

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Electric welding equipment – Assessment of restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (0 Hz to 300 Hz) –
Part 3: Resistance welding equipment**

**Matériels de soudage électrique – Évaluation des restrictions relatives à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz) –
Partie 3: Matériels de soudage par résistance**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2023 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Electric welding equipment – Assessment of restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (0 Hz to 300 Hz) –
Part 3: Resistance welding equipment**

**Matériels de soudage électrique – Évaluation des restrictions relatives à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz) –
Partie 3: Matériels de soudage par résistance**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 25.160.30

ISBN 978-2-8322-7056-1

**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.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions, quantities, units, constants and symbols	9
3.1 Terms and definitions.....	9
3.2 Quantities and units	11
3.3 Constants	11
3.4 Symbols.....	12
4 Requirements	12
5 Assessment methods.....	13
5.1 General.....	13
5.2 Methods based on reference levels.....	13
5.2.1 General	13
5.2.2 Assessment based on measured magnetic field	14
5.2.3 Assessment based on measured welding current.....	16
5.3 Methods based on assessment of corporal quantities (basic restrictions).....	18
5.3.1 General	18
5.3.2 Method based on coupling coefficients	19
5.3.3 Method based on the correction factor.....	21
5.3.4 Method based on the human model simulation.....	22
5.3.5 Result comparison	24
6 Measurement considerations	24
6.1 Measurement instruments for magnetic fields or exposure levels	24
6.1.1 General	24
6.1.2 Probe(s)	25
6.1.3 Handheld field meter	25
6.1.4 Measurement system with separate elements	25
6.2 Instruments for recording	26
6.2.1 Welding current recording.....	26
6.2.2 Magnetic field recording.....	26
6.3 Signal processing (applicable to any welding current waveform)	27
6.3.1 General	27
6.3.2 Application of the weighted peak method in the time domain	27
6.3.3 Spatial averaging.....	27
6.3.4 Time averaging.....	27
6.4 Uncertainty of assessment	27
7 Computational assessment methods.....	28
7.1 General.....	28
7.2 Quasi-static approximation.....	28
7.3 Human body models for simulation	28
7.4 Computational assessment against the basic restrictions	29
8 Source model	30
8.1 General.....	30
8.2 Source model example.....	30
9 EMF data sheet and assessment report.....	32
Annex A (informative) Example of assessment based on the individual components	34

A.1	General.....	34
A.2	Welding current generator.....	34
A.3	Coupling coefficient of welding circuit	37
A.4	Welding-system	38
Annex B	(informative) Example datasheets	40
B.1	Example current generator datasheet.....	40
B.2	Example datasheet of the welding circuit	41
B.3	Example datasheets of equipment assembly	42
Annex C	(informative) Coupling coefficient method	45
C.1	Principle	45
C.2	Validation of this method.....	45
C.2.1	Context.....	45
C.2.2	Basic restriction against health effects	46
C.2.3	Basic restriction against sensory effects	46
C.3	Conclusion.....	47
Annex D	(informative) Correction factor method.....	49
D.1	General.....	49
D.2	Principle	49
D.3	Example of correction factor finding	50
D.3.1	Context.....	50
D.3.2	Correction factor for the trunk and limbs	50
D.3.3	Correction factor for the head	50
D.4	Conclusion.....	51
Annex E	(informative) Example of exposure assessments on a welding machine	52
E.1	General.....	52
E.2	Description of the spot welding workstation.....	52
E.3	Exposure conditions.....	52
E.4	Main simulation parameters and results	54
E.4.1	Main simulation parameters	54
E.4.2	Simulation results	55
E.5	Exposure assessments	55
E.5.1	General.....	55
E.5.2	Method based on magnetic field calculation.....	55
E.5.3	Method based on coupling coefficients	55
E.5.4	Method based on the correction factor	56
E.5.5	Method based on the human model	56
E.6	Conclusion.....	57
Annex F	(informative) Computational methods	58
F.1	General.....	58
F.2	SPFD method	58
F.3	Quasi-static – Finite element method	58
F.4	Impedance method	59
F.5	Hybrid technique of FEM and SPFD method	60
F.6	Computation of the magnetic vector potential.....	60
Annex G	(informative) Averaging algorithms	62
G.1	Current density averaging over an area	62
G.1.1	General	62
G.1.2	Calculation of the current density in a Cartesian voxel.....	62

G.1.3	Calculation of the current density in a tetrahedron	63
G.1.4	Calculation of J_{avg}	63
G.2	E-field averaging in a cubical volume	64
G.3	E-field averaging along an averaging distance	64
G.3.1	General	64
G.3.2	Algorithm to construct the integration path	65
Annex H (informative)	Correspondence table between time domain and frequency domain	66
Bibliography		68
Figure 1	– Exposure measurement at the head position	15
Figure 2	– Exposure measurement at trunk position	15
Figure 3	– Exposure measurement at limb positions (hands and thigh)	16
Figure 4	– Compliance perimeters according to reference levels (action levels)	18
Figure 5	– Compliance perimeters according to basic restrictions (exposure limit values)	21
Figure 6	– Magnetic field around the human body obtained by source modelling	23
Figure 7	– Example of induced electric field in a human body exposed to a welding gun ($I = 1\text{ kA}$ to 50 Hz)	24
Figure 8	– Welding current flowing in a ($a \times b$) rectangular loop configuration	31
Figure A.1	– Assessment of a complete welding system	34
Figure A.2	– Typical component based assessment	34
Figure A.3	– LF-AC (left) and MF-DC (right) current waveforms	35
Figure A.4	– Combined ELV for the sensory and health effects applicable to the head	35
Figure A.5	– Current exposure indices over the time for two welding technologies	36
Figure A.6	– Geometry of the stationary spot welding gun	37
Figure A.7	– Welding electric circuit model (in m) and one point of interest along the X axis	37
Figure A.8	– Coupling coefficient CC_{BI} along the X axis	38
Figure A.9	– Exposure index (AL) along the X axis	38
Figure A.10	– Exposure index (ELV) along the X axis	39
Figure B.1	– Example datasheet of the power source	40
Figure B.2	– Example datasheet of the electrode assembly	41
Figure B.3	– Datasheet example of the welding system	42
Figure B.4	– Example datasheet of the welding system (continuation)	43
Figure B.5	– Example datasheet of the welding system (continuation)	44
Figure C.1	– Distribution of human to disk model exposure index ratios (health effects of ELV on trunk and hands)	46
Figure C.2	– Distribution of human to disk model exposure index ratios (sensory and health effects of ELV on the head)	47
Figure D.1	– Distribution of correction factor k_E for health effects on trunk and hands	50
Figure D.2	– Distribution of correction factor k_E for effects on the head (sensory and health)	51
Figure E.1	– Welding gun and its electric circuit model (yellow dash segments)	53
Figure E.2	– Magnetic field distribution around the exposed body	53

Figure E.3 – Configuration and electric field distribution on the exposed body (for 1 kA at $f = 50$ Hz)	54
Figure E.4 – Electric field distribution on hands (for 1 kA at $f = 50$ Hz)	54
Figure G.1 – Field components on voxel edges	63
Table 1 – Examples of human models to determine induced electric fields in the low frequency range	29
Table A.1 – Current exposure index for LF-AC technology ($I_{\text{rms}} = 11,4$ kA)	36
Table A.2 – GP current exposure index for LF-AC technology ($I_{\text{rms}} = 11,4$ kA)	36
Table C.1 – Representative disk radius (geometric model)	45
Table C.2 – Coupling coefficients	47
Table E.1 – Coupling coefficients for the magnetic field and on human model	55
Table E.2 – Results based on magnetic field calculation	55
Table E.3 – Results based on coupling coefficients	56
Table E.4 – Results based on the correction factor	56
Table E.5 – Results based on human model	56
Table H.1 – Transcription of formulae	66

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62822-3:2023

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTRIC WELDING EQUIPMENT – ASSESSMENT OF RESTRICTIONS RELATED TO HUMAN EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS (0 HZ TO 300 GHz) –

Part 3: Resistance welding equipment

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 62822-3 has been prepared by IEC technical committee 26: Electric welding. It is an International Standard.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2017. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) inclusion of the uncertainties in the results of the assessment;
- b) simplification of the methods of exposure assessment.

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

Draft	Report on voting
26/744/FDIS	26/745/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 in the IEC 62822 series, published under the general title *Electric welding equipment – Assessment of restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*, can be found on the IEC website.

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 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.

ELECTRIC WELDING EQUIPMENT – ASSESSMENT OF RESTRICTIONS RELATED TO HUMAN EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS (0 HZ TO 300 GHZ) –

Part 3: Resistance welding equipment

1 Scope

This part of IEC 62822 applies to equipment for resistance welding and allied processes designed for occupational use by professionals and for use by laymen.

More generally, this document covers equipment for which the welding current flows in an electrical circuit whose geometry cannot be changed and regardless of the technology of the current generator (for example LF-AC, MF-DC for spot or seam welding or capacitive discharge used for stud welding).

NOTE 1 Allied processes such as resistance hard and soft soldering or resistance heating achieved by means comparable to resistance welding equipment are included as well.

This document specifies procedures for the assessment of human exposure to magnetic fields produced by resistance welding equipment. It covers non-thermal biological effects in the frequency range from 0 Hz to 10 MHz and defines standardized test scenarios.

NOTE 2 The general term “field” is used throughout this document for “magnetic field”.

NOTE 3 For the assessment of exposure to electric fields and thermal effects, the methods specified in IEC 62311 or relevant basic standards will apply.

This document aims to propose methods for providing EMF exposure data that can be used to assist in the assessment of the workplace, especially when the conditions of use of the equipment are not known. When these are technically constrained (for example, a double hand control imposes the position and posture of the user), the data can be directly exploitable if they fall within the scope specified by the manufacturer or the integrator.

Other standards can apply to products covered by this document. In particular this document cannot be used to demonstrate electromagnetic compatibility with other equipment. It does not specify any product safety requirements other than those specifically related to human exposure to electromagnetic fields.

This document proposes several methods to assess the exposure to EMF, from simple to sophisticated, with the latter providing more precise assessment.

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 60050-851:2008, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 851: Electric welding* (available at www.electropedia.org)

IEC 60974-1, *Arc welding equipment – Part 1: Welding power sources*

IEC 60974-6, *Arc welding equipment – Part 6: Limited duty equipment*

IEC 61786-1, *Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 1: Requirements for measuring instruments*

IEC 61786-2:2014, *Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 2: Basic standard for measurements*

IEC 62226-2-1, *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 2-1: Exposure to magnetic fields – 2D models*

IEC 62311, *Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*

IEC 62822-1:2016, *Electric welding equipment – Assessment of restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) – Part 1: Product family standard*

3 Terms, definitions, quantities, units, constants and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-851, IEC 60974-1, IEC 60974-6, and the following apply.

ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>

3.1.1

basic restriction

restriction on exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields that is based directly on established health effects and biological considerations

Note 1 to entry: Basic restrictions are also named dosimetric reference limits (DRLs) and exposure limit values (ELVs).

3.1.2

coupling-coefficient

CC_{YX}

relation allowing to estimate Y from X

EXAMPLE CC_{EI} gives the maximum induced electric field inside a region of the human body according a unit welding current.

Note 1 to entry: Keeping in mind that the electric conductivity can be frequency dependent, a conversion between CC_{JI} and CC_{EI} or CC_{JB} and CC_{EB} is possible with the relation given in Formula (1)

$$J(j\omega) = \sigma(j\omega) \cdot E(j\omega) \quad (1)$$

where

J is the electric current density, expressed in ampere per square meter;

E is the electric field strength, expressed in volt per meter;

σ is the conductivity, expressed in siemens per meter;

ω is the angular frequency ($2 \cdot \pi \cdot f$), expressed in radians per second".

3.1.3

exposure index

EI

result of the evaluation of exposure to (both sinusoidal and non-sinusoidal) EMF, expressed as a fraction or percentage of the permissible values

Note 1 to entry: Fractions higher than 1 (100 %) exceed the permissible values.

3.1.4

general public

individuals of all ages and of varying health conditions

3.1.5

intracorporeal

situated or occurring within the body

3.1.6

layman

operator who does not weld in the performance of his profession and may have little or no formal instruction in welding

[SOURCE: IEC 60050-851:2008, 851-11-14, modified – “arc welding” was replaced with “welding”.]

3.1.7

non-thermal effect

stimulation of muscles, nerves or sensory organs as a result of human exposure to EMF

3.1.8

occupational exposure

exposure of workers to EMF at their workplaces, generally under known conditions, and as a result of performing their regular or assigned job activities

Note 1 to entry: A worker is any person employed by an employer, including trainees and apprentices.

3.1.9

reference level

directly measurable quantity, derived from basic restrictions, provided for practical exposure assessment purposes

Note 1 to entry: Reference levels are also named exposure reference levels (ERLs) and action levels (ALs).

Note 2 to entry: Respect of the reference levels will ensure respect of the relevant basic restriction. If the reference levels are exceeded, it does not necessarily follow that the basic restriction will be exceeded.

3.1.10

resistance welding system

combination of power source, transformer, cabling and welding circuit

3.1.11

sensory effect

transient disturbed sensory perceptions and minor change in brain functions as a result of human exposure to EMF

3.1.12**standardized configuration**

configuration reflecting the normal operator positions

3.1.13**standardized distance**

distance from the axis of a part of the welding circuit to the closest surface of the body in standardized configurations

3.1.14**welding circuit**

conductive material through which the welding current is intended to flow

Note 1 to entry: In resistance welding, the workpieces are not part of the welding circuit for the purposes of this document.

[SOURCE: IEC 60050-851:2008, 851-14-10, modified – the two notes to entry have been deleted, and a new note to entry has been added.]

3.2 Quantities and units

The internationally accepted SI units are used throughout this document.

Symbols throughout this document set in bold type are vector quantities.

Physical quantity	Symbol	Unit	Dimension
Electric conductivity	σ	Siemens per metre	$S \cdot m^{-1}$
Electric current	I	Ampere	A
Electric current density	J	Ampere per square metre	$A \cdot m^{-2}$
Electric field strength	E	Volt per metre	$V \cdot m^{-1}$
Frequency	f	Hertz	Hz
Magnetic flux density	B	Tesla	T ($V \cdot s / m^2$)
Magnetic permeability	μ	Henry per metre	$H \cdot m^{-1}$
Wavelength	λ	Metre	m

3.3 Constants

Physical constant	Symbol	Magnitude	Dimension
Permeability of free space	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$

3.4 Symbols

Symbols used in this document are expanded hereafter.

Symbols	Meaning
*	Convolution product i.e. $B(t)*WL(t)$ means filtering $B(t)$ by $WL(t)$
t	Time
f	Frequency of a single frequency signal
$B(t)$	Magnetic flux density (magnetic field) in the time domain
$B(f)$	Magnetic flux density (magnetic field) in the frequency domain
$B_{RL}(f)$	B reference level at f
$W_{RL}(t)$	Time (impulse) response of the weighted filter according to the reference level
$W_{RL}(f)$	Frequency response of the weighted function according to the reference level
EI_{RL}	Exposure index according to the reference level
$I(t) / I$	Welding current in the time domain/frequency domain
CC_{BI}	Coupling coefficient from I to B (frequency independent)
$\mathcal{F}^{-1}$	Inverse Fourier transform
dB/dt	Time derivate of the magnetic flux density
R	Disk radius of 2D geometric model
E_i	Induced or internal electric field
dI/dt	Time derivate of the welding current
$W_{BR}(t)$	Time (impulse) response of the weighted filter according to the basic restriction
$W_{BR}(f)$	Frequency response of the weighted function according to the basic restriction
$CC_{EB/2D}$	Coupling coefficient from B to E_i with geometric model
$CC_{EI/HM}$	Coupling coefficient from I to E_i with human model
EI_{BR}	Exposure index according to the exposure limit value (basic restriction)
k_E	Exposure index coefficient
CEI_{BR}	Current exposure index according to the basic restrictions

4 Requirements

Equipment shall be assessed as defined in Clause 5.

If the assessment is conducted using measured or calculated external field levels, 5.2 shall be applied in conjunction with Clause 6.

If the assessment is conducted using corporal quantities, 5.3 shall be applied in conjunction with Clause 6 if measurements are performed and in conjunction of Clause 7 if a human model is applied.

The results shall be reported as specified in Clause 9.

5 Assessment methods

5.1 General

Clause 5 provides basic assessment methods considering the direct effects of electromagnetic fields [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]¹. Evaluations are made either against basic restrictions or against derived reference levels. In international guidelines, different limits on basic restrictions and reference levels are defined for stimulation effects which are considered for exposure to low frequency magnetic fields.

There are five methods to assess the welding equipment exposure and to demonstrate conformity or give enough information to demonstrate it with the reference levels or basic restrictions, or both. Any of the five methods can be selected, depending on which is the most relevant for the exposure assessment. If one of the first four methods does not lead to compliance, another can be chosen. The ultimate method is the fifth (dosimetry with human model).

While the evaluation based on measuring incident magnetic fields against reference levels is the easiest method (see 5.2.2), the evaluation based on computed magnetic field from the welding current can predict the exposure, and it does not require a field meter (see 5.2.3). Those methods are necessarily more conservative than the assessment of exposure according to induced quantities against basic restrictions.

Thus, the evaluation of internal (or induced) E-field or current density against basic restrictions (5.3) is performed with more realistic exposure conditions considering mainly the heterogeneity of the magnetic field.

Evaluations of induced fields against basic restrictions using simple (geometric) models are methods of intermediate complexity (see 5.3.2 and 5.3.3). As these methods have to cover a large number of situations, they are conservative most of the time and in extreme cases, they become accurate.

Lastly, evaluation of induced fields against basic restrictions with an electrical representative human body is the most rigorous and reduces uncertainties. It requires simulation after a faithful modelling of the environment (see 5.3.4).

5.2 Methods based on reference levels

5.2.1 General

The assessments are based on external (incident) magnetic fields against reference levels.

Reference levels have been derived from the basic restrictions considering the conditions which maximized the exposure (whole body exposure to a uniform field). Such an assessment is conservative under all non-uniform and local exposure conditions, which is the case in most occupational exposure situations. Therefore, this method is simple but it overestimates exposure to welding equipment most of the time.

The exposure level is determined by a comparison of the magnetic field and the relevant exposure limits applicable to the affected regions of the body.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

5.2.2 Assessment based on measured magnetic field

5.2.2.1 General

The method based on the measured magnetic field is convenient when the use of equipment is known. In general, the assessment is performed on one or two welder positions.

Exposure shall be performed on the trunk, near the head, on both hands and on the thighs when they are the closest part to the welding electric circuit. This leads to four, sometimes five, measurement points on each welder position as described in 5.2.2.2 to 5.2.2.4. The measuring points are the places where the measured level is the maximum (worst-case point) of the different parts of the body. In general, they are closest to the welding circuit. A scan on the surface of each body part can help determine these positions.

The reading values at these points should be recorded together with the positions in the compliance testing report in order to carry out reproduceable measurements.

In practice, a magnetic field meter is able to measure either the magnetic field (in tesla) or the exposure index directly according to the relevant exposure limit. Most often the meter incorporates the weighted peak method in the time domain (methods with an RMS detector shall not be used in the low frequency range). This method is relevant for any kind of magnetic field waveform (sine, burst, pulsed, or square). In particular, it takes into account the transients when the current starts and stops to flow. The meter applies directly the formula:

$$EI_{RL} = \max |W_{RL}(t) * B(t)| \quad (2)$$

where

* represents the convolution product, i.e. the filtering of $B(t)$ by $W_{RL}(t)$;

$W_{RL}(t)$ is the time response of a frequency weighting function $W_{RL}(f)$ relevant to the reference level;

EI is a dimensionless number. Compliance is guaranteed when it is equal to or less than 1 or 100 % if expressed as a percentage;

$W_{RL}(f)$ is the inverse peak value of the exposure limit (B_{RL} in RMS value) at the frequency f , i.e.

$$W_{RL}(f) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot B_{RL}(f)}$$

The probe is positioned on the region of the body or at defined positions on particular parts of the equipment as gun handles. It can also be positioned by hook-and-loop fasteners on the helmet, gloves or apron. An appropriate cable to attach the probe to the detector can be used, for example in a tight workspace or to prevent discomfort to the welders.

The results allow to conclude on the compliance according to the reference levels under the present situation.

5.2.2.2 Exposure of the head

The maximum exposure level should be sought around the head, and more specifically, if desired, around the central nervous system (CNS) of the head. The measurement point is located in contact with the head at a location closest to the welding circuit, as illustrated in Figure 1. A scan of the head surface can help.

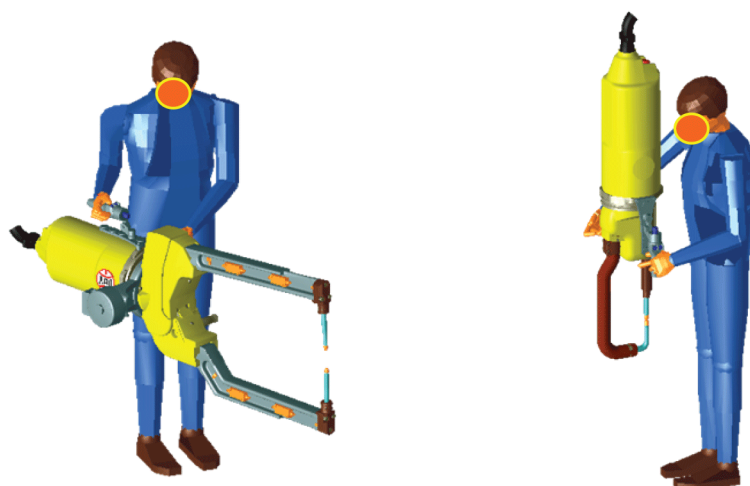


Figure 1 – Exposure measurement at the head position

5.2.2.3 Exposure of the trunk

Measurement points are on the trunk (chest, belly, hip or shoulder), at the closest part to the welding circuit, as illustrated in Figure 2. The most exposed points and their value shall be collected.



Figure 2 – Exposure measurement at trunk position

5.2.2.4 Exposure of the limbs

Measurement points are on the dorsum to both hands (control/right hand and handle/left hand), as illustrated in Figure 3. The probe can be fixed on the handles. An additional point shall be considered if the welding circuit is closer to the thighs than the trunk, as shown in Figure 3.

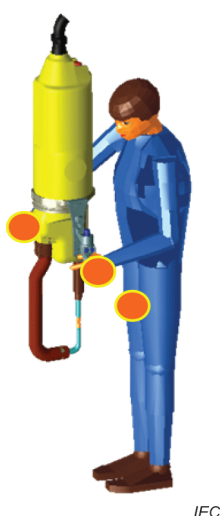


Figure 3 – Exposure measurement at limb positions (hands and thigh)

5.2.3 Assessment based on measured welding current

The method based on the calculated magnetic field is convenient when the use of equipment is unknown as in repair, for the realization of single assemblies such as prototypes, or when several people assist the welder. In these cases, there are no predefined working positions. This method should also be preferred by the manufacturer to provide information allowing the user to assess the risk of exposure.

This method involves defining the compliance perimeters around the equipment. The user is able in person to determine compliance and to implement preventive measures (such as minimum distances) if any.

This method also allows to determine exposure levels against reference levels at localized points as well, as described in 5.2.2.

The method consists in recording the welding current waveform by an appropriate tool compliant with 6.1.4.1 (e.g. a current probe connected to a scope) and to model the welding electric circuit as shown in 8.2 for a rectangular circuit. The most exposing current shall be selected (determined by the maximum exposure level obtained at an arbitrary position and an arbitrary reference level, e.g. low action level).

The model of the field source should be based on its original CAD (computer aided design) data. Alternatively, the electric circuit size and position (if stationary) are measured. All dimensions and shape can be rounded upwards (the larger the welding circuit, the higher the exposure level).

In this way, the magnetic field is calculated in the volume around the equipment according to the formula at each point:

$$B(t) = CC_{BI} \cdot I(t) \quad (3)$$

where

$I(t)$ denotes the welding current over the time in ampere,

CC_{BI} is the coupling coefficient (expressed in tesla/ampere $\frac{T}{A}$) between the welding current and the magnetic field. It depends only on the circuit geometry (see Clause 8) and the spatial position. It can be calculated at a particular location, along an axis or in the entire volume around the welding equipment. Annex A, Clause A.3 gives an example.

$B(t)$ allows to calculate the exposure index according to the relevant exposure limit. Formula (2) and Formula (3) can be combined as follows:

$$EI_{RL} = CC_{BI} \cdot \max |W_{RL}(t) * I(t)| \quad (4)$$

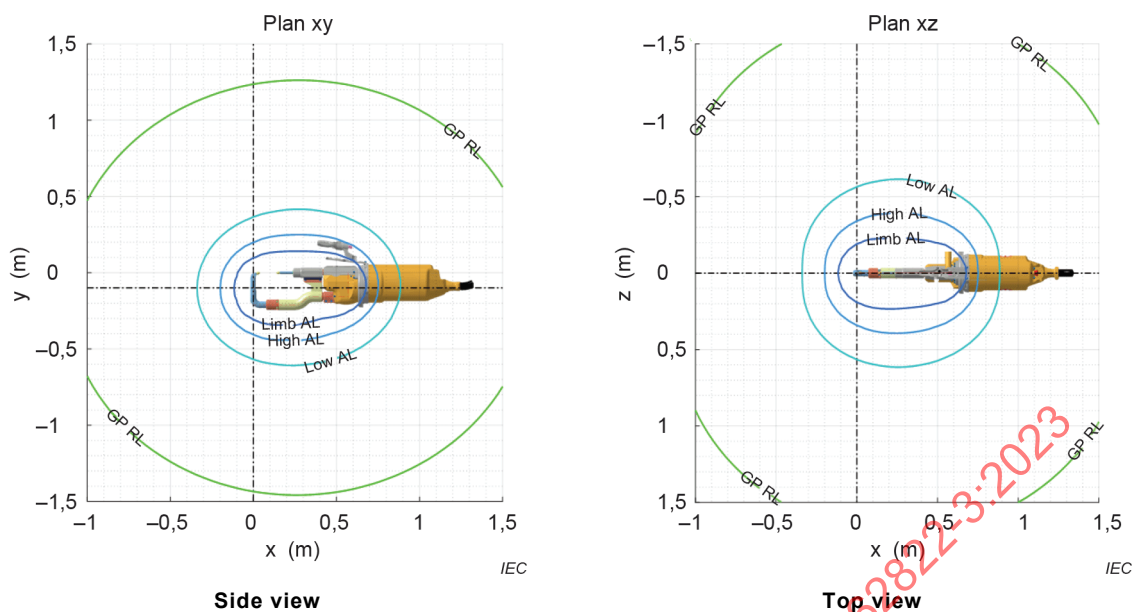
with the previous notations.

$\max |W_{RL}(t) * I(t)|$ represents the current exposure index (CEI_{RL}) according to the reference level expressed in $\frac{A}{T}$. It is a constant value around the equipment depending on the current only. It can be provided by the current generator manufacturer.

Formulae transcriptions in the frequency domain are given in Annex H.

This method allows to plot figures (see Figure 4) showing the compliance perimeters for example for four reference levels [9] where exposure indices are equal to 1 (100 %):

- LAL: Low action level. It is the compliance limit of the head to prevent sensory effects.
- HAL: High action level. It is the compliance limit of the head and the trunk to prevent health effects.
- Limb AL: Limb action as defined by European regulation [9]. It is the compliance limit of the hands, arms and thigh to prevent health effects.
- GPRL: reference level defined for the general public applicable in Europe [1]. This limit is also applicable to workers at particular risk, such as active implanted medical device holders [1]), and pregnant women where national laws can apply. This limit makes it possible to ignore the contributing effects of any neighboring equipment in the evaluation.



- Low AL: Low action level to prevent sensory effects
- High AL: high action level to prevent health effects on trunk and head
- Limb AL: Limb action level to prevent health effects on limbs
- GPRL: general public reference level including protection of workers at particular risks [29]

Figure 4 – Compliance perimeters according to reference levels (action levels)

It is possible to plot isometric magnetic field curves.

An advantage of this method is to define the compliance perimeters during the design before having the material in order to prepare its integration.

5.3 Methods based on assessment of corporal quantities (basic restrictions)

5.3.1 General

The reference levels of electromagnetic fields are derived from the basic restrictions considering the maximum coupling conditions between the fields and the human body, i.e. the maximum induced quantities in the human body exposed to the uniform electromagnetic fields. In many real exposure situations, such as in the vicinity of welding equipment where the field decreases rapidly with distance, the evaluations are too conservative when the maximum of the magnetic field is compared to the reference levels. Considering basic restrictions leads to more realistic results. Internal electric field or current density in the low frequency range (< 10 MHz) induced by the incident magnetic field are defined as corporal quantities. They are difficult, if not impossible, to measure directly. Their evaluation is often performed using dosimetry approaches based on computation or simulation. In some cases, it is possible to include in this approach measurement of magnetic fields around the radiating source.

These methods proposed are possible as the quasi-static approximation conditions are met (see 7.2). In addition, in the frequency range under consideration, the frequency dependency is linear.

The three proposed dosimetry approaches make it possible to best estimate exposure in a relatively simple to quite sophisticated way.

5.3.2 Method based on coupling coefficients

The method based on coupling coefficients is an adaptation of IEC 62226-2-1. The approach is based on the fact that the maximum induced electric field can be estimated analytically on a disk (2D model) in the time domain by a simple formula when the magnetic field is uniform:

$$E_i(t) = \frac{R}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (5)$$

where

R represents the radius of a disk, in meter, with a given conductivity, and it depends on the region of the body requiring an exposure assessment (see Table C.1 in Annex C),

dB/dt is the time derivative of B (uniform magnetic flux density normal to the plane of the disk) in tesla (T),

E_i is the induced electric field in $V \cdot m^{-1}$.

NOTE Formula (1) allows to calculate the current density J from the induced electric field E_i .

When the magnetic field is not uniform, the maximum magnetic field on the disk shall be multiplied by a compensation factor K obtained by simulation.

Instead of estimating this factor by the heterogeneity of the magnetic field on a disk, it can be numerically derived by the incident magnetic field, the induced electric field of Formula (5) and comparison with the electric field induced in a human model. Details are given in Annex C. Formula (5) becomes:

$$E_i(t) = K \cdot \frac{R}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt} = CC_{EB/2D} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (6)$$

where $CC_{EB/2D}$ is the coupling coefficient between the derivative of the magnetic field and the induced electric field (expressed in $\frac{V \cdot m^{-1}}{T \cdot Hz}$). It depends on the spatial distribution of the magnetic field and it considers the dimension of the exposed region of the body. This coefficient is time independent.

Annex C describes an estimation of the compensation factor K and the coupling coefficients

$CC_{EB/2D} = K \cdot \frac{R}{2}$ for different values of R .

To be conservative and in order to simplify the processing, the magnetic field module $|B|$ is taken into account instead of the perpendicular component (the relative orientation according to the magnetic flux density direction can be ignored as this condition considers the worst-case which maximizes the result).

