

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

**Effects of current on human beings and livestock –
Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects**

**Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques –
Partie 5: Valeurs des seuils de tension de contact pour les effets physiologiques**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2007 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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 corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

**Effects of current on human beings and livestock –
Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects**

**Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques –
Partie 5: Valeurs des seuils de tension de contact pour les effets physiologiques**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XA

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	9
4 Conditions and threshold values	9
4.1 General.....	9
4.2 Physiological effects of touch current	10
4.3 Body impedance.....	14
4.4 Impedance external to the body.....	15
4.5 Other factors affecting voltage thresholds	15
4.6 Touch voltage thresholds as a function of duration	16
4.7 Touch voltage thresholds for long durations	17
5 Touch voltage thresholds – Presentation of voltage-time curves	19
Annex A (informative) Body impedance.....	30
Annex B (informative) Touch voltage – Explanation of a method to derive estimates of touch voltages thresholds for strong muscular reactions and ventricular fibrillation from the body impedance tables and current limits in IEC/TS 60479-1	36
Annex C (informative) Determination of voltage thresholds under selected conditions.....	53
Annex D (informative) Limits of applicability.....	54
Bibliography.....	56
Figure 1 – Physiological thresholds for a.c. (50/60-Hz) and d.c. flowing hand-to-hand (transversely) through the human body	11
Figure 2 – Physiological thresholds for a.c. (50/60-Hz) and d.c. flowing from both hands to both feet (longitudinally) through the human body	12
Figure 3 – Physiological thresholds for a.c. (50/60-Hz) and d.c. flowing from hand-to-seat (longitudinal) through the human body	13
Figure 4 – Flow chart to be used for the selection of the appropriate figure providing the maximum duration for each touch voltage threshold.....	17
Figure 5 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for saltwater-wet condition and large contact area.....	20
Figure 6 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for saltwater-wet condition and medium contact area	21
Figure 7 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for saltwater-wet condition and small contact area	21
Figure 8 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for water-wet condition and large contact area	22
Figure 9 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for water-wet condition and medium contact area.....	22
Figure 10 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for water-wet condition and small contact area	23

Figure 11 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for dry condition and large contact area	23
Figure 12 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for dry condition and medium contact area	24
Figure 13 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for dry condition and small contact area	24
Figure 14 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for saltwater-wet condition and large contact area	25
Figure 15 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for saltwater-wet condition and medium contact area	25
Figure 16 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for saltwater-wet condition and small contact area	26
Figure 17 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for water-wet condition and large contact area	26
Figure 18 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for water-wet condition and medium contact area	27
Figure 19 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for water-wet condition and small contact area	27
Figure 20 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for dry condition and large contact area	28
Figure 21 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for dry condition and medium contact area	28
Figure 22 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for dry condition and small contact area	29
Figure A.1 – Model for hand-to-hand contact	33
Figure A.2 – Model for both-hands-to-feet contact	34
Figure A.3 – Model for hand-to-seat contact	35
Figure B.1 – Estimation of the variation of the skin resistance as a function of electric shock duration	38
Figure B.2 – Example of extrapolation of the hand-to-hand body impedance at 0 V in dry conditions with large contact area	42
Figure B.3 – Percentage of internal resistance of the human body for the part of the body concerned	43
Figure B.4 – Example of diagram for the estimation of the strong muscular reactions and ventricular fibrillation threshold for a.c. current hand-to-hand current path, large contact area and dry condition for a current duration of 10 ms	47
Table 1 – Current threshold values for each condition and for long duration	14
Table 2 – Tables providing minimum touch voltage threshold for a.c. and d.c. corresponding to startle reaction, strong muscular reaction and ventricular fibrillation (see Table 1 notes)	18
Table 2a – Startle reaction for alternating current 50/60 Hz	18
Table 2b – Strong muscular reaction for alternating current 50/60 Hz	18
Table 2c – Ventricular fibrillation for alternating current 50/60 Hz	18
Table 2d – Startle reaction for direct current	19
Table 2e – Strong muscular reaction for direct current	19
Table 2f – Ventricular fibrillation for direct current	19
Table A.1 – Total body impedance in ohms for dry, hand-to-hand, 50/60 Hz a.c., large surface area contact (IEC/TS 60479-1 Table 1)	31

Table A.2 – Total body impedance in ohms for dry, hand-to-hand, d.c., large surface area contact (IEC/TS 60479-1 Table 10).....	31
Table B.1 – Nature and number of the parameters influencing the human body impedance which are taken into consideration by IEC/TS 60479-1.....	37
Table B.2 – Additional parameters influencing the human body impedance.....	37
Table B.3 – Maximum a.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered and for a hand-to-hand current path.....	46
Table B.4 – Maximum a.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for both-hands-to-feet current path.....	47
Table B.5 – Maximum a.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for a hand-to-seat current path.....	48
Table B.6 – Maximum d.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for the hand-to-hand current path.....	51
Table B.7 – Maximum d.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for the both-hands-to-feet current path.....	52
Table B.8 – Maximum d.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for the hand-to-seat current path.....	52
Table C.1 – Example of touch voltage thresholds for a.c. and d.c. corresponding to muscular effects and ventricular fibrillation for the above specified environmental situations	53

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

EFFECTS OF CURRENT ON HUMAN BEINGS AND LIVESTOCK –**Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects**

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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC/TR 60479-5, which is a technical report, has been prepared by IEC technical committee 64: Electrical installations and protection against electric shock.

The text of this technical report is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
64/1585/DTS	64/1611/RVC

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all the parts in the IEC 60479 series, under the general title *Effects of current on human beings and livestock*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

This technical report provides a methodology for estimating voltage thresholds which are intended to give guidance to IEC technical committees on the selection and application of voltage limits with regard to protection against electric shock. Technical committees may use this methodology to recalculate proposed voltage thresholds or to determine new voltage threshold values based on different pathways, other current threshold values, different alternating current frequencies, other skin capacitances values, etc.

To estimate the type and severity of physiological effects that might be caused by electricity, the magnitude and pathway of current through a person's body needs to be determined. However, from an equipment design point of view, it is advantageous to be able to predict whether unwanted physiological effects are possible or probable, given only information about voltage levels on accessible conductive surfaces. If the maximum available voltage is sufficiently low under the expected circumstances to be unable to cause enough touch current to cause unwanted physiological effects, then the safeguards normally required to avoid the occurrence of these physiological effects may be reduced or eliminated. Voltages below critical levels that are unlikely to be hazardous in this respect have normally been called extra-low voltage (ELV). Based on this information technical committees may wish to review their defined values of extra-low voltage.

The objective of this technical report being to derive touch voltage threshold values corresponding to zones of physiological effects (as presented in Figures 20 and 22 of IEC/TS 60479-1), the introduction of such techniques gives designers the ability to provide a larger variety of circuits that give the expected level of user protection under a broader set of circumstances than previously considered.

The physiological effects corresponding to the threshold voltage values should be the same as those for touch current that appear in IEC/TS 60479-1. Physiological effects considered in this technical report are startle reaction of current, effects involving muscular contractions such as inability to let-go and ventricular fibrillation. Current thresholds are based on curves a, b and c₁ in IEC/TS 60479-1 which remains the prime standard. The touch voltage thresholds are related to the touch current thresholds by the body impedance according to Ohm's law. However, in this case, the application of Ohm's law is not straightforward. Body impedance is a function of a number of variables including the voltage across the body, the current pathway, the area of contact between the skin and the conductive surface, the level of moisture in the contact area, and the duration of voltage across (or current through) the body. When voltage is applied to the body and current begins to flow, the resistive component of the skin impedance changes to a lower value within a few tens of milliseconds.

This technical report discusses 50/60Hz sinusoidal alternating voltage and pure direct voltage having no significant alternating component. Higher frequency alternating voltage is not included in this type of analysis as this would require a more complex body impedance model and would require the use of frequency factors for the current thresholds for the unwanted physiological effects. As this technical report does not cover frequencies above 50/60Hz, technical committees are requested to inform IEC/TC 64 about experience gained on this subject. Suggestions for modifications and additions to the report should be submitted to IEC/TC 64.

This work does not relieve the responsibility of IEC technical committees to consider the usual touch current commonly measured in product evaluations.

EFFECTS OF CURRENT ON HUMAN BEINGS AND LIVESTOCK –

Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects

1 Scope

IEC/TR 60479-5, which is a technical report, provides touch voltage-duration combination thresholds based on analysis of information concerning body impedances and current thresholds of physiological effects, as given in IEC/TS 60479-1. Such threshold combinations relate to specific environmental and contact conditions that determine body impedance for particular current pathways.

This technical report considers only

- (i) 50/60 Hz sinusoidal alternating voltage having no other frequency components and no significant direct voltage component, and
- (ii) direct voltage with no significant alternating component.

This technical report provides thresholds as a result of calculations based on values from IEC/TS 60479-1, with uncertainties. Therefore thresholds proposed in this report also correspond to values with uncertainties.

This technical report does not consider immersion of body parts and medical application.

Touch voltage-duration combination thresholds are for use by technical committees as guidance for the determination of limits for touch voltage and touch voltage durations in various environmental situations.

Determination of limits needs to be based on risk assessment. Factors that are part of risk assessment include voltage threshold values (taking into account contact area, skin moisture condition, body current pathway) provided by this technical report, as well as other factors not covered such as:

- reduction of the likelihood of contact (by obstacles, barriers, warnings, placing out of reach, training, etc.); or
- reduction of touch voltage compared to the fault voltage (such as by equipotential bonding); or
- additional resistance in series with the human body (such as gloves, shoes, carpet, etc.).

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60050-195, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 195: Earthing and protection against electric shock*

IEC/TS 60479-1:2005, *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*

IEC 60990, *Methods of measurement of touch current and protective conductor current*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

touch current

electric current passing through a human body or through an animal body when it touches one or more accessible parts of an installation or of equipment

[IEV-195-05-21]

3.2

touch voltage

voltage between conductive parts when touched simultaneously by a person or an animal

[IEV 195-05-11]

NOTE The touch voltage may be different from the open-circuit voltage between those conductive parts.

3.3

threshold

level of stimulus just strong enough to produce a response

NOTE A threshold is not the same as a limit which includes risk assessment, safety margins, etc.

3.3.1

voltage threshold for startle reaction

minimum derived value of touch voltage for a population for which a current flowing through the body is just enough to cause involuntary muscular contraction to the person through which it is flowing

3.3.2

voltage threshold for strong muscular reaction

minimum derived value of touch voltage for a population for which a current flowing through the body is just enough to cause involuntary contraction of a muscle, such as inability to let-go from an electrode (a.c.), but not including startle reaction

3.3.3

voltage threshold for ventricular fibrillation

minimum derived value of touch voltage for a population for which a current flowing through the body is just enough to cause ventricular fibrillation

3.4

long duration

duration corresponding to the vertical asymptote of the “b” and “c₁” curves of IEC/TS 60479-1 (e.g. 10 s)

3.5

short duration

any duration less than long duration

4 Conditions and threshold values

4.1 General

Physiological effects of electricity through the human body are caused by current passing through the body. In order to estimate the type and severity of physiological effects that might be caused by electricity, the magnitude and pathway of current through a person's body must be determined. However, from an equipment design point of view, it is advantageous to be

able to predict whether unwanted physiological effects are possible or probable, armed only with information concerning voltage levels on accessible conductive surfaces. If the maximum available voltage is sufficiently low to be unable to cause enough touch current to cause unwanted physiological effects, then the safeguards normally required to avoid the occurrence of these physiological effects may be reduced or eliminated.

NOTE This technical report only estimates the touch voltage and not the effect of the source impedance. This results in the worst case situation. In this report the prospective touch voltage is considered as equal to the effective touch voltage, as defined in IEC 60050-195.

4.2 Physiological effects of touch current

Thresholds for the physiological effects associated with electric current through a human body are reported in IEC/TS 60479-1.

This technical report addresses startle reaction from current, strong involuntary muscular reaction such as inability to let go an electrode in a.c. and ventricular fibrillation. Other effects, such as perception of current, might be important for some applications but are not addressed. It should be noted that current thresholds corresponding to strong muscular reaction and to ventricular fibrillation depend on touch current magnitude, while current threshold corresponding to startle reaction depends more on current density. Nevertheless, IEC/TS 60479-1 addresses a current startle reaction threshold in mA which contributes to considerations in this report that the current startle reaction threshold only depends on the current magnitude.

For the purposes of this report, the threshold of physiological effects of greatest interest are curves a, b and c₁. Curve a is the level beyond which startle reaction of current becomes possible. Curve b is the lower boundary of current levels beyond which more serious and undesirable physiological effects begin to occur. Curve c₁ is the level beyond which the likelihood of ventricular fibrillation begins to become a concern.

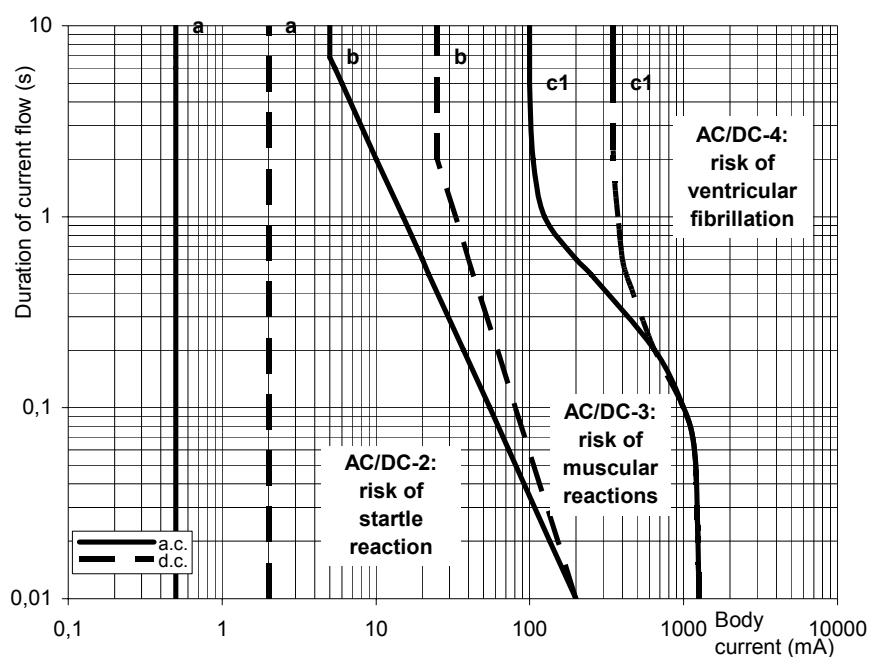
Figures 1 to 3 below show the thresholds for touch current on which the voltage thresholds are based. These figures are based only on information from IEC/TS 60479-1. Figures 1, 2 and 3 respectively show the threshold current values for hand-to-hand; both-hands-to-feet or hand-to-seat (longitudinal) current.

Figure 2 directly reproduces Figures 20 and 22 from IEC/TS 60479-1. Other figures are derived from IEC/TS 60479-1 using the appropriate factors of Table 5 to adapt the threshold current to the hand-to-hand pathway.

The values in Table 1 refer to long duration current passing through the torso. For a.c., the main concern is the inability to let go with reference to current passing through each arm. Therefore, the a.c. current value in Table 1 and in Figure 2 has been doubled for the 'both-hands-to-feet' pathway for longer current duration (only above the intersection with the d.c. line). For d.c. and for shorter a.c. duration, the value is not doubled because continuous d.c. and short duration a.c. current do not cause inability to let go (which results in coincidence of both lines) (see note 1 of Table 1).

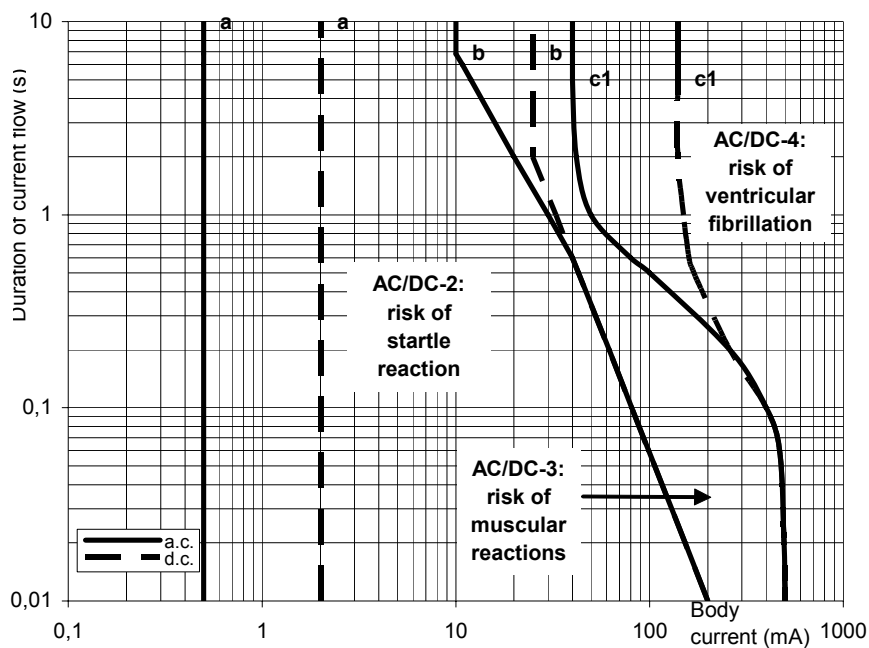
For direct current, a lower magnitude of current is needed to produce ventricular fibrillation when the current flows upward from feet to hands (feet positive with respect to the upper body) through the torso rather than downward. This technical report assumes upward current in all cases involving direct current. The ventricular fibrillation current threshold for a d.c. downwards current is about twice that of the current threshold corresponding to the upward current.

Short duration currents (less than one heart cycle) are always assumed to coincide with the vulnerable portion of the heart beat cycle.



NOTE The "c₁" curve is modified according to Table 12 of IEC/TS 60479-1; see also last paragraph of 4.1 of that standard.

Figure 1 – Physiological thresholds for a.c. (50/60 Hz) and d.c. flowing hand-to-hand (transversely) through the human body



NOTE Modifications to Figures 20 and 22 of IEC/TS 60479-1 include:

- doubling of threshold corresponding to curve “b” for a.c., explained in note 1 of Table 1;
- below the intersection of the double a.c. curve and the d.c. curve, both curves were made coincident with the more conservative d.c. curve; see explanation in the 4th paragraph of 4.1 of IEC/TS 60479-1.

Figure 2 – Physiological thresholds for a.c. (50/60 Hz) and d.c. flowing from both hands to both feet (longitudinally) through the human body

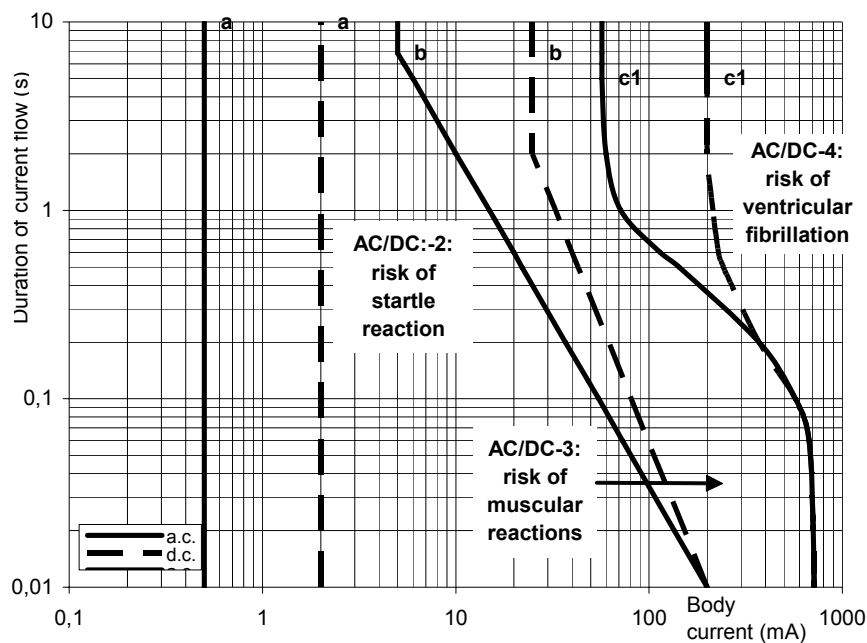


Figure 3 – Physiological thresholds for a.c. (50/60 Hz) and d.c. flowing from hand-to seat (longitudinal) through the human body

For the determination of voltage threshold, the following long duration current thresholds have been considered. They have been determined from Figures 20 and 22 and Table 12 of IEC/TS 60479-1 which correspond to the upper end of the b or c_1 curves in Figures 1 to 3 above.

Table 1 – Current threshold values for each condition and for long duration

Type of threshold	Current	Current path	mA
Current of startle reaction	a.c.	Hand-to-hand	0,5
		Both-hands-to-feet	0,5
		One-hand-to-seat	0,5
	d.c.	Hand-to-hand	2
		Both-hands-to-feet	2
		One-hand-to-seat	2
Strong muscular reactions	a.c.	Hand-to-hand	5
		Both-hands-to-feet ^(Note 1)	10
		One-hand-to-seat	5
	d.c.	Hand-to-hand	25
		Both-hands-to-feet	25
		One-hand-to-seat	25
Ventricular fibrillation (Note 3)	a.c.	Hand-to-hand	100
		Both-hands-to-feet	40
		One-hand-to-seat	57
	d.c.	Hand-to-hand	350
		Feet-to-both-hands ^(Note 2)	140
		Seat-to-one-hand ^(Note 2)	200
NOTE 1 The values in this table refer to current through the torso. For a.c. the main concern is the inability to let go which refers to the current through each arm. Therefore, the total touch current value in the table has been doubled for longer current durations.			
NOTE 2 Current path in the direction of feet-to-both-hands is referred to as upward current. The ventricular fibrillation current threshold for a d.c. downwards current is about twice that of the current threshold corresponding to the upward current.			
NOTE 3 Current values other than values corresponding to ventricular fibrillation may cause other severe effects such as respiratory arrest as described in IEC/TS 60479-1.			

4.3 Body impedance

Touch voltage thresholds are related to touch current thresholds by the body's impedance according to Ohm's law. However, the application of Ohm's law is not straightforward because the appropriate value of body impedance to use is a function of many factors. The selection of the proper value should include consideration of

- the type of power source (a.c. or d.c.), and
- the magnitude of the touch voltage, and
- the pathway of the current through the body (hand-to-hand or both-hands-to-feet or hand-to-seat), and

NOTE 1 These different pathways have been selected for their characteristics. The reason comes from the body impedance model described in Annex A. The voltage thresholds determined for the current path both-hands-to-feet may be generally considered conservative compared to the current path one hand-to-feet.

- the area of contact with the skin, and
- the condition of the skin contact area (saltwater-wet, water-wet, dry), and
- duration of the current flow.

The body impedance only includes skin impedance and internal tissue impedance.

Skin resistance changes as a function of the voltage applied to it. At low voltages, the change is reversible. The value quickly changes back to the original resistance once the voltage is removed. At high voltage, permanent injury to the skin can occur. In this case, the change in skin resistance that results from the applied voltage is not reversible.

NOTE 2 A finger can be assumed to have a resistance of approximately 1 000 Ω . Therefore, contact with a finger tip rather than with the palm of the hand will significantly increase the body impedance. The conditions described by the contact with the palm of the hand are therefore conservative.

IEC/TS 60479-1 contains information about body impedance that was obtained from measurements of live human volunteers and from measurements of cadavers. Annex A provides more details about body impedances and body impedance models. There are variations in impedance between different individuals and this is shown in the tables of Annex A by the percentile values.

Typically, physically large people have lower internal body resistance because of their larger cross-sectional area. Physically small people generally have higher internal body resistance. Some measurements [1]¹ of body impedances show that the body impedance is not greatly influenced by the body weight. Therefore, there is not sufficient correlation between the body weight (children or adults) and the physiological current values corresponding to a particular effect. Three percentiles of the population are considered in IEC/TS 60479-1 (5th, 50th and 95th). This report only considers the values of body impedance corresponding to the 5th percentile of the population which covers more than 95 % of the population.

4.4 Impedance external to the body

It is assumed that the voltage source applied to the body has a low output impedance relative to the body impedance (which is the worst case). The magnitude of the touch current is determined solely by the combination of the applied voltage and the human body impedance. Consideration of any significant circuit impedance that might be in series with the body, and that can affect the available touch current from the voltage source, is outside the scope of this technical report.

NOTE In some instances, with large inductive impedance in series with the body, the touch voltage might be higher than the open-circuit voltage of the source. This effect can become significant for 50/60Hz at inductances larger than 100 mH.

External impedance from clothing, including gloves or shoes, is not considered in this report.

4.5 Other factors affecting voltage thresholds

The factors considered are as follows:

- Source: 50/60 Hz alternating sinusoidal voltage with no d.c. component or direct voltage with no alternating component.
- Skin condition: saltwater-wet, water-wet and dry.

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

NOTE 'Dry' skin condition corresponds to normal indoor condition, water-wet skin condition corresponds to skin that has been immersed for more than 1 min in normal water (average value $\rho = 35 \Omega \times m$, pH = 7,7 - 9), and a saltwater-wet skin condition is considered as skin that has been immersed for more than 1 min in a solution of 3 % NaCl in water (average value $\rho = 0,25 \Omega \times m$, pH = 7,5 - 8,5).

