

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61161

Deuxième édition
Second edition
2006-12

**Ultrasons – Mesurage de puissance –
Balances de forces de rayonnement
et exigences de fonctionnement**

**Ultrasonics – Power measurement –
Radiation force balances and
performance requirements**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61161:2006

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions 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.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. 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.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. 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 also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61161

Deuxième édition
Second edition
2006-12

**Ultrasons – Mesurage de puissance –
Balances de forces de rayonnement
et exigences de fonctionnement**

**Ultrasonics – Power measurement –
Radiation force balances and
performance requirements**

© IEC 2006 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, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	10
1 Domaine d'application	12
2 Références normatives	12
3 Termes et définitions	14
4 Liste des symboles	16
5 Exigences pour les balances de forces de rayonnement	16
5.1 Généralités	16
5.2 Types de cibles	18
5.3 Diamètre de la cible	18
5.4 Balance / Système de mesurage de force	20
5.5 Réservoir du système	20
5.6 Structures de support de la cible	20
5.7 Positionnement du transducteur	20
5.8 Feuillet contre les courants	20
5.9 Couplage du transducteur	20
5.10 Étalonnage	20
6 Exigences pour les conditions de mesurage	22
6.1 Positionnement latéral de la cible	22
6.2 Distance du transducteur à la cible	22
6.3 Eau	22
6.4 Contact avec l'eau	22
6.5 Conditions d'environnement	22
6.6 Dérives thermiques	22
7 Incertitude de mesurage	24
7.1 Généralités	24
7.2 Système de balance à suspension de cible	24
7.3 Linéarité et résolution du système de balance	24
7.4 Extrapolation au moment de la commutation du transducteur ultrasonore	24
7.5 Imperfections de la cible	26
7.6 Géométrie de la cible réfléchissante	26
7.7 Absorbeurs latéraux dans le cas de mesurages d'une cible réfléchissante	26
7.8 Désalignement de la cible	26
7.9 Désalignement du transducteur ultrasonore	26
7.10 Température de l'eau	26
7.11 Atténuation ultrasonore et courant acoustique	26
7.12 Propriétés de feuillet	26
7.13 Taille de cible finie	26
7.14 Hypothèse de l'onde plane	26
7.15 Influences de l'environnement	28
7.16 Mesurage de la tension d'excitation	28
7.17 Température du transducteur ultrasonore	28
7.18 Non linéarité	28
7.19 Autres sources	28

CONTENTS

FOREWORD.....	7
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	13
2 Normative references	13
3 Terms and definitions	15
4 List of symbols	17
5 Requirements for radiation force balances.....	17
5.1 General.....	17
5.2 Target type.....	19
5.3 Target diameter	19
5.4 Balance / Force measuring system.....	21
5.5 System tank	21
5.6 Target support structures	21
5.7 Transducer positioning	21
5.8 Anti-streaming foils.....	21
5.9 Transducer coupling.....	21
5.10 Calibration.....	21
6 Requirements for measuring conditions.....	23
6.1 Lateral target position.....	23
6.2 Transducer-target separation	23
6.3 Water	23
6.4 Water contact.....	23
6.5 Environmental conditions	23
6.6 Thermal drifts.....	23
7 Measurement uncertainty	25
7.1 General.....	25
7.2 Balance system including target suspension.....	25
7.3 Linearity and resolution of the balance system	25
7.4 Extrapolation to the moment of switching the ultrasonic transducer	25
7.5 Target imperfections.....	27
7.6 Reflecting target geometry	27
7.7 Lateral absorbers in the case of reflecting target measurements	27
7.8 Target misalignment.....	27
7.9 Ultrasonic transducer misalignment.....	27
7.10 Water temperature	27
7.11 Ultrasonic attenuation and acoustic streaming.....	27
7.12 Foil properties	27
7.13 Finite target size.....	27
7.14 Plane-wave assumption.....	27
7.15 Environmental influences	29
7.16 Excitation voltage measurement.....	29
7.17 Ultrasonic transducer temperature.....	29
7.18 Non-linearity.....	29
7.19 Other sources.....	29

Annexe A (informative) Informations additionnelles concernant divers aspects des mesurages de force de rayonnement.....	32
Annexe B (normative) Formules fondamentales.....	56
Annexe C (informative) Autres méthodes de mesure de la puissance ultrasonore.....	62
Annexe D (informative) Milieu de propagation et dégazage.....	64
Annexe E (informative) Mesurage de force de rayonnement avec faisceaux ultrasonores divergents.....	74
Annexe F (informative) Restrictions liées aux configurations de balance.....	82
Bibliographie.....	92
Figure 1 – Vue en coupe d'une cible absorbante.....	30
Figure 2 – Vérification de la linéarité: lecture de balance en fonction de la grandeur d'entrée.....	30
Figure D.1 – Exemple de concentration en oxygène dissous en fonction du temps pour 200 ml d'eau dégazée par le vide dans un verre ayant une surface libre de liquide de 34 cm ²	68
Figure D.2 – Concentration en oxygène dissous en fonction du temps pour 2 g/l, 4 g/l et 6 g/l de sulfite de sodium dans de l'eau déminéralisée et pour différentes surfaces libres et volumes d'eau.....	70
Figure E.1 – Résultat du piston (courbe oscillante) pour P/cF en fonction de k_a , à approximation de pic (line continue) et courbe centrale intermédiaire (ligne brisée) représentant le facteur de correction $corr$	76
Figure E.2 – P/cF en fonction de k_a pour quatre distributions d'amplitude pseudo- trapézoïdales différentes, avec $\varepsilon = 0$ (piston) (plein); $\varepsilon = 0,1$ (tiret); $\varepsilon = 0,25$ (point); $\varepsilon = 0,6$ (tiret/point).....	76
Figure E.3 – Rapport de la conductance de rayonnement G obtenue en utilisant une cible réfléchissante conique convexe à demi-angle de cône de 45° à une cible absorbante vis-à-vis de la valeur de k_a pour 11 transducteurs différents à utiliser en physiothérapie et dans 3 laboratoires différents [26].....	80
Figure F.1 – Configuration A, à cible absorbante (a) ou réfléchissante (b).....	84
Figure F.2 – Configuration B, à cible réfléchissante conique convexe.....	84
Figure F.3 – Configuration B, à cible absorbante.....	84
Figure F.4 – Configuration C, à cible absorbante.....	86
Figure F.5 – Configuration E, à cible absorbante (a) ou réfléchissante conique concave (b) ...	86
Figure F.6 – Configuration F, à cible réfléchissante conique convexe.....	86
Figure F.7 – Configuration F, à cible absorbante.....	86
Tableau D.1 – Méthodes de dégazage de l'eau.....	66
Tableau D.2 – Conditions de dégazage et d'ébullition.....	68
Tableau F.1 – Avantages et désavantages de différentes configurations.....	90

Annex A (informative) Additional information on various aspects of radiation force measurements	33
Annex B (normative) Basic formulae	57
Annex C (informative) Other methods of ultrasonic power measurement.....	63
Annex D (informative) Propagation medium and degassing.....	65
Annex E (informative) Radiation force measurement with diverging ultrasonic beams	75
Annex F (informative) Limitations associated with the balance arrangements.....	83
 Bibliography.....	 93
 Figure 1 – Section through an absorbing target.....	 31
Figure 2 – Linearity check: balance readout as a function of the input quantity.....	31
Figure D.1 – Example of dissolved oxygen concentration as a function of time for 200 ml of vacuum degassed water in a glass with liquid surface area of 34 cm ²	69
Figure D.2 – Dissolved oxygen concentration as a function of time for 2 g/l, 4 g/l and 6 g/l of sodium sulphite in de-mineralized water and for different surface areas and volumes of water.....	71
Figure E.1 – Piston result (oscillating curve) for P/cF as a function of ka , with "peak" approximation (unbroken line) and the central, half-way curve (broken line) representing the correction factor $corr$	77
Figure E.2 – P/cF as a function of ka for four different pseudo-trapezoidal amplitude distributions, with $\varepsilon = 0$ (piston) (solid); $\varepsilon = 0,1$ (dash); $\varepsilon = 0,25$ (dot); $\varepsilon = 0,6$ (dash/dot).	77
Figure E.3 – Ratio of the radiation conductance G as obtained using a convex-conical reflecting target with a cone half-angle of 45° to an absorbing target versus the value of ka for 11 different transducers to be used in physiotherapy and 3 different laboratories [26].....	81
Figure F.1 – Arrangement A, with absorbing (a) or reflecting (b) target	85
Figure F.2 – Arrangement B, with convex-conical reflecting target	85
Figure F.3 – Arrangement B, with absorbing target	85
Figure F.4 – Arrangement C, with absorbing target	87
Figure F.5 – Arrangement E, with absorbing (a) or concave-conical reflecting (b) target	87
Figure F.6 – Arrangement F, with convex-conical reflecting target	87
Figure F.7 – Arrangement F, with absorbing target	87
 Table D.1 – Water degassing methods.....	 67
Table D.2 – Conditions for degassing by boiling.....	69
Table F.1 – Advantages and disadvantages of different arrangements.....	91

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ULTRASONS – MESURAGE DE PUISSANCE – BALANCES DE FORCES DE RAYONNEMENT ET EXIGENCES DE FONCTIONNEMENT

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61161 a été établie par le comité d'études 87 de la CEI: Ultrasons.

La présente deuxième édition de la CEI 61161 annule et remplace la première édition publiée en 1992 et son amendement 1 (1998). Elle constitue une révision technique. Les principales modifications sont:

- le corps de la norme a été limité au texte normatif;
- le texte informatif concernant les aspects correspondants du mesurage de puissance des ultrasons et des balances de forces de rayonnement a été introduit dans l'Annexe A;
- les Annexes A, D, E et F sont nouvelles;
- plusieurs configurations de balance de force de rayonnement sont traitées. Le nouveau texte concerne particulièrement le mesurage de puissance des dispositifs de physiothérapie à ultrasons.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ULTRASONICS – POWER MEASUREMENT –
RADIATION FORCE BALANCES AND PERFORMANCE REQUIREMENTS**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61161 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics

This second edition of IEC 61161 cancels and replaces the first edition published in 1992, and its Amendment 1 (1998). It constitutes a technical revision. The main significant changes are:

- the main body of the Standard has been restricted to normative statements;
- informative statements on corresponding aspects of ultrasonic power measurement and radiation force balances have been collected in Annex A;
- Annexes A, D, E and F are new;
- more radiation force balance arrangements are dealt with. The new material relates particularly to power measurement of ultrasonic physiotherapy devices.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
87/325/CDV	87/358/RVC

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 publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

NOTE Les caractères d'imprimerie suivants sont utilisés:

- Exigences: caractères romains
- Notes: petits caractères romains
- Les mots en **caractères gras** dans le texte sont définis à l'Article 3.
- Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie, (voir après les annexes).

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera:

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

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

Enquiry draft	Report on voting
87/325/CDV	87/358/RVC

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

NOTE The following print types are used:

- Requirements: roman type
- Notes: in small roman type
- Words in **bold** in the text are defined in Clause 3.
- The numbers in square brackets refer to the Bibliography (after the annexes)

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

Il existe plusieurs méthodes de mesurage pour la détermination de la puissance totale émise par des transducteurs ultrasonores ([1], [2], [3] ; voir aussi l'Annexe C). L'objet de la présente Norme internationale est d'établir des méthodes de mesurage de la puissance ultrasonore dans des liquides dans la plage inférieure de fréquences mégahertz sur base du mesurage de la force de rayonnement en utilisant une balance gravimétrique. L'avantage majeur du mesurage de la force de rayonnement est que la valeur de la puissance totale émise est obtenue sans qu'il soit nécessaire d'intégrer les données du champ sur la section du faisceau. La présente norme énumère les sources d'erreurs et décrit une procédure pas à pas systématique pour évaluer les incertitudes de mesurage globales ainsi que les précautions qu'il convient de prendre et les incertitudes qu'il convient de prendre en compte lors de l'exécution de mesurages de puissance.

Des exigences de sécurité de base pour des appareils de physiothérapie à ultrasons sont identifiées dans la CEI 60601-2-5 et font référence à la CEI 61689, qui spécifie le besoin de mesurages de puissance acoustique avec une incertitude inférieure à $\pm 15\%$. En considérant la dégradation de précision habituelle lors de l'application pratique de cette norme, des méthodes de mesurage de référence doivent être établies avec des incertitudes inférieures à $\pm 7\%$. Des exigences de déclaration d'appareils de diagnostic à ultrasons incluant la puissance acoustique sont spécifiées dans d'autres normes CEI, telles que la CEI 61157.

Le mesurage fiable, précis et répétable de la puissance acoustique en utilisant une balance de forces de rayonnement tel qu'il est défini dans cette norme est influencé par un certain nombre de problèmes pratiques. Des informations supplémentaires sont fournies en Annexe A comme guide pour l'utilisateur, en employant la même numérotation de section et de paragraphe que dans le corps principal du document.

With NORM.COM: Click to view the full text of IEC 61161-1:2006

INTRODUCTION

A number of measuring methods exist for the determination of the total emitted power of ultrasonic transducers ([1], [2], [3], see also Annex C). The purpose of this International Standard is to establish standard methods of measurement of ultrasonic power in liquids in the lower megahertz frequency range based on the measurement of the radiation force using a gravimetric balance. The great advantage of radiation force measurements is that a value for the total radiated power is obtained without the need to integrate field data over the cross-section of the radiated sound beam. This standard identifies the sources of errors and describes a systematic step-by-step procedure to assess overall measurement uncertainty as well as the precautions that should be undertaken, and uncertainties that should be taken into account, while performing power measurements

Basic safety requirements for ultrasonic physiotherapy devices are identified in IEC 60601-2-5 and make reference to IEC 61689, which specifies the need for acoustic power measurements with an uncertainty better than $\pm 15\%$. Considering the usual degradation of accuracy in the practical application of this standard, reference measurement methods need to be established with uncertainties better than $\pm 7\%$. Ultrasonic diagnostic device declaration requirements, including acoustic power, are specified in other IEC standards, as for example in IEC 61157.

The measurement of acoustic power accurately, precisely and repeatably using a radiation force balance as defined in this standard is influenced by a number of practical problems. As a guide to the user, additional information is provided in Annex A using the same section and clause numbering as the main body.

ULTRASONS – MESURAGE DE PUISSANCE – BALANCES DE FORCES DE RAYONNEMENT ET EXIGENCES DE FONCTIONNEMENT

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale

- prescrit une méthode pour déterminer la puissance ultrasonore totale émise par des transducteurs ultrasonores, basée sur l'usage d'une balance de forces de rayonnement;
- établit les principes généraux pour utiliser les balances de forces de rayonnement dans lesquelles un obstacle dénommé cible intercepte le champ acoustique à mesurer;
- établit des limitations de la méthode de forces de rayonnement relatives à la cavitation et à l'élévation de la température;
- établit des limitations quantitatives de la méthode de forces de rayonnement par rapport aux faisceaux divergents;
- fournit des informations concernant l'évaluation des incertitudes de mesurage globales.

Cette Norme internationale est applicable:

- au mesurage de la puissance ultrasonore jusqu'à 1 W par utilisation d'une balance de forces de rayonnement dans la plage de fréquence de 0,5 MHz à 25 MHz;
- au mesurage de la puissance ultrasonore jusqu'à 20 W par utilisation d'une balance de forces de rayonnement dans la plage de fréquence de 0,75 MHz à 5 MHz;
- au mesurage de la puissance ultrasonore totale de transducteurs, avec des faisceaux possédant de préférence une bonne collimation;
- à l'utilisation de balances de forces de rayonnement de type gravimétrique ou à retour de force.

NOTE Une liste de toutes les publications auxquelles il est fait référence dans la présente Norme est donnée dans la Bibliographie.

2 Références normatives

Les documents référencés suivants sont indispensables pour l'application de ce document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, c'est l'édition la plus récente du document référencé (y compris tous ses amendements) qui s'applique.

CEI 60050, *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique, Chapitre 802: Ultrasons*

CEI 60854:1986, *Méthodes de mesure des caractéristiques des appareils à impulsions ultrasonores utilisés pour le diagnostic*

CEI 60866:1987, *Caractéristiques et étalonnage des hydrophones fonctionnant dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz*

CEI 61101:1991, *L'étalonnage absolu des hydrophones par la technique du balayage planaire dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz*

CEI 61102:1991, *Mesurage et caractérisation des champs ultrasonores à l'aide d'hydrophones dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz*

CEI 61689:1996, *Ultrasons – Systèmes pour physiothérapie – Prescriptions de performance et méthodes de mesure dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 5 MHz*

CEI 61846:1998, *Ultrasons – Lithotripteurs à ondes de pression – Caractéristiques des champs (disponible en anglais seulement)*

ULTRASONICS – POWER MEASUREMENT – RADIATION FORCE BALANCES AND PERFORMANCE REQUIREMENTS

1 Scope

This International Standard

- specifies a method of determining the total emitted acoustic power of ultrasonic transducers based on the use of a radiation force balance;
- establishes general principles for the use of radiation force balances in which an obstacle (target) intercepts the sound field to be measured;
- establishes limitations of the radiation force method related to cavitation and temperature rise;
- establishes quantitative limitations of the radiation force method in relation to diverging and focused beams;
- provides information on assessment of overall measurement uncertainties.

This International Standard is applicable to:

- the measurement of ultrasonic power up to 1 W based on the use of a radiation force balance in the frequency range from 0,5 MHz to 25 MHz;
- the measurement of ultrasonic power up to 20 W based on the use of a radiation force balance in the frequency range 0,75 MHz to 5 MHz;
- the measurement of total ultrasonic power of transducers, preferably with well-collimated beams;
- the use of radiation force balances of the gravimetric type or force feedback type.

NOTE The titles of all publications referred to in this Standard are listed in the Bibliography.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 801: Acoustics and Electroacoustics, Chapter 802: Ultrasonics*

IEC 60854:1986, *Methods of measuring the performance of ultrasonic pulse-echo diagnostic equipment*

IEC 60866:1987, *Characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*

IEC 61101:1991, *The absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*

IEC 61102:1991, *Measurement and characterisation of ultrasonic fields using hydrophones in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*

IEC 61689:1996, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Performance requirements and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz*

IEC 61846:1998, *Ultrasonics – Pressure pulse lithotripters – Characteristics of fields*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes, ainsi que celles qui sont données dans la CEI 60050-801 et dans la CEI 60050-802, s'appliquent.

3.1

courant acoustique

mouvement d'ensemble d'un fluide provoqué par un champ acoustique

3.2 champ libre

champ acoustique dans un milieu homogène et isotrope dont les limites exercent une influence négligeable sur les ondes acoustiques

[VEI 801-23-28, modifiée]

3.3

puissance de sortie

moyenne temporelle de la puissance acoustique émise par un **transducteur ultrasonore** dans un **champ** pratiquement **libre** dans des conditions spécifiées et dans un milieu spécifié, soit l'eau de préférence

Symbole: P

Unité: watt, W

3.4

force de rayonnement

force de rayonnement acoustique

moyenne temporelle de la force s'exerçant sur un corps plongé dans un champ acoustique et trouvant son origine dans le champ acoustique ; ou, plus généralement, moyenne temporelle de la force apparaissant, dans un champ acoustique, à la surface de séparation entre deux milieux de propriétés acoustiques différentes

Symbole: F

Unité: newton, N

3.5

pression de rayonnement

force acoustique de rayonnement

force de rayonnement par unité de surface

NOTE Ce terme est largement employé dans la littérature. Cependant, la force de rayonnement par unité de surface est à proprement parler une quantité tensorielle [4] et il convient de s'y référer comme à un tenseur de contrainte de rayonnement acoustique lorsqu'une terminologie scientifique stricte doit être employée. Le terme intégral "force de rayonnement acoustique" est généralement préféré dans la présente Norme internationale. Quand parfois le terme "pression de rayonnement acoustique" est employé, il faut le comprendre comme la valeur négative de la contrainte de rayonnement normale dans la direction de l'axe du champ.

Unité: Pascal, Pa

3.6

cible

dispositif conçu spécialement pour intercepter substantiellement l'intégralité du champ ultrasonore et servir d'objet sur lequel agit la **force de rayonnement**

3.7

transducteur ultrasonore

dispositif capable de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et/ou réciproquement dans le domaine des fréquences ultrasonores

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions as well as the definitions of IEC 60050-801 and IEC 60050-802 apply.

3.1

acoustic streaming

bulk fluid motion initiated by a sound field

3.2

free field

sound field in a homogeneous isotropic medium whose boundaries exert a negligible effect on the sound waves

[IEV 801-23-28, modified]

3.3

output power

time-average ultrasonic power emitted by an **ultrasonic transducer** into an approximately **free field** under specified conditions in a specified medium, preferably water

Symbol: P

Unit: watt, W

3.4

radiation force

acoustic radiation force

time-average force acting on a body in a sound field and caused by the sound field, excluding the component due to acoustic streaming; or, more generally: time-average force (excluding the component due to acoustic streaming) in a sound field, appearing at the boundary surface between two media of different acoustic properties

Symbol: F

Unit: Newton, N

3.5

radiation pressure

acoustic radiation pressure

radiation force per unit area

NOTE This term is widely used in the literature. However, strictly speaking, the radiation force per unit area is a tensor quantity [4] and it should be referred to as the acoustic radiation stress tensor when a strict scientific terminology is to be used. The integral quantity "acoustic radiation force" is generally preferred in this International Standard. Whenever at some places the term "acoustic radiation pressure" appears, it is to be understood as the negative value of the normal radiation stress in the direction of the field axis.