Combining Formula (6) with $B(t)$ obtained by the welding circuit model of Formula (3), the induced electric field becomes:

$$E_i(t) = CC_{EB/2D} \cdot CC_{BI} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \quad (7)$$

As for the reference level of Formula (4), the exposure index according to basic restrictions is

$$EI_{BR} = CC_{EB/2D} \cdot CC_{BI} \cdot \max \left| W_{BR}(t) * \frac{dI(t)}{dt} \right| \quad (8)$$

where

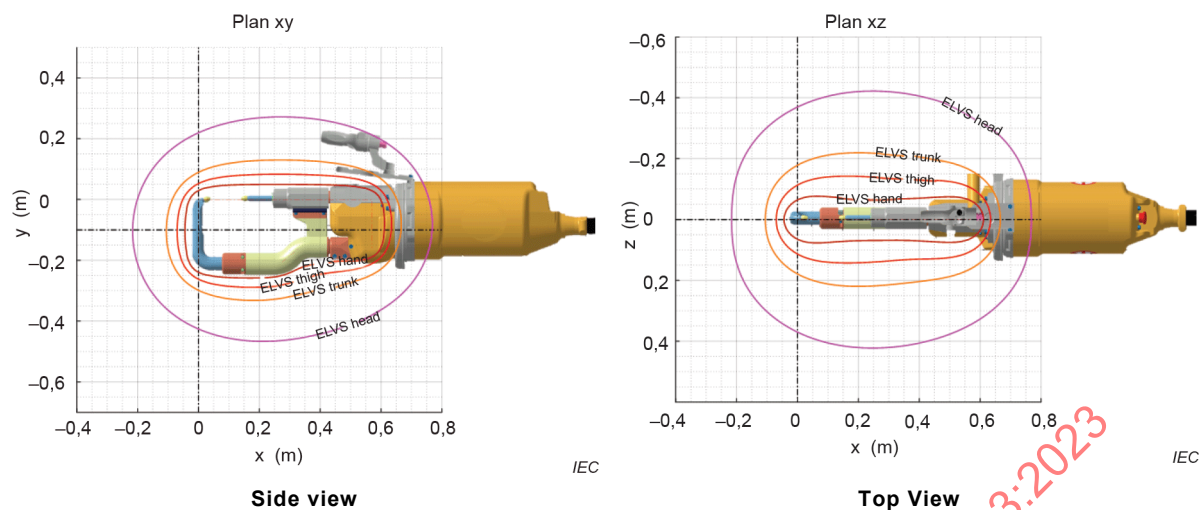
the previous notations are respected and $W_{BR}(t)$ represents the time response of a frequency weighting function $W_{BR}(t)$ relevant to the basic restrictions to be assessed.

$W_{BR}(f)$ is the inverse peak value of the exposure limit ($E_{BR}(f)$ in RMS value) at the frequency f , i.e.

$$W_{BR}(f) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot E_{BR}(f)}$$

$\max |W_{BR}(t) * I(t)|$ represents the current exposure index (CEI_{BR}) according to the basic restriction of interest expressed in $\frac{A \cdot Hz}{V/m}$. It is a constant value around the equipment. It can be provided by the current generator manufacturer.

Hence, EI_{BR} can be calculated either from the record of $B(t)$ with Formula (6) or from the record of $I(t)$ with Formula (8). In the first case, it is a combination of magnetic field measurement and calculation. It can be applied on a few exposure points (see Clause A.1). In the second case, CC_{BI} is being computed by modelling the welding circuit. This allows to draw compliance perimeters as shown in Figure 5.



- ELVS head: sensory effects ELV applicable on the head
- ELVH trunk: health effects ELV applied on the trunk
- ELVH hand: health effects ELV applied on the hands
- ELVH thigh: health effects ELV applied on the thighs

Figure 5 – Compliance perimeters according to basic restrictions (exposure limit values)

5.3.3 Method based on the correction factor

The method based on the correction factor is basically similar to the method presented in 5.3.2. It differs by using the reference level exposure index EI_{RL} as an alternative to the record of the magnetic field or of the current. It was originally introduced for exposure assessments in low frequencies in IEC 62226-2-1 and IEC 62311, then amended in IEC 62233 [28]. The proposed concept of compliance applied on current densities can be expandable to the induced electric field [11], [12].

Firstly, a correction factor k_E is predefined by Formula (9):

$$k_E = \frac{EI_{BR}}{EI_{RL}} \quad (9)$$

where

EI_{BR} is the exposure index according to the basic restriction (e.g. ELV or DRL);

EI_{RL} is the exposure index according to the reference level (e.g. AL or ERL);

k_E is dimensionless.

EI_{RL} is determined as described previously, by direct measuring or by calculation from the magnetic field or the current, considering also the worst-case scenarios. The exposure index obtained by direct measuring shall be carried out with a 3 cm² or smaller probe.

EI_{BR} is determined by simulation with the human model, taking into account field distributions and distances to the human body encountered around the welding equipment. Based on numerous evaluations, conservative values of the correction factor k_E were estimated (see Annex D).

Thus, k_E is predefined for resistance welding equipment only and it considers the effects of field non-uniformity. This factor is waveform independent, and so is the current or magnetic field frequency. It leads to a conservative result.

The compliance assessment can be performed by comparing the multiplied value of the measured or calculated exposure index according to the reference level of the magnetic field and the predefined factor as

$$EI_{BR} = k_E \cdot EI_{RL} \quad (10)$$

where

EI_{RL} is the measured or calculated exposure level/reference level,

EI_{BR} is the estimated exposure level/basic restriction.

The magnetic field or current welding waveform are considered in EI_{RL} when the weighted peak method is applied.

5.3.4 Method based on the human model simulation

In this method, a realistic human model is used to calculate induced quantities for the most representative of the real conditions.

Several realistic human models are available to derive induced quantities. The adult male model with a spatial resolution equal to less than 2 mm shall comprise at least of 50 different tissues including at least skin, brain white matter and brain grey matter. Each tissue has one particular electric conductivity value.

Different calculation methods can be carried out to determine induced quantities in the human body by an incident magnetic field emitted from welding equipment. Examples are the impedance method (IM) and scalar potential finite difference (SPFD) method. Annex F provides an overview of different calculation methods. As the information given is not sufficient for application, the source materials referred to should be reviewed.

Measured magnetic field data may be directly applied as a source in the IM. The SPFD uses vector potentials as a source to calculate the internal electric field. Vector potentials are obtained preferably by calculation from the source model or by default, also by measuring the magnetic field (H) or the magnetic flux density (B) in the volume occupied by the exposed body. In this case spatial coordinates of collected measurements are necessary.

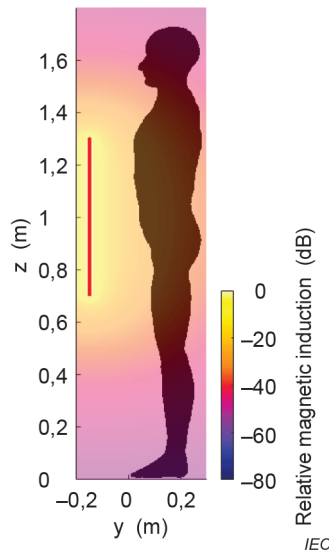


Figure 6 – Magnetic field around the human body obtained by source modelling

The general approach to assess the induced quantities consists in:

- a) Modeling the magnetic field on the volume occupied by the model (welder) with the mesh resolution by:
 - recording the welding current and modeling the welding electric circuit from the CAD data or from the dimensions, shape and height from the ground; and
 - calculating the magnetic field vector (Figure 6);
 or
 - recording the magnetic field vector on several locations on the volume occupied by the human model; and
 - interpolating the recorded magnetic field on the whole volume occupied with the mesh resolution.
- b) If required as for the SPFD, calculating the magnetic potential vector.
- c) Selecting the human model with its physical and electrical properties. Conductivity at the frequency of the current generator shall be applied (e.g. 50 Hz for an LF generator or 1 kHz for an MF inverter).
- d) Running the electric field calculation method with the model bathing in the magnetic field (see Figure 7). At this step, all tissues shall be considered.
- e) Selecting tissues with regard to the basic restrictions, going back to the scientific literature (i.e. the health and sensory effects to be avoided, as explained in the ICNIRP guidelines [2], [3], [4]).
- f) Calculating the maximum of the average of the internal quantities $E_{i,avg}$ in the selected tissues for a unit current with the algorithm proposed in Annex G. Then calculating $CC_{EI/HM}$:

$$CC_{EI/HM} = \frac{\max E_{i, avg}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I} \quad \text{in } \frac{\text{V} \cdot \text{m}^{-1}}{\text{A} \cdot \text{Hz}} \quad (11)$$

- g) Calculating the current exposure index according to the relevant basic restrictions of Formula (8).

$$CEI_{BR} = \max |W_{BR}(t) * I(t)| \quad \text{in} \quad \frac{A \cdot Hz}{mV/m} \quad (12)$$

h) Calculating the exposure indices with the following formula:

$$EI_{BR} = CC_{EI/HM} \cdot CEI_{BR} \quad (13)$$

Figure 7 shows the induced electric field repartition on the body exposed to magnetic field. Yellow indicates the highest electric fields. Red represents the medium fields and dark blue shows the weakest fields.

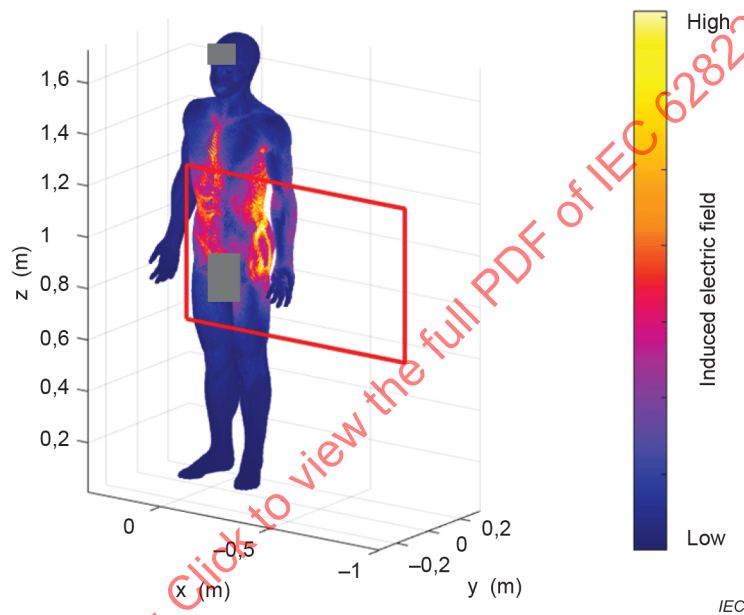


Figure 7 – Example of induced electric field in a human body exposed to a welding gun ($I = 1\text{ kA}$ to 50 Hz)

5.3.5 Result comparison

A comparison of the methods applied on a welding gun is given in Annex E.

6 Measurement considerations

6.1 Measurement instruments for magnetic fields or exposure levels

6.1.1 General

Instruments for magnetic fields or exposure levels are either a handheld field meter or a measurement system with separate elements. Both are able to provide field strengths or exposure indices.

Measurements of background levels are recommended to establish the presence of external fields. Influences of field sources not being under assessment shall be eliminated or, at least, minimized. Generally, increasing the distance to the external sources of magnetic fields will dramatically decrease the background field strength.

6.1.2 Probe(s)

Probes in which three sensors perpendicular to one another and concentric are required and shall be in accordance with IEC 61786-1 and IEC 61786-2. Such probes have the advantage of performing measurements irrespective of their orientation. Some measurement systems can include four probes or more.

Probe(s) shall be of an area equal to or less than $3 \text{ cm}^2 \pm 0,6 \text{ cm}^2$ when the measured exposure index is greater than twice the sensitivity of the measuring device. When the measurement exposure index is below this value or at a distance greater than 1 m to the welding circuit, measurement probe(s) shall be of an area of $100 \text{ cm}^2 \pm 0,6 \text{ cm}^2$. The field strength is given by the module of the RMS magnetic flux densities of the three-orthogonal axis. The exposure index shall be performed with the weighting function (filtering in time domain) applied on each axis before computing the module and then holding on the maximum.

6.1.3 Handheld field meter

The handheld field meter shall have a bandwidth from 10 Hz to 400 kHz or more.

An instrument with a peak-holding function shall be used. The automatic range selection, if any, shall be switched off.

6.1.4 Measurement system with separate elements

6.1.4.1 Frequency range and sampling rate

Assessments, depending on the type of welding current waveform, shall be made in the relevant frequency range and sampling rate.

The signal is sampled (in the time domain) as it is digitally processed regardless of the method. The sampling rate shall be at least twice the upper frequency of the signal (Nyquist law). The maximum upper frequency within the scope of this document is 10 MHz.

In low frequency exposure, the signal shall be processed in the time domain (except where some national regulations permit the frequency domain). In the time domain, it is easier to consider the minimum rise / fall time than to estimate the uppermost frequency, before choosing the sampling rate expressed in samples per second (sps).

The sampling rate shall be:

- equal to or greater than 100 ksps for
 - $\min(\text{rise/fall time}) \geq 1 \text{ ms}$ or
 - $dI/dt < 1\,000 \text{ A/ms}$
- equal to or greater than 1 Msps for
 - $1 \text{ ms} > \min(\text{rise/fall time}) \geq 0,01 \text{ ms}$ or
 - $1 \text{ kA/ms} > dI/dt \geq 100 \text{ kA/ms}$
- equal to or greater than 10 Msps for
 - $\min(\text{rise/fall time}) < 0,01 \text{ ms}$ or
 - $dI/dt > 100 \text{ kA/ms}$

$\min(\text{rise/fall time})$ or dI/dt are defined either by the manufacturer based on its knowledge of special techniques used in its apparatus or by the $\min(\text{rise/fall time})$ or dI/dt observed on the waveform of the welding current.

In general, 100 kpsps is suitable for any LF-AC and MF-DC welding systems using thyristors, IGBTs or inverters with a switching frequency less than 10 kHz. 1 Msps is relevant for capacitor discharge welding systems.

NOTE These sampling rates are based on prior experience of measurements made on resistance welding equipment.

The defined sampling rate is applicable to record the welding current as well as the magnetic field.

6.1.4.2 Duration

For each assessment requiring a post processing, it is not necessary to record the signal over a long period of time.

For LF-DC and MF-DC technologies, exposure levels are established firstly when the current starts or stops to flow and secondly by the current ripple generated by the inverter. For LF-AC, these levels can be achieved with just a single burst typically consisting of a few 50 Hz periods.

In general, a record of a few hundred milliseconds is enough for these two cases for each measurement point.

Capacitor discharges technology requires less than 10 ms.

The measurement resolution, duration and sampling rate determine the data memory requirements

6.2 Instruments for recording

6.2.1 Welding current recording

Instruments (current transducer and oscilloscope) used for recording the welding current shall have the capabilities of the predefined sampling rate (6.1.4.1) with respect to the frequency range, the resolution, and the peak current.

Measurement of welding current using voltage drop across a resistance is not recommended to avoid current magnitude and waveform modifications.

The recorded data shall be validated in order to exclude those with an excessive noise level or containing artifacts that could affect the exposure results. One possible method of validation is to analyze the derivative of this data (dI/dt in this case) immediately after saving it, before leaving the workstation.

6.2.2 Magnetic field recording

Instruments (probe(s) as defined in 6.1.2 and oscilloscope) used for recording the magnetic field around the equipment shall have the capabilities of the predefined sampling rate with respect to the frequency range, the resolution, and the peak value.

Recorded data shall be validated in order to exclude noise or artefacts on exposure results. A possible method for validation is to derive the maximum realistic dB/dt rate before processing the data.

6.3 Signal processing (applicable to any welding current waveform)

6.3.1 General

Several methods for the assessment of pulsed and non-sinusoidal fields are available (e.g. IEC 62311 and IEC 61786-2). For the purposes of this document, only the weighted peak method described in 6.3.2 is applicable. The result of this calculation method is the exposure index (EI).

NOTE Applications of the weighted peak method in the time domain or frequency domain are mathematically equivalent and give the same results, if using the same assumptions and applied correctly.

The maximum resulting EI over time shall be used for the assessment.

The weighted peak method is used for assessments based on external fields as well as for assessments based on internal quantities.

Electronic or digital filters can be used to realize the weighting functions representing the applicable limits.

The weighting function in the time domain is obtained by using Laplace transform or Z transforms.

The weighting function shall have an appropriate frequency response so that the weighting of spectral components occurs in the time domain. National or international regulations can apply.

6.3.2 Application of the weighted peak method in the time domain

The weighted peak method in the time domain executes a filtering (weighting functions) of the three field components in the time domain separately, a sum and a detection of the peak value over the observation time. The sampling rate shall be selected according to 6.1.4.1.

The exposure index shall not exceed 1,0 at any time within the evaluation interval to conclude the compliance.

NOTE Further information on this method is given in [10].

6.3.3 Spatial averaging

The measured field values may be spatially averaged over the exposed regions of the body, with the important provision that the basic restrictions for internal electric fields are not exceeded. Otherwise, the highest level shall be taken, i.e. the closest to the welding electric circuit on the exposed region.

6.3.4 Time averaging

Time averaging of exposure is not permitted for non-thermal effects. National or international regulations can apply for time averaging procedures.

6.4 Uncertainty of assessment

The expanded uncertainty of the assessment shall be calculated as defined in IEC 61786-2:2014, Clause 6.

If the expanded uncertainty is higher than the value specified IEC 62822-1:2016, 5.5, and the assessment is not proven to provide conservative results, the method to calculate penalties given in IEC 62822-1 or a simulation with a human model shall be applied.

7 Computational assessment methods

7.1 General

The internal electric field or the current density for comparison with basic restrictions shall be calculated by simulation using a representative set of anatomical human models. Calculations may be carried out using quasi-static methods depending on the relative electrical size of the problem. These methods are relevant as resistance welding radiates low frequency magnetic fields.

The main computational methods for exposure evaluation on human body based on quasi-static approximation are as follows:

- QS-FEM (quasi-static – finite element method);
- SPFD (scalar potential finite difference);
- IM (impedance method);
- hybrid method.

A brief description of computational methods is given in Annex F.

7.2 Quasi-static approximation

The dimensions of the exposed body region or person, the size of the field source and the distance between them are small compared to the lowest wavelength of the uppermost frequency of the field ($\sim 1/f$). Sizes and distances are at most a few meters whereas wavelengths are at least a few kilometres.

This allows to apply computational methods based on the quasi-static approximation. That implies that:

- there are no propagation phenomena;
- the effect of the induced electric fields or induced currents in the human body on the incident magnetic field is assumed to be negligible, meaning:
 - incident fields and induced fields can be evaluated using separate computational methods. On one side, for the calculation of the incident magnetic fields, analytical or quasi-analytical methods can be applicable. On the other side, simulation is applicable to calculate the induced quantities in a human body and analytical or quasi-analytical methods can be applicable on geometric models;
 - the presence of the body does not modify the incident magnetic field;
- the induced fields in the body follow the incident field instantaneously (displacement current is assumed to be negligible compared to conduct current). Conductivities are the relevant parameters for the tissues of the body.

7.3 Human body models for simulation

The induced current density or intracorporal electric field-strength may be derived by simulation using a 3D human body model where the electric properties of the various tissues are considered. Examples of anatomical models are listed in Table 1 with their main physical characteristics.

NOTE The model names are explained in [14].

Table 1 – Examples of human models to determine induced electric fields in the low frequency range

Model name	Height (m)	Weight (kg)
Adult male ICRP	1,76	73
UVIC	1,77	76
NORMAN	1,76	73
MAXWELL	1,76	73
DUKE	1,74	70
TARO	1,73	62
ALVAR	1,76	72

The model shall represent the relevant region of the body (e.g. head, trunk or limbs) or the whole body, as appropriate, particularly with regard to the diversity of exposure limits.

The main requirements for these models are as follows:

- availability to represent a welder (bigger bodies usually have higher induced fields for coupling with low frequency magnetic fields);
- individual segmentation of the tissues of the central nervous systems (CNS) and the skin (peripheral nervous systems) for evaluation with the respective basic restrictions;
- posable or movable limbs for the modelling of realistic exposure scenarios (by default, a body region can be extracted and exposed with a representative orientation and position).

7.4 Computational assessment against the basic restrictions

There are two types of basic restrictions: 1) ELVs established to prevent sensory effects due to the stimulation of the CNS of the head and 2) ELVs established to prevent health effects due to the stimulation of the CNS and to the stimulation of the peripheral nervous system (PNS) of the whole body.

In case 1), relevant organs are the brain (separated into white and grey matter in some body models), the retina and the optical nerve. The spinal cord is mostly not in the head, so is therefore not included in considerations of the sensory effects of ELVs.

In case 2), the skin should be taken into account. ICNIRP 2010 [3] specifies that there currently is no conversion factor for peripheral nerve tissue available and so the skin, which does not have any nerve endings, is considered as a worst-case target tissue. Hence, the following organs were considered for the PNS ELVs: the brain, the retina, the optical nerve, the spinal cord and the skin. It should be noted that taking all organs into account raises a problem of coherence between models because the most critical organ depends on the model or because the results are not available for all organs.

In order to avoid particularly numerical singularities visible among the maximum values, reference [3] recommends to use the 99th percentile of the induced electric field distribution in each tissue as the criterion to express the maximum value. However, this value underestimates the exposure when the magnetic field is highly non-uniform. Hence, the maximum average is used as a conservative value.

This average depends on the applicable safety guidelines mainly on basic restrictions quantities defined in terms of:

- averaged current density on a surface (Clause G.1);
- averaged E-field in a cubical volume (Clause G.2);

- averaged E-field along a line (Clause G.3).

However, different limits can apply depending on the exposed body region. The computational code or the applied post-processing techniques shall implement the required averaging methods. As the descriptions of the averaging algorithms in the exposure guidelines that define them are generally not sufficiently detailed for an implementation as a computational algorithm, this document refers to the respective computational International Standards that define them or specifies its own algorithms if an appropriate definition is not available elsewhere. Details are given in Annex G.

The maximum value represents the coupling coefficient between a unit current or the magnetic field and the induced electric field or current density named, respectively, CC_{EI} , CC_{EB} , CC_{JI} and CC_{JB} as defined in 3.1.2. These values multiplied by the current or the magnetic field over time shall be compared to the basic restrictions by applying the weighted peak method as presented in Clause 5.

NOTE Since the coupling phenomenon is linear in the frequency range under consideration, the frequency and amplitude welding-current or magnetic field used for the assessment are not critical and can be changed arbitrarily as needed.

Simulations can be also applied to assess the incident fields with respect to the reference levels.

All computational algorithms should be verified for technically correct implementation by comparison between analytic results and simulation results. This comparison is direct when a geometric model (as spheres with different conductivities) is exposed in uniform fields.

8 Source model

8.1 General

The source of EMF is the welding current flowing through the welding electric circuit, generating a low frequency magnetic field. This field is non-homogeneous in close proximity to the equipment.

The parameters of the welding current (e.g. magnitude and waveform), and the welding circuit characteristics (e.g. dimensions), are determined by the equipment only. External factors, for example characteristics of the work piece, can have an influence on the magnetic field, but are not taken into account by this document.

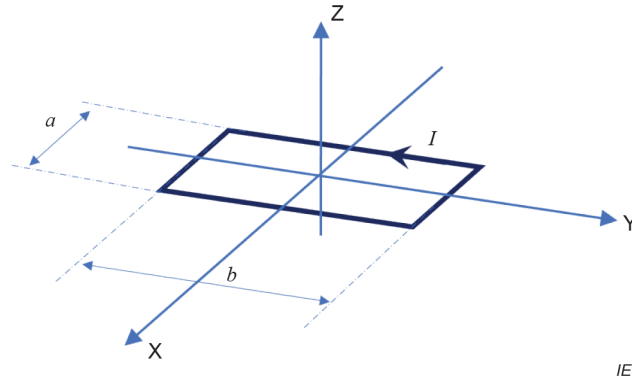
This consideration allows the use of filamentary currents and the application of Biot-Savart's Law.

The source model allows to calculate the magnetic field around the equipment and the coupling coefficients CC_{BI} .

8.2 Source model example

The simplest source model of a welding gun is a rectangular loop (any shape is possible including 3D).

For conductors forming a rectangular loop, a source model as given in Figure 8 shall be used.



IEC

Figure 8 – Welding current flowing in a $(a \times b)$ rectangular loop configuration

Because of the properties of the field distribution, three distances (x, y, z) to the centre of the conductor along the X, Y and Z axes shall be considered.

The magnetic flux density $\mathbf{B}$ of any observation point around the model is calculated using Biot-Savart's Law. The magnetic field vector $\mathbf{B}$ is given in Formula (14). The magnitude of $\mathbf{B}$ is given in Formula (15) where:

a is the dimension of the loop in the X-direction as shown in Figure 8;

b is the dimension of the loop in the Y-direction as shown in Figure 8;

x, y, z are the coordinates of the observation point P on the X, Y and Z axes respectively.

$$\begin{aligned}
 x_0 &= \frac{a}{2} - x & D_1 &= \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z^2} & R_1 &= \frac{\frac{x_0}{D_1} + \frac{x_1}{D_2}}{y_0^2 + z^2} \\
 x_1 &= \frac{a}{2} + x & D_2 &= \sqrt{x_1^2 + y_0^2 + z^2} & R_2 &= \frac{\frac{y_0}{D_2} + \frac{y_1}{D_3}}{x_1^2 + z^2} \\
 y_0 &= \frac{b}{2} - y & D_3 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z^2} & R_3 &= \frac{\frac{x_1}{D_3} + \frac{x_0}{D_4}}{y_1^2 + z^2} \\
 y_1 &= \frac{b}{2} + y & D_4 &= \sqrt{x_0^2 + y_1^2 + z^2} & R_4 &= \frac{\frac{y_1}{D_4} + \frac{y_0}{D_1}}{x_0^2 + z^2}
 \end{aligned} \tag{14}$$

The magnetic field vector $\mathbf{B}$ is as follows:

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \begin{bmatrix} B_X(x, y, z) \\ B_Y(x, y, z) \\ B_Z(x, y, z) \end{bmatrix} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \begin{bmatrix} z \cdot (R_4 - R_2) \\ z \cdot (R_1 - R_3) \\ R_1 \cdot y_0 + R_2 \cdot x_1 + R_3 \cdot y_1 + R_4 \cdot x_0 \end{bmatrix} \tag{15}$$

The magnitude of B is:

$$|B(x, y, z)| = \sqrt{B_X(x, y, z)^2 + B_Y(x, y, z)^2 + B_Z(x, y, z)^2} \quad (16)$$

If I is a unit current (1 A), $B(x, y, z)$ represents the coupling coefficient connecting I to B in $\frac{T}{A}$, named CC_{BI} in Clause 5. B is frequency independent.

The magnetic field vector B is applied for simulation on a human model especially to calculate the magnetic potential vector for the SPFD method.

These values multiplied by the welding current over the time give the magnetic field over the time at the considered position.

The result shall be compared to the reference levels by applying the weighted peak method as presented in Clause 5 to get the exposure index.

9 EMF data sheet and assessment report

The contents of the systems EMF datasheet are based on the mandatory compliance criteria and the required EMF data for the user, as specified in IEC 62822-1:2016, 7.1.5 and 7.1.6 and the decision of the manufacturer to provide additional data exceeding the mandatory amount of information. The minimum information to be collected during the assessment of the system is given in the list below:

a) For occupational use:

- If the position and posture of the welder using the equipment are fixed or known:
 - exposure indices for head, trunk and limbs and a confirmation of compliance;
 - if compliance cannot be shown, distances where compliance is reached.
- If the position and posture of the welder and of the people assisting the welder are unknown:
 - minimum distances to the electric welding circuit to reach compliance on the three axes where the exposures are the highest (in general, along an axis perpendicular to the middle of the circuit). Distance for head, trunk and limbs shall be provided;
 - compliance perimeters.
- For equipment assessed using occupational exposure limits: the distance where the exposure index falls below 100 %, based on the reference levels for the general public.

b) For layman use:

- Laymen are protected by general public exposure limits
 - distances where the exposure index falls below 100 %, based on the reference levels;
 - as an option: distances where the exposure index falls below 100 %, based on the basic restrictions.

NOTE All distances refer to the centre of the conducting material (due to physical laws).

An example for additional information that can be collected during the assessment is as follows:

- data for multiple operation modes.

The information collected shall be presented in an EMF datasheet. Examples of EMF datasheets based on the scenarios above are included in Annex B.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62822-3:2023

Annex A (informative)

Example of assessment based on the individual components

A.1 General

This document allows an assessment of a complete welding system (Figure A.1) or an assessment based on the individual components (Figure A.2).

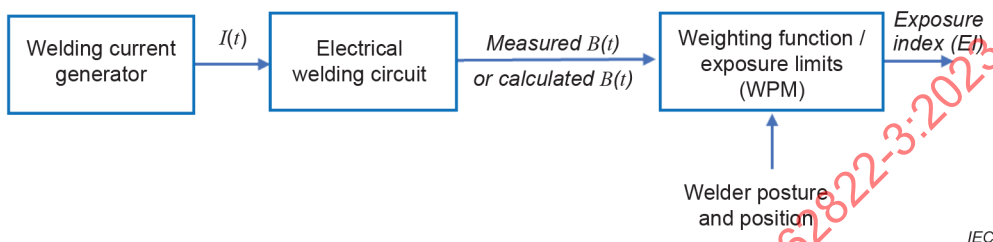


Figure A.1 – Assessment of a complete welding system

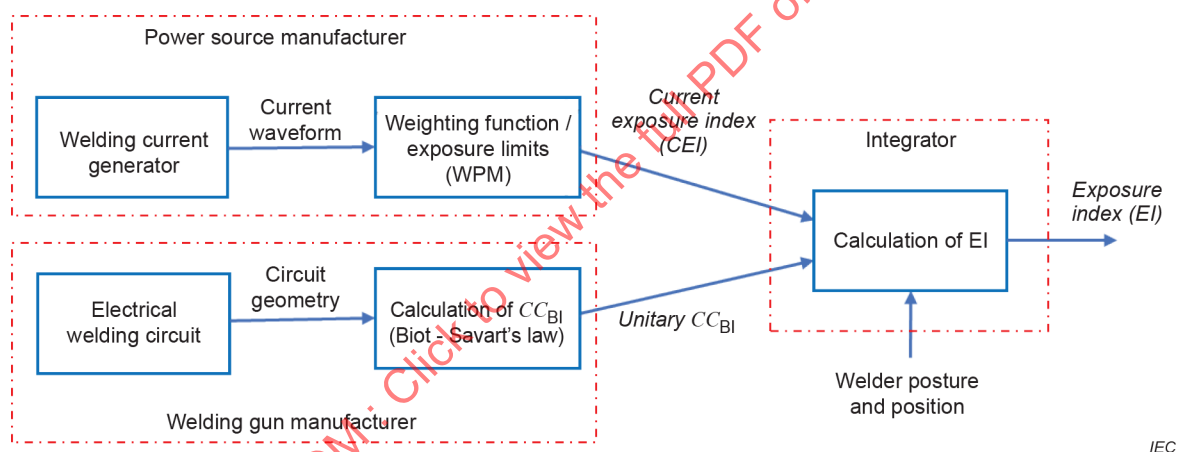


Figure A.2 – Typical component based assessment

Annex A shows an assessment based on the individual components according to the methods presented in Clause 5.