Perspiration may be considered as lying between a water-wet and saltwater-wet condition. The conductivity of some sea water is slightly higher than the saltwater-wet condition.

- Pathway: hand-to-hand contact or both-hands-to-feet contact or hand-to-seat contact with accessible conductive parts.
- Contact area: large area contact, medium area contact, or small area contact with accessible conductive parts.

For the purposes of calculation, a large, full hand contact (L) is considered to have a surface contact hand area of 82 cm². A medium contact area (M) is considered to be 12,5 cm² and might represent touching a conductive part in the palm of each hand. A small contact area (S) is considered to be 1 cm² and might represent touching a small conductive part with the hand. All contacts, except for hand-to-seat, are assumed to be symmetrical for the purposes of this analysis. It is assumed that contact between each foot and a conductive supporting surface will be the same size as for each hand surface contact.

It should be noted that contact area may be affected by the use of conductive tools or interconnected equipment (accessible conductive parts).

- Duration: 10 ms to 10 s.

The worst case presented in this report corresponds to the following situation: a.c. current, long duration, saltwater-wet condition and large contact area.

4.6 Touch voltage thresholds as a function of duration

Based on human body impedances and on current-time curves as provided in IEC/TS 60479-1, a set of diagrams (see Figures 5 to 22) provide the maximum time acceptable for a given touch voltage applied to a human body. These curves have been established by using the method described in Annex B and with the model described in Annex A.

These curves should be used as a guide by IEC technical committees when prescribing the disconnecting time of the protective device used for the automatic disconnection of supply. The limits chosen for the disconnecting time may differ from the threshold values of this technical report because of safeguards, uncertainties, tolerances, risk assessment, etc., that may be included. For more details, see Figures 5 to 22.

The following flow-chart is provided to direct the reader to the appropriate figure showing voltage threshold information based on the situation of interest:

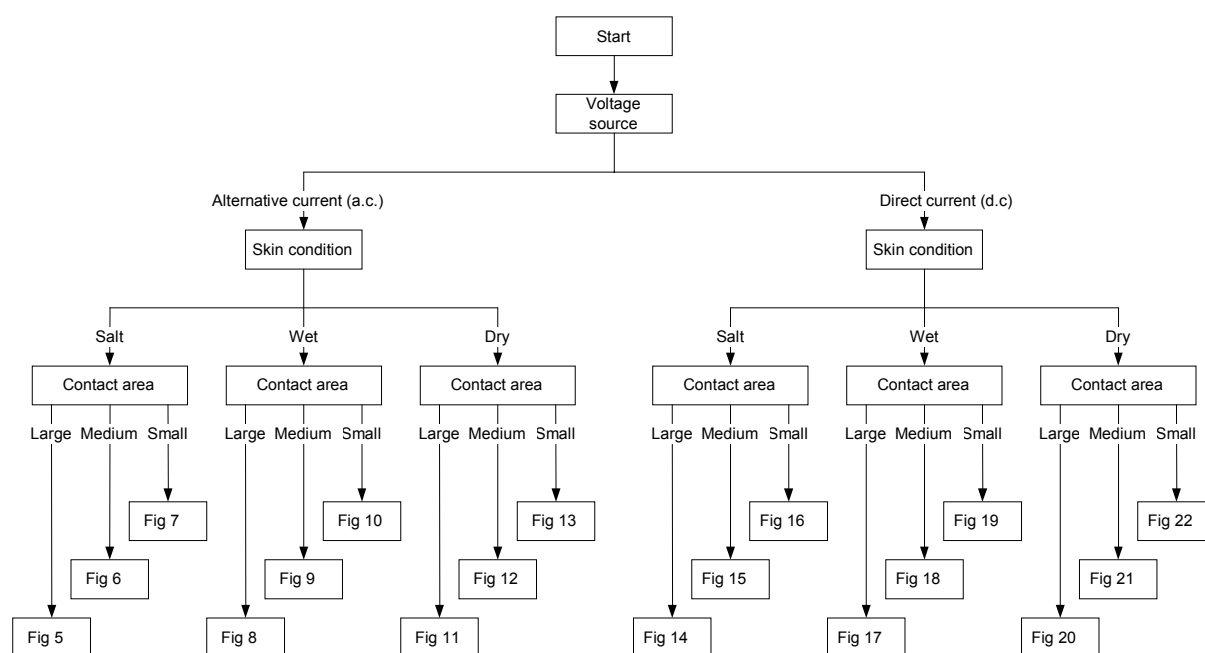


Figure 4 – Flow chart to be used for the selection of the appropriate figure providing the maximum duration for each touch voltage threshold

Annex B illustrates the method used to calculate touch voltages based on touch currents and body impedances.

4.7 Touch voltage thresholds for long durations

The following tables, (Tables 2a to 2f), represent an extract of the figures in Clause 5 for lengthy durations (longer than a few seconds corresponding to vertical asymptote for each curve in Clause 5). Annex B illustrates the method used to calculate touch voltages based on touch currents and body impedances.

Technical committees may use these voltage thresholds to set voltage limits in their product standards using appropriate risk factors.

Table 2 – Tables providing minimum touch voltage threshold or a.c. and d.c. corresponding to startle reaction, strong muscular reaction and ventricular fibrillation (see Table 1 notes)

Table 2a – Startle reaction for alternating current 50/60 Hz

Startle reaction	Current threshold mA	AC touch voltage thresholds for long duration V								
		Saltwater-wet			Water-wet			Dry		
		Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact
Hand-to-hand	0,5	1	1	3	1	4	21	2	9	40
Both-hands-to-feet	0,5	0,3	1	2	0,4	3	13	1	5	23
Hand-to-seat	0,5	0,3	0,5	2	0,4	2	11	1	4	20

Table 2b – Strong muscular reaction for alternating current 50/60 Hz

Muscular effects	Current threshold mA	AC touch voltage thresholds for long duration V								
		Saltwater-wet			Water-wet			Dry		
		Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact
Hand-to-hand	5	5	9	27	7	25	93	11	40	104
Both-hands-to-feet	10	5	9	27	7	25	93	11	40	104
Hand-to-seat	5	3	5	13	3	13	46	6	20	52

Table 2c – Ventricular fibrillation for alternating current 50/60 Hz

Ventricular fibrillation	Current threshold mA	AC touch voltage thresholds for long duration V								
		Saltwater-wet			Water-wet			Dry		
		Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact
Hand-to-hand	100	90	160	257	98	165	260	99	99	260
Both-hands-to-feet	40	20	36	94	24	71	149	33	82	149
Hand-to-seat	57	27	49	99	31	65	100	34	65	100

Table 2d – Startle reaction for direct current

Startle reaction	Current threshold mA	DC touch voltage thresholds for long duration V								
		Saltwater-wet			Water-wet			Dry		
		Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact
Hand-to-hand	2	2	4	12	3	12	56	7	23	78
Both-hands-to-feet	2	1	2	6	2	7	35	4	15	59
Hand-to-seat	2	1	2	6	1	6	28	3	12	39

Table 2e – Strong muscular reaction for direct current

Strong muscular effects	Current threshold mA	DC touch voltage thresholds for long duration V								
		Saltwater-wet			Water-wet			Dry		
		Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact
Hand-to-hand	25	24	44	112	29	81	156	43	89	156
Both-hands-to-feet	25	13	23	63	16	51	133	26	67	133
Hand-to-seat	25	12	22	56	15	41	78	21	45	78

Table 2f – Ventricular fibrillation for direct current

Ventricular fibrillation	Current threshold mA	DC touch voltage thresholds for long duration V								
		Saltwater-wet			Water-wet			Dry		
		Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact	Large contact	Medium contact	Small contact
Hand-to-hand	350	263	351	467	264	353	470	264	264	470
Both-hands-to-feet	140	68	121	220	75	143	223	87	143	223
Hand-to-seat	200	83	126	201	85	127	203	85	127	203

Annex B illustrates the method used to calculate touch voltages based on touch currents and body impedances.

5 Touch voltage thresholds – Presentation of voltage-time curves

Based on human body impedances and on current-time curves as provided in IEC/TS 60479-1, the following set of diagrams provide the maximum time for each physiological effects considered and for a given touch voltage applied to a human body. These curves have been established by using the method described in Annex B and with the model described in Annex A. See flow chart in Figure 4 to select the appropriate figure.

For each type of current (alternating current and direct current) there are nine diagrams corresponding to the followings parameters:

- skin conditions (dry, water-wet and saltwater-wet); and
- contact area (large, medium and small).

Each diagram includes a set of nine curves corresponding to

- the three different current paths through the human body considered in this report (hand-to-hand; both-hands-to-feet and hand-to-seat), and to
- the three different current thresholds considered in this report (startle reaction, strong muscular reaction and ventricular fibrillation).

These curves are intended to be used as a guide by IEC technical committees when prescribing the maximum disconnection time combinations that can be tolerated by the human body without undesired physiological effects. For example, the following characteristics are factors that need to be considered and might result in appropriate adjustments being made in the process of selecting limits:

- the symmetrical restriction of the electrical model resulting from the inability of the model to handle more than one electrical operating point of the nonlinear nature of the skin at a time;
- the limited number of discrete levels of contact area, moisture of contact, and touch current pathway that are assumed;
- the limited number of only three physiological thresholds resulting from electric current (startle reaction, direct muscular effects including inability to let go, and ventricular fibrillation).

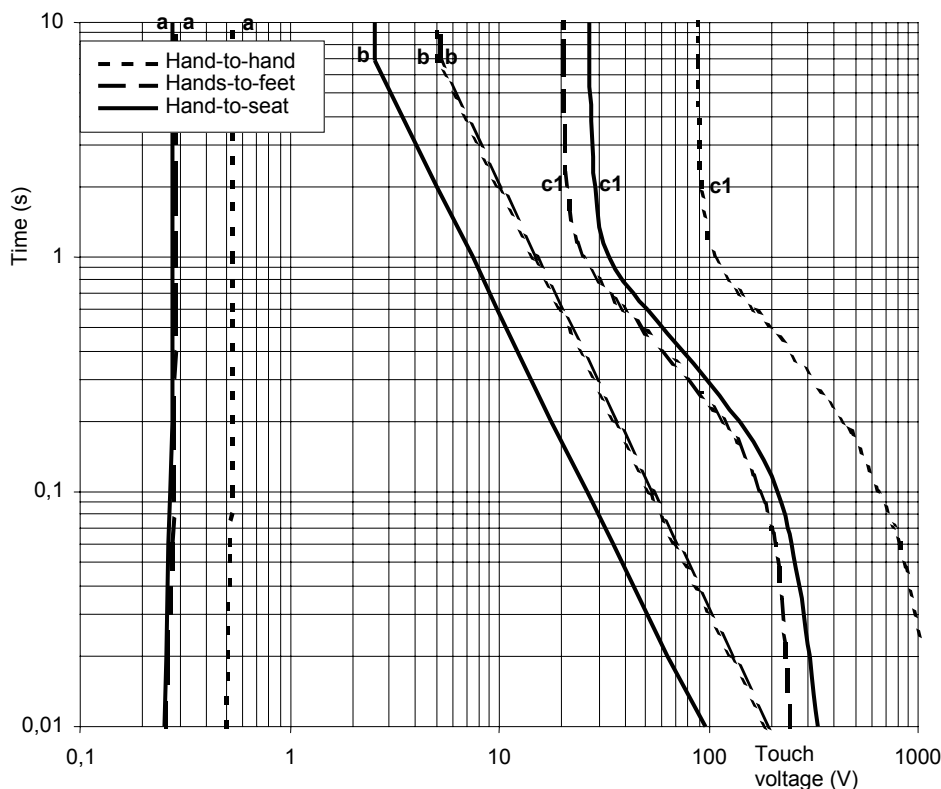


Figure 5 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for saltwater-wet condition and large contact area

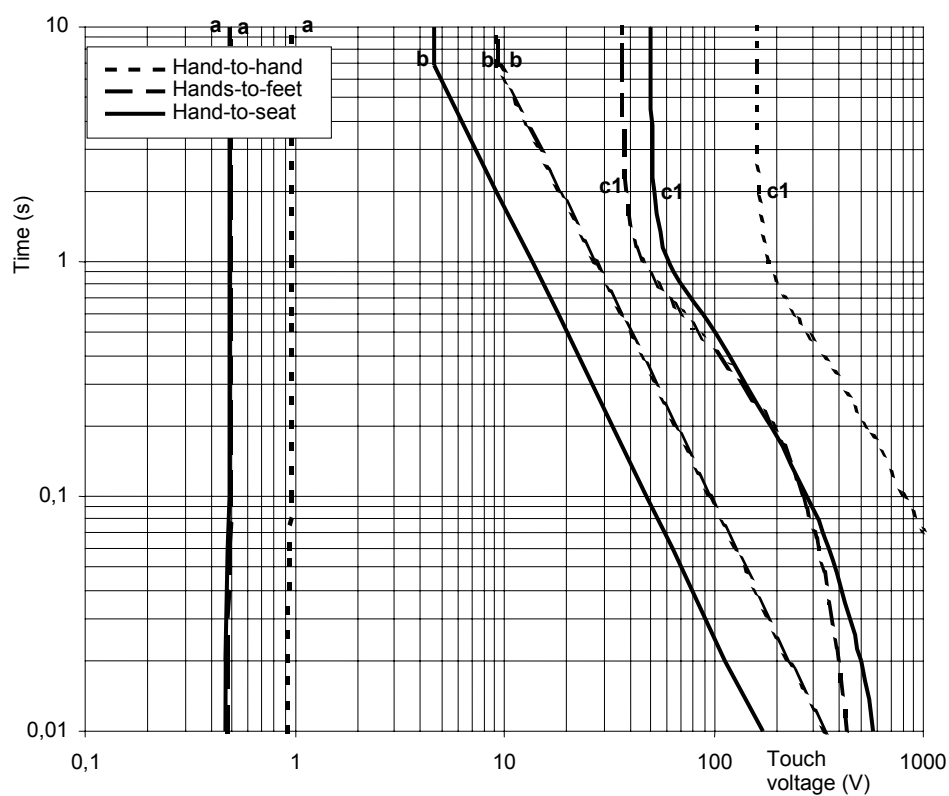


Figure 6 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for saltwater-wet condition and medium contact area

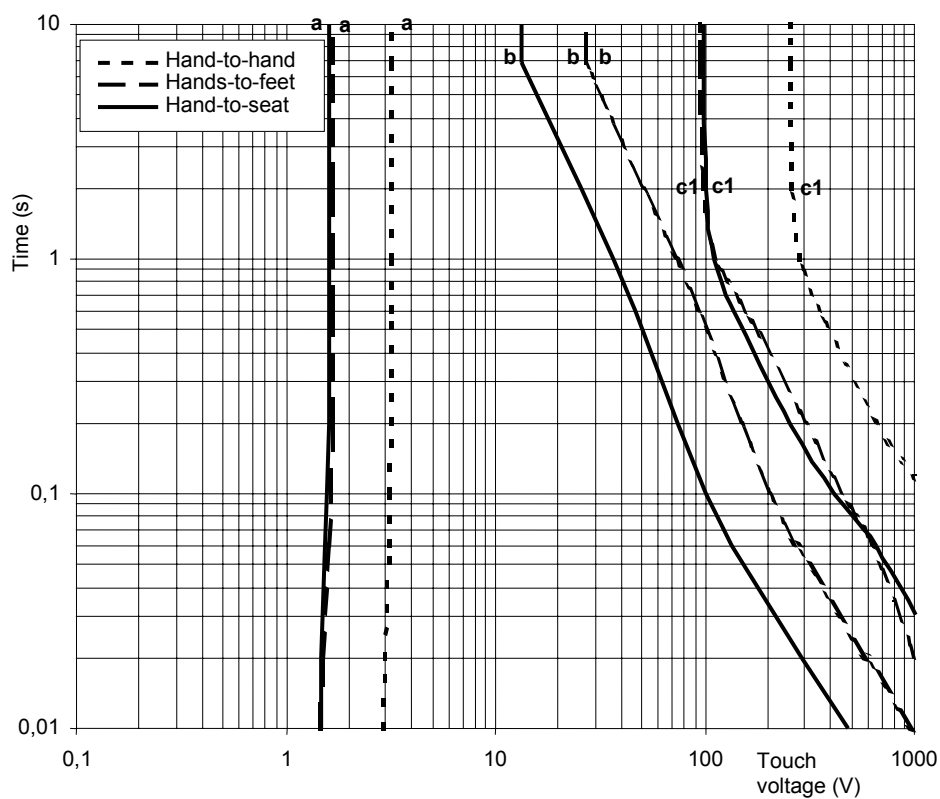


Figure 7 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for saltwater-wet condition and small contact area

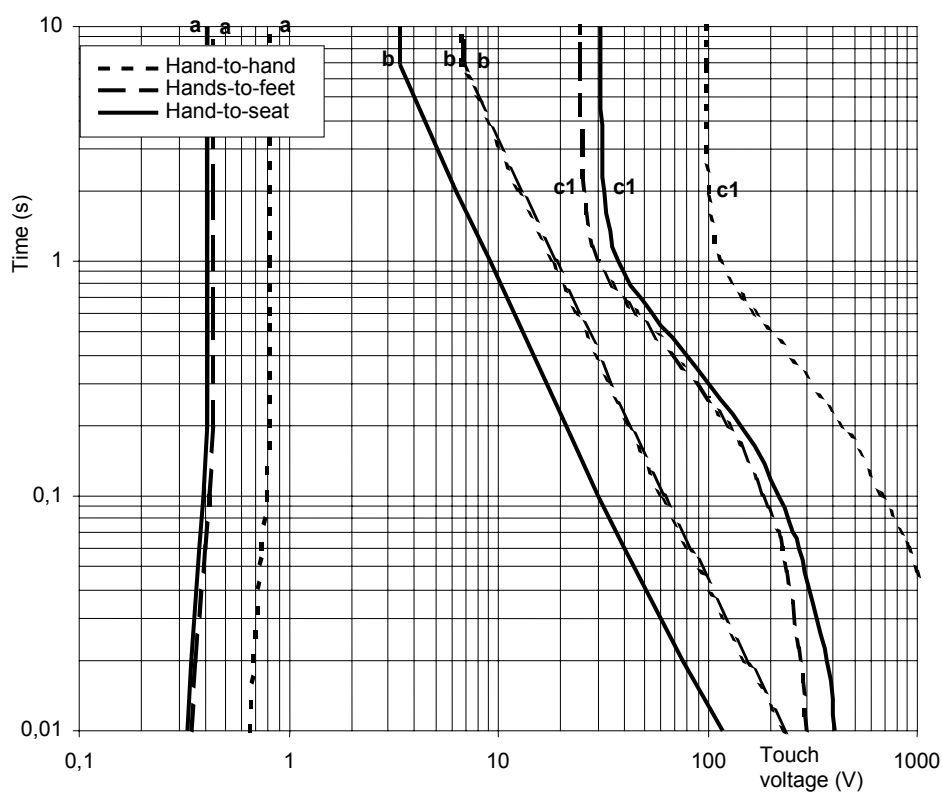


Figure 8 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for water-wet condition and large contact area

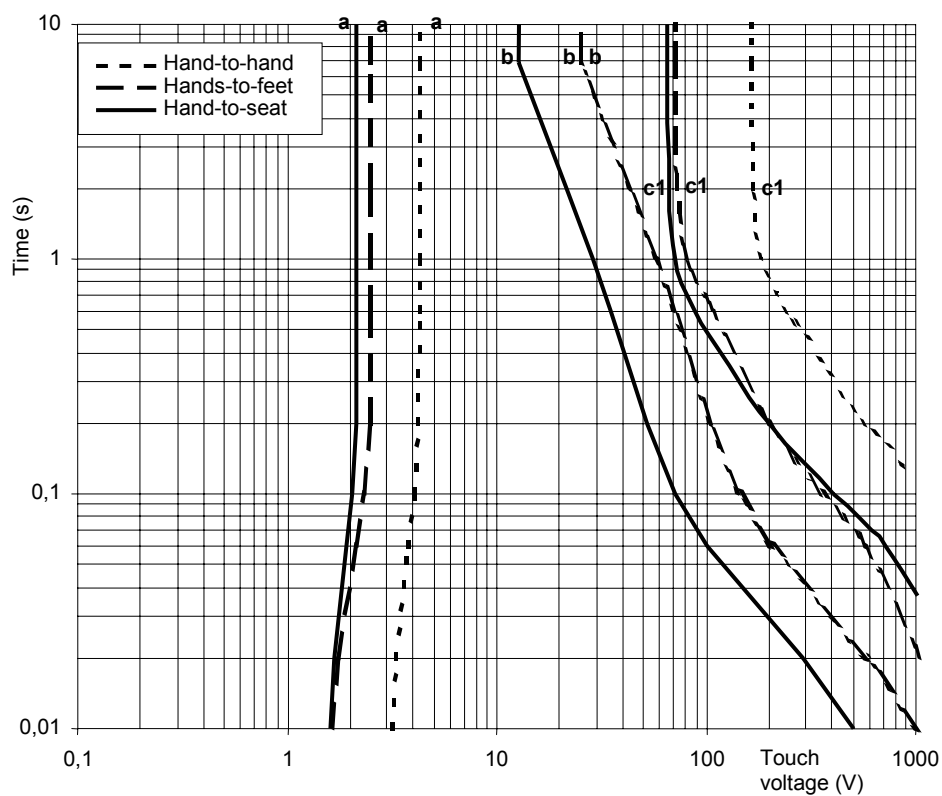


Figure 9 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for water-wet condition and medium contact area

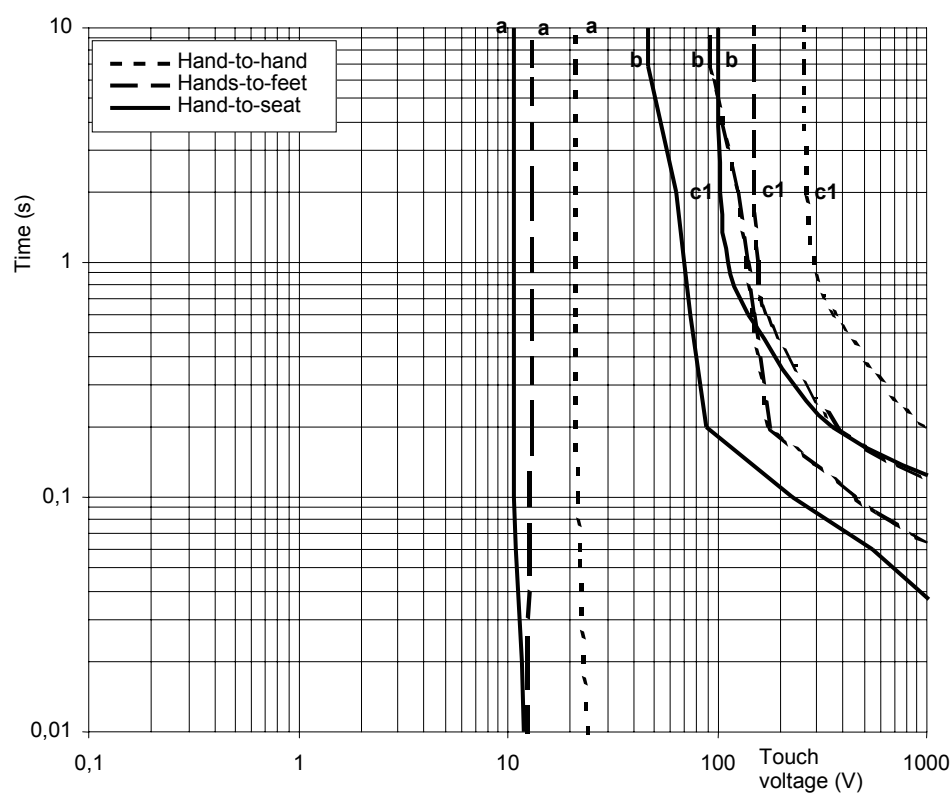


Figure 10 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for water-wet condition and small contact area

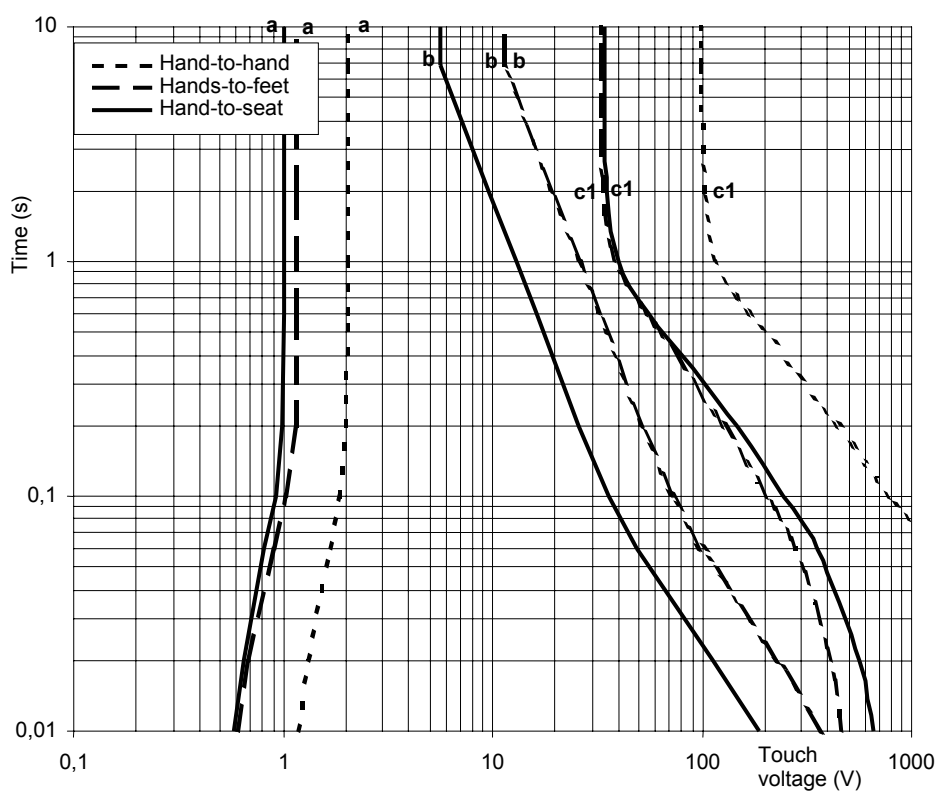


Figure 11 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for dry condition and large contact area

