

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61161

Edition 1.1
1998-05

Edition 1:1992 consolidée par l'amendement 1:1998
Edition 1:1992 consolidated with amendment 1:1998

**Mesurage de puissance ultrasonore
dans les liquides dans la gamme
de fréquences de 0,5 MHz à 25 MHz**

**Ultrasonic power measurement in liquids
in the frequency range 0,5 MHz to 25 MHz**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61161:1992+A.1:1998

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61161

Edition 1.1
1998-05

Edition 1:1992 consolidée par l'amendement 1:1998
Edition 1:1992 consolidated with amendment 1:1998

**Mesurage de puissance ultrasonore
dans les liquides dans la gamme
de fréquences de 0,5 MHz à 25 MHz**

**Ultrasonic power measurement in liquids
in the frequency range 0,5 MHz to 25 MHz**

© IEC 1998 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives.....	8
3 Définitions.....	8
4 Liste des symboles.....	10
5 Prescriptions pour les balances à force de radiation	12
5.1 Généralités	12
5.2 Caractéristiques de la cible	12
5.3 Diamètre de la cible	14
5.4 Microbalance/Système de mesurage de la force	14
5.5 Cuve du système	16
5.6 Structures du support de cible.....	16
5.7 Positionnement du transducteur	16
5.8 Feuilles contre les courants.....	18
5.9 Couplage à transducteur	18
5.10 Etalonnage.....	18
6 Prescriptions pour les conditions de mesurage	20
6.1 Position latérale du transducteur	20
6.2 Distance du transducteur à la cible.....	20
6.3 Eau.....	20
6.4 Mouillage.....	22
6.5 Conditions d'environnement	22
6.6 Dérives thermiques	22
7 Incertitude de mesurage.....	22
7.1 Evaluation des incertitudes de mesurage.....	22
Figures.....	34
Annexe A – Formules fondamentales.....	40
Annexe B – Autres méthodes de mesurage de la puissance acoustique	44
Annexe C – Bibliographie.....	46

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Definitions	9
4 List of symbols	11
5 Requirements for radiation force balances	13
5.1 General	13
5.2 Target type	13
5.3 Target diameter	15
5.4 Microbalance/Force measuring system	15
5.5 System tank	17
5.6 Target support structures	17
5.7 Transducer positioning	17
5.8 Anti-streaming foils	19
5.9 Transducer coupling	19
5.10 Calibration	19
6 Requirements for measuring conditions	21
6.1 Lateral transducer position	21
6.2 Transducer/Target separation	21
6.3 Water	21
6.4 Water contact	23
6.5 Environmental conditions	23
6.6 Thermal drifts	23
7 Measurement uncertainty	23
7.1 Assessment of measurement uncertainties	23
Figures	35
Annex A – Basic formulae	41
Annex B – Other methods of ultrasonic power measurement	45
Annex C – Bibliography	46

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MESURAGE DE PUISSANCE ULTRASONORE DANS LES LIQUIDES DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES DE 0,5 MHz À 25 MHz

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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 présente Norme internationale a été établie par le comité d'études 87 de la CEI: Ultrasons.

La présente version consolidée de la CEI 61161 est issue de la première édition (1992) et de son amendement 1 (1998) [documents 87/113/FDIS et 87/116/RVD].

Elle porte le numéro d'édition 1.1.

Une ligne verticale dans la marge indique où la publication de base a été modifiée par l'amendement 1.

L'annexe A fait partie intégrante de la présente Norme internationale.

Les annexes B et C sont données uniquement à titre d'information.

NOTE – Les caractères d'imprimerie suivants sont employés:

- Prescriptions: caractères romains
- *Modalités d'essais: caractères italiques*
- Notes: petits caractères romains
- Les termes en **caractères gras** dans le texte sont définis à l'article 3.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ULTRASONIC POWER MEASUREMENT IN LIQUIDS IN
THE FREQUENCY RANGE 0,5 MHz TO 25 MHz

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This International Standard has been prepared by technical committee 87: Ultrasonics.

This consolidated version of IEC 61161 is based on the first edition (1992), and its amendment 1 (1998) [documents 87/113/FDIS and 87/116/RVD].

It bears the edition number 1.1.

A vertical line in the margin shows where the base publication has been modified by amendment 1.

Annex A forms an integral part of this International Standard.

Annexes B and C are for information only.

NOTE – The following print types are used:

- Requirements: in roman type
- *Test specifications: in italic type*
- Notes: in small roman type
- Words in **bold** in the text are defined in clause 3.

INTRODUCTION

Il existe un certain nombre de méthodes pour déterminer la puissance acoustique totale émise par des transducteurs ultrasonores ([1]* à [3]*, voir aussi l'annexe B). Le but de cette Norme internationale est d'établir des méthodes de mesurage de puissance ultrasonore dans les liquides pour les fréquences de l'ordre du mégahertz basées sur le mesurage de la force de radiation en utilisant une balance gravimétrique. L'avantage majeur du mesurage de la force de radiation 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. De plus, les dispositifs de mesurage de la force de radiation sont simples à manipuler et à étalonner.

La présente norme énumère les sources d'erreurs et décrit une procédure pas à pas systématique nécessaire pour évaluer les incertitudes de mesurage globales.

* Les chiffres entre crochets se rapportent à l'annexe C – Bibliographie, page 46.

INTRODUCTION

A number of measuring methods exist for the determination of the total radiated power of ultrasonic transducers ([1]* to [3]*, see also annex B). The purpose of this International Standard is to establish methods of measurement of ultrasonic power in liquids in the 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. In addition, the radiation force measuring devices are easy to handle and to calibrate.

This standard enumerates the sources of errors and describes a systematic step-by-step procedure needed to assess overall measurement uncertainties.

* The figures in square brackets refer to annex C – Bibliography, page 46.

MESURAGE DE PUISSANCE ULTRASONORE DANS LES LIQUIDES DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES DE 0,5 MHz À 25 MHz

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale

- prescrit une méthode pour déterminer la puissance totale ultrasonore émise des transducteurs ultrasonores, basée sur l'usage d'une balance à force de radiation;
- établit les principes généraux pour utiliser les balances à force de radiation dans lesquelles un obstacle dénommé cible intercepte le champ acoustique à mesurer.

NOTE – La force de radiation est égale à la variation du flux de quantité de mouvement moyenne sur le temps et est donc reliée à la puissance et à l'intensité ultrasonores.

- fournit des informations concernant l'évaluation des incertitudes de mesure globales.

Cette Norme internationale est applicable:

- aux mesurages de la puissance ultrasonore par utilisation d'une balance à force de radiation dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 25 MHz;
- aux mesurages de la puissance totale ultrasonore des transducteurs avec des faisceaux possédant une bonne collimation;
- à l'utilisation de balances à force de radiation de type gravimétrique.

NOTE – Une liste des publications auxquelles il est fait référence dans cette norme est donnée dans l'annexe C.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(801):1984, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique*

CEI 60150:1963, *Essai et étalonnage de générateurs d'ultrasons à usage thérapeutique*

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*

3 Définitions

3.1 courant acoustique: Mouvement de fluide qui se développe en régime permanent dans un champ acoustique sous certaines conditions.

3.2 champ lointain: Champ libre à une distance de la source telle que la pression acoustique décroisse de manière monotone lorsque cette distance augmente. Il s'agit en général de la région du champ acoustique où l'impédance acoustique, c'est-à-dire le rapport complexe de la pression acoustique à la vitesse des particules, est substantiellement égal à ρc , ρ étant la densité du milieu et c la célérité du son dans celui-ci.

ULTRASONIC POWER MEASUREMENT IN LIQUIDS IN THE FREQUENCY RANGE 0,5 MHz TO 25 MHz

1 Scope

This International Standard

- specifies a method of determining the total radiated 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.

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

- provides information on assessment of overall measurement uncertainties.

This International Standard is applicable to:

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

NOTE – The titles of other publications referred to in this Standard are listed in annex C.

2 Normative references

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

IEC 60050(801):1984, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 801: Acoustics and electro-acoustics*

IEC 60150:1963, *Testing and calibration of ultrasonic therapeutic equipment*

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

3 Definitions

3.1 acoustic streaming: Steady-state fluid motion which develops under certain conditions in a sound field.

3.2 far field: Sound field at a distance from the source where the sound pressure decreases monotonically with increasing distance from the source. In general, this is the region of the sound field where the specific acoustic impedance, i.e. the complex ratio of sound pressure to particle velocity, is substantially equal to ρc , ρ being the density and c the velocity of sound in the sound-propagating medium.

3.3 champ libre: Champ acoustique dans un milieu homogène et isotrope dont les limites exercent une influence négligeable sur les ondes acoustiques. [VEI 801-03-28 modifié.]

3.4 champ proche: Région du champ acoustique située à une distance de la source inférieure à celle du début du **champ lointain**. C'est en général la région du champ acoustique où l'impédance acoustique complexe spécifique diffère notablement de ρc .

3.5 puissance de sortie: Moyenne temporelle de la puissance acoustique émise par un **transducteur ultrasonore** dans un **champ** quasi **libre** dans des conditions spécifiées dans un milieu spécifié, l'eau de préférence.

Symbole: P

Unité: watt, W

3.6 force de radiation; force de radiation 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

3.7 pression de radiation; force acoustique de radiation: Force de radiation par unité d'air.

3.8 cible: Dispositif conçu spécialement pour être placé dans un champ acoustique et servir d'objet sur lequel la **force de radiation** qui s'y exerce sera mesurée.

3.9 transducteur ultrasonore: Dispositif capable de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et/ou réciproquement dans le domaine des fréquences ultrasonores.