A.2 Welding current generator

The first step is to determine the current exposure indices (CEI_{RL} and CEI_{BR}) according to basic restrictions (ELV) and reference levels (AL) by applying the weighted peak method in the time domain as introduced in Formula (4) and Formula (8) to Formula (12).

The welding current shall be recorded as described in 6.2.1. A representative impedance load of the electric circuit should be taken into account. It can be composed of a series circuit of a resistance and an inductance. Examples of values are 0,35 mΩ and 0,8 μH, respectively.

Figure A.3 shows the current waveform supplied by two different technologies that are usual in resistance welding systems: LF-AC and MF-DC. I_{rms} corresponds to $I_{welding}$.

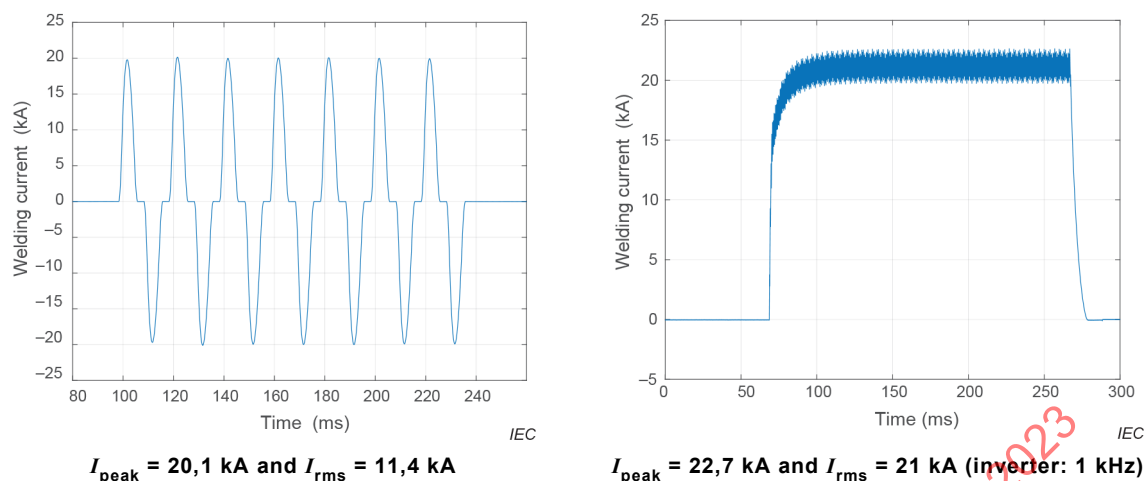


Figure A.3 – LF-AC (left) and MF-DC (right) current waveforms

The weighted peak method is then applied for these currents according to the exposure limits indicated in [9]. The CEI_{BR} associated to the ELV for sensory effects (Figure A.4) was chosen to illustrate a result.

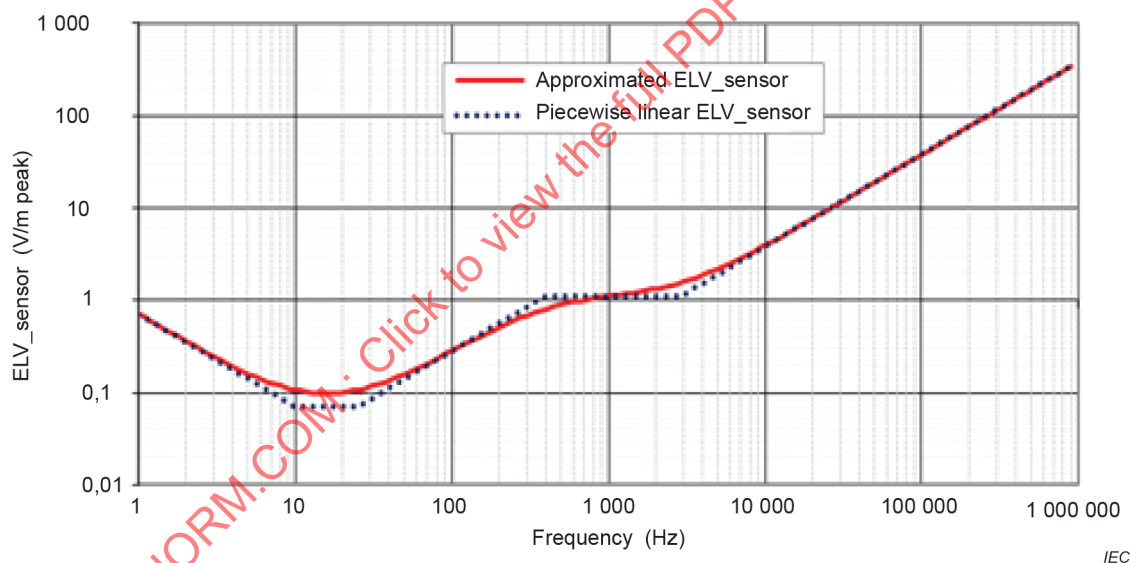


Figure A.4 – Combined ELV for the sensory and health effects applicable to the head

The current exposure indices over the time in Figure A.5 are obtained by digital filtering of the worst-case current given in Figure A.3 according to the limits given in Figure A.4.

NOTE An in-depth description of the weighted-peak-method in the time domain is provided in IEC 62311.

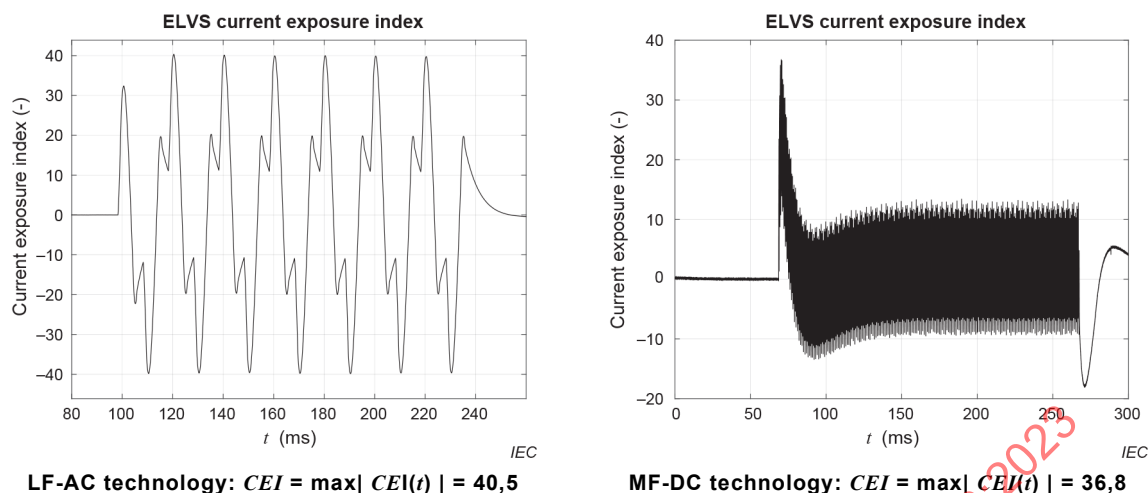


Figure A.5 – Current exposure indices over the time for two welding technologies

The different current exposure indices for the LF-AC technology are for the reference levels (AL) and for the basic restrictions (ELV) (see Table A.1):

Table A.1 – Current exposure index for LF-AC technology ($I_{rms} = 11,4$ kA)

Exposure limits [unit]	Low AL $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	High AL $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	Limb AL $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	ELV_sensor $\left[\frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}} \right]$	ELV_health $\left[\frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}} \right]$
Current exposure index (CEI)	13,4	4,42	1,47	40,5	10,7

These values (CEI) represent theoretical exposure indices expressed in $\frac{\text{A}}{\text{T}}$ or in $\frac{\text{A} \cdot \text{Hz}}{\text{V/m}}$ according to the considered exposure limit. They shall be multiplied by a coupling coefficient CC_{BI} , CC_{EI} , CC_{JI} or CC_{JB} to provide exposure indices at the welder positions. The coupling coefficients are determined for a current equal to 1 A. Application examples are presented in Annex E.

In the same way, the current exposure index according to the reference levels for the general public [1] is (see Table A.2):

Table A.2 – GP current exposure index for LF-AC technology ($I_{rms} = 11,4$ kA)

Reference level [unit]	General public $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$
Current exposure index (CEI)	239,4

A.3 Coupling coefficient of welding circuit

The coupling coefficient CC_{BI} depends on the size and geometry of the welding circuit. Data can be extracted from CAD data or by default, by length measuring on a welding equipment. Since the coupling phenomenon is linear in the frequency range under consideration, the frequency and amplitude used for the calculation are not critical and can be changed arbitrarily. The simplest way is to calculate assuming a DC current of 1 A.

The coefficients represent the ratio magnetic field to a unit welding current and they are frequency independent.

NOTE 1 In the frequency range under consideration the frequency dependency is linear.

A stationary spot welding gun is used as an example (see Figure A.6).

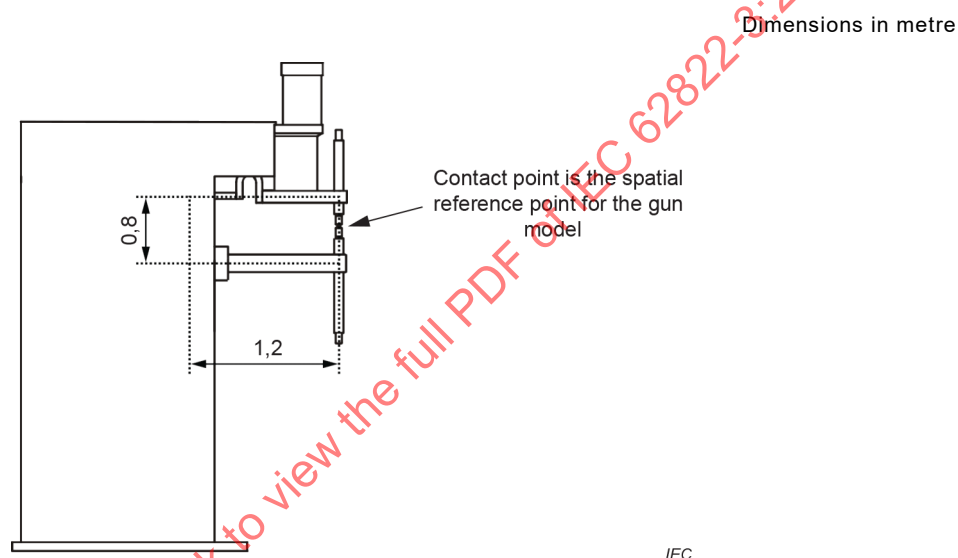


Figure A.6 – Geometry of the stationary spot welding gun

The welding circuit of this example is modelled by a 1,2 m × 0,8 m rectangular loop as shown in Figure A.7. The model corresponds to the neutral fibre (centre) of the circuit. The spatial reference chosen here is the point of contact of the two electrodes.

NOTE 2 The small loop on the top of the electrode has a negligible influence on the exposure to magnetic fields. It is therefore not taken into account. It is also difficult to size due to the construction of the machine.

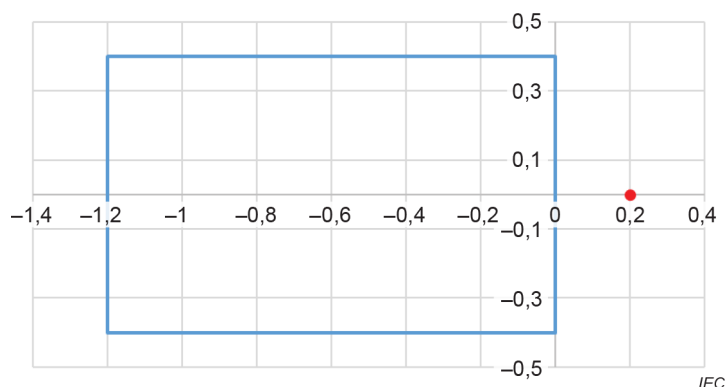


Figure A.7 – Welding electric circuit model (in m) and one point of interest along the X axis

By applying Formula (3), the coupling coefficient CC_{BI} can be plotted as illustrated along the X axis (Figure A.8).

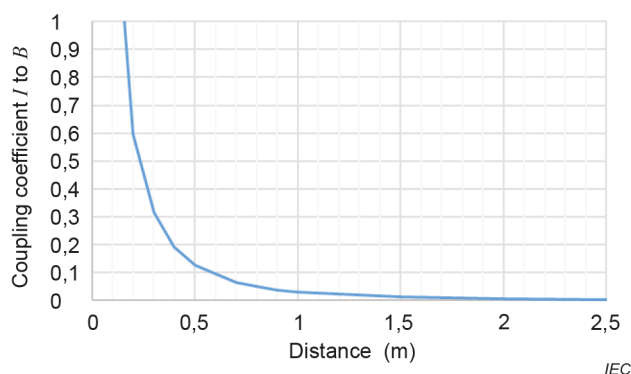


Figure A.8 – Coupling coefficient CC_{BI} along the X axis

A.4 Welding-system

The equipment integrator is able to assess the exposure to the welding system with the previous data, i.e. the current exposure indices and the coupling coefficient CC_{BI} as introduced in Clause 5.

Results according to reference levels (AL) from Table A.1 and Table A.2 using Formula (4) are summarized in Figure A.9 ($I_{rms} = 11,4$ kA).

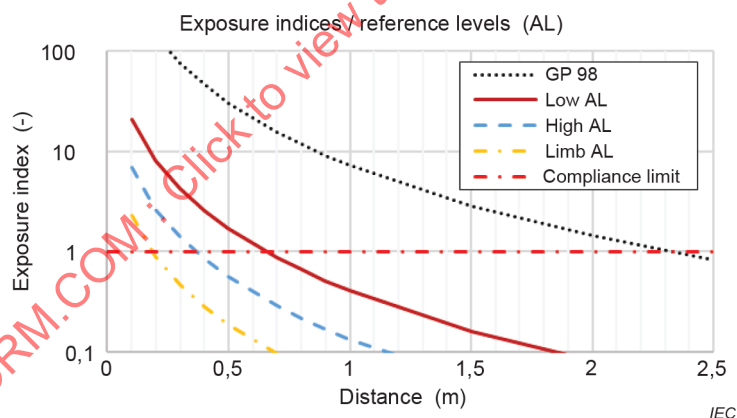


Figure A.9 – Exposure index (AL) along the X axis

Compliance with the action level is reached when the exposure index is equal to or less than 1, meaning:

- health effects on limbs are prevented at a distance greater than 0,20 m along the X axis (limb AL);
- health effects on trunk and head are prevented at a distance greater than 0,40 m (high AL);
- sensory effects on head are prevented at a distance greater than 0,65 m along the X axis (low AL);
- effects on general public and workers at particular risk are prevented at a distance greater than 2,3 m (GP98).

Results according to basic restrictions (ELV) using Formula (8) are summarized in Figure A.10.

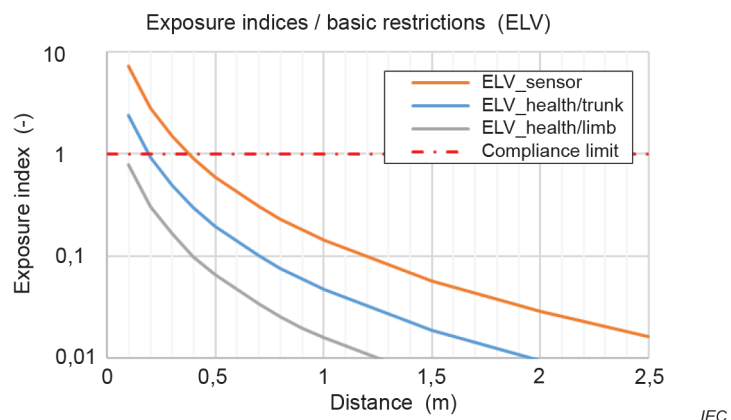


Figure A.10 – Exposure index (ELV) along the X axis

Compliance with exposure limit values is also reached when the exposure index is equal to or less than 1, meaning:

- health effects on limbs are prevented at a distance greater than 0,10 m along the X axis;
- health effects on trunk and head are prevented at a distance greater than 0,20 m;
- sensory effects on head are prevented at a distance greater than 0,40 m along the X axis.

Annex B (informative)

Example datasheets

B.1 Example current generator datasheet

See Figure B.1.

EMF DATASHEET FOR RESISTANCE WELDING POWER SOURCE					
Issued by	Compaweld Ltd			Revision	Patrick Tester A
Valid from	2021-04-20				
Equipment information					
Brand name	Compaweld				
Model name(s)	Ultrawelder 2021				
Model number(s)	21-6543-000-987				
Intended use	☒ for occupational use			☐ for use by laymen	
Basic information					
Applied regulation	Directive 2006/95/EC				
Referenced limits	Directive 2013/35/EU, Recommendation 1999/519/EC				
Applied standard(s)	IEC 62822-1:2016, IEC 62822-3:2017, IEC 50527-x				
Non-thermal effects need to be considered for workplace assessment	☒ YES			☐ NO	
Thermal effects need to be considered for workplace assessment	☐ YES			☒ NO	
☐ Data is based on maximum power source capability (valid unless firmware / hardware is changed)					
☐ Data is based on worst case setting / program (only valid until setting options / welding programs are changed)					
☐ Data is based on multiple settings / programs (only valid until setting options / welding programs are changed)					
☒ Other (specify) : mode abc - welding current = 11,4 kA (2 bursts of 140 ms)					
EMF data for non-thermal effects					
Current exposure index (CEI) / Directive 2013/35/EU					
Exposure limits	Low AL	High AL	Limb AL	ELV_sensor	ELV_health
Units of CEI	$\left[\frac{kA}{mT} \right]$	$\left[\frac{kA}{mT} \right]$	$\left[\frac{kA}{mT} \right]$	$\left[\frac{kA \cdot Hz}{mV/m} \right]$	$\left[\frac{kA \cdot Hz}{mV/m} \right]$
Current exposure indices	13,4	4,42	1,47	40,5	10,7
Current exposure index (CEI) / Recommendation 1999/519/EC					
Exposure limit		General public			
Unit for CEI		$\left[\frac{kA}{mT} \right]$			
Current exposure index		239,4			
IEC 62822-3 describes how to apply the current exposure indices to determine the exposure indices according the use cases.					

1/1

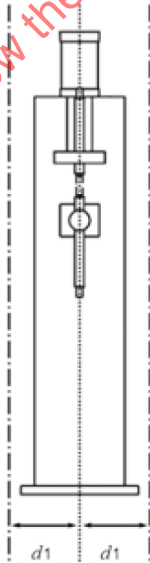
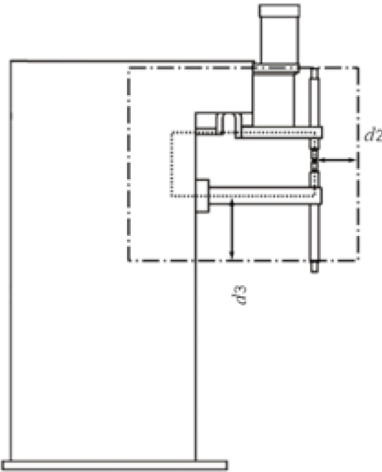
IEC

Figure B.1 – Example datasheet of the power source

B.2 Example datasheet of the welding circuit

See Figure B.2.

EMF DATA SHEET FOR RESISTANCE WELDING ELECTRODE ASSEMBLY			
Issued by	Compaweld Ltd	Revision	Patrick Tester
Valid from	2022-06-10	Revision	A
Equipment information			
Brand name	Compaweld		
Model name(s)	Ultrawelder 2021		
Model number(s)	21-6543-000-987		
Intended use	☒ for occupational use	☐ for use by laymen	
Basic information			
Applied regulation	Directive 2006/95/EC		
Referenced limits	Directive 2013/35/EU, Recommendation 1999/519/EC		
Applied standard(s)	IEC 62822-1:2016, IEC 62822-3:2022, IEC 60527-x		
EMF data for non-thermal effects			
Distance (m)	Coupling coefficient CC_{BI}		
	d1 axis (mT/kA)	d2 axis (mT/kA)	d3 axis (mT/kA)
0,10	1,132	1,539	N/A
0,20	0,962	0,598	
0,30	0,765	0,316	
0,40	0,588	0,192	
0,50	0,446	0,127	
0,70	0,259	0,065	
0,80	0,201	0,049	
0,90	0,157	0,038	
1,00	0,124	0,030	
1,50	0,046	0,012	
2,00	0,021	0,006	
2,50	0,011	0,003	

All distances refer to the centre of the welding circuit material (neutral fiber).
IEC 62822-3 describes how to use coupling coefficients to determine exposure indices according to action levels or reference levels.

1/1

IEC

Figure B.2 – Example datasheet of the electrode assembly

B.3 Example datasheets of equipment assembly

See Figure B.3.

EMF DATASHEET FOR RESISTANCE WELDING SYSTEM			
Issued by	Compaweld Ltd	Patrick Tester	
Valid from	2022-06-10	Revision	A
Equipment information			
Brand name	Compaweld		
Model name(s)	Ultrawelder 2021		
Model number(s)	21-6543-000-987		
Intended use	☒ for occupational use ☐ for use by laymen		
Basic information			
Applied regulation	Directive 2006/95/EC		
Referenced limits	Directive 2013/35/EU, Recommendation 1999/519/EC		
Applied standard(s)	IEC 62822-1:2016, IEC 62822-3:2012, IEC 50527-x		
Non-thermal effects need to be considered for workplace assessment	☒ YES	☐ NO	
Thermal effects need to be considered for workplace assessment	☐ YES	☒ NO	
☐ Data is based on maximum power source capability (valid unless firmware / hardware is changed)			
☐ Data is based on worst case setting / program (only valid until setting options / welding programs are changed)			
☐ Data is based on multiple settings / programs (only valid until setting options / welding programs are changed)			
☒ Other (specify): mode abc – welding current = 11,4 kA – 2 bursts of 140 ms			

1/2

IEC

Figure B.3 – Datasheet example of the welding system

This first sheet is followed by one of two options (compliance distances in Figure B.4 or compliance perimeters in Figure B.5).

Option 1

EMF DATASHEET FOR RESISTANCE WELDING SYSTEM (CONTINUED)**EMF data for non-thermal effects**

Exposure indices and distances to welding system. All distances refer to the centre of the welding circuit material (neutral fiber).

		Head sensory and health effects	Trunk	Right hand	Left hand
EI at working position		N/A	N/A	N/A	N/A
Required minimum distance	d_1	35 cm	75 cm	5 cm	5 cm
	d_2	40 cm	20 cm	10 cm	10 cm
	d_3	N/A	N/A	N/A	N/A
Distance where compliance with general public limits is reached	d_1	2,8 m	2,8 m		
	d_2	2,3 m	2,3 m		
	d_3	N/A	N/A		

The distances established for the general public apply to workers at particular risks (active implanted medical devices holders and pregnant women) as well.

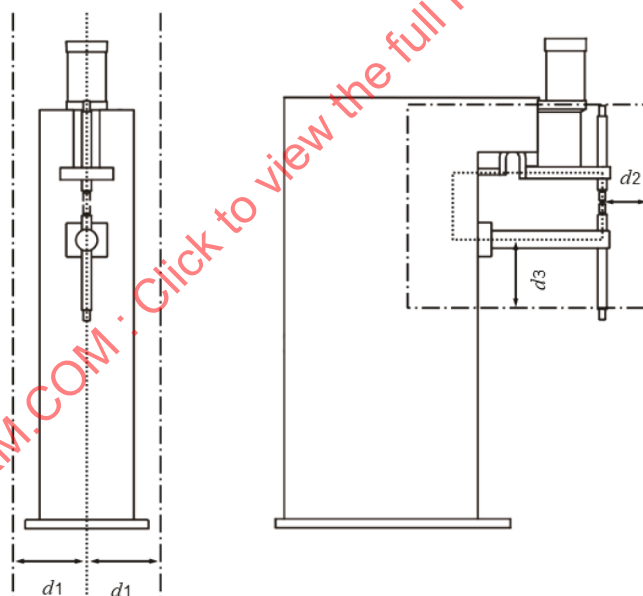


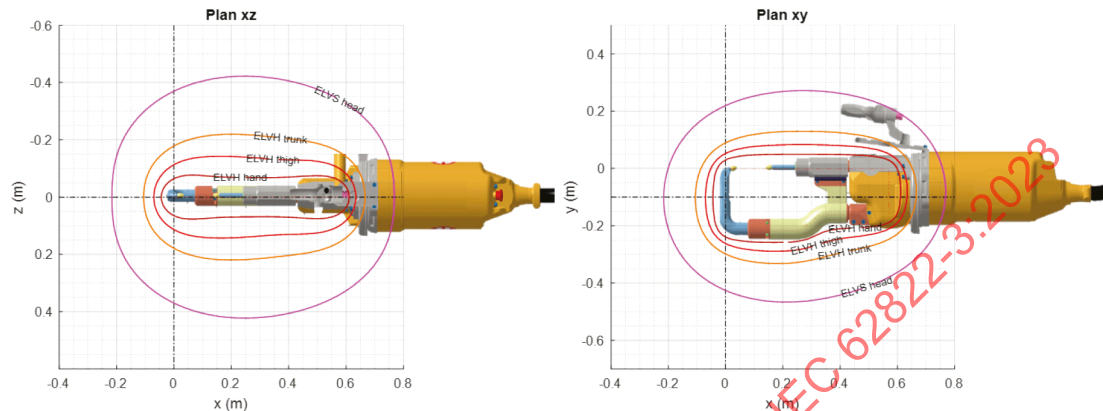
Figure B.4 – Example datasheet of the welding system (continuation)

Option 2 (alternative to option 1)

EMF DATASHEET FOR RESISTANCE WELDING SYSTEM (CONTINUED)

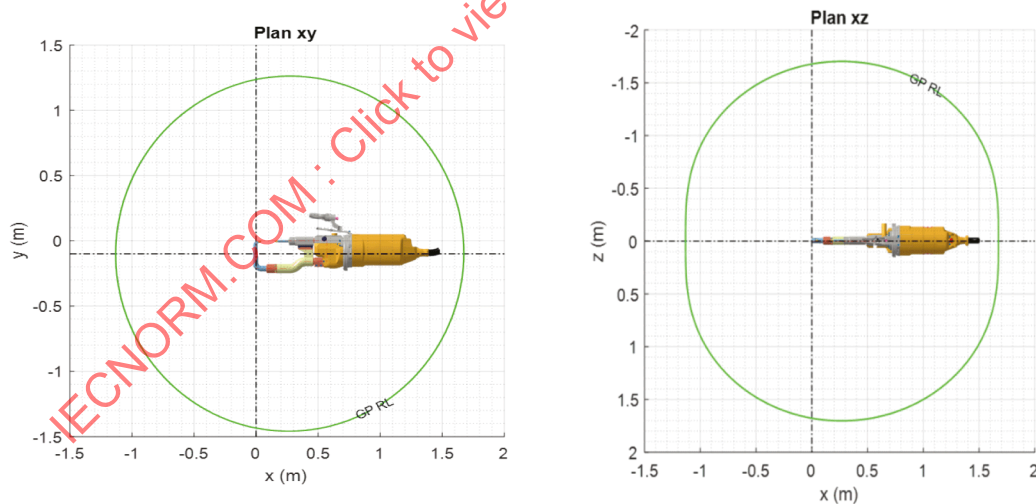
EMF data for non-thermal effects

Compliance perimeters



Compliance perimeters according exposure limit values of Directive 2013/35/EU

- ELVS head: sensory effects ELV applicable on the head
- ELVH trunk: health effects ELV applied on the trunk
- ELVH hand: health effects ELV applied on the hands
- ELVH thigh: health effects ELV applied on the thighs



Compliance perimeter according reference levels applicable to general public (GP RL).

This perimeter applies to the public as well as to workers at particular risk (active implanted medical devices holders and pregnant women).

Figure B.5 – Example datasheet of the welding system (continuation)

Annex C (informative)

Coupling coefficient method

C.1 Principle

The coupling coefficient method proposed by IEC 62226-2-1 implements a 2D model, i.e. a disk whose radius is representative of the region of the body requiring an evaluation. The maximum induced electric field on the model is calculated by a simple analytic expression when the magnetic field is uniform and perpendicular to its surface:

$$E_i(t) = \frac{R}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (\text{C.1})$$

where

R represents the disk radius, in meter, according to the dimension of the region of the body requiring an assessment (see Table C.1);

$dB(t)/dt$ is the time derivate of $B(t)$ (uniform magnetic field) in tesla (T);

$E_i(t)$ is the induced electric field in V/m.

Table C.1 – Representative disk radius (geometric model)

Region of the body	Radius m
Head	0,1
Trunk	0,2
Limb	0,1
Hand	0,05

A compensation factor K depending on the degree of non uniformity of B should be added.

C.2 Validation of this method

C.2.1 Context

A campaign of assessment undertaken on 48 welding workplaces provided to close to 200 measurements points. The exposure limits of European regulation [9] were applied.

The equipment models were either portable spot welding guns or stationary spot welding guns. The technologies were LF-AC and MF-DC from different manufacturers and with different set-ups. Large and small arms (welding electric circuit) with several use conditions were encountered. The range of exposure indices against the relevant reference levels starts at a few hundredths of a percent to several hundred percent.

During this campaign, magnetic fields and welding currents were recorded (according to 6.1.4.1) as well the electric circuit geometries in order to compare dosimetric simulations on disk models and on a human model (Duke from IT'IS).

Compensation factors were calculated for each measurement point by:

$$K = \frac{EI_{BR/HM}}{EI_{BR/2D}} \quad (C.2)$$

where

$EI_{BR/HM}$ is the exposure index obtained from the simulation on the human model,

$EI_{BR/2D}$ is the exposure index obtained from calculation on a disk.

The number of results leads to reliable statistics. De facto, K includes a correction of the disk dimension if necessary.

C.2.2 Basic restriction against health effects

The exposure levels (indices) were calculated by the applied Formula (5), geometric model, and human model simulation with basic restrictions (exposure limit values) against health effects [9]. The curve in Figure C.1 shows the statistical distribution (142 cases) of the ratio of the human model results to the disk model results.

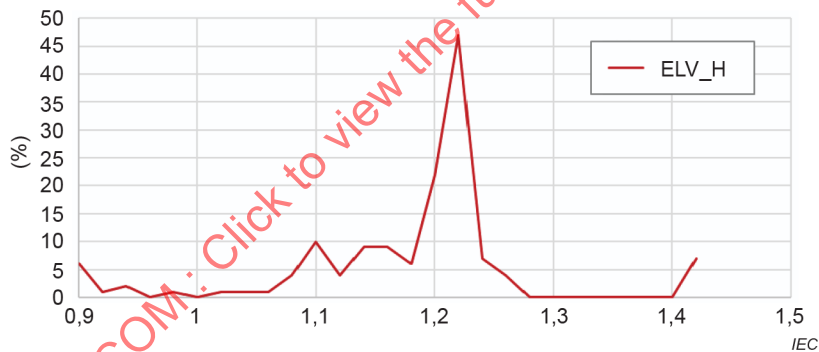


Figure C.1 – Distribution of human to disk model exposure index ratios (health effects of ELV on trunk and hands)

The human model results are mostly higher than those of the disk models. The statistical distribution is narrow with a bias.