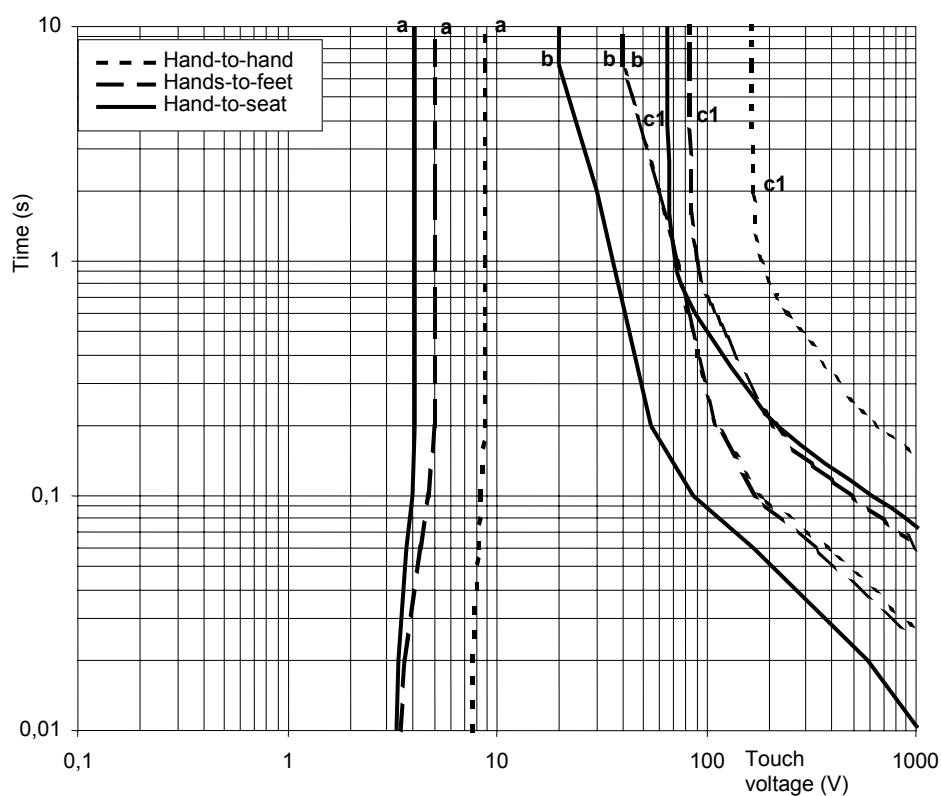


Figure 12 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for dry condition and medium contact area

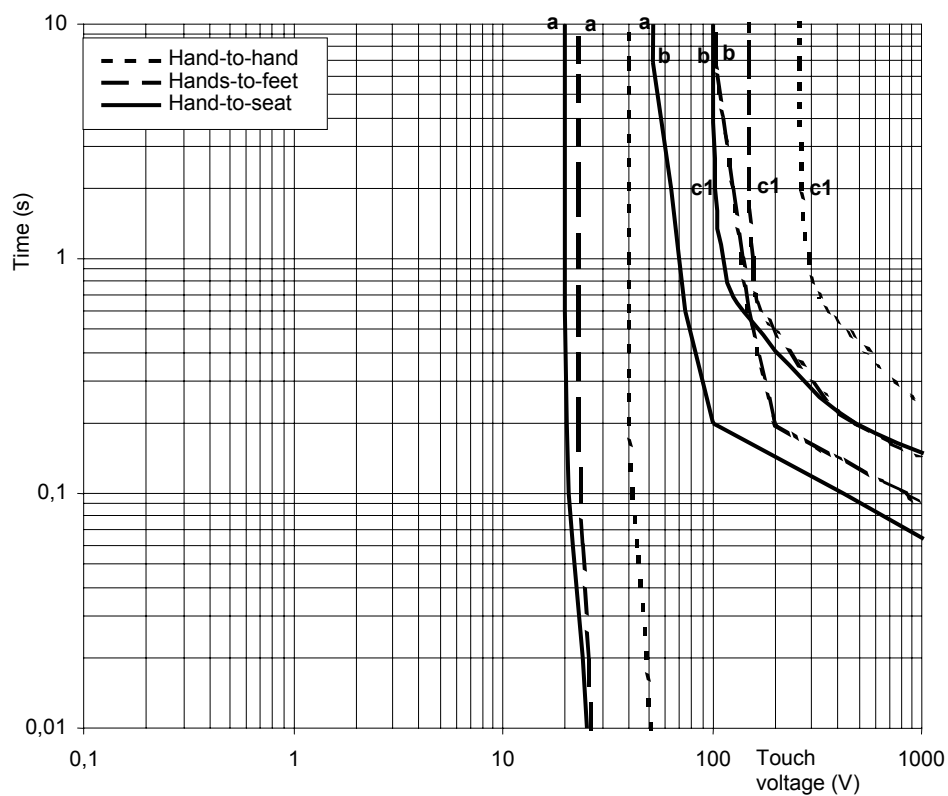


Figure 13 – Conventional time/voltage zones of effects of a.c. current (50/60 Hz) on a person for dry condition and small contact area

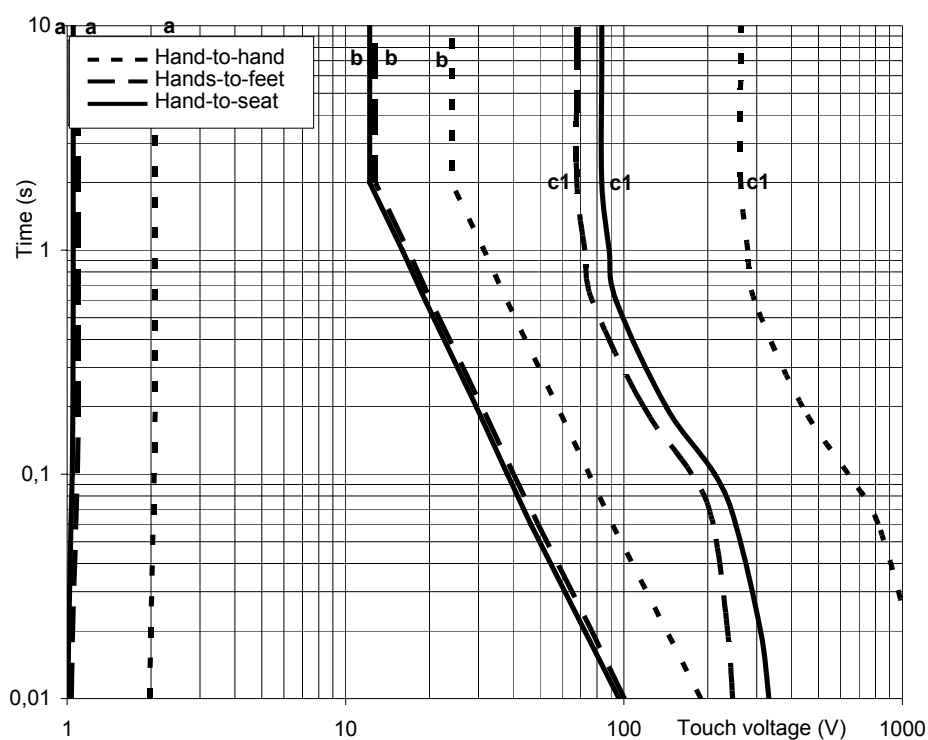


Figure 14 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for saltwater-wet condition and large contact area

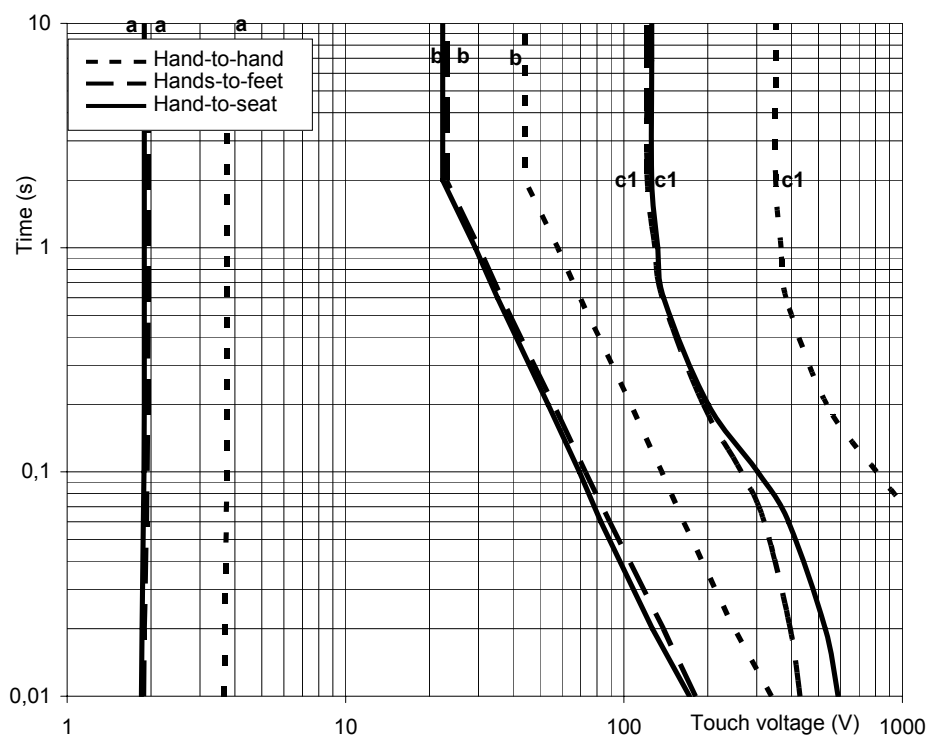


Figure 15 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for saltwater-wet condition and medium contact area

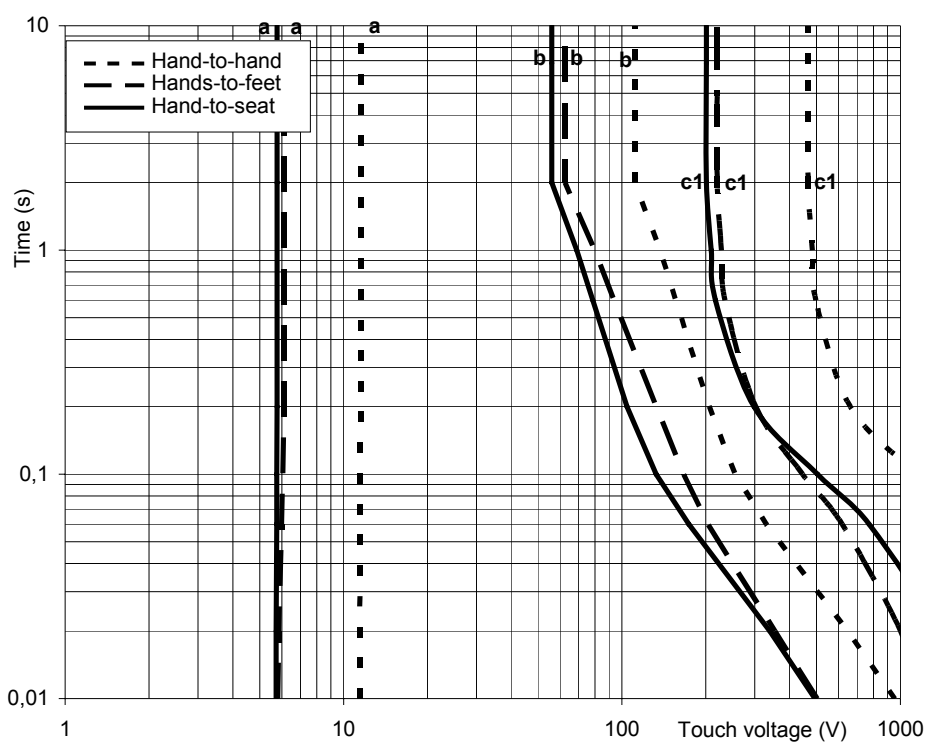


Figure 16 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for saltwater-wet condition and small contact area

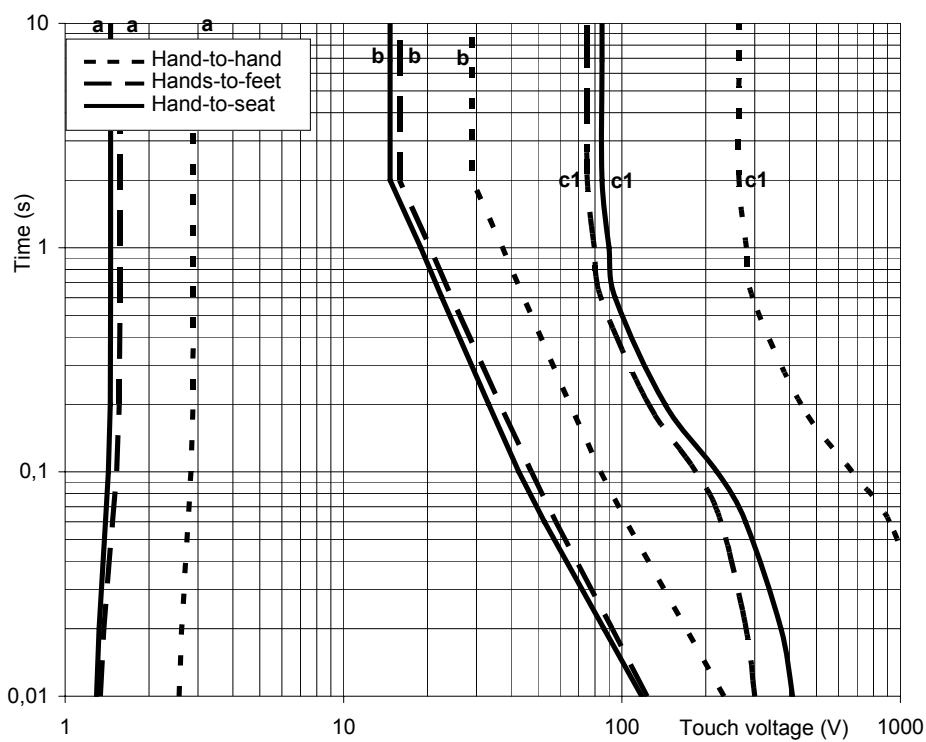


Figure 17 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for water-wet condition and large contact area

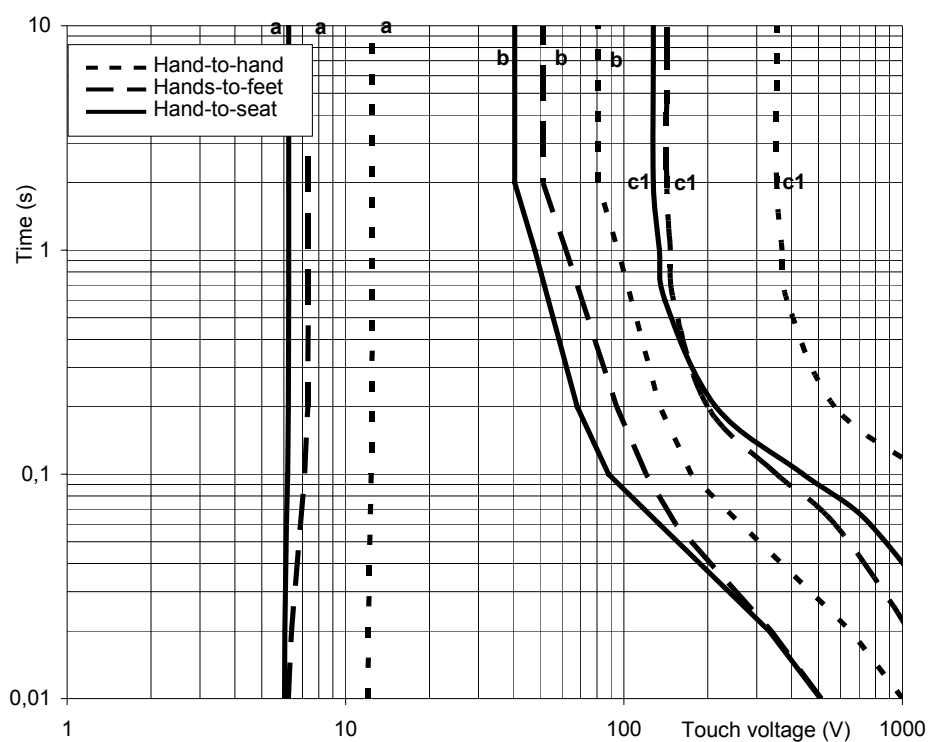


Figure 18 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for water-wet condition and medium contact area

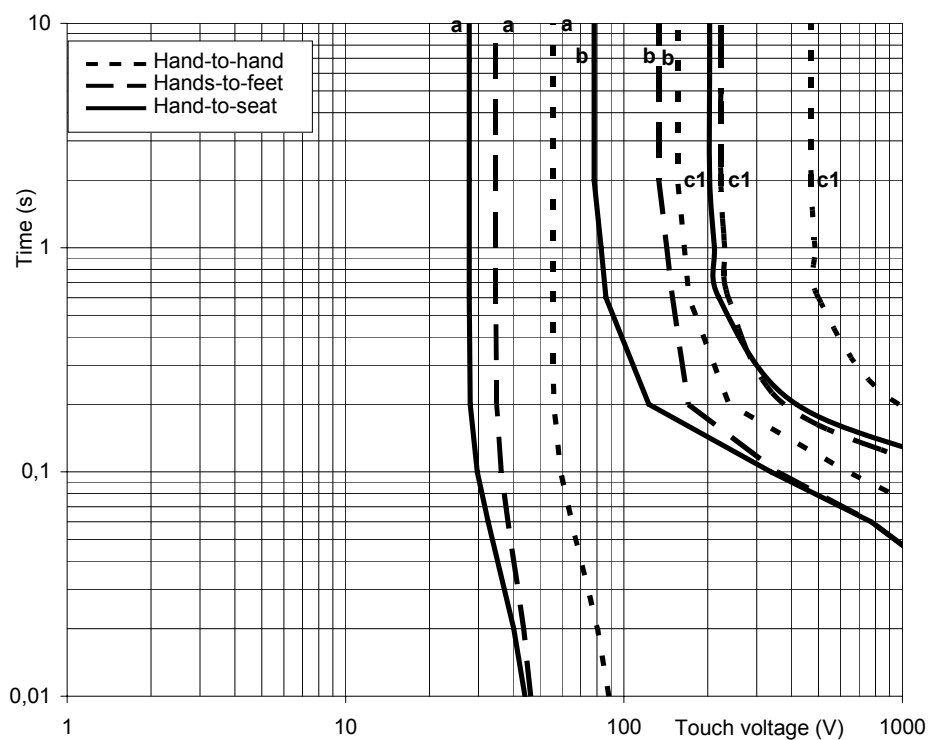


Figure 19 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for water-wet condition and small contact area

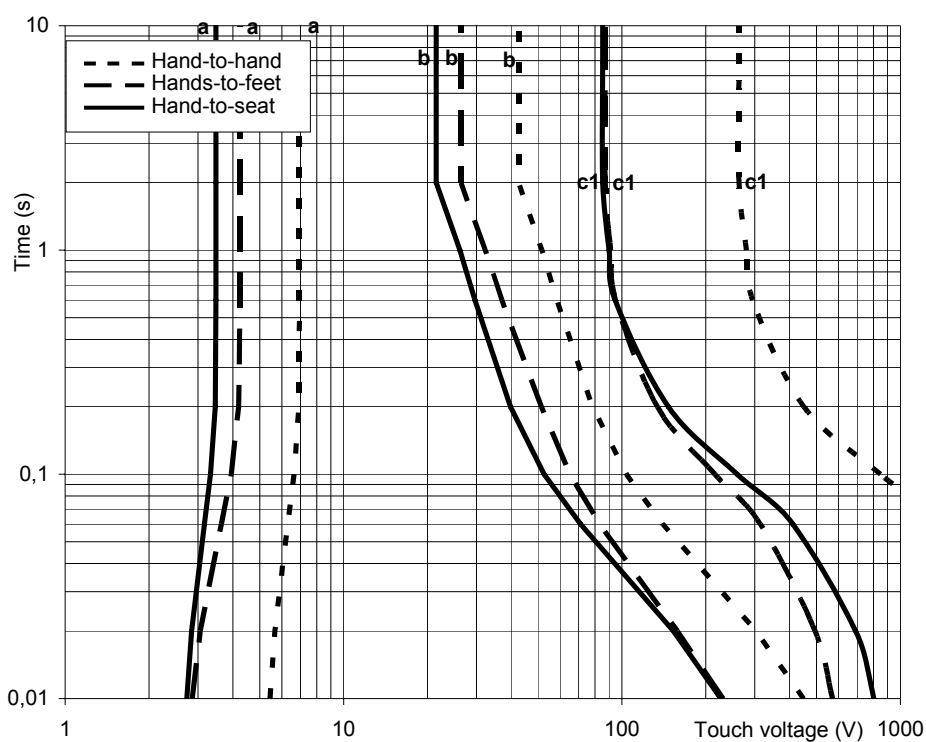


Figure 20 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for dry condition and large contact area

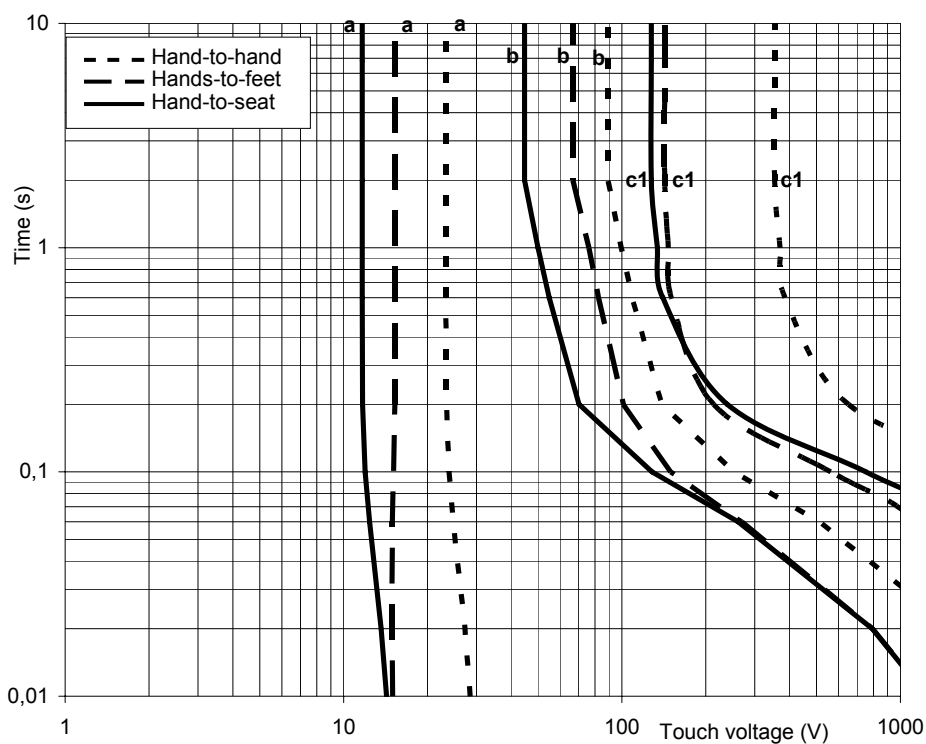


Figure 21 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for dry condition and medium contact area

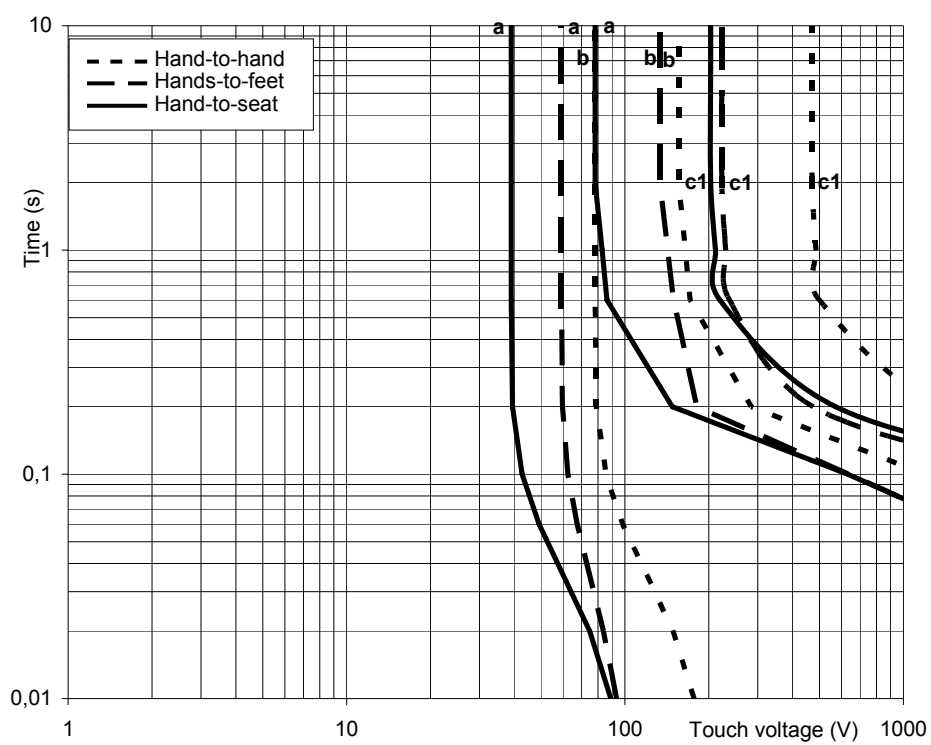


Figure 22 – Conventional time/voltage zones of effects of d.c. current on a person for dry condition and small contact area

Annex A (informative)

Body impedance

A.1 Values of body impedance

Several tables in IEC/TS 60479-1 show values of total hand-to-hand body impedance for the 5th, 50th, and 95th percentiles of a population for dry, water-wet or saltwater-wet conditions. Full-hand contact, large surface electrodes, medium size surface contact and small size surface contact are considered. Certain tables contain values for 50/60 Hz alternating voltage; other tables contains values for direct voltage.

