the point of spatial-peak pulse acoustic pressure.

8.1.4 *Spatial-peak r.m.s. acoustic pressure*

A systematic search shall be made to locate the point of spatial-peak r.m.s. acoustic pressure.

Measurements shall be made over an integral number of acoustic repetition periods and shall contain all significant contributions.

In the case of automatic scanning systems, in order to determine the r.m.s. acoustic pressure over the scan repetition period, it is essential to measure the received signal from consecutive ultrasonic scan lines. This corresponds to excitations from consecutive ultrasonic transducer element groups in the case of multielement ultrasonic transducers or from consecutive rotational ultrasonic scan lines in the case of sector scanners or phased-array scanners. If the acoustic pulse waveform from consecutive

acoustique efficace de lignes de balayage ultrasonore se chevauchant peut être déterminée à partir des mesurages de la pression acoustique moyenne sur cycle de crête pour les lignes de balayage ultrasonore concernées. Un facteur de correction doit être déterminé à partir du rapport de la pression acoustique moyenne sur cycle de crête pour la ligne de balayage ultrasonore à laquelle la pression acoustique crête spatiale crête temporelle se manifeste, à la somme des pressions acoustiques moyennes sur cycle de crête pour toutes les autres lignes de balayage ultrasonore qui apportent une contribution importante. La pression acoustique efficace crête spatiale au point considéré est déterminée à partir du produit de la valeur mesurée par le facteur de correction.

Avec les hydrophones existants, il est essentiel de faire tourner l'hydrophone autour de son axe perpendiculaire au plan de balayage afin de maximiser le signal reçu dans chaque cas.

8.1.5 Pression acoustique moyenne sur le faisceau et sur l'impulsion

Ce mesurage s'effectue sur un transducteur ultrasonore spécifié ou un groupe d'éléments transducteurs ultrasonores. L'hydrophone est balayé dans un plan perpendiculaire à l'axe d'alignement du faisceau du transducteur ultrasonore et la pression acoustique crête spatiale crête temporelle est déterminée. Le lieu géométrique des points se trouvant dans ce plan qui définit l'aire du faisceau à -6 dB est alors déterminé.

Si $\sigma_m \leq 0,5$ et si la forme d'onde de l'impulsion acoustique ne change pas dans les limites de l'aire du faisceau, cette aire est définie uniquement à partir des mesures de la pression acoustique de crête. Dans ce cas, le lieu est défini par les points dans lesquels la pression acoustique de crête temporelle est une fraction de la pression acoustique de crête spatiale et temporelle dans ce plan. La fraction spécifiée sera 0,5 ou 0,1 pour l'aire de faisceau à -6 dB ou à -20 dB respectivement.

La procédure décrite ici permet de déterminer la pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion dans tout plan. Si la position de ce plan n'est pas spécifiée, on doit le présumer comme étant le plan contenant la pression acoustique crête spatiale crête temporelle dans l'ensemble du champ acoustique.

Lorsque le lieu géométrique a été identifié, la surface délimitée par ce contour est balayée de façon systématique. Le nombre de points d'échantillon devrait être approximativement égal au rapport de l'aire du faisceau à -6 dB à la surface géométrique de l'élément actif de l'hydrophone, jusqu'à un maximum de 100 points. L'espace maximum séparant des points échantillons adjacents devrait correspondre à une variation de signal inférieure à $\pm 1,5$ dB. D'une manière générale, un réseau rectangulaire de points d'échantillonnage devrait être utilisé. La pression acoustique moyenne sur l'impulsion est déterminée en chaque point et la pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion est déterminée à partir d'une moyenne sur l'ensemble des mesurages.

Cette procédure peut être plus simple si le profil du faisceau du transducteur est supposé avoir une symétrie de révolution. Dans ce cas, un balayage diamétral est effectué, traversant le point de pression acoustique crête spatiale crête temporelle, la pression acoustique moyenne sur l'impulsion étant déterminée en chaque point d'échantillonnage. La pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion est déterminée à partir d'une moyenne sur tous les anneaux. L'hypothèse de symétrie de révolution peut être vérifiée en répétant ce mesurage selon une direction de balayage diamétral perpendiculaire à la direction d'origine. Les valeurs de la pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion déterminées à partir de ces deux balayages ne doivent pas différer de plus $\pm 30\%$.

ultrasonic scan lines does not vary significantly (see [12] and [13]) then a correction for the contribution from overlapping ultrasonic scan lines to the r.m.s. acoustic pressure may be determined from measurements of the mean-peak-cycle acoustic pressure for the relevant ultrasonic scan lines. A correction factor shall be determined from the ratio of the mean-peak-cycle acoustic pressure for the ultrasonic scan line at which the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure occurs to the sum of the mean-peak-cycle acoustic pressures for all other ultrasonic scan lines which provide a significant contribution. The spatial-peak r.m.s. acoustic pressure at the point considered is determined from the product of the measured value and the correction factor.

With existing hydrophones, it is essential to rotate the hydrophone about its axis which is perpendicular to the scan plane in order to maximise the received signal in each case.

8.1.5 Beam-average pulse acoustic pressure

This measurement is made on a specified ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group. The hydrophone is scanned in a plane perpendicular to the beam alignment axis of the ultrasonic transducer and the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure is determined. The -6 dB beam-area is then determined.

If $\sigma_m \leq 0,5$ and if the acoustic pulse waveform does not change over the beam-area, the beam-area may be determined from peak acoustic pressure measurements only. In this case, the beam-area is determined from points at which the temporal-peak acoustic pressure is a fraction of the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure in the plane. The specified fraction shall be 0,5 or 0,1 for the -6 dB beam-area or the -20 dB beam-area respectively.

The procedure described here enables the determination of the beam-average pulse acoustic pressure in any plane. If the position of this plane is not specified it shall be assumed to be the plane which contains the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure throughout the whole acoustic field.

The beam-area is scanned in a systematic manner. The number of sample points should be approximately equal to the ratio of the -6 dB beam-area to the geometrical area of the active element of the hydrophone, up to a maximum of 100 points. The maximum spacing between adjacent sample points should correspond to a signal change of less than $\pm 1,5$ dB. In general, a rectangular array of sample points should be used. The pulse acoustic pressure is determined at each point, and the beam-average pulse acoustic pressure is determined from an average over all the measurements.

This procedure may be simpler if the beam profile from the transducer is assumed to be cylindrically symmetrical. In this case, a diametrical scan is performed passing through the point of spatial-peak temporal-peak acoustic pressure, the pulse acoustic pressure being determined at each sample point. The beam-average pulse acoustic pressure is determined from an average over all the annuli. The cylindrical symmetry assumption may be tested by repeating the exercise using a diametrical scan direction perpendicular to the original direction. The values of the beam-average pulse acoustic pressure determined from these two scans shall not differ by more than ± 30 %.

8.1.6 *Pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau*

Le paragraphe 8.1.5 s'applique sauf pour ce qui suit: remplacer partout l'expression «moyenne sur l'impulsion» par «efficace».

NOTE - Ce n'est pas l'expression préférée pour les systèmes à balayage non automatique, se reporter au 8.1.7.

8.1.7 *Pression acoustique moyenne spatiale et sur l'impulsion*

Cette pression concerne exclusivement les systèmes à balayage non automatique et est égale à la pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion.

8.1.8 *Pression acoustique efficace moyenne spatiale*

Pour les systèmes à balayage non automatique, elle est égale à la pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau et, dans ce cas, la pression acoustique efficace moyenne spatiale doit être préférée.

Pour les systèmes à balayage automatique, la moyenne spatiale de la pression acoustique efficace doit être prise sur l'aire balayée. Si la position de la surface contenant l'aire balayée n'est pas spécifiée, on doit supposer qu'il s'agit de la surface qui contient la pression acoustique crête spatiale crête temporelle dans l'ensemble du champ ultrasonore.

Cette surface doit être supposée plane pour les systèmes à balayage automatique dans lesquels les lignes de balayage ultrasonore sont approximativement parallèles, elle doit être cylindrique (centrée sur le transducteur ultrasonore) pour les systèmes émettant des lignes radiales de balayage ultrasonore dans un plan, et elle doit être sphérique pour les systèmes émettant des lignes radiales de balayage ultrasonore. Il doit être tenu compte des contributions dues au chevauchement des lignes de balayage ultrasonore dans la détermination de la pression acoustique efficace en chaque point de l'aire balayée. Toutefois, cela prend manifestement beaucoup de temps dans le cas de transducteurs ultrasonores multieléments pour déterminer la pression acoustique efficace à chaque position. Il peut alors s'avérer approprié de déterminer l'intégrale du carré de la pression acoustique sur l'impulsion à chaque position pour un groupe particulier d'éléments transducteurs ultrasonores, et de déterminer ensuite une correction pour tenir compte de la variation de la contribution des autres groupes d'éléments transducteurs ultrasonores. Cette correction peut être déterminée à partir de la somme des pressions acoustiques moyennes sur un cycle de crête provenant d'autres lignes de balayage ultrasonore en appliquant la procédure définie au 8.1.4.

NOTE - Si la séparation des lignes de balayage ultrasonore est telle que les aires du faisceau de lignes de balayage ultrasonore consécutives ne se recoupent pas, la pression acoustique efficace moyenne spatiale n'est pas identique à la pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau même si les valeurs de pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau correspondant à toutes les excitations au cours de la période de répétition de balayage sont identiques.