C.2.3 Basic restriction against sensory effects

The exposure levels (indices) were calculated by the applied Formula (5), geometric model and human model simulation with basic restrictions (exposure limit values) against health and sensory effects [9]. The curves in Figure C.2 show the ratio of the human model results to the disk model results in the form of statistic distribution (over 48 inputs).

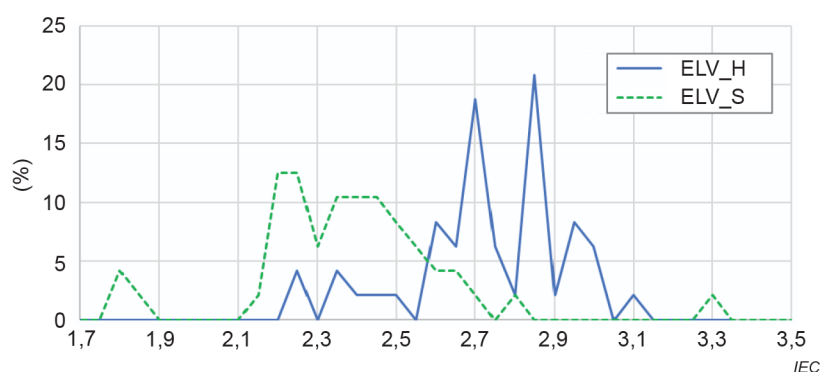


Figure C.2 – Distribution of human to disk model exposure index ratios (sensory and health effects of ELV on the head)

The human model results are higher than those of the disk model. The statistical distribution is relatively wide with a systematic bias.

C.3 Conclusion

The dosimetric method with a 2D geometric model (disk) is a valid method under the condition to apply factors (K) taking in account a conservative value of the statistic distributions. The electric field is estimated by:

$$E_i(t) = K \cdot \frac{R}{2} \frac{dB(t)}{dt} \quad (\text{C.3})$$

K is equal to 1,5 as an appropriate value to ELV health effects which can affect trunk, hands, arms and thighs. K equals 3,0 as an appropriate result to ELVs in relation with health effects and sensory effects of the head. 99 % of percentile values are selected. K is higher for the head as the magnetic field tends to be uniform farther from to the gun.

The coupling coefficient values $CC_{EB/2D} = K \cdot \frac{R}{2}$ are reported in Table C.2.

Table C.2 – Coupling coefficients

Body part	Radius m	K	$CC_{EB/2D}$
Head	0,1	3,0	0,15
Trunk	0,2	1,5	0,15
Thigh	0,1	1,5	0,075
Hand	0,05	1,5	0,0375

$CC_{EB/2D}$ is expressed in $\frac{V/m}{T \cdot Hz}$

The formulation of $E_i(t)$ is reduced as follows:

$$E_i(t) = CC_{EB/2D} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (C.4)$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62822-3:2023

Annex D (informative)

Correction factor method

D.1 General

The correction factor method was originally introduced for exposure assessments in low frequencies in IEC 62226-2-1 and IEC 62311, then amended in IEC 62233 where the concept applied on current densities is expandable to the induced electric field [11], [12].

D.2 Principle

A correction factor k_E is defined by the following ratio

$$k_E = \frac{EI_{BR}}{EI_{RL}} \quad (D.1)$$

where

EI_{BR} is the exposure index according to the basic restriction (e.g. ELV or DRL);

EI_{RL} is the exposure index according to the reference level (e.g. AL or ERL).

The correction factor k_E is the ratio of exposure indices: exposure index according to the basic restriction to the exposure index according to the reference level. The first index is obtained by dosimetry based on a representative human model while the second is obtained by calculation according to the reference levels. The result of the correction factor calculation is considered to be conservative.

The value of this factor is defined for resistance welding equipment only as it considers the specificities of the spatial distribution of the magnetic field and of the exposure situation.

The compliance assessment can be performed by comparing the multiplied value of the measured exposure index according to the reference level of the magnetic field and the correction factor as

$$EI_{BR} = k_E \cdot EI_{RL} \quad (D.2)$$

where

EI_{RL} is the measured or calculated exposure level / reference level;

EI_{BR} is the estimated exposure level / basic restriction.

The correction factor depends on the national regulations (i.e. according to the basic restrictions and references levels). It is not frequency dependent in Europe.

D.3 Example of correction factor finding

D.3.1 Context

A campaign of assessments undertaken on 48 welding workplaces provided to close to 200 measurements points. The exposure limits of European regulation [9] were applied.

The equipment models were either portable spot welding guns or stationary spot welding guns. The technologies were LF-AC and MF-DC from different manufacturers and with different set-ups. Large and small arms (welding electric circuit) with several use conditions were encountered. The range of exposure indices against the relevant reference levels starts at a few hundredths of a percent to several hundred percent.

During this campaign, magnetic fields and welding currents were recorded (in accordance with Clause 6) as well the electric circuit geometries in order to compare exposure indices from calculation and exposure indices from dosimetry simulation on a human model (Duke from IT'IS).

The number of input data leads to reliable statistics.

D.3.2 Correction factor for the trunk and limbs

Correction factors were calculated by the applied Formula (D.1). The numerator is obtained by human model simulation with basic restrictions (exposure limit values) against health effects. The denominator is calculated analytically from the magnetic field record. The weighted peak method is applied in both cases.

The curve in Figure D.1 shows the statistical distribution (142 cases) of the correction factor k_E for the trunk and hands for health effects.

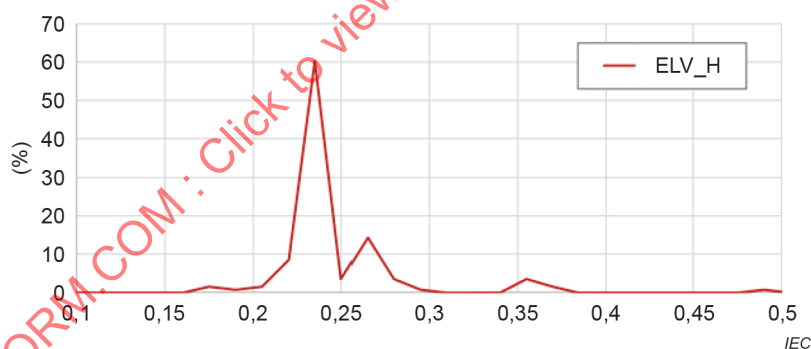


Figure D.1 – Distribution of correction factor k_E for health effects on trunk and hands

The statistical distribution is narrow with a bias. The median value is 0,23 and the 95th percentile is 0,34.

D.3.3 Correction factor for the head

The same method as in D.3.2 is applied for the exposure of the head. Both sensory and health effects are taken into account, see Figure D.2.

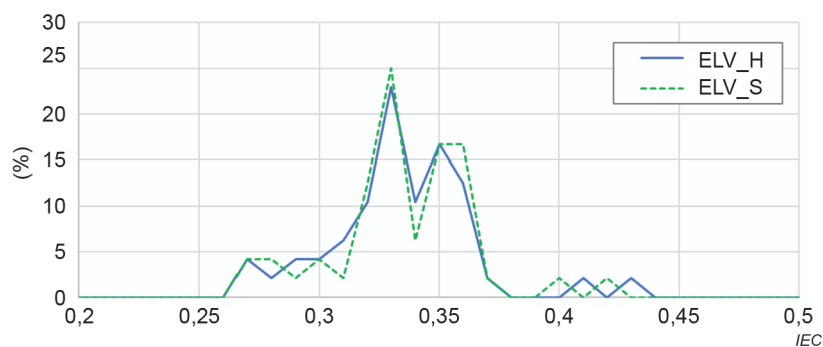


Figure D.2 – Distribution of correction factor k_E for effects on the head (sensory and health)

Both statistical distributions (sensory and health effects) can be considered identical. The distributions are narrow with a bias. The median value is 0,326 and the 95th percentile is 0,36.

D.4 Conclusion

A unique correction factor k_E of 0,35 is proposed to compensate the non-uniformity of the magnetic field on the body exposed. This value always leads to conservative analysis in all regions regardless of the adverse effects, whether sensory or health.

It is possible to determine k_E at an arbitrary frequency as it is frequency independent.

Annex E

(informative)

Example of exposure assessments on a welding machine

E.1 General

The assessment methods introduced in this document are applied onto a realistic situation, as described below. These methods are based on

- magnetic field calculation (see 5.2.3);
- coupling coefficients (see 5.3.2);
- correction factor (see 5.3.3);
- human model (see 5.3.4).

E.2 Description of the spot welding workstation

The welding machine is used to join metal parts by applying a high current to produce a spot weld. It consists of a pair of electrode arms which move in a clamping motion to clamp the ends of the electrodes to the workpieces. The equipment is kept stationary.

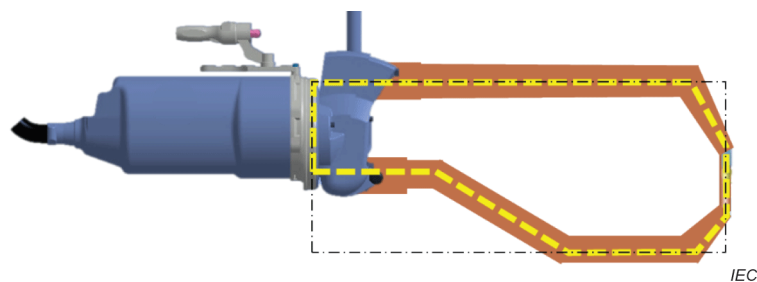
The operator is standing in front of the equipment, in its plane, 20 cm away from the welding electric circuit. The operator's hands are located 10 cm on either side of the electrodes to hold the parts during welding. The welding process is triggered by another operator.

The technology of the current generator is LF-AC (low frequency – alternative current). The welding current is set at 11,4 kA (RMS) or 60 % of its maximum available capacity and at a fundamental frequency of 50 Hz with harmonics. Its waveform is given in Figure A.3 (left). The weighted peak method (WPM) should be applied to establish exposure levels as other methods can underestimate the results.

E.3 Exposure conditions

- Trunk distance to the gun: 0,20 m
- Hand distance to the gun: 0,10 m
 - palm of right hand is vertical
 - palm of left hand is horizontal

Modeling of the welding gun (Figure E.1) is carried out to determine the distribution of the magnetic field around the gun, including in the area where the operator is located.



NOTE The electrical circuit model can be simplified by a rectangle of a size equal to the overall size of the circuit as shown (black mixed dash segments in Figure E.1). In this case, Formula (14), Formula (15) and Formula (16) apply.

Figure E.1 – Welding gun and its electric circuit model (yellow dash segments)

Figure E.2 superimposes the model, the welder and the magnetic field intensities in the selected y-z plane.

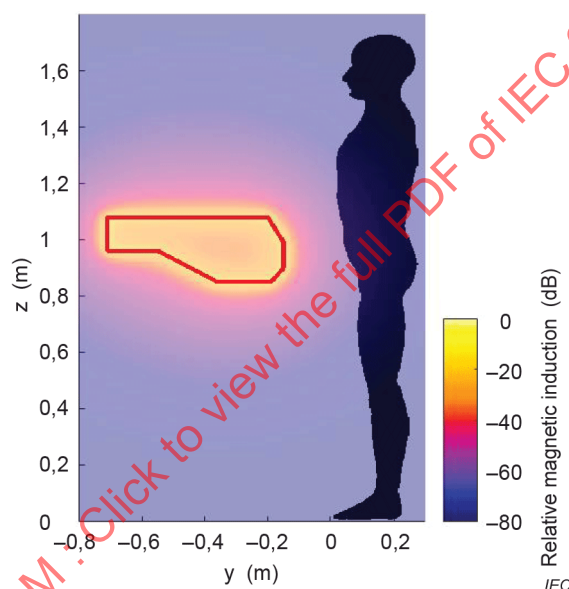


Figure E.2 – Magnetic field distribution around the exposed body

The model of the welder positioned in the magnetic field makes it possible to determine by simulation the electric fields induced in the body as illustrated in Figure E.3 and Figure E.4. Yellow indicates the highest electric fields, red represents the medium fields and dark blue shows the weakest fields. Figure E.3 results are used to determine the maximum induced electric fields in the trunk and the head. It can be seen that the field is maximum in front of the gun at the level of the belly and the upper part of the operator's legs.

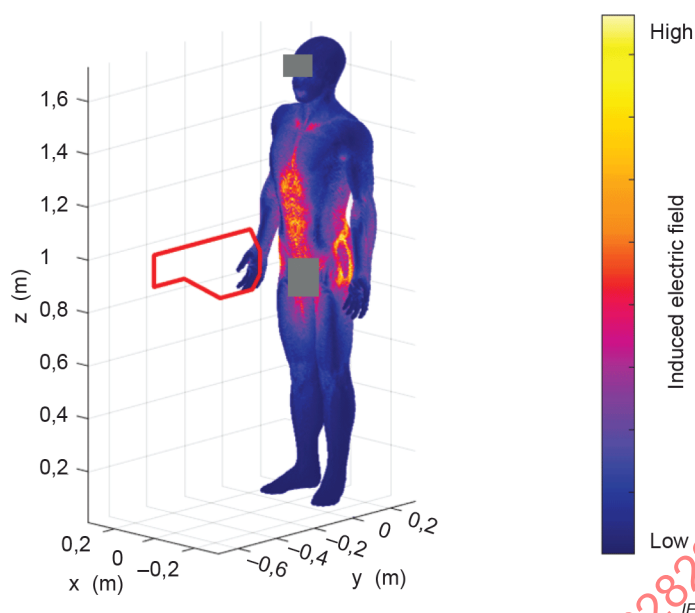


Figure E.3 – Configuration and electric field distribution on the exposed body (for 1 kA at $f = 50$ Hz)

Figure E.4 results give the maximum induced electric fields in the hands. One hand is horizontal and the other is vertical and this allows to consider their worst-case exposure regardless of orientation.

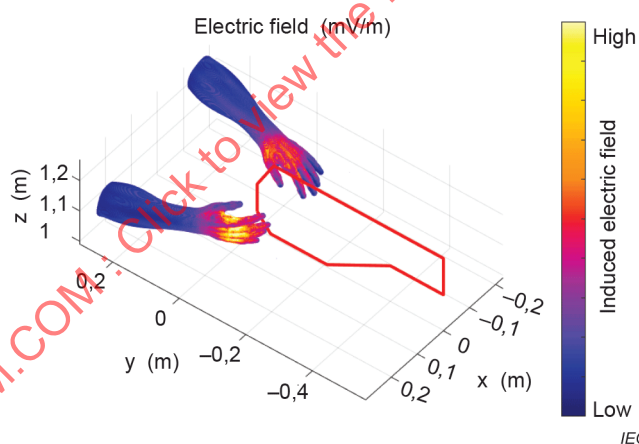


Figure E.4 – Electric field distribution on hands (for 1 kA at $f = 50$ Hz)

E.4 Main simulation parameters and results

E.4.1 Main simulation parameters

The main simulation parameters are

- human model: ALVAR (see 7.3);
- tissue conductivities: based on Gabriel's values at 50 Hz [22] with update [23];
- mesh resolution: 1 mm³ cubic;
- method: SPFD (see Annex F);
- data extraction: maximum average electric field on (2 × 2 × 2) mm³ (Annex E) of relevant tissues (see 7.4).

E.4.2 Simulation results

Results of the right hand are presented, as the induced electric field is higher than the electric field of the left hand due to a larger section crossed by the magnetic flux.

Coupling coefficients of the magnetic field (CC_{BI}) and coupling coefficients of the electric field obtained by simulation on the human model ($CC_{EI/HM}$) are presented in Table E.1.

Table E.1 – Coupling coefficients for the magnetic field and on human model

Body region	Max magnetic field (CC_{BI})	Max average electric field (50 Hz)	$CC_{EI/HM}$
Trunk	$0,214 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$	$4,80 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA}}$	$0,0153 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA} \cdot \text{Hz}}$
Hand	$3,26 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$	$17,3 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA}}$	$0,0551 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA} \cdot \text{Hz}}$
Head	$0,030 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$	$0,620 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA}}$ (CNS)	$0,0020 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA} \cdot \text{Hz}}$ (CNS)

E.5 Exposure assessments

E.5.1 General

Values, their origin tables and units (if there are any) are set in Table E.2 to Table E.5.

E.5.2 Method based on magnetic field calculation

The method based on magnetic field calculation is described in 5.2.3. Exposure indices are established on the magnetic field repartition (CC_{BI}), welding current (I) and on the action levels (low, high and limb action levels). Formula (4) is applied with values from Table E.1 and Table A.2.

Table E.2 – Results based on magnetic field calculation

Health effects (trunk)		Health effects (hand)		Sensory effects (head)	
CC_{BI} (Table E.1)	$0,214 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$	CC_{BI} (Table E.1)	$3,26 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$	CC_{BI} (Table E.1)	$0,030 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$
CEI_{HighAL} (Table A.2)	$4,113 \frac{\text{kA}}{\text{mT}}$	CEI_{LimbAL} (Table A.2)	$1,47 \frac{\text{kA}}{\text{mT}}$	CEI_{LowAL} (Table A.2)	$13,4 \frac{\text{kA}}{\text{mT}}$
EI_{HighAL} (4)	0,880	EI_{LimbAL} (4)	4,79	EI_{LowAL} (4)	0,402

E.5.3 Method based on coupling coefficients

The method based on coupling coefficients is described in 5.3.2. Exposure indices are established on the coupling coefficients (CC_{BI} and $CC_{EB/2D}$), welding current (I) and on exposure limit values (or basic restrictions). Formula (8) is applied with values from Table C.2, Table E.1 and Table A.1.

Table E.3 – Results based on coupling coefficients

Health effects (trunk)		Health effects (hand)		Sensory effects (head)	
$CC_{EB/2D}$ (Table C.2)	$0,15 \frac{\text{mV/m}}{\text{mT} \cdot \text{Hz}}$	$CC_{EB/2D}$ (Table C.2)	$0,0375 \frac{\text{mV/m}}{\text{mT} \cdot \text{Hz}}$	$CC_{EB/2D}$ (Table C.2)	$0,15 \frac{\text{mV/m}}{\text{mT} \cdot \text{Hz}}$
CC_{BI} (Table E.1)	$0,214 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$	CC_{BI} (Table E.1)	$3,262 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$	CC_{BI} (Table E.1)	$0,030 \frac{\text{mT}}{\text{kA}}$
CEI_{ELV_H} (Table A.1)	$10,7 \frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}}$	CEI_{ELV_H} (Table A.1)	$10,7 \frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}}$	CEI_{ELV_S} (Table A.1)	$40,5 \frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}}$
EI_{ELV_H} (8)	0,342	EI_{ELV_H} (8)	1,31	EI_{ELV_S} (8)	0,182

E.5.4 Method based on the correction factor

The method based on the correction factor is described in 5.3.3. Exposure indices are established on the exposure indices according to action levels and on the correction factor k_E . Formula (10) is applied with values from Table E.2 and the values obtained from Clause D.4.

Table E.4 – Results based on the correction factor

Health effects (trunk)		Health effects (hand)		Sensory effects (head)	
EI_{HighAL} (Table E.2)	0,880	EI_{LimbAL} (Table E.2)	4,80	EI_{LowAL} (Table E.2)	0,402
k_E (Clause D.4)	0,35	k_E (Clause D.4)	0,35	k_E (Clause D.4)	0,35
EI_{ELV_H} (10)	0,308	EI_{ELV_H} (10)	1,680	EI_{ELV_S} (10)	0,141

E.5.5 Method based on the human model

The method based on the human model is described in 5.3.4. For the last method, exposure indices are established on the coupling coefficient $CC_{EI/HM}$, welding current (I) and on exposure limit values (ELV_{Sensory} and ELV_{Health}). Formula (13) is applied with values from Table E.1 and Table A.1.

Table E.5 – Results based on human model

Health effects (trunk)		Health effects (hand)		Sensory effects (head)	
$CC_{EI/HM}$ (Table E.1)	$0,0153 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA} \cdot \text{Hz}}$	$CC_{EI/HM}$ (Table E.1)	$0,0551 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA} \cdot \text{Hz}}$	$CC_{EI/HM}$ (Table E.1)	$0,0020 \frac{\text{mV/m}}{\text{kA} \cdot \text{Hz}}$
CEI_{ELV_H} (Table A.1)	$10,7 \frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}}$	CEI_{ELV_H} (Table A.1)	$10,7 \frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}}$	CEI_{ELV_S} (Table A.1)	$10,7 \frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}}$
EI_{ELV_H} (13)	0,164	EI_{ELV_H} (13)	0,590	EI_{ELV_S} (13)	0,081

E.6 Conclusion

The more realistic method (based on induced electric fields obtained with a human model in working position compared with exposure limit values (or basic restrictions)) gives the more realistic and more precise exposure levels. An assessment against the action levels (or reference levels) overestimates most of the exposure as it considers the uniform magnetic field. The simplified assessment against exposure limit values using the coupling coefficient or correction factor is intermediate.

Whatever the method for this use case, the exposure is compliant with [9].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62822-3:2023

Annex F² (informative)

Computational methods

F.1 General

Different calculation methods can be used for the determination of induced quantities in the human body by an external magnetic field emitted from resistance welding equipment. Annex F provides an overview of different calculation methods for low frequencies. Magnetic field data is applied as the incident field in the computational methods such as IM or SPFD.

As the information given in Annex F is not sufficient for application, the source materials referred to should be reviewed.

All these methods are based on the resolution of the macroscopic Maxwell's formula. The choice of a precise method for the resolution is based on various criteria including calculation time.

F.2 SPFD method

The scalar potential finite difference (SPFD) method sets the branch current instead of the loop current. Defining scalar potentials (unknowns) at each node of a voxel, a branch current flowing from one node to a neighbouring one along the side of the voxels is derived, which includes a vector potential due to the applied magnetic fields and impedance between the nodes. By applying Kirchhoff's current law at all nodes, simultaneous formulae are then set. The potential is then solved iteratively. The electric field along the side of the voxel is obtained by dividing the difference of the potentials between the nodes of the voxel by the distance across the nodes and adding the vector potential [25], [26].

$$\sum_{n=1}^6 S_n \varnothing_n - \left(\sum_{n=1}^6 S_n \right) \varnothing_0 = j\omega \sum_{n=1}^6 (-1)^n S_n l_n A_{0n} \quad (\text{F.1})$$

where S_n , $\varnothing_n$, l_n , ω , and A_{0n} denote the edge conductance derived from the tissue conductivity, scalar potential, length between nodes, angular frequency and magnetic vector potential, respectively. The matrix formulae for SPFD were solved iteratively by an iterative matrix solver. An algebraic or geometric multigrid method can be also combined into the method to accelerate the computation [15], [16].

F.3 Quasi-static – Finite element method

The finite element method (FEM) with cubic elements may be used to assess exposures from resistance welding equipment. Under the quasi-static assumption and simply-connected domains, the electric field in the body can be represented as

$$\mathbf{E} = -\nabla \varnothing - \frac{\partial \mathbf{A}_0}{\partial t} \quad (\text{F.2})$$

where $\varnothing$ is the electric scalar potential and $\mathbf{A}_0$ is the vector potential of the incident magnetic field.

² Annex F is taken from IEC PAS 63184:2021, Annex F [27].

Due to the continuity condition, the electric scalar potential in the body satisfies the following elliptic partial differential formula:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \varphi = -\nabla \cdot \sigma \frac{\partial}{\partial t} A_0 \quad (\text{F.3})$$

with the boundary condition

$$n \cdot \sigma \left(\nabla \varphi + \frac{\partial}{\partial t} A_0 \right) = \frac{\partial}{\partial t} Q_S \quad (\text{F.4})$$

where σ is the conductivity and Q_S is the surface charge induced by the incident electric field.

For modelling the exposure to a magnetic field, Q_S was set to zero and A_0 was calculated analytically. The exposure to the external electric field was modelled in two steps. First, the external electric potential in air was determined assuming that the body is a perfect electric conductor by solving the following formula and boundary conditions:

$$\nabla \cdot \varepsilon_0 \nabla \varphi_{\text{ext}} = 0 \quad (\text{F.5})$$

$$n \cdot \nabla \varphi_{\text{ext}} = -n \cdot E_0 \quad \text{on outer boundary} \quad (\text{F.6})$$

$$\nabla \varphi_{\text{ext}} = 0 \quad \text{on body surface}$$

where E_0 is the incident electric field and ε_0 is the permittivity of air. In Formula (F.6), it is assumed that the outer boundary is at a sufficient distance so that the perturbation in the incident field due to the body is negligible at the boundary.

The induced charge Q_S in each voxel on the body surface is calculated from the normal component of the external electric flux density, and the internal potential was determined by solving Formula (F.3) and Formula (F.4).

The electric scalar potential Formula (F.3) and Formula (F.5) are discretized using Galerkin FEM with piecewise linear basis functions. The elements were cubical, and the degrees of freedom were the values of the electric potential at the corners of each cube. This resulted in a sparse matrix equation for the unknown scalar potential values. The matrix equation may be combined with the geometric multigrid method and solved iteratively.

F.4 Impedance method

The impedance method (IM) models an inhomogeneous human body as a three-dimensional impedance network [17], [18]. Each voxel is associated with dielectric constants corresponding to the location in the human body model. Since the impedance is assigned at each edge of the voxel, the impedances are determined by an average of the dielectric constants of four adjacent voxels, for example for an impedance along the x -direction:

$$Z_x |_{i,j,k} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0\hat{\epsilon}_a |_{i,j,k}} \cdot \frac{l_x}{l_y l_z} \quad (\text{F.7})$$

where ω and ϵ_0 are the angular frequency and free-space permittivity, respectively. l_x , l_y , and l_z are the edge lengths in the x -, y -, and z -directions, respectively. $\hat{\epsilon}_a$ denotes the average complex relative permittivity, i.e. for the x -direction,

$$\hat{\epsilon}_a |_{i,j,k} = \frac{\hat{\epsilon} |_{i,j,k} + \hat{\epsilon} |_{i,j+1,k} + \hat{\epsilon} |_{i,j,k+1} + \hat{\epsilon} |_{i,j+1,k+1}}{4}, \quad \hat{\epsilon} |_{i,j,k} = \epsilon_r |_{i,j,k} + \frac{\sigma |_{i,j,k}}{j\omega\epsilon_0} \quad (\text{F.8})$$

$\epsilon_r |_{i,j,k}$ and $\sigma |_{i,j,k}$ are the relative permittivity and conductivity, respectively, associated with the voxel at the location indexes i , j , and k . Once the impedance network has been constructed, the induced loop currents at each voxel face are then determined by applying an electromotive force due to Faraday's law and solving the system of equations with the successive overrelaxation (SOR) method. After the loop currents are obtained, the line currents along the edges of each voxel can be calculated from four loop currents surrounding each edge, and the current at the centre of each voxel is determined by averaging the four-line currents in each direction. Finally, the internal electric field is then computed using the following formula, for example for the z -component electric field,

$$E_z^{in} |_{i,j,k} = \frac{I_z^c |_{i,j,k}}{\sigma |_{i,j,k} + j\omega\epsilon_0\epsilon_r |_{i,j,k}} \cdot \frac{1}{l_x l_y} \quad (\text{F.9})$$

where $I_z^c |_{i,j,k}$ is the z -component current at the centre of the voxel at the location indexes i , j , and k .

F.5 Hybrid technique of FEM and SPFD method

In this hybrid technique [19], the external magnetic induction field B is solved using any finite element method (FEM) approach [20], [21], while the internal electric field E is evaluated with the SPFD described in Clause F.3. Specifically, the values of the welding current are needed to calculate the magnetic field behaviour. The resulting magnetic field is then exported with a fixed grid resolution and imported in any low-frequency (LF) magneto-quasi-static (MQS) solver based on the SPFD method, which has shown to work up to about 10 MHz [24]. In this method, the electric field is obtained starting from the knowledge of the magnetic vector potential A .

F.6 Computation of the magnetic vector potential

Measured magnetic field data may be directly applied as a source in IM. However, since SPFD uses vector potentials as a source to calculate the internal electric field, the reconstruction of vector potentials from the measured magnetic field (H) or the magnetic flux density (B) is required. A finite number of samples of B from simulations can be used for field reconstruction. Otherwise, a finite number of sample measurements can be collected through *ad-hoc* field meters (monitor points).

In this case the spatial coordinate of the collected measurement samples is also needed.

The procedure to reconstruct the B-field distribution *in silico* is described in [14]. The magnetic flux density is assumed to be $\mathbf{B} = u_x \mathbf{B}_x + u_y \mathbf{B}_y + u_z \mathbf{B}_z$, which satisfies $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, where $u_{x,y,z}$ are unit vectors.

Hence it can be represented using a vector potential $\mathbf{A}$, so that $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$; a vector potential is given by the following formulae:

$$A_x = -\int_0^y \left[\frac{1}{3} B_z(x, y', z) + \frac{1}{6} B_z(x, y', 0) \right] dy' + \int_0^z \left[\frac{1}{3} B_y(x, y, z') + \frac{1}{6} B_y(x, 0, z') \right] dz' \quad (\text{F.10})$$

$$A_y = -\int_0^z \left[\frac{1}{3} B_x(x, y, z') + \frac{1}{6} B_x(0, y, z') \right] dz' + \int_0^x \left[\frac{1}{3} B_z(x', y, z) + \frac{1}{6} B_z(x', y, 0) \right] dx' \quad (\text{F.11})$$

$$A_z = -\int_0^x \left[\frac{1}{3} B_y(x', y, z) + \frac{1}{6} B_y(x', 0, z) \right] dx' + \int_0^y \left[\frac{1}{3} B_x(x, y', z) + \frac{1}{6} B_x(0, y', z) \right] dy' \quad (\text{F.12})$$

Formula (F.10), Formula (F.11), and Formula (F.12) do not depend on electric or magnetic properties, therefore they are valid for any arbitrary inhomogeneous, anisotropic or nonlinear media.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62822-3:2023

Annex G³ (informative)

Averaging algorithms

G.1 Current density averaging over an area

G.1.1 General

The averaged current density J_{avg} according to [2] is calculated on a circular surface with an area A_0 . The tissues of the anatomical models in which J_{avg} is calculated should distinguish the following groups:

- central nervous system tissue;
- peripheral nervous system tissue;
- other tissues.

The anatomical models are meshed using either Cartesian voxels or tetrahedra. Each voxel or tetrahedron is assigned a single tissue belonging to one of the three groups. Each tissue has one particular electric conductivity value. For the calculation of J_{avg} in an anatomical model, its tissues should be selected from one or more of the groups listed above. Voxels or tetrahedra with unselected tissues should be disregarded by the averaging algorithm.

For the calculation of J_{avg} , the current density vector should be determined for each voxel (G.1.2) or tetrahedron (G.1.3) and then averaged over one or more voxels or tetrahedra (G.1.4). The maximum J_{avg} of all voxels or tetrahedra should be reported.

G.1.2 Calculation of the current density in a Cartesian voxel

For Cartesian computational meshes or voxel based meshes, a current density vector is calculated for each voxel. The twelve E-field components are calculated by linear interpolation of the vector components on the E-fields on the voxel edges (Figure G.1) into the voxel centre using Formula (G.1), Formula (G.2) and Formula (G.3).

$$E_x = \frac{1}{4}(E_{1x} + E_{2x} + E_{3x} + E_{4x}) \quad (\text{G.1})$$

$$E_y = \frac{1}{4}(E_{1y} + E_{2y} + E_{3y} + E_{4y}) \quad (\text{G.2})$$

$$E_z = \frac{1}{4}(E_{1z} + E_{2z} + E_{3z} + E_{4z}) \quad (\text{G.3})$$

The current density vector is calculated by multiplying the interpolated E-field vector by the electrical conductivity assigned to the voxel.