4 Liste des symboles

a = rayon d'un **transducteur ultrasonore** servant de source

c = vitesse du son (généralement dans l'eau)

d = distance focale géométrique d'un **transducteur ultrasonore** focalisé

F = **force de radiation** sur une **cible** dans la direction de propagation d'une onde ultrasonore

g = accélération de la pesanteur

k = $(= 2\pi/\lambda)$ nombre d'onde circulaire

P = **puissance de sortie** d'un **transducteur ultrasonore**

s = $(= x \lambda/a^2)$ distance normalisée par rapport à la longueur du **champ proche**

x = distance entre la **cible** et le **transducteur ultrasonore**

α = coefficient d'atténuation en amplitude d'ondes planes dans un milieu (généralement dans l'eau)

γ $(= \arcsin a/d)$ angle de focalisation d'un **transducteur ultrasonore** focalisé

θ = angle entre la direction de propagation de l'onde ultrasonore et la normale à la surface réfléchissante d'une **cible**

λ = longueur d'onde ultrasonore.

3.3 free field: A sound field in a homogeneous isotropic medium whose boundaries exert a negligible effect on the sound waves. [IEV 801-03-28 modified.]

3.4 near field: Sound field at distances from the source smaller than the distance at which the **far field** begins. In general, this is the region of the sound field where the complex specific acoustic impedance differs appreciably from ρc .

3.5 output power: Time-average ultrasonic power radiated by an **ultrasonic transducer** into an approximately **free field** under specified conditions in a specified medium, preferably water.

Symbol: P

Unit: watt, W

3.6 radiation force; acoustic radiation force: Time-average force acting on a body in a sound field and caused by the sound field; or, more generally: time-average force in a sound field, appearing at the boundary surface between two media of different acoustic properties.

Symbol: F

Unit: newton, N

3.7 radiation pressure; acoustic radiation pressure: Radiation force per unit area.

3.8 target: A device specially designed to be inserted into the ultrasonic field and to serve as the object on which the **radiation force** is to be measured.

3.9 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.

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 propagation direction of an ultrasonic wave

g = acceleration due to gravity

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

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

s = $(= x \lambda/a^2)$ distance normalized to the **near-field** length

x = distance between a **target** and an **ultrasonic transducer**

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

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

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

λ = ultrasonic wavelength.

5 Prescriptions pour les balances à force de radiation

5.1 Généralités

La balance à **force de radiation** doit comporter une **cible** reliée à une balance. Le faisceau acoustique doit être dirigé verticalement, vers le haut ou le bas, sur la **cible** et la **force de radiation** exercée par le faisceau acoustique doit être mesurée à l'aide de la balance. La puissance acoustique doit être déterminée à partir de la différence entre les forces avec et sans champ acoustique, selon les formules données en annexe A. L'étalonnage peut être réalisé au moyen de poids de précision de faibles masses connues.

5.2 Caractéristiques de la cible

La **cible** doit avoir des caractéristiques acoustiques connues en ce qui concerne les détails qui relient la puissance à la **force de radiation**. Habituellement on s'efforce d'approcher au mieux un des deux cas de figure suivants: l'absorbant parfait ou le réflecteur parfait [4]. Il convient que la compressibilité soit aussi faible que possible afin d'éviter toute variation de flottaison avec la pression ambiante. Il convient, par ailleurs, de prendre les précautions nécessaires pour rendre aussi grande que possible la stabilité de la flottaison de la **cible**.

5.2.1 Cible absorbante

La **cible** absorbante (voir figure 1) doit avoir:

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

Des disques d'élastomère approprié avec ou sans angles vifs sont généralement utilisés comme **cibles**; le matériau doit contenir des inhomogénéités pour accroître les caractéristiques absorbantes.

La figure 2 montre un exemple d'absorbeur à pointes. Dans ce cas, la concentration en inhomogénéités augmente de zéro aux angles vifs à 30 % en volume à l'arrière. Des sphères de verre creuses d'un diamètre de l'ordre de un dixième de millimètre sont utilisées comme inhomogénéités; elles ont une influence limitée sur la densité et la compressibilité de l'élastomère.

5.2.2 Cible réfléchissante – Généralités

La principale difficulté est de réduire la compressibilité de la **cible** réfléchissante parce que les variations de la pression ambiante font fluctuer le volume et donc la flottaison de la **cible**, proportionnellement à sa compressibilité. Des réflecteurs acoustiques normalement réalisés au moyen de plaques minces planes de métal avec la face arrière exposée à l'air ne peuvent pas être utilisés. Des erreurs énormes peuvent être commises avec des réflecteurs métalliques massifs inclinés à 45° du faisceau [5].

Des cônes réflecteurs creux en verre épais ou en métal mince avec la face arrière exposée à l'air sont utilisables. Des cônes réflecteurs en mousse plastique rigide recouverts d'une très mince couche métallique se sont révélés être des **cibles** convenables [4].

5.2.3 Cible réfléchissante – convexe

La figure 3 montre un réflecteur conique convexe. Le demi-angle du cône est généralement de 45°, de sorte que les ondes réfléchies partent normalement à l'axe du faisceau.

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 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, according to the formulae given in annex A. Calibration can be carried out by means of small precision weights of known mass.

5.2 Target type

The **target** shall have known acoustic properties, these being relevant to the details of the relation between ultrasonic power and **radiation force**. Usually, the aim is to approach most closely one of the two extreme cases: perfect absorber or perfect reflector [4]. The compressibility should be as low as possible in order 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**.

5.2.1 Absorbing target

An absorbing **target** (see figure 1) shall have:

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

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

Figure 2 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. 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.

5.2.2 Reflecting target – General

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 which are normally realized by means of air-backed thin metal plates cannot be applied. Using solid metal plates as reflectors, that are adjusted under an angle of 45° to the sound beam axis, may cause an enormous error [5].

Cone-shaped reflectors made of thick-walled hollow bodies or of air-backed thin metal plates are applicable. 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** [4].

5.2.3 Reflecting target – convex

A conical reflector of the convex type is shown in figure 3. The cone half-angle is typically chosen to be 45°, so that the reflected wave leaves at right angles to the ultrasound beam axis.

5.2.4 Cible réfléchissante – concave

La figure 4 montre un réflecteur conique concave. Le demi-angle du cône est généralement de l'ordre de 60° à 65°, de sorte que l'onde réfléchie se rapproche davantage du **transducteur ultrasonore** qu'avec un réflecteur convexe.

5.3 Diamètre de la cible

La **cible** doit avoir un diamètre suffisant pour intercepter toutes les parties significatives du champ. Ce diamètre doit être égal à au moins 1,5 fois la dimension correspondante (c'est-à-dire le diamètre) du **transducteur ultrasonore**. Le diamètre nécessaire dépend de la forme du champ et de la distance de la **cible** au **transducteur ultrasonore**.

Une formule d'évaluation [6] est donnée ci-dessous pour la valeur minimale du rayon b de la **cible** qui donnerait une **force de radiation** égale à au moins 98 % de la **force de radiation** 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 écranté de rayon a fonctionnant en piston, vibrant en régime permanent dans un milieu non absorbant. La formule est la suivante:

$$b = a [1/(1 + 0,53 \tau_1 s) + \tau_1 s] \quad (1)$$

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

x 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;

$s = x \lambda / a^2$ est la distance normalisée par rapport à la longueur du **champ proche** entre la **cible** et le **transducteur ultrasonore** normalisé.

L'équation (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** sera considérée à part.

Par précaution, il convient que b ne soit jamais inférieur à $1,5 a$, même si la formule ci-dessus l'autorise.

5.4 Microbalance/Système de mesurage de la force

La balance à **force de radiation**, pour les besoins de cette norme, est gravimétrique et le faisceau est, en conséquence, vertical.

NOTE – Une orientation horizontale du faisceau peut être intéressante car les effets thermiques, tels que changements de flottaison et courants de convection, seraient réduits. Un dispositif à faisceau horizontal est décrit en [7].

5.2.4 Reflecting target – concave

A conical reflector of the concave type is shown in figure 4. 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.

5.3 Target diameter

The **target** diameter shall be large enough to intercept all significant parts of the field, and shall be at least 1,5 times larger than the appropriate dimension (e.g. the diameter) of the **ultrasonic transducer**. The necessary diameter value depends on the field structure and on the distance of the **target** from the **ultrasonic transducer**.

In the following, an assessment formula [6] 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 piston **ultrasonic transducer** of radius a in a non-absorbing medium. The formula is:

$$b = a [1/(1 + 0,53 \tau_1 s) + \tau_1 s] \quad (1)$$

with

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

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

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

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

where

x 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;

$s = x \lambda / a^2$ is the distance between the **target** and the **ultrasonic transducer** normalized to the **near-field** length.

Equation (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, b should never be reduced below 1,5 a , even if this were possible according to the above equation.

5.4 Microbalance/Force measuring system

The **radiation force** balance is understood in this standard to be a gravimetric balance and, hence, the beam orientation is vertical.

NOTE – A horizontal beam orientation may potentially be of interest since thermal effects, such as convection currents and changes in buoyancy, should be reduced in that case. A measurement set-up with horizontal beam orientation is described in [7].

Le type de balance requis dépend fortement du niveau de puissance à mesurer. A une puissance de 10 mW correspond une **force de radiation** (dans l'eau et pour une **cible** absorbante) de 6,7 μN équivalent à une masse de 0,68 mg alors qu'une puissance de 10 W donne une force de 6,7 mN correspondant à une masse de 0,68 g. Dans le premier cas une microbalance électronique à tarage automatique est l'instrument le mieux adapté alors que dans le second cas une balance de laboratoire électronique ou mécanique adaptée [8] peut parfaitement être utilisée. Dans tous les cas, il est essentiel de pouvoir compenser un déplacement de la position de repos de la **cible**.