8.1.9 *Paramètres de propagation non linéaire*

La propagation des ultrasons dans l'eau aux pressions et fréquences acoustiques fréquemment rencontrées dans les champs ultrasonores médicaux n'est pas un processus linéaire et la forme d'onde d'impulsion acoustique subit fréquemment une distorsion de ce fait. Dans les champs diffractifs, des différences accrues existent entre la pression acoustique positive crête et la pression acoustique négative crête. Pour déterminer l'importance de la distorsion dans la caractérisation des champs ultrasonores, le degré de propagation non linéaire peut être prédit [14] par le calcul du paramètres de propagation non linéaire, σ_m (voir 3.25).

8.1.6 Beam-average r.m.s. acoustic pressure

8.1.5 applies except as follows: Everywhere replace the term 'pulse' by 'r.m.s.'

NOTE - This is not the preferred term for non-automatic scanning systems, see 8.1.7.

8.1.7 Spatial-average pulse acoustic pressure

This applies to non-automatic scanning systems only and is equal to the beam-average pulse acoustic pressure.

8.1.8 Spatial-average r.m.s. acoustic pressure

For non-automatic scanning systems this is equal to the beam-average r.m.s. acoustic pressure, and in this case spatial-average r.m.s. acoustic pressure shall be the preferred term.

For automatic scanning systems, the spatial average of the r.m.s. acoustic pressure shall be taken over the scan-area. If the position of the surface containing the scan-area is not specified it shall be assumed to be the surface which contains the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure throughout the ultrasonic field.

This surface shall be assumed to be planar for automatic scanning systems in which the ultrasonic scan lines are approximately parallel, it shall be cylindrical (centred at the ultrasonic transducer) for systems emitting radial ultrasonic scan lines in a plane and it shall be spherical for systems emitting radial ultrasonic scan lines. Contributions from overlapping ultrasonic scan lines shall be taken into account in the determination of r.m.s. acoustic pressure at each point in the scan-area. However, it is clearly time consuming in the case of multielement ultrasonic transducers to determine the r.m.s. acoustic pressure at each position. In this case, it may be adequate to determine the integral of the square of the acoustic pressure over the pulse at each position from the particular ultrasonic transducer element group, and then determine a correction to take account of the variation in the contribution from other ultrasonic transducer element groups. This correction may be determined from the sum of the mean-peak-cycle acoustic pressures from other ultrasonic scan lines following the procedure given in 8.1.4.

NOTE - If the ultrasonic scan line separation is such that the beam-areas from consecutive ultrasonic scan lines do not overlap, then spatial-average r.m.s. acoustic pressure is not identical to beam-average r.m.s. acoustic pressure even if the values for the beam-average r.m.s. acoustic pressure corresponding to all excitations during the scan repetition period are identical.

8.1.9 Nonlinear propagation parameter

The propagation of ultrasound in water at the acoustic pressures and frequencies frequently encountered in medical ultrasonic fields is not a linear process and the acoustic pulse waveform is often distorted as a result. In diffractive fields, enhanced differences exist between the peak-positive acoustic pressure and the peak-negative acoustic pressure. To determine the significance of the distortion in the characterisation of ultrasonic fields, the degree of nonlinear propagation can be predicted [14] by calculation of the nonlinear propagation parameter, σ_m (see 3.25).

On peut définir les régimes suivants:

- 1) $\sigma_m < 0,5$, peu de distorsion non linéaire s'est produite. L'amplitude à l'a.w.f. fondamentale diffère de moins de 5 % de la valeur, en l'absence d'effets non linéaires.
 - 2) $0,5 \leq \sigma_m \leq 1,5$, une distorsion considérable s'est produite. Un hydrophone à large bande devrait être utilisé avec une sensibilité variant de moins de ± 6 dB sur la gamme de fréquences s'étendant jusqu'à trois octaves au-dessus de l'a.w.f. (voir 5.1.6). L'amplitude dans une bande d'un demi-octave centré sur l'a.w.f. différerait de sa valeur, en l'absence d'effets non linéaires, de 5 % à 25 %.
 - 3) $\sigma_m > 1,5$, une distorsion non linéaire considérable ainsi qu'une atténuation à l'a.w.f. se sont produites. Un hydrophone à large bande devrait être utilisé comme dans le cas 2) ci-dessus. L'amplitude dans une bande d'un demi-octave centré sur l'a.w.f. différerait de plus de 25 % de la valeur en l'absence d'effets non linéaires.
- NOTE - En 2) et 3) ci-dessus, la borne supérieure de la bande passante peut dépasser 15 MHz.

La valeur réelle de la propagation non-linéaire peut être estimée tant à partir de la forme d'onde de l'impulsion acoustique que du facteur de crête acoustique. Ce dernier aurait les valeurs suivantes pour les différentes formes de cycle de crête de l'impulsion:

Sinusoidale	1,41
Dent de scie	1,73
Dent de scie diffractive >	1,73

Par conséquent, la valeur de la distorsion non linéaire présente peut être estimée à partir du facteur de crête acoustique et l'importance relative de la distorsion non linéaire peut être prédite à l'aide du paramètre de propagation non linéaire.

NOTES

- 1 – Dans des cas exceptionnels, il serait possible d'obtenir un facteur de crête acoustique supérieur à 1,41, lorsque la propagation non linéaire est absente.
- 2 – Le paramètre de propagation non linéaire serait vraisemblablement le plus fiable pour la prévision de la valeur de la distorsion non linéaire.

8.2 Paramètres d'intensité dérivés

Du fait que les hydrophones mesurent la pression acoustique, il convient que l'indication des valeurs basées sur les mesurages par hydrophone soit donnée en termes de pression acoustique. Par conséquent, les paramètres donnés en 8.1 et dans les définitions (article 3) doivent être préférés pour la spécification.

Dans les conditions dans lesquelles il est raisonnable de supposer une propagation d'onde plane, on peut convertir les paramètres de pression acoustique instantanée mesurés en intensité vraie. Si cela est fait, il doit être clairement annoncé que l'approximation d'onde progressive plane a été utilisée.

Dans ce cas, l'intensité instantanée, $I(t)$, est donnée par la formule suivante:

$$I(t) = p(t)^2 / pc$$

où:

- p est la densité de l'eau;
- c la vitesse du son dans l'eau (voir annexe B).

The following regimes may be defined:

- 1) $\sigma_m < 0,5$, little nonlinear distortion has occurred. The amplitude at the fundamental a.w.f. differs by less than 5 % from the value in the absence of nonlinear effects.
- 2) $0,5 \leq \sigma_m \leq 1,5$, considerable distortion has occurred. A broadband hydrophone should be used with a sensitivity which varies by less than ± 6 dB over the frequency range up to three octaves above the a.w.f. (see 5.1.6). The amplitude in a one half octave band centred at the a.w.f. would differ from its value in the absence of nonlinear effects by between 5 % and 25 %.
- 3) $\sigma_m > 1,5$, considerable nonlinear distortion and also attenuation at the a.w.f. has occurred. A broadband hydrophone should be used as in 2) above. The amplitude in a one half octave band centred at the a.w.f. would differ by more than 25 % from the value in the absence of nonlinear effects.

NOTE - In 2) and 3) above, the upper frequency bandwidth may exceed 15 MHz.

The actual amount of nonlinear propagation can be assessed from both the acoustic pulse waveform and also the acoustic crest factor. The acoustic crest factor would have the following values for different forms of pulse peak cycles:

Sinusoidal	1,41
Sawtooth	1,73
Diffractive Sawtooth >	1,73

Therefore, the amount of nonlinear distortion present can be estimated from the acoustic crest factor, and the relative importance of nonlinear distortion can be predicted from the nonlinear propagation parameter.

NOTES

- 1 - Under exceptional circumstances, it may be possible to obtain an acoustic crest factor greater than 1,41 when nonlinear propagation is absent.
- 2 - The nonlinear propagation parameter would be expected to be the more reliable parameter for predicting the amount of nonlinear distortion.

8.2 Derived intensity parameters

As hydrophones measure acoustic pressure, it is appropriate that the specification of quantities based on hydrophone measurements should be given in terms of acoustic pressure. Hence the parameters given in 8.1 and in the definitions (Clause 3) shall be the preferred parameters for specification.

Under conditions when it is reasonable to assume plane progressive wave propagation, it is possible to convert the measured instantaneous acoustic pressure parameters to true intensity. If this is done then it shall be clearly stated that the plane progressive wave approximation has been used.

In this case, the instantaneous Intensity, $I(t)$, is given by

$$I(t) = p(t)^2 / \rho c$$

where:

- ρ is the density of water;
- c is the velocity of sound in water (see Annex B).

Les paramètres d'intensité dérivés suivants peuvent être déterminés directement à partir des paramètres de pression:

- Intensité crête spatiale crête temporelle
- Intensité crête spatiale moyenne temporelle
- Intensité crête spatiale moyenne sur l'impulsion

Ces paramètres sont associés aux paramètres de pression correspondants de la façon suivante:

$$I_{\text{sptp}} = (p_{\text{sptp}})^2 / \rho c$$

$$I_{\text{spta}} = (p_{\text{sp},t})^2 / \rho c$$

$$I_{\text{sppa}} = (p_{\text{spp}})^2 / \rho c$$

Les paramètres d'intensité moyenne faisceau et moyenne spatiale suivants peuvent être déterminés séparément:

- Intensité moyenne sur le faisceau moyenne sur l'impulsion (I_{bapa})
- Intensité moyenne sur le faisceau moyenne temporelle (I_{bata})
- Intensité moyenne spatiale moyenne sur l'impulsion (I_{sapa})
- Intensité moyenne spatiale moyenne temporelle (I_{sata})

Les procédures utilisées pour la détermination de ces paramètres doivent être similaires à celles qui concernent les paramètres de pression acoustique équivalents (voir 7.1.5, 7.1.6, 7.1.7 et 7.1.8). Toutefois, dans ce cas, le paramètre enregistré en chaque point du champ acoustique est le carré de la pression acoustique instantanée.

