

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61161

Première édition
First edition
1992-07

**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

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61161

Première édition
First edition
1992-07

**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 1992 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

Q

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

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	16
5.5 Cuve du système	16
5.6 Structures du support de cible	16
5.7 Positionnement du transducteur	18
5.8 Feuilletts 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
Figures	24
Annexes	
A Formules fondamentales	26
B Autres méthodes de mesurage de la puissance acoustique	30
C Bibliographie	32

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	17
5.5 System tank	17
5.6 Target support structures	17
5.7 Transducer positioning	19
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
Figures	24
Annexes	
A Basic formulae	27
B Other methods of ultrasonic power measurement	31
C Bibliography	32

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

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

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
87(BC)10 87(BC)10A	87(BC)20

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

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

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

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

DIS	Report on Voting
87(CO)10 87(CO)10A	87(CO)20

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

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.

* Les chiffres entre crochets se rapportent à l'annexe C – Bibliographie, page 32.

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.

* The figures in square brackets refer to annex C – Bibliography, page 32.

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.

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

CEI 150: 1963, *Essai et étalonnage de générateurs d'ultrasons à usage thérapeutique.*

CEI 1101: 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.

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

IEC 150: 1963, *Testing and calibration of ultrasonic therapeutic equipment*.

IEC 1101: 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 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 *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.

5.2.4 *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.

5.2.3 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 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 plane piston **ultrasonic transducer** of radius a in a non-absorbing medium. The formula is:

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

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/Système de mesure 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].

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/mesure 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/mesure 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 microneutons (ou millineutons 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 mesure 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.

5.4 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].

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 Positionnement du transducteur

Le support de **transducteur ultrasonore** doit permettre un positionnement stable et reproductible de celui-ci par rapport à la **cible**.

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 réfléchie 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.

5.7 *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 *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 150).

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 150).

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

Si l'on satisfait aux exigences des articles 5 et 6, une précision de 10 % à un niveau de confiance de 95 % semble pouvoir être obtenue [15]. Une condition importante est un comportement acoustique correct de la **cible** qui doit être contrôlée de manière indépendante. En règle générale, les problèmes pour réaliser un mesurage correct croissent avec la fréquence et la diminution de la puissance. Une analyse générale des erreurs ne peut être donnée du fait de la grande variété de réalisation pratique.

On doit faire une estimation de l'incertitude de mesure pour chaque appareil utilisé, il est recommandé d'utiliser des transducteurs de référence étalonnés pour procéder à ces essais [16].

Des analyses approximatives des erreurs sont fournies pour plusieurs systèmes [17] et [18].

La précision obtenue dépend des imperfections de la **cible**. Par exemple, l'énergie réfléchie par une **cible** absorbante dans la situation de la figure 1 conduit à une augmentation de la **force de radiation**, l'énergie ultrasonore transmise par la **cible** absorbante et apparaissant sur sa face arrière amène une diminution de la **force de radiation**. Bien pire, les ondes acoustiques retournant sur la face du **transducteur ultrasonore** et interférant avec l'onde émise peuvent conduire à des erreurs encore plus importantes car elles dépendent du coefficient de réflexion en amplitude et non en énergie [10]. Ceci s'applique de manière similaire à la situation décrite par la figure 3 où interviennent de manière importante non seulement les caractéristiques acoustiques de la **cible** réfléchissante mais aussi celles de l'absorbant des parois latérales de la cuve.

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*

When complying with the requirements of clauses 5 and 6, a measurement accuracy of $\pm 10\%$ at the 95 % confidence level should be possible [15]. One important prerequisite is an appropriate acoustic behaviour of the **target** which shall be checked independently. As a general rule, the problems in performing accurate measurements increase with increasing frequency and with decreasing power. In view of the great variety of the set-ups used a general error analysis cannot be given.

An estimation of the measurement uncertainty shall be made for each apparatus used. Test measurements with calibrated reference transducers are recommended [16].