Si l'étalonnage du système balance/mesurage de la force est réalisé à l'aide de faibles poids de masse connue ou si, pour d'autres raisons la lecture du système balance/ mesurage de la force s'effectue en unités de masse, les mesures en masse doivent être multipliées par l'accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, de manière à les convertir en force. Si les mesures sont données en milligrammes (ou en grammes), la multiplication par g donne des forces en micronewtons (ou millinewtons respectivement). Quand la puissance ultrasonore est évaluée à partir de la force selon les formules données en annexe A, l'utilisation d'une célérité en mètres par seconde, comme par exemple $c = 1\,491 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans l'eau pure à 23 °C, aboutit à une puissance en microwatts (ou en milliwatts, respectivement).

5.5 Cuve du système

Si l'on utilise une **cible** réfléchissante, la cuve de mesurage doit être doublée d'un matériau absorbant.

Il est nécessaire de s'assurer que ni la **cible** ni d'autres parties de l'appareillage 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**.

5.6 Structures du support de cible

Dans les balances statiques, il convient de concevoir les éléments de structure portant la **cible** et transmettant la **force de radiation** à travers l'interface entre l'air et l'eau de manière que l'effet de tension de surface soit le plus faible possible.

Si la **cible** est suspendue par des fils qui traversent la surface du liquide, il convient alors qu'ils aient un diamètre aussi faible que possible afin de limiter les erreurs de mesure, éventuellement causées par un mauvais mouillage du fil ou par des poussières. Les forces perturbatrices peuvent être de l'ordre de 0,1 μN . L'utilisation de fil de faible diamètre est encore plus importante dans le cas où le **transducteur ultrasonore** surplombe la **cible** (rayonnement vers le bas) et où plusieurs fils sont nécessaires, comme en figure 4.

NOTE – Un fil de platine-iridium de 50 μm de diamètre convient.

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**.

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 μN 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 [8] may be used. In any case, compensation of the **target** displacement at the position of rest is essential.

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 $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, in order 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 according to the formulae given in annex A, the use of a sound velocity value in metres per second, as for example $c = 1\,491 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in pure water at 23 °C, then yields a power in microwatts (or in milliwatts, respectively).

5.5 System tank

If a reflecting **target** is used, an absorbing lining of the measuring vessel shall be used.

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 **freefield** value.

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 should be designed to minimize the effect of surface tension.

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. Disturbing forces may be of the order of 0,1 μN . 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 4.

NOTE – Platinum-iridium wire of diameter 50 μm is suitable.

5.7 Transducer positioning

The **ultrasonic transducer** mount shall be such as to ensure stable and reproducible positioning of the **ultrasonic transducer** with respect to the **target**.

5.8 Feuillet contre les courants

Lorsque l'absorption d'énergie le long du faisceau ne peut être négligée (long trajet acoustique et/ou haute fréquence [9]), **des courants acoustiques** peuvent apparaître.

On place souvent des feuillets fins en plastique sur le trajet du faisceau afin de réduire les courants qui prennent naissance dans le liquide de mesurage. Quand on utilise de tels feuillets, deux conditions aux limites doivent être remplies: le feuillet doit être placé près de la **cible** et ne doit pas être parallèle à la face active du **transducteur ultrasonore** [10].

Deux sortes de courant peuvent être considérées: le courant de convection, comme dans le cas par exemple d'un échauffement du **transducteur ultrasonore** en fonctionnement et le **courant acoustique** associé à l'atténuation acoustique et qui, en conséquence, se rencontre surtout pour les fréquences élevées.

L'épaisseur d'un feuillet, s'il en est fait usage, doit être aussi faible que possible pour optimiser ses caractéristiques de transmission. Cet aspect est essentiel aux fréquences élevées. Il convient que le coefficient de transmission soit connu théoriquement ou expérimentalement et les corrections correspondantes apportées si son influence est trop grande.

Le feuillet doit être positionné avec une légère incidence pour éviter que l'onde réfléchi n'arrive sur la face active du **transducteur ultrasonore** avec une phase constante sur toute sa surface [10].

5.9 Couplage à transducteur

Pour des mesurages précis, il convient que le **transducteur ultrasonore** soit couplé directement au liquide de mesurage afin d'éviter un changement d'impédance par le feuillet de couplage ajouté. Cela est particulièrement important pour les balances de haute précision très sensibles dans lesquelles le faisceau ultrasonore est dirigé verticalement vers le haut [11], [12] (figures 1 et 3). Il est particulièrement important d'éviter dans les mesurages le changement d'impédance provoqué par l'addition d'une membrane de couplage dans le cas de **transducteurs ultrasonores** à fort coefficient de surtension Q .

NOTE – Un **transducteur ultrasonore** avec la face arrière exposée à l'air, par exemple, peut être fortement perturbé par la pression de surface.

Des schémas détaillés de dispositifs éprouvés permettant des mesurages aisés avec une membrane de couplage sont donnés en [13]. Ils devraient fonctionner correctement dans la plupart des mesurages effectués sur des **transducteurs ultrasonores** à large bande à condition que le feuillet contre les courants soit disposé correctement comme cela est exigé en 5.8 et que son efficacité soit vérifiée séparément.

5.10 Etalonnage

La balance à **force de radiation** doit être étalonnée au moyen de poids petits de masse connue. Il convient, aussi, que la balance à **force de radiation** soit étalonnée au moyen d'un **transducteur 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 y a un indice que la sensibilité de la balance à la puissance ultrasonore a changé.

5.8 Anti-streaming foils

If the energy absorption along the sound path cannot be neglected (long sound path and/or high frequency [9]) **acoustic streaming** can take place.

To reduce streaming effects in the measuring liquid, thin plastic foils are often put into the sound path. When using these foils two boundary conditions shall be fulfilled : the foil shall be positioned close to the **target** and shall not be oriented parallel to the surface of the **ultrasonic transducer** [10].

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.

If a foil is used its thickness shall be as small as possible in order to optimize its transmitting properties. This aspect is of major concern at high frequencies. The transmission coefficient should be known from theory or experiment and a correction shall be applied if its influence is too high.

The foil shall be positioned at a slightly oblique angle in order to prevent the reflected ultrasonic wave from arriving at the **ultrasonic transducer** with a phase which is constant all over the **ultrasonic transducer** surface [10].

5.9 Transducer coupling

For precision measurements, the **ultrasonic transducer** should be coupled directly to the measurement liquid in order 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 [11], [12] (figures 1 and 3). Avoiding the impedance transformation caused by the addition of a coupling foil is particularly important in measurements on high-Q **ultrasonic transducers**.

NOTE – An air-backed **ultrasonic transducer**, for example, can be strongly affected by surface pressure.

Detailed technical drawings of a proven device for convenient measurements with a coupling membrane are given in [13]. 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 effectiveness is independently verified.

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 transducer** 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 Prescriptions pour les conditions de mesurage

6.1 Position latérale du transducteur

Pour une **cible** réfléchissante conique convexe, on portera attention au fait 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 rayonnée et de la réalisation pratique de la suspension de la **cible**.

6.2 Distance du transducteur à la cible

La distance de la face du **transducteur ultrasonore** à la **cible** ou d'un feuillet (s'il en est fait usage) à la **cible** doit être aussi faible que possible du fait que les **courants acoustiques** prennent naissance en raison de l'absorption ultrasonore au long du faisceau acoustique.

Une **cible** absorbante peut toujours être positionnée suffisamment près du **transducteur ultrasonore** pour éliminer les effets d'un champ divergent.

Pour une **cible** réfléchissante conique concave, il est indispensable d'éviter toute interférence de l'onde réfléchie sur le **transducteur ultrasonore**. Ce type de **cible** doit donc être placé à une distance d'au moins 30 mm de la face du **transducteur ultrasonore** [14], variable selon les configurations. Un faisceau divergent peut provoquer des erreurs dans les mesurages.

L'apex d'une **cible** réfléchissante convexe, par ailleurs, peut être placé virtuellement 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 frappe le réflecteur conique, ceci peut survenir sous des angles d'incidence différents de ceux retenus dans la formule de l'onde plane et amener une réduction de la **force de radiation** réelle. Si un doute existe quant à une collimation insuffisante du faisceau du **transducteur ultrasonore** en question (ce qui peut arriver essentiellement pour de faibles valeurs de ka , ce qui signifie à des fréquences basses et/ou de faibles diamètres du **transducteur ultrasonore**), on fera varier la distance entre le **transducteur ultrasonore** et la **cible** et on fera des mesures répétitives. Toute décroissance de la **force de radiation** 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.

6.3 Eau

Lorsqu'on utilise une balance à **force de radiation**, l'on doit utiliser l'eau comme liquide pour le mesurage.

Seule de l'eau dégazée doit être utilisée pour les mesurages de **puissance de sortie** au-dessus de 1 W afin d'éviter la cavitation. A des niveaux de **puissance de sortie** inférieurs, 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 que des bulles d'air ne collent pas à la surface du **transducteur ultrasonore** ou de la **cible**.

Le dégazage de l'eau est obtenu en la faisant bouillir durant 15 min à la pression atmosphérique ou en la soumettant à une pression inférieure à 4 kPa pendant plus de 3 h. On procédera à un dégazage au moins une fois pendant la période de 12 h précédant chaque mesurage, à moins de faire usage de méthodes particulières de stockage (voir CEI 60150).

6 Requirements for measuring conditions

6.1 Lateral transducer 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 power as well as on the kind of suspension used for the **target**.