Only values corresponding to the 5th percentile (representing more than 95 % of the population) of the population were considered in this report. The body impedance values corresponding to this percentile of the population are smaller than values corresponding to a higher percentile of the population. Therefore the 5th percentile values are considered conservative from a safety point of view because they correspond to higher current through the body.

When voltage is applied across a body, the skin suffers many local breakdowns of its electrical insulating properties. This process causes lowering of the overall skin resistance, and takes time to occur, generally over several tens of milliseconds. The greater the change in voltage, the greater the change in skin resistance. The measured body impedance reported in the available data sources apply to specific times when measurement was made after the application of voltage across the body. For example, measurements of cadavers were made after 3 s of touch current flow. When a living volunteer subject was involved, the time of measurement was sometimes taken as the impedance was still decreasing from the applied voltage, but the comfort and safety of the volunteer had to be considered. Measurements of living subjects were taken after 0,1 s or 20 ms to 25 ms of touch current flow depending on the potential for harm to the subject. This might be a source of uncertainty in values used for touch voltage calculations because steady-state conditions may not have been reached. Changes in skin resistance are quickly reversible for the lower voltage levels where permanent injury to the skin has not occurred.

Values of total hand-to-hand body impedance for the population (5th, 50th, and 95th percentiles) for the same large area of dry contact, but with direct current (with no a.c. component), are shown in Table 10 of IEC/TS 60479-1.

The tables below are examples of the application of the data in IEC/TS 60479-1.

Table A.1 – Total body impedance in ohms for dry, hand-to-hand, 50/60 Hz a.c., large surface area contact (IEC/TS 60479-1 Table 1)

Touch voltage V	Values in ohms that are not exceeded for the percentile rank		
	5 % of the population	50 % of the population	95 % of the population
25	1 750	3 250	6 100
50	1 375	2 500	4 600
75	1 125	2 000	3 600
100	990	1 725	3 125
125	900	1 550	2 675
150	850	1 400	2 350
175	825	1 325	2 175
200	800	1 275	2 050
225	775	1 225	1 900
400	700	950	1 275
500	625	850	1 150
700	575	775	1 050
1 000	575	775	1 050
Asymptotic value	575	775	1 050

Table A.2 – Total body impedance in ohms for dry, hand-to-hand, d.c., large surface area contact (IEC/TS 60479-1 Table 10)

Touch voltage V	Values in ohms that are not exceeded for the percentile rank		
	5 % of the population	50 % of the population	95 % of the population
25	2 100	3 875	7 275
50	1 600	2 900	5 325
75	1 275	2 275	4 100
100	1 100	1 900	3 350
125	975	1 675	2 875
150	875	1 475	2 475
175	825	1 350	2 225
200	800	1 275	2 050
225	775	1 225	1 900
400	700	950	1 275
500	625	850	1 150
700	575	775	1 050
1 000	575	775	1 050
Asymptotic value	575	775	1 050

The asymptotic values indicated in Tables A.1 and A.2 are the minimum total body impedance values that occur when the skin impedance is completely eliminated, such as when the voltage across the body is very high. At very high voltages, the skin is destroyed, leaving zero skin impedance. Then, without the skin, the total body impedance equals the internal body resistance.

A.2 Models of body impedance

The body impedance model used in this analysis to represent a person's body is a three-component model consisting of a resistor in series with a parallel combination of a resistor and capacitor. The internal body is represented by the series resistor. The parallel combination of resistor and capacitor represents the combined skin at the entry and exit of the touch current. In order to simplify the calculations which can be difficult if two or more voltage-sensitive resistors are operating at different voltages, it is assumed here that either

- the entry and exit skin is identical in area, moisture, etc. to make the model symmetrical, or
- the impedance of one skin contact area is much greater than the impedance of the other skin contact and therefore the lower impedance skin contact can be neglected as insignificant in the calculations leaving only one voltage-sensitive resistor.

A five-component body impedance model that treats the entry skin and exit skin independently would be more versatile and therefore more useful to handle more actual situations. However, the mathematical complexity involved in solving the model would be raised to a higher level.

Figure A.1 shows the model for the hand-to-hand case which was used in all of the measurements of total body impedance. The two hand skin contacts with the electrodes are identical, and therefore they can be combined into a single parallel combination of resistor and capacitor in the model. (When the two skin impedances are identical, the line a–b, shown in the figure below in the lower left-hand circuit diagram, will have no current flowing through it due to the balance of the components, and this equipotential a-b can therefore be eliminated.) The skin capacitor in the three-component model is half the actual skin contact capacitance of each hand because the two hand capacitors are in series. The skin resistor in the model is double the skin contact resistance of each actual hand. The voltage across the skin in the model is double the voltage across the skin contact of each actual hand. The series resistor in the model is equal to the actual internal body resistance (the asymptotic value of body impedance in the table) from hand-to-hand.

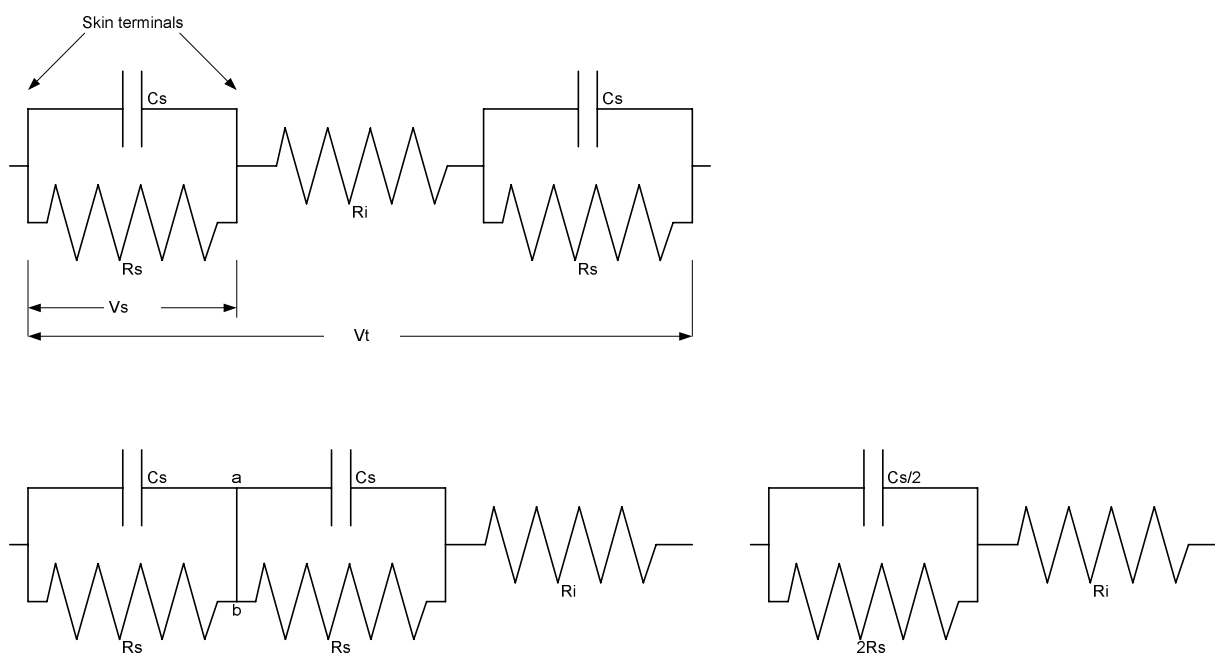


Figure A.1 – Model for hand-to-hand contact

In Figure A.2, the four hand/foot skin contacts with the electrodes are identical, and therefore they can be combined as shown into a single parallel combination of resistor and capacitor in the model. When the skin impedances are identical, the line a-b shown in the figure below in the lower left-hand circuit diagram will have no current flowing through it due to the balance of the components and this equipotential line a-b can therefore be eliminated. The skin capacitor in the model is equal to the skin contact capacitance of each hand. The skin resistor in the model is equal to the skin contact resistance of each actual hand. The voltage across the skin is equal to double the voltage across the skin contact of each actual hand. The series resistor in the model is equal to the hand-to-hand internal body resistance (the asymptotic value of body impedance) modified by a factor derived from Figure 3 of IEC/TS 60479-1 which is the ratio of both-hands-to-feet resistance divided by the hand-to-hand resistance.

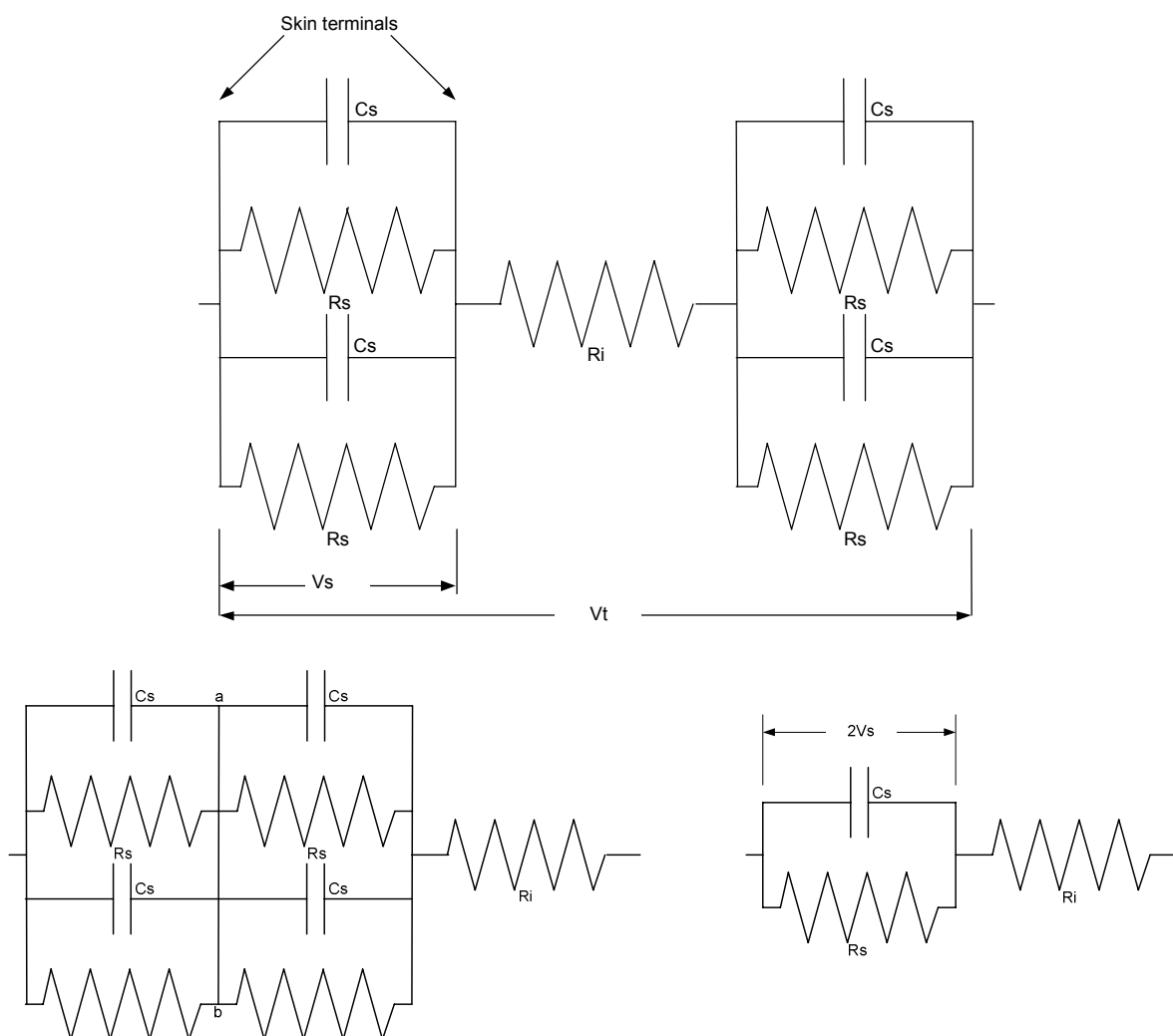


Figure A.2 – Model for both-hands-to-feet contact

In Figure A.3, the impedance of the skin contact with the electrode at the seat is assumed to be very low in value relative to the impedance of the hand skin contact. Therefore, the seat impedance is neglected in the model. The skin capacitor in the model is equal to the skin capacitance of the actual hand contact. The skin resistor in the model is equal to the skin resistance of the actual hand contact. The voltage across the skin in the model is equal to the voltage across the skin of the actual hand contact. The series resistor in the model is equal to the hand-to-hand internal body resistance (the asymptotic value of body impedance) modified by a factor derived from Figure 3 of IEC/TS 60479-1 which is the ratio of hand-to-torso resistance divided by the hand-to-hand resistance.

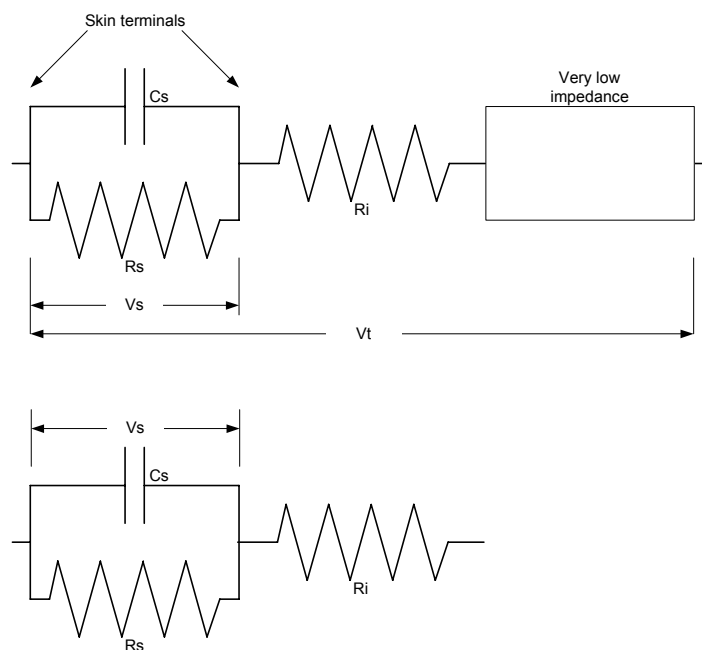


Figure A.3 – Model for hand-to-seat contact

The value of the internal body resistance for the hand-to-hand pathway is assumed to be equal to the asymptotic value of body impedance in the IEC/TS 60479-1 tables. In each table, the asymptotic value is the lowest body impedance value at the high-voltage end where it can be assumed that the skin has no contribution to the total body impedance. This value is modified according to the ratios suggested by Figure 3 of IEC/TS 60479-1 when the pathway of touch current is changed.

The values of skin resistance can span a very wide range depending on the skin contact area and the moisture and impurities associated with the contact.

Annex B (informative)

Touch voltage – Explanation of a method to derive estimates of touch voltage thresholds for startle reaction, strong muscular reactions and ventricular fibrillation from the body impedance tables and current limits in IEC/TS 60479-1

B.1 General

IEC/TS 60479-1 contains information about both body impedance and touch current thresholds. The analysis in this annex suggests a method of combining the body impedance information and the current threshold information to derive touch voltage threshold information that is fully compatible with IEC/TS 60479-1.

This informative annex reviews and explains the approach adopted to develop the new touch voltage thresholds based on this new information in IEC/TS 60479-1.

According to models of the human body, physically larger people tend to have lower internal body impedance as compared to physically smaller people. Studies have been carried out and show that total body impedance and body weight are actually largely independent. However, the small inter-dependence of these variables makes ordinary statistical methods of estimating touch voltages thresholds against the touch current unsuitable. The method used in this report is to assume independence using the 5th percentile figure in IEC/TS 60479-1. This is probably a more reasonable but less conservative approach.

B.2 Calculation methods

B.2.1 Numbers of parameters

The number of combinations that need to be considered from the contributing variables affecting touch voltage thresholds can be very large.

According to IEC/TS 60479-1, many parameters influence the values of the human body impedance. The specific influencing parameters considered in this analysis are shown in Table B.1 and Table B.2.

Table B.1 – Nature and number of parameters influencing the human body impedance taken into consideration by IEC/TS 60479-1

Influencing parameter	Type	Number of parameters	Cumulative number of combinations
Nature of current	a.c. d.c.	2	2
Current path	Hand-to-hand Both-hands-to-feet Hand-to-seat	3	6
Skin condition	Dry condition Water-wet condition Saltwater-wet condition	3	18
Skin contact area	Large area Medium area Small area	3	54
Touch voltage	25 V, 50 V, 75 V, 100 V, 125 V, 150 V, 175 V, 200 V, 225 V, 400 V, 500 V, 700 V and 1 000 V	13	702
Percentile of the population	5 th	1	702

Other parameters will then be introduced within the calculation of touch voltage such as:

Table B.2 – Additional parameters influencing the human body impedance

Influencing parameter	Type	Number of parameters	Cumulative number of combinations
Physiological thresholds	Startle reaction Strong muscular reactions Ventricular fibrillation	3	2 106
Skin capacitance	0,01 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 0,03 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 0,05 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$	3	6 318
Duration of current flow through the human body *	0,01 s, 0,02 s, 0,06 s, 0,1 s, 0,2 s, 0,6 s, 1 s, 2 s, 7 s and 10 s	10	63 180
* The times shown have been selected to show an optimum definition of the logarithmic curves.			

This means that 63 180 individual calculations need to be tabulated. A good way to perform a great number of calculations from the basic data, which are discrete values, is to use a computer spreadsheet.

B.2.2 General method

IEC/TS 60479-1 provides impedance values of the human body for all situations as described in Table B.1 but only for the hand-to-hand current path.

Therefore, all impedance values of the human body for the two other current paths (both-hands-to-both-feet and hand-to-seat) have to be determined for each skin condition and each touch voltage. From these estimations it is possible to calculate the touch voltage by

interpolation for each current threshold. This comparison is made for each value of time duration.

B.2.3 Hypothesis and calculation limit

B.2.3.1 Skin capacitance determination

The first operation is the evaluation of the skin capacitance which is known from experiments [3] to [8]. These experimental values of capacitance are in the range of 0,01 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ to 0,05 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$.

Considering this range, calculations have been made considering the following three capacitance figures:

- minimum value: 0,01 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
- medium value: 0,03 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
- maximum value: 0,05 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$.

From these values and the skin contact area it is possible to have a range of figures for the skin capacitance corresponding to each contact area. Results of calculation of touch voltages have shown that small differences exist over the range of skin capacitance; therefore, a single value of skin capacitance was chosen to be consistent with the body impedances provided by IEC/TS 60479-1.

B.2.3.2 Skin resistance as a function of time

The voltage applied to skin is zero before current begins to flow through the skin but, at the first instant, the touch voltage is present and the current starts to flow. It takes a fraction of a second for the skin resistance to adjust to the potential difference across it. It has been estimated from test results that a decreasing exponential variation of the skin resistance may provide an acceptable approximation of the phenomenon. A time constant of 50 ms is used in this technical report [9]. See Figure B.1.

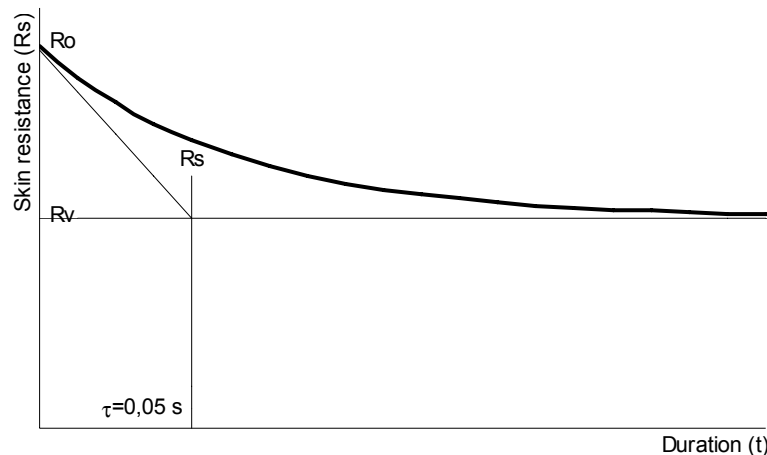


Figure B.1 – Estimation of the variation of skin resistance as a function of electric shock duration

$$(R_s(t) - R_v) = (R_0 - R_v)e^{-t/0,05} \quad (\text{B.1})$$

where

$R_s(0)$ is the skin resistance in absence of touch voltage;

R_v is the skin resistance after an infinite time of voltage application;

τ is the time constant.

The value of R_s is thus also a function of the duration of time of the current flow through the human body. This value $R_s(t)$ is given by the following formula:

$$R_s(t) = R_s + (R_s(0) - R_s) e^{-t/0,05} \quad (\text{B.2})$$

Initially the current will change as the skin resistance adjusts to the final skin voltage. For short durations the current ceases before the skin resistance is fully adjusted. This equation is used between the onset of current flow and the instant when the current is switched off. This will primarily introduce a correction for short durations up to three time constants.

B.2.3.3 Method for measuring the impedance of the human body

Human body impedance values provided by IEC/TS 60479-1 are supposed to correspond to long touch duration. Skin resistance depends on the voltage directly applied to the skin. But in the case of touching “high” voltages in severe conditions (such as water-wet skin and large skin contact area) measurements made on volunteers for the determination of body impedance are very painful. In order to avoid too much pain and risk to these persons, the application time of the touch voltage was reduced. In such cases, the measured impedances may be higher than the actual impedances that might have been achieved if the voltage were applied across the skin for a longer time.

B.2.3.4 Limit values of human body impedances

IEC/TS 60479-1 provides impedances of the human body, but not all cases necessary for calculation of touch voltages corresponding to physiological effects are provided. They have to be calculated indirectly.

- a) Measurement of human body impedance has been performed from a minimum voltage of 25 V. But according to B.2.3.2 the value of R_0 is necessary. In this report a linear extrapolation from the 25 V and 50 V values was used in order to make a conservative estimate of the impedance value of the human body at 0 V.
- b) For severe conditions (water-wet skin or saltwater wet skin) no measurements have been made for touch voltages exceeding 200 V. These test conditions are too severe due to the very strong pain felt by volunteers. At a touch voltage of the order of 1 000 V, only the internal impedance remains and no skin impedance should be considered.

B.2.3.5 Interpolations

Comparison of current flowing through the human body with the current thresholds for different physiological effects may require interpolation between calculated values which was made on a logarithmic plot.

B.2.3.6 Accuracy

Because of the statistical behaviour of the basic data, the accuracy of the touch voltage threshold values derived from calculations cannot be estimated.

B.3 Calculation

B.3.1 Calculation algorithms of the impedance for a.c.

All formulae used in this subclause are directly derived from the model described in Annex A for each current path.

B.3.1.1 Hand-to-hand path

a) Hand-to-hand current path

The starting point corresponds to the values provided by the IEC/TS 60479-1 for the human body impedance Z_{h-h} for a hand-to-hand current path and for each touch voltage $V_{t\ h-h}$ (hand-to-hand).

The hand-to-hand current I_{h-h} is given by:

$$I_{h-h} = \frac{V_{t\ h-h}}{Z_{h-h}} \quad (B.3)$$

For further calculations corresponding to other current paths, it is necessary to calculate the different component parts of the body impedance.

b) Internal resistance

The internal resistance R_{ih-h} corresponds to the resistance of the tissues located between both hands. They include the arms and the torso when current flows transversely. It is difficult to measure such a resistance, but nevertheless an indirect estimation is possible. For higher voltage, measurements of the hand-to-hand impedance becomes asymptotic for a value corresponding to this internal resistance for the current path under consideration. This is explained by the fact that skin breaks down at this voltage and skin resistances and skin capacitances are totally by-passed.

