IEC 62127-1

Edition 2.0 2022-03
REDLINE VERSION

INTERNATIONAL STANDARD

colour inside

Ultrasonics – Hydrophones –
Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields ~~up to 40 MHz~~

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

ICS 17.140.50

ISBN 978-2-8322-1093-7

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission

CONTENTS

FOREWORD 6
INTRODUCTION 2
1 Scope ~~and object~~ 9
2 Normative references 9
3 Terms and definitions 10
4 Symbols 16
5 Measurement requirements 38
5.1 Requirements for hydrophones and amplifiers 38
5.1.1 ~~Introduction~~ Preface 38
5.1.2 General 38
5.1.3 Sensitivity of a hydrophone 39
5.1.4 Directional response of a hydrophone 39
5.1.5 Effective hydrophone ~~radius~~ size 39
5.1.6 Choice of the size of a hydrophone active element 40
5.1.7 Bandwidth 41
5.1.8 Linearity 42
5.1.9 Hydrophone signal amplifier 44
5.1.10 Hydrophone cable length and amplifiers 45
5.2 Requirements for positioning and water baths 45
5.2.1 General 45
5.2.2 Positioning systems 45
5.2.3 Water bath 46
5.3 Requirements for data acquisition and analysis systems 47
5.4 Recommendations for ultrasonic equipment being characterized 48
6 Measurement procedure 48
6.1 General 48
6.2 Preparation and alignment 48
6.2.1 Preparation 48
6.2.2 Aligning an ultrasonic transducer and a hydrophone 48
6.3 Measurement 49
6.4 Analysis 49
6.4.1 Corrections for restricted bandwidth and spatial resolution 49
6.4.2 Uncertainties 49
7 Beam characterization 49
7.1 General 49
7.2 Primary pressure parameters 51
7.2.1 General 51
7.2.2 Peak-compressional acoustic pressure and peak-rarefactional acoustic pressure 52
7.2.3 Spatial-peak RMS acoustic pressure 52
7.2.4 Local distortion parameter 53
7.3 Intensity parameters ~~using instantaneous~~ derived from acoustic pressure 53
7.3.1 General 53
7.3.2 Intensity parameters using pulse-pressure-squared integral 54
8 Requirements for specific ultrasonic fields 57

8.1 General 57
8.2 Diagnostic fields 57
8.2.1 Simplified procedures and guidelines 57
8.2.2 Pulsed wave diagnostic equipment 58
8.2.3 Continuous wave diagnostic equipment 59
8.2.4 Diagnostic equipment with low acoustic output 59
8.3 Therapy fields 59
8.3.1 Physiotherapy equipment 59
~~8.3.2 Hyperthermia ..... 60~~
8.3.2 High intensity therapeutic ultrasonic fields 60
8.3.3 Non-focused and weakly focused pressure pulses 61
8.4 Surgical fields 61
8.4.1 Lithotripters and pressure pulse sources for other therapeutic purposes 61
8.4.2 Low frequency surgical applications 61
8.5 Fields from other medical applications 61
9 ~~Compliance~~ Conformity statement 61
9.1 General 61
9.2 Maximum probable values 62
9.3 Sampling 62
Annex A (informative) General rationale 63
Annex B (informative) Hydrophones and positioning 65
B.1 General 65
B.2 Electrical loading considerations 65
B.3 Hydrophone signal amplifier 65
B.4 Hydrophone cable length and amplifiers 65
B.5 Transducer positioning 66
B.6 Alignment of hydrophones 67
B.7 Water bath lining material 67
B.8 Recommendations for ultrasonic equipment being characterized 68
B.9 Types of hydrophones 68
B.9.1 Ceramic needle hydrophones 68
B.9.2 PVDF needle hydrophones 68
B.9.3 PVDF membrane hydrophones 69
B.9.4 Fibre-optic and optic hydrophones 69
B.9.5 Relative performance of different types 70
B.10 Typical specification data for hydrophones 70
Annex C (informative) Acoustic pressure and intensity 72
Annex D (informative) Voltage to pressure conversion 74
D.1 General 74
D.2 Hydrophone deconvolution procedure 75
D.3 Converting the data between double-sided and single-sided spectra 77
D.4 Use of hydrophone calibration data 79
D.4.1 Calibration data interpolation 79
D.4.2 Calibration data extrapolation 79
D.4.3 Regularization filtering 80
D.5 Implication of the hydrophone deconvolution process on measurement duration 79
D.6 Validation of deconvolution implementation 82