NOTE - Si le paramètre de propagation non-linéaire dépasse 0,5, les conversions des paramètres de pression mesurés en intensités peuvent ne pas être valides ou suffisamment précises.

8.3 Paramètres d'intégrale d'intensité sur l'impulsion dérivés

Le paramètre suivant peut être dérivé directement des paramètres d'intensité et de pression:

- Intégrale sur l'impulsion de l'intensité crête spatiale

L'intégrale sur l'impulsion de l'intensité crête spatiale est déterminée au point du champ acoustique correspondant à la pression acoustique crête spatiale crête temporelle.

9 Spécification et marquage de la puissance acoustique émise

En vue de se conformer aux dispositions de la présente norme, les déclarations de sortie acoustique pour la spécification et le marquage doivent être les valeurs probables maximales. Les paramètres acoustiques doivent être choisis parmi ceux définis dans la présente Norme internationale ou tous autres paramètres dérivés.

The following derived intensity parameters may be determined directly from the pressure parameters:

- Spatial-peak temporal-peak intensity
- Spatial-peak temporal-average intensity
- Spatial-peak pulse-average intensity

These are related to the corresponding pressure parameters as follows:

$$I_{\text{sptp}} = (p_{\text{sptp}})^2 / \rho c$$

$$I_{\text{spta}} = (p_{\text{spr}})^2 / \rho c$$

$$I_{\text{sppa}} = (p_{\text{spp}})^2 / \rho c$$

The following beam-average and spatial-average intensity parameters may be determined separately:

- Beam-average pulse-average intensity (I_{bapa})
- Beam-average temporal-average intensity (I_{bata})
- Spatial-average pulse-average intensity (I_{sapa})
- Spatial-average temporal-average intensity (I_{sata})

The procedures used for the determination of these parameters shall be similar to those for the equivalent acoustic pressure parameters (see 8.1.5, 8.1.6, 8.1.7 and 8.1.8). However, in this case the parameter recorded at each point in the acoustic field is the square of the instantaneous acoustic pressure.

NOTE - If the nonlinear propagation parameter exceeds 0,5, then the conversions of measured pressure parameters to intensities may not be valid or sufficiently accurate.

8.3 Derived pulse-intensity integral parameters

The following parameter may be derived directly from the pressure and intensity parameters:

- Spatial-peak pulse-intensity Integral

The spatial-peak pulse-intensity Integral is determined at the point in the acoustic field corresponding to the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure.

9 Acoustic output specification and labelling

For compliance with this International Standard, the statements of acoustic output for the purposes of specification and labelling shall be the maximum probable values. The acoustical parameters shall be chosen from those defined in this Standard or any other parameters derived therefrom.

Les valeurs probables maximales doivent être une sommation linéaire des contributions des deux sources suivantes: en premier lieu, l'ensemble maximal de valeur des mesurages appliqués à des systèmes, nominalement identiques, chacun d'entre eux ayant les réglages de sortie acoustique appropriés pour donner la puissance de sortie maximale; en second lieu, l'incertitude des procédures de mesurage, qui doit être une estimation de la somme quadratique totale des incertitudes systématiques et aléatoires (qui se rapportent à des mesurages faits sur un système, ces derniers étant exprimés à un niveau de confiance de 95 %).

Si des modes différents d'utilisation de système donnent des valeurs différentes des paramètres de sortie acoustique, des valeurs doivent être données pour tous ces modes.

Il peut s'avérer impossible de satisfaire à toutes les exigences de la présente norme. Si des mesurages sont faits aux fins de spécification et de marquage de puissance de sortie acoustique, qui ne satisfassent à une ou plusieurs prescriptions, cette carence doit être clairement déclarée lors du compte rendu des résultats. Une déclaration de non-conformité du mesurage doit comporter l'article ou le paragraphe concerné et doit donner la raison de la non-conformité.

NOTE - Des exemples sélectionnés de non-conformité sont donnés ci-dessous, dans lesquels la CEI 1102 renvoie à la présente norme.

- a) Les dispositions de la CEI 1102 ont été satisfaites à l'exception du 5.1.6; la sensibilité de l'hydrophone à 20 MHz était de 60 % inférieure à la sensibilité à 5 MHz.
- b) Les dispositions de la CEI 1102 ont été satisfaites à l'exception du 5.1.8; la variation de gain d'amplificateur de 5 MHz à 20 MHz était de -5 dB.
- c) Les dispositions de la CEI 1102 ont été satisfaites à l'exception du 5.1.5; le rayon apparent de l'hydrophone était de 0,5 mm.

The maximum probable values shall be a linear summation of the contributions from the following two sources: first, the maximum set of values of the measurements applied to nominally identical systems, each with the appropriate acoustic output settings yielding the maximum output; and second, the uncertainty in the measurement procedures, which shall be an estimate of the square root of the total quadrature sum of the systematic and random uncertainties (these referring to measurements made on one system and the latter expressed as a 95 % confidence level).

If different system operating modes give rise to different values of the acoustic output parameters, then values shall be given for all such modes.

It may not be possible to comply with all the requirements of this International Standard. If measurements are made for the purposes of acoustic output specification and labelling which do not comply with any particular requirements then lack of compliance shall be clearly stated when reporting results. A statement of non-compliance shall include the relevant clause or subclause and shall give the reason for non-compliance.

NOTE - Selected examples of non-compliance may be as follows, where IEC 1102 refers to this International Standard.

- a) IEC 1102 was complied with except for 5.1.6; the sensitivity of the hydrophone at 20 MHz was 60 % below the sensitivity at 5 MHz.
- b) IEC 1102 was complied with except for 5.1.8; the change in amplifier gain from 5 MHz to 20 MHz was –5 dB.
- c) IEC 1102 was complied with except for 5.1.5; the effective radius of the hydrophone was 0,5 mm.

Annexe A (informative)

A.1 Hydrophones

Il existe essentiellement trois types d'**hydrophones** actuellement en utilisation. Deux modèles d'**hydrophones** emploient un élément actif constitué soit d'une céramique soit d'un polymère piézoélectrique (généralement le fluorure de polyvinylidène, PVDF) placé à la pointe d'une structure en forme d'aiguille. Le troisième type est l'**hydrophone à membrane** qui utilise une large feuille de PVDF, dont la partie centrale est piézoélectrique. On se reportera au A.4 qui présente une étude détaillée de ces trois types d'**hydrophones**.

Aucune de ces conceptions actuelles d'**hydrophones** ne permet de satisfaire à toutes les exigences sur la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz. Néanmoins, l'importance relative des exigences dépend du champ ultrasonore particulier à caractériser. Par exemple, dans le champ lointain d'un transducteur ultrasonore fonctionnant en piston plan, la taille de l'élément actif peut atteindre de deux à trois fois la longueur d'onde acoustique. Également, pour des pressions acoustiques inférieures à 0,1 MPa, la bande passante de l'**hydrophone** est moins critique du fait que la distorsion non linéaire ne sera vraisemblablement pas importante aux distances de propagation normalement rencontrées. De même, pour les mesurages de champs pulsés, les réflexions provenant des **hydrophones à membrane** sont moins importantes que pour les champs à ondes entretenues.

A.1.1 Considérations de charge électrique

La sensibilité en bout de câble d'un **hydrophone** peut être déterminée à partir de sa sensibilité en circuit ouvert en bout de câble, à l'aide de la méthode suivante.

Considérons le cas général, représenté à la figure 8, dans lequel l'**hydrophone** est censé être un réseau à deux bornes d'impédance complexe Z . Supposons également que l'**hydrophone** est relié à une charge électrique d'impédance complexe Z_{el} . Selon la théorie des réseaux électriques (voir [15]), la sensibilité en bout de câble de l'**hydrophone**, M_L , lorsque celui-ci est relié à la charge spécifiée, est associée à la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble M_c , par la formule suivante:

$$M_L = M_c \left(\frac{\operatorname{Re}(Z_{el})^2 + \operatorname{Im}(Z_{el})^2}{[\operatorname{Re}(Z_{el}) + \operatorname{Re}(Z)]^2 + [\operatorname{Im}(Z_{el}) + \operatorname{Im}(Z)]^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

où:

Re et Im indiquent les parties réelles et imaginaires de l'impédance complexe appropriée.

On suppose fréquemment que la charge électrique est une combinaison parallèle d'une résistance R_{el} et d'une capacité C_{el} , comme le représente la figure 8(b). Dans ce cas, $\operatorname{Re}(Z_{el})$ et $\operatorname{Im}(Z_{el})$ sont donnés par les formules suivantes:

Annex A (Informative)

A.1 Hydrophones

There are three basic types of hydrophone which are currently in use. Two hydrophone constructions employ an active element made from either a piezoelectric ceramic or polymer (usually polyvinylidene fluoride, pvdf), which is supported at the end of a needle-like structure. The third type is the membrane hydrophone which uses a large sheet of pvdf, the central region of which is piezoelectrically activated. Refer to Annex A for a more detailed assessment of the three types of hydrophone.

None of these current designs of hydrophone yield devices which meet all the requirements over the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz. Nevertheless, the relative importance of the requirements depends on the particular ultrasonic field to be characterised. For instance, in the far field of a plane piston ultrasonic transducer, the size of the active element can be up to two or three times the acoustic wavelength. Also, for acoustic pressures less than 0,1 MPa, the bandwidth of the hydrophone is less critical because nonlinear distortion is unlikely to be significant at the propagation distances normally encountered. Likewise, for measurements on pulsed fields, reflections from membrane hydrophones are less important than for continuous wave fields.

