



INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Ultrasonics – Hydrophones –
Part 2: Calibration for ultrasonic fields**

**Ultrasons – Hydrophones –
Partie 2: Etalonnage des champs ultrasoniques**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.140.50

ISBN 978-2-8327-0091-4

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	8
INTRODUCTION.....	10
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Terms and definitions	12
4 List of symbols	21
5 Overview of calibration procedures.....	24
5.1 Principles.....	24
5.2 Summary of calibration procedures.....	25
5.3 Reporting of results.....	26
5.4 Recommended calibration periods	28
6 Generic requirements of a hydrophone calibration system	28
6.1 Mechanical positioning.....	28
6.1.1 General	28
6.1.2 Accuracy of the axial hydrophone position	28
6.1.3 Accuracy of the lateral hydrophone position.....	29
6.2 Temperature measurements and temperature stability	29
6.3 Hydrophone size.....	29
6.4 Measurement vessel and water properties	30
6.5 Measurement of output voltage	30
7 Electrical considerations.....	30
7.1 Signal type.....	30
7.2 Earthing	31
7.3 Measurement of hydrophone output voltage.....	31
7.3.1 General	31
7.3.2 Electrical loading by measuring instrument.....	31
7.3.3 Electrical loading by extension cables	31
7.3.4 Noise.....	32
7.3.5 Cross-talk (radio-frequency rf pick-up) and acoustic interference	32
7.3.6 Integral hydrophone pre-amplifiers	32
8 Preparation of hydrophones.....	32
8.1 General.....	32
8.2 Wetting	32
8.3 Hydrophone support.....	32
8.4 Influence of cable	33
9 Free field reciprocity calibration	33
9.1 General.....	33
9.2 Object.....	33
9.3 General principles.....	33
9.3.1 General	33
9.3.2 Three-transducer reciprocity calibration method	33
9.3.3 Self-reciprocity calibration method	34
9.3.4 Two-transducer reciprocity calibration method	34
9.4 Two-transducer reciprocity calibration method	34
9.4.1 General	34
9.4.2 Auxiliary transducers	34

9.4.3	Reflector.....	35
9.4.4	Measurement field	35
9.4.5	Reciprocity approach	35
9.4.6	Measurement procedure	35
10	Free field calibration by planar scanning.....	35
10.1	General.....	35
10.2	Object.....	36
10.3	General principle	36
10.4	Procedural requirements	38
10.4.1	Hydrophone scanning	38
10.4.2	Power measurement.....	38
10.4.3	Transducer mounting	38
10.4.4	Measurement conditions	38
10.4.5	Measurements	39
10.5	Corrections and sources of uncertainty	39
11	Free field calibration by optical interferometry	39
11.1	General.....	39
11.2	Principle	39
12	Calibration by comparison using a standard hydrophone	39
12.1	General.....	39
12.2	Object.....	39
12.3	Principle	40
12.4	Procedural requirements	40
12.4.1	Source transducer	40
12.4.2	Source transducer drive signal	40
12.4.3	Measurement system.....	40
12.5	Procedure	41
12.5.1	Measurements (Type I): determination of the directional response of a hydrophone	41
12.5.2	Measurements (Type II): calibration by comparison using a standard hydrophone	42
12.6	Maximum hydrophone size.....	42
Annex A (informative) Assessment of uncertainty in free field calibration of hydrophones		43
A.1	General.....	43
A.2	Overall (expanded) uncertainty	43
A.3	Common sources of uncertainty	43
Annex B (informative) Behaviour of PVDF polymer sensors in high-intensity ultrasonic fields.....		45
B.1	General.....	45
B.2	Theoretical background.....	45
B.3	Tests	45
B.4	Results	46
B.5	Conclusions	47
Annex C (informative) Electrical loading corrections		48
C.1	General.....	48
C.2	Corrections using complex impedance	48
C.3	Corrections using only capacitances	49