Annex E (informative) Correction for spatial averaging 83
E.1 Linear and quasilinear fields 83
E.2 Linear fields, quasilinear fields, and broadband nonlinearly distorted waveforms 85
Annex F (informative) Acoustic output parameters for multi-mode medical ultrasonic fields in the absence of scan-frame synchronization 88
F.1 General 88
F.2 Current philosophy 88
F.3 Need for ~~change~~ an alternative approach 89
F.4 Proposed ~~changes~~ approach 89
F.4.1 Alternative philosophy 89
F.4.2 Alternative parameters 90
F.5 Measurement methods 91
F.5.1 General 91
F.5.2 Peak pressures 92
F.5.3 Temporal-average intensity 92
F.5.4 Frequency 92
F.5.5 Power 93
F.6 Discussion 93
F.6.1 Relationship to existing standards 93
F.6.2 Advantages 93
F.6.3 Disadvantages 93
Annex G (informative) Propagation medium and degassing 95
Annex H (informative) Specific ultrasonic fields 96
H.1 Diagnostic fields 96
H.1.1 Useful relationships between acoustical parameters 96
H.1.2 Pulsed wave diagnostic equipment 97
H.1.3 Continuous wave diagnostic equipment 98
H.2 Therapy fields 98
H.2.1 Physiotherapy equipment 98
~~H.2.2 Hyperthermia ..... 98~~
H.2.2 High intensity therapeutic ultrasonic equipment 98
H.2.3 Non-focused and weakly focused pressure pulses 99
H.3 Surgical fields 99
H.3.1 Lithotripters 99
H.3.2 Low frequency surgical applications 99
Annex I (informative) Assessment of uncertainty in the acoustic quantities obtained by hydrophone measurements 100
I.1 General 100
I.2 Overall (expanded) uncertainty 100
I.3 Common sources of uncertainty 100
Annex J (informative) Transducer and hydrophone positioning systems 102
Annex K (informative) Beamwidth midpoint method 103
Bibliography 36

Figure 1 – Schematic diagram of the different planes and lines in an ultrasonic field 14
Figure 2 – Several apertures and planes for a transducer of unknown geometry 28

Figure 3 – Parameters for describing ~~an example of~~ a focusing transducer of known geometry 33
Figure 4 – Schematic diagram of the method of determining pulse duration 51
Figure D.1 – A flow diagram of the hydrophone deconvolution process 77
Figure D.2 – Example of waveform deconvolution 81
Figure J.1 – Schematic diagram of the ultrasonic transducer and hydrophone degrees of freedom 102

Table 1 – Acoustic parameters appropriate to various types of medical ultrasonic equipment 50
Table B.1 – Typical specification data for hydrophones, in this case given at 1 MHz [69] 71
Table C.1 – Properties of distilled or de-ionized water as a function of temperature [71] 73
Table D.1 – Method of conversion from a double- to a single-sided spectrum 78
Table D.2 – Method of conversion from a single- to a double-sided spectrum 78
Table F.1 – Main basic parameters defined in this document or in IEC 61161 89
Table F.2 – List of parameters that are to be used or are to be deleted 91
Table K.1 – Decibel beamwidth levels for determining midpoints 103

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

_____

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields ~~up to 40 MHz~~

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) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This redline version of the official IEC Standard allows the user to identify the changes made to the previous edition IEC 62127-1:2007+AMD1:2013 CSV. A vertical bar appears in the margin wherever a change has been made. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text.

IEC 62127-1 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 and Amendment 1:2013. 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) Procedures and requirements for narrow-band approximation and broadband measurements have been modified; details on waveform deconvolution have been added.
d) Procedures for spatial averaging correction have been amended.
e) Annex D, Annex E and bibliography have been updated to support the changes of the normative parts.

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

Draft	Report on voting
87/783/FDIS	87/788/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/standardsdev/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 Words in **bold** in the text are terms 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,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication 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 main purpose of this document is to define various acoustic parameters that can be used to specify and characterize ultrasonic fields propagating in liquids, and, in particular, water, using hydrophones. Measurement procedures are outlined that may be used to determine these parameters. Specific device related measurement standards, for example IEC 61689, IEC 61157, IEC 61847 or IEC 62359, can refer to this document for appropriate acoustic parameters. In IEC 62359, some additional measurement methods for attenuated parameters and indices are described addressing the specific needs of acoustic output characterization of ultrasonic diagnostic equipment in accordance with IEC 60601-2-37.