³ Annex G is taken from IEC PAS 63184:2021, Annex G [27].

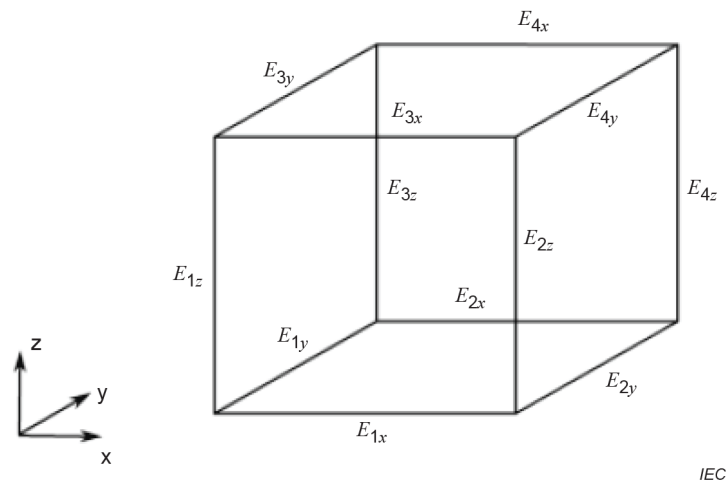


Figure G.1 – Field components on voxel edges

G.1.3 Calculation of the current density in a tetrahedron

For the calculation of the current density in the tetrahedra, the electric field vector should be calculated in the gravitational centre of each tetrahedron by evaluation of the respective finite elements. It should then be multiplied by the conductivity assigned to the respective tetrahedron.

G.1.4 Calculation of J_{avg}

J_{avg} should be evaluated for all points sampled on a rectilinear grid at a step width of $\sqrt{A_0} / 10$ or alternatively for each voxel or tetrahedron according to the following steps:

- Determine the direction of the current density vector $\mathbf{j}_v$ at point v or in the centre of the current voxel v or tetrahedron v in terms of the normalized vector $\mathbf{n}_v$.
- Determine a circle with the area A_0 and the direction of the current density of the normal vector.
- Triangulate the circle with a maximum edge length of $\sqrt{A_0} / 10$.
- Initialize two variables I_v and A_v to zero. These variables contain the current and the area contributing to J_{avg} of the current voxel v or tetrahedron v .
- Calculate the contribution of each triangle t in the circle to the averaged current density J_{av} :
 - Determine the current passing through each triangle t by multiplying the current density vector calculated in its centre by the normalized vector $\mathbf{n}_v$ and the dimensions of the respective triangle.

NOTE 1 The current through the triangle t can be very different from the current of the voxel v or tetrahedron v for which J_{avg} is evaluated. Only the part of the current that is parallel to the current of the voxel v or tetrahedron v is considered.

2) If I_t is positive, add it to I_v and add the area of the current triangle t to A_v .

3) After iterating over all triangles of the circle, calculate J_{avg} by dividing I_v by A_v .

NOTE 2 This algorithm automatically adapts the size of the averaging area to structures or current paths of the cross sections which are thinner than the area of the averaging circle (e.g. peripheral nerve cords) and reduces the dimensions of the averaging area at tissue-air interfaces. As a result, excessive overestimation due to a reduced averaging area is prevented.

G.2 E-field averaging in a cubical volume

The averaged E-field E_{avg} in a selected tissue group within cubical volumes [3] should be evaluated using the following algorithm in case of anatomical voxel models:

- The magnitude of the local E-field should be interpolated at the centre points of each voxel.
- For each centre point, a cube C_{avg} with initial edge length $d_1 = 2 \text{ mm}$ should be constructed.
- For each voxel which belongs to the selected tissue group, its volume inside C_{avg} should be added up to V_{avg} .
- While V_{avg} is smaller than 8 mm^3 , the edge length d_1 should be increased to approximate $V_{\text{avg}} = 8 \text{ mm}^3$, but only as long as $d_1 < d_{1,\text{max}} = 4 \text{ mm}$.

NOTE With this limitation, in the case of a voxel model with a thin nerve of 0,5 mm diameter, the E-field in this nerve would be averaged over a length of 4 mm, i.e. 8 voxels, instead of 32 mm with 64 voxels. A larger $d_{1,\text{max}}$ of e.g. 8 mm could also be used.

- The final V_{avg} should not exceed 8 mm^3 by more than 0,1 %, the smallest V_{avg} and its d_1 and its centre point should be reported.
- For the final V_{avg} all local E-field magnitudes should be multiplied by their voxel's partial volume inside C_{avg} and summed up. The sum should be divided by V_{avg} . The resulting E_{avg} should be assigned to the centre voxel.

In case of anatomical surface models, the above algorithm should be used assuming virtual voxels around the sampling points of an equidistant rectilinear grid. In this case, each virtual voxel belongs to the tissue found at its centre.

G.3 E-field averaging along an averaging distance

G.3.1 General

The averaged E-field along an average distance [5], [6], [7], [8] should be evaluated by calculating the voltage difference ΔV on two points in a tissue or a group of tissues and dividing it by the averaging distance d_a . It is assumed that quasi-static conditions are met (see G.1.3) such that the E-field integral over the distance d_a can be regarded as independent from the actual integration path. For exposure to fields higher frequencies or to magnetic sources, the E-field integral can no longer be assumed to be independent of the integration path. The E-field averaging algorithm needs to consider this by finding a path that maximizes the integral of the E-field vector along this path. For typical mesh resolutions in anatomical models, the computational effort for rigorous search of the path that maximizes the E-field integral can be assumed to significantly exceed available resources.

Hence, the integration path of the E-field is constructed following the direction of the E-field vector through the tissue groups that are evaluated. For the quasi-static case, this method will identify the path that correctly calculates the voltage difference ΔV if the mesh resolution is sufficiently fine. For the general case, this method is expected to yield convergent results if the mesh resolution is refined.

If the E-field in the domain of interest is assumed to depend on the phase of the field source, the maximization should be carried out by integrating the real part of the E-field vector for seven different phase steps of 45° of the field source.

The tissues of the anatomical models in which E_{avg} is calculated should distinguish the following groups:

- central nervous system tissue;
- peripheral nervous system tissue;
- other tissues.

Depending on the algorithm to calculate the induced fields, the anatomical models are meshed using elements, i.e. either Cartesian voxels or tetrahedra. Each element is assigned a single tissue which belongs to one of the three groups. For the calculation of E_{avg} in an anatomical model, its tissues should be selected from one or more of the groups listed above. Elements with unselected tissues should be disregarded by the averaging algorithm.

To improve the accuracy, for example in case of large tetrahedra of higher finite element order, virtual voxels can be used as elements in the following algorithm. These should be created by sampling the volume with a constant sampling step $d_0 < d_a/5$.

G.3.2 Algorithm to construct the integration path

The integration of the E-field vector along a path with the length of the averaging distance d_a should be carried out based on the following assumptions:

- Each element that belongs to the selected group of the three tissue groups listed in G.3.1 should be used as a starting point for the integration path.
- For each element, the E-field vector should be linearly interpolated into or evaluated in its gravitational centre. The reference location for each element should be assumed to be in the gravitational centre as well.

The integration path should be determined in the following steps:

- a) Define two variables arrays that store the dot product of the E-field vector and its direction and the location of the gravitational centre of the element.
- b) At the starting element, determine the direction of the E-field vector and the dot product of the E field vector and its direction. Store the result and the location of the vector in their respective variable arrays.
- c) Identify the face of the voxel or tetrahedron through which the current direction vector passes. If the direction vector passes through an edge or vertex, all faces adjacent to this edge or vertex should be considered in the next steps.
- d) For the faces identified in step c), identify the elements that share these edges.
- e) If no elements can be identified in step d), disregard the current starting voxel and proceed to the next one.
- f) For all elements identified in step d), determine the one with the maximum $|E|$. Store this $|E|$ and its location as part of the path for the current starting element.
- g) Calculate the distance covered by the path. If the distance is less than d_a , return to step c) and add the next element.
- h) Calculate the sum of the stored $|E|$ and scale it to the target distance d_a . Assign it to the current starting element.
- i) Proceed to the next starting element and return to step b).

Report the overall maximum of all elements. If no maximum can be determined (see step e)) over the entire computational domain, report an error message.

Annex H (informative)

Correspondence table between time domain and frequency domain

In theory, the calculation can be carried out indifferently in the time domain and in the frequency domain. Transcription from the first domain to the second consists in processing the frequency components (amplitude and phase). This involves replacing the convolution product (*) with an arithmetic multiplication. The symbols are expanded on in 3.4 (see Table H.1).

The frequency domain seems easier to understand but it is more complex to implement (designing a filter once is easier than implementing a Fourier transform on each waveform).

Table H.1 – Transcription of formulae

Formula	Time domain (any waveform signal)	Frequency domain (single frequency signal)
(2)	$EI_{RL} = \max W_{RL}(t) * B(t) $	$EI_{RL} = \frac{\max[B(f)]}{B_{RL}(f)}$
	$W_{RL}(t) = \mathcal{F}^{-1}(W_{RL}(f))$	$W_{RL}(f) = \frac{1}{B_{RL}(f)}$
(3)	$B(t) = CC_{BI} \cdot I(t)$	$B = CC_{BI} \cdot I(f)$
(4)	$EI_{RL} = CC_{BI} \cdot \max W_{RL}(t) * I(t) $	$EI_{RL} = \max(CC_{BI}) \cdot \frac{I(f)}{B_{RL}(f)}$
(5)	$E_i(t) = \frac{R}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt}$	$E_i(f) = R \cdot \pi \cdot f \cdot B(f)$
(6)	$E_i(t) = CC_{EB/2D} \cdot \frac{dB(t)}{dt}$	$E_i(f) = CC_{EB/2D} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot B(f)$
(7)	$E_i(t) = CC_{EB/2D} \cdot CC_{BI/2D} \cdot \frac{dI(t)}{dt}$	$E_i(f) = CC_{EB/2D} \cdot CC_{BI/2D} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I(f)$
(8)	$EI_{BR} = CC_{EB/2D} \cdot CC_{BI/2D} \cdot \max W_{BR}(t) * \frac{dI(t)}{dt} $	$EI_{BR} = CC_{EI} \cdot \max(CC_{BI/2D}) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I(f)}{E_{BR}(f)}$
	$W_{BR}(t) = \mathcal{F}^{-1}(W_{BR}(f))$	$W_{BR}(f) = \frac{1}{E_{RL}(f)}$
(9)	$k_E = \frac{EI_{BR}}{EI_{RL}}$	$k_E = \frac{E_{iHM}(f) \cdot B_{RL}(f)}{E_{BR}(f) \cdot B(f)}$
(10)	$EI_{BR} = k_E \cdot EI_{RL}$	$EI_{BR} = k_E \cdot \frac{B(f)}{B_{RL}(f)}$
(11)	$CC_{EI/HM} = \frac{\max E_{i,avg}}{2 \cdot \pi \cdot f}$	$CC_{EI/HM} = \frac{\max E_{i,avg}}{2 \cdot \pi \cdot f}$

Formula	Time domain (any waveform signal)	Frequency domain (single frequency signal)
(12)	$CEI_{BR} = \max W_{BR}(t) * I(t) $	$CEI_{BR} = \frac{I(f)}{B_{RL}(f)}$
(13)	$EI_{BR} = CC_{EI/HM} \cdot CEI_{BR}$	$EI_{BR} = CC_{EI/HM} \cdot CEI_{BR}$
NOTE Values are peak in the time domain and RMS in the frequency domain. The RMS values are equal to the peak values divided by $\sqrt{2}$ for sinusoidal quantities.		

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62822-3:2023

Bibliography

- [1] Council Recommendation 1999/519/EC of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), Official Journal L 199, 30.07.1999, p.59-70
- [2] ICNIRP, "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," Health Phys, vol. 74, pp. 494-522, Apr 1998
- [3] ICNIRP, "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," Health Phys, vol. 99, pp. 818-36, Dec 2010
- [4] ICNIRP, "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," Health Phys, vol. 118, pp. 483-524, Mar 2020
- [5] IEEE Std C95.6-2002, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz*
- [6] IEEE Std C95.1-1999, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*
- [7] IEEE Std C95.1-2005, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*
- [8] IEEE Std C95.1-2019, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*
- [9] Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC, Official Journal L 179, 29.06.2013, p.1-21
- [10] Staebler P, "Human Exposure to Electromagnetic Fields from Extremely Low Frequency (ELF) to radiofrequency", pp 201-232, ISTE-Wiley 2017 ISBN: 9781786301215
- [11] Sunohara T, Hirata A, Laakso I, De Santis V, and Onishi T, "Evaluation of nonuniform field exposures with coupling factors," Phys Med Biol, vol. 60, pp. 8129-40, Oct 21 2015
- [12] Wake K, Laakso I, Hirata A, Chakarothei J, Onishi T, Watanabe S, et al., "Derivation of Coupling Factors for Different Wireless Power Transfer Systems: Inter- and Intralaboratory Comparison," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 59, pp. 677-685, 2017
- [13] Magne I., Deschamps F. Electric field induced in the human body by uniform 50 Hz electric or magnetic fields: bibliography analysis and method for conservatively deriving measurable limits. J. Radiol. Prot. 2016, 36 (3) pp. 419–436
- [14] Laakso I, De Santis V, Cruciani S, Campi T, and Feliziani M, "Modelling of induced electric fields based on incompletely known magnetic fields," Physics in Medicine & Biology, vol. 62, pp. 6567-6578, 2017
- [15] Zhu Y and Cangellaris A C, Multigrid finite element methods for electromagnetic field modelling vol. 28: John Wiley & Sons, 2006

- [16] Laakso I and Hirata A, "Fast multigrid-based computation of the induced electric field for transcranial magnetic stimulation," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 57, pp. 7753-65, Dec 7 2012
- [17] Deford J F and Gandhi O P, "An Impedance Method to Calculate Currents Induced in Biological Bodies Exposed to Quasi-Static Electromagnetic Fields," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-27, pp. 168-173, 1985
- [18] Orcutt N and Gandhi O P, "A 3-D impedance method to calculate power deposition in biological bodies subjected to time varying magnetic fields," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 35, pp. 577- 83, Aug 1988
- [19] De Santis V, Campi T, Cruciani S, Laakso I, and Feliziani M, "Assessment of the induced electric fields in a carbon-fiber electrical vehicle equipped with a wireless power transfer system," *Energies*, vol. 11, p. 684, 2018
- [20] Campi T, Cruciani S, De Santis V, Maradei F, and Feliziani M, "Numerical characterization of the magnetic field in electric vehicles equipped with a WPT system," *Wireless Power Transfer*, vol. 4, pp. 78-87, 2017
- [21] Campi T, Cruciani S, De Santis V, Maradei F, and Feliziani M, "Wireless power transfer (WPT) system for an electric vehicle (EV): how to shield the car from the magnetic field generated by two planar coils," *Wireless Power Transfer*, vol. 5, pp. 1-8, 2018
- [22] Gabriel S, Lau R W, and Gabriel C, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, p. 2271, 1996
- [23] De Santis V, Chen XL, Laakso I, Hirata A. 2015. An equivalent skin conductivity model for low-frequency magnetic field dosimetry. *Biomed. Phys. Eng. Express* 1 (2015) 015201
- [24] Hirata A, Fumihiro I, and Laakso I, "Confirmation of quasi-static approximation in SAR evaluation for a wireless power transfer system," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 58, p. N241, 2013
- [25] Dimbylow P J 1998 Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution, anatomically realistic model of the body *Phys. Med. Biol.* 43 221–30
- [26] Dawson TW, Caputa K and Stuchly MA 1998 High resolution organ dosimetry for human exposure to low-frequency electric fields *IEEE Trans. Power Deliv.* 13 366–73
- [27] IEC PAS 63184⁴, *Assessment methods of the human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems – Models, instrumentation, measurement and numerical methods and procedures (frequency range of 1 kHz to 30 MHz)*
- [28] IEC 62233, *Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure*
- [29] EN 50527 (all parts), *Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices*

⁴ A reference update will be necessary before the document becomes an IS.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	74
1 Domaine d'application	76
2 Références normatives	76
3 Termes, définitions, grandeurs, unités, constantes et symboles	77
3.1 Termes et définitions	77
3.2 Grandeurs et unités	79
3.3 Constantes	79
3.4 Symboles	80
4 Exigences	80
5 Méthodes d'évaluation	81
5.1 Généralités	81
5.2 Méthodes fondées sur des niveaux de référence	81
5.2.1 Généralités	81
5.2.2 Évaluation fondée sur le champ magnétique mesuré	82
5.2.3 Évaluation fondée sur le courant de soudage calculé	84
5.3 Méthodes fondées sur l'évaluation des grandeurs corporelles (restrictions de base)	86
5.3.1 Généralités	86
5.3.2 Méthode fondée sur les coefficients de couplage	87
5.3.3 Méthode fondée sur le facteur de correction	89
5.3.4 Méthode fondée sur la simulation sur modèle humain	90
5.3.5 Comparaison des résultats	92
6 Considérations relatives aux mesurages	92
6.1 Instruments de mesure des champs magnétiques ou des niveaux d'exposition	92
6.1.1 Généralités	92
6.1.2 Sonde(s)	93
6.1.3 Mesureur de champ portatif	93
6.1.4 Système de mesurage avec éléments distincts	93
6.2 Instruments d'enregistrement	94
6.2.1 Enregistrement du courant de soudage	94
6.2.2 Enregistrement du champ magnétique	95
6.3 Traitement des signaux (applicable à toute forme d'onde de courant de soudage)	95
6.3.1 Généralités	95
6.3.2 Application de la méthode de crête pondérée dans le domaine temporel	95
6.3.3 Moyennage spatial	95
6.3.4 Moyennage temporel	96
6.4 Incertitude d'évaluation	96
7 Méthodes d'évaluation par calcul	96
7.1 Généralités	96
7.2 Approximation quasi statique	96
7.3 Modèles de corps humain pour la simulation	97
7.4 Évaluation par calcul en fonction des restrictions de base	98
8 Modèle de source	99
8.1 Généralités	99
8.2 Exemple de modèle de source	99

9	Fiche technique champs électromagnétiques et rapport d'évaluation	101
Annexe A (informative) Exemple d'évaluation fondée sur les composantes individuelles		
	A.1 Généralités	102
	A.2 Générateur de courant de soudage	102
	A.3 Coefficient de couplage du circuit de soudage	105
	A.4 Système de soudage	106
Annexe B (informative) Exemples de fiches techniques		
	B.1 Exemple de fiche technique du générateur de courant	108
	B.2 Exemple de fiche technique du circuit de soudage	109
	B.3 Exemple de fiche technique de montage du matériel	110
Annexe C (informative) Méthode du coefficient de couplage		
	C.1 Principe	113
	C.2 Validation de cette méthode	113
	C.2.1 Contexte	113
	C.2.2 Restrictions de base relatives aux effets sur la santé	114
	C.2.3 Restrictions de base relatives aux effets sensoriels	114
	C.3 Conclusion	115
Annexe D (informative) Méthode du facteur de correction		
	D.1 Généralités	117
	D.2 Principe	117
	D.3 Exemple d'observation pour le facteur de correction	118
	D.3.1 Contexte	118
	D.3.2 Facteur de correction pour le tronc et les membres	118
	D.3.3 Facteur de correction pour la tête	118
	D.4 Conclusion	119
Annexe E (informative) Exemple d'évaluations de l'exposition sur une machine de soudage		
	E.1 Généralités	120
	E.2 Description du poste de soudage par points	120
	E.3 Conditions d'exposition	120
	E.4 Principaux paramètres de simulation et résultats	122
	E.4.1 Principaux paramètres de simulation	122
	E.4.2 Résultats de la simulation	123
	E.5 Évaluations de l'exposition	123
	E.5.1 Généralités	123
	E.5.2 Méthode fondée sur un calcul du champ magnétique	123
	E.5.3 Méthode fondée sur les coefficients de couplage	124
	E.5.4 Méthode fondée sur le facteur de correction	124
	E.5.5 Méthode fondée sur le modèle humain	124
	E.6 Conclusion	125
Annexe F (informative) Méthodes de calcul		
	F.1 Généralités	126
	F.2 Méthode SPFD	126
	F.3 Méthode quasi statique – par éléments finis	127
	F.4 Méthode des impédances	128
	F.5 Technique hybride des méthodes FEM et SPFD	129
	F.6 Calcul du potentiel vecteur de champ magnétique	129

Annexe G (informative) Algorithmes de moyennage	130
G.1 Moyennage de la densité de courant sur une surface	130
G.1.1 Généralités	130
G.1.2 Calcul de la densité de courant dans un voxel cartésien	130
G.1.3 Calcul de la densité de courant dans un tétraèdre	131
G.1.4 Calcul de J_{avg}	131
G.2 Moyennage des champs E dans un volume cubique	132
G.3 Moyennage des champs E le long d'une distance moyenne	132
G.3.1 Généralités	132
G.3.2 Algorithme de construction du chemin d'intégration	133
Annexe H (informative) Tableau de correspondance entre le domaine temporel et le domaine fréquentiel	134
Bibliographie	136
Figure 1 – Mesurage de l'exposition au niveau de la tête	83
Figure 2 – Mesurage de l'exposition au niveau du tronc	83
Figure 3 – Mesurage de l'exposition au niveau des membres (mains et cuisse)	84
Figure 4 – Périmètres de conformité en fonction des niveaux de référence (valeurs d'action)	86
Figure 5 – Périmètres de conformité selon les restrictions de base (valeurs limites d'exposition)	89
Figure 6 – Champ magnétique autour du corps humain obtenu par modélisation de la source	91
Figure 7 – Exemple de champ électrique induit dans un corps humain exposé à un pistolet de soudage ($I = 1\text{ kA}$ à 50 Hz)	92
Figure 8 – Courant de soudage qui circule dans une configuration de boucle rectangulaire ($a \times b$)	99
Figure A.1 – Évaluation d'un système de soudage complet	102
Figure A.2 – Évaluation type fondée sur les composantes	102
Figure A.3 – Formes d'onde de courant avec les technologies LF-AC (à gauche) et MF-DC (à droite)	103
Figure A.4 – VLE combinées pour les effets sensoriels et sur la santé applicables à la tête	103
Figure A.5 – Indices d'exposition courant dans le temps pour deux technologies de soudage	104
Figure A.6 – Géométrie du pistolet de soudage par point fixe	105
Figure A.7 – Modèle de circuit électrique de soudage (en m) et un point d'intérêt le long de l'axe X	106
Figure A.8 – Coefficient de couplage CC_{BI} le long de l'axe X	106
Figure A.9 – Indice d'exposition (VA) le long de l'axe X	107
Figure A.10 – Indice d'exposition (VLE) le long de l'axe X	107
Figure B.1 – Exemple de fiche technique de la source de courant	108
Figure B.2 – Exemple de fiche technique du montage d'électrodes	109
Figure B.3 – Exemple de fiche technique du système de soudage	110
Figure B.4 – Exemple de fiche technique du système de soudage (suite)	111
Figure B.5 – Exemple de fiche technique du système de soudage (suite)	112

Figure C.1 – Distribution des rapports d'indice d'exposition modèle humain/ modèle de disque (effets du VLE sur la santé pour le tronc et les mains)	114
Figure C.2 – Distribution des rapports d'indice d'exposition modèle humain/ modèle de disque (effets sensoriels et sur la santé du VLE pour la tête)	115
Figure D.1 – Distribution du facteur de correction k_E concernant les effets sur la santé pour le tronc et les mains	118
Figure D.2 – Distribution du facteur de correction k_E concernant les effets pour la tête (sensoriels et sur la santé)	119
Figure E.1 – Pistolet de soudage et son modèle de circuit électrique (segments représentés par des tirets jaunes)	121
Figure E.2 – Distribution du champ magnétique autour du corps exposé	121
Figure E.3 – Configuration et distribution du champ électrique sur le corps exposé (pour 1 kA à $f = 50$ Hz)	122
Figure E.4 – Distribution du champ électrique sur les mains (pour 1 kA à $f = 50$ Hz)	122
Figure G.1 – Composantes du champ sur les bords du voxel	131
Tableau 1 – Exemples de modèles humains pour déterminer les champs électriques induits dans la plage des basses fréquences	97
Tableau A.1 – Indice d'exposition courant pour la technologie AC-LF ($I_{rms} = 11,4$ kA)	104
Tableau A.2 – Indice d'exposition courant du grand public pour la technologie AC-LF ($I_{rms} = 11,4$ kA)	104
Tableau C.1 – Rayon du disque représentatif (modèle géométrique)	113
Tableau C.2 – Coefficients de couplage	115
Tableau E.1 – Coefficients de couplage pour le champ magnétique et sur le modèle humain	123
Tableau E.2 – Résultats fondés sur un calcul du champ magnétique	123
Tableau E.3 – Résultats fondés sur les coefficients de couplage	124
Tableau E.4 – Résultats fondés sur le facteur de correction	124
Tableau E.5 – Résultats fondés sur le modèle humain	125
Tableau H.1 – Transcription des formules	134

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIELS DE SOUDAGE ÉLECTRIQUE – ÉVALUATION DES RESTRICTIONS RELATIVES À L'EXPOSITION HUMAINE AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES (0 HZ À 300 GHz) –

Partie 3: Matériels de soudage par résistance

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 62822-3 a été établie par le comité d'études 26 de l'IEC: Soudage électrique. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2017. Cette édition constitue une révision technique.

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

- a) inclusion des incertitudes dans les résultats de l'évaluation;
- b) simplification des méthodes d'évaluation de l'exposition.

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

Projet	Rapport de vote
26/744/FDIS	26/745/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/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62822, publiées sous le titre général *Matériels de soudage électrique – Évaluation des restrictions relatives à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz)*, se trouve sur le site web de l'IEC.

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,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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.

MATÉRIELS DE SOUDAGE ÉLECTRIQUE – ÉVALUATION DES RESTRICTIONS RELATIVES À L'EXPOSITION HUMAINE AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES (0 HZ À 300 GHz) –

Partie 3: Matériels de soudage par résistance

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62822 s'applique aux matériels de soudage par résistance et techniques connexes conçus pour un usage professionnel et non professionnel.

Plus généralement, le présent document traite des matériels où le courant de soudage circule dans un circuit électrique dont la géométrie ne peut pas être modifiée, quelle que soit la technologie du générateur de courant (par exemple LF-AC, MF-DC pour le soudage par points ou continu, ou le soudage par décharge capacitive utilisé pour le soudage de goujons).

NOTE 1 Les techniques connexes comme le brasage fort et tendre par résistance ou le chauffage par résistance obtenu par des moyens comparables au matériel de soudage par résistance sont également incluses.

Le présent document spécifie les procédures d'évaluation de l'exposition humaine aux champs magnétiques générés par les matériels de soudage par résistance. Il couvre les effets biologiques non thermiques dans la plage de fréquences comprises entre 0 Hz et 10 MHz et définit des scénarios d'essai normalisés.

NOTE 2 Tout au long du présent document, le terme général "champ" fait référence au "champ magnétique".

NOTE 3 Pour évaluer l'exposition aux champs électriques et les effets thermiques, les méthodes spécifiées dans l'IEC 62311 ou les normes de base correspondantes s'appliquent.

L'objet du présent document est de proposer des méthodes pour produire des données relatives à l'exposition aux champs électromagnétiques qui peuvent être utilisées pour faciliter l'évaluation du lieu de travail, en particulier lorsque les conditions d'utilisation du matériel sont inconnues. Lorsque ces données sont techniquement limitées (par exemple, une double commande manuelle impose la position et la posture de l'utilisateur), les données peuvent être directement exploitables si elles entrent dans le domaine d'application spécifié par le fabricant ou l'intégrateur.

D'autres normes peuvent s'appliquer aux produits couverts par le présent document. Le présent document ne peut notamment pas être utilisé pour démontrer la compatibilité électromagnétique avec d'autres matériels. Il ne spécifie pas d'exigences de sécurité du produit autres que celles spécifiquement liées à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques.

Le présent document propose plusieurs méthodes pour évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques, simples à sophistiquées, ces dernières fournissant une évaluation plus précise.

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 60050-851:2008, *Vocabulaire Électrotechnique International (IEV) – Partie 851: Soudage électrique* (disponible à l'adresse www.electropedia.org)

IEC 60974-1, *Matériel de soudage à l'arc – Partie 1: Sources de courant de soudage*

IEC 60974-6, *Matériel de soudage à l'arc – Partie 6: Matériel à service limité*

IEC 61786-1, *Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine – Partie 1: Exigences applicables aux instruments de mesure*

IEC 61786-2:2014, *Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine – Partie 2: Norme de base pour les mesures*

IEC 62226-2-1, *Exposition aux champs électriques ou magnétiques à basse et moyenne fréquence – Méthodes de calcul des densités de courant induit et des champs électriques induits dans le corps humain – Partie 2-1: Exposition à des champs magnétiques – Modèles 2D*

IEC 62311, *Évaluation des équipements électroniques et électriques en relation avec les restrictions d'exposition humaines aux champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz)*

IEC 62822-1:2016, *Matériels de soudage électrique – Évaluation des restrictions relatives à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz) – Partie 1: Norme de famille de produits*

3 Termes, définitions, grandeurs, unités, constantes et symboles

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60050-851, de l'IEC 60974-1, de l'IEC 60974-6 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.1.1

restriction de base

restriction sur l'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques fondée directement sur des effets sur la santé et des considérations biologiques établis

Note 1 à l'article: Les restrictions de base sont également appelées limites dosimétriques de référence (DRL, *Dosimetric Reference Limits*) et valeurs limites d'exposition (VLE)

3.1.2

coefficient de couplage

CC_{YX}

relation qui permet d'estimer Y à partir de X

EXEMPLE CC_{EI} donne le champ électrique induit maximal à l'intérieur d'une région du corps humain en fonction d'un courant de soudage unitaire.

Note 1 à l'article: En gardant à l'esprit que la conductivité électrique peut être dépendante de la fréquence, une conversion entre CC_{JI} et CC_{EI} ou entre CC_{JB} et CC_{EB} est possible avec la relation donnée dans la Formule (1)

$$J(j\omega) = \sigma(j\omega) \cdot E(j\omega) \quad (1)$$

où

J est la densité de courant électrique, exprimée en ampères par mètre carré;

E est l'intensité de champ électrique, exprimée en volts par mètre;

σ est la conductivité, exprimée en siemens par mètre;

ω est la fréquence angulaire ($2 \cdot \pi \cdot f$), exprimée en radians par seconde.

3.1.3

indice d'exposition

EI

résultat de l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques (sinusoïdaux et non sinusoïdaux), exprimé en fraction ou pourcentage des valeurs admissibles

Note 1 à l'article: Les fractions supérieures à 1 (100 %) dépassent les valeurs admissibles.

Note 2 à l'article: L'abréviation "EI" est dérivée du terme anglais développé correspondant "exposure index".