Annex D (informative) Absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique.....	50
D.1 Overview.....	50
D.2 Hydrophone scanning methodology.....	50
D.3 Corrections and sources of measurement uncertainty	51
D.3.1 Total power	51
D.3.2 Received hydrophone signal.....	51
D.3.3 Integration	52
D.3.4 Directional response.....	52
D.3.5 Finite size of the hydrophone.....	53
D.3.6 Noise.....	53
D.3.7 Nonlinear propagation	54
D.3.8 Planar scanning.....	55
D.3.9 Intensity proportional to pressure squared	55
D.4 Rationale behind the planar scanning technique for calibrating hydrophones	56
D.4.1 General	56
D.4.2 Relationship between hydrophone and transducer effective radii	56
D.4.3 Justification for $a_t / l \leq 0,5$	56
D.4.4 Derivation of Formula (D.2).....	57
D.4.5 Effect of nonlinear propagation, D.3.7.....	58
Annex E (informative) Properties of water	60
E.1 General.....	60
E.2 Attenuation coefficient for propagation in water.....	61
Annex F (informative) The absolute calibration of hydrophones by optical interferometry	62
F.1 Overview.....	62
F.2 Present position.....	62
F.2.1 "Magnomic" or nonlinear propagation-based method	62
F.2.2 Optical interferometry	63
F.2.3 High-frequency implementations of optical interferometry	63
Annex G (informative) Waveform concepts	78
G.1 Overview.....	78
G.2 Temporal waveform, frequency concepts and hydrophone positioning for comparison calibrations of hydrophones	78
G.3 Temporal waveform and frequency coverage concepts	79
G.3.1 Using a narrow-band tone-burst (concept a)	79
G.3.2 Using a broadband waveform resulting from a narrow-band tone-burst after nonlinear propagation (concept b)	80
G.3.3 Using a broadband pulse (concept c).....	80
G.3.4 Using a continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry (concept d)	81
G.3.5 Continuous wave frequency sweep with TGFA (concept e)	81
G.4 Hydrophone position concepts	81
G.4.1 Near-field hydrophone position (concept A)	81
G.4.2 Far field hydrophone position (concept B).....	81
G.4.3 Far field hydrophone position with special reference to a long propagation path in order to achieve nonlinear distortion (concept C)	82
G.4.4 Geometric spherical focus position with focusing source transducer (low voltage or linear excitation) (concept D).....	82

G.4.5	Geometric spherical focus position with focusing source transducer and high voltage excitation in order to achieve nonlinear distortion (concept E)	82
G.5	Special considerations for calibrations close to the face of a transducer	83
G.5.1	General requirement	83
G.5.2	Influence of edge waves	83
G.5.3	Potential influence of head waves	84
G.5.4	Treatment of head waves close to the transducer	84
G.5.5	Statements on the usable paraxial plane wave region in the case of a near-field hydrophone position, considering both edge wave and head wave contributions	86
Annex H (informative)	Time delay spectrometry – Requirements and a brief review of the technique	87
H.1	General	87
H.2	Calibration and performance evaluation of ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry	87
H.2.1	Ultrasonic field parameter measured	87
H.2.2	Ultrasonic frequency range over which the technique is applicable	87
H.2.3	Ultrasonic field configuration for which the technique is applicable	87
H.2.4	Spatial resolution	88
H.2.5	Sensitivity of the technique	88
H.2.6	Range over which the sensitivity is measured	88
H.2.7	Reproducibility	88
H.2.8	Impulse response	88
H.2.9	Procedure for performing measurements	88
H.3	Measurement procedure for sensitivity intercomparison	89
H.4	Measurement procedure (reciprocity calibration)	89
H.5	Limitations	89
Annex I (informative)	Determination of the phase response of hydrophones	90
I.1	Overview	90
I.2	Coherent time delay spectrometry	91
I.2.1	Principle of operation	91
I.2.2	Example results	91
I.2.3	Uncertainties	92
I.2.4	Limitations	93
I.3	Pulse calibration technique with optical multilayer hydrophone	93
I.3.1	Principle of operation	93
I.3.2	Example of results	93
I.3.3	Uncertainties	94
I.3.4	Limitations	94
I.4	Nonlinear pulse propagation modelling	95
I.4.1	Principle of operation	95
I.4.2	Limitations	95
Annex J (informative)	Maximum size considerations for the active element of a hydrophone	96
J.1	Maximum hydrophone size in the near field case (Annex G – hydrophone position concept A)	96
J.2	Maximum hydrophone size in the far field case (Annex G – hydrophone position concept B)	96