Unit: Pascal, Pa

3.6

target

device specially designed to intercept substantially all of the ultrasonic field and to serve as the object which is acted upon by the **radiation force**

3.7

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

3.8

conductance de rayonnement

rapport de la **puissance de sortie** acoustique par le carré de la tension d'entrée efficace du transducteur. Elle est utilisée pour caractériser le transfert d'énergie électrique en énergie acoustique des **transducteurs ultrasonores**

Symbole: G

Unité: siemens, S

4 Liste des symboles

- a rayon d'un **transducteur ultrasonore** servant de source
- c vitesse du son (généralement dans l'eau)
- d longueur focale géométrique d'un **transducteur ultrasonore** focalisé
- F **force de rayonnement** exercée sur une **cible** en direction de l'onde ultrasonore incidente
- g accélération de la pesanteur
- G **conductance de rayonnement**
- k nombre d'onde circulaire ($2\pi/\lambda$)
- P **puissance de sortie** d'un **transducteur ultrasonore**
- s distance normalisée par rapport à un **transducteur ultrasonore** ($s = z \lambda / a^2$)
- z distance entre la **cible** et le **transducteur ultrasonore**
- α coefficient d'atténuation d'amplitude pour des ondes planes dans un milieu (généralement dans l'eau)
- γ (demi-)angle de focalisation d'un **transducteur ultrasonore** focalisé ($\text{arc sin } a/d$)
- θ angle entre la direction de propagation de l'onde ultrasonore incidente et la normale à la surface réfléchissante de la **cible**
- λ longueur d'onde ultrasonore
- ρ densité (massique) du milieu de propagation du son (généralement de l'eau).

NOTE La direction de l'onde incidente mentionnée ci-dessus sous F et θ est entendue comme étant la direction de l'axe du champ, c'est-à-dire qu'elle est entendue dans un sens général plutôt que local.

5 Exigences pour les balances de forces de rayonnement

5.1 Généralités

La balance de **forces de rayonnement** doit comporter une **cible** reliée à une balance. Le faisceau acoustique doit être dirigé verticalement (vers le haut ou vers le bas) ou horizontalement vers la **cible** et la **force de rayonnement** exercée par le faisceau ultrasonore doit être mesurée à l'aide de la balance. La puissance ultrasonore doit être déterminée à partir de la différence entre les forces mesurées avec et sans rayonnement ultrasonore, selon les formules données en Annexe B. L'étalonnage peut être réalisé au moyen de petits poids de précision dont la masse est connue.

NOTE Différentes configurations possibles de mesurage de la force de rayonnement sont présentées aux Figures F.1 à F.7. Chaque configuration de mesurage a ses avantages, qui sont aussi résumés à l'Annexe F.

3.8

radiation conductance

ratio of the acoustic **output power** and the squared RMS transducer input voltage. It is used to characterize the electrical to acoustical transfer of **ultrasonic transducers**

Symbol: G

Unit: siemens, S

4 List of symbols

a radius of a source **ultrasonic transducer**

c speed of sound (usually in water)

d geometrical focal length of a focused **ultrasonic transducer**

F **radiation force** on a **target** in the direction of the incident ultrasonic wave

g acceleration due to gravity

G **radiation conductance**

k circular wavenumber ($2\pi/\lambda$)

P **output power** of an **ultrasonic transducer**

s normalized distance from an **ultrasonic transducer** ($s = z/\lambda \times a^2$)

z distance between a **target** and an **ultrasonic transducer**

α amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water)

γ focus (half-)angle of a focused **ultrasonic transducer** ($\arcsin a/d$)

θ angle between the direction of the incident ultrasonic wave and the normal to a reflecting surface of a **target**

λ ultrasonic wavelength

ρ (mass) density of the sound-propagating medium (usually water).

NOTE The direction of the incident wave mentioned above under F and θ is understood to be the direction of the field axis, i.e., it is understood in a global sense rather than in a local sense.

5 Requirements for radiation force balances

5.1 General

The **radiation force** balance shall consist of a **target** which is connected to a balance. The ultrasonic beam shall be directed vertically upwards or downwards or horizontally on the **target** and the **radiation force** exerted by the ultrasonic beam shall be measured by the balance. The ultrasonic power shall be determined from the difference between the force measured with and without ultrasonic radiation, in accordance with the formulae given in Annex B. Calibration can be carried out by means of small precision weights of known mass.

NOTE Different possible radiation force measurement set-ups are presented in Figures F.1 to F.7. Each measurement set-up has its own merits, which are also summarised in Annex F.

5.2 Types de cibles

5.2.1 Généralités

La **cible** doit avoir des caractéristiques acoustiques connues en ce qui concerne les détails de la relation entre la puissance acoustique à la **force de rayonnement**. (voir aussi A.5.2.)

Si la cible est choisie de façon à s'approcher au mieux d'un des deux cas de figure extrêmes, soit un absorbeur parfait ou un réflecteur parfait, la formule appropriée de l'Annexe B doit être utilisée en fonction de la structure du champ, et les exigences suivantes s'appliquent:

5.2.2 Cible absorbante

Une **cible** absorbante (voir Figures 1, F.1a, F.3, F.4, F.5a et F.7) doit présenter:

- un coefficient de réflexion inférieur à 3,5 % ;
- une absorption d'énergie acoustique à l'intérieur de la **cible** d'au moins 99 %.

(Voir aussi A.5.2.2)

5.2.3 Cible réfléchissante

Une **cible** réfléchissante (voir Figures F.1b, F.2, F.5b et F.6) doit présenter:

- un coefficient de réflexion supérieur à 99 %.

Il ne convient pas qu'une cible réfléchissante conique soit utilisée pour des mesurages de puissance de transducteurs où $ka < 30$. Un réflecteur conique convexe avec un demi-angle de 45° ne doit pas être utilisé pour des mesurages de puissance de transducteurs où $ka < 17,4$, ce qui découle de considérations théoriques concernant les effets de la divergence de faisceau. Voir aussi A.5.3.

NOTE 1 La signification exacte de la valeur a dépend des circonstances. Pour des transducteurs, en pratique, il s'agit du rayon du transducteur effectif selon la définition particulière au champ d'application. Dans des calculs de modèles selon l'approche du piston, il s'agit du rayon géométrique du piston.

En outre, il ne convient pas d'utiliser un réflecteur conique convexe avec un demi-angle de cône de 45° pour des mesures de puissance de transducteurs focalisés où $d < 32a$. Si la longueur focale géométrique d n'est pas connue, il ne convient pas d'utiliser un réflecteur conique convexe avec un demi-angle de cône de 45° lorsque la distance du maximum de pression du transducteur est $z_f < 1/((1/32a) + (\lambda/a^2))$.

NOTE 2 Cette condition préconise de restreindre l'utilisation de réflecteurs coniques convexes aux cas non focalisés ou de faible focalisation, ce qui rejoint la restriction du domaine d'application aux "faisceaux possédant de préférence une bonne collimation". Si néanmoins un réflecteur conique convexe est utilisé dans des champs fortement focalisés et que la formule (B.5) est appliquée, il est nécessaire de prendre en compte des incertitudes additionnelles non comprises à l'Article 7.

(Voir aussi A.5.2.3 et B.6.)

5.3 Diamètre de la cible

Le diamètre de la **cible** doit être suffisamment grand pour intercepter toutes les portions significatives du champ. Comme exigence générale, il ne doit en aucun cas être inférieur à 1,5 fois la dimension correspondante (soit le diamètre) du **transducteur ultrasonore**.

Qu'il soit recommandé ou non d'avoir un diamètre de cible de plus de 1,5 fois le diamètre du transducteur dépend du diamètre de faisceau du champ à l'emplacement particulier de la cible. Les dimensions du faisceau doivent être mesurées ou calculées à partir d'une estimation théorique telle que fournie par exemple au paragraphe A.5.3.

5.2 Target type

5.2.1 General

The **target** shall have known acoustic properties, these being relevant to the details of the relation between ultrasonic power and **radiation force**. (See also A.5.2.)

If the target is chosen so as to closely approach one of the two extreme cases, i.e. perfect absorber or perfect reflector, the appropriate formula of Annex B shall be used depending on the field structure and the following requirements shall apply:

5.2.2 Absorbing target

An absorbing **target** (see Figure 1, F.1a, F.3, F.4, F.5a and F.7) shall have:

- an amplitude reflection factor of less than 3,5 %;
- an acoustic energy absorption within the **target** of at least 99 %.

(See also A.5.2.2.)

5.2.3 Reflecting target

A reflecting **target** (see Figure F.1b, F.2, F.5b and F.6) shall have:

- an amplitude reflection factor of greater than 99 %.

A conical reflecting target should not be used for power measurements of transducers where $ka < 30$. A convex-conical reflector with a cone half-angle of 45° shall not be used for power measurements of transducers where $ka < 17,4$, which follows from theoretical consideration of the effects of beam divergence. See also A.5.3.

NOTE 1 The exact meaning of the quantity a depends on circumstances. For practical transducers, this is the effective transducer radius in accordance with the particular definition in the field of application. In model calculations using a piston approach, it is the geometrical piston radius.

In addition, a convex-conical reflector with a cone half-angle of 45° should not be used for power measurements of focused transducers where $d < 32a$. If the geometrical focal length d is not known, then a convex-conical reflector with a cone half-angle of 45° should not be used when the distance z_f of the pressure maximum from the transducer is $z_f < 1/((1/32a) + (\lambda/a^2))$.

NOTE 2 This condition recommends to restrict the use of convex-conical reflectors to the unfocused case or the case of weak focusing, and this is in line with the restriction to "preferably well-collimated beams" in the Scope. If, nevertheless, a convex-conical reflector is used in strongly focused fields and formula (B.5) is applied, additional uncertainties that are not covered by Clause 7 need to be taken into account.

(See also A.5.2.3 and B.6.)

5.3 Target diameter

The **target** diameter shall be large enough to intercept all significant parts of the field. As a general requirement, it shall in no case be lower than 1,5 times the appropriate dimension (e.g. the diameter) of the **ultrasonic transducer**.

Whether or not the target diameter should be more than 1,5 times the transducer diameter, depends on the beam diameter of the field at the particular location of the target. The beam dimensions shall be measured or calculated from theoretical estimation as given, for example in A.5.3.

5.4 Balance / Système de mesurage de force

La balance de **forces de rayonnement** peut être une balance gravimétrique, exigeant par conséquent une orientation verticale du faisceau. Alternativement, la balance peut être un dispositif à retour de force, permettant une orientation horizontale du faisceau. Si la balance a été étalonnée en unités de masse, une conversion correcte des lectures de balance en valeurs de force doit être assurée soit par le fabricant du dispositif de force de rayonnement, soit par l'utilisateur.

NOTE Une orientation verticale du faisceau permet une conversion en standards de masse nationaux (poids étalonnés). Il existe en pratique des configurations à orientation de faisceau horizontale utilisant soit une cible réfléchissante [5,6], soit une cible absorbante [7]. L'étalonnage peut être effectué en utilisant une extension de bras de balance appropriée ou en étalonnant par rapport à des sources de puissance acoustique connue.

La balance utilisée doit posséder une résolution suffisante pour la valeur de puissance ultrasonore à mesurer. (Voir A.5.4.)

5.5 Réservoir du système

Si une **cible** réfléchissante est utilisée, le réservoir de mesurage doit être revêtu d'un matériau absorbant de manière à ce que les réflexions ne contribuent pas à plus de 1 % de la puissance totale mesurée. (Voir aussi A.5.5.)

5.6 Structures de support de la cible

Dans les balances statiques, les éléments de structure qui portent la **cible** et transmettent la **force de rayonnement** à travers l'interface entre l'air et l'eau doivent être conçus de façon à limiter l'effet de tension de surface à moins de 1 % de la puissance totale mesurée. (Voir aussi A.5.6.)

5.7 Positionnement du transducteur

Le support de **transducteur ultrasonore** doit permettre un positionnement stable et reproductible de celui-ci par rapport à la **cible** de manière à ce que les variations qui lui sont liées ne dépassent pas 1 % de la puissance totale mesurée.

5.8 Feuillet contre les courants

Si un feuillet contre les courants est utilisé, il doit être placé près de la **cible** et ne doit pas être parallèle à la surface du **transducteur ultrasonore** [8]. Son coefficient de transmission doit être connu par mesurage et une correction doit être appliquée si son influence dépasse 1 % de la puissance totale mesurée. (Voir aussi A.5.8.)

NOTE En pratique, un angle d'inclinaison de 5° à 10° a été trouvé approprié.

5.9 Couplage du transducteur

Le **transducteur ultrasonore** doit être couplé au dispositif de mesurage de telle manière que l'impact sur la puissance totale mesurée soit inférieur à 1 %, sans quoi une correction doit être appliquée. (Voir aussi A.5.9.)

5.10 Étalonnage

La balance de **forces de rayonnement** doit être étalonnée au moyen de petits poids de masse connue. Il convient également d'étalonner la balance de **forces de rayonnement** au moyen d'une source ultrasonore de puissance de sortie connue. Dans ce cas, l'étalonnage doit être effectué une fois tous les deux ans ou plus fréquemment s'il apparaît un quelconque indice de variation de sensibilité de la balance à la puissance ultrasonore.

5.4 Balance / Force measuring system

The **radiation force** balance may be a gravimetric balance with, therefore, the beam orientation vertical. Alternatively the balance may be of a force feed-back design, allowing the beam to be horizontal. If the balance has been calibrated against mass units, a correct conversion of the balance readings to force values shall be ensured by the manufacturer of the radiation force device or by the user.

NOTE Vertical beam orientation allows traceability to national mass standards (calibrated weights). Set-ups with horizontal beam orientation exist in practice using either a reflecting target [5,6] or an absorbing target [7]. Calibration may be carried out using an appropriate balance arm attachment, or by calibration against sources of known acoustic power.

The balance used shall have sufficient resolution for the magnitude of the ultrasonic power to be measured. (See A.5.4)

5.5 System tank

If a reflecting **target** is used, an absorbing lining of the measuring vessel shall be used so that returning reflections do not contribute to more than 1 % of the overall measured power. (See also A.5.5.)

5.6 Target support structures

In static-force balances, the structural members supporting the **target** and carrying the **radiation force** across the air-water interface shall be designed to limit the effect of surface tension to less than 1 % of the overall measured power. (See also A.5.6.)

5.7 Transducer positioning

The **ultrasonic transducer** mount shall allow stable and reproducible positioning of the **ultrasonic transducer** with respect to the **target** in a way that related changes in overall measured power do not exceed 1 %.

5.8 Anti-streaming foils

If an anti-streaming foil is used it shall be positioned close to the **target** and shall not be oriented parallel to the surface of the **ultrasonic transducer** [8]. Its transmission coefficient shall be known from measurement and a correction shall be applied, if its influence is more than 1 % of the overall measured power. (See also A.5.8.)

NOTE In practice a tilt angle of 5° to 10° has been found to be adequate.

5.9 Transducer coupling

The **ultrasonic** transducer shall be coupled to the measurement device such that the impact on the overall measured power is less than 1 %, otherwise a correction shall be applied. (See also A.5.9.)

5.10 Calibration

The **radiation force** balance shall be calibrated by the use of small weights of known mass. Also, the **radiation force** balance should be calibrated by use of an ultrasonic source of known output power. In this case, the calibration shall be undertaken once every two years or more frequently if there is any indication that the balance sensitivity to ultrasonic power has changed.

6 Exigences pour les conditions de mesurage

6.1 Positionnement latéral de la cible

Le positionnement latéral de la cible doit être identique et reproductible de manière à ce que les variations qui lui sont liées ne dépassent pas 1 % de la puissance totale mesurée. (Voir aussi A.6.1.)

6.2 Distance du transducteur à la cible

La distance de la face du **transducteur ultrasonore** à la **cible**, ou le cas échéant d'un feuillet à la **cible**, doit être connue et reproductible de manière à ce que les variations qui lui sont liées ne dépassent pas 1 % de la puissance totale mesurée. (Voir aussi A.6.2.)

6.3 Eau

Lors de l'utilisation d'une balance de **forces de rayonnement**, le liquide de mesurage doit être de l'eau.

Pour la détermination de **puissances de sortie** supérieures à 1 W, seule de l'eau dégazée doit être utilisée.

Le dégazage de l'eau doit être effectué selon un procédé bien défini tel que décrit à l'Annexe D. Lorsque de l'eau dégazée est requise, la quantité d'oxygène dissous dans l'eau doit être inférieure à 4 mg/l durant tous les mesurages.

(Voir aussi A.6.3.)

6.4 Contact avec l'eau

Il faut s'assurer que toutes les bulles d'air sont éliminées des faces actives avant d'entreprendre un mesurage. Après les mesurages, les faces actives doivent être inspectées à nouveau et les mesurages doivent être rejetés si des bulles d'air sont constatées. (Voir aussi A.6.4.)

6.5 Conditions d'environnement

Pour des mesurages dans les plages milliwatt et microwatt, soit le dispositif de mesurage doit comporter une isolation thermique, soit la procédure de mesurage, y compris l'acquisition de données, doit être effectuée de telle manière que les variations liées à la dérive thermique et à d'autres perturbations durant le mesurage ne dépassent pas 1 % de la puissance totale mesurée.

Le dispositif de mesurage doit être protégé contre les vibrations et courants d'air ambiants.

(Voir aussi A.6.5.)

6.6 Dérives thermiques

Lors de l'utilisation d'une **cible** absorbante, une évaluation des effets thermiques dus à l'énergie acoustique absorbée (par dilatation et changement de flottabilité) doit être effectuée en enregistrant le signal mesuré avant et après l'excitation et l'arrêt du **transducteur ultrasonore**. (Voir aussi A.6.6.)

6 Requirements for measuring conditions

6.1 Lateral target position

The lateral position of the target during measurement shall be constant and reproducible to an extent that related changes in overall measured power do not exceed 1 %. (See also A.6.1.)

6.2 Transducer-target separation

The distance between the **ultrasonic transducer** surface and the **target**, or foil (if used) and **target**, shall be known and reproducible to an extent that possible changes in overall measured power do not exceed 1 %. (See also A.6.2.)

6.3 Water

When using a **radiation force** balance, the liquid used for the measurements shall be water.

For determining **output powers** above 1 W, only degassed water shall be used.

Degassing of water shall be accomplished in a well-defined process such as described in Annex D. Where degassed water is required, the amount of dissolved oxygen in the water shall be <4 mg/l during all measurements.

(See also A.6.3.)

6.4 Water contact

Before starting the measurements, it shall be ensured that all air bubbles are removed from the active faces. After measurements are completed, the active faces shall again be inspected, and the measurements shall be discarded if any air bubbles are found. (See also A.6.4.)

6.5 Environmental conditions

For measurements in the milliwatt and microwatt region, either the measuring device shall be provided with thermal isolation or the measurement process, including data acquisition, shall be performed in such a way that thermal drift and other disturbances during the measurement cause no more than a 1 % effect on the overall measured power.

The measuring device shall be protected against environmental vibrations and air flow.

(See also A.6.5.)

6.6 Thermal drifts

When using an absorbing **target**, an estimate of the thermal effects due to the absorbed sound energy (expansion and buoyancy change) shall be made by recording the measured signal before and after the switch-on and switch-off of the **ultrasonic transducer**. (See also A.6.6.)

7 Incertitude de mesurage

7.1 Généralités

Une évaluation de l'incertitude de mesurage globale ou de la précision doit être réalisée de manière individuelle pour chaque configuration utilisée. Il convient que cette évaluation comprenne les éléments qui suivent.

L'incertitude doit être évaluée en utilisant le Guide ISO [9].

7.2 Système de balance à suspension de cible

Le système de balance doit être vérifié ou étalonné en utilisant de petits poids de masse connue, avec l'ensemble du système préparé pour des mesurages de forces de rayonnement, soit notamment avec la **cible** suspendue dans l'eau.

Cette procédure doit être répétée plusieurs fois avec chaque poids pour obtenir une indication de la dispersion aléatoire des résultats. Une estimation d'incertitude pour le facteur d'étalonnage de la balance doit être déduite des résultats de cet étalonnage et de l'incertitude de masse des poids utilisés.

Il convient d'archiver les résultats de ces vérifications pour pouvoir juger de la stabilité à long terme du facteur d'étalonnage de la balance.

(Voir aussi A.7.2)

7.3 Linéarité et résolution du système de balance

La linéarité du système de balance doit être vérifiée au moins tous les six mois comme suit.

Les mesurages décrits au paragraphe 7.2 doivent être effectués avec au moins trois poids de masses différentes dans la plage de sortie concernée de la balance. La lecture de la balance en fonction de la masse d'entrée peut être représentée comme un graphique en conformité avec la Figure 2. Idéalement, il convient que les points résultants de ce graphique se trouvent sur une ligne droite commençant à l'origine des coordonnées. Si des déviations apparaissent par rapport à cette ligne, une composante d'incertitude additionnelle doit en être déduite.

Étant donné que les poids de moins de 10 mg sont difficiles à manipuler, la linéarité de la balance peut également être vérifiée au moyen d'un **transducteur ultrasonore** dont les propriétés sont connues, activé par différents niveaux d'amplitude de tension et produisant donc des forces de rayonnement de grandeurs différentes. Dans ce cas, la grandeur d'entrée en abscisse de la Figure 2 est la **puissance de sortie** ultrasonore du transducteur et son incertitude doit être prise en compte.

La résolution limitée de la balance peut conduire à une incertitude de la puissance, dont la contribution doit être prise en compte dans l'analyse de l'incertitude.

7.4 Extrapolation au moment de la commutation du transducteur ultrasonore

Dans le cas d'une balance électronique, pour obtenir la valeur de la **force de rayonnement**, le signal de sortie de la balance est typiquement enregistré en fonction du temps et extrapolé au moment de la commutation du **transducteur ultrasonore**. Cette extrapolation entraîne une incertitude, qui dépend essentiellement de la valeur de dispersion du signal de sortie de la balance (rapport signal/bruit). L'incertitude du résultat de l'extrapolation doit être estimée au moyen de procédures mathématiques standard, en employant l'algorithme de régression.

7 Measurement uncertainty

7.1 General

An estimation of the overall measurement uncertainty or accuracy assessment shall be determined individually for each set-up used. This assessment should include the following elements.

The uncertainty shall be assessed using the ISO Guide [9].

7.2 Balance system including target suspension

The balance system shall be checked or calibrated using small weights of known mass with the whole system prepared for radiation force measurements, including with the **target** suspended in water.