3.1.4

grand public

individus de tous les âges et d'états de santé variables

3.1.5

intracorporel

situé ou se produisant à l'intérieur du corps

3.1.6

non professionnel

opérateur qui ne soude pas dans le cadre de sa profession et qui peut avoir peu ou pas d'instruction formelle en soudage

[SOURCE: IEC 60050-851:2008, 851-11-14, modifié – la modification ne s'applique qu'à la version anglaise.]

3.1.7

effet non thermique

stimulation des muscles, des nerfs ou des organes sensoriels par suite d'une exposition aux champs électromagnétiques

3.1.8

exposition professionnelle

exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques sur leur lieu de travail, en général dans des conditions connues, et dans le cadre de leurs activités professionnelles normales ou attribuées

Note 1 à l'article: Un travailleur est une personne employée par un employeur, y compris les stagiaires et les apprentis.

3.1.9

niveau de référence

grandeur directement mesurable, déduite des restrictions de base, qui permet de procéder à une évaluation pratique de l'exposition

Note 1 à l'article: Les niveaux de référence sont également appelés niveaux d'exposition de référence (ERL, *Exposure Reference Levels*) et valeurs d'action (VA).

Note 2 à l'article: Le respect des niveaux de référence assure le respect des restrictions de base correspondantes. Si les niveaux de référence sont dépassés, les restrictions de base ne le sont pas nécessairement.

3.1.10

système de soudage par résistance

ensemble composé d'une source de courant, d'un transformateur, d'un câblage et d'un circuit de soudage

3.1.11

effet sensoriel

trouble passager de perceptions sensorielles et variation mineure de fonctions cérébrales par suite d'une exposition humaine aux champs électromagnétiques

3.1.12

configuration normalisée

configuration qui reflète les positions normales de l'opérateur

3.1.13

distance normalisée

distance entre l'axe d'une partie du circuit de soudage et la surface la plus proche du corps aux configurations normalisées

3.1.14

circuit de soudage

tous les éléments conducteurs à travers lesquels le passage du courant de soudage est prévu

Note 1 à l'article: Dans le soudage par résistance, les pièces mises en œuvre ne font pas partie du circuit de soudage pour les besoins du présent document.

[SOURCE: IEC 60050-851:2008, 851-14-10, modifié – les deux notes à l'article ont été supprimées, et une nouvelle note à l'article a été ajoutée.]

3.2 Grandeurs et unités

Les unités du système international (SI) adoptées au niveau international sont utilisées tout au long du présent document.

Dans l'ensemble du présent document, les symboles en caractère gras sont des grandeurs vectorielles.

Grandeur physique	Symbole	Unité	Dimension
Conductivité électrique	σ	Siemens par mètre	$S \cdot m^{-1}$
Courant électrique	I	Ampère	A
Densité de courant électrique	J	Ampère par mètre carré	$A \cdot m^{-2}$
Intensité de champ électrique	E	Volt par mètre	$V \cdot m^{-1}$
Fréquence	f	Hertz	Hz
Induction magnétique	B	Tesla	T ($V \cdot s / m^2$)
Perméabilité magnétique	μ	Henry par mètre	$H \cdot m^{-1}$
Longueur d'onde	λ	Mètre	m

3.3 Constantes

Constante physique	Symbole	Amplitude	Dimension
Perméabilité du vide	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$

3.4 Symboles

Les symboles utilisés dans le présent document sont développés ci-après.

Symboles	Signification
*	Produit de convolution, c'est-à-dire que $B(t)*WL(t)$ signifie filtrer $B(t)$ par $WL(t)$
t	Temps
f	Fréquence d'un signal de fréquence unique
$B(t)$	Induction magnétique (champ magnétique) dans le domaine temporel
$B(f)$	Induction magnétique (champ magnétique) dans le domaine fréquentiel
$B_{RL}(f)$	Niveau de référence B à f
$W_{RL}(t)$	Réponse temporelle (impulsion) du filtre de pondération selon le niveau de référence
$W_{RL}(f)$	Réponse en fréquence de la fonction de pondération selon le niveau de référence
EI_{RL}	Indice d'exposition selon le niveau de référence
$I(t) / I$	Courant de soudage dans le domaine temporel/domaine fréquentiel
CC_{BI}	Coefficient de couplage de I à B (indépendant de la fréquence)
$\mathcal{F}^{-1}$	Transformée inverse de Fourier
dB/dt	Dérivée temporelle de l'induction magnétique
R	Rayon du disque d'un modèle géométrique 2D
E_i	Champ électrique induit ou interne
dI/dt	Dérivée temporelle du courant de soudage
$W_{BR}(t)$	Réponse temporelle (impulsion) du filtre de pondération selon la restriction de base
$W_{BR}(f)$	Réponse en fréquence de la fonction de pondération selon la restriction de base
$CC_{EB/2D}$	Coefficient de couplage de B à E_i avec un modèle géométrique
$CC_{EI/HM}$	Coefficient de couplage de I à E_i avec un modèle humain
EI_{BR}	Indice d'exposition selon la valeur limite d'exposition (restriction de base)
k_E	Coefficient de l'indice d'exposition
CEI_{BR}	Indice d'exposition courant selon les restrictions de base

4 Exigences

Le matériel doit être évalué comme cela est indiqué à l'Article 5.

Si l'évaluation est réalisée à l'aide de niveaux mesurés ou calculés de champs extérieurs, les dispositions du 5.2 doivent être appliquées conjointement avec celles de l'Article 6.

Si l'évaluation est réalisée à l'aide de grandeurs corporelles, les dispositions du 5.3 doivent être appliquées conjointement avec celles de l'Article 6 si des mesurages sont effectués et conjointement avec celles de l'Article 7 si un modèle humain est utilisé.

Les résultats doivent être consignés comme cela est indiqué à l'Article 9.

5 Méthodes d'évaluation

5.1 Généralités

L'Article 5 fournit des méthodes d'évaluation de base qui tiennent compte des effets directs des champs électromagnétiques [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]¹. Les évaluations sont effectuées soit en fonction des restrictions de base soit en fonction des niveaux de référence dérivés. Les lignes directrices internationales définissent différentes limites sur les restrictions de base et les niveaux de référence pour les effets de stimulation qui sont pris en compte pour une exposition à des champs magnétiques de basses fréquences.

Cinq méthodes sont utilisées pour évaluer l'exposition à des matériels de soudage et pour démontrer la conformité ou fournir suffisamment d'informations pour démontrer la conformité aux niveaux de référence et/ou aux restrictions de base. L'une quelconque de ces cinq méthodes peut être choisie, en retenant la méthode la plus pertinente pour l'évaluation de l'exposition. Si l'une des quatre premières méthodes ne conduit pas à démontrer la conformité, une autre peut être choisie. La méthode ultime est la cinquième (dosimétrie avec modèle humain).

Tandis que l'évaluation fondée sur le mesurage des champs magnétiques incidents en fonction des niveaux de référence est la méthode la plus simple (voir 5.2.2), l'évaluation fondée sur le champ magnétique calculé à partir du courant de soudage peut prédire l'exposition sans nécessiter l'utilisation d'un mesureur de champ (voir 5.2.3). Ces méthodes sont nécessairement plus prudentes qu'une évaluation de l'exposition selon les quantités induites en regard des restrictions de base.

Ainsi, l'évaluation du champ E interne (ou induit) ou de la densité de courant en fonction des restrictions de base (5.3) est effectuée avec des conditions d'exposition plus réalistes qui tiennent principalement compte de l'hétérogénéité du champ magnétique.

Les évaluations des champs induits en fonction des restrictions de base à l'aide de modèles simples (géométriques) constituent des méthodes de complexité intermédiaire (voir 5.3.2 et 5.3.3). Puisque ces méthodes doivent couvrir un grand nombre de situations, elles sont généralement prudentes et deviennent exactes dans des cas extrêmes.

Enfin, l'évaluation des champs induits en fonction des restrictions de base à l'aide d'un corps humain électriquement représentatif constitue la méthode la plus rigoureuse et réduit les incertitudes. Elle nécessite une simulation après une modélisation fidèle de l'environnement (voir 5.3.4).

5.2 Méthodes fondées sur des niveaux de référence

5.2.1 Généralités

Les évaluations sont fondées sur les champs magnétiques externes (incidents) en fonction des niveaux de référence.

Les niveaux de référence ont été dérivés des restrictions de base, en tenant compte des conditions qui ont donné l'exposition maximale (exposition du corps entier à un champ uniforme). Une telle évaluation se révèle prudente dans toutes les conditions d'exposition non uniformes et locales, ce qui est le cas dans la plupart des situations d'exposition professionnelle. Par conséquent, cette méthode est simple, mais elle surestime la plupart du temps l'exposition au matériel de soudage.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

Le niveau d'exposition est déterminé par comparaison du champ magnétique et des limites d'exposition applicables aux parties du corps concernées.

5.2.2 Évaluation fondée sur le champ magnétique mesuré

5.2.2.1 Généralités

L'évaluation fondée sur le champ magnétique mesuré est une méthode pratique lorsque l'utilisation du matériel est connue. En général, l'évaluation est effectuée sur une ou deux positions du soudeur.

L'exposition doit être réalisée sur le tronc, près de la tête, sur les deux mains et sur les cuisses lorsqu'il s'agit de la partie la plus proche du circuit électrique de soudage. Cela conduit à quatre voire cinq points de mesure pour chaque position du soudeur, décrits du 5.2.2.2 au 5.2.2.4. Les points de mesure correspondent aux endroits où le niveau mesuré est maximal (point le plus défavorable) pour les différentes parties du corps. En général, il s'agit des parties les plus proches du circuit de soudage. Un balayage à la surface de chaque partie du corps peut aider à déterminer ces positions.

Il convient d'enregistrer les valeurs lues en ces points ainsi que les positions correspondantes dans le rapport d'essai de conformité afin de pouvoir reproduire les mesurages.

Dans la pratique, un mesureur de champ permet de mesurer soit le champ magnétique (en tesla) soit l'indice d'exposition directement en fonction de la limite d'exposition pertinente. Le plus souvent, le mesureur de champ intègre la méthode de crête pondérée dans le domaine temporel (les méthodes avec détecteur de valeurs efficaces ne doivent pas être utilisées dans la plage des basses fréquences). Cette méthode est pertinente pour tout type de forme d'onde de champ magnétique (sinusoïdale, en salves, à impulsion ou carrée). En particulier, elle prend en compte les transitoires lorsque le courant commence et s'arrête de circuler. Le mesureur de champ applique directement la formule suivante:

$$EI_{RL} = \max |W_{RL}(t) * B(t)| \quad (2)$$

où

* représente le produit de convolution, c'est-à-dire le filtrage de $B(t)$ par $W_{RL}(t)$;

$W_{RL}(t)$ est la réponse temporelle d'une fonction de pondération de fréquence $W_{RL}(f)$ pertinente pour le niveau de référence;

EI est un nombre sans dimension. La conformité est assurée lorsque la valeur est inférieure ou égale à 1 ou 100 % si elle est exprimée en pourcentage;

$W_{RL}(f)$ est la valeur de crête inverse de la limite d'exposition (B_{RL} en valeur efficace) à la fréquence f , c'est-à-dire.

$$W_{RL}(f) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot B_{RL}(f)}$$

La sonde est positionnée sur la région du corps ou en des positions définies sur des parties données du matériel, comme les poignées de pistolet. Elle peut également être positionnée au moyen d'une fermeture autoagrippante sur le casque, les gants ou le tablier. Un câble approprié peut être utilisé pour relier la sonde au détecteur, par exemple dans un espace de travail exigü ou pour empêcher l'inconfort des soudeurs.

Les résultats permettent de conclure à la conformité en fonction des niveaux de référence dans la situation actuelle.

5.2.2.2 Exposition de la tête

Il convient de rechercher le niveau d'exposition maximal autour de la tête et, si cela est souhaitable, de manière plus spécifique autour du système nerveux central (SNC) de la tête. Le point de mesure se situe au contact de la tête, à l'endroit le plus proche du circuit de soudage, comme cela est représenté à la Figure 1. Un balayage de la surface de la tête peut être utile.

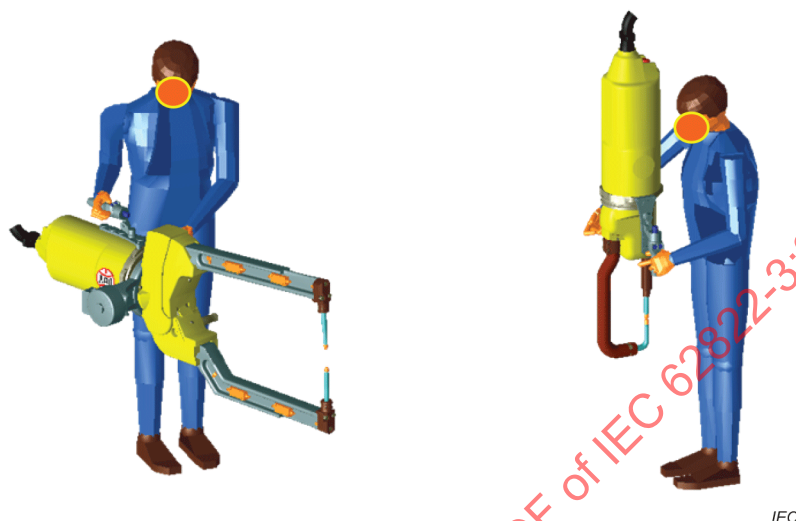


Figure 1 – Mesurage de l'exposition au niveau de la tête

5.2.2.3 Exposition du tronc

Les points de mesure se situent sur le tronc (poitrine, ventre, hanche ou épaule), sur la partie la plus proche du circuit de soudage, comme cela est représenté à la Figure 2. Les points les plus exposés doivent être collectés, ainsi que les valeurs correspondantes.



Figure 2 – Mesurage de l'exposition au niveau du tronc

5.2.2.4 Exposition des membres

Les points de mesure se situent au dos des deux mains (commande/main droite et poignée/main gauche), comme cela est représenté à la Figure 3. La sonde peut être fixée sur les poignées. Un point supplémentaire doit être envisagé si le circuit de soudage est plus proche des cuisses que du tronc, comme cela est représenté à la Figure 3.

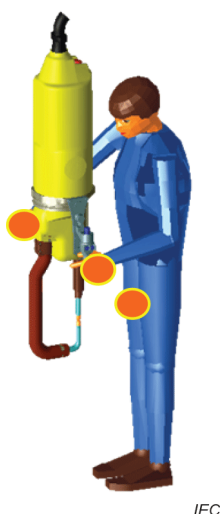


Figure 3 – Mesurage de l'exposition au niveau des membres (mains et cuisse)

5.2.3 Évaluation fondée sur le courant de soudage calculé

L'évaluation fondée sur le champ magnétique calculé est une méthode pratique lorsque l'utilisation du matériel n'est pas connue, par exemple en réparation, pour la réalisation d'assemblages uniques tels que des prototypes, ou lorsque plusieurs personnes assistent le soudeur. Dans ces cas, il n'y a pas de postes de travail prédéfinis. Il convient également que le fabricant privilégie cette méthode pour fournir des informations qui permettent à l'utilisateur d'évaluer le risque d'exposition.

Cette méthode implique de définir les périmètres de conformité autour du matériel. L'utilisateur est en mesure de déterminer en personne la conformité et de mettre en œuvre des mesures préventives (distances minimales, par exemple) le cas échéant.

Cette méthode permet également de déterminer les niveaux d'exposition en fonction des niveaux de référence aux points localisés ainsi qu'aux emplacements décrits en 5.2.2.

La méthode consiste à enregistrer la forme d'onde du courant de soudage au moyen d'un outil approprié conforme au 6.1.4.1 (par exemple, une sonde de courant raccordée à un oscilloscope) et à modéliser le circuit électrique de soudage comme cela est indiqué en 8.2 pour un circuit rectangulaire. Le courant qui produit l'exposition maximale doit être choisi (déterminé par le niveau d'exposition maximal obtenu à une position arbitraire et à un niveau de référence arbitraire, par exemple la valeur d'action basse).

Il convient que le modèle de la source de champ repose sur ses données de conception assistée par ordinateur (CAO) initiales. À défaut, la taille du circuit électrique et sa position (s'il est fixe) sont mesurées. Toutes les dimensions et formes peuvent être arrondies à la hausse (plus le circuit de soudage est grand, plus le niveau d'exposition est élevé).

De cette façon, le champ magnétique est calculé dans le volume autour du matériel en fonction de la formule à chaque point:

$$B(t) = CC_{BI} \cdot I(t) \quad (3)$$

où

$I(t)$ indique le courant de soudage dans le temps, en ampères;

CC_{BI} est le coefficient de couplage (exprimé en tesla/ampère, $\frac{T}{A}$) entre le courant de soudage et le champ magnétique. Il ne dépend que de la géométrie du circuit (voir Article 8) et de la position spatiale. Il peut être calculé à un endroit particulier, le long d'un axe ou dans l'ensemble du volume autour du matériel de soudage. Un exemple est donné à l'Article A.3 de l'Annexe A.

$B(t)$ permet de calculer l'indice d'exposition en fonction de la limite d'exposition pertinente. La Formule (2) et la Formule (3) peuvent être combinées comme suit:

$$EI_{RL} = CC_{BI} \cdot \max |W_{RL}(t) * I(t)| \quad (4)$$

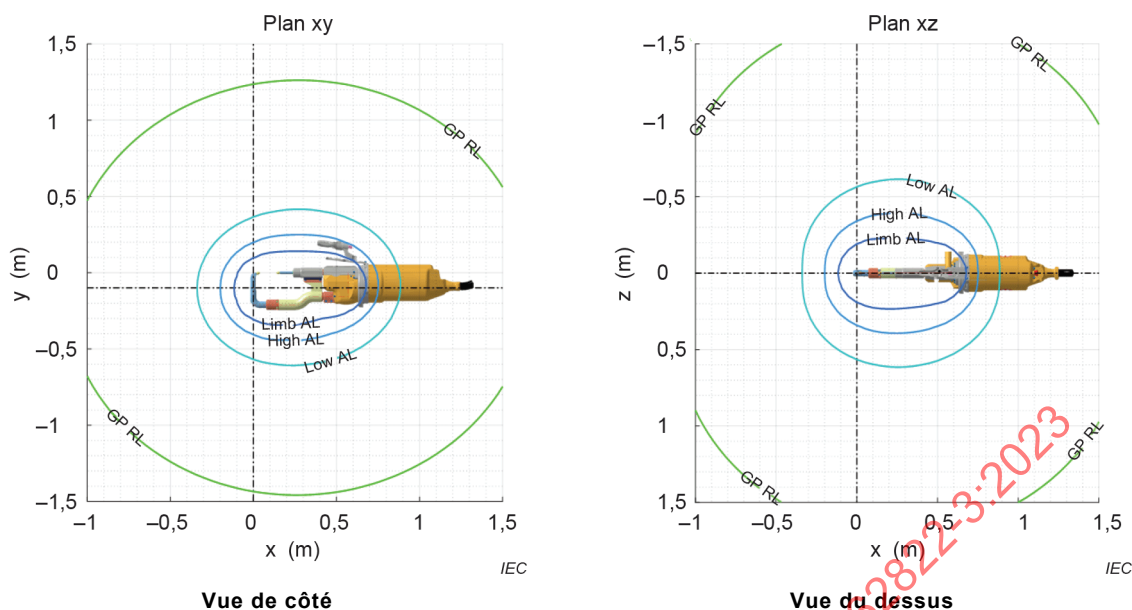
avec les notations précédentes.

$\max |W_{RL}(t) * I(t)|$ représente l'indice d'exposition courant (CEI_{RL}) en fonction du niveau de référence exprimé en $\frac{T}{A}$. Il s'agit d'une valeur constante autour du matériel qui dépend uniquement du courant. Cette valeur peut être fournie par le fabricant du générateur de courant.

Les transcriptions des formules dans le domaine fréquentiel sont données à l'Annexe H.

Cette méthode permet de tracer des figures (voir Figure 4) qui représentent les périmètres de conformité, par exemple pour quatre niveaux de référence [9] où les indices d'exposition sont égaux à 1 (100 %):

- LAL: valeur d'action basse (*Low Action Level*). Il s'agit de la limite de conformité de la tête pour prévenir les effets sensoriels;
- HAL: valeur d'action haute (*High Action Level*). Il s'agit de la limite de conformité de la tête et du tronc pour prévenir les effets sur la santé;
- Limb AL: valeur d'action sur les membres telle qu'elle est définie par le règlement européen [9]. Il s'agit de la limite de conformité des mains, des bras et des cuisses pour prévenir les effets sur la santé;
- GPRL: niveau de référence défini pour le grand public applicable en Europe [1]. Cette limite s'applique également aux travailleurs à risques particuliers, tels que les porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs [1], ainsi qu'aux femmes enceintes, une législation nationale pouvant s'appliquer. Cette limite permet d'ignorer les effets contributifs de tout matériel voisin dans le cadre de l'évaluation.



- Low AL: valeur d'action basse pour prévenir les effets sensoriels;
- High AL: valeur d'action haute pour prévenir les effets sur la santé au niveau du tronc et de la tête;
- Limb AL: valeur d'action membres pour prévenir les effets sur la santé au niveau des membres;
- GPRL: niveau de référence pour le grand public (*General Public Reference Level*), incluant la protection des travailleurs à risques particuliers [29].

Figure 4 – Périmètres de conformité en fonction des niveaux de référence (valeurs d'action)

Il est possible de tracer des courbes de champ magnétique isométriques.

Cette méthode présente notamment l'avantage de définir les périmètres de conformité au stade de la conception, avant de disposer de l'équipement pour préparer son intégration.

5.3 Méthodes fondées sur l'évaluation des grandeurs corporelles (restrictions de base)

5.3.1 Généralités

Les niveaux de référence des champs électromagnétiques sont dérivés des restrictions de base, en tenant compte des conditions de couplage maximal entre les champs et le corps humain, c'est-à-dire des grandeurs maximales induites dans le corps humain exposé aux champs électromagnétiques uniformes. Dans de nombreuses situations d'exposition réelles, par exemple à proximité du matériel de soudage où le champ diminue rapidement en fonction de la distance, les évaluations sont trop prudentes lorsque la valeur maximale du champ magnétique est comparée aux niveaux de référence. La prise en compte des restrictions de base conduit à des résultats plus réalistes. Le champ électrique interne ou la densité de courant dans la plage des basses fréquences (< 10 MHz) induite par le champ magnétique incident sont définis comme des grandeurs corporelles. Il est difficile, voire impossible, de les mesurer directement. Leur évaluation est souvent effectuée à l'aide d'approches dosimétriques par calcul ou par simulation. Dans certains cas, il est possible d'inclure dans cette approche le mesurage des champs magnétiques autour de la source rayonnante.

Ces méthodes proposées sont possibles du fait que les conditions d'approximation quasi statique sont remplies (voir 7.2). En outre, dans la plage de fréquences étudiée, la dépendance à la fréquence est linéaire.

Les approches dosimétriques proposées permettent d'estimer au mieux l'exposition d'une manière relativement simple à assez sophistiquée.

5.3.2 Méthode fondée sur les coefficients de couplage

La méthode fondée sur les coefficients de couplage est une adaptation de l'IEC 62226-2-1. L'approche repose sur le fait que le champ électrique maximal induit peut être estimé par des moyens analytiques sur un disque (modèle 2D) dans le domaine temporel à l'aide d'une formule simple lorsque le champ magnétique est uniforme:

$$E_i(t) = \frac{R}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (5)$$

où

R représente le rayon d'un disque, en mètres, avec une conductivité donnée, qui dépend de la région du corps nécessitant une évaluation de l'exposition (voir Tableau C.1 à l'Annexe C);

dB/dt est la dérivée temporelle de B (induction magnétique, uniforme normale au plan du disque), en tesla (T);

E_i est le champ électrique induit, en $V \cdot m^{-1}$.

NOTE La Formule (1) permet de calculer la densité de courant J à partir du champ électrique induit E_i .

Lorsque le champ magnétique n'est pas uniforme, le champ magnétique maximal sur le disque doit être multiplié par un facteur de compensation K obtenu par simulation.

Au lieu d'estimer ce facteur par l'hétérogénéité du champ magnétique sur un disque, il peut être dérivé numériquement par le champ magnétique incident, le champ électrique induit de la Formule (5) et par comparaison avec le champ électrique induit dans un modèle humain. Des précisions sont données à l'Annexe C. La Formule (5) devient:

$$E_i(t) = K \cdot \frac{R}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt} = CC_{EB/2D} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (6)$$

où $CC_{EB/2D}$ est le coefficient de couplage entre la dérivée du champ magnétique et le champ électrique induit (exprimé en $\frac{V \cdot m^{-1}}{T \cdot Hz}$). Il dépend de la distribution spatiale du champ magnétique et tient également compte de la dimension de la région du corps exposée. Ce coefficient est indépendant du temps.

L'Annexe C décrit une estimation du facteur de compensation K et des coefficients de couplage

$CC_{EB/2D} = K \cdot \frac{R}{2}$ pour différentes valeurs de R .

À des fins de prudence et de simplification du traitement, le module de champ magnétique $|B|$ est pris en compte à la place de la composante perpendiculaire (l'orientation relative en fonction de la direction de l'induction magnétique peut être ignorée, car cette condition prend en compte le cas le plus défavorable qui donne le résultat maximal).

En combinant la Formule (6) avec la valeur de $B(t)$ obtenue par le modèle de circuit de soudage de la Formule (3), le champ électrique induit devient:

$$E_i(t) = CC_{EB/2D} \cdot CC_{BI} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \quad (7)$$

En ce qui concerne le niveau de référence de la Formule (4), l'indice d'exposition selon les restrictions de base est

$$EI_{BR} = CC_{EB/2D} \cdot CC_{BI} \cdot \max \left| W_{BR}(t) * \frac{dI(t)}{dt} \right| \quad (8)$$

où

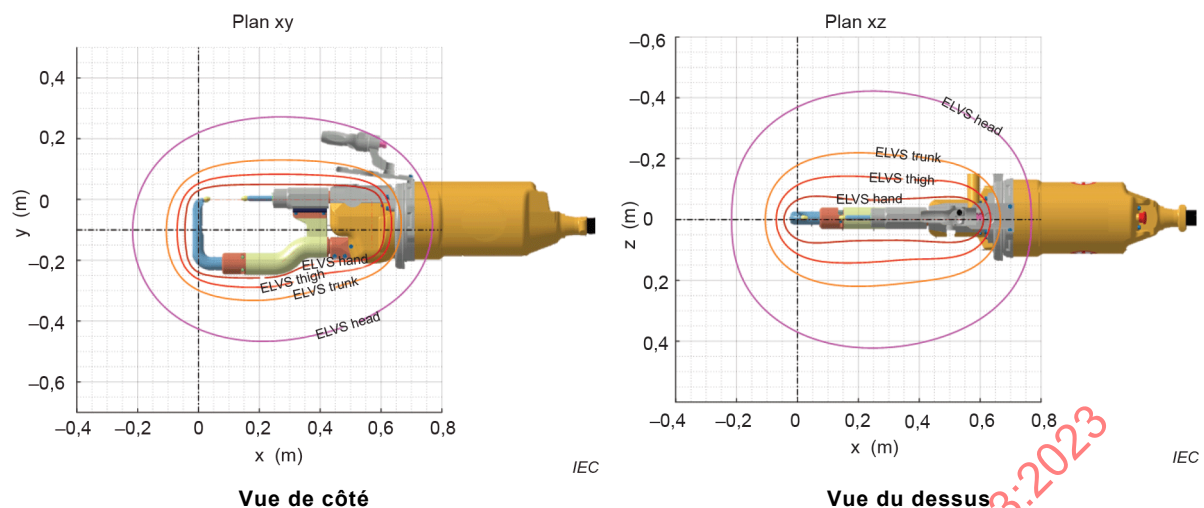
Les notations précédentes sont respectées et $W_{BR}(t)$ représente la réponse temporelle d'une fonction de pondération de fréquence $W_{BR}(t)$ pertinente pour les restrictions de base à évaluer.

$W_{BR}(f)$ est la valeur de crête inverse de la limite d'exposition ($E_{BR}(f)$ en valeur efficace) à la fréquence f , c'est-à-dire.

$$W_{BR}(f) = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot E_{BR}(f)}$$

$\max |W_{BR}(t) * I(t)|$ représente l'indice d'exposition courant (CEI_{BR}) en fonction des restrictions de base d'intérêt, exprimé en $\frac{A \cdot Hz}{V/m}$. Il s'agit d'une valeur constante autour du matériel. Cette valeur peut être fournie par le fabricant du générateur de courant.

Par conséquent, la valeur EI_{BR} peut être calculée soit à partir de l'enregistrement de $B(t)$ avec la Formule (6) soit à partir de l'enregistrement de $I(t)$ avec la Formule (8). Dans le premier cas, il s'agit d'une combinaison de mesurage et de calcul du champ magnétique. Cette valeur peut être appliquée sur différents points d'exposition (voir Article A.1). Dans le deuxième cas, la valeur CC_{BI} est calculée en modélisant le circuit de soudage. Cela permet de tracer des périmètres de conformité tels que ceux représentés à la Figure 5.



- ELVS head: VLE applicable à la tête – effets sensoriels;
- ELVH trunc: VLE appliquée au tronc – effets sur la santé;
- ELVH hand: VLE appliquée aux mains – effets sur la santé;
- ELVH thigh: VLE appliquée aux cuisses – effets sur la santé.

Figure 5 – Périmètres de conformité selon les restrictions de base (valeurs limites d'exposition)

5.3.3 Méthode fondée sur le facteur de correction

La méthode fondée sur le facteur de correction est fondamentalement similaire à la méthode décrite en 5.3.2. Elle diffère par l'utilisation d'un indice d'exposition relatif au niveau de référence EI_{RL} comme alternative à l'enregistrement du champ magnétique ou du courant. Elle a été introduite à l'origine pour les évaluations de l'exposition aux basses fréquences dans l'IEC 62226-2-1 et l'IEC 62311, puis modifiée dans l'IEC 62233 [28]. Le concept proposé de conformité appliqué aux densités de courant peut être extensible au champ électrique induit [11], [12].

Premièrement, un facteur de correction k_E est prédéfini par la Formule (9):

$$k_E = \frac{EI_{BR}}{EI_{RL}} \quad (9)$$

où

EI_{BR} est l'indice d'exposition selon la restriction de base (par exemple VLE ou DRL);

EI_{RL} est l'indice d'exposition selon le niveau de référence (par exemple VA ou ERL);

k_E est sans dimension.

EI_{RL} est déterminé comme cela est décrit précédemment, par mesurage direct ou par calcul à partir du champ magnétique ou du courant, en tenant également compte des scénarios les plus défavorables. L'indice d'exposition doit être obtenu par mesurage direct à l'aide d'une sonde de surface inférieure ou égale à 3 cm².

EI_{BR} est déterminé par simulation à l'aide du modèle humain en tenant compte des distributions de champ et des distances par rapport au corps humain rencontrées autour du matériel de soudage. À partir de nombreuses évaluations, des valeurs prudentes du facteur de correction k_E ont été estimées (voir Annexe D).