J.3	Maximum hydrophone size in the far field case with special reference to a long propagation path in order to achieve nonlinear distortion (Annex G – hydrophone position concept C).....	96
Annex K (informative)	Two-transducer reciprocity calibration method.....	98
K.1	General.....	98
K.2	Fundamentals of reciprocity.....	98
K.3	Electrical quantities.....	99
K.4	Diffraction correction and loss due to nonlinear sound propagation.....	100
K.5	Ultrasonic field.....	100
K.6	Experimental set-up.....	101
K.6.1	General.....	101
K.6.2	Twisting reflector.....	101
K.6.3	Translational reflector.....	102
K.6.4	Translational auxiliary transducer.....	102
K.7	Hydrophone calibration using a calibrated spherically curved auxiliary transducer based on the self-reciprocity method.....	103
Bibliography	107
Figure F.1	– Experimental set-up of the interferometric foil technique.....	65
Figure F.2	– End-of-cable open-circuit sensitivity level L_{M_c} of a coplanar membrane hydrophone.....	67
Figure F.3	– Experimental set-up of the heterodyne vibrometer technique.....	69
Figure F.4	– Measured frequency-dependent radial profiles of the acoustic pulse field.....	71
Figure F.5	– Experimentally determined spatial averaging correction versus frequency for hydrophones of different effective element diameter, d_{eff}	72
Figure F.6	– End-of-cable loaded sensitivity level and sensitivity phase of a coplanar membrane hydrophone assembly at 50 Ω termination.....	73
Figure F.7	– Hydrophone waveform generated by a 9 μm coplanar membrane hydrophone positioned at the focus of a 5 MHz transducer (focal length 51 mm).....	74
Figure F.8	– Interferometer displacement waveform generated with the pellicle positioned at the focus of the 5 MHz transducer (focal position 51 mm).....	75
Figure F.9	– Frequency spectrum of the displacement waveform (lower curve) and the differentiated displacement waveform (upper curve).....	75
Figure F.10	– Sensitivity of a 0,2 mm active element diameter of a 9 μm bilaminar membrane hydrophone determined at 5 MHz intervals over the frequency range 5 MHz to 60 MHz.....	76
Figure G.1	– Coordinates of a field point P in the near field of a plane-circular source transducer of radius a_t	84
Figure I.1	– Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for two membrane hydrophones.....	92
Figure I.2	– Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for a 0,2 mm diameter needle hydrophone.....	94
Figure K.1	– Experimental set-up with a twisting reflector [22].....	102
Figure K.2	– Experimental set-up with a translational reflector [23].....	102
Figure K.3	– Experimental set-up with a translational auxiliary transducer [24].....	103
Figure K.4	– Relationship of G_C and $\theta_m(^{\circ})$ for several values of ka_h	105

Table 1 – List of typical uncertainty values (for 95 % coverage) obtained by the calibration methods specified in this document and for the frequency range listed	26
Table E.1 – Speed of sound c [54],[55] and specific acoustic impedance, ρc , as a function of temperature, for propagation in water	60
Table G.1 – Temporal waveform and hydrophone position concepts described in Annex G	78
Table I.1 – Example of uncertainties (where a coverage factor, $k = 2$, is used) for a HTDS phase calibration of a needle hydrophone with a diameter of 0,2 mm, expressed at a confidence level of 95 %	92
Table K.1 – Values of the correction coefficient $G_c(ka_h, \theta_m)$ for the spatial average effect of the free-field acoustic pressure over the hydrophone surface if it were removed	105

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 2: Calibration for ultrasonic fields

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 62127-2 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics. It is an International Standard.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2007, Amendment 1:2013 and Amendment 2:2017. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) the upper frequency limit of 40 MHz has been removed;
- b) hydrophone sensitivity definitions have been changed to recognize sensitivities as complex-valued quantities;
- c) directional response measurement and effective size determination procedures have been updated in 12.5.1 to align with recent changes in IEC 62127-3;

- d) Annex F has been amended to comprise a calibration technique for high-frequency complex-valued calibration;
- e) the reciprocity method description in Annex K was extended to also comprise focusing transducers;

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

Draft	Report on voting
87/878/FDIS	87/884/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

A list of all parts of IEC 62127 series, published under the general title *Ultrasonics – Hydrophones*, can be found on the IEC website.

NOTE Terms in **bold** in the text are defined in Clause 3.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

The spatial and temporal distribution of acoustic pressure in an ultrasonic field in a liquid medium is commonly determined using miniature ultrasonic **hydrophones**. These devices are not absolute measurement instruments and it is important that they are calibrated. This part of IEC 62127 specifies the calibration methods to use in determining the response of a **hydrophone** in the ultrasonic range, i.e. above 50 kHz. The main **hydrophone** application in this context lies in the measurement of ultrasonic fields emitted by medical diagnostic equipment in water. It is important to understand **hydrophone** behaviour over a wide frequency band in order to reliably characterize the acoustic parameters of the applied acoustic field. In particular, the frequency range above 15 MHz is important to fully characterize this equipment, primarily due to the increased appearance of high-frequency components in the ultrasonic signals, caused by nonlinear propagation. In addition, the number of medical ultrasonic systems that use frequencies above 15 MHz, particularly intra-operative probes, is growing. It has turned out in recent years that the **hydrophone** response below 0,5 MHz is also important in order to reliably determine the peak-negative (rarefactional) acoustic pressure.