This procedure shall be repeated several times with each weight to obtain an indication of the random scatter of results. An uncertainty estimate for the balance calibration factor shall be derived from the results of this calibration and from the mass uncertainty of the weights used.

The results of these checks should be filed in order to enable a judgement of the long-term stability of the balance calibration factor.

(See also A.7.2.)

7.3 Linearity and resolution of the balance system

The linearity of the balance system shall be checked at least every six months as follows.

The measurements described in 7.2 shall be made with at least three weights of different masses within the balance output range of interest. The balance readout as a function of input mass can be represented as a graph in accordance with Figure 2. The resulting points of this graph should ideally be on a straight line starting at the origin of the coordinates. If deviations from this line occur, an additional uncertainty contribution shall be derived from them.

Since weights of less than 10 mg are difficult to handle, the balance linearity can also be checked by means of an **ultrasonic transducer** with known properties, activated by various levels of voltage amplitude and thus producing radiation forces of various magnitudes. In this case the input quantity at the abscissa of Figure 2 is the ultrasonic **output power** of the transducer, and its uncertainty shall be taken into account.

The limited resolution of the balance leads to a power uncertainty contribution that needs to be taken into account in the uncertainty analysis.

7.4 Extrapolation to the moment of switching the ultrasonic transducer

In the case of an electronic balance, to obtain the **radiation force** value, the balance output signal is typically recorded as a function of time and extrapolated back to the moment of switching the **ultrasonic transducer**. This extrapolation involves an uncertainty, depending mainly on the amount of scatter in the balance output signal (signal-to-noise ratio). The uncertainty of the extrapolation result shall be estimated by means of standard mathematical procedures in utilizing the regression algorithm.

7.5 Imperfections de la cible

L'influence des imperfections de la **cible** doit être évaluée en utilisant une approche d'onde plane telle que décrite en annexe A.7.5.

7.6 Géométrie de la cible réfléchissante

L'influence de la géométrie de la **cible réfléchissante** doit être évaluée et incorporée dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.6.)

7.7 Absorbeurs latéraux dans le cas de mesurages d'une cible réfléchissante

Les imperfections des absorbeurs latéraux dans la configuration des Figures F.1b, F.2, F.5b et F.6 doivent être évaluées et incorporées dans l'incertitude globale du système. (Voir aussi A.7.7)

7.8 Désalignement de la cible

L'influence du désalignement de la **cible** doit être évaluée et incorporée dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.8)

7.9 Désalignement du transducteur ultrasonore

L'influence du désalignement du **transducteur ultrasonore** doit être évaluée et incorporée dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.9)

7.10 Température de l'eau

L'incertitude provoquée par la température de l'eau doit être évaluée et incorporée dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.10)

7.11 Atténuation ultrasonore et courant acoustique

L'incertitude provoquée par l'atténuation ultrasonore et les courants acoustiques doit être évaluée et incorporée dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.11)

7.12 Propriétés de feuillet

Si un feuillet de couplage ou un feuillet écran est utilisé pendant le mesurage de la **force de rayonnement**, la perte de transmission du feuillet mesurée ou évaluée doit être prise en compte, ainsi que tout effet possible de l'onde réfléchie sur le **transducteur ultrasonore**. L'incertitude introduite par ces effets doit être évaluée individuellement et incorporée dans l'incertitude globale du système.

7.13 Taille de cible finie

L'effet de la taille finie de la cible sur l'incertitude doit être déterminé et incorporé dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.13)

7.14 Hypothèse de l'onde plane

La contribution à l'incertitude du fait de l'utilisation de l'hypothèse de l'onde plane doit être déterminée et incorporée dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.14)

7.5 Target imperfections

The influence of the **target** imperfections shall be estimated using a plane-wave approach such as described in A.7.5.

7.6 Reflecting target geometry

The influence of the reflecting **target** geometry shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See A.7.6)

7.7 Lateral absorbers in the case of reflecting target measurements

The imperfections of the lateral absorbers in the arrangement of Figure F.1b, F.2, F.5b and F.6 shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See also A.7.7.)

7.8 Target misalignment

The influence of **target** misalignment shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See A.7.8)

7.9 Ultrasonic transducer misalignment

The influence of **ultrasonic transducer** misalignment shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See A.7.9)

7.10 Water temperature

The uncertainty caused by water temperature shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See A.7.10)

7.11 Ultrasonic attenuation and acoustic streaming

The uncertainty caused by ultrasonic attenuation and acoustic streaming shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See A.7.11)

7.12 Foil properties

If a coupling foil or a shielding foil is used during the **radiation force** measurements, the foil transmission loss as measured or estimated shall be taken into account, as well as any possible effect of the reflected wave on the **ultrasonic transducer**. The uncertainty introduced by these effects shall be assessed individually and incorporated into the overall system uncertainty.

7.13 Finite target size

The effect on uncertainty of the finite target size shall be determined and included in the overall system uncertainty. (See A.7.13)

7.14 Plane-wave assumption

The uncertainty contribution due to the use of a plane-wave assumption shall be determined and included in the overall system uncertainty. (See A.7.14)

7.15 Influences de l'environnement

Les incertitudes provoquées par les vibrations, variations de températures et courants d'air ambiants doivent être évaluées et incorporées dans l'incertitude globale du système. (Voir A.7.15)

7.16 Mesurage de la tension d'excitation

Si la tension d'excitation appliquée au **transducteur ultrasonore** est mesurée et que sa valeur est significative pour le résultat du mesurage de la puissance ultrasonore, sa mesure d'incertitude doit être évaluée et incorporée dans l'incertitude globale du système. (Voir aussi A.7.16)

7.17 Température du transducteur ultrasonore

Si des valeurs de puissance ultrasonore mesurées à différentes températures doivent être comparées, la relation entre la puissance et la température doit être vérifiée et son influence doit être prise en compte. (Voir aussi A.7.17)

7.18 Non linéarité

L'influence potentielle des non linéarités relatives aux points suivants doit être évaluée et, si nécessaire, incorporée dans l'incertitude globale du système:

- a) linéarité du système de balance, y compris la suspension de la **cible**;
- b) contributions à la non linéarité dues à un dégazage incorrect de l'eau;
- c) atténuation ultrasonore et **courant acoustique**;
- d) les relations théoriques des **forces de rayonnement** elles-mêmes

(Voir A.7.18)

7.19 Autres sources

Il convient de vérifier périodiquement si l'incertitude globale telle que spécifiée aux paragraphes 7.2 à 7.18 en suivant les exigences qui précèdent n'est pas influencée par d'autres sources de diffusion aléatoire. (Voir aussi A.7.19)

7.15 Environmental influences

The uncertainties caused by environmental vibrations, air flow or temperature variations shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See A.7.15)

7.16 Excitation voltage measurement

If the excitation voltage applied to the **ultrasonic transducer** is measured and its value is of relevance to the result of the ultrasonic power measurement, its measurement uncertainty shall be estimated and incorporated into the overall system uncertainty. (See also A.7.16.)

7.17 Ultrasonic transducer temperature

If ultrasonic power values measured at different temperatures are to be compared, the dependence of the power on the temperature shall be checked and its influence be taken into account. (See also A.7.17.)

7.18 Non-linearity

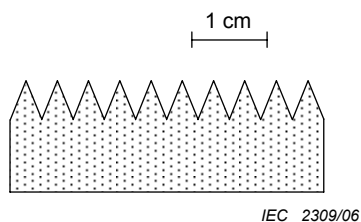
The potential influence of non-linearities regarding the following shall be assessed and, if necessary, included in the overall system uncertainty:

- a) the linearity of the balance system including the **target** suspension;
- b) non-linear contributions due to improperly degassed water;
- c) ultrasonic attenuation and **acoustic streaming**;
- d) the theoretical **radiation force** relations themselves.

(See A.7.18)

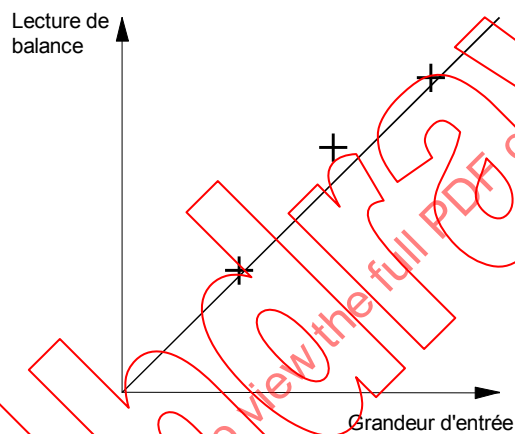
7.19 Other sources

Checks should be performed periodically to determine whether the overall uncertainty as specified in 7.2 to 7.18 using the above guidelines is not influenced by any other sources of random scatter. (See also A.7.19.)



IEC 2309/06

Figure 1 – Vue en coupe d'une cible absorbante



CEI 136/98

NOTE Si la linéarité est vérifiée en appliquant de petits poids de masse connue, la grandeur d'entrée est la masse des poids utilisés. Si la linéarité est vérifiée en appliquant la **force de rayonnement** du champ ultrasonore émis par un **transducteur ultrasonore** de propriétés connues, la grandeur d'entrée est la **puissance de sortie** ultrasonore du transducteur.

Figure 2 – Vérification de la linéarité: lecture de balance en fonction de la grandeur d'entrée

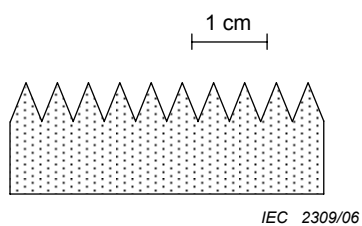
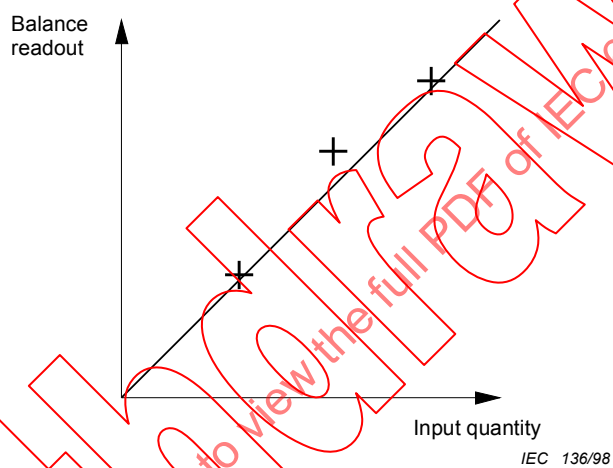


Figure 1 – Section through an absorbing target



NOTE If linearity is checked by applying small weights of known mass, the input quantity is the mass of the weights used. If the linearity is checked by applying the **radiation force** of the ultrasonic field emitted by an **ultrasonic transducer** with known properties, the input quantity is the ultrasonic **output power** of the transducer.

Figure 2 – Linearity check: balance readout as a function of the input quantity

Annexe A (informative)

Informations additionnelles concernant divers aspects des mesurages de force de rayonnement

Cette annexe comporte des informations additionnelles concernant les spécifications de la présente norme, afin d'aider à la mise en oeuvre pratique de mesurages de puissance ultrasonore. La numérotation des articles et paragraphes correspond à celle du corps principal du document.

A.1 Domaine d'application

NOTE La force de rayonnement est égale à la variation moyenne temporelle des quantités de mouvement [4] et est donc reliée à la puissance et à l'intensité ultrasonores.

A.2 Références normatives

Vacant.

A.3 Définitions

Vacant.

A.4 Liste des symboles

Vacant.

A.5 Balances de forces de rayonnement

A.5.1 Généralités

Vacant.

A.5.2 Types de cible

A.5.2.1 Généralités

Le but est habituellement d'approcher au mieux un des deux cas de figure extrêmes: l'absorbeur parfait ou le réflecteur parfait [10]. Il convient que la compressibilité soit aussi faible que possible pour éviter toute variation de flottabilité avec la pression ambiante. Il convient par ailleurs de prendre les précautions nécessaires pour maximiser la stabilité de la flottabilité de la **cible**.

Pour effectuer des mesurages de puissance dans des limites d'incertitude prévisibles, le choix du type de cible dépend de la façon dont le faisceau ultrasonore dévie de l'approche théorique de l'onde plane. L'utilisation d'une cible réfléchissante peut en particulier provoquer des incertitudes inacceptables (voir 5.2.3).

Annex A (informative)

Additional information on various aspects of radiation force measurements

This annex contains additional information on the specifications of this standard to aid in the actual practical measurement of ultrasonic power. The clause and subclause numbers follow the format of the main body.

A.1 Scope

NOTE The radiation force is equal to the change in the time-averaged momentum flow [4] and is thus related to ultrasonic intensity and power.

A.2 Normative references

Void.

A.3 Definitions

Void.

A.4 List of symbols

Void.

A.5 Radiation force balances

A.5.1 A.5.1 General

Void.

A.5.2 Target type

A.5.2.1 General

Usually, the aim is to approach most closely one of the two extreme cases: perfect absorber or perfect reflector [10]. The compressibility should be as low as possible to avoid buoyancy changes due to variations of the ambient pressure. Care should be taken in other respects to maximize the stability of buoyancy of the **target**.

To perform power measurements within predictable uncertainty, the choice of the target type depends on the way the ultrasonic beam deviates from the theoretical plane wave approach. In particular the use of a reflecting target may result in unacceptable uncertainties (see 5.2.3).

A.5.2.2 Cible absorbante

Des échantillons d'élastomère approprié avec ou sans angles vifs sont généralement utilisés comme **cibles** absorbantes. Le matériau peut contenir des inhomogénéités pour accroître ses caractéristiques absorbantes.

La Figure 1 montre un exemple de configuration d'un absorbeur à angles vifs. Dans ce cas, la concentration en inhomogénéités augmente de zéro aux angles vifs à 30 % en volume à l'arrière. Dans cet exemple, des sphères de verre creuses d'un diamètre de l'ordre d'un dixième de millimètre constituent des inhomogénéités satisfaisantes, car elles n'ont qu'une influence limitée sur la densité et la compressibilité de l'élastomère.

D'autres types d'absorbeurs sont décrits dans [11,12].

Des faisceaux ultrasonores transmettant des puissances supérieures à 10 W ou présentant des densités de puissance locales élevées ont montré qu'ils provoquent de fortes augmentations de température locales dans l'absorbeur, qui peuvent mener à des détériorations et à des modifications de ses propriétés acoustiques. Des augmentations de température supérieures à 50 °C ont été observées.

A.5.2.3 Cible réfléchissante

La principale difficulté est de réduire la compressibilité de la **cible** réfléchissante, car les variations de pression d'air font fluctuer le volume - et donc la flottabilité - de la **cible** proportionnellement à sa compressibilité. Il ne convient pas d'utiliser des réflecteurs acoustiques plans réalisés au moyen de feuilles métalliques minces sur couche d'air. L'utilisation de plaques métalliques massives, inclinées à 45° de l'axe du faisceau comme réflecteurs peut provoquer des erreurs [13] à cause de la transmission significative et dépendante de la fréquence à travers la plaque.

Des réflecteurs coniques sous forme de corps creux à parois épaisses ou de feuilles métalliques minces sur couche d'air sont adéquats. Des réflecteurs coniques en mousse plastique très rigide et recouverts d'une mince couche métallique galvanisée se sont révélés être des **cibles** convenables [10].

Cible réfléchissante – convexe

Les Figures F.1b, F.2 et F.6 montrent un réflecteur conique convexe. Le demi-angle du cône est typiquement de 45°, de sorte que les ondes réfléchies s'éloignent perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore.

Cible réfléchissante – concave

La Figure F.5b montre un réflecteur conique concave. Le demi-angle du cône est typiquement de l'ordre de 60° à 65°, de sorte que l'onde réfléchie se rapproche davantage du **transducteur ultrasonore** qu'avec un réflecteur convexe.

A.5.3 Diamètre de la cible

Une formule d'évaluation [14] est donnée ci-dessous pour la valeur minimale du rayon b de la **cible** qui donnerait une **force de rayonnement** égale à au moins 98 % de la **force de rayonnement** qui existerait si la **cible** avait une section infinie (c'est-à-dire donnant une erreur inférieure à 2 %). L'équation est valable pour une **cible** circulaire absorbante placée dans le champ d'un **transducteur ultrasonore** circulaire plan cloisonné de rayon a fonctionnant en piston et vibrant en régime permanent dans un milieu non absorbant. La formule est la suivante:

A.5.2.2 Absorbing target

Samples of appropriate elastic rubber material with or without wedges are normally used as absorbing **targets**. To increase the absorbing properties, the material may contain inhomogeneities.

Figure 1 shows an example of a set-up of a wedge-type absorber. In this case the concentration of the inhomogeneities increases from zero at the wedges to 30 % by volume at the rear surface. In this example, hollow glass spheres of diameter of the order of one-tenth millimetre behave satisfactorily as inhomogeneities, since they have only little influence on the density and compressibility of the elastic rubber material.

Other types of absorbers are described in [11,12].

Ultrasonic beams transmitting powers above 10 W or exhibiting high local power densities have been shown to cause very high local temperature rises in the absorber which might lead to damage and changes in its acoustic properties. Temperature rises higher than 50 °C have been observed.

A.5.2.3 Reflecting target

The main problem is to reduce the compressibility of a reflecting **target** because air pressure fluctuations modulate the volume, and thereby the buoyancy of the **target**, proportional to its compressibility. Plane sound reflectors that are realized by means of air-backed thin metal plates should not be used. Using solid metal plates as reflectors, which are adjusted under an angle of 45° to the sound beam axis, may cause errors [13] due to significant and frequency-dependent transmission through the plate.

Cone-shaped reflectors made of thick-walled hollow bodies or of air-backed thin metal plates are suitable. Cone-shaped reflectors made of very stiff plastic foam and which are coated with a very thin metal layer produced by electroplating have proved to be adequate **targets** [10].

Reflecting target – convex

A conical reflector of the convex type is shown in Figures F.1b, F.2 and F.6. The cone half-angle is typically chosen to be 45°, so that the reflected wave leaves at right angles to the ultrasound beam axis.

Reflecting target – concave

A conical reflector of the concave type is shown in Figure F.5b. The cone half-angle is typically chosen to be of the order of 60° to 65°, so that the reflected wave is directed nearer to the **ultrasonic transducer** than with the convex-type reflector.

A.5.3 Target diameter

In the following, an assessment formula [14] is given for the minimum value of the **target** radius b which would lead to a **radiation force** which amounts to at least 98 % of the **radiation force** that would exist if the **target** were of infinite cross-sectional size (i.e. giving an error of less than 2 %). The equation is valid for an absorbing circular **target** in the field of a continuously vibrating, baffled circular plane piston **ultrasonic transducer** of radius a in a non-absorbing medium. The formula is:

$$b = a [1/(1 + 0,53 \tau_1 s) + \tau_1 s] \quad (\text{A.1})$$

avec

$$\beta = 0,98 + 0,01 \pi k a$$

$$\tau_1 = \tau_0 + \Delta \tau$$

$$\tau_0 = k a / (2\pi (\beta^2 - 1)^{1/2})$$

$$\Delta \tau = \begin{cases} 0,7 & \text{si } k a \leq 9,3 \\ 6,51/k a & \text{si } 9,3 \leq k a \leq 65,1 \\ 0,1 & \text{si } 65,1 \leq k a \end{cases}$$

où

z est la distance entre la **cible** et le **transducteur ultrasonore** ;

λ est la longueur d'onde ultrasonore dans le milieu de propagation ;

$k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde circulaire ;

$s = z\lambda/a^2$ est la distance normalisée entre la **cible** et le **transducteur ultrasonore**.

L'équation (A.1) peut aussi être résolue en s , fournissant une valeur maximale de la distance normalisée entre la **cible** et le **transducteur ultrasonore** pour une **cible** de rayon b donné. L'influence de l'absorption et des **courants acoustiques** est considérée séparément.

Par précaution et conformément au 5.3, b ne doit jamais être inférieur à $1,5a$, même si l'équation ci-dessus l'autorise.

Les formules ci-dessus s'appliquent à proprement parler à une cible absorbante, mais elles peuvent aussi être utilisées pour décider si une cible réfléchissante est adéquate pour des mesurages en cas de faisceaux divergents. Il convient alors d'entendre b comme le rayon de la plus grande section transversale (dans le cas d'un réflecteur conique convexe, il s'agirait de la base du cône) et z comme la distance entre cette section et le transducteur.

Dans le cas d'un réflecteur conique convexe à 45° , le transducteur présente une certaine valeur de ka limitante sous laquelle les exigences de ces formules ne peuvent jamais être remplies, indépendamment de la taille du réflecteur et même si le sommet du réflecteur est aussi proche que possible ou en contact avec la surface du transducteur. La valeur limitante est $ka = 17,4$.

A.5.4 Balance / Système de mesurage de force

Le type de balance requis dépend fortement du niveau de puissance ultrasonore à mesurer. À une puissance de 10 mW correspond une **force de rayonnement** (dans l'eau et pour une **cible** absorbante) de $6,7 \mu\text{N}$, équivalant à une masse de $0,68 \text{ mg}$, alors qu'une puissance de 10 W donne une **force de rayonnement** de $6,7 \text{ mN}$ équivalant à une masse de $0,68 \text{ g}$. Dans le premier cas, une microbalance électronique à tarage automatique est l'instrument le plus adéquat, alors que dans le second cas une balance de laboratoire électronique ou mécanique adaptée [15] peut parfaitement être utilisée. Dans tous les cas, il est essentiel de pouvoir compenser un déplacement de la position de repos de la **cible**.

$$b = a [1/(1 + 0,53 \tau_1 s) + \tau_1 s] \quad (\text{A.1})$$

with

$$\begin{aligned} \beta &= 0,98 + 0,01 \pi k a \\ \tau_1 &= \tau_0 + \Delta \tau \\ \tau_0 &= k a / (2\pi (\beta^2 - 1)^{1/2}) \\ \Delta \tau &= \begin{cases} 0,7 & \text{if } k a \leq 9,3 \\ 6,51/k a & \text{if } 9,3 \leq k a \leq 65,1 \\ 0,1 & \text{if } 65,1 \leq k a \end{cases} \end{aligned}$$

where

z is the distance between the **target** and the **ultrasonic transducer**;

λ is the ultrasonic wavelength in the propagation medium;

$k = 2\pi/\lambda$ is the circular wavenumber;

$s = z\lambda/a^2$ is the normalized distance between the **target** and the **ultrasonic transducer**.