Approximate error analyses have been offered for several systems [17] and [18].

The accuracy obtained depends on the **target** imperfections. For example, the ultrasonic energy reflected by the absorbing **target** in the situation shown in figure 1 leads to a **radiation force** increase, the ultrasonic energy transmitted by the absorbing **target** and appearing at the **target's** rear surface leads to a **radiation force** decrease. Even worse, those parts of the ultrasonic wave which return to the **ultrasonic transducer** and interfere with the original wave may lead to errors which are even higher, since they depend on the amplitude reflection coefficient and not on the energy reflection coefficient [10]. This applies in a similar manner to the situation outlined in figure 3 where not only the acoustic properties of the reflecting target are relevant, but also those of the absorber used to absorb the ultrasound reflected from the target.

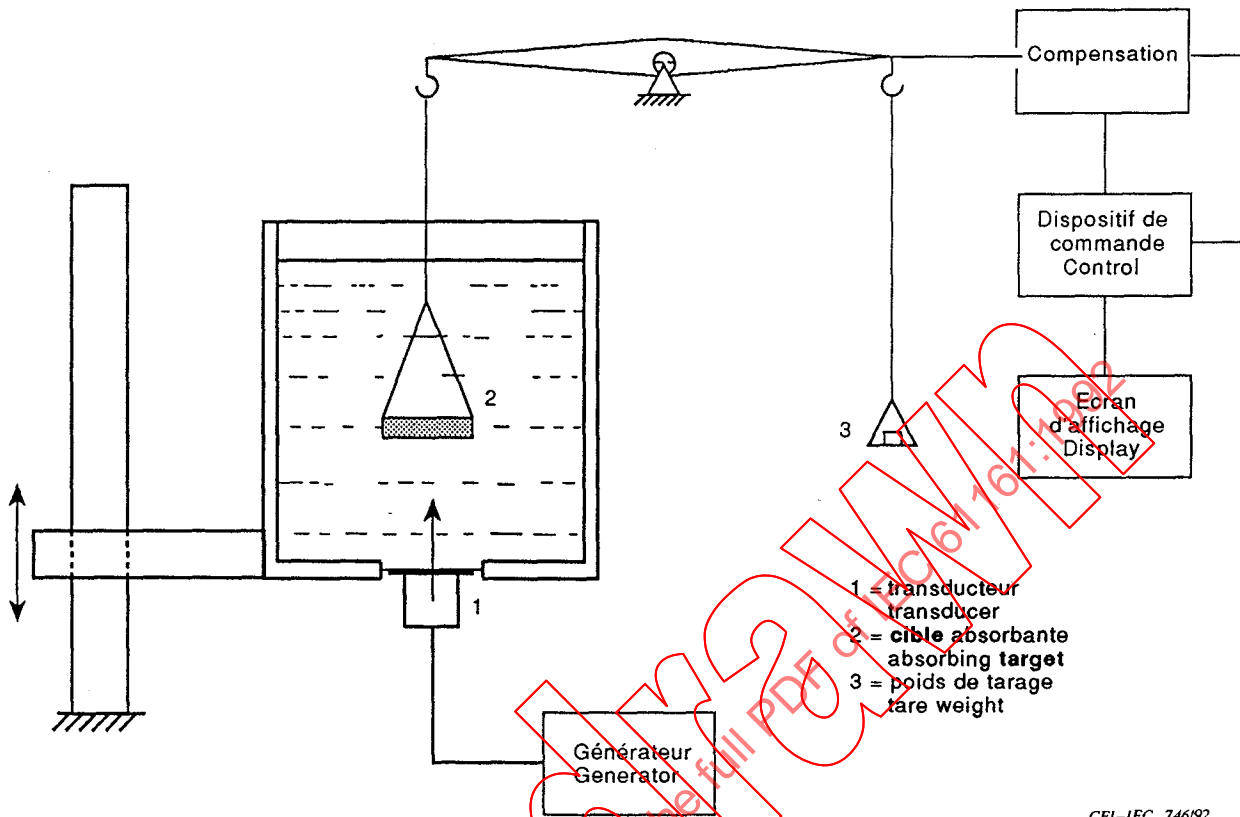


Figure 1 – Système d'équilibrage de la force de radiation à cible absorbante
Radiation force balance system with an absorbing target