While the term "**hydrophone**" can be used in a wider sense, it is understood here as referring to miniature piezoelectric **hydrophones**. It is this instrument type that is used today in various areas of medical ultrasonics and, in particular, to characterize quantitatively the field structure of medical diagnostic instruments [1]¹. With regard to other pressure sensor types, such as those based on fibre optics, some of the requirements of this document are applicable to these as well but others are not. If in the future these other "**hydrophone**" types gain more importance in field measurement practice, their characteristics and calibration will be dealt with in a future edition of IEC 62127-2 or in a separate part of IEC 62127.

NOTE 1 This document covers the ultrasonic frequency range, from 50 kHz to an upper frequency of 100 MHz. Not all techniques described are applicable to the full frequency range. Standards dealing with **hydrophone** properties (IEC 62127-3) and **hydrophone** use (IEC 62127-1) are being maintained in parallel. This will eventually lead to unified standards covering the whole field of practical **hydrophone** application.

NOTE 2 **Hydrophone** calibration in the lower ultrasonic and in the underwater sound frequency range is particularly addressed in the IEC 60565 series [2],[3].

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 2: Calibration for ultrasonic fields

1 Scope

This part of IEC 62127 specifies:

- absolute **hydrophone** calibration methods;
- relative (comparative) **hydrophone** calibration methods.

Recommendations and references to accepted literature are made for the various relative and absolute calibration methods in the frequency range covered by this document.

This document is applicable to

- **hydrophones** used for measurements made in water and in the ultrasonic frequency range 50 kHz to 100 MHz;

NOTE 1 Although some physiotherapy medical applications of medical ultrasound are developing which operate in the frequency range 40 kHz to 100 kHz, the primary frequency range of diagnostic imaging remains above 2 MHz. It has recently been established that, even in the latter case, the **hydrophone** response at substantially lower frequencies can influence measurements made of key acoustic parameters [4].

NOTE 2 Calibration methods for underwater acoustics **hydrophones** applicable in the frequency range from 200 Hz to 1 MHz are available in IEC 60565-1 [2], and for frequencies from 0,01 Hz to several kilohertz in IEC 60565-2 [3].

- **hydrophones** employing piezoelectric sensor elements, designed to measure the pulsed wave and continuous wave ultrasonic fields generated by ultrasonic equipment;

NOTE 3 Some **hydrophones** can have non-circular active elements, arising from slight deviations from a circular structure caused, for example, by electrode structure; or, conversely, the active elements can actually be squares. It is important in these cases to pay special attention to the **directional response** and to the effective radii of the active element through various axes of rotation.

- **hydrophones** with or without a **hydrophone** pre-amplifier.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 61161, *Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements*

IEC 61689, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz*

IEC 62127-1, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields*

IEC 62127-3:2022, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	122
INTRODUCTION.....	124
1 Domaine d'application	125
2 Références normatives	125
3 Termes et définitions	126
4 Liste des symboles	135
5 Vue d'ensemble des procédures d'étalonnage	139
5.1 Principes.....	139
5.2 Récapitulatif des procédures d'étalonnage	140
5.3 Consignation des résultats.....	141
5.4 Périodes d'étalonnage recommandées.....	143
6 Exigences génériques d'un système d'étalonnage d'hydrophone	143
6.1 Positionnement mécanique	143
6.1.1 Généralités	143
6.1.2 Exactitude de la position axiale de l'hydrophone	143
6.1.3 Exactitude de la position latérale de l'hydrophone	144
6.2 Mesurages et stabilité de la température.....	144
6.3 Taille de l'hydrophone	144
6.4 Récipient de mesure et propriétés de l'eau	145
6.5 Mesurage de la tension de sortie	145
7 Considérations électriques	146
7.1 Type de signal	146
7.2 Mise à la terre.....	146
7.3 Mesurage de la tension de sortie de l'hydrophone.....	146
7.3.1 Généralités	146
7.3.2 Charge électrique par appareil de mesure	146
7.3.3 Charge électrique par câbles d'extension.....	147
7.3.4 Bruit	147
7.3.5 Diaphonie (capteur de radiofréquence) et interférence acoustique	147
7.3.6 Préamplificateurs d'hydrophone intégrés	147
8 Préparation des hydrophones	148
8.1 Généralités	148
8.2 Mouillage	148
8.3 Support de l'hydrophone	148
8.4 Influence du câble.....	148
9 Étalonnage par réciprocité en champ libre	148
9.1 Généralités	148
9.2 Objet.....	148
9.3 Principes généraux	149
9.3.1 Généralités	149
9.3.2 Méthode d'étalonnage par réciprocité à trois transducteurs	149
9.3.3 Méthode d'étalonnage par autoréciprocité	149
9.3.4 Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs.....	149
9.4 Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs	149
9.4.1 Généralités	149
9.4.2 Transducteurs auxiliaires	150