A.1.1 Electrical loading considerations

The end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone may be determined from its end-of-cable open-circuit sensitivity using the following method.

Consider the general case, shown in figure 8, in which the hydrophone is considered as a two-terminal network of complex impedance Z . Consider also that the hydrophone is connected to an electrical load of complex impedance Z_{el} . From electrical network theory (see [15]), the end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone, M_L , when connected to the specified load is related to the end-of-cable open-circuit sensitivity, M_c , by

$$M_L = M_c \left(\frac{\operatorname{Re}(Z_{el})^2 + \operatorname{Im}(Z_{el})^2}{[\operatorname{Re}(Z_{el}) + \operatorname{Re}(Z)]^2 + [\operatorname{Im}(Z_{el}) + \operatorname{Im}(Z)]^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

where:

Re and Im denote the real and imaginary parts of the relevant complex impedance.

Often, the electrical load can be assumed to be a parallel combination of a resistance R_{el} and capacitance C_{el} , as shown in figure 8(b). In this case, $\operatorname{Re}(Z_{el})$ and $\operatorname{Im}(Z_{el})$ are given by

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{el}}) = \frac{R_{\text{el}}}{1 + \omega^2 C_{\text{el}}^2 R_{\text{el}}^2}$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{el}}) = \frac{-\omega C_{\text{el}} R_{\text{el}}^2}{1 + \omega^2 C_{\text{el}}^2 R_{\text{el}}^2}$$

où:

ω est la fréquence angulaire.

On peut simplifier plus encore si l'on peut supposer que l'impédance de l'hydrophone et la charge sont capacitives. Dans ce cas, si C est la capacité en bout de câble de l'hydrophone, y compris tout câble et tout connecteur intégré, l'équation (1) se réduit à

$$M_L = M_c \left(\frac{C}{C + C_{\text{el}}} \right) \quad (2)$$

Se reporter à [7], [16-19].

Il convient donc de spécifier l'impédance complexe de la charge électrique et de l'hydrophone en fonction de la fréquence afin de déterminer la sensibilité vraie en bout de câble d'un hydrophone lorsqu'il est relié à une charge électrique quelconque. En ce qui concerne la situation dans laquelle l'impédance de l'hydrophone est capacitive, l'impédance complexe peut être donnée sous la forme de capacité de bout de câble en fonction de la fréquence et de la longueur de tout câble intégré. Pour les hydrophones qui ont un amplificateur incorporé, le gain de l'amplificateur devra également être spécifié, avec l'impédance de sortie et la sensibilité avec une charge électrique spécifiée.

A.1.2 Amplificateur de signal d'hydrophone

Le but d'un amplificateur de signal d'hydrophone est de fournir un étage tampon entre l'hydrophone et le système de mesure. Cet étage tampon élimine les effets de résonance de câble aux fréquences élevées et fournit un gain supplémentaire et une charge électrique constante à l'hydrophone. Un amplificateur peut être incorporé dans l'hydrophone comme pré-amplificateur intégré, auquel cas il est impossible de séparer les deux dispositifs. Il peut également constituer un dispositif distinct dans lequel l'hydrophone est enfiché, soit directement, soit à l'aide d'un connecteur disposé à l'extrémité du câble d'hydrophone. Ces trois configurations sont représentées de manière schématique à la figure 9. Les désavantages des amplificateurs d'hydrophones tiennent au fait qu'ils tendent à limiter la dynamique et qu'ils doivent faire appel à une alimentation, ce qui ajoute encore à la complexité. Les pré-amplificateurs intégrés présentent un autre inconvénient, celui d'avoir besoin de fils d'alimentation supplémentaires au niveau de l'hydrophone. Dans ce cas, il peut être utile de monter un fil complémentaire pour l'essai du pré-amplificateur par injection de signal électrique (voir [7]).

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{el}}) = \frac{R_{\text{el}}}{1 + \omega^2 C_{\text{el}}^2 R_{\text{el}}^2}$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{el}}) = \frac{-\omega C_{\text{el}} R_{\text{el}}^2}{1 + \omega^2 C_{\text{el}}^2 R_{\text{el}}^2}$$

where:

ω is the angular frequency.

A further simplification is possible if the impedance of the hydrophone and the load can be assumed to be capacitative. In this case, if C is the end-of-cable capacitance of the hydrophone, including any integral cable and connector, equation (1) reduces to

$$M_L = M_c \left(\frac{C}{C + C_{\text{el}}} \right) \quad (2)$$

See [7], [16-19].

It is, therefore, necessary to specify the complex impedance of both the hydrophone and the electrical load as a function of frequency in order to determine the true end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone when connected to any electrical load. For the situation where the hydrophone impedance is capacitative, the complex impedance can be given in terms of the end-of-cable capacitance as a function of frequency and the length of any integral cable. For hydrophones with an integral amplifier, the gain of the amplifier should also be specified together with the output impedance and the sensitivity into a specified electrical load.

A.1.2 Hydrophone signal amplifier

The purpose of a hydrophone signal amplifier is to provide a buffer between the hydrophone and the measurement system. Such a buffer overcomes cable resonance effects at high frequencies and provides extra gain and a constant electrical load for the hydrophone. An amplifier may be incorporated in the hydrophone as a built-in preamplifier in which case it is not possible to separate the two devices. Alternatively, it may be a separate device into which the hydrophone is plugged either directly or using the connector at the end of the hydrophone cable. The three configurations are shown schematically in figure 9. Disadvantages of any hydrophone amplifiers are that they will tend to limit dynamic range and that they will need a power supply, thereby adding complexity. An additional disadvantage of built-in preamplifiers is the need for extra power supply wires at the hydrophone. In this case, it may be useful to provide a further wire for electrical signal injection testing of the preamplifier. See [7].

A.1.3 Alignement des hydrophones

Cette partie présente les procédures utiles pour l'alignement des hydrophones au point de pression acoustique crête spatiale crête temporelle dans un plan perpendiculaire à l'axe d'alignement du faisceau.

Dans le cas des hydrophones à membrane, il est possible de vérifier si l'alignement est correct en faisant tourner l'hydrophone de 180° autour d'un axe traversant le plan de l'élément actif et en notant la variation du signal reçu en observant un champ acoustique pulsé. Une variation dans le retard entre l'excitation et la réception indique un défaut d'alignement dans la direction normale à l'élément actif, et une variation d'amplitude indique un défaut d'alignement dans le plan de l'élément actif. Dans le cas de transducteurs ultrasonores excités par onde entretenu, la même procédure peut être appliquée vis-à-vis de l'amplitude et, si l'hydrophone a déjà été aligné à une valeur égale ou inférieure à un quart de la longueur d'onde acoustique près dans l'eau, des réglages fins doivent être effectués en notant la modification de phase à la rotation.

Dans le cas d'hydrophones à ondes, il est possible de vérifier que l'alignement est correct en faisant tourner l'hydrophone d'un angle inférieur à 180° autour d'un axe traversant le plan de l'élément actif.

Pour les deux types d'hydrophones, on peut appliquer des méthodes optiques utilisant soit un microscope mobile, soit un faisceau laser de faible diamètre. Là encore, la procédure consisterait à observer la position de l'élément actif et sa variation lorsque l'on fait tourner l'hydrophone à l'aide du système à micropositionnement.

A.1.4 Types d'hydrophones

A.1.4.1 Hydrophones à sonde céramique

Ces hydrophones sont généralement constitués d'un petit disque circulaire de céramique piézoélectriques monté sur la pointe d'un support en forme d'aiguille ou de crayon, comme le représente schématiquement la figure 10. L'élément actif de l'hydrophone est soutenu par un matériau absorbant et est d'une taille proche du diamètre du support, allant fréquemment de 0,5 mm à 1,5 mm de diamètre. Le câble véhiculant les signaux traverse inévitablement le champ ultrasonore, ce qui peut créer des difficultés du point de vue de l'effet triboélectrique.

La sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de ces dispositifs est typiquement de 0,67 µV/Pa pour une sonde ayant un élément actif de 1 mm de diamètre. Lorsqu'ils ont été étudiés avec soin, ces dispositifs peuvent avoir une réponse en fréquence relativement plate sur environ 6 MHz. Toutefois, d'une manière générale, les modes de résonance radiale et les réverbérations dans le matériau de support créent fréquemment des variations de ±10 dB dans la réponse en fréquence entre 0,5 MHz et 15 MHz. De surcroît, la réponse directionnelle de la plupart des hydrophones en céramique proposés est fréquemment imprévisible et peut présenter des écarts importants par rapport aux prévisions théoriques. Se reporter à [20] et [21].

A.1.3 Alignment of hydrophones

This section provides useful procedures for the alignment of hydrophones at the point of spatial-peak temporal-peak acoustic pressure in a plane perpendicular to the beam-alignment axis.

In the case of membrane hydrophones, it is possible to test for correct alignment by rotating the hydrophone through 180° about an axis passing through the plane of the active element and noting the change in the received signal when monitoring a pulsed acoustic field. A change in the time delay between excitation and reception indicates a misalignment in the direction normal to the active element, and a change in the amplitude indicates a misalignment in the plane of the active element. In the case of continuous wave excited ultrasonic transducers, the same procedure can be used with respect to amplitude, and, if the hydrophone has already been aligned to within one quarter of an acoustic wavelength in water, fine adjustments can be made by noting the phase change on rotation.