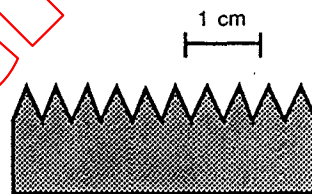


Figure 2 – Vue en coupe d'une cible absorbante
Section through an absorbing target

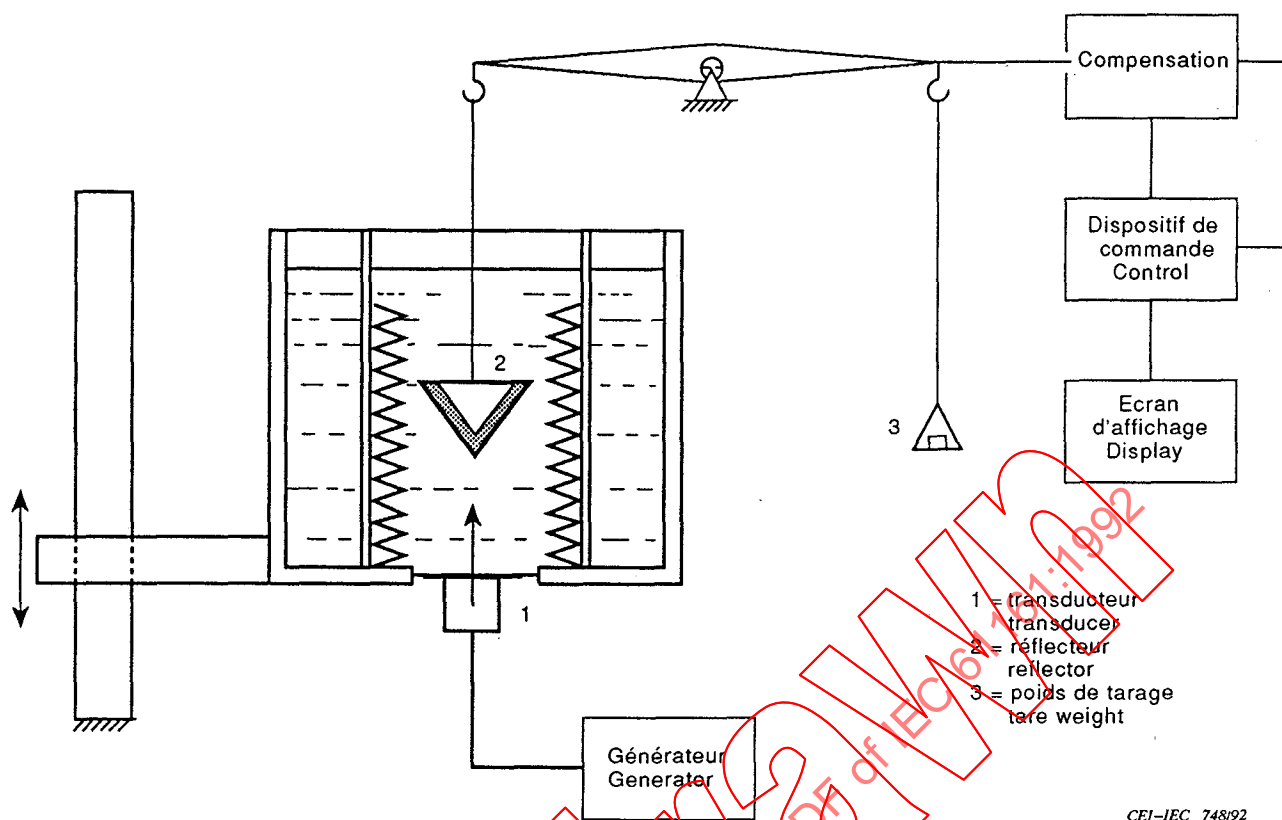


Figure 3 – Système d'équilibrage de la force de radiation à cible réfléchissante (convexe)
Radiation force balance system with a reflecting target (convex)