Ainsi, k_E n'est prédéfini que pour les matériels de soudage par résistance et tient compte des effets de la non-uniformité du champ. Ce facteur est indépendant de la forme d'onde, tout comme la fréquence du courant ou du champ magnétique. Cela conduit à un résultat prudent.

L'évaluation de la conformité peut être effectuée en comparant le produit de l'indice d'exposition mesuré en fonction du niveau de référence du champ magnétique et du facteur prédéfini, comme suit:

$$EI_{BR} = k_E \cdot EI_{RL} \quad (10)$$

où

EI_{RL} est le niveau d'exposition mesuré ou calculé en fonction du niveau de référence;

EI_{BR} est le niveau d'exposition estimé en fonction de la restriction de base.

La forme d'onde du champ magnétique ou du courant de soudage est prise en compte dans EI_{RL} lorsque la méthode de crête pondérée est appliquée.

5.3.4 Méthode fondée sur la simulation sur modèle humain

Dans cette méthode, un modèle humain réaliste est utilisé pour calculer les grandeurs induites dans les conditions réelles les plus représentatives.

Plusieurs modèles humains réalistes sont disponibles pour calculer les grandeurs induites. Le modèle homme adulte d'une résolution spatiale inférieure à 2 mm doit comprendre au moins 50 tissus différents, dont au moins la peau, la matière blanche du cerveau et la matière grise du cerveau. Chaque tissu a une valeur de conductivité électrique particulière.

Différentes méthodes de calcul peuvent être utilisées pour déterminer les grandeurs induites dans le corps humain par un champ magnétique incident émis par le matériel de soudage. La méthode des impédances (IM, *Impedance Method*) et la méthode de différences finies en potentiel scalaire (SPFD, *Scalar Potential Finite Difference*) en sont des exemples. L'Annexe F donne une vue d'ensemble des différentes méthodes de calcul. Étant donné que les informations fournies ne sont pas suffisantes pour l'application, il convient d'examiner leurs sources.

Les données de champ magnétique mesurées peuvent être directement appliquées comme source dans la méthode IM. La méthode SPFD utilise les potentiels vecteurs comme source pour calculer le champ électrique interne. Les potentiels vecteurs sont obtenus de préférence par calcul à partir du modèle de source ou par défaut, également en mesurant le champ magnétique (H) ou l'induction magnétique (B) dans le volume occupé par le corps exposé. Dans ce cas, les coordonnées spatiales des mesures collectées sont nécessaires.

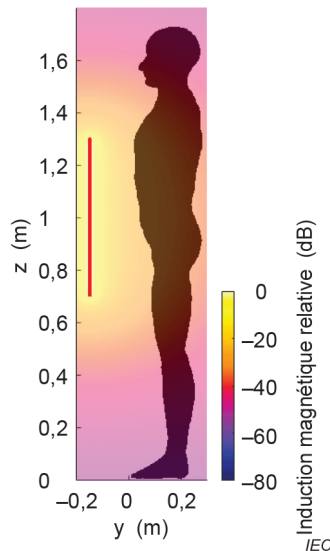


Figure 6 – Champ magnétique autour du corps humain obtenu par modélisation de la source

L'approche générale pour évaluer les grandeurs induites consiste à:

- a) modéliser le champ magnétique sur le volume occupé par le modèle (soudeur) avec la résolution du maillage en:
 - enregistrant le courant de soudage et en modélisant le circuit électrique de soudage à partir des données CAO ou des dimensions, de la forme et de la hauteur par rapport au sol; et
 - calculant ensuite le vecteur de champ magnétique (Figure 6);
 ou
 - enregistrant le vecteur de champ magnétique en plusieurs emplacements sur le volume occupé par le modèle humain; et
 - interpolant le champ magnétique enregistré sur l'ensemble du volume occupé par la résolution du maillage;
- b) si nécessaire, comme dans le cas de la méthode SPFD, calculer le potentiel vecteur du champ magnétique;
- c) choisir le modèle humain avec ses propriétés physiques et électriques. La conductivité à la fréquence du générateur de courant doit être appliquée (par exemple 50 Hz pour un générateur basse fréquence ou 1 kHz pour un onduleur moyenne fréquence);
- d) exécuter la méthode de calcul du champ électrique avec le modèle baignant dans le champ magnétique (voir Figure 7). À cette étape, tous les tissus doivent être pris en compte;
- e) choisir des tissus compte tenu des restrictions de base, en revenant à la documentation scientifique (c'est-à-dire les effets sur la santé et les effets sensoriels à éviter, comme cela est expliqué dans les lignes directrices de l'ICNIRP [2], [3], [4]);
- f) calculer la valeur maximale de la moyenne des grandeurs internes $E_{i,avg}$ dans les tissus choisis pour un courant unitaire à l'aide de l'algorithme proposé à l'Annexe G. Calculer ensuite $CC_{EI/HM}$:

$$CC_{EI/HM} = \frac{\max E_{i, avg}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I} \quad \text{en} \quad \frac{\text{V} \cdot \text{m}^{-1}}{\text{A} \cdot \text{Hz}} \quad (11)$$

- g) calculer l'indice d'exposition courant en fonction des restrictions de base pertinentes de la Formule (8);

$$CEI_{BR} = \max |W_{BR}(t) * I(t)| \text{ en } \frac{A \cdot Hz}{mV/m} \quad (12)$$

- h) calculer les indices d'exposition avec la formule suivante:

$$EI_{BR} = CC_{EI/HM} \cdot CEI_{BR} \quad (13)$$

La Figure 7 montre la répartition du champ électrique induit sur le corps exposé au champ magnétique. Le jaune indique les champs électriques les plus élevés. Le rouge représente les champs moyens et le bleu foncé les champs les plus faibles.

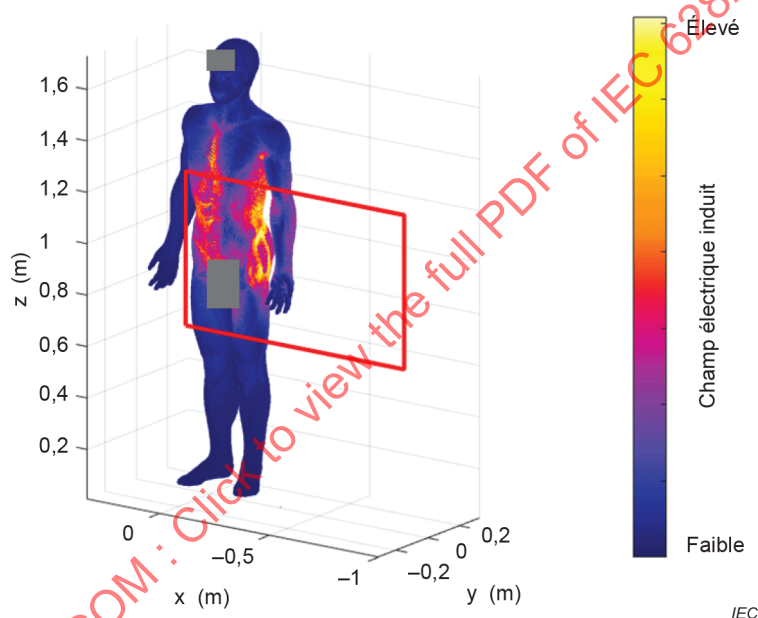


Figure 7 – Exemple de champ électrique induit dans un corps humain exposé à un pistolet de soudage ($I = 1\text{kA}$ à 50 Hz)

5.3.5 Comparaison des résultats

Une comparaison des méthodes appliquées sur un pistolet de soudage est donnée à l'Annexe E.

6 Considérations relatives aux mesurages

6.1 Instruments de mesure des champs magnétiques ou des niveaux d'exposition

6.1.1 Généralités

Les instruments de mesure des champs magnétiques ou des niveaux d'exposition sont soit un mesureur de champ portatif soit un système de mesure qui comporte des éléments distincts. Les deux sont en mesure de fournir des intensités de champ ou des indices d'exposition.

Les mesurages des niveaux de fond sont recommandés afin d'établir la présence de champs extérieurs. Les influences des sources de champs qui ne font pas l'objet d'une évaluation doivent être éliminées ou, au moins, réduites le plus possible. En règle générale, l'augmentation de la distance par rapport aux sources extérieures de champs magnétiques diminue de manière importante l'intensité de champ de fond.

6.1.2 Sonde(s)

Des sondes qui comportent trois capteurs perpendiculaires les uns aux autres et concentriques sont exigées et doivent être conformes à l'IEC 61786-1 et à l'IEC 61786-2. De telles sondes ont l'avantage d'effectuer des mesurages quelle que soit leur orientation. Certains systèmes de mesure peuvent inclure quatre sondes ou plus.

La ou les sondes doivent avoir une surface inférieure ou égale à $3 \text{ cm}^2 \pm 0,6 \text{ cm}^2$ lorsque l'indice d'exposition mesuré est supérieur à deux fois la sensibilité du dispositif de mesure. Lorsque l'indice d'exposition du mesurage est inférieur à cette valeur ou est à une distance supérieure à 1 m du circuit de soudage, la ou les sondes de mesure doivent avoir une surface de $100 \text{ cm}^2 \pm 0,6 \text{ cm}^2$. L'intensité du champ est donnée par le module des inductions magnétiques en valeur efficace des trois axes orthogonaux. L'indice d'exposition doit être utilisé avec la fonction de pondération (filtrage dans le domaine temporel) appliquée sur chaque axe avant de calculer le module puis de retenir la valeur maximale.

6.1.3 Mesureur de champ portatif

Le mesureur de champ portatif doit avoir une largeur de bande comprise entre 10 Hz et 400 kHz ou plus.

Un instrument avec une fonction de maintien de la valeur de crête doit être utilisé. La sélection automatique du calibre doit être désactivée, le cas échéant.

6.1.4 Système de mesure avec éléments distincts

6.1.4.1 Plage de fréquences et fréquence d'échantillonnage

Les évaluations, en fonction du type de forme d'onde du courant de soudage, doivent être effectuées dans une plage de fréquences et à une fréquence d'échantillonnage pertinentes.

Le signal est échantillonné (dans le domaine temporel), car il est traité numériquement quelle que soit la méthode. La fréquence d'échantillonnage doit correspondre au moins au double de la fréquence supérieure du signal (théorème de Nyquist-Shannon). La fréquence supérieure maximale spécifiée dans le domaine d'application du présent document est de 10 MHz.

Dans le cas d'une exposition à basse fréquence, le signal doit être traité dans le domaine temporel (sauf si le domaine fréquentiel est admis par certaines réglementations nationales). Dans le domaine temporel, il est plus simple de prendre en compte le temps de montée/descente minimal plutôt que d'estimer la plus haute fréquence, avant de choisir la fréquence d'échantillonnage exprimée en nombre d'échantillons par seconde (sps, *samples per second*).

La fréquence d'échantillonnage doit être:

- supérieure ou égale à 100 ksps pour;
 - (temps de montée/descente) minimal $\geq 1 \text{ ms}$ ou;
 - $dI/dt < 1\,000 \text{ A/ms}$;
- supérieure ou égale à 1 Msps pour;
 - $1 \text{ ms} > (\text{temps de montée/descente}) \text{ minimal} \geq 0,01 \text{ ms}$ ou;
 - $1 \text{ kA/ms} > dI/dt \geq 100 \text{ kA/ms}$;

- supérieure ou égale à 10 Msps pour;
 - (temps de montée/descente) minimal $< 0,01$ ms ou;
 - $dI/dt > 100$ kA/ms.

Les valeurs de (temps de montée/descente) minimal ou dI/dt sont définies soit par le fabricant d'après sa connaissance des techniques spéciales utilisées dans son appareil, soit par les valeurs de (temps de montée/descente) minimal ou dI/dt observées sur la forme d'onde du courant de soudage.

En général, une valeur de 100 ksps convient à tous les systèmes de soudage LF-AC et MF-DC qui utilisent des thyristors, des transistors bipolaires à porte isolée ou des onduleurs avec une fréquence de commutation inférieure à 10 kHz. Le nombre de 1 Msps est pertinent pour les systèmes de soudage à décharge de condensateur.

NOTE Ces fréquences d'échantillonnage ont été déterminées à partir de mesurages préalables effectués sur du matériel de soudage par résistance.

La fréquence d'échantillonnage définie s'applique à l'enregistrement du courant de soudage ainsi que du champ magnétique.

6.1.4.2 Durée

Pour chaque évaluation qui exige un post-traitement, il n'est pas nécessaire d'enregistrer le signal sur une période prolongée.

Pour les technologies LF-DC et MF-DC, les niveaux d'exposition sont établis en premier lieu lorsque le courant commence ou s'arrête de circuler, et en second lieu par l'ondulation du courant générée par l'onduleur. Pour la technologie LF-AC, ces niveaux peuvent être atteints avec seulement une salve unique généralement composée de quelques périodes de 50 Hz.

En général, un enregistrement de quelques centaines de millisecondes suffit dans ces deux cas pour chaque point de mesure.

La technologie de décharges de condensateur nécessite moins de 10 ms.

La résolution, la durée et la fréquence d'échantillonnage du mesurage déterminent les exigences de la mémoire de données.

6.2 Instruments d'enregistrement

6.2.1 Enregistrement du courant de soudage

Les instruments (transducteur de courant et oscilloscope) utilisés pour enregistrer le courant de soudage doivent présenter les capacités de la fréquence d'échantillonnage prédéfinie (6.1.4.1) en ce qui concerne la plage de fréquences, la résolution et le courant de crête.

Il n'est pas recommandé de mesurer le courant de soudage à partir de la tension aux bornes d'une résistance en série pour éviter les modifications d'amplitude et de forme d'onde du courant.

Les données enregistrées doivent être validées afin d'exclure celles qui présentent un niveau de bruit excessif ou qui contiennent des artefacts susceptibles d'altérer les résultats d'exposition. Une méthode de validation possible consiste à analyser la dérivée de ces données (dI/dt dans le cas présent) immédiatement après leur enregistrement, avant de quitter le poste de travail.

6.2.2 Enregistrement du champ magnétique

Les instruments (sonde(s) définie(s) en 6.1.2 et oscilloscope) utilisés pour enregistrer le champ magnétique autour du matériel doivent présenter les capacités de la fréquence d'échantillonnage prédéfinie en ce qui concerne la plage de fréquences, la résolution et la valeur de crête.

Les données enregistrées doivent être validées afin d'exclure le bruit ou les artefacts dans les résultats d'exposition. Une méthode de validation possible consiste à calculer la dérivée dB/dt maximale réaliste du champ magnétique avant de traiter les données.

6.3 Traitement des signaux (applicable à toute forme d'onde de courant de soudage)

6.3.1 Généralités

Plusieurs méthodes d'évaluation des champs pulsés et non sinusoïdaux sont disponibles (IEC 62311 et IEC 61786-2, par exemple). Pour les besoins du présent document, seule la méthode de crête pondérée donnée en 6.3.2 s'applique. Le résultat de cette méthode de calcul est l'indice d'exposition (EI).

NOTE D'un point de vue mathématique, les applications de la méthode de crête pondérée dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel sont équivalentes et donnent les mêmes résultats, si elles utilisent les mêmes hypothèses et si elles sont appliquées correctement.

L'indice d'exposition EI maximal obtenu dans le temps doit être utilisé pour l'évaluation.

La méthode de crête pondérée est utilisée pour des évaluations qui reposent sur des champs extérieurs ainsi que pour des évaluations qui reposent sur des grandeurs internes.

Des filtres électroniques ou numériques peuvent être utilisés pour assurer les fonctions de pondération qui représentent les limites applicables.

La fonction de pondération dans le domaine temporel est obtenue en utilisant la transformée de Laplace ou des transformées en Z.

La fonction de pondération doit avoir une réponse en fréquence appropriée, de sorte que la pondération des composantes spectrales se produise dans le domaine temporel. Des réglementations nationales ou internationales peuvent s'appliquer.

6.3.2 Application de la méthode de crête pondérée dans le domaine temporel

La méthode de crête pondérée dans le domaine temporel exécute un filtrage (fonctions de pondération) des trois composantes de champ dans le domaine temporel séparément, une somme et une détection de la valeur de crête pendant la période d'observation. La fréquence d'échantillonnage doit être choisie conformément au 6.1.4.1.

L'indice d'exposition ne doit dépasser 1,0 à aucun moment dans l'intervalle d'évaluation pour déterminer la conformité.

NOTE Des informations supplémentaires relatives à cette méthode sont données dans [10].

6.3.3 Moyennage spatial

Pour les valeurs de champ mesurées, un moyennage spatial peut être effectué sur les régions exposées du corps, l'important étant de ne pas dépasser les restrictions de base applicables aux champs électriques internes. Dans le cas contraire, le niveau le plus élevé doit être pris, c'est-à-dire le plus proche du circuit électrique de soudage sur la région exposée.

6.3.4 Moyennage temporel

Le moyennage temporel d'exposition n'est pas admis pour les effets non thermiques. Des réglementations nationales ou internationales peuvent s'appliquer pour les procédures de moyennage temporel.

6.4 Incertitude d'évaluation

L'incertitude élargie de l'évaluation doit être calculée comme cela est indiqué dans l'IEC 61786-2:2014, Article 6.

Si l'incertitude élargie est supérieure à la valeur spécifiée dans l'IEC 62822-1:2016, 5.5, et si l'évaluation n'est pas réputée donner des résultats prudents, la méthode de calcul des pénalités donnée dans l'IEC 62822-1 ou une simulation avec un modèle humain doit être appliquée.

7 Méthodes d'évaluation par calcul

7.1 Généralités

À des fins de comparaison avec les restrictions de base, le champ électrique interne ou la densité de courant doit être calculé(e) par simulation à l'aide d'un ensemble représentatif de modèles anatomiques humains. Les calculs peuvent être effectués à l'aide de méthodes quasi statiques en fonction de la dimension électrique relative du problème. Ces méthodes sont pertinentes dans la mesure où le soudage par résistance émet des champs magnétiques de basses fréquences.

Les principales méthodes de calcul pour l'évaluation de l'exposition sur le corps humain fondées sur une approximation quasi statique sont les suivantes:

- QS-FEM (méthode quasi statique – par éléments finis);
- SPFD (différences finies en potentiel scalaire);
- IM (méthode des impédances);
- méthode hybride.

L'Annexe F fournit une brève description des méthodes de calcul.

7.2 Approximation quasi statique

Les dimensions de la région du corps ou de la personne exposée, la taille de la source de champ et la distance entre ces éléments sont faibles par rapport à la plus petite longueur d'onde de la fréquence la plus haute du champ ($\sim 1/f$). Les dimensions et les distances n'excèdent pas quelques mètres, tandis que les longueurs d'onde sont d'au moins quelques kilomètres.

Cela permet d'appliquer des méthodes de calcul qui reposent sur une approximation quasi statique. Cela implique:

- qu'il n'y a pas de phénomène de propagation;
- que l'effet des champs électriques induits ou des courants induits dans le corps humain sur le champ magnétique incident est réputé négligeable, autrement dit:
 - les champs incidents et les champs induits peuvent être évalués à l'aide de méthodes de calcul distinctes. D'une part, pour le calcul des champs magnétiques incident, des méthodes analytiques ou quasi analytiques peuvent s'appliquer. D'autre part, une simulation est applicable pour calculer les grandeurs induites dans un corps humain, tandis que des méthodes analytiques ou quasi analytiques peuvent s'appliquer aux modèles géométriques;
 - la présence du corps ne modifie pas le champ magnétique incident;
- que les champs induits dans le corps suivent instantanément le champ incident (l'hypothèse retenue est que le courant de déplacement est négligeable par rapport au courant conduit). Les conductivités sont les paramètres pertinents pour les tissus du corps.

7.3 Modèles de corps humain pour la simulation

La densité de courant induit ou l'intensité de champ électrique intracorporel peut être déduite par simulation à l'aide d'un modèle de corps humain en 3D dont les propriétés électriques des différents tissus sont prises en compte. Des exemples de modèles anatomiques sont énumérés dans le Tableau 1 avec leurs principales caractéristiques physiques.

NOTE Les noms des modèles sont expliqués dans [14].

Tableau 1 – Exemples de modèles humains pour déterminer les champs électriques induits dans la plage des basses fréquences

Nom du modèle	Taille (m)	Poids (kg)
Homme adulte ICRP	1,76	73
UVIC	1,77	76
NORMAN	1,76	73
MAXWELL	1,76	73
DUKE	1,74	70
TARO	1,73	62
ALVAR	1,76	72

Le modèle doit représenter la région concernée du corps (par exemple la tête, le tronc ou les membres) ou l'ensemble du corps, selon le cas, notamment en ce qui concerne la diversité des limites d'exposition.

Les principales exigences pour ces modèles sont les suivantes:

- disponibilité pour représenter un soudeur (les corps plus grands ont généralement des champs induits plus élevés pour un couplage avec des champs magnétiques de basses fréquences);
- segmentation individuelle des tissus du système nerveux central (SNC) et de la peau (système nerveux périphérique) pour évaluation avec les restrictions de base correspondantes;
- membres posables ou mobiles pour la modélisation de scénarios d'exposition réalistes (par défaut, une région du corps peut être extraite et exposée avec une orientation et une position représentatives).

7.4 Évaluation par calcul en fonction des restrictions de base

Il existe deux types de restrictions de base: 1) les VLE établies pour prévenir les effets sensoriels dus à la stimulation du SNC de la tête et 2) les VLE établies pour prévenir les effets sur la santé dus à la stimulation du SNC et à la stimulation du système nerveux périphérique (SNP) de l'ensemble du corps.

Dans le cas 1), les organes pertinents sont le cerveau (séparé en matière blanche et grise dans certains modèles corporels), la rétine et le nerf optique. La moelle épinière ne se trouve principalement pas dans la tête, et n'est donc pas prise en compte dans les effets sensoriels des VLE.

Dans le cas 2), il convient que la peau soit prise en compte. L'ICNIRP 2010 [3] spécifie qu'il n'existe actuellement aucun facteur de conversion pour le tissu nerveux périphérique et que, par conséquent, la peau, qui ne contient aucune terminaison nerveuse, est considérée comme un des tissus cibles les plus défavorables. Par conséquent, les organes suivants ont été pris en compte pour les VLE du SNP: le cerveau, la rétine, le nerf optique, la moelle épinière et la peau. Il convient de noter que la prise en compte de tous les organes soulève un problème de cohérence entre les modèles, parce que l'organe le plus critique dépend du modèle ou parce que les résultats ne sont pas disponibles pour tous les organes.

Afin d'éviter des singularités numériques particulièrement visibles parmi les valeurs maximales, la référence [3] recommande d'utiliser le 99^e percentile de la distribution du champ électrique induit dans chaque tissu comme critère pour exprimer la valeur maximale. Cependant, cette valeur sous-estime l'exposition lorsque le champ magnétique est fortement non uniforme. Par conséquent, la moyenne maximale est utilisée comme valeur prudente.

Cette moyenne dépend des lignes directrices de sécurité applicables, principalement des grandeurs des restrictions de base, définies par:

- la densité de courant moyennée sur une surface (Article G.1);
- le champ E moyenné dans un volume cubique (Article G.2);
- le champ E moyenné le long d'une ligne (Article G.3).

Toutefois, des limites différentes peuvent s'appliquer en fonction de la région du corps exposée. Le code de calcul ou les techniques de post-traitement appliquées doivent mettre en œuvre les méthodes de moyennage exigées. Les descriptions des algorithmes de moyennage dans les lignes directrices d'exposition qui les définissent n'étant généralement pas suffisamment détaillées pour réaliser un algorithme de calcul, le présent document fait référence aux Normes internationales de calcul applicables qui les définissent ou spécifient ses propres algorithmes si aucune définition appropriée n'est disponible par ailleurs. Des précisions sont données à l'Annexe G.

La valeur maximale représente le coefficient de couplage entre un courant unitaire ou le champ magnétique et le champ électrique induit ou la densité de courant, nommés respectivement CC_{EI} , CC_{EB} , CC_{JI} et CC_{JB} , comme cela est défini en 3.1.2. Ces valeurs multipliées par le courant ou le champ magnétique dans le temps doivent être comparées aux restrictions de base en appliquant la méthode de crête pondérée décrite à l'Article 5.

NOTE Étant donné que le phénomène de couplage est linéaire dans la plage de fréquences à l'étude, la fréquence et l'amplitude du courant de soudage ou du champ magnétique utilisées pour l'évaluation ne sont pas essentielles et peuvent être modifiées arbitrairement en fonction des besoins.

Des simulations peuvent également être appliquées pour évaluer les champs incidents par rapport aux niveaux de référence.

Il convient de vérifier tous les algorithmes de calcul pour une mise en œuvre correcte sur le plan technique, en comparant les résultats analytiques aux résultats de simulation. Cette comparaison est directe lorsqu'un modèle géométrique (des sphères de conductivités différentes, par exemple) est exposé dans des champs uniformes.

8 Modèle de source

8.1 Généralités

La source de champs électromagnétiques est le courant de soudage qui circule à travers le circuit électrique de soudage, générant un champ magnétique de basse fréquence. Ce champ n'est pas homogène à proximité immédiate du matériel.

Les paramètres du courant de soudage (par exemple, l'amplitude et la forme d'onde) et les caractéristiques du circuit de soudage (par exemple, les dimensions) sont déterminés uniquement par le matériel. Des facteurs externes, par exemple les caractéristiques de la pièce mise en œuvre, peuvent avoir une influence sur le champ magnétique, mais ne sont pas pris en compte par le présent document.

Cet aspect permet l'utilisation de courants filamenteux et l'application de la loi de Biot-Savart.

Le modèle de source permet de calculer le champ magnétique autour du matériel et les coefficients de couplage CC_{BI} .

8.2 Exemple de modèle de source

Le modèle de source le plus simple d'un pistolet de soudage est une boucle rectangulaire (toute forme est possible, y compris en 3D).

Pour les conducteurs qui forment une boucle rectangulaire, un modèle de source tel que celui représenté à la Figure 8 doit être utilisé.

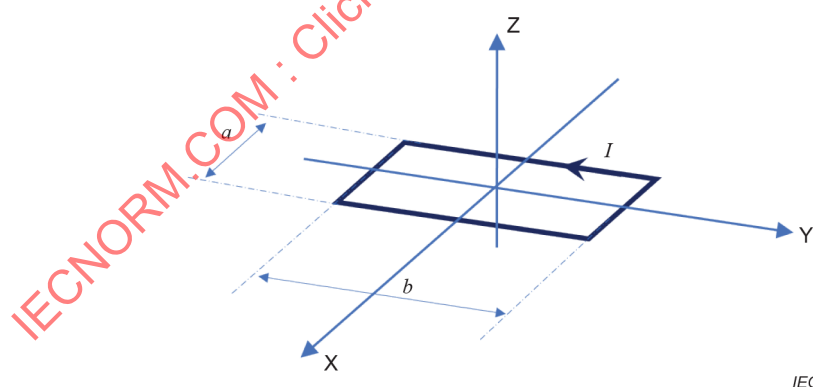


Figure 8 – Courant de soudage qui circule dans une configuration de boucle rectangulaire ($a \times b$)

En raison des propriétés de la distribution du champ, trois distances (x , y , z) par rapport au centre du conducteur doivent être prises en compte le long des axes X, Y et Z.

L'induction magnétique $\mathbf{B}$ en tout point d'observation autour du modèle est calculée en utilisant la loi de Biot-Savart. Le vecteur de champ magnétique $\mathbf{B}$ est calculé comme cela est indiqué dans la Formule (14). L'amplitude de $\mathbf{B}$ est calculée comme cela est indiqué dans la Formule (15), où:

- a est la dimension de la boucle dans la direction X telle que représentée à la Figure 8;
- b est la dimension de la boucle dans la direction Y telle que représentée à la Figure 8;
- x, y, z sont les coordonnées du point d'observation P sur les axes X, Y et Z , respectivement.

$$\begin{aligned}
 x_0 &= \frac{a}{2} - x & D_1 &= \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z^2} & R_1 &= \frac{\frac{x_0}{D_1} + \frac{x_1}{D_2}}{y_0^2 + z^2} \\
 x_1 &= \frac{a}{2} + x & D_2 &= \sqrt{x_1^2 + y_0^2 + z^2} & R_2 &= \frac{\frac{y_0}{D_2} + \frac{y_1}{D_3}}{x_1^2 + z^2} \\
 y_0 &= \frac{b}{2} - y & D_3 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z^2} & R_3 &= \frac{\frac{x_1}{D_3} + \frac{x_0}{D_4}}{y_1^2 + z^2} \\
 y_1 &= \frac{b}{2} + y & D_4 &= \sqrt{x_0^2 + y_1^2 + z^2} & R_4 &= \frac{\frac{y_1}{D_4} + \frac{y_0}{D_1}}{x_0^2 + z^2}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Le vecteur de champ magnétique $\mathbf{B}$ est le suivant:

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \begin{bmatrix} B_X(x, y, z) \\ B_Y(x, y, z) \\ B_Z(x, y, z) \end{bmatrix} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \begin{bmatrix} z \cdot (R_4 - R_2) \\ z \cdot (R_1 - R_3) \\ R_1 \cdot y_0 + R_2 \cdot x_1 + R_3 \cdot y_1 + R_4 \cdot x_0 \end{bmatrix} \tag{15}$$

L'amplitude de $\mathbf{B}$ est:

$$|\mathbf{B}(x, y, z)| = \sqrt{B_X(x, y, z)^2 + B_Y(x, y, z)^2 + B_Z(x, y, z)^2} \tag{16}$$

Si I est un courant unitaire (1 A), $\mathbf{B}(x, y, z)$ représente le coefficient de couplage qui relie I à $\mathbf{B}$ en $\frac{T}{A}$, nommé CC_{BI} à l'Article 5. $\mathbf{B}$ est indépendant de la fréquence.

Le vecteur de champ magnétique $\mathbf{B}$ est utilisé pour la simulation sur un modèle humain, plus particulièrement pour calculer le potentiel vecteur du champ magnétique nécessaire à la méthode SPFD.

Ces valeurs multipliées par le courant de soudage dans le temps donnent le champ magnétique dans le temps à la position étudiée.

Le résultat doit être comparé aux niveaux de référence en appliquant la méthode de crête pondérée décrite à l'Article 5 pour obtenir l'indice d'exposition.

9 Fiche technique champs électromagnétiques et rapport d'évaluation

Le contenu de la fiche technique champs électromagnétiques du système repose sur les critères de conformité obligatoires et sur les données champs électromagnétiques exigées pour l'utilisateur, comme cela est indiqué dans l'IEC 62822-1:2016, 7.1.5 et 7.1.6, ainsi que sur la décision du fabricant de fournir des données supplémentaires, en plus de la quantité d'informations obligatoires. Les informations minimales à rassembler pendant l'évaluation du système figurent dans la liste ci-dessous:

a) pour une utilisation professionnelle:

- si la position et la posture du soudeur qui utilise le matériel sont fixes ou connues:
 - les indices d'exposition pour la tête, le tronc et les membres, ainsi qu'une confirmation de la conformité;
 - si la conformité ne peut pas être démontrée, les distances où la conformité est atteinte;
- si la position et la posture du soudeur et de ses assistants ne sont pas connues:
 - les distances minimales par rapport au circuit de soudage électrique pour atteindre la conformité sur les trois axes où les expositions sont les plus élevées (en général, le long d'un axe perpendiculaire au milieu du circuit). La distance par rapport à la tête, au tronc et aux membres doit être indiquée;
 - les périmètres de conformité;
- pour les matériels évalués conformément aux limites d'exposition professionnelle: la distance à laquelle l'indice d'exposition devient inférieur à 100 %, selon les niveaux de référence pour le grand public;

b) pour une utilisation non professionnelle:

- les utilisateurs non professionnels sont protégés par les limites d'exposition du grand public:
 - les distances auxquelles l'indice d'exposition devient inférieur à 100 %, selon les niveaux de référence;
 - en option, les distances auxquelles l'indice d'exposition devient inférieur à 100 %, selon les restrictions de base.