From a practical point of view, the internal resistance is considered equal to the total body impedance measured at a voltage in the order of 1 000 V.

$$R_{ih-h} = Z_{h-h} \text{ at } \approx 1\ 000\ \text{V} \quad (B.4)$$

c) Skin capacitance

Estimation of the skin impedance value is necessary. To do this, estimation of the skin capacitance C_s is needed. This skin capacitance is calculated from the skin capacity variation per area C_s/S_s (from 0,01 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ to 0,05 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$) and from the surface of contact S_c :

$$C_s = S_c \times \left(\frac{C_s}{S_s} \right) \Bigg|_{C_s/S_s=0,01\ \mu\text{F}/\text{cm}^2}^{C_s/S_s=0,05\ \mu\text{F}/\text{cm}^2} \quad (B.5)$$

d) Skin resistance

Calculation of skin resistance is more difficult and has to be made by successive approximation. This can be solved by calculation software.

Skin resistance is part of the total human body impedance. But this resistance depends on the voltage that is directly applied to the skin, which depends itself on the split of the total human body impedance.

This results in finding the right value for the skin resistance R_s such as Z_{h-h} given by the following formula which becomes equal to the value given in IEC/TS 60479-1.

$$Z_{h-h} = \frac{R_{ih-h} \sqrt{(2\pi f)^2 + \left(\frac{R_{ih-h} + 2R_s}{R_{ih-h} \times 2R_s \times \frac{C_s}{2}} \right)^2}}{\sqrt{(2\pi f)^2 + \left(\frac{1}{2R_s \times \frac{C_s}{2}} \right)^2}} \quad (\text{B.6})$$

where

f is the frequency of the current passing through the human body.

NOTE For some cases, it has been impossible to estimate the correct value of R_s in order to match the value provided by IEC/TS 60479-1. This comes from the value of the skin capacitive reactance which becomes too small. For this reason this report uses the minimum value of skin capacitance.

The formula for Z_{h-h} depends also on R_{ih-h} , which corresponds to the resistance of the internal tissue for a hand-to-hand current path.

e) Readjustment of the skin resistance

The value found for R_s corresponds to a resistance for long duration of touch voltage (it has been supposed that the human body impedance value Z_{h-h} corresponds to a long touch voltage duration, long enough for R_s to adjust itself to the voltage directly applied to the skin). For shorter durations (less than three time constants) the skin resistance does not have enough time to be completely adjusted. This calculation adjusts the curve as a function of time as given in B.2.3.2.

$$R_s(t) = R_s + (R_s(0) - R_s) e^{-t/0,05} \quad (\text{B.7})$$

In order to apply this algorithm, an estimation of $R_s(0)$, which is the skin resistance before the electric shock, is needed.

f) Estimation of the initial skin resistance

Linear extrapolation of the curve giving Z_{h-h} as a function of V_t provides an estimation of the initial value of $Z_{h-h}(0)$ which permits the calculation of $R_s(0)$.

The graph below (Figure B.2) enables extrapolation to give the initial value of the hand-to-hand impedance $Z_{h-h}(0)$. Linear extrapolation provides a value of 2 125 Ω for the hand-to-hand body impedance at 0 V.

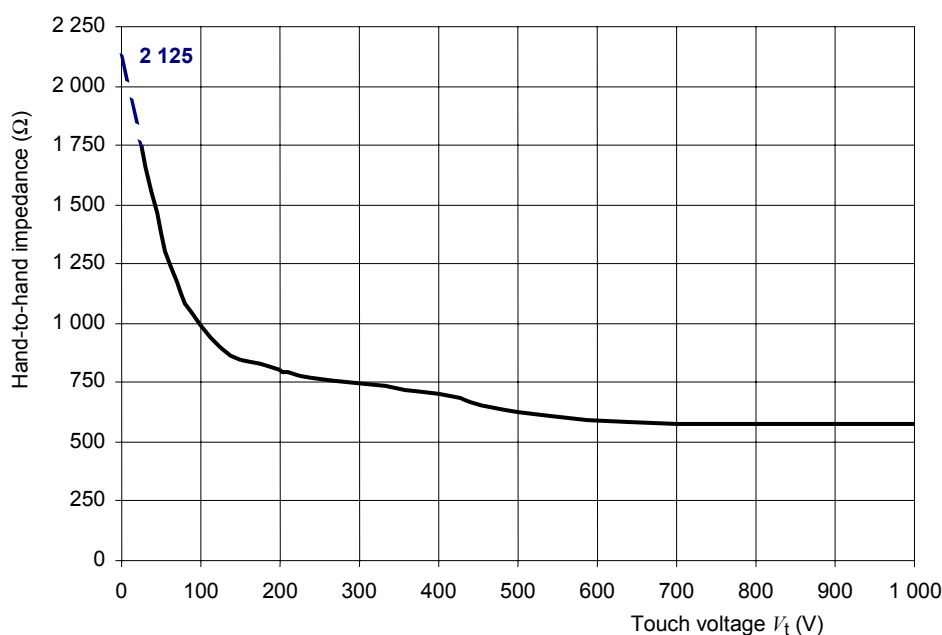


Figure B.2 – Example of extrapolation of the hand-to-hand body impedance at 0 V in dry conditions with large contact area

g) Skin impedance

Once the skin resistance and the skin capacitance are known, it is possible to estimate the skin impedance $Z_s(t)$, for a certain time of current flow, by using the following equation:

$$Z_{sh-h}(t) = \frac{\left(\frac{1}{C_s} \right)}{\sqrt{(2f\pi)^2 + \left(\frac{1}{R_s(t) \times C_s} \right)^2}} \quad (\text{B.8})$$

h) Skin voltage

From the skin impedance value, it is possible to estimate the voltage directly applied to the skin $V_s(t)$ (at the skin “terminals”). This voltage depends on the current flowing through the skin and which is for a hand-to-hand current path equal to the hand-to-hand current calculated in a):

$$V_s(t) = Z_s(t) \times I_{h-h} \quad (\text{B.9})$$

This value of $V_s(t)$ will be used for other current paths through the human body.

All these calculations need to be repeated for different values and combinations of the following parameters:

- touch voltage;
- skin capacitance density;
- skin conditions (dry, water-wet, saltwater-wet);
- time of current flow.

B.3.1.2 Both-hands-to-feet path

a) Calculation of the internal resistance

For different current paths, the resistance of internal tissue has a different value. The new value $R_{i\ h-f}$ for a current path from both-hands-to-both-feet can be estimated from the internal resistance corresponding to hand-to-hand current path ($R_{i\ h-h}$) by the following method.

All total impedance values provided by IEC/TS 60479-1 correspond to a hand-to-hand current path. Internal tissue through which current is flowing corresponds to the internal tissue of the two arms and the trunk when crossed transversely by the current (see Figure B.3).

IEC/TS 60479-1 also provides the possibility of finding internal resistance values corresponding to different current paths by using a percentage of the internal resistance for a hand-to-hand current path.

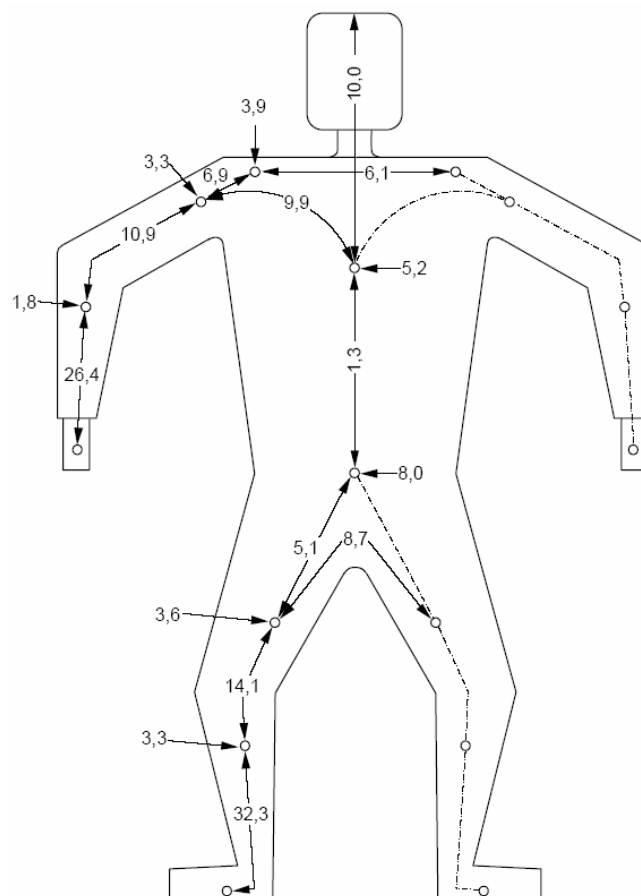


Figure B.3 – Percentage of internal resistance of the human body for the part of the body concerned

- Percentage for hand-to-hand current path:

$$26,4 \% + 10,9 \% + 6,9 \% + 6,1 \% + 6,9 \% + 10,9 \% + 26,4 \% = 94,5 \%$$

- Percentage for both-hands-to-both-feet current path:

$$\frac{(26,4 \% + 10,9 \% + 9,9 \%)}{2} + 1,3 \% + \frac{(5,1 \% + 14,1 \% + 32,3 \%)}{2} = 50,65 \%$$

As the reference corresponds to hand-to-hand current path, for a both-hands-to-both-feet current path, the internal impedance value corresponds to: $\frac{50,65\%}{94,5\%} = 0,536$ times the internal resistance value for a hand-to-hand current path.

It is possible to estimate the internal resistance $R_{i\ h-f}$ of the human body for both-hands-to-both-feet current path from the internal resistance $R_{i\ h-h}$ for a hand-to-hand current path, as follows:

$$R_{i\ h-f} = R_{i\ h-h} \times 0,536 \quad (B.10)$$

b) Both-hands-to-feet current

From the skin impedance value $Z_{s\ h-h}(t)$ calculated for the hand-to-hand current path and from the skin voltage $V_s(t)$ also calculated for the hand-to-hand current path, it is possible to calculate the corresponding value of the current flowing through the human body for the both-hands-to-feet current path I_{h-f} from the following formula:

$$I_{h-f} = 2 \times \frac{V_s(t)}{Z_{s\ h-h}(t)} \quad (B.11)$$

The coefficient 2 comes from the fact that the current through the torso is twice the current through one hand, because in this situation both hands are in contact with a live part are at the same voltage (see model described in Figure A.2 of Annex A).

c) Total impedance

It is now possible to estimate the new total impedance value for the human body by using the following formula:

$$Z_{h-f} = \frac{R_{i\ h-f} \times \sqrt{(2f\pi)^2 + \frac{(R_{i\ h-f} + R_s(t))^2}{(R_{i\ h-f} \times R_s(t) C_s)^2}}}{\sqrt{(2f\pi)^2 + \left(\frac{1}{R_s(t) C_s}\right)^2}} \quad (B.12)$$

Obviously, this new value of both-hands-to-feet human body impedance does not correspond to the same touch voltage as calculated for a hand-to-hand current path. The new touch voltage values correspond to the estimated touch voltage for the hand-to-hand current path.

d) Touch voltage

The new touch voltage $V_{t\ h-f}$ can be estimated in the following way:

$$V_{t\ h-f} = Z_{h-f} \times I_{h-f} \quad (B.13)$$

Again, these calculations have to be made for each parameter mentioned above.

B.3.1.3 Hand-to-seat path

a) Calculation of the internal resistance

In a similar way as explained in B.3.1.2 a), it is possible to estimate the internal resistance of the human body for this particular current path from the internal resistance corresponding to the hand-to-hand current path.

The percentage for one-hand-to-seat current path is as follows:

$$26,4 \% + 10,9 \% + 9,9 \% + 1,3 \% = 48,5 \%$$

For a one-hand-to-seat current path, the internal impedance value corresponds to: $\frac{48,5 \%}{80,7 \%} = 0,601$ times the internal resistance value corresponding to a hand-to-hand current path.

Therefore, it is possible to estimate the internal resistance $R_{i\ h-f}$ of the human body for a hand-to-seat current path from the internal resistance $R_{i\ h-h}$ for a hand-to-hand current path, as follows:

$$R_{i\ h-s} = R_{i\ h-h} \times 0,601 \quad (B.14)$$

b) Total impedance

The method is similar to the one used for the both-hands-to-feet path, with some modifications.

The new value of the total human body impedance is given from the following formula:

$$Z_{h-s} = \frac{R_{i\ h-s} \times \sqrt{(2f\pi)^2 + \frac{(R_{i\ h-f} + R_s(t))^2}{(R_{i\ h-f} \times R_s(t)C_s)^2}}}{\sqrt{(2f\pi)^2 + \left(\frac{1}{R_s(t)C_s}\right)^2}} \quad (B.15)$$

As for the both-hands-to-feet current path, this new value of the hand-to-seat impedance of the human body does not correspond to the same touch voltage as the one calculated for a hand-to-hand path.

c) Hand-to-seat current

From the skin impedance value $Z_{s\ h-h}(t)$ calculated for the hand-to-hand current path and from the skin voltage $V_s(t)$ also calculated for the hand-to-hand current path, it is possible to calculate the corresponding value of the current flowing through the human body for the hand-to-seat current path from the following formula:

$$I_{h-s} = \frac{V_s(t)}{Z_{sh-h}(t)} \quad (B.16)$$

In this situation, the current through the torso is equal to the current through the hand (see model described in Figure A.3 of Annex A).

d) Touch voltage

The new touch voltage $V_{t\ h-s}$ is estimated in the following way:

$$V_{th-s} = Z_{h-s} \times I_{h-s} \quad (B.17)$$

New calculations have to be made for the different parameters mentioned above.

B.3.2 Algorithms of calculation of voltage thresholds in a.c. current

B.3.2.1 Hand-to-hand path

For each touch voltage V_{th-h} , values for Z_{h-h} and I_{h-h} have been estimated. It is now possible to draw graphics representing currents through the human body as a function of the touch voltages V_{h-h} .

In addition, values of the minimum thresholds corresponding to the physiological effects considered need to be superimposed. The thresholds, for the hand-to-hand current path, are as shown in Table B.3:

Table B.3 – Maximum a.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered and for a hand-to-hand current path

Current threshold (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Startle reaction	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Strong muscular reaction	200	135	73	55	37	20	15	10	5	5
Ventricular fibrillation	1 250	1 238	1 175	1 000	650	200	125	105	100	100

For a current duration of 200 ms, the touch current line crosses the 0,5 mA startle reaction (SR) current threshold curve at 0,5 V, the 37 mA muscular effect (ME) current threshold curve at 35 V and the 650 mA ventricular fibrillation (VF) current threshold curve at 438 V (see Figure C.1).

The touch current is a function of the touch voltage and corresponds to the body impedance characteristic.

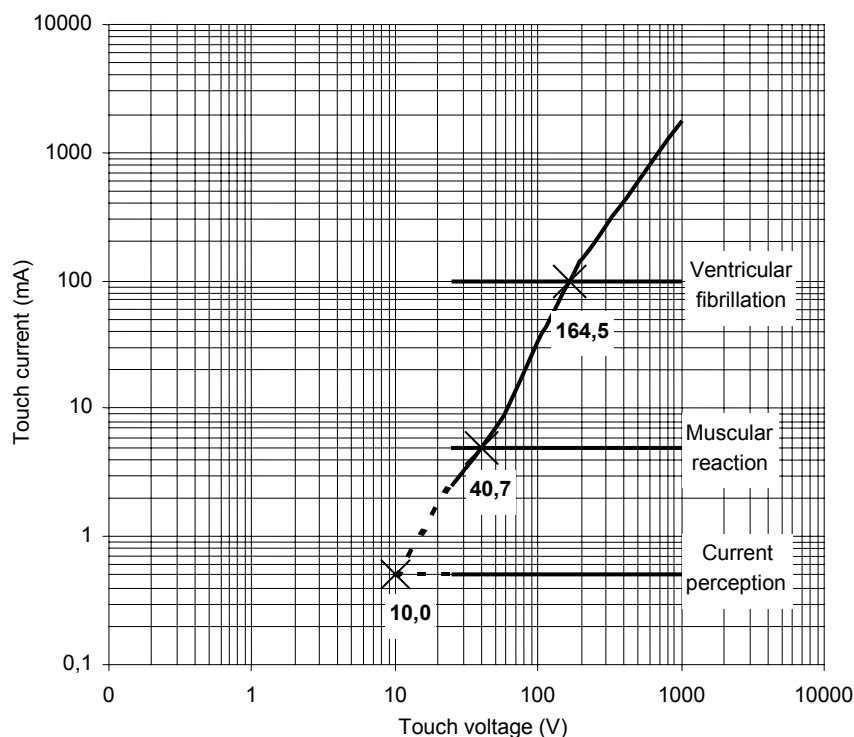


Figure B.4 – Example of diagram for the estimation of the strong muscular reactions and ventricular fibrillation threshold for a.c. current hand-to-hand current path, large contact area and dry condition for a current duration of 10 ms

In the example given in Figure B.4, the curves plotted in log-log axis systems seem to be rectilinear. It may thus be adequate to calculate the values corresponding to the crosses of the curves by using logarithmic interpolation.

All such calculations described above shall be made for different values of the following parameters:

- status of the skin (dry, water-wet, salt water-wet);
- skin contact area (small, medium, large);
- time for the current flow.

B.3.2.2 Both-hands-to-feet path

A similar method applies for this current path through the human body. Different values of minimum current thresholds apply as shown in Table B.4:

Table B.4 – Maximum a.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for a both-hands-to-feet current path

Current threshold (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Startle reaction	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Strong muscular reaction	400	270	146	110	74	40	30	20	10	10
Ventricular fibrillation	500	495	470	400	260	80	50	42	40	40

Here again, calculations have to be made for all the parameters described above.

B.3.2.3 Hand-to-seat path

The same method applies as previously, using the following minimum current threshold values as shown in Table B.5:

Table B.5 – Maximum a.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for a hand-to-seat current path

Current threshold (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Startle reaction	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Strong muscular reaction	200	135	73	55	37	20	15	10	5	5
Ventricular fibrillation	714	707	671	571	371	114	71	60	57	57

Here again, calculations have to be made for all the parameters described above.

B.3.2.4 Voltage/time diagrams

Once all the calculations described above have been made, it is then possible to draw voltage/time diagrams by gathering the values corresponding to similar applications (current path, skin condition, skin contact area) but for increasing durations of current flow.

Some simplifications are needed:

All calculations have been performed for three values of the skin capacitance density (low, medium and high) (see B.2.2.1). For reasons of safety of persons, it is possible to select the value of the capacity resulting in the minimum voltage threshold.

With this simplifying hypothesis, it is now possible to draw the curves of voltage/time thresholds corresponding to the time/current thresholds of IEC/TS 60479-1. All figures are provided in Clause 5.

B.3.3 Algorithms of calculation of the impedance for d.c. current

Calculations for d.c. current are simpler than for a.c. current because it is possible to neglect the influence of the skin capacitances. The method used is similar to the one used for a.c. current.

B.3.3.1 Hand-to-hand path

a) Hand-to-hand current

IEC/TS 60479-1 provides values for the resistance of the human body R_{h-h} for a hand-to-hand path and for each touch voltage V_{th-h} (hand-to-hand).

The hand-to-hand current I_{h-h} is given by:

$$I_{h-h} = \frac{V_{th-h}}{Z_{h-h}} \quad (B.18)$$

b) Internal resistance

As with a.c. current, the internal resistance $R_{i\ h-h}$ corresponds to the asymptotic value of the hand-to-hand impedance curve as a function of the touch voltage. In fact the same physiological effects appear with d.c. current.

$$R_{i\ h-h} = Z_{h-h}(1\ 000) \quad (\text{B.19})$$

c) Skin resistance

The human body resistance is equal to the sum of the two skin resistances of both hands and of the internal tissue resistance. Therefore it is now possible to estimate the skin resistance of one single hand from the following formula:

$$R_s = \frac{Z_{h-h} - R_{i\ h-h}}{2} \quad (\text{B.20})$$

d) Readjustment of skin resistance

As with a.c. current, skin resistance requires a fraction of a second to be tuned correctly to its final value, depending on the voltage which is directly applied to it. The skin resistance $R_s(t)$ at a given time t is estimated by using the following formula:

$$R_s(t) = R_s + (R_s(0) - R_s) e^{-t/0,05} \quad (\text{B.21})$$

in which $R_s(0)$ corresponds to the initial value of R_s when the skin voltage is zero.

e) Estimation of initial skin resistance

This estimation is possible by linear extrapolation of the curve giving R_{h-h} function of V_t for value of V_t equal to 0 V.

From this initial value of the hand-to-hand resistance $R_{h-h}(0)$, a calculation similar to c) and d) is possible in order to determine the initial value of the skin resistance $R_s(0)$.

f) Skin voltage

Here again it is possible to calculate the voltage directly applied to the skin V_s . This voltage is estimated in the same way as for a.c. current.

$$V_s = R_s(t) \times I_{h-h} \quad (\text{B.22})$$

Again, this value of V_s will be used for other current paths through the human body.

All these calculations described above have to be made for different values of the following parameters:

- touch voltage;
- skin condition (dry; water-wet, saltwater-wet);
- contact area (small, medium, large);
- current flow duration.

B.3.3.2 Both-hands-to-feet path

a) Internal resistance

For a different current path, the internal impedance which is estimated to be a resistance, is different. The correction factor applied for a.c. current is applicable for the d.c. current.

$$R_{ih-f} = R_{ih-f} \times 0,628 \quad (B.23)$$

b) Both-hands-to-feet current

The both-hands-to-feet current is determined in a similar way as for the a.c. current.

$$I_{h-f} = 2 \times \frac{V_s}{Z_{h-h}} \quad (B.24)$$

The same coefficient of 2 also applies.

c) Total impedance

The estimation of the total resistance is much simpler in this case than for a.c. current because phase angles due to the presence of skin capacitances does not have to be taken into consideration. The following formula applies:

$$R_{m-p} = 2 \times R_p(t) + R_{im-p} \quad (B.25)$$

d) Touch contact

The new touch voltage $V_{c\ m-p}$ is obtained in the following way:

$$V_{c\ m-p} = R_{m-p} \times I_{m-p} \quad (B.26)$$

Nonetheless, these calculations need to be made for the different parameters mentioned above.

B.3.3.3 Hand-to-seat path

a) Internal resistance

As for the both-hands-to-feet current path, which differs from the hand-to-hand current path, which is the reference of calculation, the internal resistance is different. The same correction factor used in a.c. current is also applicable for d.c.

$$R_{ih-s} = R_{ih-h} \times 0,601 \quad (B.27)$$

b) Hand-to-seat current

The hand-to-seat current can now be estimated by the following formula:

$$I_{h-s} = \frac{V_s}{Z_{h-h}} \quad (B.28)$$

It must not be forgotten that in this situation the current through the torso is equal to the current through the hand.

c) Total resistance

The new value of the total resistance of the human body is simply the algebraic sum of the skin resistance and of the internal resistance:

$$R_{h-s} = R_{ih-s} + R_s(t) \quad (\text{B.29})$$

d) Touch voltage

The new touch voltage V_{th-s} is obtained in the following way:

$$V_{th-s} = R_{h-s} \times I_{h-s} \quad (\text{B.30})$$

Nonetheless these calculations have to be made for the different parameters described above.

B.3.4 Algorithms of calculation of the voltage thresholds for d.c. current

B.3.4.1 Hand-to-hand path

In the same way as for a.c. current, the values of R_{h-h} and of I_{h-h} for each value of V_{h-h} have been estimated. It is now possible to draw the curve giving the current through the human body I_{h-h} as a function of the touch voltages V_{h-h} .

If the values of the current thresholds for the desired physiological effects are superimposed on these curves, it is possible to estimate the values of the voltage thresholds by calculating the abscissa of the crossing points of these curves.

The values for the minimum thresholds in current for this current path are as shown in Table B.6.

Table B.6 – Maximum d.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for the hand-to-hand current path

Current threshold (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Startle reaction	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Strong muscular reaction	200	153	99	81	62	40	33	25	25	25
Ventricular fibrillation	1 250	1 238	1 175	1 000	650	400	375	350	350	350

In this example, curves plotted in a log-log scale appear to be rectilinear. It may appear opportune to calculate the values at the crossings of curves by logarithmic interpolation. However, the curves are not always rectilinear in this log-log axis system which is why it both types of known interpolations should be used (see 4.2.4).

All these calculations described above need to be made for the values of the following parameters:

- skin condition (dry, water-wet, saltwater-wet);
- contact area (small, medium, large);
- population percentile;
- current flow duration.

B.3.4.2 Both-hands-to-feet path

The same method applies for this current path through the human body. Different values for the minimum current thresholds have to be used as shown in Table B.7.

Table B.7 – Maximum d.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for the both-hands-to-feet current path

Current threshold (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Startle reaction	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Strong muscular reaction	200	153	99	81	62	40	33	25	25	25
Ventricular fibrillation	500	495	470	400	260	160	150	140	140	140

Once again the same calculations have to be made for all the parameter listed above.

B.3.4.3 Hand-to-seat path

Again, methods similar to the ones used previously apply with minimum threshold values in current as shown in Table B.8:

Table B.8 – Maximum d.c. current threshold corresponding to current flow duration for each current effect considered for the hand-to-seat current path

Current threshold (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Startle reaction	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Strong muscular reaction	200	153	99	81	62	40	33	25	25	25
Ventricular fibrillation	714	707	671	571	371	229	214	200	200	200

Again, the same calculations have to be made for all the parameters listed above.

B.3.4.4 Time/voltage diagrams

As for the a.c. current, it is now possible to draw the time/voltage diagrams by gathering the values corresponding to the same applications (current path, skin condition, contact area) but for increasing current flow durations.