Equation (A.1) can also be solved for s , yielding a maximum value of the normalized distance between the **target** and the **ultrasonic transducer** for a **target** of given radius b . The influence of absorption and **acoustic streaming** is considered separately.

By way of precaution and in accordance with 5.3, b shall never be reduced below $1,5a$, even if this were possible in accordance with the above equation.

Strictly speaking, the above formulae apply to an absorbing target, but they may also be used to decide whether a reflecting target is appropriate for measurements in case of a diverging beam. b should then be understood as the radius of the largest target cross-section (in the case of a convex-conical reflector this would be the base of the cone) and z as the distance of that cross-section from the transducer.

In the case of a 45° convex-conical reflector there is a certain limiting ka value of the transducer below which the requirements of these formulae can never be fulfilled, irrespective of the reflector size and even if the reflector apex is as close as possible, namely in contact with the transducer surface. This limiting value is $ka = 17,4$.

A.5.4 Balance / Force measuring system

The type of balance needed depends strongly on the magnitude of the ultrasonic power to be measured. A power value of 10 mW is equivalent to a **radiation force** (in water on an absorbing **target**) of $6,7 \mu\text{N}$ corresponding to a mass equivalent of 0,68 mg, whereas a power value of 10 W means a **radiation force** of 6,7 mN corresponding to a mass equivalent of 0,68 g. In the former case, an electronic, self-compensating microbalance is the most suitable instrument, whereas in the latter case, an appropriate electronic balance or a purely mechanical laboratory balance [15] may be used. In any case, compensation of the **target** displacement at the position of rest is essential.

Si la balance ou le dispositif de mesurage de force est étalonné à l'aide de petits poids de masse connue ou si, pour d'autres raisons, la lecture de la balance ou du dispositif de mesurage de force est fournie en unités de masse, ces mesures doivent être multipliées par l'accélération de la pesanteur, g , de manière à être converties en mesures de force. Si la mesure est donnée en milligrammes (ou en grammes), la multiplication par g donne une force en micronewtons (ou millinewtons, respectivement). Quand la force est convertie en puissance ultrasonore conformément aux formules données en Annexe B, l'utilisation d'une vitesse du son en mètres par seconde, soit par exemple $c = 1491 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans l'eau pure à 23 °C, aboutit à une puissance en microwatts (ou en milliwatts, respectivement).

NOTE La valeur de g dépend du lieu où se trouve la balance de **forces de rayonnement**. La valeur adéquate doit être employée, soit par exemple $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ in Europe centrale, mais elle dépend aussi de l'altitude.

A.5.5 Réservoir du système

Il est nécessaire de s'assurer que ni la **cible** ni d'autres parties de dispositif de mesurage ne génèrent des réflexions acoustiques significatives, ou bien que ces réflexions sont renvoyées dans des directions telles qu'elles n'interfèrent pas avec le **transducteur ultrasonore**. Dans le cas contraire, la puissance mesurée ne sera pas en général égale à la valeur attendue en **champ libre**.

Si une cible réfléchissante est utilisée, les réflexions provenant des parois du réservoir sont critiques. Leur influence sur la puissance mesurée dépend de la géométrie du réservoir. Si le réservoir est circulaire en section transversale, toutes les réflexions peuvent être renvoyées à la cible (et par la cible réfléchissante au transducteur). Dans ce cas, l'exigence de 1 % du 5.5 mène à nouveau à une exigence d'au plus 1 % de réflexion d'énergie par les parois du réservoir, revêtement compris.

Si le réservoir du système est placé directement sur le plateau de la balance (voir configuration de mesurage à la Figure F.4), il convient de veiller à centrer correctement le réservoir sur le plateau.

A.5.6 Structures de support de la cible

Si la **cible** est suspendue par des fils qui traversent la surface du liquide, il convient qu'ils aient un diamètre aussi faible que possible afin de limiter les erreurs de mesure éventuellement causées par un mouillage incomplet du fil ou par des particules de poussière. L'utilisation de fil de faible diamètre est encore plus importante quand le **transducteur ultrasonore** surplombe la **cible** (rayonnement vers le bas) et où plusieurs fils sont nécessaires, comme dans la Figure F.5.

NOTE 1 Un fil platine-iridium de 60 μm ou 80 μm de diamètre convient.

NOTE 2 L'influence des fils de suspension peut être vérifiée en étalonnant le système avec des poids de masse connue, la cible étant suspendue dans l'eau, conformément au 7.2 et A.7.2.

NOTE 3 Une plus grande attention est nécessaire lorsque la configuration représentée à la Figure F.4 est utilisée. La surface externe du transducteur contribue ici à distribuer les forces de tension de surface. Il convient de laisser s'écouler un certain délai avant de démarrer le mesurage, pour stabiliser le niveau d'eau.

A.5.7 Positionnement du transducteur

Vacant.

A.5.8 Feuilletés contre les courants

Deux sortes de courant peuvent être considérées: le courant de convection de chaleur, comme lors de l'échauffement d'un **transducteur ultrasonore** en fonctionnement, et le **courant acoustique** associé à l'atténuation acoustique, ces courants se rencontrant donc surtout aux fréquences élevées.

If the balance/force measuring device is calibrated by means of small weights of known mass or if for other reasons, the readout of the balance/force-measuring device is given in mass units, the measurement result in mass units is to be multiplied by the acceleration due to gravity, g , to convert it into a force. If the measurement result is given in milligrams (or grams), multiplication by g yields a force in micronewtons (or in millinewtons, respectively). When the force is converted to ultrasonic power in accordance with the formulae given in Annex B, the use of a sound velocity value in metres per second, as for example $c = 1491 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in pure water at 23°C , then yields a power in microwatts (or in milliwatts, respectively).

NOTE The numerical value of g depends on the location of the radiation force balance. The appropriate value must be used which is, for example, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ in central Europe, but it also depends on the altitude.

A.5.5 System tank

It is necessary to ensure that neither the **target** nor any other parts of the measuring device give rise to any substantial ultrasonic reflections, or that the reflections are emitted in such directions that they do not return to the **ultrasonic transducer** and react on it. Otherwise, the measured power will not in general be equal to the desired **free-field** value.

If a reflecting target is used, reflections from the tank walls are critical. Their influence on the measured power depends on the geometry of the tank. If the tank is circular in cross-section, all reflections may return to the target (and via the reflecting target to the transducer). In this case the 1 % requirement of 5.5 leads to a requirement of again $\leq 1\%$ energy reflectivity of the tank wall including lining.

In case the system tank is directly placed on the balance pan (see measurement set-up in Figure F.4) care should be taken to centre the tank correctly on the pan.

A.5.6 Target support structures

If the **target** is suspended by wires which penetrate the liquid surface then they should have a diameter as small as possible to reduce measurement errors that may be caused by incomplete wetting of the wire or by dust particles. The use of a small wire diameter is even more important in a situation where the **ultrasonic transducer** is placed above the **target** (radiation downwards) and where several suspension wires may be needed, as in Figure F.5.

NOTE 1 Platinum-iridium wire of diameter $60 \mu\text{m}$ or $80 \mu\text{m}$ is suitable.

NOTE 2 The influence of the suspension wire(s) can be checked by calibrating the system using weights of known mass and with the target suspended in water, in accordance with 7.2 and A.7.2.

NOTE 3 Special notice has to be given when the set-up presented in Figure F.4 is used. Here the transducer outer surface will contribute to disturbing surface tension forces. Some delay to start a measurement should be allowed to stabilize the water level.

A.5.7 Transducer positioning

Void.

A.5.8 Anti-streaming foils

Two types of streaming can be relevant: the heat convection type, as for example in the case of an **ultrasonic transducer** warm-up during ultrasonic operation, and the **acoustic streaming** which is associated with ultrasonic attenuation and, hence, occurs primarily in the high-frequency range.

Des **courants acoustiques** peuvent apparaître lorsque l'absorption d'énergie le long de la trajectoire acoustique n'est pas négligeable (long trajet acoustique et/ou haute fréquence [16]). Leur effet peut être compensé par (a) une correction de la mesure de la force de rayonnement, (b) l'utilisation d'un feuillet contre les courants ou (c) en faisant varier l'éloignement de la cible et en extrapolant le résultat de la force de rayonnement à une distance nulle.

Si un feuillet est utilisé, son épaisseur doit être aussi faible que possible pour optimiser ses caractéristiques de transmission. Cet aspect est essentiel aux fréquences élevées.

A.5.9 Couplage du transducteur

Pour des mesurages précis, il convient que le **transducteur ultrasonore** soit couplé directement au liquide de mesurage afin d'éviter une modification d'impédance à cause d'un feuillet de couplage additionnel. Cela est particulièrement important pour les balances de haute précision très sensibles, dans lesquelles le faisceau ultrasonore est dirigé verticalement vers le haut [17,18] (Figure F.1). Il est particulièrement important d'éviter la modification d'impédance provoquée par l'addition d'un feuillet de couplage dans les mesurages de **transducteurs ultrasonores** à fort coefficient de surtension Q .

Des dessins détaillés d'un dispositif éprouvé permettant des mesurages aisés avec une membrane de couplage sont donnés dans [19]. Il devrait bien fonctionner en pratique pour la plupart des mesurages de **transducteurs ultrasonores** à large bande, à condition que le feuillet contre les courants soit disposé correctement tel que prescrit au paragraphe 5.8 et que son coefficient de transmission soit vérifié indépendamment.

A.5.10 Étalonnage

Vacant.

A.6 Conditions de mesurage

A.6.1 Positionnement latéral de la cible

Pour une **cible** réfléchissante conique convexe, il convient de prendre en compte que la **cible** peut se décentrer sous l'action du faisceau ultrasonore. La **cible** peut se déplacer dans une zone de moindre intensité et l'angle d'incidence du faisceau sonore avec la **cible** peut changer.

Cet effet dépend surtout de la puissance ultrasonore rayonnée et de la distribution locale de l'intensité, ainsi que du type de suspension employé pour la cible.

A.6.2 Distance du transducteur à la cible

Il convient que la distance de la face du **transducteur ultrasonore** à la **cible**, ou le cas échéant du feuillet à la **cible**, soit aussi faible que possible, du fait que le **courant acoustique** est provoqué par l'absorption ultrasonore le long de la trajectoire acoustique.

Une **cible** absorbante peut toujours être positionnée suffisamment près du **transducteur ultrasonore** pour éliminer tout problème lié à un champ divergent.

Pour une **cible** réfléchissante conique concave, il est indispensable d'éviter toute interférence de l'onde réfléchie avec le **transducteur ultrasonore**. Ce type de **cible** doit donc être placé à une distance qui empêche l'interaction [20]. Cette distance minimale dépend des détails individuels et, par conséquent, elle doit être évaluée individuellement.

Acoustic streaming may occur if the energy absorption along the sound path cannot be neglected (long sound path and/or high frequency [16]). Its effect can be compensated by (a) correcting the radiation force result, (b) using an anti-streaming foil or (c) varying the target distance and extrapolating the radiation force result to zero distance.

If a foil is used, its thickness shall be as small as possible to optimize its transmitting properties. This aspect is of major concern at high frequencies.

A.5.9 Transducer coupling

For precision measurements, the **ultrasonic transducer** should be coupled directly to the measurement liquid to avoid an impedance transformation by an additional coupling foil. This is particularly important for very sensitive high accuracy balances in which the ultrasonic beam is directed vertically upwards [17,18] (Figure F.1). Avoiding the impedance transformation caused by the addition of a coupling foil is particularly important in measurements on high-Q **ultrasonic transducers**.

Detailed technical drawings of a proven device for convenient measurements with a coupling membrane are given in [19]. They should work well for most practical measurements on broadband **ultrasonic transducers** provided that the anti-streaming foil is appropriately positioned as required in 5.8 and that its transmission coefficient is independently verified.

A.5.10 Calibration

Void.

A.6 Measuring conditions

A.6.1 Lateral target position

For a convex-conical reflecting **target**, attention should be paid to the fact that the **target** may decentre under the action of the ultrasonic beam. The **target** may move into a region of lower intensity and the angle of incidence of the sound beam on the **target** may change.

This effect depends mainly on the radiated ultrasonic power and the distribution of local intensities as well as on the kind of suspension used for the target.

A.6.2 Transducer/Target separation

The distance between the **ultrasonic transducer** surface and the **target**, or foil (if used) and **target**, should be as small as possible in view of the fact that **acoustic streaming** is caused by the ultrasonic absorption along the sound path.

An absorbing **target** can always be positioned near enough to the **ultrasonic transducer** to overcome any problem concerning a diverging field structure.

For a concave-conical reflecting **target**, it is essential to avoid any reaction of the reflected wave on the **ultrasonic transducer**. This type of **target** shall therefore be placed at a distance which avoids this interaction [20]. This minimum distance depends on the individual details and shall therefore be assessed individually.

Par ailleurs, le sommet d'une **cible** réfléchissante convexe peut être placé pratiquement en contact avec la face du **transducteur ultrasonore**, mais ceci ne signifie pas que la **cible** couvre le demi-espace entier dans lequel le **transducteur ultrasonore** émet. Même si (dans le cas d'un faisceau divergent) la plus grande partie du champ atteint le cône convexe, cela peut se produire à des angles d'incidence différents de ceux supposés dans la formule de l'onde plane et amener une réduction de la **force de rayonnement** réelle. Si un doute existe quant à une collimation insuffisante du champ du **transducteur ultrasonore** en question (ce qui peut arriver essentiellement pour de faibles valeurs de ka , c'est-à-dire à des fréquences basses et/ou avec de faibles diamètres du **transducteur ultrasonore**), il convient de faire varier la distance entre le **transducteur ultrasonore** et la **cible** et de répéter les mesurages. Toute décroissance de la **force de rayonnement** lorsque la distance augmente au-delà de celle provoquée par l'atténuation ultrasonore indique que la taille ou le type de la **cible** n'est pas approprié.

Lorsqu'une cible absorbante est utilisée pour des mesurages de forte puissance, il convient que la distance cible-transducteur ne soit jamais inférieure à 8 mm. Les ultrasons absorbés produisent un échauffement de l'absorbeur. À de courtes distances, les propriétés du transducteur peuvent changer par transfert de chaleur direct de l'absorbeur.

A.6.3 Eau

De l'eau dégazée est spécifiée pour des **puissances de sortie** dépassant 1 W pour éviter la cavitation. À des niveaux de **puissance de sortie** plus faibles, de l'eau dégazée est préférable pour la précision des mesures mais de l'eau distillée non dégazée est acceptable dans de nombreux cas, si l'on veille à ce qu'il n'y ait pas de bulles d'air sur les faces du **transducteur ultrasonore** ou de la **cible**.

NOTE 1 La quantité d'oxygène dissous dans l'eau augmente au cours du temps, voir Annexe D. La vitesse de cette augmentation dépend des dimensions du réservoir et des perturbations de l'eau.

NOTE 2 L'utilisation d'un additif pour éliminer la cavitation est décrite en D.4.

NOTE 3 Dans le cas où l'eau est saturée d'air, des bulles se formeront si la température de l'eau augmente pendant les mesurages. Ceci est dû au fait que la solubilité des gaz diminue avec la température.

A.6.4 Contact avec l'eau

Pour obtenir un mouillage (contact avec de l'eau) parfait des surfaces du **transducteur ultrasonore**, de la **cible** et du feuillet (le cas échéant), il convient de les plonger au moins plusieurs heures dans de l'eau dégazée avant d'effectuer le mesurage.

NOTE Le dégazage simultané d'une cible absorbante et de son eau évite d'éventuels problèmes de mouillage du matériau absorbant.

A.6.5 Conditions d'environnement

Il convient en outre que le réservoir de mesurage soit presque fermé, pour minimiser les courants de convection thermique dans le liquide de mesurage provoqués par des effets de refroidissement dus à l'évaporation à la surface du liquide.

Dans le cas d'une configuration comme celle montrée à la Figure F.4, il peut être difficile ou impossible de fermer le réservoir de mesurage et il est nécessaire de corriger la dérive résultante des valeurs de sortie de la balance due à l'évaporation à la surface du liquide.

Il convient de mesurer la température du liquide de mesure (eau). La valeur de la vitesse du son dans l'eau, nécessaire pour calculer la valeur de puissance, dépend de la température. (Voir aussi A.7.10)

NOTE L'influence des vibrations et courants d'air ambiants peut être aisément observée à la lecture de la balance.

The apex of a convex-type reflecting **target**, on the other hand, can be positioned virtually in contact with the face of the **ultrasonic transducer**, but this does not mean that the **target** covers the whole half-space into which the **ultrasonic transducer** radiates. Even if (in the case of a diverging field structure) almost all of the field reaches the convex-type cone, this may occur at angles of incidence which differ from those assumed in the plane-wave formula and may lead to a reduction of the actual **radiation force**. If there is any suspicion that the field of the **ultrasonic transducer** in question might not be collimated enough (this may occur primarily with low ka values, which means at low frequencies and/or with a small diameter of **ultrasonic transducer**), the distance between the **ultrasonic transducer** and the **target** should be varied and repeat measurements made. Any decrease in **radiation force** with increasing distance in excess of that caused by ultrasonic attenuation is an indication of an inappropriate **target** size or type.

In case an absorbing target is used for high power measurements the transducer-target separation should not be below 8 mm. The absorbed ultrasound will heat the absorber. At small distances the transducer properties could change through direct heat transfer from the absorber.

A.6.3 Water

Degassed water at **output powers** exceeding 1 W is specified to avoid cavitation. At lower **output power** levels, degassed water is preferable for precision measurements but distilled water without additional degassing may be acceptable in many cases, if care is taken that air bubbles are not present on the faces of the **ultrasonic transducer** or the **target**.

NOTE 1 The amount of dissolved oxygen in the water increases with time, see Annex D. The speed of this increase depends on the tank dimensions and water disturbances.

NOTE 2 The use of an additive to suppress cavitation is described in Clause D.4.

NOTE 3 If the water used is saturated with air, bubbles will form if the temperature of the water increases during the course of measurements. This is because the gas solubility decreases with temperature.

A.6.4 Water contact

A perfect wetting (water contact) of the **ultrasonic transducer** surface, **target**, and foil (if used) should be achieved by storing these parts for at least several hours in degassed water before the measurements are taken.

NOTE Degassing an absorbing target together with the water prevents possible wetting problems of the absorber material.

A.6.5 Environmental conditions

In addition, the measuring vessel should be almost closed to minimize thermal convection currents in the measuring liquid caused by cooling effects due to evaporation at the liquid surface.

In case of a measurement set-up as shown in Figure F.4, it may be difficult or impossible to close the measuring vessel, and the resulting drift of the balance readout due to evaporation at the liquid surface needs to be corrected for.

The temperature of the measuring liquid (water) should be measured. The value of the speed of sound in water, needed for calculating the power result, depends on the temperature. (See also A.7.10.)

NOTE The influence of environmental vibrations and air flow can easily be observed in the balance readout.

A.6.6 Dérives thermiques

Dans certaines circonstances, cela peut s'appliquer aussi aux cibles réfléchissantes, bien que dans une moindre mesure.

NOTE L'influence des variations de flottabilité de la cible est fortement réduite dans la configuration de balance de la Figure F.4, mais même dans ce cas, un enregistrement de la lecture de la balance en fonction de temps est recommandé.

A.7 Incertitude de mesurage

A.7.1 Généralités

Vacant.

A.7.2 Système de balance à suspension de cible

Cette exigence assure que l'influence possible du fil de suspension pénétrant la surface de l'eau est automatiquement prise en compte.

A.7.3 Linéarité et résolution du système de balance

Vacant.

A.7.4 Extrapolation au moment de la commutation du transducteur ultrasonore

Vacant.

A.7.5 Imperfections de la cible

À proprement parler, une connaissance du moment transporté par toutes les ondes indésirables émanant de la **cible** et dans toutes les directions serait nécessaire pour évaluer l'influence des imperfections de la **cible** sur la précision des mesurages à la balance de **force de rayonnement**. Comme cette connaissance n'est pas disponible, une approche simplifiée en onde plane telle que décrite ci-dessous est considérée en pratique comme suffisante. Avec l'hypothèse de l'onde plane, la **force acoustique de rayonnement** est égale à la densité d'énergie acoustique totale. L'onde transmise par une **cible** absorbante (voir par exemple la configuration de la Figure F.1a) vers l'avant conduit à une réduction de la **force de rayonnement**, la réduction étant déterminée par la densité d'énergie transmise, c'est-à-dire par la densité d'énergie existant derrière la **cible**. La grandeur de cet effet peut être déterminée en utilisant la **cible** comme un obstacle et en effectuant un mesurage de **force de rayonnement** au moyen d'une **cible** additionnelle, positionnée immédiatement derrière l'originale. Il convient de noter que la réflexion de l'onde transmise à la surface de l'eau dans le montage représenté à la Figure F.1a doublera la baisse de la **force de rayonnement** mesurée.

L'onde réfléchie ou diffusée en retour par une **cible** absorbante conduit à une augmentation de la **force de rayonnement** qui est déterminée par la densité d'énergie réfléchie. Pour une **cible** absorbante plane, cet effet peut être évalué en comparant le signal impulsion-écho avec celui d'un réflecteur parfait. Cependant, pour une **cible** avec une structure de surface, ce mesurage ne détermine que la composante spatiale cohérente et n'indique pas l'énergie réfléchie totale. Dans ce cas, l'énergie réfléchie devrait être évaluée par balayage avec un hydrophone et intégration du carré de la force mesurée sur le champ réfléchi (voir CEI 61101). L'autre alternative consisterait à utiliser d'autres informations concernant les propriétés de l'absorbeur pour fournir une limite de réflexion supérieure (par exemple le pouvoir réfléchissant d'une version plane équivalente). En plus de l'augmentation de la **force de rayonnement** mesurée, la réflexion par la **cible** peut agir à son tour sur le **transducteur ultrasonore** et modifier ses caractéristiques de sortie [8]. Cet effet d'interférence peut être minimisé en inclinant légèrement la **cible** ou en utilisant une meilleure **cible**. Si une interférence apparaît, cela

A.6.6 Thermal drifts

This may also apply under certain circumstances to reflecting targets, though to a lesser extent.