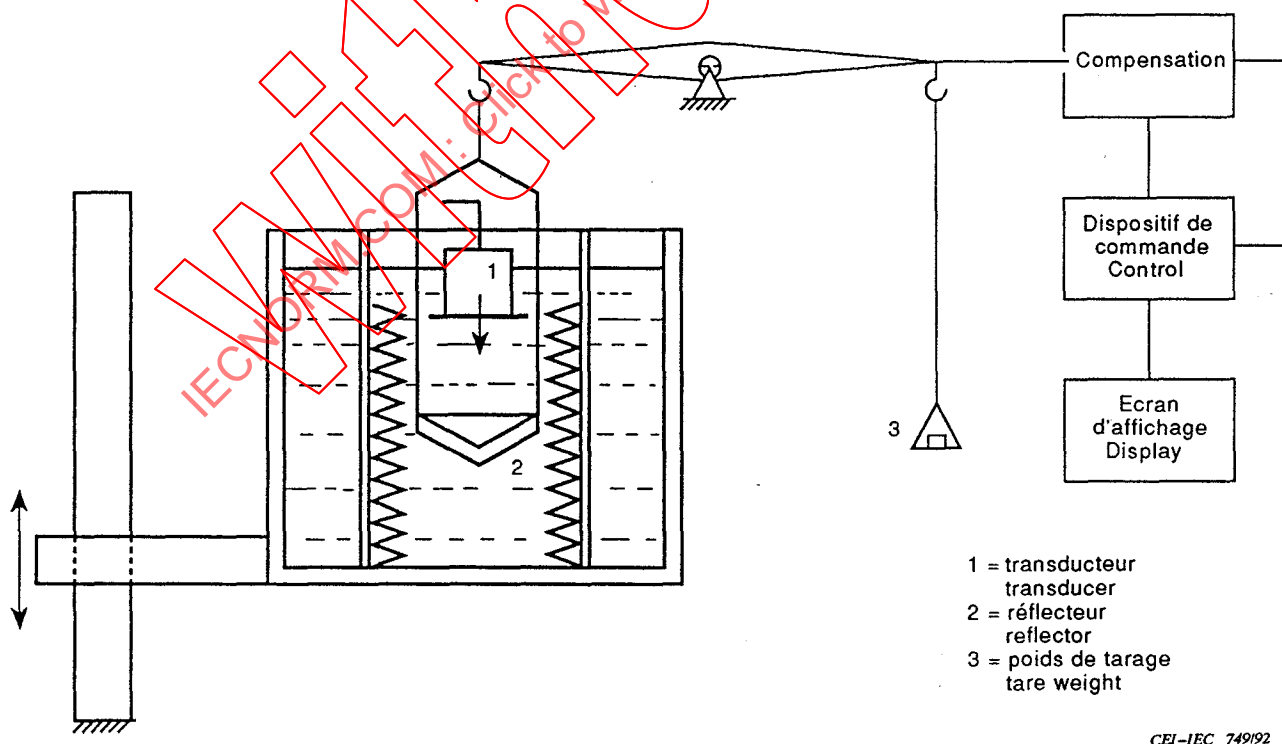


Figure 4 – Système d'équilibrage de la force de radiation à cible réfléchissante (concave)
Radiation force balance system with a reflecting target (concave)

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 150).

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

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

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).

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 150).

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 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:

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:

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

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.