9.4.3	Réflecteur.....	150
9.4.4	Champ de mesure	151
9.4.5	Approche réciproque	151
9.4.6	Procédure de mesure	151
10	Étalonnage en champ libre par balayage planaire.....	151
10.1	Généralités	151
10.2	Objet.....	151
10.3	Principe général.....	151
10.4	Exigences de procédure.....	154
10.4.1	Balayage de l'hydrophone.....	154
10.4.2	Mesurage de la puissance	154
10.4.3	Montage du transducteur	154
10.4.4	Conditions de mesure	154
10.4.5	Mesurages.....	155
10.5	Corrections et sources d'incertitude	155
11	Étalonnage en champ libre par interférométrie optique	155
11.1	Généralités	155
11.2	Principe	155
12	Étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé	155
12.1	Généralités	155
12.2	Objet.....	156
12.3	Principe	156
12.4	Exigences de procédure.....	156
12.4.1	Transducteur source	156
12.4.2	Signal d'entraînement du transducteur source	157
12.4.3	Système de mesure	157
12.5	Procédure	157
12.5.1	Mesurages (Type I): détermination de la réponse directionnelle d'un hydrophone	157
12.5.2	Mesurages (Type II): étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé	158
12.6	Taille maximale de l'hydrophone	158
Annexe A (informative) Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage en champ libre des hydrophones		159
A.1	Généralités	159
A.2	Incertitude (élargie) globale	159
A.3	Sources communes d'incertitude.....	159
Annexe B (informative) Comportement des capteurs polymères PVDF dans les champs ultrasoniques à haute intensité		161
B.1	Généralités	161
B.2	Contexte théorique.....	161
B.3	Essais.....	162
B.4	Résultats	163
B.5	Conclusions	164
Annexe C (informative) Corrections de charge électrique.....		165
C.1	Généralités	165
C.2	Corrections à l'aide de l'impédance complexe	165
C.3	Corrections à l'aide des capacités électriques uniquement.....	166

Annexe D (informative) Étalonnage absolu des hydrophones à l'aide de la technique de balayage planaire.....	167
D.1 Vue d'ensemble	167
D.2 Méthodologie de balayage de l'hydrophone.....	167
D.3 Corrections et sources d'incertitude de mesure	168
D.3.1 Puissance totale	168
D.3.2 Signal reçu de l'hydrophone.....	169
D.3.3 Intégration	169
D.3.4 Réponse directionnelle	170
D.3.5 Taille finie de l'hydrophone	170
D.3.6 Bruit	170
D.3.7 Propagation non linéaire.....	171
D.3.8 Balayage planaire.....	172
D.3.9 Intensité proportionnelle à la pression au carré.....	173
D.4 Justification concernant la technique de balayage planaire pour l'étalonnage des hydrophones	173
D.4.1 Généralités	173
D.4.2 Relation entre les rayons efficaces de l'hydrophone et du transducteur	173
D.4.3 Justification pour $a_t / l \leq 0,5$	174
D.4.4 Écart de la Formule (D.2)	174
D.4.5 Effet de la propagation non linéaire, D.3.7.....	175
Annexe E (informative) Propriétés de l'eau	177
E.1 Généralités	177
E.2 Coefficient d'atténuation pour la propagation dans l'eau.....	178
Annexe F (informative) Étalonnage absolu des hydrophones par interférométrie optique	179
F.1 Vue d'ensemble	179
F.2 Position actuelle	179
F.2.1 Méthode reposant sur la propagation "magnétique" ou non linéaire	179
F.2.2 Interférométrie optique	180
F.2.3 Mises en œuvre à haute fréquence de l'interférométrie optique	181
Annexe G (informative) Concepts de forme d'onde	196
G.1 Vue d'ensemble	196
G.2 Forme d'onde temporelle, concepts de fréquence et positionnement de l'hydrophone pour des étalonnages par comparaison des hydrophones	196
G.3 Concepts de forme d'onde temporelle et de fréquences couvertes	197
G.3.1 Utilisation d'une salve d'impulsion à bande étroite (concept a).....	197
G.3.2 Utilisation d'une forme d'onde à large bande résultant d'une salve d'impulsion à bande étroite après propagation non linéaire (concept b)	198
G.3.3 Utilisation d'une impulsion à large bande (concept c).....	198
G.3.4 Utilisation d'un balayage de fréquence à ondes entretenues avec la spectrométrie de temporisation (concept d)	199
G.3.5 Balayage de fréquence à ondes entretenues avec analyse de fréquence par portillonnage temporel (concept e).....	199
G.4 Concepts de position de l'hydrophone.....	199
G.4.1 Position de l'hydrophone de champ proche (concept A).....	199
G.4.2 Position de l'hydrophone de champ lointain (concept B)	200
G.4.3 Position de l'hydrophone de champ lointain avec référence particulière à un long trajet de propagation afin d'obtenir une déformation non linéaire (concept C).....	200