The philosophy behind this document is the specification of the acoustic field in terms of acoustic pressure parameters, acoustic pressure being the primary measurement quantity when hydrophones are used to characterize the field.

Intensity parameters are specified in this document, but these are regarded as derived quantities that are meaningful only under certain assumptions related to the ultrasonic field being measured.

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields ~~up to 40 MHz~~

1 Scope ~~and object~~

This part of IEC 62127 specifies methods of use of calibrated **hydrophones** for the measurement in liquids of acoustic fields generated by ultrasonic medical equipment ~~operating in the frequency range up to 40 MHz~~ including **bandwidth** criteria and calibration frequency range requirements in dependence on the spectral content of the fields to be characterized.

This document:

– defines a group of acoustic parameters that can be measured on a physically sound basis;

– defines a second group of parameters that can be derived under certain assumptions from these measurements, and called derived intensity parameters;

– defines a measurement procedure that ~~may~~ can be used for the determination of acoustic pressure parameters;

– defines the conditions under which the measurements of acoustic parameters can be made ~~in the frequency range up to 40 MHz~~ using calibrated **hydrophones**;

– defines procedures for correcting for limitations caused by the use of **hydrophones** with finite **bandwidth** and finite active element size, and for estimating the corresponding **uncertainties**.

NOTE 1 Throughout this document, SI units are used. In the specification of certain parameters, such as **beam areas** and intensities, it ~~may~~ can be convenient to use decimal multiples or submultiples. For example, **beam area** ~~may~~ is likely to be specified in cm^2 and intensities in W/cm^2 or mW/cm^2.

NOTE 2 The **hydrophone** as defined ~~may~~ can be of a piezoelectric or an optic type.

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 60050-801:1994, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*~~

~~IEC 60565, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz*~~

IEC 60565-1, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones*

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

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

~~IEC 61828, *Ultrasonics – Focusing transducers – Definitions and measurement methods for the transmitted fields*~~

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

~~IEC 61847, *Ultrasonics – Surgical systems – Measurement and declaration of the basic output characteristics*~~

IEC 62127-2, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz*

IEC 62127-3, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz*

IEC 63009, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 20 kHz to 500 kHz*

ISO 16269-6~~:2005~~, *Statistical interpretation of data – Part 6: Determination of statistical tolerance intervals*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

~~NOTE The following standards rely on the proper use of this document.~~

~~IEC 61157, *Standard means for the reporting of the acoustic output of medical diagnostic ultrasonic equipment*~~

~~IEC 62359, *Ultrasonics – Field characterization – Test methods for the determination of thermal and mechanical indices related to medical diagnostic ultrasonic fields*~~

~~IEC 61847, *Ultrasonics – Surgical systems – Measurement and declaration of the basic output characteristics.*~~

IEC 62127-1

Edition 2.0 2022-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields

Ultrasons – Hydrophones – Partie 1: Mesurage et caractérisation des champs ultrasoniques médicaux



IEC 62127-1:2022-03(en-fr)

CONTENTS

FOREWORD 6
INTRODUCTION 8
1 Scope 9
2 Normative references 9
3 Terms and definitions 10
4 Symbols 32
5 Measurement requirements 34
5.1 Requirements for hydrophones and amplifiers 34
5.1.1 Preface 34
5.1.2 General 34
5.1.3 Sensitivity of a hydrophone 35
5.1.4 Directional response of a hydrophone 35
5.1.5 Effective hydrophone size 35
5.1.6 Choice of the size of a hydrophone active element 35
5.1.7 Bandwidth 37
5.1.8 Linearity 40
5.1.9 Hydrophone signal amplifier 40
5.1.10 Hydrophone cable length and amplifiers 40
5.2 Requirements for positioning and water baths 41
5.2.1 General 41
5.2.2 Positioning systems 41
5.2.3 Water bath 42
5.3 Requirements for data acquisition and analysis systems 43
5.4 Recommendations for ultrasonic equipment being characterized 43
6 Measurement procedure 43
6.1 General 43
6.2 Preparation and alignment 44
6.2.1 Preparation 44
6.2.2 Aligning an ultrasonic transducer and a hydrophone 44
6.3 Measurement 44
6.4 Analysis 44
6.4.1 Corrections for restricted bandwidth and spatial resolution 44
6.4.2 Uncertainties 44
7 Beam characterization 45
7.1 General 45
7.2 Primary pressure parameters 46
7.2.1 General 46
7.2.2 Peak-compressional acoustic pressure and peak-rarefactional acoustic pressure 47
7.2.3 Spatial-peak RMS acoustic pressure 47
7.2.4 Local distortion parameter 48
7.3 Intensity parameters derived from acoustic pressure 48
7.3.1 General 48
7.3.2 Intensity parameters using pulse-pressure-squared integral 49
8 Requirements for specific ultrasonic fields 52