In the case of probe hydrophones, it is possible to test for correct alignment by rotating the hydrophone through an angle less than 180° about an axis passing through the plane of the active element.

For both types of hydrophones, optical techniques using either a travelling microscope or a small diameter laser beam can be used. Again, the procedure would be to observe the position of the active element and its change when the hydrophone is rotated using the micropositioning system.

A.1.4 Types of hydrophone

A.1.4.1 Ceramic probe hydrophones

These hydrophones usually consist of a small circular disc of piezoelectric ceramic mounted on the end of a needle or pencil-like support as shown schematically in figure 10. The active element of the hydrophone is backed by an acoustically absorbing material and has a size close to the diameter of the support, often in the range 0,5 mm to 1,5 mm diameter. The signal cable inevitably passes through the ultrasonic field, which can cause problems from the triboelectric effect.

The end-of-cable open-circuit sensitivity of these devices is typically 0,67 µV/Pa for a probe with an active element of 1 mm diameter. When carefully designed they may have a relatively flat frequency response to about 6 MHz. However, in general, radial resonance modes and reverberations in the backing material often lead to variations of ±10 dB in the frequency response between 0,5 MHz and 15 MHz. In addition, the directional response of most ceramic hydrophones available is often unpredictable and can show significant differences from theoretical predictions. See [20] and [21].

A.1.4.2 *Hydrophones à sonde PVDF*

Ces hydrophones sont similaires par leur configuration extérieure aux sondes en céramique évoquées en A.4.1 (voir figure 10). Toutefois, l'élément actif en est le polymère fluorure de polyvinylidène (PVDF). La sensibilité type en circuit ouvert en bout de câble (1 m) d'un hydrophone ayant un élément actif de 1 mm de diamètre est de 0,12 µV/Pa et la fréquence de résonance est supérieure à 25 MHz. Des sondes étudiées de manière approfondie présentent une caractéristique de fréquence régulière ($\pm 1,5$ dB) et une réponse directionnelle prévisible. Les diamètres apparents de telles sondes [22] sont très proches des diamètres physiques des éléments actifs. Se reporter à [21-23].

A.1.4.3 *Hydrophones à membrane PVDF*

Ce type d'hydrophone est représenté de manière schématique à la figure 11 et est constitué d'un film mince de PVDF tendu sur un cadre annulaire. Les électrodes sont évaporées sur les deux faces et une région de recouvrement définit l'élément actif après qu'il ait été polarisé. Diverses configurations ont été produites, présentant différents degrés de blindage électrique de l'élément actif. Essentiellement, la membrane laisse passer la plus grande partie des ultrasons lorsque son diamètre est suffisamment important pour que la totalité du faisceau d'ultrasons la traverse. Avec cette conception, les modes de résonance radiale dans la gamme de fréquences des mégahertz sont éliminés. Ces hydrophones présentent par conséquent une réponse régulière en fréquence. Typiquement, pour un élément actif de 1 mm de diamètre, la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble (0,7 m) des hydrophones à membrane est de l'ordre de 0,10 µV/Pa, et la fréquence de résonance est approximativement de 40 MHz pour un film d'épaisseur de 0,025 mm en PVDF. La réponse directionnelle à toutes les fréquences est prévisible, y compris aux fréquences basses, pour lesquelles les ondes de la membrane dans le film engendrent des lobes latéraux plus importants dans la réponse directionnelle.

Se reporter à [17], [21], [24] et [25].

A.1.4.4 *Comparaison de fonctionnement des différents types*

Le choix d'un type particulier d'hydrophone pour une tâche spécifique dépendra de nombreux facteurs. Du fait qu'il existe une large diversité de conceptions d'hydrophones et donc de types de fabrication, il n'est pas possible de donner de ligne directrice simple pour le choix du modèle le plus approprié. Toutefois, il convient de tenir compte des éléments suivants:

- 1) Un hydrophone à membrane présentera de moindres variations de sa réponse en fréquence qu'un hydrophone à sonde.
- 2) La sensibilité d'un hydrophone à élément actif en céramique sera généralement supérieure à celle d'un hydrophone ayant un élément actif de même diamètre, fabriqué en PVDF.

A.1.4.2 *PVDF probe hydrophones*

These are similar in external physical construction to the ceramic probes described in A.1.4.1 (see figure 10). However, the active element is the polymer polyvinylidene fluoride (pvdf). Typically, the end-of-cable (1 m) open-circuit sensitivity of a hydrophone with a 1 mm diameter active element is $0,12 \mu\text{V/Pa}$, and the mounted resonance frequency is beyond 25 MHz. Carefully designed probes show a smooth frequency characteristic ($\pm 1,5 \text{ dB}$) and a predictable directional response. The effective diameters of such probes [22] are very close to the physical diameters of the active elements. See [21-23].

A.1.4.3 *PVDF membrane hydrophones*

This type of hydrophone is shown schematically in figure 11, and consists of a thin film of pvdf stretched across an annular frame. Electrodes are evaporated onto the two surfaces and an overlap region defines the active element after it has been poled. Various designs have been produced offering different degrees of electrical shielding for the active element. Essentially, the membrane transmits most of the ultrasound when the diameter of the membrane is sufficiently large to enable the whole of the ultrasound beam to pass through it. With this design of hydrophone, radial resonance modes in the megahertz frequency range are eliminated, and hence they exhibit a smooth frequency response. Typically, for a 1 mm diameter active element, the end-of-cable (0,7 m) open-circuit sensitivity of membrane hydrophones is about $0,10 \mu\text{V/Pa}$, and the resonance frequency is at approximately 40 MHz for a 0,025 mm thick film of pvdf. The directional response at all frequencies is predictable, including the low megahertz range where membrane waves in the film give rise to larger side-lobes in the directional response.

See [17], [21], [24] and [25]

A.1.4.4 *Relative performance of different types*

The choice of a particular type of hydrophone for a specific task will depend on a number of factors. As there is a large variety of designs of hydrophones of all basic constructional types, it is not possible to produce simple guidelines for choosing the most appropriate one. However, the following points are worth noting:

- 1) A membrane hydrophone will exhibit less variation in its frequency response than a probe hydrophone.
- 2) The sensitivity of a hydrophone with a ceramic active element will usually be higher than one with the same diameter active element made from pvdf.

3) Dans le cas des hydrophones à membrane, la membrane constitue un obstacle plan, important, de réflectivité finie dans le champ ultrasonore. La partie réfléchie de l'onde ultrasonore peut revenir de façon cohérente sur le transducteur ultrasonore et réagir avec lui par interférence acoustique [26]. Cet effet est particulièrement important pour l'excitation en onde entretenue des transducteurs ultrasonores, et il convient de tenir compte de cette source d'erreur bien que son effet sur les mesures puisse généralement être minimisé. Sur tous les types d'hydrophones à sonde, l'effet des réflexions existe, mais il est plus faible.

A.1.5 Exemples de spécifications pour les hydrophones

Consulter le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 - Exemples de spécifications des hydrophones, présentés dans ce cas à 1 MHz [27]

Type d'hydrophone	Sensibilité bout de câble avec charge spécifiée M_L ($\mu\text{V/Pa}$)	Charge spécifiée Z_L	Longueur de câble (m)	Capacité bout de câble ou impédance hydrophone Z	Sensibilité circuit ouvert bout de câble M_C ($\mu\text{V/Pa}$)
Pointe d'aiguille PVDF dia 1 mm	0,100	1 Mohm 30 pF	1	130 pF	0,123
Pointe d'aiguille PVDF dia 0,6 mm	0,032	1 Mohm 30 pF	1	130 pF	0,039
Membrane PVDF dia 1 mm	0,098	50 kohm 5 pF	0,7	$\text{Re}(Z) = 170 \text{ ohm}$ $\text{Im}(Z) = -1220 \text{ ohm}$	0,102
Membrane PVDF dia 0,5 mm	0,033	50 kohm 5 pF	0,7	$\text{Re}(Z) = 220 \text{ ohm}$ $\text{Im}(Z) = -1610 \text{ ohm}$	0,035
Pointe d'aiguille céramique dia 0,5 mm	0,56	1 Mohm 30 pF	1	150 pF	0,67

3) In the case of membrane hydrophones, the membrane constitutes a large, plane obstacle of finite reflectivity in the ultrasonic field. The reflected part of the ultrasonic wave may return in a coherent way to the ultrasonic transducer and react on it by acoustic interference [26]. This is particularly important in continuous wave excitation of ultrasonic transducers, and this source of error should be kept in mind although its effect on measurements can usually be minimised. In all types of probe hydrophone, the effect of reflections is present but to a smaller extent.

A.1.5 Typical specification data for hydrophones

See the accompanying table 1.

Table 1 - Typical specification data for hydrophones, in this case given at 1 MHz [27].

Hydrophone Type	End-of-cable loaded sensitivity (with a specified load) M_L ($\mu\text{V/Pa}$)	Specified load Z_L	Cable length (m)	End-of-cable capacitance or hydrophone impedance Z	End-of-cable open-circuit sensitivity M_c ($\mu\text{V/Pa}$)
PVDF Needle-like 1 mm dia.	0,100	1 Mohm 30 pF	1	130 pF	0,123
PVDF Needle-like 0,6 mm dia.	0,032	1 Mohm 30 pF	1	130 pF	0,039
PVDF membrane 1 mm dia.	0,098	50 kohm 5 pF	0,7	$\text{Re}(Z) = 170 \text{ ohm}$ $\text{Im}(Z) = -1220 \text{ ohm}$	0,102
PVDF membrane 0,5 mm dia.	0,033	50 kohm 5 pF	0,7	$\text{Re}(Z) = 220 \text{ ohm}$ $\text{Im}(Z) = -1610 \text{ ohm}$	0,035
Ceramic Needle-like 0,5 mm dia.	0,56	1 Mohm 30 pF	1	150 pF	0,67

Annexe B
(informative)

B.1 Pression acoustique et intensité

Traditionnellement, les champs ultrasonores ont été caractérisés par le paramètre intensité, ce qui est approprié et directement utilisable pour de nombreuses applications.