Some simplification is needed for d.c. current concerning the selection among two types of interpolations. As for a.c. current, and for favouring the safety of persons, the selection will be made on the type of interpolation providing the smallest voltage threshold.

With this simplifying hypothesis it is now possible to draw the curves of the time/voltage zones corresponding to the time/current zones of IEC/TS 60479-1. All figures are provided in Clause 5.

Annex C (informative)

Determination of voltage thresholds under selected conditions

C.1 Simplified examples

For those situations where the following criteria are met:

- current path corresponding to both-hands-to-feet,
- large contact area,

Table C.1 is an example of the results.

Table C.1 – Example of touch voltage thresholds for a.c. and d.c. corresponding to strong muscular effects and ventricular fibrillation for the above specified environmental situations

Minimum touch voltage V		Water-wet	Dry
Startle reaction	a.c.	0,4	1
	d.c.	2	4
Strong muscular reaction	a.c.	7	11
	d.c.	16	26
Ventricular fibrillation	a.c.	24	33
	d.c.	75	87

These situations correspond to Figures 8, 9, 17 and 20.

C.2 Common situations

The following examples corresponding to common situations illustrate the way to use Table 2:

a) Bathroom

A person may be standing on a wet floor with bare hands and bare feet. When grasping a faulty electric towel dryer, a touch voltage not exceeding 24 V a.c. will not cause ventricular fibrillation.

b) Restrictive conductive location

A person repairing a large metallic tank from the inside may be permanently touching the metallic tank with one hand while touching a live conductor with the other hand. Assuming that the person is not sweating, a touch voltage less than 104 V a.c. will not cause inability to let-go. This value corresponds to dry moisture and a hand-to-hand current path with a small contact area.

c) Swimming pools

Water from swimming pools contains chemicals which will increase conductivity and swimmers have bare hands and bare feet. When playing, wet people may touch electrical appliances and could support for a long period a touch voltage less than 11 V a.c. which corresponds to medium contact area for inability to let-go. For swimmers immersed in a pool, the allowable touch voltage threshold will be much lower.

Annex D (informative)

Limits of applicability

D.1 Higher frequency alternating voltages and currents

This technical report discusses only 50/60 Hz sinusoidal alternating voltage and pure direct voltage having no significant alternating component. Higher frequency alternating voltage including complex mixed frequency sources and composite a.c. and d.c. waveforms would require a more complex body impedance model and adjustments of the current thresholds for the unwanted physiological effects.

As frequency rises above 50/60 Hz, the human body impedance decreases (see Figure 12 of IEC/TS 60479-1) while the physiological effect of current decreases [2]. However, the decrease in body impedance only begins to occur at a lower frequency than the frequency at which the increase in threshold current for the physiological effect begins to occur. The result is that as frequency rises from 50/60 Hz, the threshold touch voltage for a physiological effect such as startle reaction, inability to let go, or ventricular fibrillation decreases before it begins to increase with rising frequency.

IEC 60990 makes proper allowance for high-frequency touch current according to the conditions given by IEC/TS 60479-1. The body impedance model is designed to represent the body for voltages from 100 V to 240 V, but can be an oversimplification under some conditions.

D.2 Immersion

Voltage thresholds are not easily used for applications that involve immersion of body parts, such as products used in swimming pools, spas, bathtubs, and the like. One complication is that the presence of the body in the water distorts the electric field in the water. Another complication is the large number of possible pathways for current to enter and exit the body over very large areas of skin. Movement of the body in water with respect to the direction of the electric field can change the touch current and therefore the effect of the electric field on the body. The orientation of the body with respect to the electric field determines the amplitude of the current through different parts of the body, and that affects the types of physiological effects that can occur as a result of the electric field.

Electric current through an immersed swimmer's body can include the person's head. The effect of current through the head can interfere with the person's ability to swim. Drowning can occur in addition to the other physiological effects including muscular effects that are normally addressed.

Without current-limiting in the electrical source, adverse effects can be caused when a person is immersed in water with only a few volts available. Products used in immersed body applications generally should be current-limited and evaluated based on the current-limiting features, not voltage. Therefore this report does not cover situations where the human body is immersed.

D.3 Medical applications

Special consideration needs to be given to medical environments where highly current-sensitive patients (e.g. catheterized patients) may be present. Both current and voltage thresholds might be considerably different for these special situations. The voltage threshold information developed as part of this work are not intended to apply to medical devices or medical environments.

Bibliography

- [1] WHITAKER, H.B. "*Electric shock as it pertains to the Electric fence*", 1939 Underwriters Laboratories Inc.
 - [2] HART, W. F., "*A Five-Part Resistor-Capacitor Network for Measurement of Voltage and Current Levels Related to Electric Shock and Burns*", in J. E. Bridges, G. L. Ford, I. A. Sherman, and M. Vainberg (eds.) "*Electrical Shock Safety Criteria*", 1985, Pergamon Press, New York
 - [3] FREIBURGER, H. "*The electrical resistance of the human body to commercial direct and alternating currents*", Springer 1934
 - [4] CONRAD, HAGGARD and TEARE, "*Electrical studies of living tissues*", Electrical engineering, July 1936
 - [5] BIEGELMEIER, "*Experiments on the electrical impedance of human body*", IEC, TC64 WG4, October 1976
 - [6] OSYPKA, "*Quantitative investigation of current strength, duration and routing in a.c. electrocution accidents involving human beings and animals: their evaluation and application to power installations*", Elektromedizin band 8/1963, Nr3
 - [7] BARNETT, "*The phase angle of normal human skin*", J. Physiol. 1938 Vol 93
 - [8] REILLY, "*Electrical stimulation and electropathology*", Cambridge university press 1992
 - [9] Underwriters Laboratories Inc, "*Development of test equipment and methods for measuring potentially lethal and otherwise damaging current levels*", CPSC-C-79-1034, 1981, revised 1982
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	61
INTRODUCTION.....	63
1 Domaine d'application	64
2 Références normatives	64
3 Termes et définitions	65
4 Conditions et valeurs de seuils	66
4.1 Généralités.....	66
4.2 Effets physiologiques du courant de contact.....	66
4.3 Impédance du corps	70
4.4 Impédances externes au corps	71
4.5 Autres facteurs pouvant affecter les seuils de tension	71
4.6 Seuils de tension de contact en fonction de la durée	72
4.7 Seuils de tension de contact pour de longues durées	73
5 Seuils de tension de contact – Présentation des courbes tension-temps.....	75
Annexe A (informative) Impédance du corps humain.....	86
Annexe B (informative) Tension de contact – Explication de la méthode de calcul des seuils de tension de contact pour la réaction de tressaillement, les forts effets musculaires et la fibrillation ventriculaire à partir des tableaux d'impédances et des limites de courant de la CEI/TS 60479-1	92
Annexe C (informative) Détermination des seuils de tension dans certaines conditions	109
Annexe D (informative) Limite d'utilisation	111
Bibliography.....	113
Figure 1 – Seuils physiologiques en courant alternatif (50/60-Hz) et continu pour un courant circulant au travers du corps humain entre main-main (transversal)	68
Figure 2 – Seuils physiologiques en courant alternatif (50/60-Hz) et continu pour un courant circulant au travers du corps humain entre les deux mains et les deux pieds (longitudinal).....	68
Figure 3 – Seuils physiologiques en courant alternatif (50/60-Hz) et continu pour un courant circulant au travers du corps humain entre main et siège (longitudinal)	69
Figure 4 – Organigramme à utiliser pour le choix de la figure appropriée fournissant la durée maximale pour chaque seuil de tension de contact.....	73
Figure 5 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une grande surface de contact	76
Figure 6 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une surface moyenne de contact.....	77
Figure 7 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une petite surface de contact	77
Figure 8 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions humides et pour une grande surface de contact.....	78

Figure 9 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions humides et pour une surface moyenne de contact.....	78
Figure 10 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions humides et pour une petite surface de contact.....	79
Figure 11 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions sèches et pour une grande surface de contact.....	79
Figure 12 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions sèches et pour une surface moyenne de contact.....	80
Figure 13 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions sèches et pour une petite surface de contact.....	80
Figure 14 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une grande surface de contact.....	81
Figure 15 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une surface moyenne de contact.....	81
Figure 16 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une petite surface de contact.....	82
Figure 17 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions humides et pour une grande surface de contact	82
Figure 18 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions humides et pour une surface moyenne de contact	83
Figure 19 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions humides et pour une petite surface de contact.....	83
Figure 20 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions sèches et pour une grande surface de contact.....	84
Figure 21 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions sèches et pour une surface moyenne de contact	84
Figure 22 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions sèches et pour une petite surface de contact.....	85
Figure A.1 – Modèle pour un contact main-main	89
Figure A.2 – Modèle pour un contact deux-mains-deux-pieds	90
Figure A.3 – Modèle pour un contact main-siège	91
Figure B.1 – Estimation de la variation de la résistance de peau en fonction de la durée de choc électrique.....	94
Figure B.2 – Exemple d'extrapolation de l'impédance main-main à 0 V dans des conditions sèches avec une large surface de contact.....	98
Figure B.3 – Pourcentage de la résistance interne d'un corps humain pour la partie concernée.....	99
Figure B.4 – Exemple de diagramme utilisé pour le calcul des seuils de réaction de tressaillement, de fort effet musculaire et de fibrillation ventriculaire en courant alternatif pour un passage du courant main-main, avec de grandes surfaces de contact dans des conditions sèches et pour une durée de passage du courant de 10 ms	103
Tableau 1 – Valeurs des seuils de courant pour chaque condition et pour une longue durée	70

Tableau 2 – Tableaux fournissant les seuils minimaux de tension de contact pour des courants alternatifs et continus correspondant à des courants de réaction de tressaillement, de fort effet musculaire et de fibrillation ventriculaire (voir les notes du Tableau 1)	74
Tableau 2a – Courants de réaction de tressaillement pour un courant alternatif 50/60 Hz.....	74
Tableau 2b – Forts effets musculaires pour un courant alternatif 50/60 Hz.....	74
Tableau 2c – Fibrillation ventriculaire pour un courant alternatif 50/60 Hz.....	74
Tableau 2d – Courants de réaction de tressaillement en courant continu	75
Tableau 2e – Forts effets musculaires en courant continu.....	75
Tableau 2f – Fibrillation ventriculaire en courant continu.....	75
Tableau A.1 – Impédance totale du corps humain en ohms pour des conditions sèches, un trajet main-main, en courant alternatif (50/60 Hz), grande surface de contact (Tableau 1 de la CEI/TS 60479-1).....	87
Tableau A.2 – Impédance totale du corps humain en ohms pour des conditions sèches, un trajet main-main, en courant continu, grande surface de contact (Tableau 10 de la CEI/TS 60479-1).....	87
Tableau B.1 – Nature et nombre des paramètres influençant l'impédance du corps humain considérés par la CEI/TS 60479-1	93
Tableau B.2 – Paramètres additionnels influençant l'impédance du corps humain	93
Tableau B.3 – Seuils maximaux du courant alternatif correspondant à une durée de circulation du courant pour chaque effet considéré et pour un cheminement du courant main-main.....	102
Tableau B.4 – Seuils maximaux en courant alternatif pour des durées de passage du courant entre deux-mains-deux-pieds et pour chaque effet du courant.....	103
Tableau B.5 – Seuils maximaux en courant alternatif pour des durées de passage du courant entre main-siège et pour chaque effet du courant.....	104
Tableau B.6 – Seuils maximaux en courant continu correspondant à une durée de passage du courant pour chaque effet physiologique considéré et pour un cheminement main-main	107
Tableau B.7 – Seuils maximaux en courant continu correspondant à une durée de passage du courant pour chaque effet considéré et pour un cheminement deux-mains-deux-pieds	108
Tableau B.8 – Seuils maximaux en courant continu correspondant à une durée de passage du courant pour chaque effet considéré et pour un cheminement du courant main-siège	108
Tableau C.1 – Exemple de seuils de tension pour un courant alternatif et continu correspondant à des effets musculaires et à la fibrillation ventriculaire pour les conditions mentionnées ci-dessus.....	109

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

EFFETS DU COURANT SUR L'HOMME ET LES ANIMAUX DOMESTIQUES –

**Partie 5: Valeurs des seuils de tension de contact
pour les effets physiologiques**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

La CEI/TR 60479-5, qui est un rapport technique, a été établie par le comité d'études 64 de la CEI: Installations électriques et protection contre les chocs électriques.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
64/1585/DTS	64/1611/RVC

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60479, présentées sous le titre général *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTRODUCTION

Ce rapport technique fournit la méthodologie pour calculer les seuils de tension prévus pour servir de lignes directrices aux comités d'études de la CEI dans le choix et l'utilisation des limites de tension pour la protection contre les chocs électriques. Les comités d'études peuvent utiliser cette méthodologie pour recalculer les seuils de tensions proposés ou pour déterminer de nouvelles valeurs de seuils de tension basées sur d'autres cheminements du courant, d'autres valeurs de seuils de courant, des valeurs différentes de fréquences pour le courant alternatif, d'autres valeurs de capacités de peau, etc.

Il faut déterminer l'amplitude du courant et son cheminement au travers du corps d'une personne pour calculer le type et la gravité d'un effet physiologique pouvant être causé par l'électricité. Cependant, pour la conception d'un matériel électrique, il est avantageux de pouvoir prédire si des effets physiologiques indésirables sont possibles ou probables ayant seulement une information concernant les niveaux de tension sur les surfaces conductrices accessibles. Dans la mesure où la tension maximale admissible est suffisamment en dessous des circonstances capables de générer un courant de contact suffisant pour causer un effet physiologique, alors les garanties normalement prévues pour éviter l'apparition de ces effets physiologiques peuvent être réduites voire éliminées. Les tensions en dessous des niveaux critiques qui ne sont pas susceptibles d'être dangereux sont dans ce cas appelées très basses tensions (TBT). Sur la base de ces informations, les comités d'études peuvent désirer réviser leurs valeurs définies comme très basses tensions.

Le but de ce rapport technique étant de calculer les seuils de tension de contact correspondant aux zones d'effets physiologiques proposées dans les Figures 20 et 22 de la CEI/TS 60479-1, l'introduction de telles méthodes donne aux concepteurs la possibilité de fournir une grande variété de circuits fournissant les niveaux attendus de protection des utilisateurs en regard d'un plus large éventail de circonstances considéré antérieurement.

Les effets physiologiques correspondant aux valeurs de seuils de tension sont les mêmes que ceux pour les seuils de courant tels que proposés dans la CEI/TS 60479-1. Les effets physiologiques considérés dans ce rapport technique sont le courant de tressaillement, les effets provoquant de fortes contractions musculaires involontaires telles que le non-lâcher et la fibrillation ventriculaire. Les seuils de courant sont basés sur les courbes a, b et c_1 de la CEI/TS 60479-1 qui reste la norme principale. Les seuils de tension de contact sont associés aux seuils de courant de contact par l'intermédiaire de l'impédance du corps humain selon la loi d'Ohm. Cependant, dans ce cas de figure, l'utilisation de la loi d'Ohm n'est pas directe. L'impédance du corps humain est fonction d'un certain nombre de paramètres comprenant la tension appliquée au corps humain, le cheminement du courant, la surface de contact entre la peau et la partie conductrice, le niveau d'humidité de la surface de contact et la durée d'application de la tension (ou du courant) au corps humain. Lorsque la tension est appliquée au corps humain et que le courant commence à circuler, la composante résistive de la peau change vers une plus faible valeur en quelques dizaines de millisecondes.

Ce rapport technique traite des tensions alternatives sinusoïdales à 50/60 Hz et du courant continu pur n'ayant aucune composante alternative significative. Les tensions alternatives de fréquence plus élevée ne sont pas intégrées dans cette analyse, étant donné que cela nécessiterait un modèle d'impédance du corps humain plus complexe et nécessiterait également l'utilisation de facteurs de fréquence pour les seuils de courant pour les effets physiologiques indésirables. Puisque ce rapport technique ne couvre pas les fréquences plus élevées que 50/60 Hz, il est demandé aux comités d'études d'informer le CEI/TC 64 de toute expérience acquise sur ce sujet. Les propositions de modification de ce rapport devront être soumises au CEI/TC 64.

Ce travail ne pallie pas la responsabilité des comités d'études de la CEI de considérer les courants de contact habituellement mesurés lors de l'évaluation d'un produit.

EFFETS DU COURANT SUR L'HOMME ET LES ANIMAUX DOMESTIQUES –

Partie 5: Valeurs des seuils de tension de contact pour les effets physiologiques

1 Domaine d'application

La CEI/TR 60479-5, qui est un rapport technique, fournit les seuils de combinaison temps-tension de contact basés sur une analyse des valeurs des impédances du corps humain et des seuils de courant pour des effets physiologiques donnés tels que fournis dans la CEI/TS 60479-1. Ces seuils de combinaison temps-tension de contact se rapportent à des conditions d'environnement particulier et à des conditions de contact qui déterminent l'impédance du corps humain pour des cheminements particuliers du courant.

Ce rapport technique considère uniquement

- i) les tensions alternatives sinusoïdales de fréquence 50/60 Hz n'ayant aucune composante de fréquence différente ainsi qu'aucune composante continue significative, ou
- ii) des tensions continues avec aucune composante alternative significative.

Ce rapport technique fournit les seuils résultant de calculs basés sur les valeurs de la CEI/TS 60479-1 avec des incertitudes. Ainsi, les seuils proposés dans le présent rapport technique correspondent à des valeurs ayant des incertitudes.

Ce rapport technique ne considère pas l'immersion des corps humains ni les applications médicales.

Les seuils de combinaison temps-tension de contact sont destinés à être utilisés par les comités d'études en tant que lignes directrices pour la détermination des limites de tensions de contact et des durées des tensions de contact dans plusieurs situations d'environnement.

La détermination des limites nécessite d'être basée sur une analyse de risques. Les facteurs qui font partie de cette analyse incluent les valeurs de seuils de tension (en considérant les surfaces de contact, les conditions d'humidité de la peau, le passage du courant dans le corps humain) fournies par ce rapport technique, ainsi que d'autres facteurs non couverts tels que:

- la réduction de la probabilité de contact (par des obstacles, des barrières, des avertissements, la mise hors de portée, la formation, etc.); ou
- la réduction de la tension de contact vis-à-vis de la tension de défaut (par la liaison équipotentielle); ou
- une résistance additionnelle en série avec le corps humain (telle que des gants, des chaussures, un tapis, etc.).

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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).

CEI 60050-195, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 195: Mise à la terre et protection contre les chocs électriques*

CEI/TS 60479-1:2005, *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1: Aspects généraux*

CEI 60990, *Méthodes de mesure du courant de contact et du courant dans le conducteur de protection*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

courant de contact

courant électrique passant dans le corps humain ou dans le corps d'un animal domestique lorsque ce corps est en contact avec une ou plusieurs parties accessibles d'une installation ou de matériels

[VEI 195-05-21]

3.2

tension de contact

tension entre des parties conductrices touchées simultanément par une personne ou un animal

[VEI 195-05-11]

NOTE La tension de contact peut être différente de la tension de circuit ouverte entre ces parties conductrices.

3.3

seuil

niveau d'une stimulation juste suffisamment forte pour produire une réponse

NOTE Un seuil n'est pas identique à une limite qui inclut une analyse de risque, une marge de sécurité, etc.

3.3.1

seuil de tension de tressaillement

valeur minimale de la tension de contact pour une population pour qui un courant passant au travers du corps humain est juste suffisant pour provoquer une contraction musculaire involontaire de la personne soumise au passage du courant

3.3.2

seuil de tension de fort effet musculaire

valeur minimale de la tension de contact pour une population pour qui un courant passant au travers du corps humain est juste suffisant pour provoquer une forte contraction musculaire involontaire, telle que le non-lâcher d'une électrode (courant alternatif), mais n'incluant pas la contraction involontaire

3.3.3

seuil de tension pour la fibrillation ventriculaire

valeur minimale de la tension de contact pour une population pour qui un courant passant au travers du corps humain est juste suffisant pour provoquer la fibrillation ventriculaire

3.4

longue durée

durée correspondant à l'asymptote verticale des courbes « b » et « c₁ » de la CEI/TS 60479-1 (par exemple 10 s)

3.5

courte durée

toute durée inférieure à la longue durée

4 Conditions et valeurs de seuils

4.1 Généralités

Les effets physiologiques de l'électricité au travers du corps humain sont provoqués par le courant à travers le corps humain. Dans le but d'estimer le type et la gravité des effets physiologiques qui pourraient être causés par l'électricité, il est nécessaire de déterminer l'amplitude et le cheminement du courant au travers du corps de la personne. Cependant pour la conception d'un matériel électrique, il est avantageux de pouvoir prédire si des effets physiologiques indésirables sont possibles, ou probables, ayant seulement une information concernant les niveaux de tension sur les surfaces conductrices accessibles. Dans la mesure où la tension maximale admissible est suffisamment en dessous des circonstances capables de générer un courant de contact suffisant pour causer un effet physiologique, alors les garanties normalement prévues pour éviter l'apparition de ces effets physiologiques peuvent être réduites voire éliminées.

NOTE Ce rapport calcule uniquement la tension de contact et non pas l'effet de l'impédance de la source. Ceci résulte de la pire situation. Dans ce rapport, la tension de contact présumée est considérée comme étant égale à la tension de contact efficace, telle que définie dans la CEI 60050-195.

4.2 Effets physiologiques du courant de contact

Les seuils correspondant aux effets physiologiques associés au passage d'un courant électrique passant au travers du corps humain sont décrits dans la CEI/TS 60479-1.

Ce rapport technique couvre la réaction de tressaillement aux courants, un fort effet musculaire involontaire tel que le non-lâcher d'une électrode en courant alternatif, et la fibrillation ventriculaire. D'autres effets tels que la perception du courant, pourraient être importants pour certaines applications mais ne sont pas considérés. Il devrait être noté que les seuils en courant correspondant à un fort effet musculaire et à la fibrillation ventriculaire dépendent de l'amplitude du courant de contact, tandis que le seuil en courant correspondant à une réaction de tressaillement dépend plutôt de la densité de courant. Néanmoins la CEI/TS 60479-1 propose un seuil en courant pour une réaction de tressaillement en mA ce qui contribue à considérer dans ce rapport que le seuil du courant de réaction de tressaillement comme dépendant seulement de l'amplitude du courant.

Pour les besoins de ce rapport, les seuils d'effets physiologiques présentant le plus grand intérêt correspondent aux courbes a, b et c₁. La courbe a correspond au niveau au-dessus duquel une réaction de tressaillement devient possible. La courbe b correspond à la frontière inférieure à laquelle des effets physiologiques plus sérieux et indésirables commencent à se produire. La courbe c₁ correspond au niveau au-delà duquel la probabilité de fibrillation ventriculaire commence à devenir un réel problème.

Les Figures 1 et 3 ci-dessous illustrent les seuils de courants de contact sur lesquels sont basés les seuils de tension. Ces figures sont issues des seules informations de la CEI/TS 60479-1. Les Figures 1, 2 et 3 respectivement, montrent les valeurs de seuil en courant pour un trajet main-main, deux-mains-deux-pieds et main-siège (trajet longitudinal).

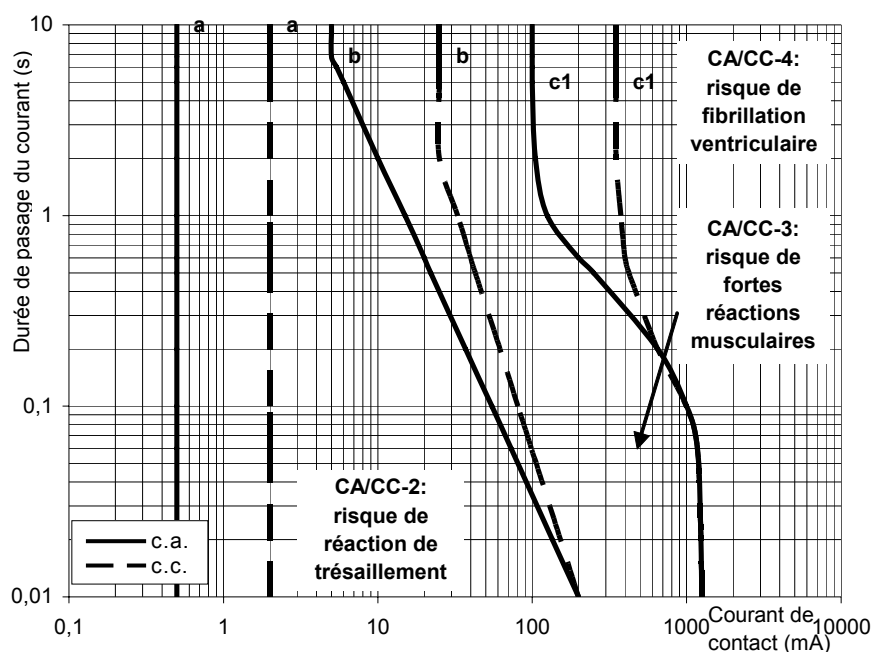
La Figure 2 reproduit les Figures 20 et 22 de la CEI/TS 60479-1. Les autres figures sont déduites de la CEI/TS 60479-1 en utilisant les facteurs appropriés du Tableau 5 afin d'adapter les seuils de courant en fonction du trajet main-main.