8.1 General ... 52
8.2 Diagnostic fields ... 52
8.2.1 Simplified procedures and guidelines ... 52
8.2.2 Pulsed wave diagnostic equipment ... 52
8.2.3 Continuous wave diagnostic equipment ... 53
8.2.4 Diagnostic equipment with low acoustic output ... 54
8.3 Therapy fields ... 54
8.3.1 Physiotherapy equipment ... 54
8.3.2 High intensity therapeutic ultrasonic fields ... 55
8.3.3 Non-focused and weakly focused pressure pulses ... 55
8.4 Surgical fields ... 55
8.4.1 Lithotripters and pressure pulse sources for other therapeutic purposes ... 55
8.4.2 Low frequency surgical applications ... 56
8.5 Fields from other medical applications ... 56
9 Conformity statement ... 56
9.1 General ... 56
9.2 Maximum probable values ... 56
9.3 Sampling ... 57
Annex A (informative) General rationale ... 58
Annex B (informative) Hydrophones and positioning ... 60
B.1 General ... 60
B.2 Electrical loading considerations ... 60
B.3 Hydrophone signal amplifier ... 60
B.4 Hydrophone cable length and amplifiers ... 60
B.5 Transducer positioning ... 61
B.6 Alignment of hydrophones ... 62
B.7 Water bath lining material ... 62
B.8 Recommendations for ultrasonic equipment being characterized ... 62
B.9 Types of hydrophones ... 63
B.9.1 Ceramic needle hydrophones ... 63
B.9.2 PVDF needle hydrophones ... 63
B.9.3 PVDF membrane hydrophones ... 63
B.9.4 Fibre-optic and optic hydrophones ... 64
B.9.5 Relative performance of different types ... 65
B.10 Typical specification data for hydrophones ... 65
Annex C (informative) Acoustic pressure and intensity ... 66
Annex D (informative) Voltage to pressure conversion ... 68
D.1 General ... 68
D.2 Hydrophone deconvolution procedure ... 69
D.3 Converting the data between double-sided and single-sided spectra ... 70
D.4 Use of hydrophone calibration data ... 72
D.4.1 Calibration data interpolation ... 72
D.4.2 Calibration data extrapolation ... 72
D.4.3 Regularization filtering ... 73
D.5 Implication of the hydrophone deconvolution process on measurement duration ... 74
D.6 Validation of deconvolution implementation ... 75
Annex E (informative) Correction for spatial averaging ... 76

E.1 Linear and quasilinear fields 76
E.2 Linear fields, quasilinear fields, and broadband nonlinearly distorted waveforms 78
Annex F (informative) Acoustic output parameters for multi-mode medical ultrasonic fields in the absence of scan-frame synchronization 81
F.1 General 81
F.2 Current philosophy 81
F.3 Need for an alternative approach 82
F.4 Proposed approach 82
F.4.1 Alternative philosophy 82
F.4.2 Alternative parameters 83
F.5 Measurement methods 84
F.5.1 General 84
F.5.2 Peak pressures 84
F.5.3 Temporal-average intensity 84
F.5.4 Frequency 85
F.5.5 Power 85
F.6 Discussion 85
F.6.1 Relationship to existing standards 85
F.6.2 Advantages 86
F.6.3 Disadvantages 86
Annex G (informative) Propagation medium and degassing 87
Annex H (informative) Specific ultrasonic fields 88
H.1 Diagnostic fields 88
H.1.1 Useful relationships between acoustical parameters 88
H.1.2 Pulsed wave diagnostic equipment 89
H.1.3 Continuous wave diagnostic equipment 89
H.2 Therapy fields 90
H.2.1 Physiotherapy equipment 90
H.2.2 High intensity therapeutic ultrasonic equipment 90
H.2.3 Non-focused and weakly focused pressure pulses 90
H.3 Surgical fields 90
H.3.1 Lithotripters 90
H.3.2 Low frequency surgical applications 90
Annex I (informative) Assessment of uncertainty in the acoustic quantities obtained by hydrophone measurements 91
I.1 General 91
I.2 Overall (expanded) uncertainty 91
I.3 Common sources of uncertainty 91
Annex J (informative) Transducer and hydrophone positioning systems 93
Annex K (informative) Beamwidth midpoint method 94
Bibliography 95