G.4.4	Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation (excitation à basse tension ou linéaire) (concept D)	200
G.4.5	Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation et excitation à tension élevée afin d'obtenir une déformation non linéaire (concept E).....	201
G.5	Considérations particulières liées aux étalonnages réalisés à proximité de la face d'un transducteur	201
G.5.1	Exigence générale	201
G.5.2	Influence des ondes de bord.....	201
G.5.3	Influence potentielle des ondes réfractées.....	202
G.5.4	Traitement des ondes réfractées proches du transducteur	203
G.5.5	Indications sur la région d'onde plane paraxiale utilisable dans le cas d'une position de l'hydrophone de champ proche, en prenant en considération tant les contributions de l'onde de bord que celles de l'onde réfractée.....	205
Annexe H (informative) Spectrométrie de temporisation – Exigences et bref examen de la technique		206
H.1	Généralités	206
H.2	Évaluation de l'étalonnage et des performances des hydrophones à ultrasons à l'aide de la spectrométrie de temporisation	206
H.2.1	Paramètre du champ ultrasonique mesuré	206
H.2.2	Plage de fréquences ultrasonores dans laquelle la technique est applicable.....	206
H.2.3	Configuration du champ ultrasonique pour lequel la technique est applicable	206
H.2.4	Résolution spatiale	207
H.2.5	Sensibilité de la technique	207
H.2.6	Plage de mesure de la sensibilité	207
H.2.7	Reproductibilité	207
H.2.8	Réponse impulsionnelle.....	207
H.2.9	Procédure de réalisation des mesurages	207
H.3	Procédure de mesure pour intercomparaison de sensibilité.....	208
H.4	Procédure de mesure (étalonnage par réciprocité).....	208
H.5	Limitations	208
Annexe I (informative) Détermination de la réponse en phase des hydrophones		209
I.1	Vue d'ensemble	209
I.2	Spectrométrie de temporisation cohérente	210
I.2.1	Principe de fonctionnement	210
I.2.2	Exemple de résultats	210
I.2.3	Incertitudes.....	211
I.2.4	Limitations	212
I.3	Technique d'étalonnage par impulsion avec hydrophone multicouche optique.....	212
I.3.1	Principe de fonctionnement	212
I.3.2	Exemple de résultats	212
I.3.3	Incertitudes.....	213
I.3.4	Limitations	213
I.4	Modélisation de la propagation non linéaire des impulsions	214
I.4.1	Principe de fonctionnement	214
I.4.2	Limitations.....	214
Annexe J (informative) Considérations liées à la taille maximale de l'élément actif d'un hydrophone.....		215

J.1	Taille maximale de l'hydrophone dans le cas du champ proche (Annexe G – Concept A de position de l'hydrophone)	215
J.2	Taille maximale de l'hydrophone dans le cas du champ lointain (Annexe G – Concept B de position de l'hydrophone)	215
J.3	Taille maximale de l'hydrophone dans le cas d'un champ lointain avec référence particulière à un long trajet de propagation afin d'obtenir une déformation non linéaire (Annexe G – Concept C de position de l'hydrophone)	215
Annexe K (informative)	Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs	218
K.1	Généralités	218
K.2	Principes fondamentaux de la réciprocité	218
K.3	Grandeurs électriques	219
K.4	Correction de la diffraction et perte due à la propagation sonore non linéaire	220
K.5	Champ ultrasonique	220
K.6	Montage expérimental	221
K.6.1	Généralités	221
K.6.2	Réflecteur pivotant	221
K.6.3	Réflecteur translationnel	222
K.6.4	Transducteur auxiliaire translationnel	222
K.7	Étalonnage d'un hydrophone à l'aide d'un transducteur auxiliaire étalonné à courbure sphérique fondé sur la méthode par autorécaprocité	223
Bibliographie	227
Figure F.1	– Montage expérimental de la technique de la feuille interférométrique	182
Figure F.2	– Niveau de sensibilité en circuit ouvert en bout de câble, L_{Mc} , d'un hydrophone à membrane coplanaire	184
Figure F.3	– Montage expérimental de la technique du vibromètre hétérodyne	186
Figure F.4	– Profils radiaux mesurés dépendant de la fréquence du champ d'impulsions acoustiques	188
Figure F.5	– Correction de la moyenne spatiale déterminée expérimentalement en fonction de la fréquence pour des hydrophones de différents diamètres d'éléments efficaces, d_{eff}	189
Figure F.6	– Niveau de sensibilité en bout de câble et phase de sensibilité d'un ensemble d'hydrophones à membrane coplanaire avec une terminaison de 50Ω	190
Figure F.7	– Forme d'onde d'hydrophone générée par un hydrophone à membrane coplanaire de 9 m placé au foyer d'un transducteur de 5 MHz (longueur focale de 51 mm)	191
Figure F.8	– Forme d'onde de déplacement de l'interféromètre générée avec la pellicule placée au foyer du transducteur de 5 MHz (position focale de 51 mm)	192
Figure F.9	– Spectre de fréquences de la forme d'onde de déplacement (courbe inférieure) et forme d'onde de déplacement différenciée (courbe supérieure)	192
Figure F.10	– Sensibilité du diamètre d'un élément actif de 0,2 mm d'un hydrophone à membrane à deux feuilles de 9 m déterminée à intervalles de 5 MHz dans la plage de fréquences comprise entre 5 MHz et 60 MHz	193
Figure G.1	– Coordonnées d'un point du champ, P, dans le champ proche d'un transducteur source circulaire plan de rayon a_t	203
Figure I.1	– Phase de la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de deux hydrophones à membrane	211
Figure I.2	– Phase de la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre	213