Les valeurs du Tableau 1 couvrent les courants de longue durée au travers du torse. Pour un courant alternatif, le point essentiel concerne l'incapacité de lâcher qui correspond au courant au travers de chaque bras. C'est la raison pour laquelle la valeur du courant alternatif dans le Tableau 1 et dans la Figure 2 a été doublée pour un passage du courant entre deux mains et

deux pieds pour un courant de longue durée (uniquement au-dessus de l'intersection avec la courbe correspondant au courant continu). Pour le courant continu et pour des durées plus courtes en courant alternatif, cette valeur n'est pas doublée car un courant continu et un courant alternatif de courte durée ne provoquent pas l'incapacité de non-lâcher (ce qui résulte dans la superposition des deux courbes) (voir note 1 du Tableau 1).

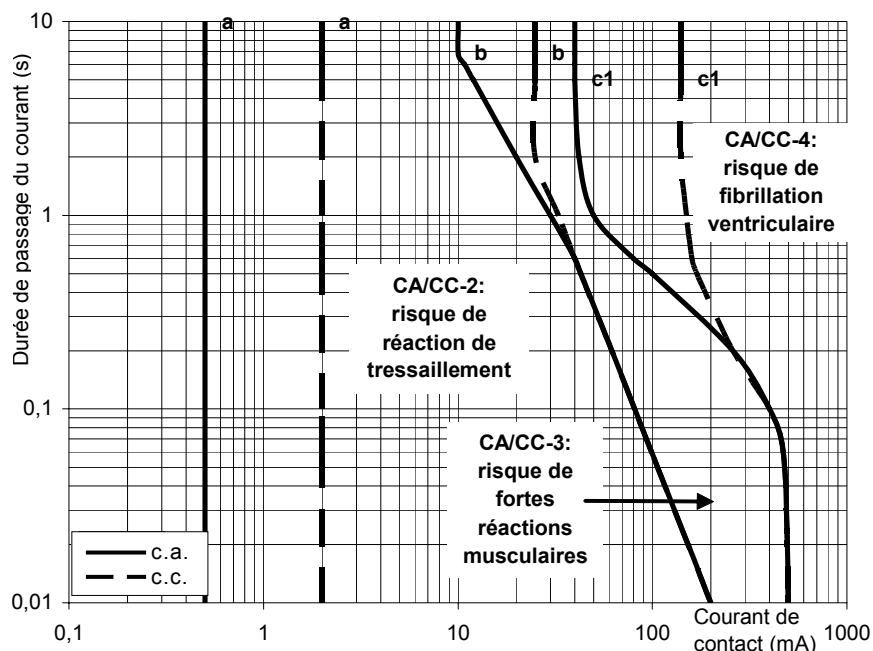
Pour le courant continu, une amplitude de courant plus faible est nécessaire pour provoquer la fibrillation ventriculaire lorsque le courant circule en remontant des pieds vers les mains (les pieds étant positifs comparés à la partie supérieure du corps) au travers du torse plutôt qu'en descendant. Il est supposé dans ce rapport technique que le courant continu soit dans tous les cas un courant montant. Le seuil du courant de fibrillation ventriculaire pour le courant continu descendant est environ le double du seuil de courant continu remontant.

Il est toujours supposé que les courants de courte durée (inférieure à un cycle cardiaque) coïncident avec la partie vulnérable du cycle cardiaque.



NOTE La courbe « c₁ » a été modifiée selon le Tableau 12 de la CEI/TS 60479-1; voir aussi le dernier alinéa de 4.1 de la même norme.

Figure 1 – Seuils physiologiques en courant alternatif (50/60 Hz) et continu pour un courant circulant au travers du corps humain entre main-main (transversal)



NOTE Les modifications par rapport aux Figures 20 et 22 de la CEI/TS 60479-1 sont les suivantes:

- le doublement du seuil correspondant à la courbe « b » pour le courant alternatif, expliqué dans la note 1 du Tableau 1;
- dessous l'intersection de la courbe « doublée » en courant alternatif et de la courbe en courant continu, les deux courbes se superposent en fonction de la courbe la plus sévère en courant continu; voir explication dans le 4^e alinéa de 4.1 de la CEI/TS 60479-1.

Figure 2 – Seuils physiologiques en courant alternatif (50/60 Hz) et continu pour un courant circulant au travers du corps humain entre les deux mains et les deux pieds (longitudinal)

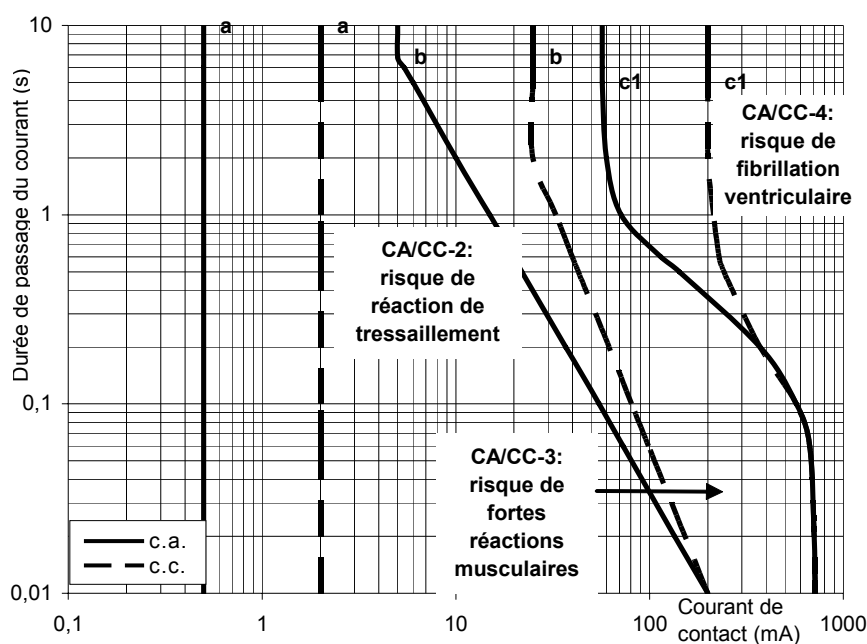


Figure 3 – Seuils physiologiques en courant alternatif (50/60-Hz) et continu pour un courant circulant au travers du corps humain entre main et siège (longitudinal)

Pour la détermination du seuil de tension, ce rapport considère les seuils en courant suivants, correspondant à une longue durée. Ils ont été calculés à partir des Figures 20 et 22 et du Tableau 12 de la CEI/TS 60479-1 qui correspondent à la partie supérieure des courbes b ou c_1 dans les Figures 1 à 3 ci-dessus.

Tableau 1 – Valeurs des seuils de courant pour chaque condition et pour une longue durée

Type de seuil	Courant	Passage du courant	mA
Réaction de tressaillement	Alternatif	Main-main	0,5
		Deux-mains-deux-pieds	0,5
		Une-main-siège	0,5
	Continu	Main-main	2
		Deux-mains-deux-pieds	2
		Une-main-siège	2
Fort effet musculaire	Alternatif	Main-main	5
		Deux-mains-deux-pieds (Note 1)	10
		Une-main-siège	5
	Continu	Main-main	25
		Deux-mains-deux-pieds	25
		Une-main-siège	25
Fibrillation ventriculaire (Note 3)	Alternatif	Main-main	100
		Deux-mains-deux-pieds	40
		Une-main-siège	57
	Continu	Main-main	350
		Deux-pieds-deux-mains (Note 2)	140
		Siège-une-main (Note 2)	200

NOTE 1 Les valeurs dans ce tableau correspondent à un passage du courant au travers du torse. Pour un courant alternatif, le souci principal est l'incapacité de lâcher qui correspond au courant dans chaque bras. Par conséquent, la valeur totale du courant de contact dans ce tableau a été doublée pour des durées de passage de courant plus longues.

NOTE 2 Le cheminement du courant en direction des deux-pieds-deux-mains correspond au courant remontant. Le seuil de courant de fibrillation ventriculaire pour des courants continus descendants est environ le double du seuil du courant remontant.

NOTE 3 Les valeurs de courant autres que celles correspondant à la fibrillation ventriculaire peuvent provoquer des effets importants tels que l'arrêt respiratoire tel que décrit dans la CEI/TS 60479-1.

4.3 Impédance du corps

Les seuils de tension de contact correspondent aux seuils de courant de contact par l'intermédiaire de l'impédance du corps selon la loi d'Ohm. Cependant, l'application de la loi d'Ohm n'est pas immédiate car la valeur appropriée de l'impédance du corps à utiliser dépend de nombreux facteurs. Le choix de la valeur correcte devrait considérer

- le type de source de puissance (alternative ou continue), et
- l'amplitude de la tension de contact, et
- le cheminement du courant dans le corps humain (main-main, ou mains-pieds, ou main-siège), et

NOTE 1 Ces différents cheminements ont été choisis pour leurs caractéristiques. La raison en vient du modèle d'impédance du corps humain décrit à l'Annexe A. Les seuils de tension calculés pour le passage du courant entre deux-mains-deux-pieds peuvent être généralement considérés comme plus sévères que le cheminement du courant correspondant à une main-deux-pieds.

- la surface de contact avec la peau, et
- la condition de la surface de contact de la peau (humide et salée, humide, sèche), et
- la durée de passage du courant.

L'impédance du corps ne comprend que l'impédance de peau et l'impédance des tissus internes.

La résistance de peau varie en fonction de la tension qui lui est appliquée. Aux basses tensions la variation est réversible. La valeur revient rapidement à la valeur initiale après que la tension a été annulée. Aux hautes tensions, des dommages permanents de la peau peuvent exister. Dans ce cas, la variation de la résistance de peau qui dépend de l'application de la tension n'est plus réversible.

NOTE 2 Il est possible d'estimer la résistance d'un doigt à environ 1 000 Ω . Par conséquent, un contact avec le bout du doigt plutôt qu'avec la paume de la main résultera en une augmentation significative de l'impédance du corps. Les conditions de contact avec la paume de la main telles que décrites sont donc conventionnelles.

La CEI/TS 60479-1 contient les informations à propos des impédances du corps humain obtenues à partir de mesures sur des êtres humains volontaires et à partir de mesures sur des cadavres. Voir l'Annexe A pour plus de détails à propos des impédances du corps et des modèles de ces impédances du corps. Des variations sur les valeurs des impédances du corps des personnes existent et sont indiquées dans les tableaux par des valeurs en pour-cent.

Généralement, les personnes physiquement fortes devraient correspondre à des valeurs plus faibles de la résistance interne du corps à cause de la surface plus importante de la section de leur corps. Les personnes physiquement petites généralement possèdent une résistance interne plus élevée. Certaines mesures [1]¹ de l'impédance du corps montrent que l'impédance du corps n'est pas fortement influencée par le poids du corps. Par conséquent, il n'existe pas de corrélation suffisante entre le poids du corps (enfants ou adultes) et les valeurs du courant physiologiques correspondant à un effet particulier. Trois pourcentages de la population sont considérés dans la CEI/TS 60479-1 (5 %, 50 % et 95 %). Ce rapport ne considère que les valeurs des impédances de corps correspondant à 5 % de la population afin de couvrir plus de 95 % de la population.

4.4 Impédances externes au corps

La source de tension appliquée au corps est supposée posséder une faible impédance de sortie comparativement à l'impédance du corps (ce qui est le pire des cas). L'amplitude du courant de contact est uniquement déterminée par la combinaison de la tension appliquée et de l'impédance du corps humain. Dans ce rapport technique, toute considération sur une impédance significative qui peut être en série avec le corps et qui modifie le courant de contact émis par la source de tension, se situe en dehors du domaine d'application.

NOTE Dans certains cas où des inductances élevées sont en série avec le corps, la tension de contact peut devenir plus élevée que la tension à vide de la source. Ces effets peuvent devenir significatifs à 50/60 Hz pour des inductances plus élevées que 100 mH.

Le présent rapport ne considère pas les impédances externes provenant de gants ou de chaussures.

4.5 Autres facteurs pouvant affecter les seuils de tension

Les facteurs considérés sont les suivants:

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

- Source: en courant alternatif sinusoïdal à 50/60 Hz sans aucune composante continue ou un courant continu sans composante alternative.
- Condition de peau: mouillée-salée, humide et sèche.

NOTE Il est considéré que la condition sèche de la peau correspond à une condition d'intérieur, la condition humide correspond à une condition d'immersion pendant plus de 1 min dans de l'eau normale (valeur moyenne de $\rho = 35 \Omega \times m$, pH = 7,7 à 9), et la condition humide et salée de la peau correspond à une condition d'immersion pendant plus de 1 min dans une solution aqueuse avec 3 % de NaCl (valeur moyenne de $\rho = 0,25 \Omega \times m$, pH = 7,5 à 8,5).

La transpiration peut être considérée comme se situant entre la condition humide et mouillée-salée. La conductivité de l'eau de mer est légèrement supérieure à celle de la condition humide et salée.

- Cheminement: un contact main-main ou deux-mains-deux-pieds ou main-siège avec des parties accessibles conductrices.
- Surface de contact: large surface de contact, moyenne surface de contact, ou petite surface de contact avec des parties accessibles conductrices.

Pour les besoins des calculs, un large contact à pleine main (L) est considéré correspondre à une surface de contact de la main de 82 cm². Une surface moyenne de contact (M) est considérée correspondre à 12,5 cm² et peut représenter un contact avec une partie conductrice avec la paume de chaque main. Une petite surface de contact (P) est considérée être égale à 1 cm² et peut représenter un contact de la main avec une petite partie conductrice. Tous les types de contact, à l'exception du cheminement main-siège, sont considérés comme symétriques pour cette étude. Il est supposé que le contact entre chaque pied et une partie conductrice supportant la personne a la même taille que la surface de contact de la main.

Il est à noter que la surface de contact peut être modifiée par l'utilisation d'outils conducteurs ou d'équipements interconnectés (parties conductrices accessibles).

- Durée: de 10 ms à 10 s.

Le cas le plus sévère présenté dans ce rapport correspond à la situation suivante: courant alternatif, longue durée, condition humide et salée et large surface de contact.

4.6 Seuils de tension de contact en fonction de la durée

Un ensemble de diagrammes (voir Figures 5 à 22), basés sur les impédances du corps humains et sur les courbes courant-temps tels que fournis par la CEI/TS 60479-1, propose le temps maximal admissible pour une tension donnée appliquée à un corps humain. Ces courbes ont été établies en utilisant la méthode décrite dans l'Annexe B et avec le modèle décrit à l'Annexe A.

Il convient que ces courbes soient utilisées par les comités d'études de la CEI comme lignes directrices pour décrire du temps de coupure d'un appareil de protection utilisé pour la coupure automatique de la source. Les limites choisies pour le temps de coupure peuvent être différentes des valeurs de seuils de ce rapport technique à cause des sécurités, des incertitudes, des tolérances, de l'analyse du risque, etc., qui peuvent être incluses. Pour plus de détails, voir Figures 5 à 22.

Il est proposé l'organigramme suivant afin de diriger le lecteur vers la bonne figure montrant les informations sur le seuil de tension en fonction de la situation présentant un intérêt.

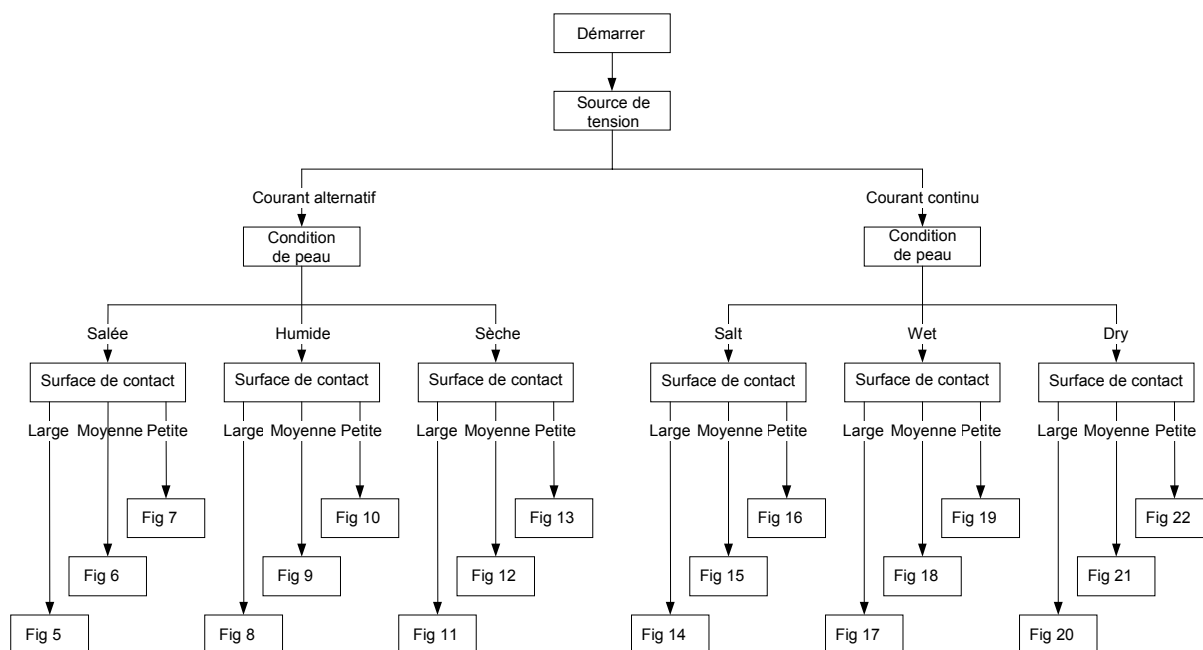


Figure 4 – Organigramme à utiliser pour le choix de la figure appropriée fournissant la durée maximale pour chaque seuil de tension de contact

L'Annexe B présente la méthode utilisée pour le calcul des tensions de contact basées sur les courants et les impédances du corps.

4.7 Seuils de tension de contact pour de longues durées

Les tableaux suivants, (Tableaux 2a à 2f), présentent un extrait des figures de l'Article 5 pour de longues durées (plus longues que quelques secondes, correspondant à l'asymptote verticale de chaque courbe de l'Article 5). L'Annexe B illustre la méthode de calcul des tensions de contact basée sur les courants de contact et les impédances du corps humain.

Les comités d'études peuvent utiliser ces seuils de tension pour établir les limites de tension de leurs normes de produits en utilisant les facteurs de risques appropriés.

Tableau 2 – Tableaux fournissant les seuils minimaux de tension de contact pour des courants alternatifs et continus correspondant à des courants de réaction de tressaillement, de fort effet musculaire et de fibrillation ventriculaire (voir les notes du Tableau 1)

Tableau 2a – Courants de réaction de tressaillement pour un courant alternatif 50/60 Hz

Réaction de tressaillement	Seuil en courant mA	Seuils de tension de contact en courant alternatif pour une longue durée V								
		Humide et salée			Humide			Sèche		
		Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface
Main-main	0,5	1	1	3	1	4	21	2	9	40
Deux-mains-deux-pieds	0,5	0,3	1	2	0,4	3	13	1	5	23
Main-siège	0,5	0,3	0,5	2	0,4	2	11	1	4	20

Tableau 2b – Forts effets musculaires pour un courant alternatif 50/60 Hz

Fort effet musculaire	Seuil en courant mA	Seuils de tension de contact en courant alternatif pour une longue durée V								
		Humide et salée			Humide			Sèche		
		Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface
Main-main	5	5	9	27	7	25	93	11	40	104
Deux-mains-deux-pieds	10	5	9	27	7	25	93	11	40	104
Main-siège	5	3	5	13	3	13	46	6	20	52

Tableau 2c – Fibrillation ventriculaire pour un courant alternatif 50/60 Hz

Fibrillation ventriculaire	Seuil en courant mA	Seuils de tension de contact en courant alternatif pour de longue durée V								
		Humide et salée			Humide			Sèche		
		Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface
Main-main	100	90	160	257	98	165	260	99	99	260
Deux-mains-deux-pieds	40	20	36	94	24	71	149	33	82	149
Main-siège	57	27	49	99	31	65	100	34	65	100

Tableau 2d – Courants de réaction de tressaillement en courant continu

Réaction de tressaillement	Seuil en courant mA	Seuils de tension de contact en courant continu pour de longue durée V								
		Humide et salée			Humide			Sèche		
		Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface
Main-main	2	2	4	12	3	12	56	7	23	78
Deux-mains-deux-pieds	2	1	2	6	2	7	35	4	15	59
Main-siège	2	1	2	6	1	6	28	3	12	39

Tableau 2e – Forts effets musculaires en courant continu

Fort effet musculaire	Seuil en courant mA	Seuils de tension de contact en courant continu pour de longue durée V								
		Humide et salée			Humide			Sèche		
		Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface
Main-main	25	24	44	112	29	81	156	43	89	156
Deux-mains-deux-pieds	25	13	23	63	16	51	133	26	67	133
Main-siège	25	12	22	56	15	41	78	21	45	78

Tableau 2f – Fibrillation ventriculaire en courant continu

Fibrillation ventriculaire	Seuil en courant mA	Seuils de tension de contact en courant continu pour de longue durée V								
		Humide et salée			Humide			Sèche		
		Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface	Grande surface	Moyenne surface	Petite surface
Main-main	350	263	351	467	264	353	470	264	264	470
Deux-mains-deux-pieds	140	68	121	220	75	143	223	87	143	223
Main-siège	200	83	126	201	85	127	203	85	127	203

L'Annexe B illustre la méthode de calcul des tensions de contact basée sur les courants de contact et les impédances du corps humain.

5 Seuils de tension de contact – Présentation des courbes tension-temps

En se basant sur les impédances du corps humain et sur les courbes courant-temps fournis par la CEI/TS 60479-1, l'ensemble des diagrammes suivants donne le temps maximal pour chaque effet physiologique considéré et pour une tension de contact appliquée au corps humain. Ces courbes ont été établies en utilisant la méthode décrite à l'Annexe B avec le

modèle décrit à l'Annexe A. Voir l'organigramme de la Figure 4 pour choisir la figure appropriée.

Pour chaque type de courant (alternatif ou continu), il existe neuf diagrammes correspondant aux paramètres suivants:

- état de la peau (sèche, humide et mouillée-salée); et
- surface de contact (grande, moyenne et petite).

Chaque diagramme comprend neuf courbes correspondant:

- aux trois cheminements du courant au travers du corps humain considérés dans ce rapport (main-main; deux-mains-deux-pieds et main-siège), et
- aux trois seuils différents de courant considérés dans ce rapport (réaction de tressaillement; fort effet musculaire et fibrillation ventriculaire).

Ces courbes sont destinées à être utilisées par les comités d'études de la CEI lorsque ceux-ci prescrivent un temps maximal de coupure qui peut être toléré par un être humain sans effets physiologiques indésirables. Par exemple, les facteurs suivants doivent être considérés pour faire, le cas échéant, des ajustements appropriés dans le processus de choix d'une limite:

- la restriction à un modèle électrique symétrique qui résulte de l'incapacité de ce modèle à considérer plus d'un point de fonctionnement électrique de la peau de nature non linéaire à la fois,
- le nombre limité de niveaux discrets à considérer quant à la surface de contact, au niveau d'humidité de la peau et au cheminement du courant,
- le nombre limité à trois quant aux seuils physiologiques résultant d'un courant électrique (réaction de tressaillement, forts effets musculaires incluant le non-lâcher et la fibrillation ventriculaire).