Figure 1 – Schematic diagram of the different planes and lines in an ultrasonic field 12
Figure 2 – Several apertures and planes for a transducer of unknown geometry 26
Figure 3 – Parameters for describing a focusing transducer of known geometry 29
Figure 4 – Schematic diagram of the method of determining pulse duration 46
Figure D.1 – A flow diagram of the hydrophone deconvolution process 70

Figure D.2 – Example of waveform deconvolution 74
Figure J.1 – Schematic diagram of the ultrasonic transducer and hydrophone degrees of freedom 93

Table 1 – Acoustic parameters appropriate to various types of medical ultrasonic equipment 45
Table B.1 – Typical specification data for hydrophones, in this case given at 1 MHz [69] 65
Table C.1 – Properties of distilled or de-ionized water as a function of temperature [71] 67
Table D.1 – Method of conversion from a double- to a single-sided spectrum 71
Table D.2 – Method of conversion from a single- to a double-sided spectrum 71
Table F.1 – Main basic parameters defined in this document or in IEC 61161 82
Table F.2 – List of parameters that are to be used or are to be deleted 83
Table K.1 – Decibel beamwidth levels for determining midpoints 94

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

_____

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 1: Measurement and characterization of medical 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) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 62127-1 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 and Amendment 1:2013. 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) Procedures and requirements for narrow-band approximation and broadband measurements have been modified; details on waveform deconvolution have been added.
d) Procedures for spatial averaging correction have been amended.
e) Annex D, Annex E and bibliography have been updated to support the changes of the normative parts.

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

Draft	Report on voting
87/783/FDIS	87/788/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/standardsdev/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 Words in **bold** in the text are terms 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,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

The main purpose of this document is to define various acoustic parameters that can be used to specify and characterize ultrasonic fields propagating in liquids, and, in particular, water, using hydrophones. Measurement procedures are outlined that may be used to determine these parameters. Specific device related measurement standards, for example IEC 61689, IEC 61157, IEC 61847 or IEC 62359, can refer to this document for appropriate acoustic parameters. In IEC 62359, some additional measurement methods for attenuated parameters and indices are described addressing the specific needs of acoustic output characterization of ultrasonic diagnostic equipment in accordance with IEC 60601-2-37.

The philosophy behind this document is the specification of the acoustic field in terms of acoustic pressure parameters, acoustic pressure being the primary measurement quantity when hydrophones are used to characterize the field.

Intensity parameters are specified in this document, but these are regarded as derived quantities that are meaningful only under certain assumptions related to the ultrasonic field being measured.

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields

1 Scope

This part of IEC 62127 specifies methods of use of calibrated **hydrophones** for the measurement in liquids of acoustic fields generated by ultrasonic medical equipment including **bandwidth** criteria and calibration frequency range requirements in dependence on the spectral content of the fields to be characterized.

This document:

– defines a group of acoustic parameters that can be measured on a physically sound basis;
– defines a second group of parameters that can be derived under certain assumptions from these measurements, and called derived intensity parameters;
– defines a measurement procedure that can be used for the determination of acoustic pressure parameters;
– defines the conditions under which the measurements of acoustic parameters can be made using calibrated **hydrophones**;
– defines procedures for correcting for limitations caused by the use of **hydrophones** with finite **bandwidth** and finite active element size, and for estimating the corresponding **uncertainties**.

NOTE 1 Throughout this document, SI units are used. In the specification of certain parameters, such as **beam areas** and intensities, it can be convenient to use decimal multiples or submultiples. For example, **beam area** is likely to be specified in cm^2 and intensities in W/cm^2 or mW/cm^2.

NOTE 2 The **hydrophone** as defined can be of a piezoelectric or an optic type.