Toutefois, l'intensité instantanée, $I(t)$, peut être donnée par l'expression:

$$I(t) = p(t) v(t)$$

où:

$p(t)$ est la pression acoustique instantanée;

$v(t)$ est la vitesse de particule.

Dans des conditions d'ondes progressives planes, l'intensité instantanée est donnée par l'une des formules suivantes:

$$\text{soit } I(t) = p(t)^2 / \rho c$$

$$\text{soit } I(t) = \rho c V(t)^2$$

Ces expressions n'ont qu'une validité limitée et ne peuvent être appliquées de façon générale à l'ensemble du champ acoustique. Toutefois, la première des deux expressions est utilisée presque exclusivement pour déduire l'intensité instantanée des mesurages d'hydrophone d'une pression acoustique instantanée.

Pour illustrer l'importance de cet élément, on peut démontrer (voir [28]), par exemple, que le rapport de l'intensité vraie à la valeur d'approximation d'onde plane est de 0,66 à une distance de 5 mm de la face d'un transducteur ultrasonore fonctionnant en piston plan circulaire de 30 mm de diamètre et fonctionnant en onde entretenue. A une distance égale au diamètre du transducteur ultrasonore, le rapport est d'environ 0,94.

C'est pour cet ensemble de raisons que la présente Norme internationale recommande la spécification de paramètres de pression acoustique et, en tant que tels, ce sont les paramètres mesurés appropriés pour tout champ acoustique.

On peut utiliser pour la détermination de l'intensité dérivée de la pression acoustique les valeurs de ρ , c et ρc pour de l'eau distillée et désionisée, en fonction de la température, données au tableau 2.

Tableau 2 - Propriétés de l'eau distillée ou désionisée en fonction de la température [29]

Température <i>T</i> °C	Densité <i>ρ</i> 10^3 kg/m^3	Vitesse du son <i>c</i> m/s	Impédance acoustique <i>ρc</i> $10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$
16	0,9989	1469,4	1,4678
18	0,9986	1476,0	1,4739
20	0,9982	1482,3	1,4796
22	0,9978	1488,3	1,4850
24	0,9973	1494,0	1,4900
26	0,9968	1499,3	1,4945
28	0,9962	1504,4	1,4987

Annex B
(informative)

B.1 Acoustic pressure and intensity

Traditionally, ultrasonic fields have been characterised by the parameter intensity and this is appropriate and directly relevant for many applications.

However, the instantaneous Intensity, $I(t)$, may be given by the expression:

$$I(t) = p(t) v(t)$$

where:

$p(t)$ is the instantaneous acoustic pressure;

$v(t)$ is the particle velocity.

Under conditions of plane progressive waves, the instantaneous intensity is given by:

$$\text{either } I(t) = p(t)^2 / \rho c$$

$$\text{or } I(t) = \rho c v(t)^2$$

These expressions have only limited validity and cannot generally be applied throughout an acoustic field. However, the first of these two expressions is almost exclusively used to derive Instantaneous Intensity from hydrophone measurements of Instantaneous acoustic pressure.

To illustrate the significance of this, it can be shown (see [28]), for example, that the ratio of the true intensity to the plane wave approximation value is 0,66 at a distance of 5 mm from the face of a circular plane piston ultrasonic transducer of diameter 30 mm and in continuous wave operation. At a distance equal to the diameter of the ultrasonic transducer, the ratio is about 0,94.

It is for these reasons that this International Standard recommends the specification of acoustic pressure parameters and, as such, these are the measured parameters appropriate to any acoustic field.

For the determination of derived intensity from acoustic pressure, the values of ρ , c and ρc for distilled or deionised water, as a function of temperature, given in table 2 may be used.

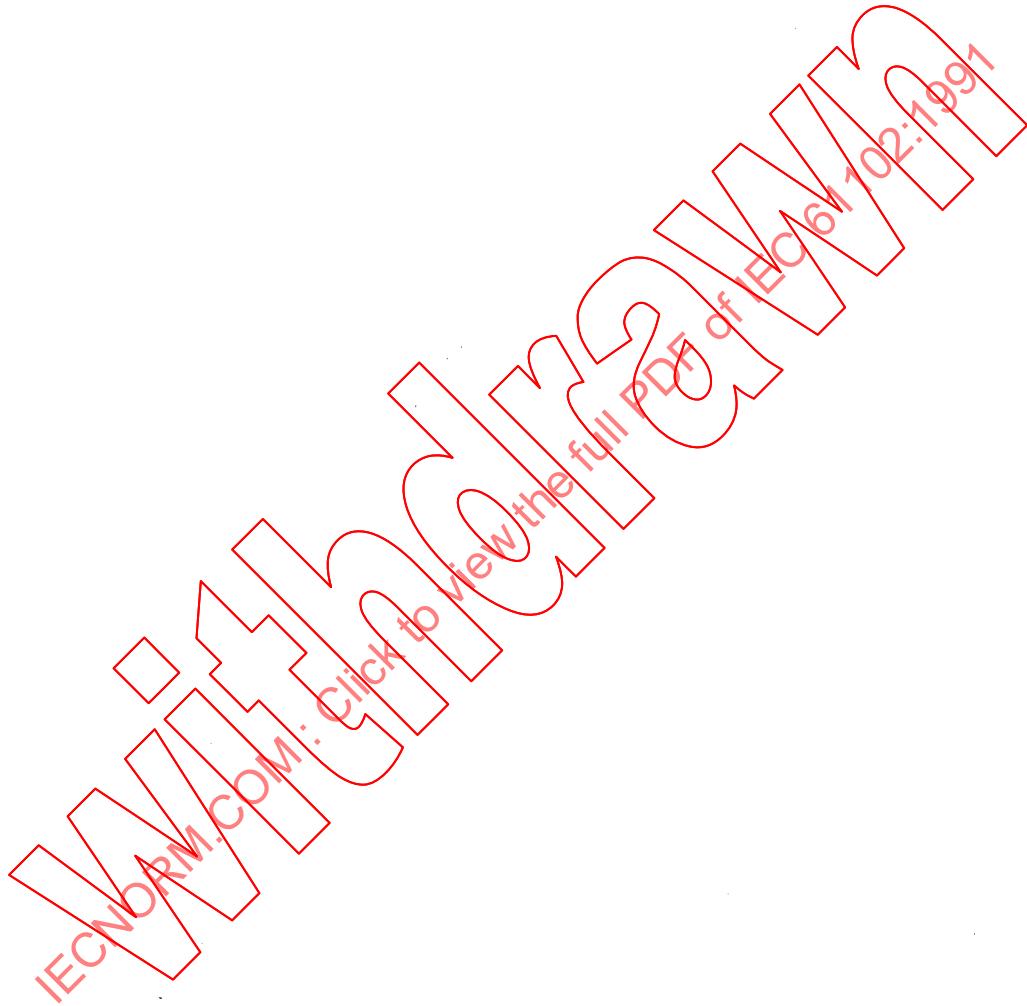
Table 2 - Properties of distilled or deionised water as a function of temperature. [29]

Temperature <i>T</i> °C	Density ρ 10^3 kg/m^3	Velocity of sound <i>c</i> m/s	Acoustic impedance ρc $10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$
16	0,9989	1469,4	1,4678
18	0,9986	1476,0	1,4739
20	0,9982	1482,3	1,4796
22	0,9978	1488,3	1,4850
24	0,9973	1494,0	1,4900
26	0,9968	1499,3	1,4945
28	0,9962	1504,4	1,4987

Annexe C
(informative)