NOTE Toutes les distances font référence au centre du matériau conducteur (en raison des lois de la physique).

Un exemple d'informations supplémentaires qui peuvent être rassemblées lors de l'évaluation est donné ci-dessous:

- données pour plusieurs modes de fonctionnement.

Les informations rassemblées doivent être présentées dans une fiche technique champs électromagnétiques. Des exemples de telles fiches techniques qui s'appuient sur les scénarios ci-dessus sont inclus à l'Annexe B.

Annexe A (informative)

Exemple d'évaluation fondée sur les composantes individuelles

A.1 Généralités

Le présent document permet une évaluation d'un système de soudage complet (Figure A.1) ou une évaluation qui repose sur les différentes composantes (Figure A.2).

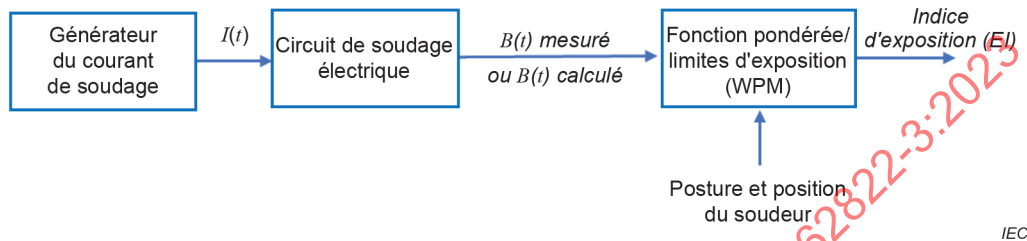


Figure A.1 – Évaluation d'un système de soudage complet

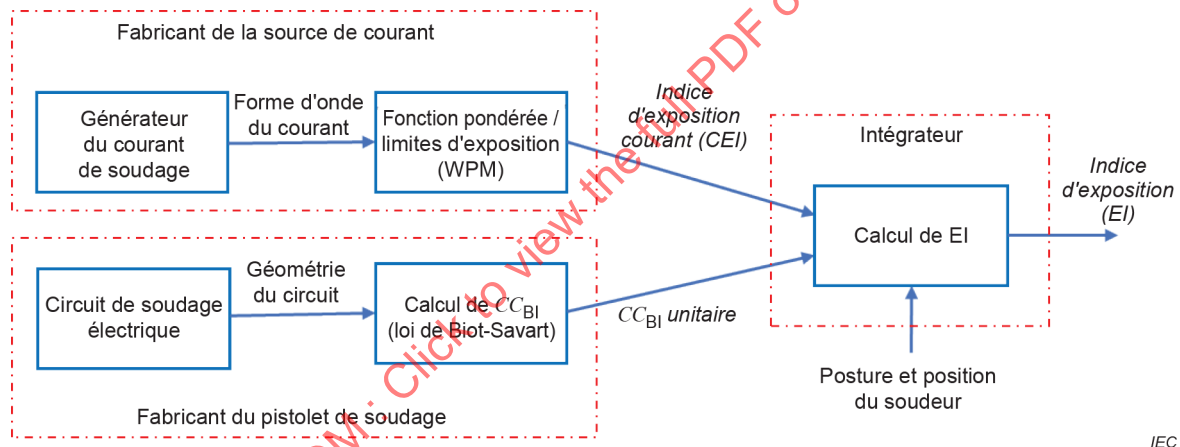


Figure A.2 – Évaluation type fondée sur les composantes

L'Annexe A décrit une évaluation fondée sur les composantes individuelles selon les méthodes données à l'Article 5.

A.2 Générateur de courant de soudage

La première étape consiste à déterminer les indices d'exposition courant (CEI_{RL} et CEI_{BR}) en fonction des restrictions de base (VLE) et des niveaux de référence (VA) en appliquant la méthode de crête pondérée dans le domaine temporel donnée par la Formule (4) et de la Formule (8) à la Formule (12).

Le courant de soudage doit être enregistré comme cela est décrit en 6.2.1. Il convient de prendre en compte une charge d'impédance représentative du circuit électrique. Il peut s'agir d'un circuit en série constitué d'une résistance et d'une inductance. 0,35 mΩ et 0,8 μH sont des exemples de valeurs, respectivement.

La Figure A.3 représente la forme d'onde de courant fournie par deux technologies différentes habituellement utilisées dans un système de soudage par résistance: LF-AC et MF-DC. I_{rms} correspond à $I_{welding}$.

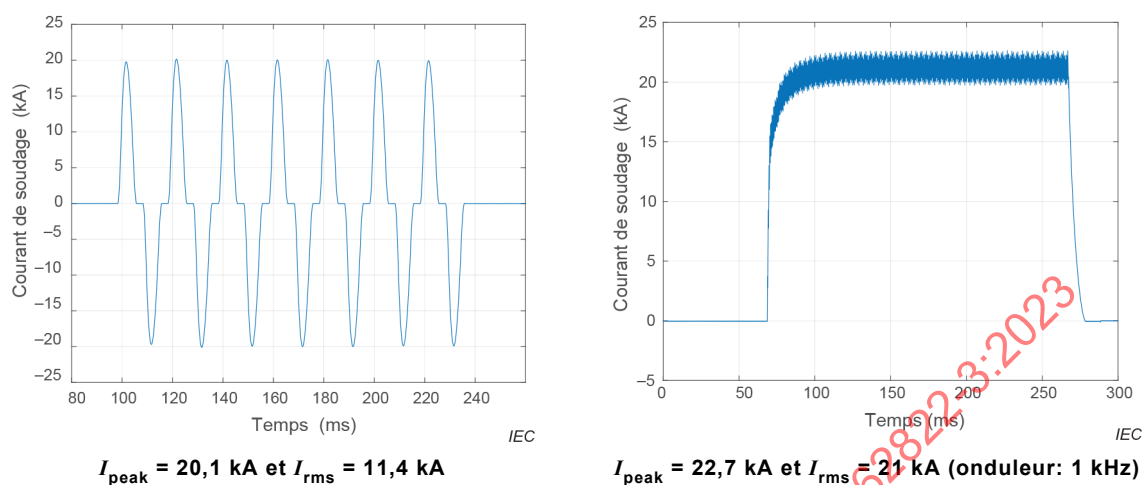


Figure A.3 – Formes d'onde de courant avec les technologies LF-AC (à gauche) et MF-DC (à droite)

La méthode de crête pondérée est ensuite appliquée pour ces courants en fonction des limites d'exposition indiquées dans [9]. La valeur CEI_{BR} associée aux VLE pour les effets sensoriels (Figure A.4) a été choisie pour représenter un résultat.

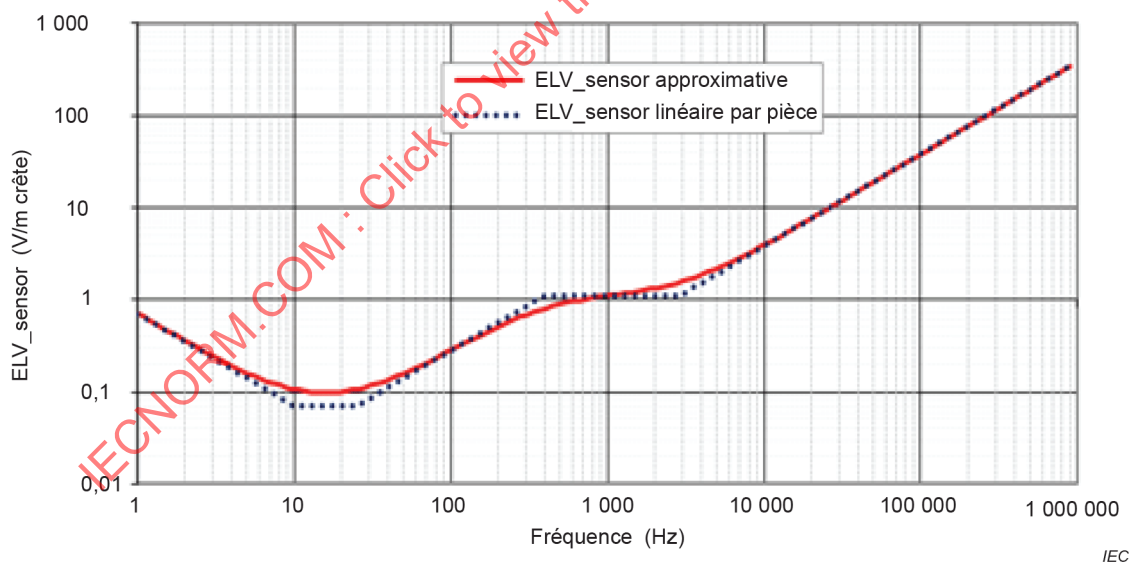


Figure A.4 – VLE combinées pour les effets sensoriels et sur la santé applicables à la tête

Les indices d'exposition courant dans le temps représentés à la Figure A.5 sont obtenus par filtrage numérique du courant le plus défavorable donné sur la Figure A.3 selon les limites indiquées sur la Figure A.4.

NOTE L'IEC 62311 donne des informations détaillées sur la méthode de crête pondérée dans le domaine temporel.

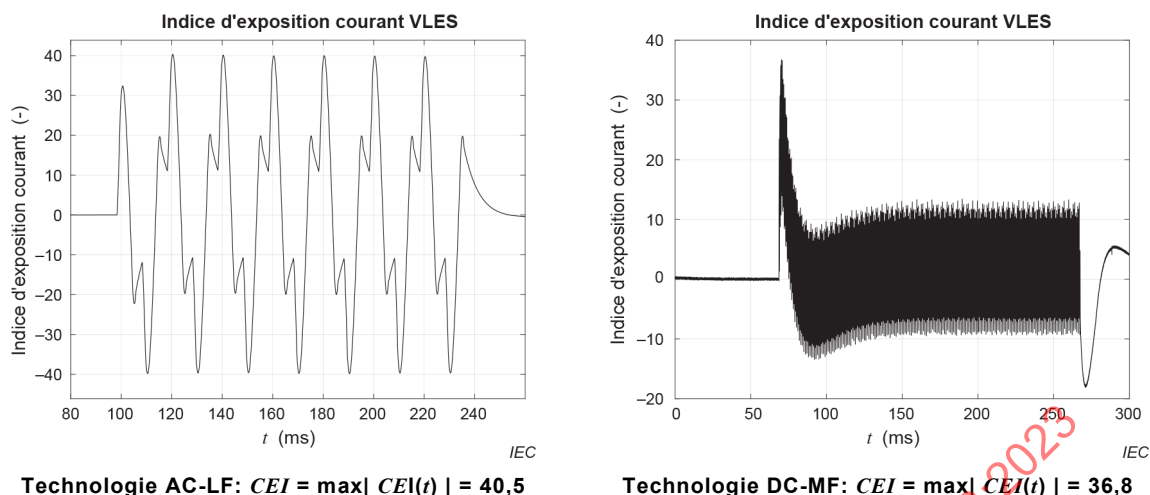


Figure A.5 – Indices d'exposition courant dans le temps pour deux technologies de soudage

Les différents indices d'exposition courant pour la technologie LF-AC s'appliquent aux niveaux de référence (VA) et aux restrictions de base (VLE) (voir Tableau A.1):

Tableau A.1 – Indice d'exposition courant pour la technologie AC-LF ($I_{rms} = 11,4$ kA)

Limites d'exposition [unité]	Low AL $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	High AL $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	Limb AL $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	ELV_sensor $\left[\frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}} \right]$	ELV_health $\left[\frac{\text{kA} \cdot \text{Hz}}{\text{mV/m}} \right]$
Indice d'exposition courant (CEI)	13,4	4,42	1,47	40,5	10,7

Ces valeurs (CEI) représentent des indices d'exposition théoriques exprimés en $\frac{\text{A}}{\text{T}}$ ou en $\frac{\text{A} \cdot \text{Hz}}{\text{V/m}}$, selon la limite d'exposition concernée. Elles doivent être multipliées par un coefficient de couplage CC_{BI} , CC_{EI} , CC_{JI} ou CC_{JB} pour fournir des indices d'exposition aux positions du soudeur. Les coefficients de couplage sont déterminés pour un courant égal à 1 A. Des exemples d'application sont donnés à l'Annexe E.

De la même manière, l'indice d'exposition courant selon les niveaux de référence pour le grand public [1] est (voir Tableau A.2):

Tableau A.2 – Indice d'exposition courant du grand public pour la technologie AC-LF ($I_{rms} = 11,4$ kA)

Niveau de référence [unité]	Grand public $\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$
Indice d'exposition courant (CEI)	239,4

A.3 Coefficient de couplage du circuit de soudage

Le coefficient de couplage CC_{BI} dépend de la taille et de la géométrie du circuit de soudage. Les données peuvent être extraites de données CAO ou, à défaut, obtenues par mesurage de la longueur sur un matériel de soudage. Étant donné que le phénomène de couplage est linéaire dans la plage de fréquences à l'étude, la fréquence et l'amplitude utilisées pour le calcul ne sont pas essentielles et peuvent être modifiées arbitrairement. La méthode la plus simple consiste à effectuer un calcul en prenant pour hypothèse un courant continu de 1 A.

Les coefficients représentent le rapport du champ magnétique à un courant de soudage unitaire et ils sont indépendants de la fréquence.

NOTE 1 Dans la plage de fréquences à l'étude, la dépendance à la fréquence est linéaire.

Un pistolet de soudage par point fixe est utilisé en exemple (voir Figure A.6).

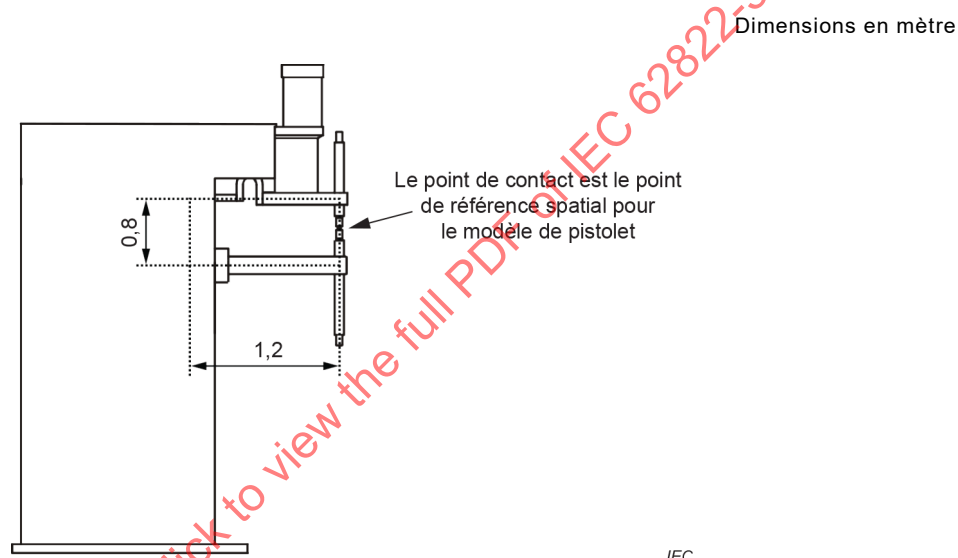


Figure A.6 – Géométrie du pistolet de soudage par point fixe

Le circuit de soudage de cet exemple est modélisé par une boucle rectangulaire de 1,2 m × 0,8 m représentée à la Figure A.7. Le modèle correspond à la fibre neutre (centre) du circuit. La référence spatiale choisie ici est le point de contact des deux électrodes.

NOTE 2 La petite boucle sur le dessus de l'électrode a une influence négligeable sur l'exposition aux champs magnétiques. Elle n'est donc pas prise en compte. Elle est également difficile à dimensionner en raison de la construction de la machine.

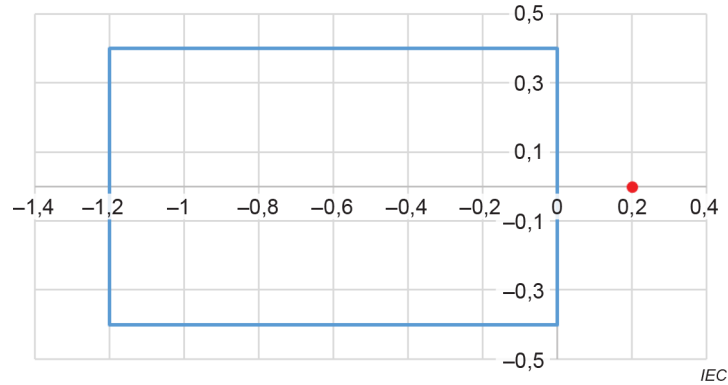


Figure A.7 – Modèle de circuit électrique de soudage (en m) et un point d'intérêt le long de l'axe X

En appliquant la Formule (3), le coefficient de couplage CC_{BI} peut être tracé comme cela est représenté le long de l'axe X (Figure A.8).

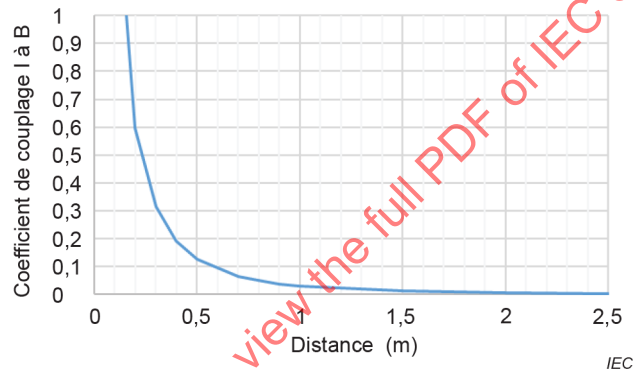


Figure A.8 – Coefficient de couplage CC_{BI} le long de l'axe X

A.4 Système de soudage

L'intégrateur du matériel est en mesure d'évaluer l'exposition au système de soudage à l'aide des données précédentes, à savoir les indices d'exposition courant et le coefficient de couplage CC_{BI} donnés à l'Article 5.

Les résultats selon les niveaux de référence (VA) du Tableau A.1 et du Tableau A.2 en utilisant la Formule (4) sont repris de manière synthétique sur la Figure A.9 ($I_{rms} = 11,4$ kA).

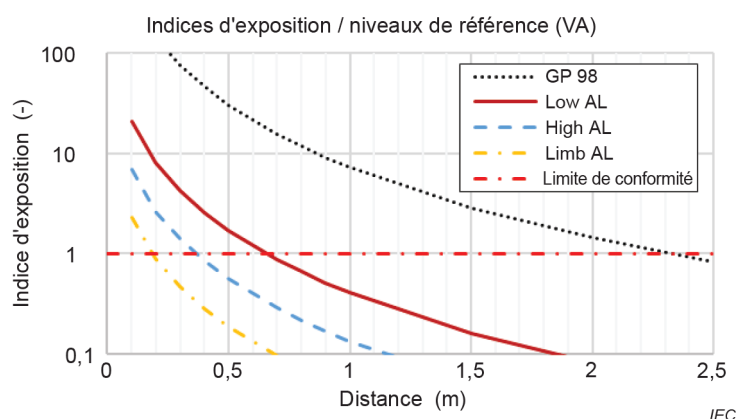


Figure A.9 – Indice d'exposition (VA) le long de l'axe X

La conformité à la valeur d'action est atteinte lorsque l'indice d'exposition est inférieur ou égal à 1, ce qui signifie que:

- les effets sur la santé pour les membres sont évités à une distance supérieure à 0,20 m le long de l'axe X (Limb AL);
- les effets sur la santé pour le tronc et la tête sont évités à une distance supérieure à 0,40 m (High AL);
- les effets sensoriels sur la tête sont évités à une distance supérieure à 0,65 m le long de l'axe X (Low AL);
- les effets sur le grand public et les travailleurs à risques particuliers sont évités à une distance supérieure à 2,3 m (GP98).

Les résultats selon les restrictions de base (VLE) avec la Formule (8) sont repris de manière synthétique sur la Figure A.10.

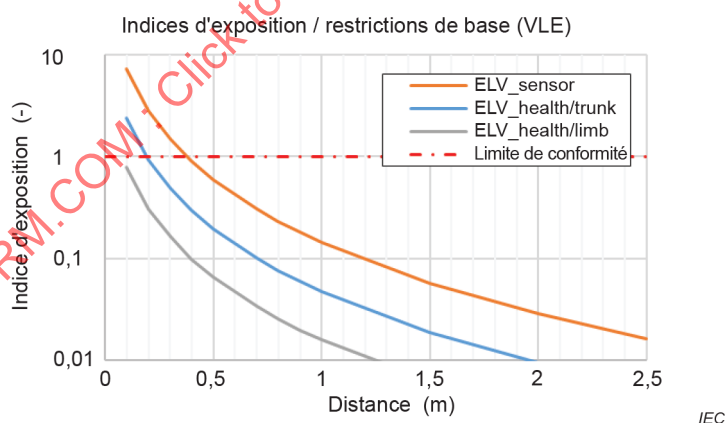


Figure A.10 – Indice d'exposition (VLE) le long de l'axe X

La conformité aux valeurs limites d'exposition est également atteinte lorsque l'indice d'exposition est inférieur ou égal à 1, ce qui signifie que:

- les effets sur la santé pour les membres sont évités à une distance supérieure à 0,10 m environ le long de l'axe X;
- les effets sur la santé pour le tronc et la tête sont évités à une distance supérieure à 0,20 m;
- les effets sensoriels sur la tête sont évités à une distance supérieure à 0,40 m environ le long de l'axe X.

Annexe B (informative)

Exemples de fiches techniques

B.1 Exemple de fiche technique du générateur de courant

Voir Figure B.1.

FICHE TECHNIQUE CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES POUR LA SOURCE DE COURANT DE SOUDAGE PAR RESISTANCE

Publiée par Compaweld Ltd
Valide à partir du 20/04/2021
Révision Patrick Tester
A

Informations sur le matériel

Marque Compaweld
Nom(s) du modèle Ultrawelder 2021
Numéro(s) de modèle 21-6543-000-987
Usage prévu ☒ pour usage professionnel ☐ pour usage non-professionnel

Informations de base

Règlement appliqué Directive 2006/95/CE
Limites référencées Directive 2013/35/UE, Recommandation 1999/519/CE
Norme(s) appliquée(s) IEC 62822-1:2016, IEC 62822-3:2017, IEC 50527-x
Prise en compte des effets non thermiques pour l'évaluation du lieu de travail ☒ OUI ☐ NON
Prise en compte des effets thermiques pour l'évaluation du lieu de travail ☐ OUI ☒ NON

☐ Les données reposent sur la capacité maximale de la source de courant
(valide tant que le micrologiciel/matériel n'est pas modifié)

☐ Les données reposent sur le réglage/le programme le plus défavorable
(valide seulement tant que les options de réglage / programmes de soudage ne sont pas modifiés)

☐ Les données reposent sur plusieurs réglages/programmes
(valide seulement tant que les options de réglage / programmes de soudage ne sont pas modifiés)

☒ Autres (préciser): mode abc - courant de soudage = 11,4 kA (2 salves de 140 ms)

Données champs électromagnétiques pour les effets non thermiques

Indice d'exposition courant (CEI) / Directive 2013/35/UE

Limites d'exposition	Low AL	High AL	Limb AL	ELV_sensor	ELV_health
Unités de CEI	$\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	$\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	$\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$	$\left[\frac{\text{kA.Hz}}{\text{mV/m}} \right]$	$\left[\frac{\text{kA.Hz}}{\text{mV/m}} \right]$
Indices d'exposition courant	13,4	4,42	1,47	40,5	10,7

Indice d'exposition courant (CEI) / Recommandation 1999/519/CE

Limite d'exposition	Grand public
Unité de CEI	$\left[\frac{\text{kA}}{\text{mT}} \right]$
Indice d'exposition courant	239,4

L'IEC 62822-3 décrit comment appliquer les indices d'exposition courant pour déterminer les indices d'exposition selon les cas d'utilisation.

Figure B.1 – Exemple de fiche technique de la source de courant

B.2 Exemple de fiche technique du circuit de soudage

Voir Figure B.2.

FICHE TECHNIQUE CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES POUR LE MONTAGE D'ELECTRODES DE SOUDAGE PAR RESISTANCE

Publiée par Compaweld Ltd

Patrick Tester

Valide à partir du 10/06/2022

Révision

A

Informations sur le matériel

Marque Compaweld

Nom(s) du modèle Ultrawelder 2021

Numéro(s) de modèle 21-6543-000-987

Usage prévu ☒ pour usage professionnel

☐ pour usage non-professionnel

Informations de base

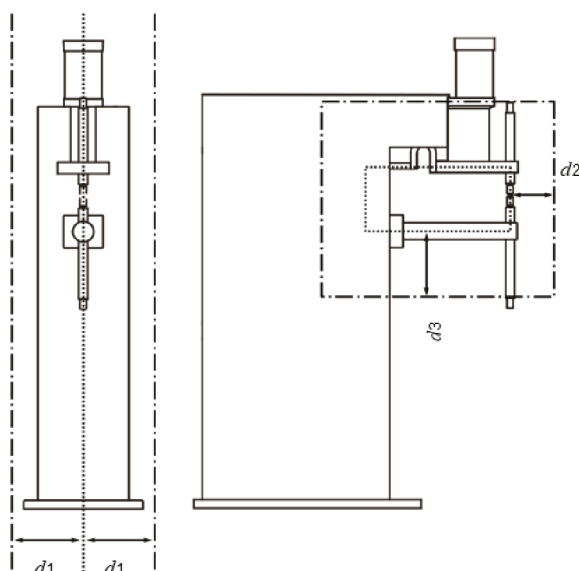
Règlement appliqué Directive 2006/95/CE

Limites référencées Directive 2013/35/UE, Recommandation 1999/519/CE

Norme(s) appliquée(s) IEC 62822-1:2016, IEC 62822-3:2022, IEC 50527-x

Données champs électromagnétiques pour les effets non thermiques

Distance (m)	Coefficient de couplage CC_{BI}		
	axe d1 (mT/kA)	axe d2 (mT/kA)	axe d3 (mT/kA)
0,10	1,132	1,539	N/A
0,20	0,962	0,598	
0,30	0,765	0,316	
0,40	0,588	0,192	
0,50	0,446	0,127	
0,70	0,259	0,065	
0,80	0,201	0,049	
0,90	0,157	0,038	
1,00	0,124	0,030	
1,50	0,046	0,012	
2,00	0,021	0,006	
2,50	0,011	0,003	



Toutes les distances se rapportent au centre du matériau du circuit de soudage (fibre neutre).

L'IEC 62822-3 décrit comment utiliser les coefficients de couplage pour déterminer les indices d'exposition en fonction des valeurs d'action ou des niveaux de références.

IEC

Figure B.2 – Exemple de fiche technique du montage d'électrodes

B.3 Exemple de fiche technique de montage du matériel

Voir Figure B.3.

FICHE TECHNIQUE CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES POUR LE SYSTEME DE SOUDAGE PAR RESISTANCE

Publiée par Compaweld Ltd Patrick Tester
Valide à partir du 10/06/2022 Révision A

Informations sur le matériel

Marque Compaweld
Nom(s) du modèle Ultrawelder 2021
Numéro(s) de modèle 21-6543-000-987
Usage prévu ☒ pour usage professionnel ☐ pour usage non-professionnel

Informations de base

Règlement appliqué Directive 2006/95/CE
Limites référencées Directive 2013/35/UE, Recommandation 1999/519/CE
Norme(s) appliquée(s) IEC 62822-1:2016, IEC 62822-3:2012, IEC 50527-x
Prise en compte des effets non thermiques pour l'évaluation du lieu de travail ☒ OUI ☐ NON
Prise en compte des effets thermiques pour l'évaluation du lieu de travail ☐ OUI ☒ NON
☐ Les données reposent sur la capacité maximale de la source de courant
(valide tant que le micrologiciel/matériel n'est pas modifié)
☐ Les données reposent sur le réglage/le programme le plus défavorable
(valide seulement tant que les options de réglage / programmes de soudage ne sont pas modifiés)
☐ Les données reposent sur plusieurs réglages/programmes
(valide seulement tant que les options de réglage / programmes de soudage ne sont pas modifiés)
☒ Autres (préciser): mode abc – courant de soudage = 11,4 kA – 2 salves de 140 ms

Figure B.3 – Exemple de fiche technique du système de soudage

Cette première fiche est suivie de l'une de deux options (distances de conformité selon la Figure B.4 ou périmètres de conformité selon la Figure B.5).

Option 1

FICHE TECHNIQUE CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES POUR LE SYSTEME DE SOUDAGE PAR RESISTANCE (SUITE)

Données champs électromagnétiques pour les effets non thermiques

Indices d'exposition (EI) et distances par rapport au système de soudage Toutes les distances se rapportent au centre du matériau du circuit de soudage (fibre neutre).

		Tête effets sensoriels et sur la santé	Tronc	Main droite	Main gauche
EI au poste de travail		N/A	N/A	N/A	N/A
Distance minimale exigée	d_1	35 cm	75 cm	5 cm	5 cm
	d_2	40 cm	20 cm	10 cm	10 cm
	d_3	N/A	N/A	N/A	N/A
Distance à laquelle la conformité aux limites pour le grand public est assurée	d_1	2,8 m	2,8 m		
	d_2	2,3 m	2,3 m		
	d_3	N/A	N/A		

Les distances établies pour le grand public s'appliquent également aux travailleurs à risques particuliers (porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs et femmes enceintes).

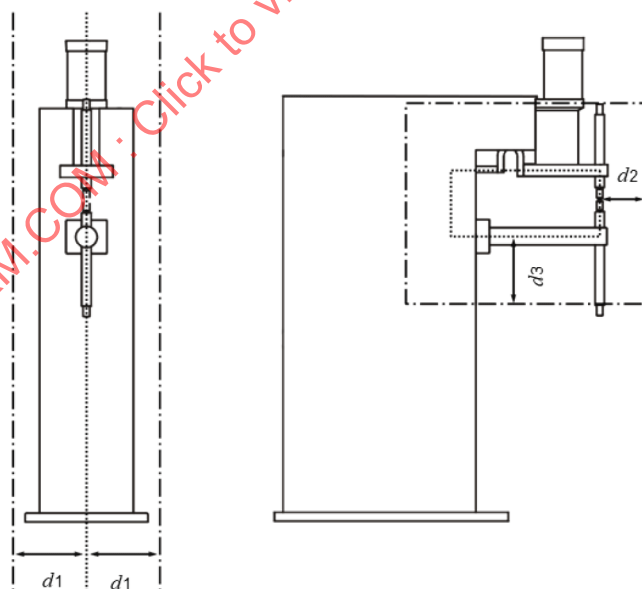


Figure B.4 – Exemple de fiche technique du système de soudage (suite)