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 60565-1, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones*

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

IEC 62127-2, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz*

IEC 62127-3, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz*

IEC 63009, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 20 kHz to 500 kHz*

ISO 16269-6, *Statistical interpretation of data – Part 6: Determination of statistical tolerance intervals*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 108
INTRODUCTION 110
1 Domaine d'application 111
2 Références normatives 111
3 Termes et définitions 112
4 Symboles 135
5 Exigences de mesure 137
5.1 Exigences relatives aux hydrophones et aux amplificateurs 137
5.1.1 Avertissement 137
5.1.2 Généralités 137
5.1.3 Sensibilité d'un hydrophone 138
5.1.4 Réponse directionnelle d'un hydrophone 138
5.1.5 Taille efficace de l'hydrophone 138
5.1.6 Choix de la taille de l'élément actif d'un hydrophone 138
5.1.7 Largeur de bande 140
5.1.8 Linéarité 143
5.1.9 Amplificateur de signal de l'hydrophone 143
5.1.10 Longueur du câble de l'hydrophone et amplificateurs 144
5.2 Exigences de positionnement et bains-marie 144
5.2.1 Généralités 144
5.2.2 Systèmes de positionnement 144
5.2.3 Bain-marie 145
5.3 Exigences liées aux systèmes d'acquisition et d'analyse des données 147
5.4 Recommandations concernant les appareils à ultrasons en cours de caractérisation 147
6 Mode opératoire de mesure 147
6.1 Généralités 147
6.2 Préparation et alignement 147
6.2.1 Préparation 147
6.2.2 Alignement d'un transducteur ultrasonique et d'un hydrophone 148
6.3 Mesurage 148
6.4 Analyse 148
6.4.1 Corrections de la largeur de bande limitée et de la résolution spatiale 148
6.4.2 Incertitudes 148
7 Caractérisation du faisceau 148
7.1 Généralités 148
7.2 Paramètres de pression principaux 150
7.2.1 Généralités 150
7.2.2 Pression acoustique de compression de crête et pression acoustique de raréfaction de crête 151
7.2.3 Pression acoustique efficace à la crête spatiale 151
7.2.4 Paramètre de déformation locale 152
7.3 Paramètres d'intensité dérivés de la pression acoustique 152
7.3.1 Généralités 152
7.3.2 Paramètres d'intensité utilisant l'intégrale de pression d'impulsion au carré 153

8 Exigences liées aux champs ultrasoniques spécifiques 156
8.1 Généralités 156
8.2 Champs de diagnostic 156
8.2.1 Modes opératoires simplifiés et lignes directrices 156
8.2.2 Appareil de diagnostic à ondes pulsées 157
8.2.3 Appareil de diagnostic à ondes entretenues 157
8.2.4 Appareil de diagnostic à faible émission acoustique 158
8.3 Champs thérapeutiques 158
8.3.1 Appareils de physiothérapie 158
8.3.2 Champs ultrasoniques thérapeutiques de haute intensité 159
8.3.3 Ondes de pression non focalisées et faiblement focalisées 160
8.4 Champs chirurgicaux 160
8.4.1 Lithotripteurs et sources à ondes de pression utilisés à d'autres fins thérapeutiques 160
8.4.2 Applications chirurgicales à basse fréquence 160
8.5 Champs provenant d'autres applications médicales 160
9 Déclaration de conformité 160
9.1 Généralités 160
9.2 Valeurs probables maximales 161
9.3 Échantillonnage 161
Annexe A (informative) Analyse raisonnée générale 162
Annexe B (informative) Hydrophones et positionnement 165
B.1 Généralités 165
B.2 Considérations relatives à la charge électrique 165
B.3 Amplificateur de signal de l'hydrophone 165
B.4 Longueur du câble de l'hydrophone et amplificateurs 165
B.5 Positionnement du transducteur 166
B.6 Alignement des hydrophones 167
B.7 Matériau de revêtement du bain-marie 167
B.8 Recommandations concernant les appareils à ultrasons en cours de caractérisation 168
B.9 Types d'hydrophones 168
B.9.1 Hydrophones à aiguille céramique 168
B.9.2 Hydrophones à aiguille PVDF 168
B.9.3 Hydrophones à membrane PVDF 169
B.9.4 Hydrophones optiques et à fibre optique 169
B.9.5 Performances relatives des différents types d’hydrophone 170
B.10 Données de spécification types pour les hydrophones 170
Annexe C (informative) Pression et intensité acoustiques 172
Annexe D (informative) Conversion de la tension en pression 174
D.1 Généralités 174
D.2 Mode opératoire de déconvolution de l'hydrophone 175
D.3 Conversion des données du spectre à double bande en spectre à une seule bande 176
D.4 Utilisation des données d'étalonnage de l'hydrophone 178
D.4.1 Interpolation des données d’étalonnage 178
D.4.2 Extrapolation des données d’étalonnage 179
D.4.3 Filtrage de régularisation 180