C.1 Systèmes de positionnement des transducteurs et hydrophones

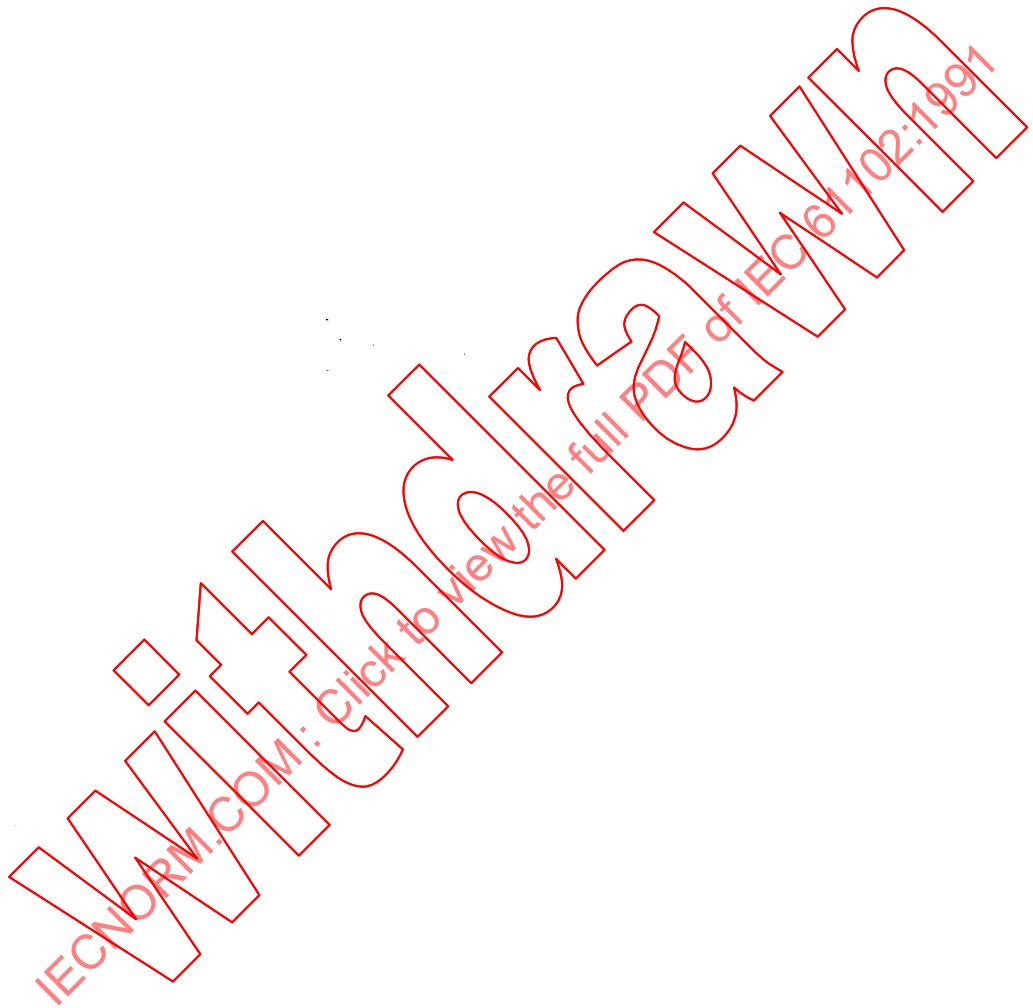
Il existe de nombreuses manières d'installer le transducteur ultrasonore et l'hydrophone de façon à satisfaire aux exigences spécifiées en 5.2. Les figures 12 à 14 représentent certains des systèmes possibles.



Annex C (informative)

C.1 Transducer and hydrophone positioning systems

There are numerous ways to mount the ultrasonic transducer and hydrophone such that the requirements specified in 5.2 may be met. Figures 12 to 14 illustrate some of the possible systems.



Annexe D
(informative)

Justificatif

Cette annexe présente un justificatif concis pour les prescriptions importantes de la présente Norme internationale et a pour but de donner des informations d'ordre général aux lecteurs connaissant bien le sujet de celle-ci, mais qui n'ont pas participé à son développement. Il est considéré comme essentiel de comprendre les motifs qui sont à l'origine des principales exigences pour pouvoir appliquer correctement la présente norme. De surcroît, du fait que le matériel médical ultrasonore se développe en permanence, on estime qu'un justificatif explicatif des prescriptions actuelles facilitera l'application de la norme elle-même au nouveau matériel, ainsi que l'élaboration de ses suppléments à venir.

La numérotation des paragraphes dans l'annexe se rapporte directement à cette Norme internationale.

3 De nombreux paramètres acoustiques sont définis de façon à pouvoir donner une valeur unique ou, également, qu'une valeur puisse être donnée, correspondant aux mesurages effectués dans un plan spécifié. Cette option permet d'obtenir une souplesse plus grande dans l'application de la présente norme. Par exemple, dans le cas des transducteurs utilisés pour la physiothérapie, ou des transducteurs à faisceaux divergents tels que ceux que l'on emploie pour la surveillance foetale, il peut être contre-indiqué de déterminer les paramètres acoustiques dans le plan contenant la **pression acoustique crête spatiale crête temporelle**. La forme des définitions utilisées dans la présente Norme internationale permet de faire un choix du plan de mesure basé sur des critères autres que ceux qui sont donnés dans celle-ci.

Enfin, les transducteurs focalisés et la terminologie n'ont pas été mentionnés explicitement dans la présente Norme internationale. Toutefois, les procédures et définitions données s'appliquent indifféremment aux champs des transducteurs focalisés et non focalisés.

3.1 Le facteur de crête acoustique donne un indice d'évaluation du degré de distorsion de la forme d'onde d'impulsion acoustique, et il est approprié lorsqu'il existe d'importants effets de propagation non linéaire.

3.4 Les définitions portent sur de nombreuses méthodes de spécification de la fréquence acoustique de fonctionnement mais seule la moyenne arithmétique est utilisée dans le cadre de la présente Norme internationale.

3.7 La présente Norme internationale différencie les paramètres associés au faisceau ultrasonore émis par une excitation unique d'un système à balayage automatique tel que le scannographe à barrette linéaire, à balayage par déphasage (phased array) ou sectoriel, et ceux résultant du fonctionnement normal de l'appareil. Les valeurs de moyenne faisceau pour les systèmes à balayage automatique peuvent par conséquent être considérées comme équivalentes aux valeurs de moyenne spatiale pour les systèmes à balayage non automatique tels que les scannographes «E» manuels. Pour les systèmes à balayage automatique, les valeurs de moyenne faisceau et moyenne spatiale sont appropriées. Il convient de remarquer que toutes les valeurs de moyenne sur le faisceau concernent des excitations de transducteur unique ou de groupes d'éléments

Annex D
(informative)**Rationale**

This annex provides a concise rationale for the important requirements of this International Standard and is intended to provide background information for those who are familiar with the subject of this International Standard but who have not participated in its development. An understanding of the reasons for the main requirements is considered to be essential for the proper application of this International Standard. Furthermore, as medical ultrasonic equipment continues to develop, it is believed that a rationale for the present requirements will facilitate the application of this International Standard to new equipment and facilitate any future supplement to this International Standard.

The numbering in this annex refers directly to this International Standard.

3 Many of the acoustic parameters are defined such that either a single value may be given or, alternatively, a value may be given which corresponds to measurements in a specified plane. This option permits greater flexibility in the application of this International Standard. For instance, in the case of transducers used for physiotherapy, or divergent beam transducers such as used for foetal monitoring, it may not be appropriate to determine acoustic parameters in the plane containing the maximum spatial-peak temporal-peak acoustic pressure. The form of definitions used in this International Standard permit a choice of measurement plane based on criteria other than those given in this International Standard.

Finally, focussed transducers and terminology have not been mentioned explicitly in this International Standard. However, the procedures and definitions given can equally well be applied to focussed and non-focussed transducer fields.

3.1 Acoustic crest factor provides an index for the assessment of the degree of distortion of the acoustic pulse waveform, and is relevant when there is significant nonlinear propagation effects.

3.4 A number of definitions of acoustic-working frequency are given but only the arithmetic-mean acoustic-working frequency is used within this International Standard.

3.7 This International Standard differentiates between parameters related to the ultrasonic beam emitted by a single excitation of an automatic scanning system such as a linear-array, phased-array or sector scanner from that of the whole scanner output. Beam-average quantities for automatic scanning systems can therefore be regarded as equivalent to spatial-average quantities for non-automatic scanning systems such as manual B-scanners. For automatic scanning systems, both beam-average and spatial-average quantities are appropriate. It should be noted that all beam-average quantities relate to single transducer or transducer element group excitations and therefore do not take into account contributions from other ultrasonic scan lines which may overlap the beam-area considered. Hence, even if the ultrasonic scan line separation is such that

transducteurs et ne tiennent pas compte des contributions d'autres lignes de balayage ultrasonore susceptibles de recouvrir l'aire du faisceau considérée. Donc, même si la séparation entre les lignes de balayage acoustique est telle que toutes les aires du faisceau ne se recouvrent pas pour un système de balayage automatique, la pression acoustique efficace moyenne sur le faisceau ou l'intensité moyenne sur le faisceau moyenne temporelle ne sera pas nécessairement égale à la pression acoustique efficace moyenne spatiale ni à l'intensité moyenne spatiale moyenne temporelle respectivement. Il convient également de remarquer que l'intensité moyenne sur le faisceau moyenne sur l'impulsion et la pression acoustique moyenne sur le faisceau et l'impulsion doivent, par définition, n'être associées qu'à une excitation unique, ceci ne pouvant être utilisé que pour les systèmes à balayage non automatique ou pour une excitation unique ou choisie d'un transducteur ou d'un groupe d'éléments transducteurs pour les systèmes à balayage automatique.