NOTE The influence of target buoyancy changes is much reduced in the balance arrangement shown in Figure F.4 but even here, a recording of the balance readout as a function of time is recommended.

A.7 Measurement uncertainty

A.7.1 General

Void.

A.7.2 Balance system including target suspension

This requirement ensures that effect of the suspension wire penetrating the water surface is automatically taken into account.

A.7.3 Linearity and resolution of the balance system

Void.

A.7.4 Extrapolation to the moment of switching the ultrasonic transducer

Void.

A.7.5 Target imperfections

Strictly speaking, a knowledge of the momentum carried by all undesirable waves emanating from the **target** in all directions would be required to assess the influence of the **target** imperfections on the accuracy of the **radiation force** balance measurements. Since this knowledge is unavailable, in practice, a simplified plane-wave approach described below is considered to be sufficient. With the plane-wave assumption, the **acoustic radiation pressure** is equal to the total acoustic energy density. The wave transmitted by an absorbing **target** (as, for example, in the arrangement of Figure F.1a) in the forward direction leads to a reduction in the **radiation force**, the reduction being determined by the transmitted energy density, i.e., by the energy density existing behind the **target**. The magnitude of this effect can be determined by using the **target** as an obstacle and carrying out a **radiation force** measurement by means of an additional **target**, positioned immediately behind the original one. It should be noted that the reflection of the transmitted wave at the water surface in the arrangement shown in Figure F.1a will double the decrease in the measured **radiation force**.

The wave reflected or scattered back by an absorbing **target** leads to a **radiation force** increase that is determined by the reflected energy density. For a plane absorbing **target**, this effect can be assessed by comparing the pulse-echo signal with that from a perfect reflector. For a **target** with surface structure, however, this measurement determines only the spatially coherent component, and does not indicate the total reflected energy. In this case, the reflected energy would have to be assessed by scanning with a hydrophone and integrating the square of the measured pressure over the reflected field (see IEC 61101). Alternatively, other information about the properties of the absorber could be used to give an upper limit to the reflection (e.g. the reflectivity of an equivalent, plane version). In addition to increasing the measured radiation force, the reflection from the **target** can also act back on the **ultrasonic transducer** to change its output characteristics [8]. This interference effect can be minimized by slightly tilting the **target** or by using a better **target**. If the interference occurs, it

donnera lieu à des oscillations dans la **force de rayonnement**, qui peuvent être observées en faisant varier la fréquence ou la distance **cible/transducteur ultrasonore** [8]. L'incertitude due à tout effet d'interférence résiduelle peut être évaluée à partir des amplitudes d'oscillation.

Dans le cas de **cibles** réfléchissantes, la discussion précédente concernant l'onde transmise et son influence est également valable. Les ondes réfléchies peuvent cependant provenir aussi bien de la **cible** que d'un quelconque absorbeur latéral (voir Figures F.1b, F.2, F.6) et doivent par conséquent être considérées plus attentivement.

De manière générale, l'évaluation la plus fiable de la précision est obtenue en comparant les mesures effectuées avec différents types de **cibles**. Les propriétés acoustiques des **cibles** varient significativement avec la fréquence et toute évaluation d'incertitude doit ainsi être réalisée séparément pour chaque fréquence concernée. Il est particulièrement difficile d'obtenir une bonne conception de **cible** pour des fréquences inférieures à 2 MHz.

Pour minimiser l'influence de réflexions cohérentes, il est recommandé d'effectuer 2 mesurages et de calculer leur moyenne pour des distances de cible séparées par $\frac{1}{2}\lambda$, où λ est la longueur d'onde de l'onde acoustique.

A.7.6 Géométrie de cible réfléchissante

Comme discuté à l'Article B.2, l'angle de cône d'une **cible** réfléchissante conique influence le résultat de mesurage. Plus spécifiquement, si le demi-angle du cône d'un réflecteur convexe d'une valeur nominale de 45° se trouve dans la plage $45^\circ \pm 1^\circ$, l'incertitude de puissance résultante est de $\pm 3,5\%$. Si le demi-angle du cône d'un réflecteur concave d'une valeur nominale de 63° (soit $\theta = 27^\circ$ selon la notation employée à l'Article B.2) se trouve dans la plage $63^\circ \pm 1^\circ$, l'incertitude de puissance résultante est de $\pm 1,8\%$.

NOTE L'Annexe E procure des informations additionnelles concernant l'influence de la taille de la cible pour des champs ultrasonores divergents.

A.7.7 Absorbeurs latéraux dans le cas de mesurages de la cible réfléchissante

Les imperfections des absorbeurs latéraux dans la configuration des Figures F.1b, F.2, F.5b et F.6 donnent lieu à des ondes réfléchies qui retournent vers la **cible** et conduisent à une augmentation de la valeur de la **force de rayonnement** mesurée. Ici encore, la densité d'énergie réfléchie est significative dans des conditions incohérentes et, une fois de plus, des effets d'interférence peuvent se produire (voir A.7.5).

A.7.8 Désalignement de la cible

Le présent paragraphe s'applique si le **transducteur ultrasonore** et le dispositif de mesurage de force sont colinéaires mais que l'alignement angulaire de la **cible** est incorrect.

Tandis que la **force de rayonnement** sur une **cible** parfaitement absorbante selon la formule donnée en Article B.2 n'est pas sensible à l'inclinaison de la **cible**, dans le cas d'une **cible** réfléchissante, le mesurage dépend de l'orientation correcte de la **cible**. Par exemple, une incertitude d'angle de $\pm 1^\circ$ pour un réflecteur plan incliné à 45° conduit à une incertitude de mesurage de puissance de $\pm 3,5\%$. L'influence d'un désalignement dans le cas d'une **cible** réfléchissante conique ne peut pas être donnée par une formule universelle, mais sera en général bien inférieure à celle d'une **cible** réfléchissante plane, en particulier lorsque la **cible** est centrée sur le faisceau. Pour un faisceau cylindrique symétrique centré par rapport à une **cible** réfléchissante conique à 45° , la sensibilité au désalignement angulaire est encore plus réduite.

Un avantage d'une cible réfléchissante conique concave est que, en fonction du type de suspension, elle se centre d'elle-même symétriquement dans le faisceau ultrasonore.

will give rise to oscillations in the **radiation force**, which can be observed by varying the frequency or the **target/ultrasonic transducer** distance [8]. The uncertainty due to any residual interference effects can be assessed from the oscillation amplitudes.

For the case of reflecting **targets**, the previous discussion of the transmitted wave and its influence is also valid. The reflected waves, however, may come both from the **target** and from any lateral absorbers (see Figures F.1b, F.2, F.6) and so shall be considered more carefully.

Overall, the most reliable assessment of accuracy will be obtained by comparing measurements made with different **target** types. The acoustical properties of **targets** vary significantly with frequency and so any uncertainty assessment shall be made separately for each frequency of interest. It is particularly difficult to obtain a good **target** design for frequencies below 2 MHz.

To minimize the influence of coherent reflections, it is recommended to carry out and average 2 measurements at target distances separated by $\frac{1}{4} \lambda$, where λ is the wavelength of the acoustic wave.

A.7.6 Reflecting target geometry

As discussed in Clause B.2 the cone angle of a conical reflecting **target** has an influence on the measurement result. More specifically, if the cone half-angle of a convex-type reflector of nominally 45° lies within $45^\circ \pm 1^\circ$, the resulting power uncertainty is $\pm 3,5\%$. If the cone half-angle of a concave-type reflector of nominally 63° (which means $\theta = 27^\circ$, following the notation given in Clause B.2) lies within $63^\circ \pm 1^\circ$, the resulting power uncertainty is $\pm 1,8\%$.

NOTE Annex E gives additional information on the influence of the target size in case of diverging ultrasonic fields.

A.7.7 Lateral absorbers in the case of reflecting target measurements

Imperfections of the lateral absorbers in the arrangement of Figures F.1b, F.2, F.5b and F.6 give rise to reflected waves which return to the **target** and lead to an increase in the value of the measured **radiation force**. Here again, the reflected energy density is relevant under incoherent conditions and, again, interference effects may occur (see A.7.5).

A.7.8 Target misalignment

This subclause applies if the **ultrasonic transducer** and the force-measuring device are collinear to each other but the angular alignment of the **target** is incorrect.

While the **radiation force** on a perfectly absorbing **target** according to the formula given in Clause B.2 is insensitive to a **target** tilt, in the case of the reflecting **target**, the measurement depends on the correct **target** orientation. For example, an angle uncertainty of $\pm 1^\circ$ for a plane reflector at 45° leads to a power measurement uncertainty of $\pm 3,5\%$. The influence of a misalignment in the case of a conical reflecting **target** cannot be given by a universal formula, but it will, in general, be much lower than that of a plane reflecting **target**, particularly when the **target** is centred over the beam. For a cylindrically symmetrical beam centred with respect to a 45° conical reflecting **target**, the sensitivity to angular misalignment is reduced still further.

An advantage of a concave-conical reflecting target is that, depending on the type of suspension it will centre itself symmetrically within the ultrasonic beam.

A.7.9 Désalignement du transducteur ultrasonore

Le présent paragraphe s'applique si la **cible** et le dispositif de mesurage de force sont colinéaires mais que le **transducteur ultrasonore** a une orientation ou une position incorrecte.

Dans le cas d'une **cible** parfaitement absorbante de taille suffisante, la **force de rayonnement** apparente est proportionnelle au cosinus de l'angle de désalignement.

Dans le cas d'une **cible** réfléchissante conique convexe à 45°, une incertitude maximale due au désalignement de $\pm 3\%$ peut être attendue si les erreurs maximales de positionnement et d'alignement angulaire de $\pm 3\text{ mm}$ et de $\pm 3^\circ$ sont admises [21], ces valeurs s'avérant être réalistes pour un alignement visuel.

Si les mesurages sont répétés et que le **transducteur ultrasonore** est déposé de l'appareil entre les mesurages, une vérification des effets aléatoires provoqués par le désalignement du **transducteur ultrasonore** est incluse dans l'évaluation. En outre, il peut y avoir un désalignement systématique du transducteur.

A.7.10 Température de l'eau

Du fait de la relation entre la température et la vitesse du son dans l'eau [22], une incertitude de mesurage de la température de $\pm 1^\circ\text{C}$ entraîne une incertitude de mesurage de puissance de $\pm 0,2\%$.

Lorsque des mesurages de puissance de plus d'1 W doivent être effectués, une augmentation de température significative peut être attendue. Il convient de veiller à prendre en compte l'augmentation de température effective.

A.7.11 Atténuation ultrasonore et courant acoustique

La valeur de puissance telle qu'elle est dérivée du mesurage d'équilibrage de la **force de rayonnement** fait référence à la position de la **cible** à une distance axiale donnée par rapport au **transducteur ultrasonore**. Cependant, la grandeur concernée est souvent la puissance émise par rapport à la surface du **transducteur ultrasonore**. L'incertitude additionnelle déduite dans ce cas est examinée comme suit.

Cette discussion tient compte principalement des configurations de mesurage des **forces de rayonnement** telles que représentées dans les Figures F.1, F.2, F.3, F.5, F.6 et F.7. Pour la configuration de mesurage de la Figure F.4, ces effets semblent être moins importants, mais lorsque des effets ont été observés, leur origine est inconnue. Pour cette configuration de mesurage, il convient d'utiliser l'approche alternative telle que décrite plus loin pour effectuer les corrections.

Deux modèles de base expliquent la différence entre les valeurs de puissance décrites ci-dessus. Le premier considère l'influence de l'atténuation ultrasonore seule. Dans ce cas, la correction est faite en incluant le facteur de correction exponentiel (voir B.3.2). Le second inclut les effets du **courant acoustique** le long du chemin de propagation libre devant la **cible**. Pour une **cible** absorbante dans certaines conditions idéales, le théorème de Borgnis [23] stipule que les effets de l'atténuation et du **courant acoustique** s'annulent mutuellement et que, par conséquent, aucune correction n'est nécessaire. Il s'est avéré que le comportement de **cibles** réelles (aussi bien absorbantes que réfléchissantes) est intermédiaire entre ces deux modèles de base [16]. Il est par conséquent recommandé de considérer une plage d'incertitude s'étendant entre la valeur de puissance non corrigée telle que mesurée par la balance et la valeur comportant la correction d'atténuation complète [24]. Cette contribution d'incertitude dépend de la distance de la **cible** et est particulièrement critique lorsque les mesurages sont effectués dans la plage de fréquence mégahertz supérieure.

A.7.9 Ultrasonic transducer misalignment

This subclause applies if the **target** and the force-measuring device are collinear to each other but the **ultrasonic transducer** has an incorrect orientation or position.

In case of a perfectly absorbing **target** of sufficient size, the apparent **radiation force** is proportional to the cosine of the misalignment angle. In case of a 45° convex conical reflecting **target**, a maximum uncertainty due to misalignment of $\pm 3\%$ can be expected if maximum positioning and angular alignment errors of $\pm 3\text{ mm}$ and $\pm 3^\circ$ are assumed [21], which appears to be realistic for an alignment by eye.

If the measurements are repeated and the **ultrasonic transducer** is removed from the apparatus between the measurements, a check of the random effects caused by **ultrasonic transducer** misalignment is included in the assessment. In addition, there may be a systematic transducer misalignment.

A.7.10 Water temperature

As a result of the temperature dependence of the velocity of sound in water [22], an uncertainty in the temperature measurement of $\pm 1^\circ\text{C}$ will result in a power measurement uncertainty of $\pm 0,2\%$.

When power measurements have to be performed above 1 W a significant temperature rise can be expected. Care should be taken to take the actual temperature rise into account.

A.7.11 Ultrasonic attenuation and acoustic streaming

The power value as derived from the **radiation force** balance measurement refers to the **target** position at a given axial distance from the **ultrasonic transducer**. The quantity of interest, however, is often the radiated power with reference to the **ultrasonic transducer** surface. The additional uncertainty inferred in this case is discussed as follows.

This discussion counts mainly for radiation force measurement set-ups as given in Figures F.1, F.2, F.3, F.5, F.6 and F.7. For the measurement set-up as shown in Figure F.4 these effects seem to be less important but where effects have been observed their origin is unknown. For this measurement set-up the alternative approach as described further below should be used to perform the corrections.

There are two basic models accounting for the difference between the above-noted power values. The first one considers the influence of ultrasonic attenuation alone. In this case, the correction is made by including the exponential correction factor (see B.3.2). The second one includes the effects of the **acoustic streaming** along the free propagation path in front of the **target**. For an absorbing **target** under certain ideal conditions, the Borgnis theorem [23] states that the effects of attenuation and **acoustic streaming** cancel each other, and consequently no correction is necessary. The behaviour of real **targets** (both absorbing and reflecting ones) has been found to lie somewhere in between these two basic models [16]. It is therefore recommended to consider an uncertainty span which ranges from the uncorrected power value as measured by the balance to the value with the full attenuation correction [24]. This uncertainty contribution depends on the **target** distance and is particularly critical when the measurements are taken in the higher megahertz frequency range.

Une autre procédure consiste à mesurer la puissance apparente en fonction de la distance de la **cible** et à extrapoler le résultat vers la distance nulle au moyen d'un algorithme de régression basé sur une loi de distance linéaire ou exponentielle. Les valeurs mesurées ne s'adapteront pas exactement à la loi de distance utilisée, c'est-à-dire qu'il y aura une certaine diffusion expérimentale, et des procédures mathématiques normalisées peuvent donc être utilisées pour estimer l'incertitude du résultat d'extrapolation.

Dans le cas d'une surface de **cible** non plane, il est difficile de définir la distance effective de la **cible**. Il est utile ici de rappeler que la hauteur moyenne d'un cône ou d'une pyramide est le tiers de la hauteur maximale lorsqu'elle est mesurée à partir de la base ou de deux tiers lorsqu'elle est mesurée à partir du sommet. Cette règle peut être appliquée lorsque des **cibles** réfléchissantes coniques ou des **cibles** absorbantes à arêtes pyramidales sont employées. Dans le cas d'un faisceau cylindrique pratiquement uniforme incident sur une **cible** conique convexe, la distance effective additionnelle à la **cible** (considérée depuis le sommet) est:

$$2a / (3 \tan \beta)$$

où

a est le rayon du faisceau ;

β est le demi-angle du cône.

A.7.12 Propriétés du feuillet

Vacant.

A.7.13 Taille de cible finie

En A.5.3, une formule est donnée pour la taille de **cible** minimale basée sur un critère de 2 %. Si la largeur réelle de la **cible** est supérieure de plus de 50 % à la valeur déterminée en A.5.3, il est raisonnable de prévoir une contribution d'incertitude de seulement 1 % ou même inférieure [14]. Cependant, il est recommandé de vérifier la dépendance de la **force de rayonnement** sur la distance de **cible** conformément à A.6.2, en prenant dûment en compte l'atténuation et le **courant acoustique** (voir 7.11).

Les formules mentionnées s'appliquent à proprement parler à une cible absorbante. Au paragraphe A.5.3 et en Annexe E, des limitations sont stipulées pour l'utilisation de cibles réfléchissantes coniques convexes.

A.7.14 Hypothèse de l'onde plane

Si le champ présente une structure divergente ou convergente, les formules d'onde plane de l'Article B.2 ne sont plus strictement valables. Des estimations théoriques de la grandeur des erreurs dues à la déviation par rapport à ces formules pour des champs focalisés sur une cible absorbante sont fournies en B.4.2 et B.5 (voir [25]). Des estimations théoriques de la grandeur des erreurs dues à la déviation par rapport à ces formules pour des champs divergents sur une cible absorbante sont fournies en E.1 (voir [26, 27]). Une discussion pour des champs divergents sur des réflecteurs coniques convexes est donnée en E.2.

A.7.15 Influences de l'environnement

L'estimation de l'incertitude due aux vibrations et courants d'air ambiants ou aux variations de température peut être vérifiée en répétant au moins trois fois les mesurages, préférablement à des jours différents.

An alternative way is to measure the apparent power as a function of the **target** distance and to extrapolate the result back to zero distance by means of a regression algorithm based on a linear or exponential distance law. The measured values will not exactly fit the assumed distance law, i.e., there will be some experimental scatter, and so standard mathematical procedures can be used to estimate the uncertainty of the extrapolation result.

In the case of a non-planar **target** surface, it is difficult to define the effective **target** distance. Here, it is helpful to recall that the average height of a cone or pyramid is $1/3$ of the peak height when measured from the base or $2/3$ when measured from the apex. This rule can be applied when conically shaped reflecting **targets** or absorbing **targets** with pyramid-like shaped wedges are used. For a notionally uniform cylindrical beam incident on a convex conical **target**, the extra effective distance to the **target** (reckoned from the apex) is

$$2a / (3 \tan \beta)$$

where

a is the radius of the beam;

β is the half-angle of the cone.

A.7.12 Foil properties

Void.

A.7.13 Finite target size

In A.5.3, a formula is given for the minimum **target** size based on a 2 % criterion. If the actual **target** width is more than 50 % larger than the value determined by A.5.3, it is reasonable to assume an uncertainty contribution of only 1 % or even lower [14]. However, it is recommended to check the dependence of the **radiation force** on the **target** distance, in accordance with A.6.2, making due allowance for attenuation and **acoustic streaming** (see 7.11).

Strictly speaking, the formulae referred to apply to an absorbing target. In A.5.3 and Annex E limitations are given for the use of convex-conical reflecting targets.

A.7.14 Plane-wave assumption

If the field has a divergent or convergent field structure, the plane-wave formulae of Clause B.2 are no longer strictly valid. Theoretical estimations of the magnitude of the errors due to the deviation from these formulae for focused fields on an absorbing target are given in B.4.2 and Clause B.5 (see [25]). Theoretical estimations of the magnitude of the errors due to the deviation from these formulae for divergent fields on an absorbing target are given in Clause E.1 (see [26, 27]). A discussion for divergent fields on convex-conical reflectors is given in Clause E.2.

A.7.15 Environmental influences

The estimation of uncertainty due to environmental vibrations, air flow or temperature variations can be checked by repeating the measurements at least three times, preferably on different days.

A.7.16 Mesurage de la tension d'excitation

En général, l'incertitude de mesurage de la tension d'excitation appliquée au **transducteur ultrasonore** n'est pas significative pour le mesurage de la **puissance de sortie**. Cependant, si des mesurages de **puissance de sortie** du même **transducteur ultrasonore** sont effectués par des laboratoires indépendants (par exemple pour raisons de comparaison), les différences possibles de grandeur de la tension d'excitation doivent être prises en compte. Comme la **puissance de sortie** est proportionnelle au carré de la tension appliquée, la conductance de rayonnement G est habituellement formée dans ce cas et il est nécessaire de doubler l'incertitude de tension déterminée lorsqu'elle est incluse dans la valeur d'incertitude globale de G .

NOTE 1 Si la tension d'excitation est prise en compte, sa valeur significative est celle mesurée directement à l'entrée du transducteur ultrasonore.

NOTE 2 Il est recommandé de mesurer et d'enregistrer la tension d'excitation durant chaque mesurage de puissance de sortie pour lequel la valeur de la tension d'excitation est utilisée afin d'établir un niveau de puissance désiré ou de calculer la conductance de rayonnement. De telles informations peuvent être utilisées pour déceler des instabilités de plusieurs types.