Figure K.1 – Montage expérimental avec un réflecteur pivotant [22].....	222
Figure K.2 – Montage expérimental avec un réflecteur translationnel [23]	222
Figure K.3 – Montage expérimental avec un transducteur auxiliaire translationnel [24]	223
Figure K.4 – Relation de G_c et $\theta_m(^{\circ})$ pour plusieurs valeurs de ka_h	225
Tableau 1 – Liste des valeurs d'incertitude types (pour une couverture à 95 %) obtenues par les méthodes d'étalonnage spécifiées dans le présent document et pour la plage de fréquences indiquée	141
Tableau E.1 – Vitesse du son c [54],[55] et impédance acoustique spécifique ρc , en fonction de la température, pour la propagation dans l'eau	177
Tableau G.1 – Concepts de forme d'onde temporelle et de position de l'hydrophone décrits dans l'Annexe G	196
Tableau I.1 – Exemple d'incertitudes (où un facteur d'élargissement $k = 2$ est utilisé) dans le cas de l'étalonnage de phase HTDS d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre, exprimé à un niveau de confiance de 95 %.....	211
Tableau K.1 – Valeurs du coefficient de correction $G_c(ka_h, \theta_m)$ pour l'effet de la moyenne spatiale de la pression acoustique de champ libre sur la surface de l'hydrophone en cas de retrait de ce dernier	225

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ULTRASONS – HYDROPHONES –

Partie 2: Étalonnage des champs ultrasoniques

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 62127-2 a été établie par le comité d'études 87 de l'IEC: Ultrasons. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette seconde édition annule et remplace la première édition parue en 2007, l'Amendement 1:2013 et l'Amendement 2:2017. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) la limite de fréquence supérieure de 40 MHz a été supprimée;
- b) les définitions de la sensibilité de l'hydrophone ont été modifiées afin de reconnaître les sensibilités comme des grandeurs à valeur complexe;
- c) les procédures de mesure de la réponse directionnelle et de détermination de la taille efficace ont été mises à jour au 12.5.1 pour s'aligner sur les modifications récentes de l'IEC 62127-3;
- d) l'Annexe F a été modifiée pour inclure une technique d'étalonnage pour l'étalonnage à haute fréquence à valeurs complexes;
- e) la description de la méthode par réciprocity de l'Annexe K a été élargie pour comprendre également les transducteurs à focalisation.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
87/878/FDIS	87/884/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62127, publiées sous le titre général *Ultrasons – Hydrophones*, se trouve sur le site web de l'IEC.

NOTE Les termes en **gras** dans le texte sont définis à l'Article 3.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de ce document indique qu'il contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer ce document en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

La répartition spatiale et temporelle de la pression acoustique d'un champ ultrasonique en milieu liquide est généralement déterminée à l'aide d'**hydrophones** à ultrasons miniatures. Ces dispositifs ne sont pas des appareils de mesure à proprement parler et il est important qu'ils soient étalonnés. La présente partie de l'IEC 62127 spécifie les méthodes d'étalonnage à utiliser pour déterminer la réponse d'un **hydrophone** dans la plage ultrasonore, c'est-à-dire au-dessus de 50 kHz. Dans ce contexte, la principale application de l'**hydrophone** consiste à mesurer les champs ultrasoniques émis par des appareils de diagnostic médical dans l'eau. Il est important de comprendre le comportement de l'**hydrophone** dans cette large bande de fréquences afin de caractériser de manière fiable les paramètres acoustiques du champ acoustique appliqué. En particulier, la plage de fréquences au-dessus de 15 MHz est importante pour caractériser cet appareil de manière exhaustive, principalement en raison de la présence accrue de composants à haute fréquence dans les signaux ultrasonores provoqués par une propagation non linéaire. En outre, les systèmes médicaux à ultrasons qui utilisent des fréquences supérieures à 15 MHz sont de plus en plus nombreux, notamment les sondes périopératoires. Ces dernières années, il est apparu que la réponse d'un **hydrophone** inférieure à 0,5 MHz était également importante afin de déterminer avec fiabilité la pression acoustique négative (de raréfaction) de crête.