6.2 Transducer/Target separation

The distance between the **ultrasonic transducer** surface and the **target**, or foil (if used) and **target**, shall be as small as possible in view of the fact that any **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 of at least 30 mm from the face of the **ultrasonic transducer** [14], depending on the individual details of the situation. This may lead to errors in measurements in the case of a divergent field structure.

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.

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, in order 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**.

Degassing of water shall be accomplished by boiling it for 15 min at atmospheric pressure, or by subjecting it to a reduced pressure of not more than 4 kPa for more than 3 h. Degassing shall be carried out at least once within the 12 h period preceding each measurement series unless special storage methods are used (see IEC 60150).

6.4 Mouillage

De façon à obtenir un mouillage parfait des surfaces du **transducteur ultrasonore**, de la **cible** et du feuillet, il convient de maintenir ces parties au moins plusieurs heures dans de l'eau dégazée avant de procéder au mesurage. On veillera à ce que les bulles d'air aient disparu des faces actives avant le mesurage.

NOTE – Une dérive légère du poids apparent d'une cible absorbante peut se produire plusieurs heures après la mise en eau du fait de la résorption du matériau absorbant.

6.5 Conditions d'environnement

Pour la réalisation de mesurage de puissances de l'ordre du milliwatt et du microwatt, l'appareil de mesurage doit être isolé thermiquement et protégé contre les vibrations et courants d'air ambiants.

La cuve de mesurage doit en outre être presque close afin d'éviter 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.

6.6 Dérives thermiques

Il est nécessaire, dans le cas d'une **cible** absorbante, de procéder à un enregistrement du signal avant et après l'excitation et l'arrêt du **transducteur ultrasonore** de manière à pouvoir procéder à une estimation des effets thermiques (dilatation et changement de flottaison) dus à l'absorption de l'énergie acoustique; l'utilisation d'une balance électronique est fortement recommandée dans ce cas.

7 Incertitude de mesurage

7.1 Evaluation des incertitudes de mesurage

En raison de la grande diversité des montages de mesurage utilisés, une analyse d'incertitude valable pour tous les montages possibles n'est pas possible immédiatement. C'est pourquoi une estimation de l'incertitude de mesurage globale ou une évaluation de précision doivent être déterminées de manière individuelle pour chaque montage utilisé. Il est recommandé que cette évaluation comprenne les éléments suivants.

7.1.1 Système d'équilibrage à suspension de cible

Il est de règle, avant tout mesurage, que le système d'équilibrage soit vérifié ou étalonné en utilisant des petits poids de masse connue. Il est important que cela soit fait avec l'ensemble du système préparé pour des mesurages de forces de radiation, c'est-à-dire avec la **cible** suspendue dans l'eau. Ainsi, toute influence possible du fil de suspension pénétrant la surface de l'eau est automatiquement prise en compte.

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

Il est recommandé d'archiver les résultats de ces vérifications pour permettre un jugement de la stabilité à long terme du facteur d'étalonnage d'équilibrage.

6.4 Water contact

A perfect wetting (water contact) of the **ultrasonic transducer** surface, **target**, and foil should be achieved by storing these parts for at least several hours in degassed water before the measurements are undertaken. Before starting the measurements, care shall be taken to ensure that all air bubbles are removed from the active faces.

NOTE – A small drift in the apparent weight of an absorbing **target** may occur during several hours after the beginning of the water storage, due to water resorption of the absorbing material.

6.5 Environmental conditions

For measurements in the milliwatt and microwatt region the measuring device shall be provided with thermal isolation and protected against environmental vibrations and air flow.

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

6.6 Thermal drifts

For an absorbing **target**, in order to be able to estimate the thermal effects due to the absorbed sound energy (expansion and buoyancy change), a recording of the measured signal before and after the switch-on and switch-off of the **ultrasonic transducer** is necessary, and the use of an electronic balance is highly recommended in this case.

7 Measurement uncertainty

7.1 Assessment of measurement uncertainties

Due to the great variety of measurement arrangements used, an uncertainty analysis valid for all possible arrangements is not immediately possible. Therefore, 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.

7.1.1 Balance system including target suspension

As a rule, prior to the measurement, the balance system shall be checked or calibrated using small weights of known mass. It is important that this be done with the whole system prepared for radiation force measurements, i.e., with the **target** suspended in water. Thus, any potential influence of the suspension wire penetrating the water surface is automatically taken into account.

This procedure shall be repeated several times with each weight in order to obtain an indication of the random scatter of results. An uncertainty estimate for the balance calibration factor can 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.

7.1.2 Linéarité du système d'équilibrage

La linéarité du système d'équilibrage doit être vérifiée au moins tous les deux mois comme suit.

Les mesurages décrits en 7.1.1 doivent être effectués avec au moins trois poids de masse différente dans la gamme de sortie d'équilibrage concernée. La lecture d'équilibrage en fonction de la masse d'entrée peut être représentée sur un graphique en conformité avec la figure 5. Idéalement, il convient que les points qui en résultent dans ce graphique soient sur une ligne droite commençant à l'origine des coordonnées. Si des déviations interviennent sur cette ligne, une contribution d'incertitude complémentaire doit en être déduite.

Etant donné que les poids de moins de 10 mg sont difficiles à manipuler, la vérification de linéarité d'équilibrage peut également être effectuée au moyen d'un **transducteur ultrasonore** à propriétés connues, activé par différents niveaux d'amplitude de tension et donc produisant des forces de radiation de magnitudes différentes. Dans ce cas, la grandeur d'entrée en abscisse de la figure 5 est la **puissance de sortie** ultrasonore du transducteur.

7.1.3 Extrapolation au moment de commutation du transducteur ultrasonore

Dans le cas d'un équilibrage électronique, pour obtenir la valeur de **force de radiation**, le signal de sortie d'équilibrage est en général enregistré en fonction du temps et extrapolé en revenant au moment de commutation du **transducteur ultrasonore**. Cette extrapolation entraîne une incertitude, qui dépend essentiellement de la quantité de diffusion dans le signal de sortie d'équilibrage (rapport signal à bruit). L'incertitude du résultat d'extrapolation peut être estimé au moyen de procédures mathématiques normalisées en utilisant l'algorithme de régression.

7.1.4 Imperfections de la cible

A proprement parler, une connaissance du moment porté par toutes les ondes indésirables émanant de la **cible** dans toutes les directions serait nécessaire pour évaluer l'influence des imperfections de **cible** sur la précision des mesurages d'équilibrage de la **force de radiation**. Comme cette connaissance n'est pas disponible, en pratique, une approche simplifiée en onde plane décrite ci-dessous est considérée comme suffisante. Avec l'hypothèse de l'onde plane, la **force acoustique de radiation** est égale à la densité d'énergie acoustique totale. L'onde transmise par une **cible** absorbante (voir figure 1) vers l'avant conduit à une réduction de la **force de radiation**, la réduction étant déterminée par la densité d'énergie transmise, c'est-à-dire par la densité d'énergie existant derrière la **cible**. La magnitude de cet effet peut être déterminée en utilisant la **cible** comme un obstacle et en effectuant un mesurage de **force de radiation** au moyen d'une **cible** complémentaire, 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 1 doublera la baisse de la **force de radiation** mesurée.

L'onde réfléchie ou diffusée en retour par une **cible** absorbante conduit à une augmentation de la **force de radiation** 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 du réflecteur parfait. Cependant, pour une **cible** avec une structure de surface, ce mesurage ne détermine que le composant cohérent dans l'espace et n'indique pas l'énergie réfléchie totale. Dans ce cas, l'énergie réfléchie devrait être évaluée à l'aide d'un hydrophone (de type acoustiquement transparent, c'est-à-dire un hydrophone à membrane) et en intégrant le 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 donner une limite supérieure à la réflexion (par exemple la réflexivité d'une version plane équivalente). En plus de l'augmentation de la force de radiation mesurée, la réflexion émanant de la **cible** peut également avoir un effet en retour sur le **transducteur ultrasonore** pour modifier ses caractéristiques de sortie [10]. Cet effet d'interférences peut être minimisé en inclinant légèrement la **cible** ou en utilisant une meilleure **cible**. Si une interférence apparaît, cela donnera lieu à des oscillations dans la **force de radiation** qui peuvent être observées en faisant varier la fréquence ou la distance **cible/transducteur ultrasonore** [10]. L'incertitude due à tout effet d'interférence résiduelle peut être évaluée à partir des amplitudes d'oscillation.

7.1.2 Linearity of the balance system

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

The measurements described in 7.1.1 shall be done 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 in a graph in accordance with figure 5. The resulting points in 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 these.

Since weights of less than 10 mg are difficult to handle, the balance linearity check can also be done 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 5 is the ultrasonic **output power** of the transducer.

7.1.3 Extrapolation to the moment of switching the ultrasonic transducer

In the case of an electronic balance, in order to obtain the **radiation force** value, the balance output signal is usually 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 can be estimated by means of standard mathematical procedures in utilizing the regression algorithm.

7.1.4 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** (see figure 1) 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 1 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 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 [10]. This interference effect can be minimised by slightly tilting the **target** or by using a better **target**. If the interference occurs, it will give rise to oscillations in the **radiation force**, which can be observed by varying the frequency or the **target/ultrasonic transducer** distance [10]. The uncertainty due to any residual interference effects can be assessed from the oscillation amplitudes.

Dans le cas de **cibles** réfléchissantes, la discussion précédente concernant l'onde transmise et son influence est également valable. Cependant, il n'est pas exclu que les ondes réfléchies viennent à la fois de la **cible** et de tout absorbeur latéral (voir figure 3) et c'est pourquoi il faut les considérer avec plus de soin.