D.5 Implication du processus de déconvolution de l'hydrophone sur la durée du mesurage 181
D.6 Validation de la mise en œuvre de la déconvolution 182
Annexe E (informative) Correction de la moyenne spatiale 183
E.1 Champs linéaires et quasi-linéaires 183
E.2 Champs linéaires, champs quasi-linéaires et formes d'onde à large bande et à déformation non linéaire 185
Annexe F (informative) Paramètres d'émission acoustique de champs ultrasoniques médicaux multimodaux en l'absence de synchronisation exploration-cadre 188
F.1 Généralités 188
F.2 Philosophie actuelle 188
F.3 Nécessité d'une approche alternative 189
F.4 Approche proposée 189
F.4.1 Philosophie alternative 189
F.4.2 Paramètres alternatifs 190
F.5 Méthodes de mesure 191
F.5.1 Généralités 191
F.5.2 Pressions de crête 191
F.5.3 Intensité dérivée de la moyenne temporelle 192
F.5.4 Fréquence 192
F.5.5 Puissance 192
F.6 Discussion 193
F.6.1 Relations avec les normes existantes 193
F.6.2 Avantages 193
F.6.3 Inconvénients 194
Annexe G (informative) Milieu de propagation et dégazage 195
Annexe H (informative) Champs ultrasoniques particuliers 196
H.1 Champs de diagnostic 196
H.1.1 Relations utiles entre les paramètres acoustiques 196
H.1.2 Appareil de diagnostic à ondes pulsées 197
H.1.3 Appareil de diagnostic à ondes entretenues 198
H.2 Champs thérapeutiques 198
H.2.1 Appareils de physiothérapie 198
H.2.2 Appareils ultrasonores thérapeutiques de haute intensité 198
H.2.3 Ondes de pression non focalisées et faiblement focalisées 199
H.3 Champs chirurgicaux 199
H.3.1 Lithotripteurs 199
H.3.2 Applications chirurgicales à basse fréquence 199
Annexe I (informative) Évaluation de l'incertitude dans les grandeurs acoustiques obtenues par suite des mesurages de l'hydrophone 200
I.1 Généralités 200
I.2 Incertitude (élargie) globale 200
I.3 Sources communes d'incertitude 200
Annexe J (informative) Systèmes de positionnement du transducteur et de l'hydrophone 202
Annexe K (informative) Méthode du point médian de largeur de faisceau 203
Bibliographie 204

Figure 1 – Schéma représentant les différents plans et différentes lignes d'un champ ultrasonique 114
Figure 2 – Ouvertures et plans différents pour un transducteur de géométrie inconnue 128
Figure 3 – Paramètres pour la description d'un transducteur focalisant de géométrie connue 132
Figure 4 – Schéma représentant la méthode de détermination de la durée d'impulsion 150
Figure D.1 – Organigramme du processus de déconvolution de l'hydrophone 176
Figure D.2 – Exemple de déconvolution de forme d'onde 181
Figure J.1 – Schéma représentant les degrés de liberté du transducteur ultrasonique et de l'hydrophone 202

Tableau 1 – Paramètres acoustiques adaptés aux différents types d'appareils médicaux à ultrasons 149
Tableau B.1 – Données de spécification types pour les hydrophones, dans ce cas données à 1 MHz [69] 171
Tableau C.1 – Propriétés de l'eau distillée ou déionisée en fonction de la température [71] 173
Tableau D.1 – Méthode de conversion d'un spectre à double bande en spectre à une seule bande 177
Tableau D.2 – Méthode de conversion d'un spectre à une seule bande en spectre à double bande 178
Tableau F.1 – Principaux paramètres de base définis dans le présent document ou dans l'IEC 61161 189
Tableau F.2 – Liste des paramètres qui doivent être utilisés ou supprimés 190
Tableau K.1 – Niveaux de largeur de faisceau en décibel pour déterminer les points médians 203

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

_____

ULTRASONS – HYDROPHONES –

Partie 1: Mesurage et caractérisation des champs ultrasoniques médicaux

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'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 62127-1 a été établie par le comité d'études 87 de l'IEC: Ultrasons. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2007 ainsi que l'Amendement 1:2013. Cette édition constitue une révision technique.