Si le terme "**hydrophone**" peut être utilisé dans un sens plus large, il fait référence ici aux **hydrophones** piézoélectriques miniatures. Il s'agit du type d'appareil utilisé aujourd'hui dans différents domaines des ultrasons médicaux et, en particulier, pour caractériser de manière quantitative la structure du champ des appareils de diagnostic médicaux [1]¹. Concernant les autres types de capteurs de pression, comme les capteurs fibroniques, certaines exigences du présent document s'appliquent à des capteurs particuliers seulement. Si, à l'avenir, ces autres types d'"**hydrophones**" prennent de l'importance dans la pratique de mesure sur le terrain, leurs caractéristiques et leur étalonnage seront traités dans une future édition de l'IEC 62127-2 ou dans une partie distincte de l'IEC 62127.

NOTE 1 Le présent document porte sur la plage de fréquences ultrasonores comprise entre 50 kHz et une fréquence supérieure de 100 MHz. Toutes les techniques décrites ne sont pas applicables à l'ensemble de la plage de fréquences. Les normes qui traitent des propriétés de l'**hydrophone** (IEC 62127-3) et de l'utilisation de l'**hydrophone** (IEC 62127-1) font l'objet d'une maintenance en parallèle. Cette maintenance conduira finalement à des normes unifiées qui couvrent l'ensemble du domaine d'application pratique de l'**hydrophone**.

NOTE 2 L'étalonnage des **hydrophones** dans la plage de fréquences ultrasonores inférieures et dans la plage de fréquences acoustiques sous-marines est spécifiquement traité dans la série IEC 60565 [2],[3].

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

ULTRASONS – HYDROPHONES –

Partie 2: Étalonnage des champs ultrasoniques

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62127 spécifie:

- les méthodes d'étalonnage absolues de l'**hydrophone**;
- les méthodes d'étalonnage (comparatives) relatives de l'**hydrophone**.

Des recommandations et des références à des documents validés sont indiquées pour les différentes méthodes d'étalonnage relatif et absolu dans la plage de fréquences couverte par le présent document.

Le présent document s'applique:

- aux **hydrophones** utilisés pour des mesurages réalisés dans l'eau et dans la plage de fréquences ultrasonores comprise entre 50 kHz et 100 MHz;

NOTE 1 Bien que certaines applications médicales des ultrasons utilisées en physiothérapie et qui fonctionnent dans la plage de fréquences comprise entre 40 kHz et 100 kHz soient en cours de développement, la plage de fréquences principale des appareils d'imagerie de diagnostic reste supérieure à 2 MHz. Il a récemment été établi que, même dans ce dernier cas, la réponse de l'**hydrophone** à des fréquences sensiblement inférieures peut avoir une influence sur les mesurages des paramètres acoustiques fondamentaux [4].

NOTE 2 Les méthodes d'étalonnage des **hydrophones** acoustiques sous-marins applicables dans la plage de fréquences comprise entre 200 Hz et 1 MHz sont disponibles dans l'IEC 60565-1 [2], et pour les fréquences de 0,01 Hz à plusieurs kHz dans l'IEC 60565-2 [3].

- aux **hydrophones** qui utilisent des capteurs piézoélectriques, conçus pour mesurer les champs ultrasoniques à ondes pulsées et entretenues, générés par les équipements à ultrasons;

NOTE 3 Certains **hydrophones** peuvent comporter des éléments actifs non circulaires par suite de légers écarts de la structure circulaire provoqués, par exemple, par une structure à électrode. À l'inverse, les éléments actifs peuvent s'avérer être carrés. Dans ces cas, il est important d'accorder une attention particulière à la **réponse directionnelle** et aux rayons efficaces de l'élément actif qui passe par différents axes de rotation.

- aux **hydrophones** avec ou sans préamplificateur d'**hydrophone**.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 61161, *Ultrasons – Mesurage de puissance – Balances de forces de rayonnement et exigences de fonctionnement*

IEC 61689, *Ultrasons – Systèmes de physiothérapie – Spécifications des champs et méthodes de mesure dans la plage de fréquences de 0,5 MHz à 5 MHz*

IEC 62127-1, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 1: Mesurage et caractérisation des champs ultrasoniques médicaux*

IEC 62127-3:2022, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 3: Propriétés des hydrophones pour les champs ultrasoniques*