En général, l'évaluation de précision la plus sûre sera obtenue en comparant les mesurages faits avec différents types de **cibles**. Les propriétés acoustiques des **cibles** varient de manière importante avec la fréquence et ainsi il faut faire toute évaluation d'incertitude séparément pour chaque fréquence concernée. Il est particulièrement difficile d'obtenir une bonne conception de **cible** pour des fréquences inférieures à 2 MHz.

7.1.5 Géométrie de la cible réfléchissante

Comme discuté à l'article A.2, l'angle de cône d'une **cible** réfléchissante conique a une influence sur le résultat de mesurage. De manière plus spécifique, si le demi-angle du cône d'un réflecteur de type convexe de 45° nominal se situe à $45^\circ \pm 1^\circ$, l'incertitude de puissance qui en résulte est de $\pm 3,5\%$. Si le demi-angle du cône d'un réflecteur de type concave de 63° nominal (ce qui signifie que $\theta = 27^\circ$, suivant la notation donnée à l'article A.2) se situe à $63^\circ \pm 1^\circ$, l'incertitude de puissance qui en résulte est de $\pm 1,8\%$.

7.1.6 Absorbeurs latéraux dans le cas de mesurages de la cible réfléchissante

Les imperfections des absorbeurs latéraux dans le montage de la figure 3 donnent lieu à des ondes réfléchies qui retournent vers la **cible** et conduisent à une augmentation de la valeur de la **force de radiation** mesurée. Ici encore, la densité d'énergie réfléchie est pertinente dans des conditions incohérentes et, une fois de plus, il n'est pas exclu que des effets d'interférence interviennent (voir 7.1.4).

7.1.7 Mauvais alignement 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 radiation** sur une **cible** parfaitement absorbante selon la formule donnée à l'article A.2 n'est pas sensible à une inclinaison de **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 à 45° conduit à une incertitude de mesurage de puissance de $\pm 3,5\%$. L'influence d'un mauvais alignement 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 un faisceau. Pour un faisceau cylindrique symétrique centré par rapport à une **cible** réfléchissante conique à 45°, la sensibilité au mauvais alignement angulaire est encore plus réduite.

7.1.8 Mauvais alignement 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 incorrectes.

Dans le cas d'une **cible** parfaitement absorbante d'une taille suffisante, la **force de radiation** apparente est proportionnelle au cosinus de l'angle de mauvais alignement. Dans le cas d'une **cible** réfléchissante conique convexe à 45°, une incertitude maximum due au mauvais alignement de $\pm 3\%$ peut être attendue si le positionnement maximum et les erreurs d'alignement angulaire de $\pm 3\text{ mm}$ et $\pm 3^\circ$ sont admises [32], ce qui paraît réaliste pour un alignement à l'oeil.

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 figure 3) 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.

7.1.5 Reflecting target geometry

As discussed in A.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 A.2) lies within $63^\circ \pm 1^\circ$, the resulting power uncertainty is $\pm 1,8\%$.

7.1.6 Lateral absorbers in the case of reflecting target measurements

Imperfections of the lateral absorbers in the arrangement of figure 3 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 7.1.4).

7.1.7 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 A.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.

7.1.8 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 [32], which appears to be realistic for an alignment by eye.

7.1.9 Température de l'eau

Compte tenu de la dépendance qui existe entre la température et la rapidité du son dans l'eau, une incertitude de mesurage de température de ± 1 °C entraînera une incertitude de mesurage de puissance de $\pm 0,2$ %.

7.1.10 Atténuation ultrasonore et courant acoustique

La valeur de puissance telle qu'elle est dérivée du mesurage d'équilibrage de la **force de radiation** 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 complémentaire déduite dans ce cas est examinée ci-dessous.

Il y a deux modèles de base expliquant la différence entre les valeurs de puissance notées ci-dessus. Le premier examine l'influence de l'atténuation ultrasonore seule. Dans ce cas, la correction est faite en incluant le facteur de correction exponentiel (voir A.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 [33] stipule que les effets de l'atténuation et le **courant acoustique** s'annulent mutuellement et que par conséquent, aucune correction n'est nécessaire. Le comportement des **cibles** réelles (à la fois absorbantes et réfléchissantes) se situerait quelque part entre ces deux modèles de base [9]. C'est pourquoi il est recommandé d'examiner un éventail d'incertitudes qui va des valeurs de puissance non corrigées telles qu'elles sont mesurées par l'équilibrage à la valeur avec pleine correction d'atténuation [17]. La contribution d'incertitude dépend de la distance de la **cible** et est particulièrement critique lorsque les mesurages sont effectués dans la gamme de fréquences supérieures en mégahertz.

Une autre procédure consiste à mesurer la puissance apparente en fonction de la distance de la **cible** et à extrapoler le résultat en arrière vers la distance zéro 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 diffusion expérimentale et ainsi des procédures mathématiques normalisées peuvent être utilisées pour estimer l'incertitude des résultats d'extrapolation.

Dans le cas d'une surface **cible** non plane, il est difficile de définir la distance **cible** effective. Il est alors judicieux 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 du sommet. Cette règle peut être appliquée lorsque des **cibles** réfléchissantes de forme conique ou des **cibles** absorbantes avec des pointes de formes pyramidale sont utilisées. Pour un faisceau cylindrique uniforme de notion incident arrivant sur une **cible** conique convexe, la distance extra effective vers la **cible** (calculée à partir du sommet) est

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

où

a est le rayon du faisceau;

β est le demi-angle du cône.

7.1.9 Water temperature

As a result of the temperature dependence of the velocity of sound in water, an uncertainty in the temperature measurement of ± 1 °C will result in a power measurement uncertainty of $\pm 0,2$ %.

7.1.10 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 below.

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 A.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 [33] 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 [9]. 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 [17]. This uncertainty contribution depends on the **target** distance and is particularly critical when the measurements are performed in the higher megahertz frequency range.

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.

7.1.11 Propriétés du feuillet

Si un feuillet de couplage ou un feuillet écran est utilisé pendant le mesurage de la **force de radiation**, la perte de transmission du feuillet telle qu'elle est mesurée ou estimée 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.

7.1.12 Taille de la cible finie

En 5.3, une formule pour la taille de **cible** minimale basée sur un critère de 2 % est indiquée. Si la largeur réelle de la **cible** est supérieure de plus de 50 % à la valeur déterminée en 5.3, il est raisonnable de prévoir une contribution d'incertitude de seulement 1 % ou même inférieure [6]. Cependant, il est recommandé de vérifier la dépendance de la **force de radiation** sur la distance de **cible**, conformément à 6.2, en tenant suffisamment compte de l'atténuation et du **courant acoustique** (voir 7.1.10).

7.1.13 Hypothèse d'une onde plane

Si le champ a une structure de champ divergente ou convergente, les formules onde plane de l'article A.2 ne sont plus strictement valables. Des estimations théoriques de la magnitude des erreurs due à la déviation par rapport à ces formules pour les champs focalisés ou les champs à faible valeur ka sont données en A.4.2 et à l'article A.5 (voir [20] et [21]).

7.1.14 Influences de l'environnement

Les incertitudes aléatoires causées par les vibrations de l'environnement et le flux d'air doivent être vérifiées en répétant les mesurages au moins trois fois. Si le **transducteur ultrasonore** est enlevé de l'appareil entre ces mesurages, une vérification de l'incertitude aléatoire causée par le mauvais alignement du **transducteur ultrasonore** est incluse.

7.1.15 Mesurage de la tension d'excitation

En général, l'incertitude dans le mesurage de la tension d'excitation appliquée au **transducteur ultrasonore** n'est pas pertinente pour le mesurage de la **puissance de sortie**. Cependant, si les mesurages de **puissance de sortie** du même **transducteur ultrasonore** sont effectués dans des laboratoires indépendants (par exemple pour des raisons de comparaison), les différences possibles dans l'amplitude de tension d'excitation doivent être prises en compte. Comme la **puissance de sortie** est proportionnelle au carré de la tension appliquée, l'incertitude de tension déterminée doit être doublée quand elle est incluse dans le chiffre d'incertitude globale.

7.1.16 Température du transducteur ultrasonore

La variation de la **puissance de sortie** avec la température du **transducteur ultrasonore** peut être importante lorsqu'on compare les mesurages faits à différents moments ou à différents endroits. Parfois, cette variation peut être très importante (par exemple 5 % par °C), en particulier avec les **transducteurs ultrasonores** à couches multiples, adaptés à l'impédance. Il n'est pas exclu que la variation de température soit causée par des modifications d'environnement ou par la dissipation de la chaleur à l'intérieur du **transducteur ultrasonore**.

Il n'est pas exclu qu'une augmentation de la température du transducteur produise également des courants de convection thermiques de nature à affecter la lecture de l'équilibrage.

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

7.1.11 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.

7.1.12 Finite target size

In 5.3, a formula for the minimum **target** size based on a 2 % criterion is stated. If the actual **target** width is more than 50 % larger than the value determined by 5.3, it is reasonable to assume an uncertainty contribution of only 1 % or even lower [6]. However, it is recommended to check the dependence of the **radiation force** on the **target** distance, according to 6.2, making due allowance for attenuation and **acoustic streaming** (see 7.1.10).

7.1.13 Plane-wave assumption

If the field has a divergent or convergent field structure, the plane-wave formulae of clause A.2 are no longer strictly valid. Theoretical estimations of the magnitude of the errors due to the deviation from these formulae for focused fields or fields with low ka values are given in A.4.2 and clause A.5 (see [20] and [21]).