~~3.14, 3.15 La sensibilité d'un hydrophone relié à une charge électrique, telle qu'un oscilloscope, et la sensibilité dans une charge à impédance infinie (circuit ouvert) sont données l'une et l'autre, car elles sont toutes les deux appropriées à l'application pratique des hydrophones.~~

~~3.25 Aux pressions acoustiques élevées engendrées par le matériel médical de diagnostic par ultrasons (pressions acoustiques positives crête dans la gamme des 0,1 MPa à 10 MPa), il y a une distorsion importante de la forme d'onde d'impulsion acoustique, en particulier dans la zone focale. Le fait que la présente Norme internationale traite de ces effets non linéaires associés à la propagation des ultrasons dans l'eau, est important. Cette distorsion est due au fait qu'au cours d'une période acoustique la partie «compression» de l'onde se déplace plus rapidement que la partie «raréfaction», engendrant ainsi une distorsion progressive de la forme d'onde. D'une manière générale, le degré de distorsion présent en un point quelconque d'un champ acoustique s'accroît avec l'augmentation de nombreux facteurs. Ce sont la distance par rapport au transducteur, la fréquence acoustique de fonctionnement, la pression acoustique à la face du transducteur ultrasonore, le paramètre de non-linéarité pour le milieu de propagation (eau) et le degré de focalisation. Bien que l'on accepte le fait que l'absorption et la diffusion des ultrasons dans divers types de tissus aboutissent à une réduction de la pression acoustique de crête dans de nombreux cas d'imagerie médicale, tel ne sera pas le cas pour certaines applications. Par exemple, l'imagerie au travers de l'oeil, de la vessie et du liquide amniotique sont des exemples spécifiques dans lesquels une grande partie du trajet s'effectue au travers d'un fluide. Afin de pouvoir faire face à cette non-linéarité, la présente norme comporte, dans le tableau des paramètres qui peut être utilisé aux fins de spécification, deux paramètres associés à la non-linéarité. Le premier est le facteur de crête d'impulsion acoustique, déjà mentionné, qui est un paramètre déterminé expérimentalement et indiquant le degré de non-linéarité observé. Le second est le paramètre de propagation non linéaire qui est un indice permettant de prévoir l'importance de la distorsion non linéaire [14]. A partir de ce paramètre, on peut déterminer la bande passante de l'hydrophone/amplificateur et le besoin de corrections à apporter aux pressions de crête mesurées.~~

~~3.26, 3.27 On définit également les deux pressions acoustiques de crête car il existe fréquemment une différence pouvant atteindre un facteur de trois entre elles. Comme la pression acoustique négative de crête concernera le plus vraisemblablement la cavitation acoustique (partie décompression de la période), il importe de faire la distinction entre elles.~~

all beam-areas do not overlap for an automatic scanning system, the beam-average r.m.s. acoustic pressure or beam-average temporal-average intensity will not necessarily equal the spatial-average r.m.s. acoustic pressure or spatial-average temporal-average intensity respectively. It should also be noted that beam-average pulse-average intensity and beam-average pulse acoustic pressure must by definition relate only to a single excitation and this can be used only for non-automatic scanning systems or for a single or chosen excitation of a transducer or transducer element group for automatic scanning systems.

~~3.14,3.15 Both the sensitivity of a hydrophone when connected to an electrical load, such as an oscilloscope, and the sensitivity into an infinite impedance load (open circuit) are given as they are both relevant to the practical application of hydrophones.~~

~~3.25 At the high acoustic pressures generated by medical ultrasonic diagnostic equipment (peak-positive acoustic pressures in the range 0,1 MPa to 10 MPa) there is severe distortion of the acoustic pulse waveform, especially in the focal region. An important aspect of this International Standard is that it addresses these nonlinear effects which are associated with the propagation of ultrasound in water. This distortion is caused by the fact that during an acoustic cycle, the compressional part of the wave travels faster than the rarefaction part giving rise to a progressive distortion of the waveform. In general, the degree of distortion present at any point in an acoustic field increases with the increase in a number of factors. These are the distance from the transducer, the acoustic-working frequency, the peak acoustic pressure at the face of the ultrasonic transducer, the nonlinearity parameter for the propagating medium (water) and the degree of focussing. While it is accepted that absorption and scattering of ultrasound in various types of tissue will lead to a reduction in the peak acoustic pressure in many medical imaging situations, for certain applications this will not be the case. For instance, imaging through the eye, bladder and amniotic fluid are specific examples where much of the path is through liquid. To cope with this nonlinearity, this International Standard includes, in the list of parameters which may be used for specification purposes, two parameters related to non-linearity. The first is the acoustic pulse crest factor as already mentioned, which is an experimentally determined parameter indicating the degree of nonlinearity present. The second is the nonlinear propagation parameter which is an index predicting the importance of nonlinear distortion [14]. From this parameter, the bandwidth of the hydrophone/amplifier and the need for corrections to measured peak pressures may be determined.~~

~~3.26,3.27 Again, both the peak acoustic pressures are defined as often there is a difference of up to a factor of three between them. As the peak-negative acoustic pressure is most likely to be relevant to acoustic cavitation (the decompression part of the cycle) it is important to distinguish between them.~~

3.57 Le but de cette définition est de distinguer les lignes de balayage ultrasonore qui coupent le plan choisi à des positions variant progressivement au cours du balayage acoustique de celles qui ne le font pas; par exemple, celles qui appartiennent à la dernière catégorie constituerait des excitations multiples du même transducteur ultrasonore ou groupe d'éléments transducteurs ultrasonores pour la focalisation à différentes profondeurs ou pour des lignes Doppler entrelacées sur les échographes Duplex.

8 Un grand nombre de paramètres acoustiques sont définis à l'article 3 et donnés ici. Ils constituent la base de la spécification d'une large gamme de champs ultrasonores bien que l'accent ait été mis en particulier sur le matériel ultrasonore médical. Toutefois, pour tout matériel particulier, on prévoit que seul un petit ensemble de ces paramètres acoustiques soit choisi, par exemple aux fins de marquage de puissance de sortie acoustique.

Bien qu'une discussion sur la précision de mesurage puisse être utile, elle pourrait nuire aux développements futurs des méthodes de mesurage et d'étalonnage à l'aide d'hydrophones. De surcroît, il serait difficile de traiter toute la gamme des champs ultrasonores et des systèmes de mesurage. Toutefois, des données détaillées figureront dans un supplément futur à la présente Norme internationale.

9 Cette Norme internationale n'a pas pour but de spécifier les paramètres acoustiques pour le marquage de la puissance de sortie acoustique. Mais cette partie donne les lignes conductrices requises pour la déclaration de paramètres acoustiques aux fins de marquage de la puissance de sortie acoustique. Des dispositions sont prises pour rendre compte des résultats lorsque les procédures de mesurage ne satisfont pas toutes les prescriptions de la présente Norme internationale.

3.57 This definition is intended to distinguish between the ultrasonic scan lines which intersect the chosen plane at gradually changing positions during the acoustic scan from those which essentially do not; for instance, those in the latter category would be multiple excitations of the same ultrasonic transducer or ultrasonic transducer element group for focussing at different depths or for interlaced Doppler lines in Duplex scanners.

8 A large number of acoustical parameters are defined in Clause 3 and given here. These provide the basis for the specification of a wide range of ultrasonic fields although emphasis has been given to medical ultrasonic equipment. However, for any particular equipment it is expected that only a small group of these acoustical parameters would be chosen, for instance for the purpose of acoustic output labelling.

Although a discussion on accuracy of measurement could be useful, this might prejudice future development of measurement and calibration techniques using hydrophones. In addition, it would be difficult to cover the wide range of ultrasonic fields and measurement systems. However, details will be given in a future Supplement to this International Standard.

9 It is not the purpose of this International Standard to specify the acoustical parameters for acoustic output labelling. But, this section provides the necessary guidelines for the declaration of acoustical parameters for the purpose of acoustic output labelling. Provision is made for the reporting of results when the measurement procedures do not meet all the requirements of this International Standard.

IECNORM.COM: Click to view this document online

Bibliographie/Bibliography

- [1] AIUM/NEMA, 'Safety standard for diagnostic ultrasound equipment', AIUM/NEMA Standard Publication No. UL 1 - 1981.
- [2] R.T. Beyer, 'Parameter of nonlinearity in fluids', *J. Acoust. Soc. Am.* 32, 719-721 (1960).
- [3] K. Beissner, 'Maximum hydrophone size in ultrasonic field measurements', *Acustica* 59, 61-66 (1985).
- [4] G.R. Harris, 'Transient field of a baffled planar piston having an arbitrary vibration amplitude distribution', *J. Acoust. Soc. Am.* 70, 186-204 (1981).
- [5] B. Fay, 'Numerische berechnung der beugungsverluste im schalifeld von ultraschallwändiern', *Acustica*, 36, 209-213 (1976).
- [6] A.S. Khimunin, 'On the ultrasound diffraction losses for circular transducers of different radii', *Acustica*, 54, 13-22 (1983).
- [7] P.A. Lewin, M.E. Schafer, and R.C. Chivers, 'Factors affecting choice of preamplification of hydrophone probes', *Ultrasound in Med. and Biol.*, 13, 141-147 (1987).
- [8] R.C. Preston, D.R. Bacon, and R.A. Smith, 'Calibration of medical ultrasonic equipment - procedures and accuracy assessment', *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectrics and Freq. Contr.*, UFFC-35, 110-121 (1988).
- [9] G.R. Harris, 'Hydrophone measurements in diagnostic ultrasound fields', *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectrics and Freq. Contr.*, UFFC-35, 87-101 (1988).
- [10] D.G. Shomber and G.R. Harris, 'Use of miniature hydrophones to determine intensities typical of medical ultrasound devices', *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics and Freq. Contr.*, UFFC-33, 287-294 (1986).
- [11] P.A. Lewin, 'Calibration of Hydrophones', *Technical Review*, Brüel and Kjaer, 1, 3-17 (1973).
- [12] S.M. Jones, P.L. Carson, R.A. Banjovic, and C.R. Meyer, 'Simplified technique for the calibration and use of miniature hydrophones and intensity measurements of pulsed fields', *J. Acoust. Soc. Am.* 70, 1220-1228 (1981).
- [13] R.A. Banjovic, P.L. Carson, R.M. Jones, C.R. Meyer and D. Thompson, 'Procedures for use of calibrated hydrophones and acoustic dosimetry measurements of diagnostic ultrasound', AIP document PAPS, JASMA - 70-1220-71 American Institute of Physics, New York (1981).
- [14] D.R. Bacon, 'Finite amplitude distortion of the pulsed fields used in diagnostic ultrasound', *Ultrasound in Med. and Biol.* 10, 189-195 (1984).
- [15] I.S. Grant and W.R. Phillips, 'Electromagnetism', John Wiley and Sons, p. 295 (1980).