A.7.17 Température du transducteur ultrasonore

La variation de la **puissance de sortie** en fonction de la température du **transducteur ultrasonore** peut être importante si l'on compare des mesurages effectués à différents moments ou en différents endroits. Cette variation peut parfois être très importante (par exemple 5 % par °C), en particulier avec des **transducteurs ultrasonores** multicouches à impédance adaptée. La variation de température peut être causée par des changements d'environnement ou par la dissipation de chaleur à l'intérieur du **transducteur ultrasonore**.

Une augmentation de la température du transducteur peut aussi produire des courants thermiques de convection qui peuvent affecter la lecture de la balance.

Ces effets peuvent être évalués en observant la **force de rayonnement** en fonction du temps après mise sous tension du **transducteur ultrasonore**.

A.7.18 Non-linéarité

- a) La linéarité du système de balance incluant la suspension de **cible** peut être vérifiée par étalonnage au moyen de poids, en fonction de leur valeur de masse ou par des mesurages avec un **transducteur ultrasonore** de caractéristiques connues (7.2) et avec la **cible** à moins de 10 mm du **transducteur ultrasonore**.
- b) Selon 6.3 et 6.4, le dégazage de l'eau et l'absence de toute bulle sont nécessaires. Si des bulles d'air ou des effets de cavitation sont présents dans le champ ultrasonore, la mesure de puissance peut être complètement faussée. Aucune estimation générale ne peut être fournie pour ces sources d'erreur.

Plus d'information concernant le dégazage de l'eau et la cavitation est fournie en Annexe D.

- c) L'atténuation ultrasonore et le **courant acoustique** peuvent entraîner des non-linéarités. Si la distance **cible/transducteur ultrasonore** ou la distance de **cible** la plus courte dans un essai de variation de distance est inférieure à 10 mm, il est suffisant de suivre les consignes du paragraphe A.7.11. Si la distance **cible/transducteur ultrasonore** ou la distance de **cible** la plus courte dans un essai de variation de distance est supérieure ou égale à 10 mm, des incertitudes additionnelles dues à la non-linéarité sont susceptibles d'apparaître, mais aucune estimation générale ne peut être donnée ici.

A.7.16 Excitation voltage measurement

In general, the uncertainty in the measurement of the excitation voltage applied to the **ultrasonic transducer** is irrelevant for the **output power** measurement. However, if **output power** measurements of the same **ultrasonic transducer** are taken at independent laboratories (e.g. for intercomparison purposes), the possible differences in the excitation voltage amplitude shall be taken into account. As the **output power** is proportional to the square of the applied voltage, the radiation conductance G is usually formed in this case and the voltage uncertainty determined needs to be doubled when it is included in the overall uncertainty value of G .

NOTE 1 If the excitation voltage is taken into consideration, it is its value as measured directly at the entrance of the ultrasonic transducer that is of relevance.

NOTE 2 It is recommended that the excitation voltage be measured and recorded for the duration of every output power measurement for which the value of applied excitation voltage is used to establish a desired power level or to calculate the radiation conductance. Such data can be used to detect instabilities of various kinds.

A.7.17 Ultrasonic transducer temperature

The variation of the **output power** with the **ultrasonic transducer** temperature can be important when comparing measurements made at different times or in different places. Sometimes, this variation can be very significant (e.g. 5 % per °C), particularly with multilayered, impedance-matched **ultrasonic transducers**. The temperature variation may be caused by environmental changes or by heat dissipation within the **ultrasonic transducer**.

An increase in the transducer temperature may also produce thermal convection currents which may affect the balance reading.

These effects can be assessed by observing the **radiation force** as a function of time after energizing the **ultrasonic transducer**.

A.7.18 Non-linearity

- a) The linearity of the balance system including the **target** suspension can be checked by calibration by means of weights as a function of their mass value or by measurements with an **ultrasonic transducer** with known properties (7.2) and with the **target** closer than 10 mm to the **ultrasonic transducer**.
- b) According to 6.3 and 6.4, water degassing and the absence of any bubbles are necessary. If there are air bubbles or cavitation activities in the ultrasonic field, the power measurement may be grossly incorrect. No general estimates can be given for these sources of error.

More information on water degassing and cavitation can be found in Annex D.

- c) Ultrasonic attenuation and **acoustic streaming** may involve non-linearities. If the **target/ultrasonic transducer** distance or the smallest **target** distance in a distance variation experiment is less than 10 mm, it is sufficient to follow A.7.11. If the **target/ultrasonic transducer** distance or the smallest **target** distance in a distance variation experiment is 10 mm or higher, additional uncertainties due to non-linearity are likely to occur, but no general estimate can be given here.

Il n'est pas exclu que cet effet puisse être vérifié avec un **transducteur ultrasonore** de référence à **puissance de sortie** connue. Il convient de noter cependant que des non-linéarités d'atténuation ultrasonore et de **courant acoustique** peuvent dépendre d'une forme d'onde temporelle et de la valeur de crête de la pression ; les résultats d'essai obtenus avec un **transducteur ultrasonore** de référence à forme d'onde différente de celle du **transducteur ultrasonore** à mesurer ne sont donc pas entièrement concluants.

- d) Outre les effets traités aux points a), b) et c) ci-dessus, les relations théoriques des **forces de rayonnement** elles-mêmes peuvent être non-linéaires et différer des formules de deuxième ordre données en B.2 et B.5, où les relations entre force et puissance sont linéaires. Cependant, dans la plage de **puissance de sortie** produite par les équipements de diagnostic et de thérapie à ultrasons actuels, et tant qu'aucune information contraire n'aura été obtenue, il convient de considérer la **force de rayonnement** acoustique comme un phénomène essentiellement linéaire par rapport à la **puissance de sortie**. Il convient de considérer comme négligeables les déviations non-linéaires des formules données en B.2 et B.5 comparées aux autres contributions d'incertitudes [28].

A.7.19 Autres sources

Il est recommandé de vérifier périodiquement si l'incertitude globale telle qu'elle est déterminée en utilisant les directives ci-dessus n'est pas influencée par toute autre source d'erreur aléatoire. Cela peut être effectué facilement en démontant le circuit de mesurage, en le remontant et en répétant le mesurage au moins trois fois.

Lorsqu'il y a conformité avec les exigences des Articles 5 et 6 et pour des transducteurs où $ka \geq 30$, une précision de mesurage globale de 10 % semble réalisable [26,29,30,31,32] dans la plage de fréquence de 1 MHz à 10 MHz, de 20 % en dehors de cette plage de fréquence et jusqu'à 20 MHz et de 30 % au-delà de 20 MHz. Pour des transducteurs où $10 < ka < 30$, la précision de mesurage globale réalisable pour des fréquences d'environ 1 MHz semble être de 20 %.

Des analyses d'erreur pour des systèmes spécifiques sont données dans [24,26,30,33]. En outre, lorsque des transducteurs ultrasonores étalonnés de référence sont disponibles, des mesurages d'essai à l'aide de ceux-ci sont fortement recommandés [30,31,34].

It may appear that this effect can be checked with a reference **ultrasonic transducer** of known **output power**. It should be noted, however, that non-linearities in ultrasonic attenuation and **acoustic streaming** may depend on the temporal waveform and on the peak pressure value, and that test results obtained with a reference **ultrasonic transducer** with a waveform different from that of the **ultrasonic transducer** to be measured are not therefore fully conclusive.

- d) Apart from the effects dealt with in items a), b) and c) above, the theoretical **radiation force** relations themselves might be non-linear and differ from the second-order formulae given in B.2 and B.5, where linear relationships between power and force are stated. However, in the **output power** range produced by current diagnostic and therapeutic ultrasonic equipment, and as long as no information to the contrary has been obtained, the **acoustic radiation force** should be regarded as a chiefly linear phenomenon with respect to the **output power**. Non-linear deviations from the formulae given in B.2 and B.5 should be considered as negligible in comparison with the other uncertainty contributions [28].

A.7.19 Other sources

It is recommended to check periodically whether the overall uncertainty as determined using the above guidelines is not influenced by any other sources of random scatter. This can be readily done by disassembling the measurement arrangement, reassembling it again and repeating the measurement at least three times.

When the requirements of Clauses 5 and 6 are complied with and for transducers with $ka \geq 30$, an overall measurement accuracy of 10 % seems to be achievable [26,29,30,31,32] in the frequency range from 1 MHz to 10 MHz, one of 20 % outside this frequency range and up to 20 MHz, and one of 30 % above 20 MHz. For transducers where $10 < ka < 30$ the achievable overall measurement accuracy for frequencies around 1 MHz seems to be 20 %.

Error analyses for specific systems have been given in [24,26,30,33]. Also, where calibrated reference ultrasonic transducers are available, test measurements with these are highly recommended [30,31,34].

Annexe B (normative)

Formules fondamentales

B.1 Les mesurages de **force de rayonnement** recommandés dans la présente norme sont effectués dans des conditions de «réservoir ouvert» (condition de Langevin), c'est-à-dire que le fluide rayonné est en contact avec le milieu environnant et donc soumis à la pression ambiante.

B.2 Dans de telles conditions et pour des ondes acoustiques planes de faible amplitude, la **force de rayonnement** apparaissant à la surface limite entre deux milieux est égale à la différence entre les densités d'énergie acoustique totales existant de chaque côté de la surface. Cela conduit aux formules suivantes, reliant la composante F de la **force de rayonnement** sur la **cible** selon la direction de propagation de l'onde incidente à la **puissance de sortie** acoustique P du **transducteur ultrasonore**.

Pour une **cible** parfaitement absorbante:

$$P = cF \quad (\text{B.1})$$

Pour une **cible** parfaitement réfléchissante:

$$P = cF / (2 \cos^2 \theta) \quad (\text{B.2})$$

où

c est la vitesse du son dans le fluide de propagation du son (eau) ; et

θ est l'angle entre la direction de propagation de l'onde incidente et la normale à la surface réfléchissante.

NOTE La direction de l'onde incidente mentionnée ci-dessus est entendue comme étant la direction de l'axe de champ, c'est-à-dire dans un sens global plutôt que local.

B.3 Les formules ci-dessus sont basées sur deux hypothèses:

B.3.1 La **cible** est assez grande pour couvrir toute la section du faisceau acoustique, c'est-à-dire que la quantité de puissance acoustique émise dans des directions évitant la **cible** est négligeable par rapport à la puissance acoustique totale.

B.3.2 Il n'y a pas d'absorption ultrasonore dans le milieu de propagation du son. S'il y a absorption, le symbole P dans les formules ci-dessus représente la puissance acoustique à l'emplacement de la **cible**. Pour la convertir en **puissance de sortie** du **transducteur ultrasonore**, elle doit être multipliée par $\exp(2\alpha z)$, où z est la distance entre la **cible** et le **transducteur ultrasonore** et α est le coefficient d'atténuation d'amplitude pour des ondes planes. La valeur de α dans la plage de fréquence mégahertz est proportionnelle à f^2 et est fournie par exemple par:

$$\alpha / f^2 = 2,3 \times 10^{-4} \text{ MHz}^{-2} \text{ cm}^{-1}, \text{ pour de l'eau pure à } 23^\circ \text{C} \quad (\text{B.3})$$

où f est la fréquence ultrasonore (voir [35], interpolée).

Les conditions de validité de cette règle sont l'absence d'amortissement additionnel dû à des distorsions d'amplitude finies et l'absence d'une force additionnelle sur la **cible** du fait des **courants acoustiques** (en supposant l'utilisation d'un feuillet écran).

Annex B (normative)

Basic formulae

B.1 The **radiation force** measurements recommended in this standard are performed under open vessel conditions (Langevin condition), i.e. the irradiated fluid is in contact with the surrounding medium, which is subject to ambient pressure.

B.2 Under such conditions and for small amplitude plane ultrasonic waves, the **radiation pressure** appearing at the boundary surface between two media is equal to the difference between the total acoustic energy densities existing on both sides of the surface. This leads to the following formulae relating the **radiation force** component F on the **target** in the propagation direction of the incident wave to the acoustic **output power** P of the **ultrasonic transducer**:

For a perfectly absorbing **target**:

$$P = cF \quad (\text{B.1})$$

For a perfectly reflecting **target**:

$$P = cF / (2 \cos^2 \theta) \quad (\text{B.2})$$

where

c is the speed of sound in the sound-propagating fluid (water);

θ is the angle between the propagation direction of the incident wave and the normal to the reflecting surface.

NOTE The direction of the incident wave mentioned above is understood to be the direction of the field axis, i.e., it is understood in a global sense rather than in a local sense.

B.3 The above formulae involve two assumptions:

B.3.1 The **target** is large enough to cover the whole cross-section of the ultrasonic beam, i.e. the amount of acoustic power emitted in such directions as to miss the **target** is negligible in comparison with the total acoustic power.

B.3.2 There is no ultrasonic absorption in the sound-propagating medium. If there is absorption, the symbol P in the above formulae represents the acoustic power in the position of the **target**. In order to convert it to the **output power** of the **ultrasonic transducer**, it has to be multiplied by $\exp(2\alpha z)$ where z is the distance between the **target** and the **ultrasonic transducer** and α is the amplitude attenuation coefficient of plane waves. The value of α in the megahertz frequency range is proportional to f^2 and is given, for example, by:

$$\alpha / f^2 = 2,3 \times 10^{-4} \text{ MHz}^{-2} \text{ cm}^{-1}, \text{ for pure water at } 23^\circ \text{C} \quad (\text{B.3})$$

where f is the ultrasonic frequency (see [35], interpolated).

Prerequisites for the validity of this rule are the absence of additional damping due to finite amplitude distortions and the absence of an additional force on the **target** due to **acoustic streaming** (assuming a shielding foil is used).

B.4 Les formules ci-dessus sont basées sur l'hypothèse d'une onde plane. La structure de champ d'un **transducteur ultrasonore** diffère en général de celle d'une onde plane, principalement à cause de la diffraction. Il est néanmoins recommandé d'utiliser ces formules pour deux raisons:

B.4.1 Expérimentalement, elles n'ont jamais été invalidées pour des **transducteurs ultrasonores** plans de type piston, avec des précisions de mesurage typiques d'au moins plusieurs pour cent.

B.4.2 Du point de vue théorique [36] (voir aussi l'équation (E.2) ci-dessous), le résultat basé sur l'onde plane s'avère approximativement valable pour une source piston plane circulaire (sans apodisation), à la condition que son ka soit suffisamment élevé ($k = 2\pi/\lambda$ étant le nombre d'onde circulaire dans le milieu de propagation acoustique et a le rayon du **transducteur ultrasonore**; les études théoriques ont été limitées au cas d'une cible absorbante). La concordance est par exemple de 2 % si $ka \geq 35$, condition qui est généralement remplie par les **transducteurs ultrasonores**. Une inadéquation des formules ci-dessus peut être considérée possible principalement dans la plage des faibles valeurs de ka (voir l'Annexe E ci-dessous pour une correction de cet effet).

B.5 Il a été mis en évidence théoriquement [25] que les formules s'appuyant sur l'hypothèse de l'onde plane ne sont pas tout à fait correctes dans le cas de **transducteurs ultrasonores** focalisés. L'expression de la **force de rayonnement** pour une **cible** absorbante s'écrit alors:

$$P = 2 c F / (1 + \cos \gamma) \quad (\text{B.4})$$

où

$\gamma = \arcsin(a/d)$ est le (demi-)angle de focalisation;

d est la longueur focale géométrique (rayon de courbure du **transducteur ultrasonore**);

a est le rayon de l'élément actif du **transducteur ultrasonore**.

L'expression ci-dessus tend vers la formule correspondante pour une onde plane lorsque $\gamma \rightarrow 0$ ou $d \rightarrow \infty$. Aussi longtemps qu'aucune confirmation indépendante (théorique ou expérimentale) des expressions ci-dessus n'est disponible, il convient de considérer la différence mentionnée pour le moins comme possible et de la prendre en compte par une contribution à l'évaluation de l'incertitude dans le cas d'un champ focalisé.

B.6 Une formule approximative de la **force de rayonnement** pour un réflecteur conique dans un champ ultrasonore focalisé est fournie comme suit. Sa dérivation est basée sur les hypothèses qui suivent.

- Le champ ultrasonore d'un transducteur circulaire à courbure sphérique dans un fluide sans pertes est considéré consister en des rayons acoustiques propagés en ligne droite et totalement réfléchis à la surface de la cible, comme pour une onde plane. γ est à nouveau le (demi-)angle de focalisation.
- La cible conique est un réflecteur parfaitement dur ou parfaitement mou. Son sommet est placé sur l'axe du champ, entre le transducteur et le foyer. La géométrie de la cible est caractérisée par un angle θ tel que défini à l'Article 4. Des valeurs typiques pour des réflecteurs concaves sont comprises entre 25° et 30°. La valeur est considérée comme négative pour des réflecteurs convexes et est dans ce cas typiquement $\theta = -45^\circ$.
- La cible recouvre l'intégralité du champ, c'est-à-dire qu'aucun rayon ne manque la cible.
- Les rayons réfléchis se propagent librement jusqu'à l'infini ou sont parfaitement absorbés quelque part. Aucun rayon ne retourne vers le transducteur. Dans le cas d'un cible concave: pas de réflexions multiples.

B.4 The above formulae are based on the plane-wave assumption. The field structure of **ultrasonic transducers** differs in general from that of a plane wave, mainly due to diffraction. However, the use of these formulae is recommended for two reasons:

B.4.1 On the experimental side, they have never been found to be invalid for plane-piston **ultrasonic transducers**, within the measurement accuracy of, typically, at least several per cent.

B.4.2 On the theoretical side [36], see also Equation (E.2) below, the plane-wave result has been found to be approximately valid in the case of a (unapodized) circular plane-piston source, provided its ka value is high enough ($k = 2\pi/\lambda$ being the circular wavenumber in the sound-propagating fluid and a being the radius of the **ultrasonic transducer**; the theoretical investigation has been restricted to the case of an absorbing **target**). For example, agreement amounts to 2 % if $ka \geq 35$, a condition which is usually fulfilled by **ultrasonic transducers**. A failure of the above formulae might be considered possible mainly in the range of low ka values (for a correction of this effect, see Annex E below).

B.5 Theoretical evidence has been found [25] that the plane-wave formulae are not completely correct for focused **ultrasonic transducers**. Instead, the **radiation force** expression for an absorbing **target** would read:

$$P = 2 c F / (1 + \cos \gamma) \quad (\text{B.4})$$

where

$\gamma = \arcsin(a/d)$ is the focus (half-)angle;

d is the geometrical focal length (radius of curvature of the **ultrasonic transducer**);

a is the radius of the active element of the **ultrasonic transducer**.

The above expression tends to the corresponding plane-wave formula for $\gamma \rightarrow 0$ or $d \rightarrow \infty$. As long as no independent confirmation (theoretical or experimental) for the above evidence has been obtained, the difference mentioned should at least be regarded as possible and be accounted for by means of a contribution to the uncertainty estimate in the case of a focused field.

B.6 An approximate radiation force formula for a conical reflector in a focused ultrasonic field is as follows. Its derivation is based on the following assumptions.

- The ultrasonic field from a circular, spherically curved transducer in a lossless fluid is considered to consist of acoustic rays each of which is propagated along a straight line and is totally reflected at the target surface like a plane wave. γ is again the focus (half-)angle.
- The conical target is a perfectly hard or perfectly soft reflector. Its apex is placed on the field axis between transducer and focus. The target geometry is characterized by the angle θ as defined in Clause 4. Typical values for concave reflectors are between 25° and 30° . The value is to be understood as negative for convex reflectors; typically then $\theta = -45^\circ$.
- The target covers the entire field, i.e., there are no rays that miss the target.
- The reflected rays freely propagate until infinity or are perfectly absorbed somewhere. There are no rays that return to the transducer. In the case of a concave target: There are no multiple reflections.

La formule devient alors:

$$P = 4 cF \cdot \text{fonction}(\gamma, \theta)$$

avec

$$\text{fonction}(\gamma, \theta) = (1 - \cos \gamma) / [(1 - \cos 2\gamma)(1 + \cos 2\theta) - (2\gamma - \sin 2\gamma)\sin 2\theta] \quad (\text{B.5})$$

NOTE 1 L'angle γ n'apparaît pas seulement dans des fonctions trigonométriques de la formule ci-dessus et il est donc nécessaire de l'exprimer en radians.

NOTE 2 Si $\theta = -45^\circ$, alors P/cF conformément à (B.5) a la valeur 0,98 (c'est-à-dire que la différence entre (B.2) et (B.5) s'élève à 2 %) pour une valeur de γ correspondant à $d = 32a$. C'est là la base de la recommandation correspondante du paragraphe 5.2.3.

Il convient de noter que l'expression ci-dessus passe par une fonction échelon de Heaviside lorsque le sommet du cône est déplacé à travers le foyer.

La formule est basée sur un modèle qui n'est pas parfait et qui est par conséquent une approximation. Les effets de diffraction sont négligés ici, ainsi que les parties imaginaires de vitesse de particule qui se produisent lorsque des rayons acoustiques ne sont pas parallèles entre eux. Une déviation locale par rapport à la propagation en ligne droite (due par exemple à la diffraction) peut provoquer une augmentation ou une diminution de la **force de rayonnement**, alors que dans le cas d'un absorbeur, la diffraction tend généralement à diminuer la **force de rayonnement**.

NOTE 3 Il existe cependant des confirmations expérimentales et de calcul [37] qui supportent les tendances générales indiquées par le modèle et la formule acoustiques des rayons simples (B5). Dans cette expérience en particulier, avec un réflecteur conique convexe dont $\theta = -45^\circ$, l'Equation (B.5) est approximativement valide lorsque la distance entre le transducteur et le sommet du cône dépasse 20 mm et est inférieure à la longueur focale moins 10 mm. Pour des distances inférieures à 20 mm et manifestement à cause des réflexions entre le transducteur et le cône, la force mesurée augmente, jusqu'à un facteur d'environ 2 pour de très faibles distances ; à des distances supérieures à la longueur focale moins 10 mm, la force mesurée décroît progressivement à partir de la valeur pré-focale considérée dans l'Equation (B.5) jusqu'à une valeur post-focale plus faible.