7.1.14 Environmental influences

The random uncertainties caused by environmental vibrations and air flow shall be checked by repeating the measurements at least three times. If the **ultrasonic transducer** is removed from the apparatus between these measurements, a check of the random uncertainty caused by **ultrasonic transducer** misalignment is included.

7.1.15 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 carried out 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 voltage uncertainty determined shall be doubled when it is included in the overall uncertainty figure.

7.1.16 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**.

7.1.17 Non-linéarité

L'influence potentielle des non-linéarités doit être examinée en considérant les points suivants.

- a) La linéarité du système d'équilibrage 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** à propriétés connues (7.1.2) 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. S'il y a des bulles d'air ou des activités de cavitation dans le champ d'ultrasons, il n'est pas exclu que le mesurage de puissance soit très incorrect. Aucune estimation générale ne peut être donnée pour ces sources d'erreur.
- c) Il n'est pas exclu que l'atténuation acoustique et le **courant acoustique** entraînent des non-linéarités. Si la distance **cible/transducteur ultrasonore** ou la distance la plus courte de **cible** dans une expérimentation de variation de distance est inférieure à 10 mm, il est suffisant de suivre 7.1.10. Si la distance **cible/transducteur ultrasonore** ou la distance la plus courte de **cible** dans une expérimentation de variation de distance est supérieure ou égale à 10 mm, des incertitudes complémentaires dues à la non-linéarité sont susceptibles d'apparaître, mais aucune estimation générale ne peut être donnée ici.

Il n'est pas exclu que cet effet puisse être vérifié avec un **transducteur ultrasonore** de référence de **puissance de sortie** connue. Il convient de noter cependant qu'il n'est pas exclu que les non-linéarités de l'atténuation ultrasonique et du **courant acoustique** dépendent d'une forme d'onde temporelle et de la valeur de crête de la pression et que les résultats d'essai obtenus avec un **transducteur ultrasonore** de référence avec une 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 de **force de radiation** théoriques elles-mêmes peuvent être non linéaires et différer des formules de deuxième ordre données aux articles A.2 et A.5, là où les relations linéaires entre puissance et force sont indiquées. Cependant, dans la gamme de **puissance de sortie** produite par les équipements à ultrasons actuels de diagnostic et de thérapie, et tant qu'aucune information contraire n'a été obtenue, il convient de considérer la **force de radiation** 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 aux articles A.2 et A.5 comparées aux autres contributions d'incertitudes [34].

7.1.18 Remarques finales

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 fait 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 prescriptions des articles 5 et 6, une précision de mesurage globale de $\pm 10\%$ semble réalisable [15] dans la gamme de fréquence de 1 MHz à 10 MHz, avec $\pm 20\%$ hors de cette gamme de fréquence et jusqu'à 20 MHz et avec $\pm 30\%$ au-dessus de 20 MHz. Des analyses d'erreurs pour les systèmes spécifiques ont été données en [17] et [18]. Là où des **transducteurs ultrasonores** de référence calibrés sont disponibles, des mesurages d'essai les utilisant sont fortement recommandés [16].

7.1.17 Nonlinearity

The potential influence of nonlinearities shall be considered with respect to the following.

- 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 (7.1.2) 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.
- c) Ultrasonic attenuation and **acoustic streaming** may involve nonlinearities. 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 7.1.10. 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 nonlinearity are likely to occur, but no general estimate can be given here.

It may appear that this effect can be checked with a reference **ultrasonic transducer** of known **output power**. It should be noted, however, that nonlinearities 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 nonlinear and differ from the second-order formulas given in clauses A.2 and A.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**. Nonlinear deviations from the formulae given in clauses A.2 and A.5 should be considered as negligible in comparison with the other uncertainty contributions [34].

7.1.18 Concluding remarks

It is recommended to check periodically whether the overall uncertainty as determined using the above guidelines is not influenced by any other random error sources. 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, an overall measurement accuracy of $\pm 10\%$ seems to be achievable [15] in the frequency range from 1 MHz to 10 MHz, one of $\pm 20\%$ outside this frequency range and up to 20 MHz, and one of $\pm 30\%$ above 20 MHz. Error analyses for specific systems have been given in [17] and [18]. Also, where calibrated reference **ultrasonic transducers** are available, test measurements with these are highly recommended [16].

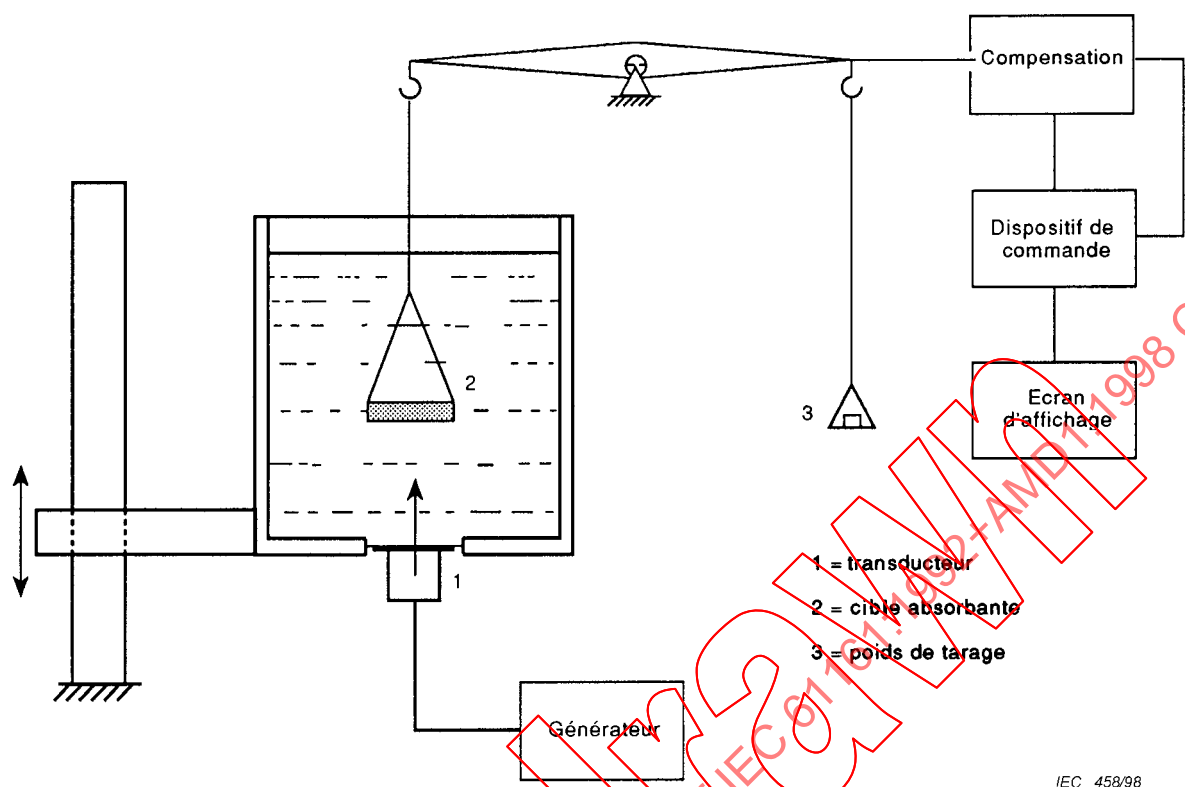


Figure 1 – Système d'équilibrage de la force de radiation à cible absorbante

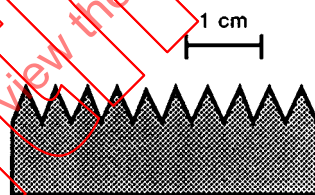


Figure 2 – Vue en coupe d'une cible absorbante

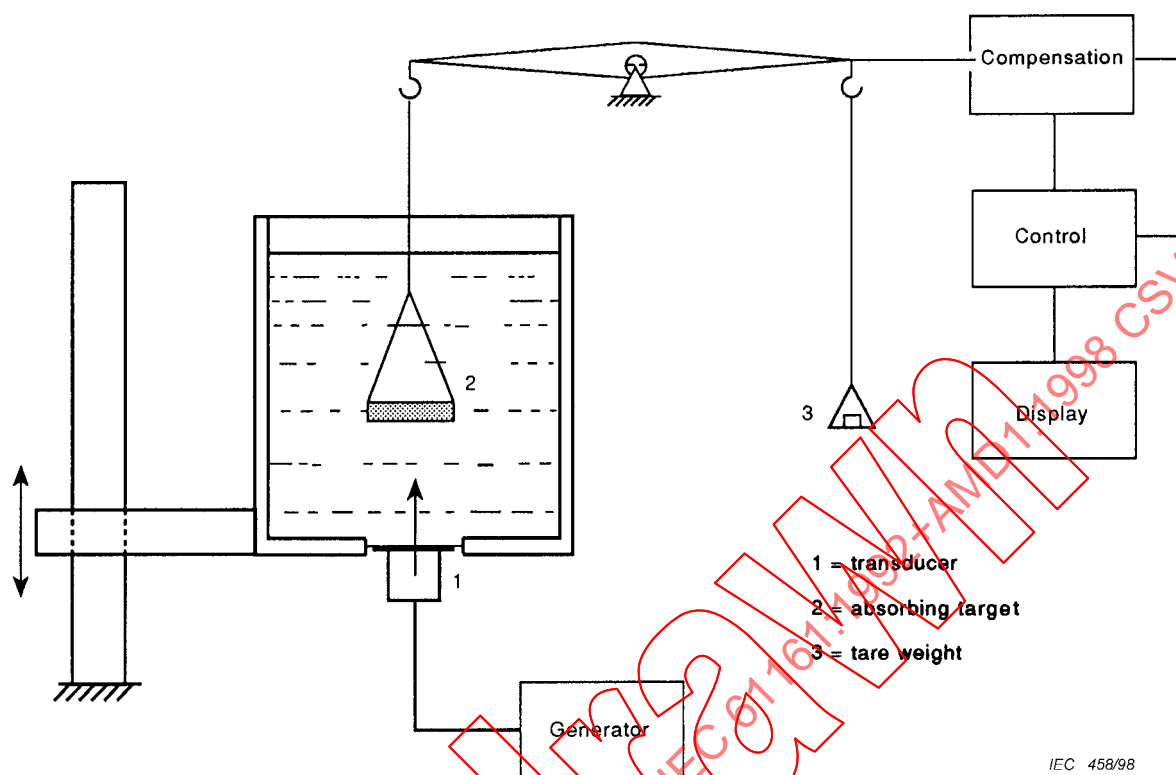
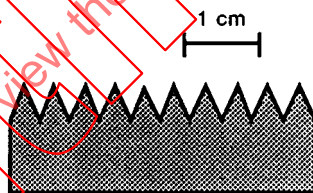