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

a) La limite supérieure de fréquence de 40 MHz a été supprimée.
b) Les définitions de la sensibilité des hydrophones ont été modifiées pour considérer les sensibilités comme des grandeurs à valeurs complexes.

c) Les modes opératoires et les exigences concernant l'approximation à bande étroite et les mesurages à large bande ont été modifiés; des informations détaillées sur la déconvolution des formes d'onde ont été ajoutés.

d) Les modes opératoires de correction de la moyenne spatiale ont été modifiés.

e) L'Annexe D, l'Annexe E et la Bibliographie ont été mises à jour pour tenir compte des modifications apportées aux parties normatives.

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

Projet	Rapport de vote
87/783/FDIS	87/788/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.

Le présent 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/standardsdev/publications

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

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

Le comité a décidé que le contenu du présent 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,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

INTRODUCTION

Le présent document a pour principal objet de définir différents paramètres acoustiques qui peuvent être utilisés pour préciser et caractériser les champs ultrasoniques qui se propagent dans les liquides et, en particulier, dans l'eau, à l'aide d'hydrophones. Les modes opératoires de mesure présentés peuvent être utilisés pour déterminer ces paramètres. Les normes de mesure liées à des appareils spécifiques (IEC 61689, IEC 61157, IEC 61847 ou IEC 62359, par exemple) peuvent se rapporter au présent document pour des paramètres acoustiques appropriés. Quelques méthodes de mesure supplémentaires des paramètres et indices atténués sont décrites dans l'IEC 62359 pour répondre aux besoins spécifiques de caractérisation des émissions acoustiques des appareils de diagnostic à ultrasons conformément à l'IEC 60601-2-37.

La philosophie sur laquelle repose le présent document porte sur la spécification du champ acoustique en matière de paramètres de pression acoustique, cette dernière étant la principale grandeur de mesure lorsque des hydrophones sont utilisés pour caractériser le champ.

Les paramètres d'intensité sont spécifiés dans le présent document. Cependant, ils sont considérés comme des grandeurs dérivées qui sont significatives uniquement dans le cadre de certaines hypothèses liées au champ ultrasonique mesuré.

ULTRASONS – HYDROPHONES –

Partie 1: Mesurage et caractérisation des champs ultrasoniques médicaux

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62127 spécifie les méthodes d'utilisation des **hydrophones** étalonnés qui permettent de mesurer, dans des liquides, les champs acoustiques générés par des appareils médicaux à ultrasons, y compris les critères de **largeur de bande** et les exigences de plage de fréquences d'étalonnage en fonction du contenu spectral des champs à caractériser.

Le présent document:

– définit un groupe de paramètres acoustiques qui peuvent être mesurés sur une base physiquement sonore;

– définit un second groupe de paramètres qui peuvent être déduits, dans le cadre de certaines hypothèses, de ces mesurages et appelés paramètres d'intensité dérivés;

– définit un mode opératoire de mesure qui peut être utilisé pour déterminer les paramètres de pression acoustique;

– définit les conditions dans lesquelles les mesurages des paramètres acoustiques peuvent être réalisés à l'aide d'**hydrophones** étalonnés;

– définit les modes opératoires de correction, dans le cas de limitations provoquées par l'utilisation d'**hydrophones** à **largeur de bande** finie et de taille d'élément actif finie, ainsi que les modes opératoires d'estimation des **incertitudes** correspondantes.

NOTE 1 Tout au long du présent document, le système international d'unités (SI) est utilisé. Dans la spécification de certains paramètres (les **surfaces du faisceau** ou les intensités, par exemple), il peut être utile d'utiliser des multiples ou sous-multiples décimaux. Par exemple, la **surface du faisceau** est susceptible d'être exprimée en cm^2 et les intensités en W/cm^2 ou mW/cm^2.

NOTE 2 L'**hydrophone**, tel qu'il est défini, peut être de type piézoélectrique ou optique.

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 60565-1, *Acoustique sous-marine – Hydrophones – Étalonnage des hydrophones – Partie 1: Procédures d'étalonnage en champ libre des hydrophones*

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

IEC 62127-2, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 2: Étalonnage des champs ultrasoniques jusqu'à 40 MHz*

IEC 62127-3, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 3: Propriétés des hydrophones pour les champs ultrasoniques jusqu'à 40 MHz*

IEC 63009, *Ultrasons – Systèmes de physiothérapie – Spécifications des champs et méthodes de mesure dans la plage de fréquences de 20 kHz à 500 kHz*

ISO 16269-6, *Interprétation statistique des données – Partie 6: Détermination des intervalles statistiques de dispersion*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*