The formula then reads

$$P = 4 cF \cdot \text{function}(\gamma, \theta)$$

with

$$\text{function}(\gamma, \theta) = (1 - \cos \gamma) / [(1 - \cos 2\gamma) (1 + \cos 2\theta) - (2\gamma - \sin 2\gamma) \sin 2\theta] \quad (\text{B.5})$$

NOTE 1 The angle γ appears in the above formula not only under trigonometric functions and is therefore to be used in radians.

NOTE 2 If $\theta = -45^\circ$, then P/cF in accordance with (B5) has the value 0,98 (i.e., the difference between (B.2) and (B.5) amounts to 2 %) at a γ value that corresponds to $d = 32a$. This is the basis of the corresponding recommendation in 5.2.3.

It should be noted that the above expression goes through a Heaviside step function when the cone apex is moved through the focus.

The formula is based on a model which is not perfect and, therefore, is an approximation. Diffraction effects are neglected here, and also imaginary parts in the particle velocity which occur when acoustic rays are not parallel to one another. Local deviation from straight propagation (as, for example, due to diffraction) may result in an increase or decrease of the radiation force whereas in the absorber case, diffraction generally tends to decrease the radiation force.

NOTE 3 There is, however, experimental and computational evidence [37] to support the general trends indicated by the simple ray acoustic model and formula (B5). In this particular experiment with a convex-conical reflector of $\theta = -45^\circ$, Equation (B.5) was approximately valid when the distance between transducer and cone apex was more than 20 mm and less than the focal length minus 10 mm. For distances smaller than 20 mm and obviously due to reflections between the transducer and cone, the measured force increased, up to a factor of approximately 2 for very small distances; for distances larger than the focal distance minus 10 mm, the measured force decreased progressively from the pre-focal value dealt with by Equation (B.5) to a lower, post-focal value.

Annexe C (informative)

Autres méthodes de mesurage de la puissance ultrasonore

Beaucoup d'autres méthodes de mesurage de la **force de rayonnement** ont été mises en oeuvre, telles que la balance de torsion [38] ou les dispositifs employant la **pression de rayonnement** modulée [24,39]. La balance de **pression de rayonnement** modulée peut être utilisée avec tout **transducteur ultrasonore** capable de fonctionner en excitation modulée ou à groupes d'impulsions. Les instruments utilisant la méthode du flotteur constituent une vaste famille d'appareils typiquement conçus pour la plage de puissance de l'ordre de quelques watts utilisée en thérapie par ultrasons. Dans le modèle de principe [20], un réflecteur conique se déplace sous l'action de la **force de rayonnement** dans un liquide plus dense (tétrachlorure de carbone ou perchloréthylène). De nombreuses modifications et améliorations du principe sont décrites dans la littérature [40 à 44]. Une balance à immersion très sensible convenant aux mesurages de l'ordre du microwatt est décrite dans [45].

Le balayage du champ ultrasonore avec un hydrophone étalonné (balayage planaire) (voir CEI 61101) [46], la diffraction lumineuse (Debye-Sears) [1,47] et les méthodes calorimétriques [1,3,48] sont des méthodes utilisant un principe différent de celui de la **force de rayonnement**.

Annex C (informative)

Other methods of ultrasonic power measurement

Many other **radiation force** methods have been applied, as for example the torsion balance [38] or the devices using modulated **radiation force** [24,39]. The modulated **radiation force** balance can be used with any **ultrasonic transducer** capable of operation with modulated or tone-burst excitation. A large family of devices is formed by the float-method instruments which are typically intended for the range of power of the order of watts used in ultrasonic therapy. In the basic design [20] a cone-shaped reflector moves under the action of the **radiation force** into a heavier liquid (carbon-tetrachloride or tetrachloroethylene). Numerous modifications and improvements of the principle can be found in the literature [40 to 44]. A very sensitive immersion balance, suitable for measurements in the microwatt range, has been described [45].

Other methods which differ from the **radiation force** principle are the scanning of the ultrasonic field by means of a calibrated hydrophone (planar scanning) (see IEC 61101) [46] and light diffraction (Debye-Sears) [1,47] and calorimetric methods [1,3,48].

Annexe D (informative)

Milieu de propagation et dégazage

D.1 Généralités

Il est bien établi que des mesurages de puissance ultrasonore, en particulier à des fréquences de 1 MHz et inférieures, peuvent être fortement affectées par la cavitation acoustique. La cavitation est la croissance, la vibration et l'implosion de micro-bulles préexistantes de gaz ou de vapeur dans un milieu. Au cours de mesurages de puissance ultrasonore, ces bulles diffusent l'ultrason du transducteur à l'essai, provoquant des instabilités et des sous-estimations de la puissance réelle. Il est donc nécessaire de savoir quand la cavitation se produit durant les mesurages de puissance et aussi de définir des milieux adéquats dans lesquels les effets de la cavitation peuvent être minimisés.

Une méthode de mesure pour détecter l'amorçage de la cavitation est décrite dans [26]. Spécifiquement, l'amorçage d'une cavitation inertielle est souvent caractérisé par la présence de la sous-harmonique de la fréquence fondamentale de fonctionnement. Un exemple de spectre acoustique acquis au moyen d'un hydrophone à aiguille est présenté dans [26].

Des méthodes possibles de dégazage de l'eau sont fournies dans le Tableau D.1. Dans ce tableau, les méthodes décrites dans plusieurs documents sont collectées pour montrer les nombreuses possibilités d'obtenir de l'eau dégazée. Pour une description plus précise des procédures de préparation, il convient de faire référence au document correspondant. Lorsque l'utilisation de l'eau dégazée est recommandée, la mesure de la concentration en O₂ dissous fournit une information suffisante sur la quantité de gaz dissous dans l'eau.

Il existe aussi d'autres méthodes ou additifs pour diminuer le contenu en gaz de l'eau.

- Un procédé électrochimique pour extraire l'oxygène de l'eau. Cette méthode n'est pas vraiment simple à mettre en œuvre. Cela vaut aussi pour la procédure d'électrolyse.
- Ajout d'hydrazine dans l'eau. Le problème est que l'hydrazine est très toxique et s'évapore après un certain temps dans un gaz.
- Utilisation d'un micro-filtre. Il s'agit d'une méthode coûteuse pour de faibles quantités d'eau mais qui peut être employée si une circulation d'eau est disponible.

Le dégazage à basse pression (par exemple 12 h à 2,5 kPa) et le dégazage à la chaleur (par exemple 15 min à 100 °C) sont bien connus. Ils permettent de produire une eau bien dégazée (concentration en O₂ <4 mg/l) mais uniquement durant quelques heures – voir Figure D.1. Dans toutes les configurations, la surface libre de l'eau est importante par rapport au volume d'eau pour réduire le temps de dégazage. La vitesse de rechargement en gaz dépend des dimensions du réservoir d'eau et de l'agitation de la surface libre. Les méthodes de dégazage sous vide ou par ébullition du Tableau D.1 fournissent toutes des résultats similaires.

L'ajout de sulfite de sodium ou d'éthanediol à l'eau pour éviter la cavitation est moins connu. Dans ces cas également, la vitesse de rechargement en gaz dépend des dimensions du réservoir d'eau et de l'agitation de la surface libre.

Annex D (informative)

Propagation medium and degassing

D.1 General

It is well established that measurements of ultrasonic power, particularly at frequencies of 1 MHz and below, can be strongly affected by acoustic cavitation. Cavitation is the growth, oscillation and collapse of previously-existing gas or vapour-filled microbubbles in a medium. During ultrasonic power measurements, these bubbles will scatter the ultrasound from the transducer under test, causing instabilities and underestimates of true power. There is thus a need to know when cavitation is occurring during power measurements, and also to define suitable media in which the effects of cavitation may be minimized.

A measurement method to detect the onset of cavitation is described in [26]. Specifically, the onset of inertial cavitation is often characterized by the presence of the subharmonic of the fundamental operating frequency. An example of an acoustic spectrum acquired using a needle hydrophone is presented in [26].

Possible methods to degas the water are listed in Table D.1. In this table the methods described in a number of documents are collected to show the numerous possibilities for obtaining degassed water. For a more precise description of the preparation procedures reference should be made to the relevant document. Where the use of degassed water is recommended, measurement of the dissolved O_2 -concentration will give sufficient information about the amount of dissolved gas in the water.

Also other methods or additives to decrease the gas content of water exist:

- An electrochemical process to extract oxygen from the water. This method is not so easy to perform; the same is true of the electrolysis process.
- Adding hydrazine into the water. The problem is that hydrazine is very toxic and evaporates after awhile into a gas.
- Using a micro-filter. This is an expensive method for small amounts of water, but can be used if a water flow is present.

Degassing by a low-pressure level (e.g. 12 h at 2,5 kPa) and degassing by heat (e.g. 15 min at 100 °C) are commonly known. They produce well-degassed water (O_2 -concentration <4 mg/l), but only for a few hours, see Figure D.1. In all set-ups the size of the water surface compared to the water content is important to reduce the degassing time. The speed of re-gassing strongly depends on the dimensions of the water tank and whether the water surface is kept quiet. The methods of degassing by vacuum or boiling given in Table D.1 will all give similar results.

Less commonly known are the addition of sodium sulphite or ethanediol to the water to suppress the formation of cavitation. Also in these cases the speed of re-gassing depends on the dimensions of the water tank and whether the water surface is kept quiet.

Tableau D.1 – Méthodes de dégazage de l'eau

Document	Méthode	Qualité initiale de l'eau	Procédure de préparation pour obtenir de l'eau dégazée	Exigences de qualité après dégazage
CEI 61846	ébullition	distillée et filtrée	ébullition durant 15 min refroidissement à 54 °C bouteille à tuyau rempli et obturé refroidissement et stockage jusqu'à utilisation	mesurage de concentration en O ₂ pas d'exigences
	ébullition à pression réduite	distillée et filtrée	ébullition sous pression < 10 ⁴ Pa (20l) refroidissement à 39 °C durant la nuit maintien à 39 °C, < 10 ⁴ Pa jusqu'à utilisation (1 à 7 jours)	mesurage de concentration en O ₂ pas d'exigences
	aspersion à pression réduite	distillée et filtrée	aspersion fine à une pression < 10 ⁴ Pa	mesurage de concentration en O ₂ pas d'exigences
CEI 60854	ébullition	distillée	chauffage à 80 °C durant 1 h	pas d'exigences
CEI 61102	pression réduite	distillée	à 2 500 Pa (25 mbar) durant 1 h	
Présent document	pression réduite	désionisée	2 500 Pa durant au moins 24 h concentration en O ₂ < 1 mg/l	concentration en O ₂ < 4 mg/l
	ébullition	désionisée	ébullition durant 5 min refroidissement lent à 23 °C concentration en O ₂ < 1 mg/l	
	ajout de Na ₂ SO ₃	désionisée	ajout de 4 g/l Na ₂ SO ₃ concentration résultante: 0,1 mg/l O ₂	
	différentes procédures	désionisée	variable	
CEI 60866	ébullition	distillée	chauffage à 80 °C durant 1 h laisser max. 48 h à 10 ⁵ Pa	pas d'exigences
	pression réduite	distillée	pas plus de 2 000 Pa (20 mbar) laisser max. 48 h à 10 ⁵ Pa	
[49]		désionisée	pompe centrifuge --> très basse pression --> chauffage --> réservoir de mesure fraîchement dégazée: concentration en O ₂ < 1 mg/l meilleure conservation: film alimentaire ou sphères creuses en plastique	pour mesurages hydrophone: concentration en O ₂ < 5 mg/l à 8 mg/l pour mesures de puissance jusqu'à 10 W: concentration en O ₂ < 4 mg/l
[50]	10 procédures différentes	variable	variable	pas d'exigences

Table D.1 – Water degassing methods

Document	Method	Water initial quality	Preparation procedure to obtain degassed water	Demand for quality after degassing
IEC 61846	boiling	distilled and filtered	boiling for 15 min cooled to 54 °C bottle with hose filled and closed cooled and stored until used	measure O ₂ -concentration no demand
	boiling at reduced pressure	distilled and filtered	boiling under pressure < 10 ⁴ Pa (20 l) cooled to 39 °C overnight maintain at 39 °C, < 10 ⁴ Pa until used (1 to 7 days)	measure O ₂ -concentration no demand
	reduced pressure spray	distilled and filtered	fine water spray in pressure < 10 ⁴ Pa	measure O ₂ -concentration no demand
IEC 60854	boiling	distilled	heating to 80 °C for 1 h	no demand
IEC 61102	reduced pressure	distilled	at 2 500 Pa (25 mbar) for 1h	
This document	reduced pressure	deionized	2 500 Pa for at least 24 h O ₂ -concentration will be < 1 mg/l	O ₂ -concentration < 4 mg/l
	boiling	deionized	boiling for 5 min cooled quietly to 23 °C O ₂ -concentration will be < 2 mg/l	
	adding Na ₂ SO ₃	deionized	adding 4 g/l Na ₂ SO ₃ will result in 0.1 mg/l O ₂ -concentration	
	different procedures	deionized	variable	
IEC 60866	boiling	distilled	heating to 80 °C for 1 h remains max. 48 h at 10 ⁵ Pa	no demand
	reduced pressure	distilled	to no more than 2 000 Pa (20 mbar) remains max. 48 h at 10 ⁵ Pa	
[49]		deionized	centrifugal pump --> very low pressure --> heater --> measurement tank freshly degassed: O ₂ -concentration will be < 1 mg/l to keep it longer: kitchen wrap or hollow plastic spheres	for hydrophone measurements: O ₂ -concentration < 5 mg/l to 8 mg/l for power measurements up to 10 W: O ₂ -concentration < 4 mg/l
[50]	10 different procedures	variable	variable	no demand

D.2 Dégazage par le vide

L'eau peut être dégazée en soumettant l'eau à un vide (de 2 kPa à 2,5 kPa). Après un période de 24 h, la concentration en O₂ dissous peut baisser jusqu'à 1 mg/l. Cette méthode est appropriée, car la concentration en O₂ dans l'eau reste inférieure à 4 mg/l durant plusieurs heures.

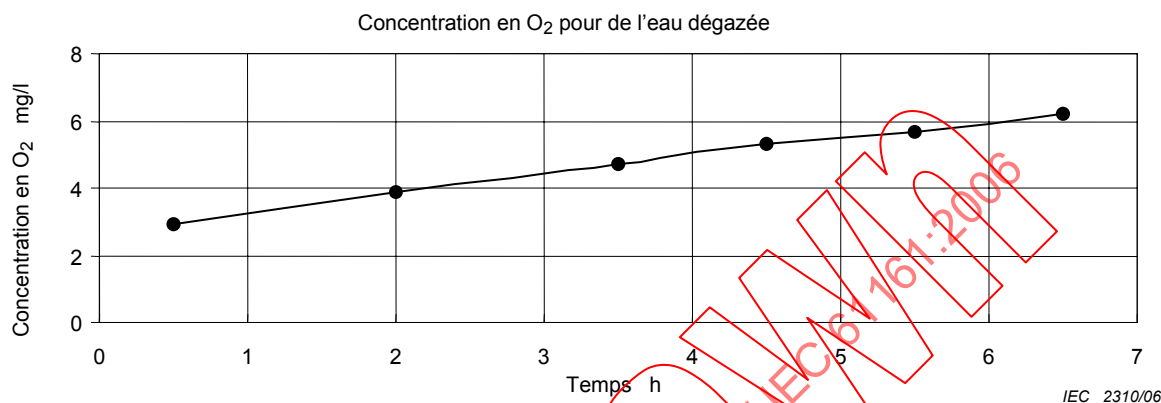


Figure D.1 – Exemple de concentration en oxygène dissous en fonction du temps pour 200 ml d'eau dégazée par le vide dans un verre ayant une surface libre de liquide de 34 cm²

D.3 Dégazage par ébullition

L'ébullition de l'eau durant une période de temps spécifiée est également une méthode adéquate de dégazage. Le Tableau D.2 présente des résultats obtenus en employant différentes procédures.

La concentration en O₂ est fournie après ébullition et refroidissement jusqu'à 23 °C dans un réservoir d'eau. La période de refroidissement dépend de la vitesse de renouvellement d'eau dans le réservoir et de son mélange.

Tableau D.2 – Conditions de dégazage et d'ébullition

Période d'ébullition (min)	Concentration en O ₂ initiale (mg/l) avant ébullition	Concentration en O ₂ finale (mg/l) à environ 23 °C	Temps entre la fin de l'ébullition (T = 100 °C) et le refroidissement à T = 23 °C (min)
5 ^a	7,2 ^a	1,7 ^a	24 ^a
10 ^a	7,8 ^a	2,0 ^a	35 ^a
20 ^b	8,0 ^b	3,1 ^b	28 ^b
^a Non mélangé.			
^b Mélangé très lentement.			

Les conclusions suivantes peuvent être tirées du tableau D.2:

- Une courte ébullition de 5 min procure déjà un dégazage suffisant de l'eau.

D.2 Vacuum degassing

Water can be degassed by applying a vacuum (2 kPa to 2,5 kPa) to the water. After a period of 24 h the dissolved O₂-concentration can be as low as 1 mg/l. This is a suitable method, since the O₂-concentration in the water stays below 4 mg/l for a few hours.

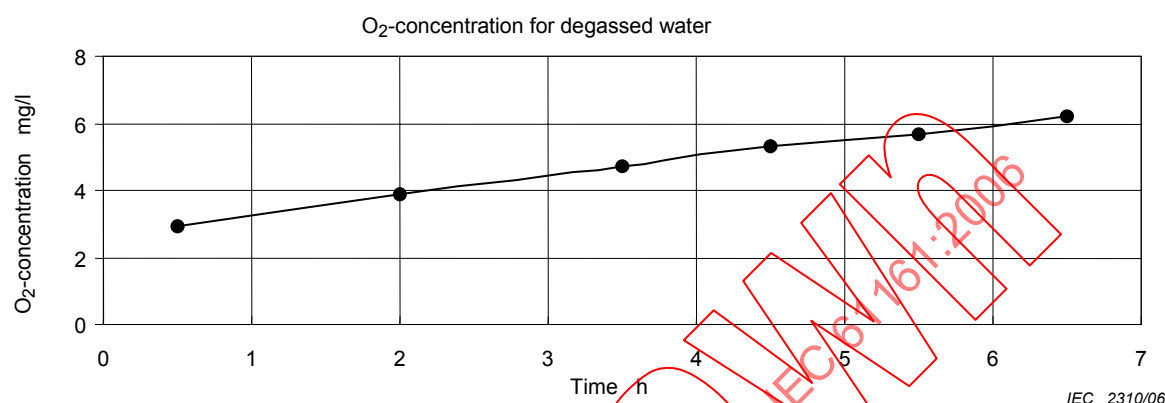


Figure D.1 – Example of dissolved oxygen concentration as a function of time for 200 ml of vacuum degassed water in a glass with liquid surface area of 34 cm²

D.3 Degassing by boiling

Boiling the water for a specified period of time is also a suitable method for degassing. Table D.2 presents results that can be obtained using three different procedures.

The O₂-concentration is given after boiling and cooling down in a water reservoir to below 23 °C. The cooling down period depends on how fast the water in the reservoir is being refreshed and on stirring.

Table D.2 – Conditions for degassing by boiling

Boiling period (min)	Start O ₂ -concentration (mg/l) before boiling	End O ₂ -concentration at about 23 °C (mg/l)	Period between end of boiling (T = 100 °C) and cooling down till T = 23 °C (min)
5 ^a	7,2 ^a	1,7 ^a	24 ^a
10 ^a	7,8 ^a	2,0 ^a	35 ^a
20 ^b	8,0 ^b	3,1 ^b	28 ^b
^a Not stirred.			
^b Very quietly stirred.			

From the Table D.2 the following conclusions can be drawn:

- Boiling for as short as 5 min sufficiently degasses the water.

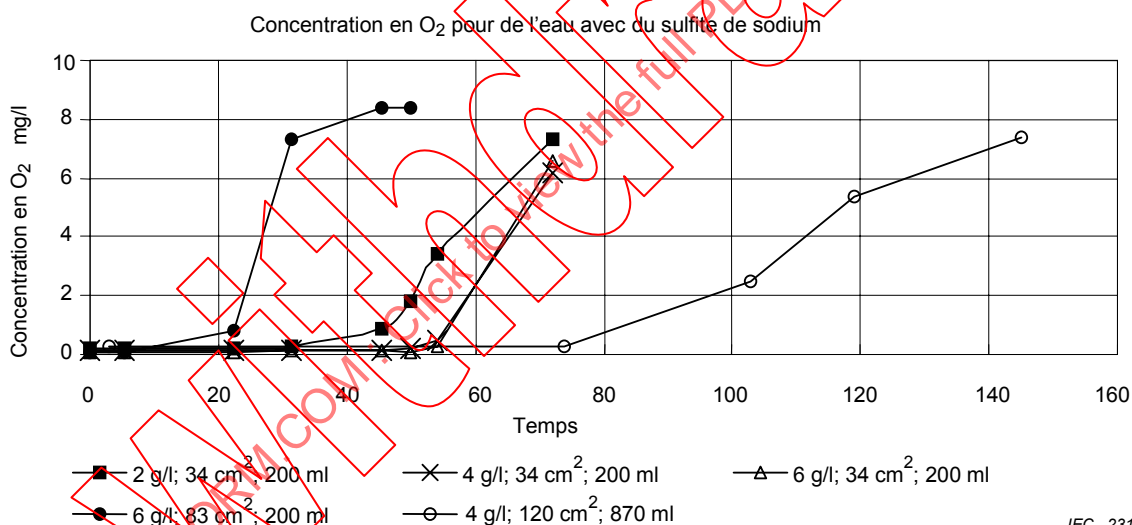
- Le mélange (même très lent) durant la période de refroidissement exerce une influence fortement défavorable sur le contenu en oxygène de l'eau.
- La période de refroidissement ne semble apparemment pas influencer le contenu en oxygène, tant qu'elle ne dépasse pas 35 min.