Figure 1 – Radiation force balance system with an absorbing target



IEC 747/92

Figure 2 – Section through an absorbing target

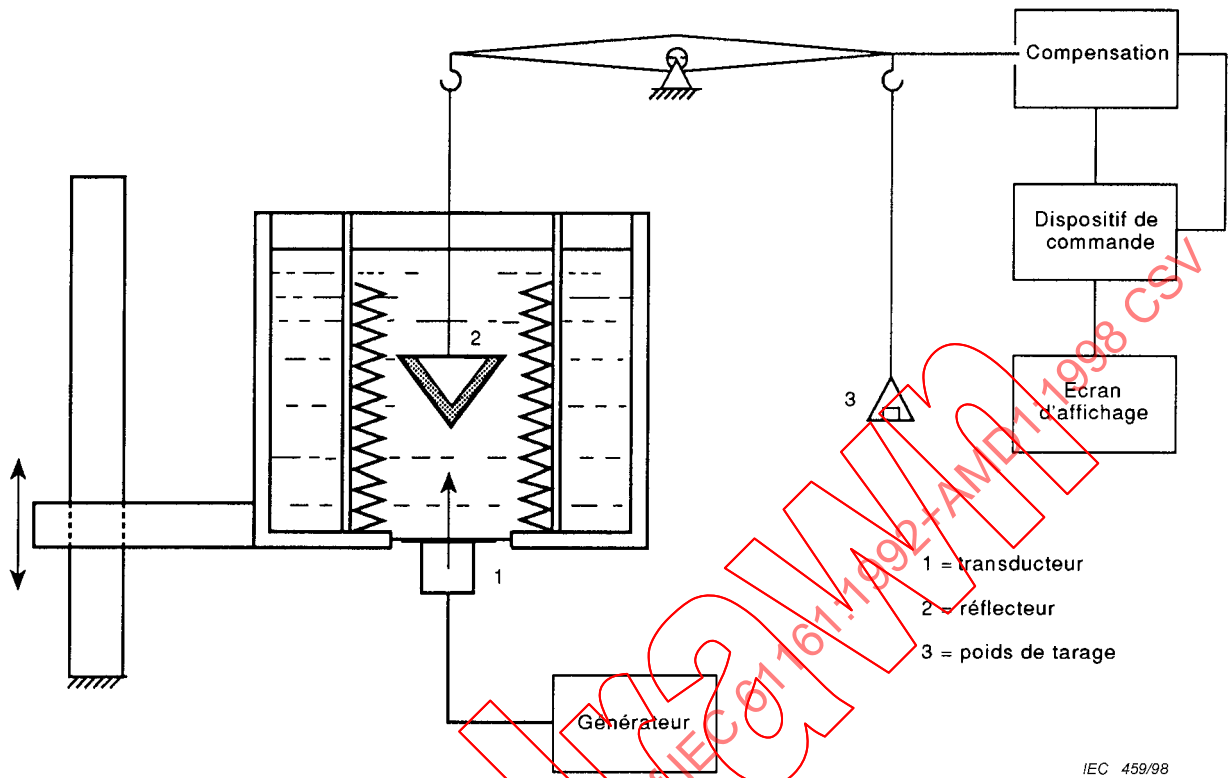


Figure 3 – Système d'équilibrage de la force de radiation à cible réfléchissante (convexe)

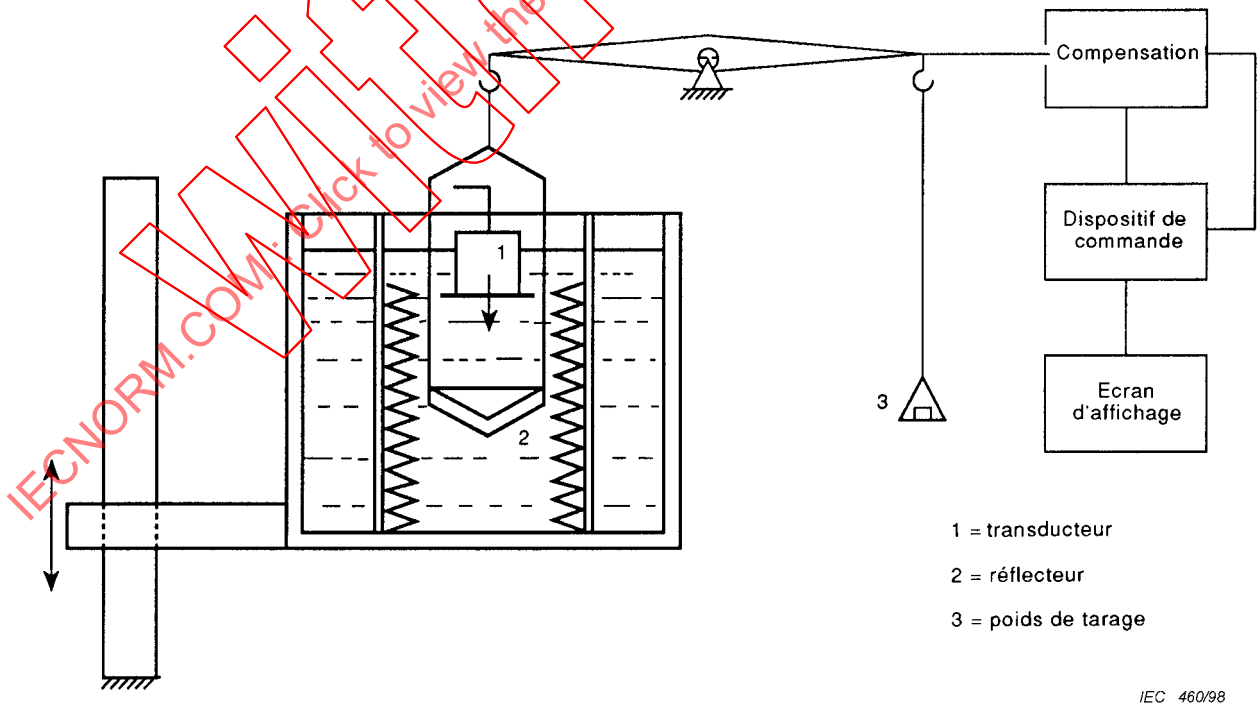


Figure 4 – Système d'équilibrage de la force de radiation à cible réfléchissante (concave)

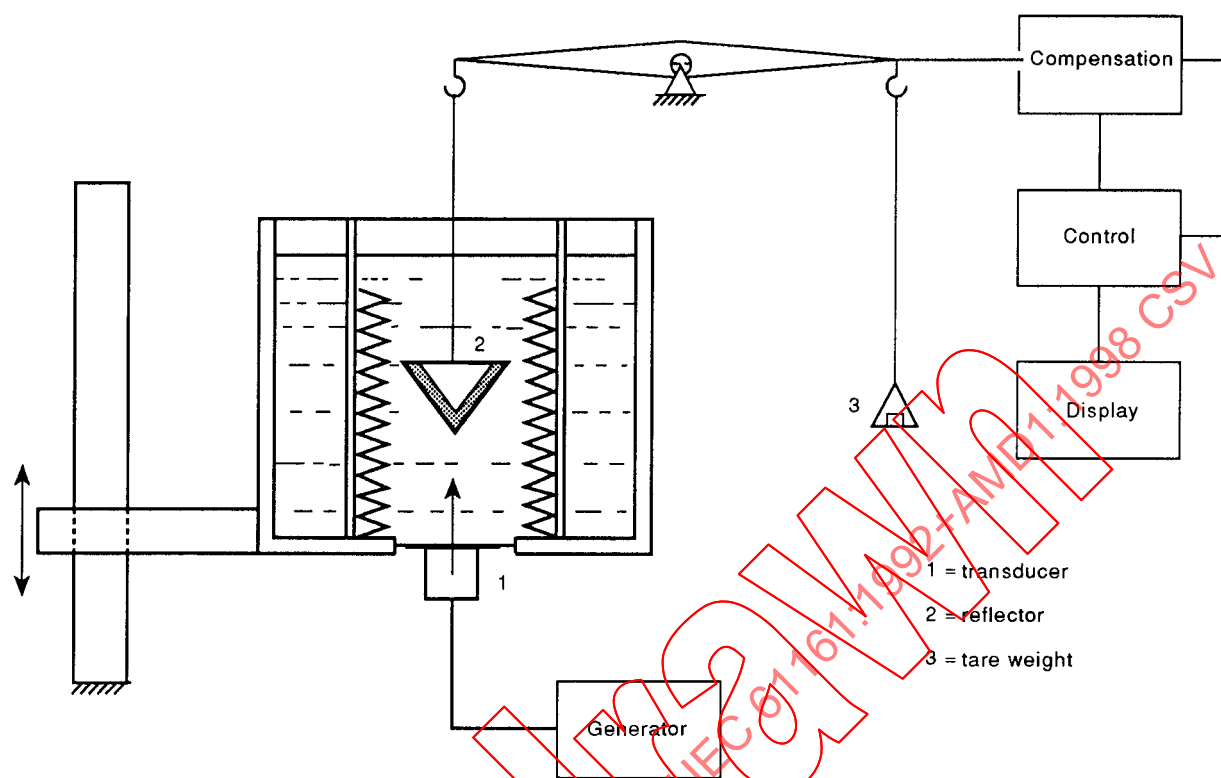


Figure 3 – Radiation force balance system with a reflecting target (convex)

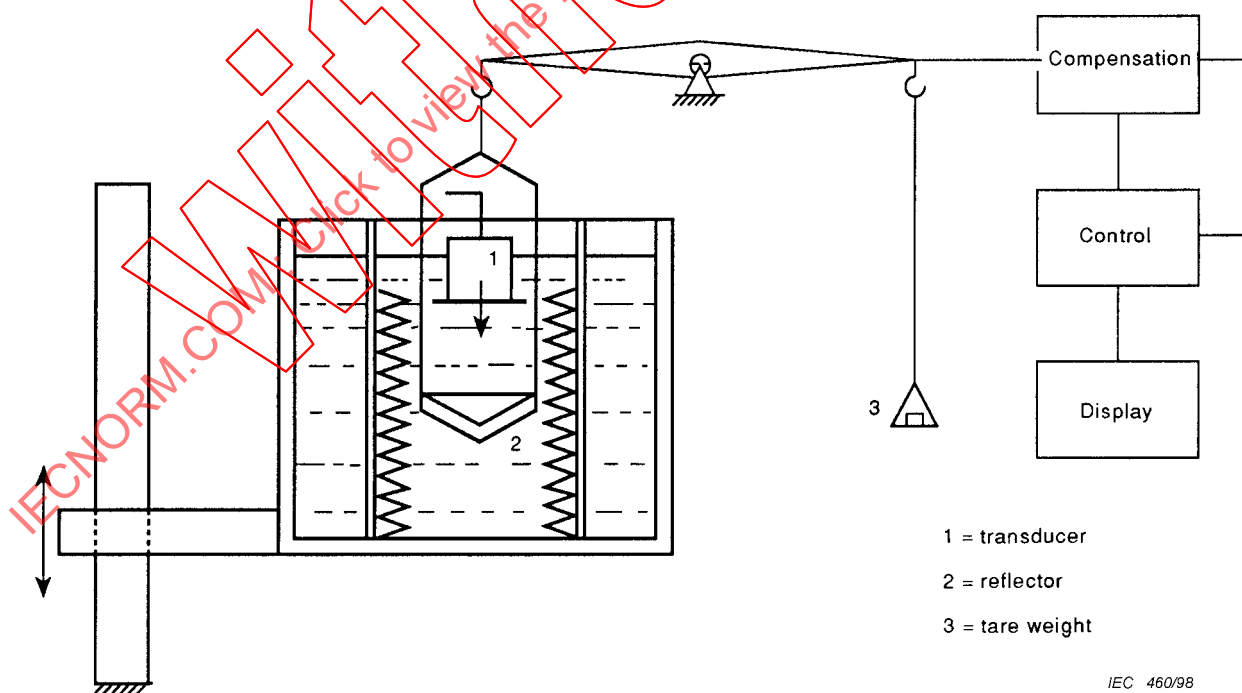
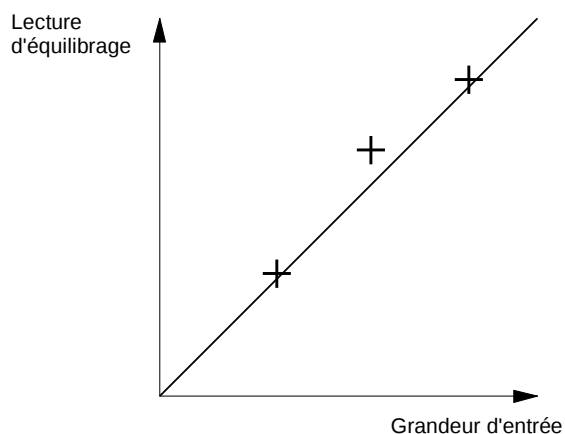


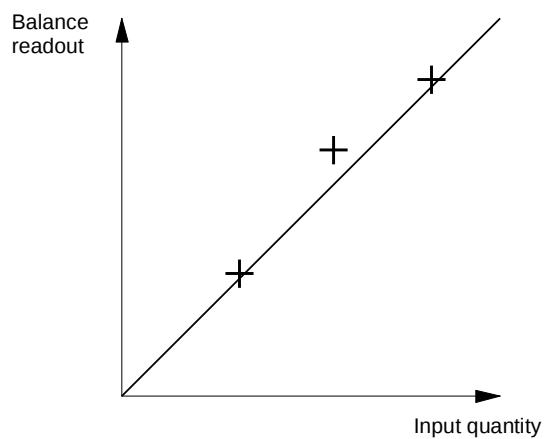
Figure 4 – Radiation force balance system with a reflecting target (concave)



IEC 136/98

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

Figure 5 – Vérification de la linéarité: lecture d'équilibrage en fonction de la grandeur d'entrée



IEC 136/98

NOTE – If the linearity check is performed by applying small weights of known mass, the input quantity is the mass of the weights used. If the linearity check is performed 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 5 – Linearity check: balance readout as a function of the input quantity

Annexe A (normative)

Formules fondamentales

A.1 Les mesurages de **force de radiation** recommandés dans cette norme sont effectués en situation de «réservoir ouvert» (condition de Langevin), soit dans un fluide en contact avec le milieu environnant et donc soumis à la pression ambiante.

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

Pour une **cible** parfaitement absorbante:

$$P = cF$$

Pour une **cible** parfaitement réfléchissante:

$$P = cF / (2 \cos^2 \theta)$$

où

c est la célérité de son dans le milieu de propagation (eau),

θ l'angle entre la direction de propagation de l'onde incidente et la normale à la surface réfléchissante (voir CEI 60150).

A.3 La formule ci-dessus implique deux hypothèses:

A.3.1 La **cible** est assez grande pour couvrir la section du faisceau acoustique, c'est-à-dire que la partie de puissance acoustique émise dans des directions autres que celle de la **cible** est négligeable devant la puissance totale.

A.3.2 Il n'y a pas d'absorption dans le milieu de propagation. S'il y a absorption, le symbole P dans la formule ci-dessus donne la puissance à l'emplacement de la **cible**. Pour convertir cela en **puissance de sortie** du **transducteur ultrasonore**, il faut multiplier par $\exp(2\alpha x)$ où x est la distance de la **cible** au **transducteur ultrasonore** et α le coefficient d'atténuation en amplitude d'onde plane. La valeur de α dans le domaine de fréquences de l'ordre du mégahertz est proportionnelle à f^2 et est donnée, par exemple, par

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

où

f est la fréquence ultrasonore (voir [19], interpolée).

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

A.4 Les formules ci-dessus sont basées sur l'hypothèse d'une onde plane. Le **champ** acoustique **proche** d'un **transducteur ultrasonore** diffère en général de celui d'une onde plane. Il est néanmoins recommandé d'utiliser ces formules pour deux raisons:

Annex A (normative)

Basic formulae

A.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 the ambient pressure.

A.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 original wave to the acoustic **output power** P of the **ultrasonic transducer**:

For a perfectly absorbing **target**:

$$P = cF$$

For a perfectly reflecting **target**:

$$P = cF / (2 \cos^2 \theta)$$

where

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

θ is the angle between the propagation direction of the original wave and the normal to the reflecting surface (see IEC 60150).

A.3 The above formulae involve two assumptions:

A.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.

A.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 $\exp(2\alpha x)$ where x 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:

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

where

f is the ultrasonic frequency (see [19], 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).

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

A.4.1 Elles n'ont jamais, expérimentalement, été invalidées pour des **transducteurs ultrasonores** pistons plans, pour des précisions de mesurage d'au moins plusieurs pour-cents typiquement.

A.4.2 Du point de vue théorique [20], le résultat basé sur l'hypothèse d'une onde plane est approximativement valable pour une source plane circulaire fonctionnant en piston à la condition que son ka soit suffisamment élevé ($k = 2\pi/\lambda$ étant le nombre d'onde dans le milieu de propagation et a étant le rayon du **transducteur ultrasonore**, les études théoriques ont été limitées au cas d'une **cible** absorbante). Par exemple, l'accord est de 2 % si $ka \geq 35$, condition qui est généralement remplie par les **transducteurs ultrasonores**. Un mauvais accord de la formule ci-dessus peut être considéré comme possible principalement pour les faibles valeurs de ka .

A.5 Il a été théoriquement mis en évidence [21] 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 radiation** pour une **cible** absorbante s'écrit alors.

$$P = 2 c F / (1 + \cos \gamma)$$

où

$\gamma = \arcsin (a/d)$ est l'angle de focalisation;

d est la distance 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 de l'onde plane lorsque $\gamma \rightarrow 0$ ou $d \rightarrow \infty$. Tant qu'une confirmation indépendante (théorique ou expérimentale) de cette forme n'aura pas été obtenue, la différence mentionnée sera au moins considérée comme possible et prise en compte sous forme d'une contribution à l'incertitude estimée dans le cas d'un faisceau focalisé.