D.4 Dégazage par addition de Na_2SO_3

Une autre méthode fournissant de très bons résultats est l'addition de sulfite de sodium (Na_2SO_3). L'eau saturée en oxygène à 20 °C contient environ 9 mg/l d'oxygène. Pour fixer l'oxygène, 0,5 g/l de sulfite de sodium sont nécessaires. L'utilisation de Na_2SO_3 pour dégazer de l'eau produit du sulfate de sodium (Na_2SO_4).

Par exemple, de l'eau a été préparée à laquelle du Na_2SO_3 est ajouté pour fournir une solution à 0,4 % masse de Na_2SO_3 . La teneur en O_2 de ce type d'eau reste < 4 mg/l durant une longue période (voir Figure D.2). La vitesse de rechargement en gaz dépend fortement des dimensions du réservoir d'eau. Des temps de recharge en gaz > 150 h sont observés pour des réservoirs de grandes dimensions.

La vitesse du son reste identique après ajout du Na_2SO_3 . La variation de densité est < 1 %. La conductivité électrique d'une solution à 4 g/l Na_2SO_3 est de 5,1 mS/cm.



Les mesurages commencent directement après remplissage du verre. Température de l'eau: (22 ± 1) °C.

Figure D.2 – Concentration en oxygène dissous en fonction du temps pour 2 g/l, 4 g/l et 6 g/l de sulfite de sodium dans de l'eau déminéralisée et pour différentes surfaces libres et volumes d'eau

Certaines réactions se produisent avec des métaux tels que l'aluminium et le nickel (Na_2SO_3 agit comme une base). Après 2 h dans la solution par exemple, un transducteur à surface frontale en aluminium sera légèrement corrodé. Il est par conséquent recommandé que ce type de métaux soit immergé durant une période aussi courte que possible.

En prenant en compte les précautions qui précèdent, on peut conclure que la solution de Na_2SO_3 est bien adaptée pour une utilisation comme milieu alternatif.

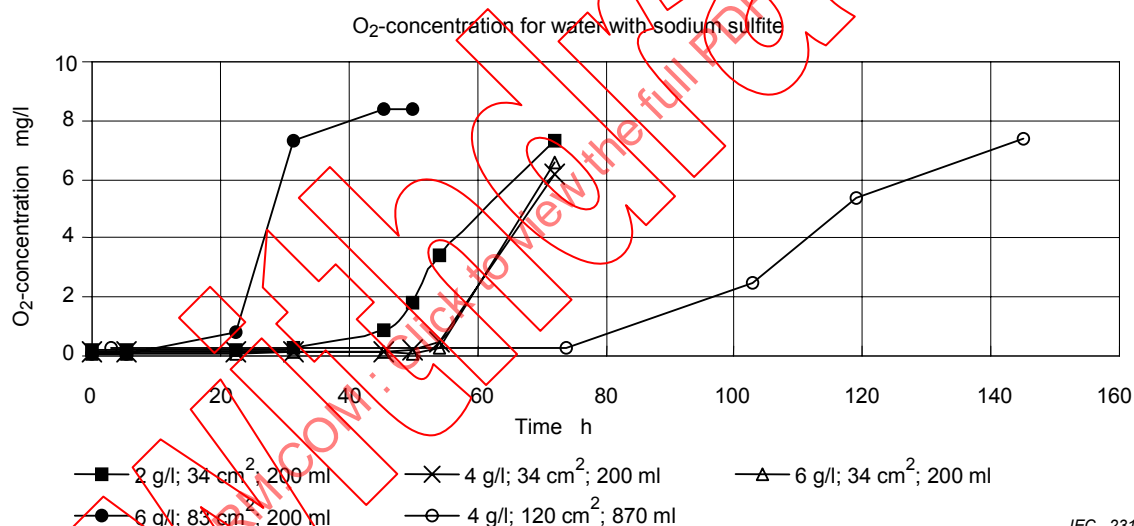
- Stirring (even very quietly) in the cooling period has a strong, undesired influence on oxygen content of the water.
- The cooling period does not apparently influence the oxygen content, as long as it does not exceed 35 min.

D.4 Degassing by adding Na_2SO_3

Another method that shows very good results is to add sodium sulphite (Na_2SO_3). Water saturated with oxygen at 20 °C will contain about 9 mg/l oxygen. To bind the oxygen 0,5 g/l sodium sulphite is needed. The use of Na_2SO_3 for degassing water results in sodium sulphate (Na_2SO_4).

As an example, water has been prepared to which Na_2SO_3 is added to give a solution of 0,4 mass % Na_2SO_3 . The O_2 -content of this water type stays < 4 mg/l during a long period of time, see Figure D.2. The speed of re-gassing strongly depends on the dimensions of the water tank. Re-gassing periods >150 h are observed in tanks with greater dimensions.

The change in the sound velocity after adding Na_2SO_3 was nil. The change in density is < 1 %. The electrical conductivity using a mixture of 4 g/l Na_2SO_3 is 5,1 mS/cm.



The measurements are started directly after filling the glass. Water temperature (22 ± 1) °C.

Figure D.2 – Dissolved oxygen concentration as a function of time for 2 g/l, 4 g/l and 6 g/l of sodium sulphite in de-mineralized water and for different surface areas and volumes of water

There are some effects on metals like aluminium and nickel (Na_2SO_3 will act like a base). For example, after 2 h in the solution, a transducer with an aluminium front surface will be corroded somewhat. It is therefore recommended that this type of metal should be immersed over as short a time-period as possible.

Taking the above precaution into account it can be concluded that the Na_2SO_3 solution is well-suited for use as an alternative medium.

NOTE Cette méthode est uniquement valable pour l'élimination d'O₂. Cependant, il a été montré que l'élimination d'O₂ évite la cavitation [27].

D.5 Milieux de propagation autres que l'eau

Éthanediol

Une solution d'éthanediol, par exemple en mélange 2:1 avec de l'eau, n'est pas recommandée comme un milieu pour éviter la cavitation, même s'il peut être supposé que l'apparition de cavitation est moins probable du fait de la viscosité plus élevée du mélange.

Des mesurages à l'aide d'une solution d'éthanediol ont montré que la fréquence sous-harmonique, qui permet de prédire la cavitation, ne se manifeste qu'aux niveaux de puissance les plus élevés et que ce milieu évite donc efficacement la cavitation. Cependant, des mesurages des propriétés acoustiques du mélange ont montré que la vitesse de propagation à 19,5 °C est de 1 720 ms⁻¹, soit 16 % plus élevé que dans l'eau. L'impédance acoustique de la solution d'éthanediol diffère également de 20 % par rapport à celle de l'eau, ce qui n'est pas idéal.

Solution physiologique

Il a été suggéré d'employer une "solution physiologique" du type employé dans les hôpitaux comme source de fluide dégazé pour les balances de **forces de rayonnement**. Cependant, des essais effectués avec de tels fluides ont confirmé que la cavitation se produit dans le milieu d'essai à des puissances relativement faibles (5 W) en comparaison avec l'eau dégazée (15 W). Ce fluide n'est par conséquent pas un candidat alternatif à utiliser pour des mesurages de puissance. Voir [27].

NOTE Une solution physiologique standard est composée d'eau stérile contenant 0,9 % de chlorure de sodium (9 g/l).

NOTE This method is only valid for removal of O_2 . However, removal of O_2 has been shown to suppress cavitation [27].

D.5 Propagation media other than water

Ethenediol

Ethenediol solution, in for example a mixture of 2:1 with water, is not recommended as a non-cavitating medium, although it may be thought that cavitation is less likely to occur due to the higher viscosity of the mixture.

Measurements made using ethenediol solution showed that the sub-harmonic frequency, a predictor of cavitation, was only seen at the highest power levels and that the medium was therefore successful in suppressing cavitation. However, measurements of the acoustic properties of the mixture showed that the propagation velocity at 19,5 °C was 1720 ms⁻¹, 16 % higher than in water. Also the acoustic impedance of the ethenediol solution is 20 % different from that of water, which is not ideal.

A physiological solution

A suggestion was made that a “physiological solution” of the type used within hospitals might be a source of degassed fluid which could be used within **radiation force** balances. However, tests performed using such a fluid have confirmed that cavitation occurs within the test medium at relatively low powers (5 W) in comparison to degassed water (15 W). The fluid is therefore not a candidate for an alternative medium to be used for power measurements. See [27].

NOTE A standard physiological solution is sterile water that contains 0,9 % sodium chloride (9 g/l).

Annexe E (informative)

Mesurage de force de rayonnement avec faisceaux ultrasonores divergents

E.1 Correction et incertitude, champs divergents affectant une cible absorbante

La méthode communément appliquée pour mesurer la **force de rayonnement** F et calculer la puissance ultrasonore P est basée sur l'hypothèse que les ondes sont planes. Des modèles de champ plus réalistes présentés dans la littérature [25] ont été étudiés dans un projet de collaboration européen et sont décrits en Annexe B de cette étude [26]. On peut affirmer en général que la structure d'un champ réel, non focalisé, se trouve probablement entre celle d'une onde plane et celle d'un champ piston plan circulaire. Dans le cas d'une cible parfaitement absorbante de section transversale infinie, la formule correspondante est

$$\frac{P}{cF} = 1 \quad (\text{E.1})$$

pour une onde plane et

$$\frac{P}{cF} = \frac{1 - J_0(2ka)/ka}{1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka)} \quad (\text{E.2})$$

pour une source piston plane circulaire,

où

c est la vitesse du son,

k est le nombre d'onde circulaire,

a est le rayon du transducteur, et

J représente les fonctions de Bessel.

Dans la Figure E.1, la courbe oscillante représente la formule de la fonction de Bessel de l'Equation (E.2). Le maximum peut être connecté à une courbe douce selon la formule (approximation de "pic")

$$\frac{P}{cF} = fct(ka) = 1 + \frac{0,6531}{ka} \left(1 + \frac{1,407}{(ka)^{2/3}} \right) \quad (\text{E.3})$$

qui est représentée par la ligne continue de la Figure E.1.

La courbe s'applique uniquement à une source piston ; pour d'autres distributions d'amplitude, en particulier pour des transducteurs à atténuation d'amplitude (apodisation) de bord, on peut s'attendre à ce que la courbe se trouve entre $P/cF = 1$ (onde plane) et la courbe du piston.

Annex E (informative)

Radiation force measurement with diverging ultrasonic beams

E.1 Correction and uncertainty, divergent fields impinging on an absorbing target

The method commonly applied to measure the **radiation force** F and to calculate the ultrasonic power P is based on the assumption that the waves are plane. More realistic field models from the literature [25] were studied as a part of a European collaborative project and reported in Annex B of that study [26]. It can generally be stated that the structure of a real, unfocused field is most likely between that of a plane wave and that of a circular plane piston field. In the case of a perfectly absorbing target of infinite cross-sectional size the relevant formula is

$$\frac{P}{cF} = 1 \quad (\text{E.1})$$

for a plane wave and

$$\frac{P}{cF} = \frac{1 - J_1(2ka)/ka}{1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka)} \quad (\text{E.2})$$

for a circular plane piston source,

where

c is the speed of sound,

k is the circular wavenumber,

a is the transducer radius, and

J stands for Bessel functions.

In Figure E.1 the oscillating curve represents the Bessel function formula of Equation (E.2). The maxima can be connected by a smooth curve according to the formula ("peak" approximation)

$$\frac{P}{cF} = fct(ka) = 1 + \frac{0,6531}{ka} \left(1 + \frac{1,407}{(ka)^{2/3}} \right) \quad (\text{E.3})$$

which is given as the unbroken line in Figure E.1.

This curve applies only to a piston source; for other amplitude distributions, particularly for transducers with an amplitude shading (apodization) at the rim, it can be expected that the curve lies somewhere between $P/cF = 1$ (plane wave) and the piston curve.

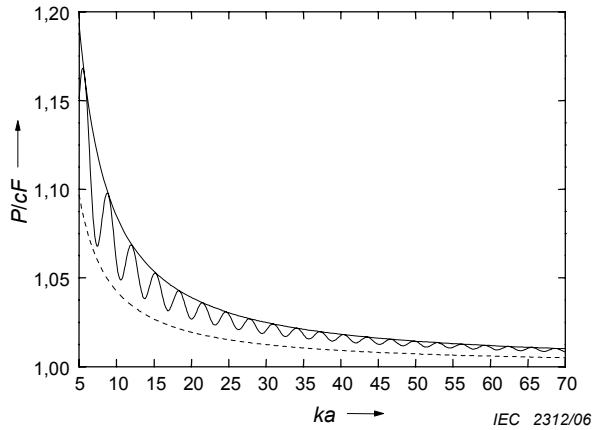


Figure E.1 – Résultat du piston (courbe oscillante) pour P/cF en fonction de ka , à approximation de pic (line continue) et courbe centrale intermédiaire (ligne brisée) représentant le facteur de correction $corr$.

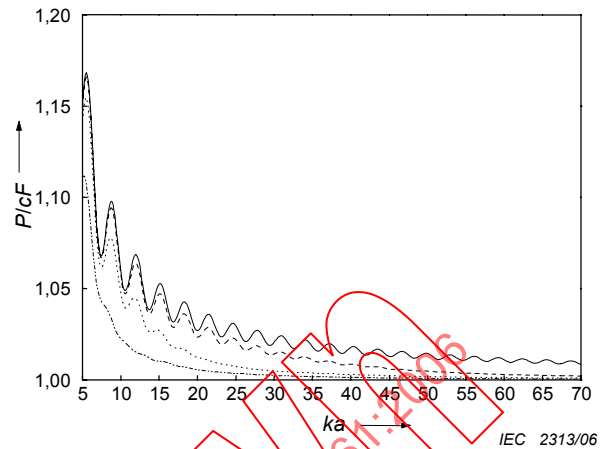


Figure E.2 – P/cF en fonction de ka pour quatre distributions d'amplitude pseudo-trapézoïdales différentes, avec $\varepsilon = 0$ (piston) (plein) ; $\varepsilon = 0,1$ (tiret) ; $\varepsilon = 0,25$ (point) ; $\varepsilon = 0,6$ (tiret/point).

Les résultats de calcul confirmant cela sont présentés dans la Figure E.2. Une distribution d'amplitude pseudo-trapézoïdale est considérée et la diminution de l'amplitude de vibration vers le bord du transducteur est supposée être linéaire comme dans [25], mais est fournie sous forme quadratique conformément à la formule

$$\frac{v(R)}{v_0} = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq R \leq a_1 \\ \frac{a_2^2 - R^2}{a_2^2 - a_1^2} & \text{for } a_1 \leq R \leq a_2 \\ 0 & \text{for } a_2 \leq R \end{cases} \quad (\text{E.4})$$

dans laquelle R est la distance latérale à partir du centre du transducteur. Elle suppose que l'amplitude de la vitesse de particule v est égale à une constante v_0 jusqu'au rayon caractéristique $R = a_1$ et qu'elle descend ensuite de façon progressive vers zéro, jusqu'à ce que le second rayon caractéristique $R = a_2$ soit atteint, et reste à zéro au-delà de a_2 . Le rayon effectif a du transducteur est défini ici simplement comme la valeur de R pour laquelle l'amplitude de vitesse est $v_0/2$, ce qui signifie

$$\frac{v(a)}{v_0} = \frac{1}{2} \quad (\text{E.5})$$

Ceci est similaire à la définition employée dans [25]. Les équations (E.4) et (E.5) mènent à

$$a^2 = \frac{a_1^2 + a_2^2}{2} \quad (\text{E6})$$

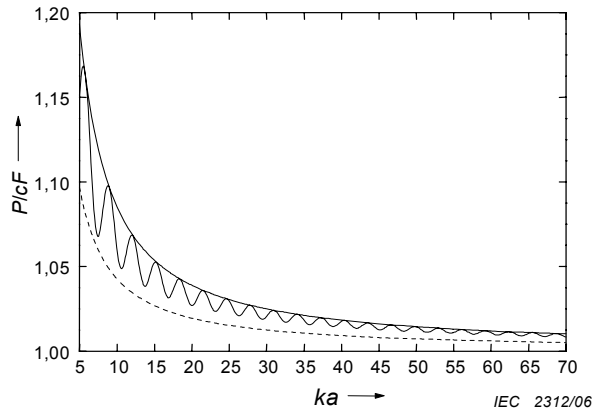


Figure E.1 – Piston result (oscillating curve) for P/cF as a function of ka , with "peak" approximation (unbroken line) and the central, half-way curve (broken line) representing the correction factor $corr$.

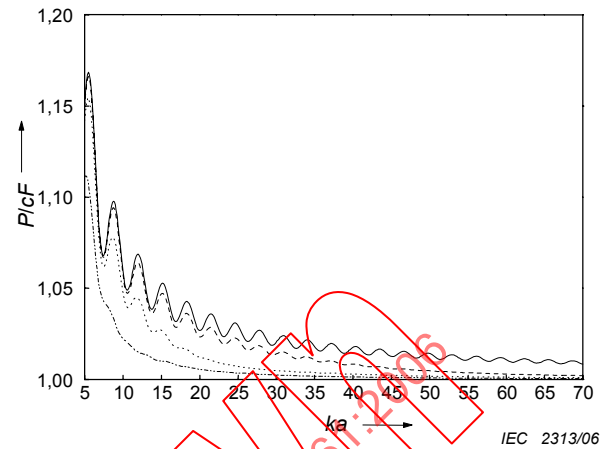


Figure E.2 – P/cF as a function of ka for four different pseudo-trapezoidal amplitude distributions, with $\varepsilon = 0$ (piston) (solid); $\varepsilon = 0,1$ (dash); $\varepsilon = 0,25$ (dot); $\varepsilon = 0,6$ (dash/dot).

Calculation results confirming this are presented in Figure E.2. A pseudo-trapezoidal distribution is considered and the decrease in the vibrational amplitude towards the edge of the transducer is assumed not to be linear as in [25], but is given in a quadratic manner in accordance with the formula

$$\frac{v(R)}{v_0} = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq R \leq a_1 \\ \frac{a_2^2 - R^2}{a_2^2 - a_1^2} & \text{for } a_1 \leq R \leq a_2 \\ 0 & \text{for } a_2 \leq R \end{cases} \quad (\text{E.4})$$

in which R is the lateral distance from the transducer centre. It assumes that the particle velocity amplitude v is equal to a constant v_0 up to a characteristic radius $R = a_1$ and that it then monotonically decreases towards zero until the second characteristic radius $R = a_2$ is reached, and that it remains zero beyond a_2 . The effective transducer radius a is defined here simply as that value of R for which the velocity amplitude is $v_0/2$ which means

$$\frac{v(a)}{v_0} = \frac{1}{2} \quad (\text{E.5})$$

This is similar to the definition used in [25]. Equations (E.4) and (E.5) lead to

$$a^2 = \frac{a_1^2 + a_2^2}{2} \quad (\text{E.6})$$

Chaque distribution pseudo-trapézoïdale peut être caractérisée par un paramètre ε (désigné comme α dans [25]) qui, comme dans [25], est la largeur relative de la région de chute d'amplitude près du bord du transducteur selon l'expression

$$\varepsilon = \frac{a_2 - a_1}{a} \quad (\text{E.7})$$

Quatre distributions d'amplitude pseudo-trapézoïdales différentes sont considérées ici et sont représentées dans la Figure E.2 avec différents types d'impression comme suit: $\varepsilon = 0$ (piston) (plein) ; $\varepsilon = 0,1$ (tiret) ; $\varepsilon = 0,25$ (point) ; $\varepsilon = 0,6$ (tiret/point). Les résultats pour les distributions avec $\varepsilon > 0$ apparaissent entre la courbe du piston et le résultat de l'onde plane $P/cF = 1$ (voir aussi [25]).

Pour cette raison, la valeur moyenne de 1 (valeur d'onde plane) et l'Equation (E.3) peuvent être considérées comme la meilleure approximation de P/cF dans le cas d'une distribution d'amplitude inconnue. Cela est montré dans la Figure E.1 par la ligne brisée, qui représente la correction qui peut être appliquée en multipliant les résultats de mesurage d'onde plane par le facteur de correction

$$corr = \frac{1 + fct(ka)}{2} \quad (\text{E.8})$$

qui augmente le résultat à partir de la valeur $P/cF = 1$ pour parvenir à celui représenté par la ligne brisée centrale de la Figure E.1 et en assumant une incertitude $\pm u$ qui couvre tout l'espace entre la valeur $P/cF = 1$ et la ligne de connexion continue de "pic" dans la Figure E.1.

Il est recommandé d'employer cette approximation. En pratique, il convient de prendre le rayon effectif a le plus adéquat. Pour des transducteurs utilisés en physiothérapie, le rayon doit être calculé à partir de la valeur de l'aire de rayonnement effective (A_{ER}) telle que donnée dans la CEI 61689. Pour d'autres transducteurs, la valeur du rayon a doit soit être déterminée par mesurages à l'hydrophone, soit par mesurage géométrique de la dimension de l'élément ou du groupe d'éléments. Le facteur de correction $corr$ est calculé en fonction de ka conformément à

$$corr = 1 + \frac{0,6531}{2ka} \left(1 + \frac{1,407}{(ka)^{2/3}} \right) \quad (\text{E.9})$$

Le facteur $corr$ compense les effets (habituellement faibles) d'une structure de champ non plane (divergence de faisceau) dans le cas de mesurages de **forces de rayonnement** avec une cible absorbante. Il peut être appliqué aux valeurs de puissance acoustique obtenues.

Comme la structure de champ des transducteurs à l'essai n'est pas connue avec suffisamment de détail pour pouvoir calculer le facteur de correction vrai dans chaque cas individuel, une valeur d'incertitude est attribuée à la correction. Celle-ci est basée sur l'hypothèse d'une distribution rectangulaire s'étendant à partir de $P/cF = 1$ jusqu'à la valeur de l'Equation (E.3).

Il convient de noter que le traitement ci-dessus est approprié pour une cible absorbante. Aucune correction ou incertitude n'est disponible lorsqu'une cible réfléchissante est employée pour les mesurages.