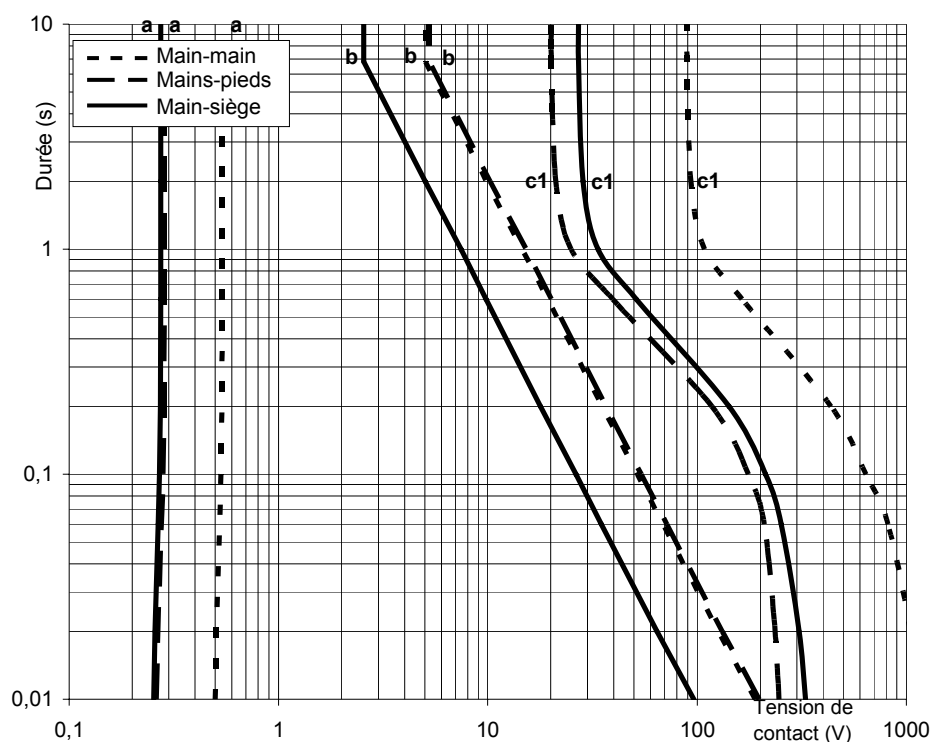


Figure 5 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une grande surface de contact

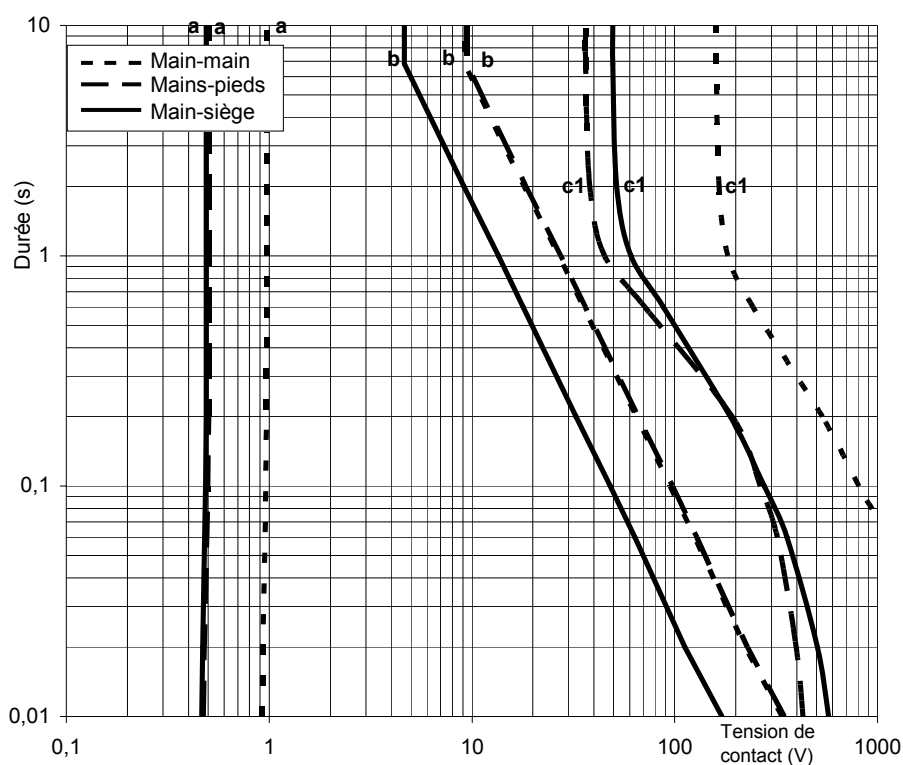


Figure 6 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une surface moyenne de contact

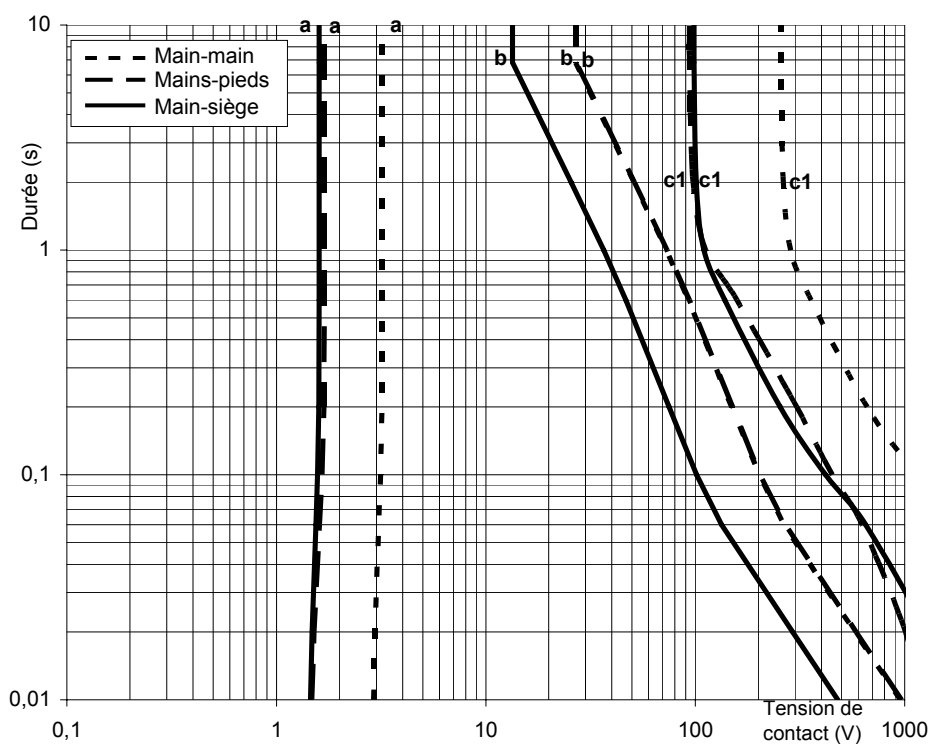


Figure 7 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une petite surface de contact

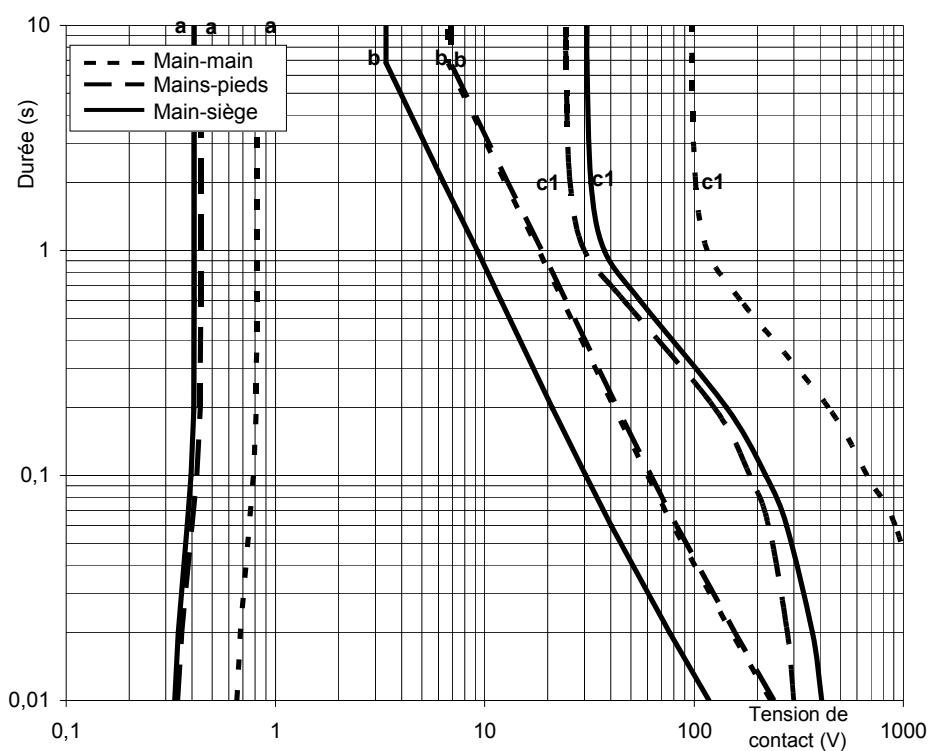


Figure 8 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions humides et pour une grande surface de contact

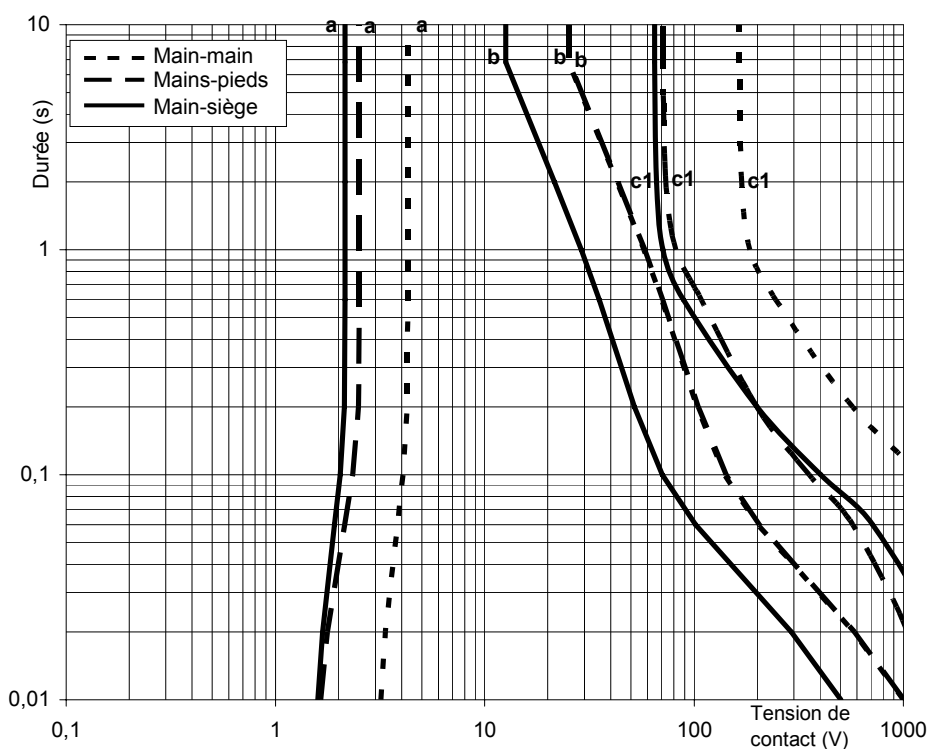


Figure 9 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions humides et pour une surface moyenne de contact

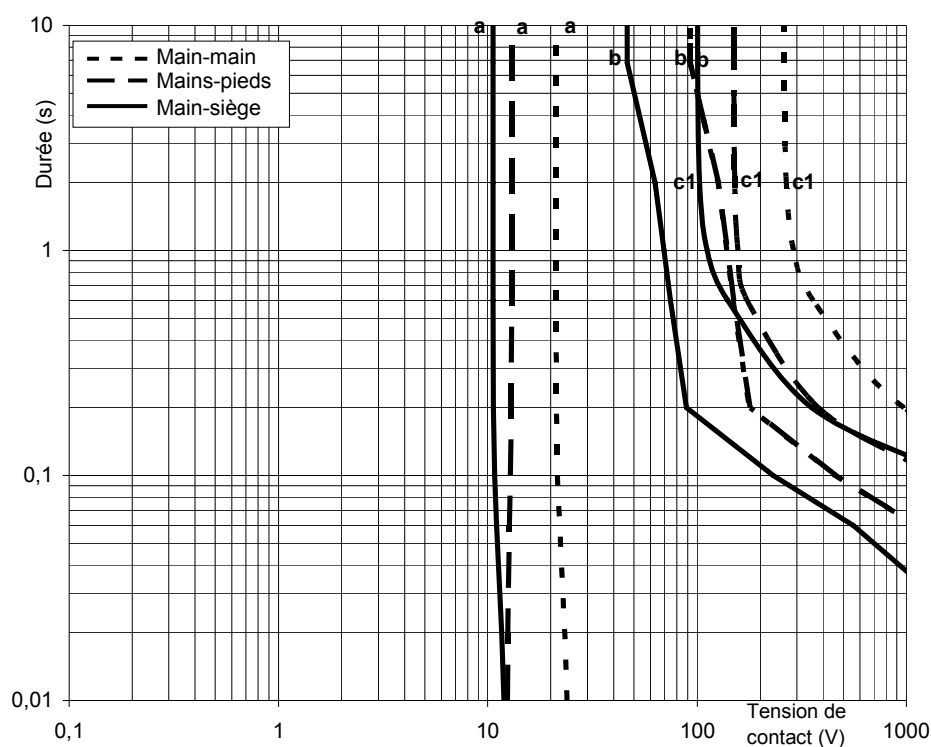


Figure 10 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions humides et pour une petite surface de contact

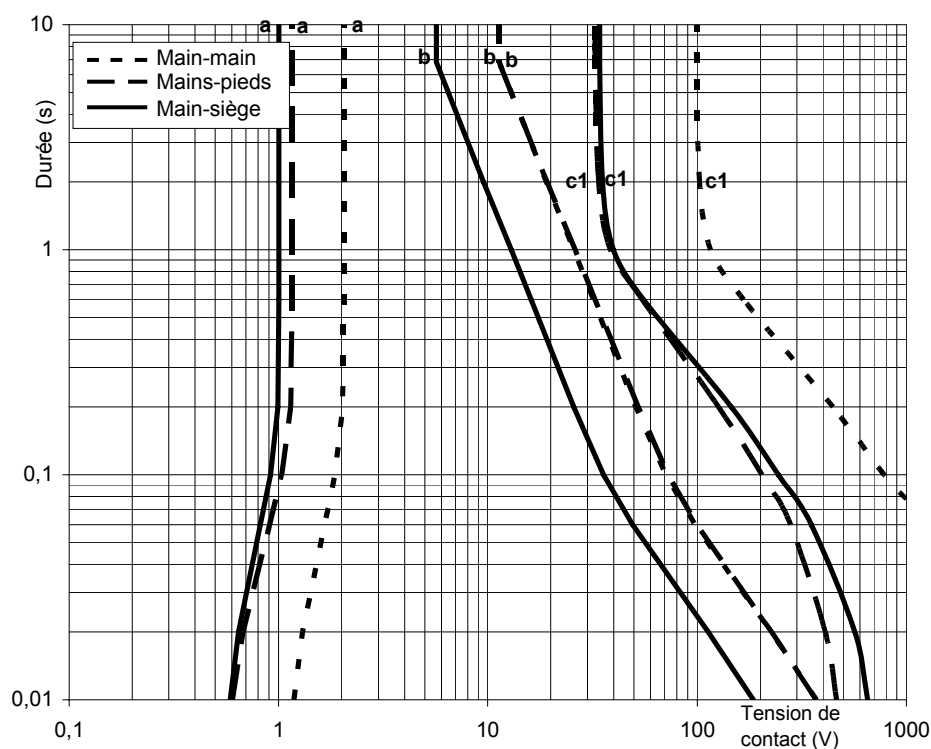


Figure 11 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions sèches et pour une grande surface de contact

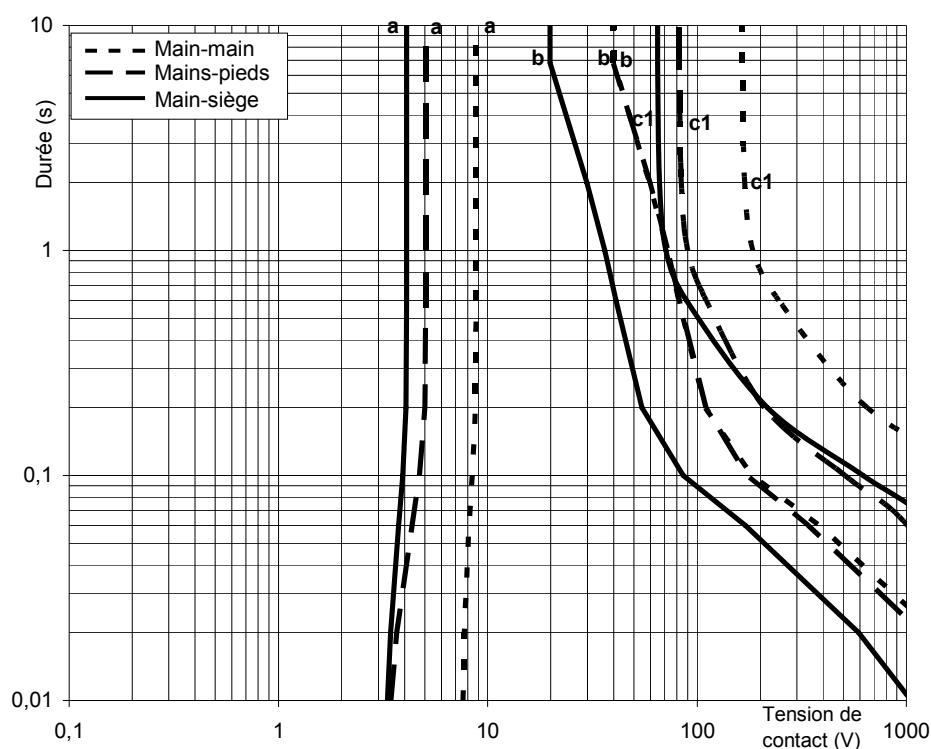


Figure 12 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions sèches et pour une surface moyenne de contact

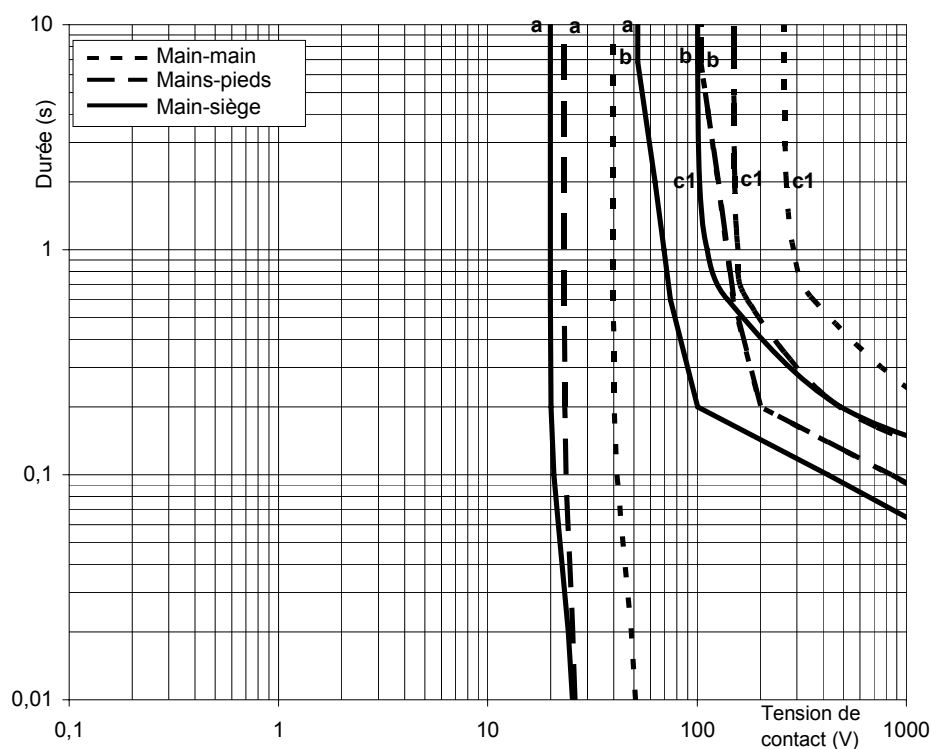


Figure 13 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant alternatif (50/60 Hz) sur une personne pour des conditions sèches et pour une petite surface de contact

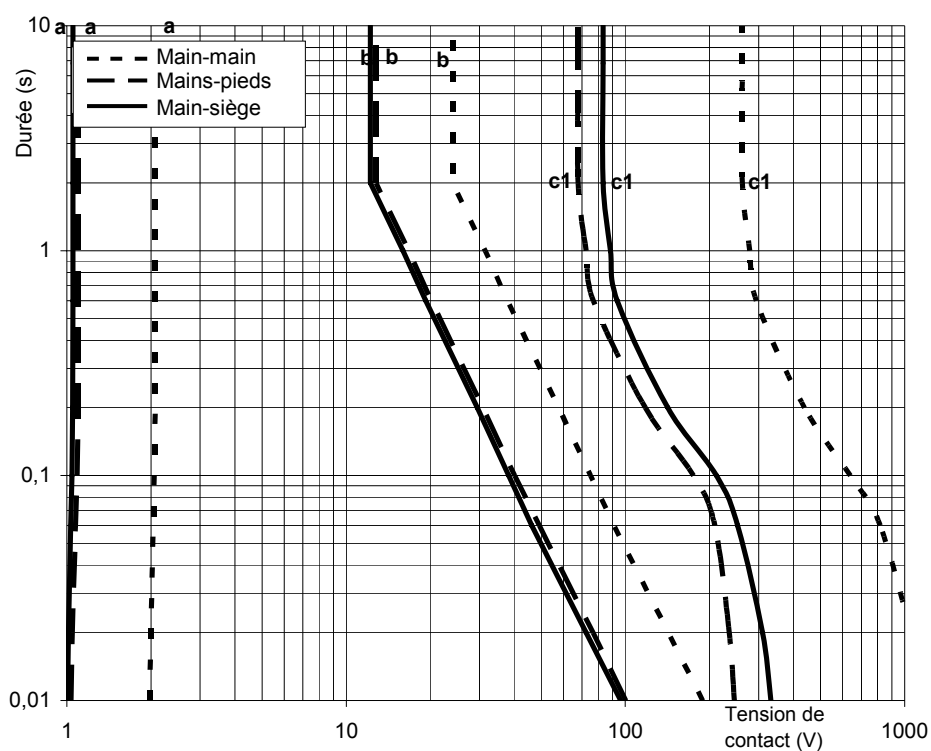


Figure 14 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une grande surface de contact

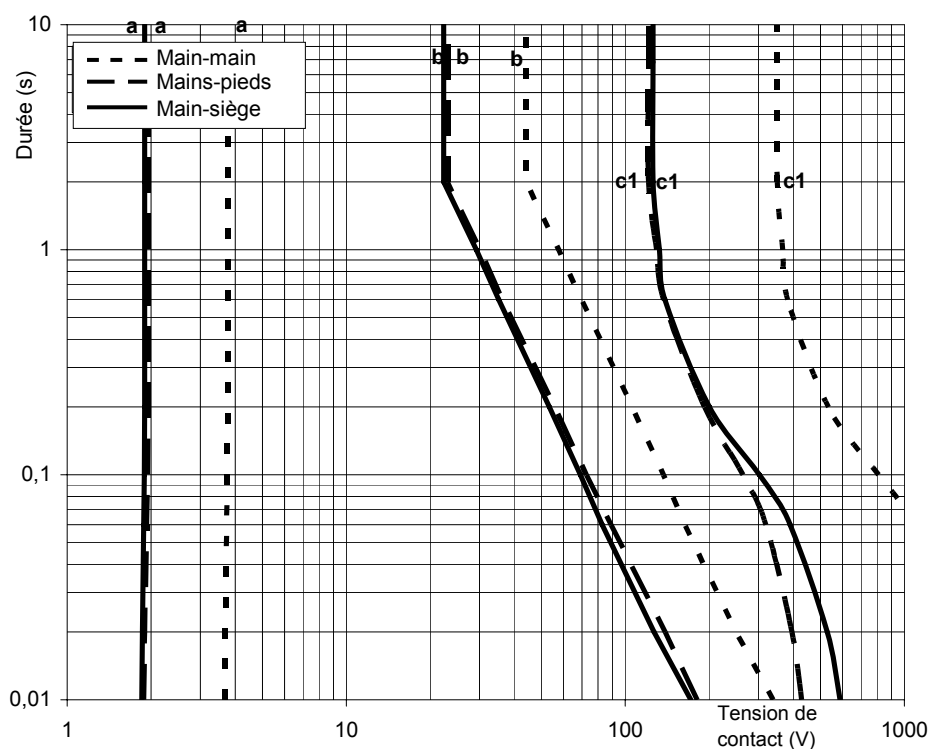


Figure 15 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une surface moyenne de contact

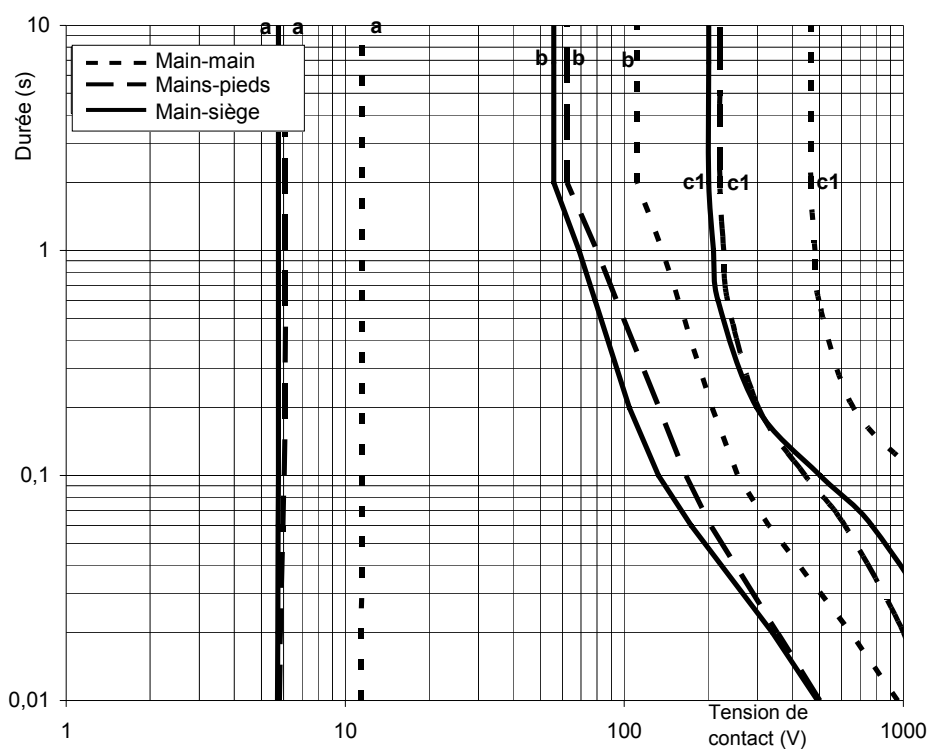


Figure 16 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions mouillées-salées et pour une petite surface de contact

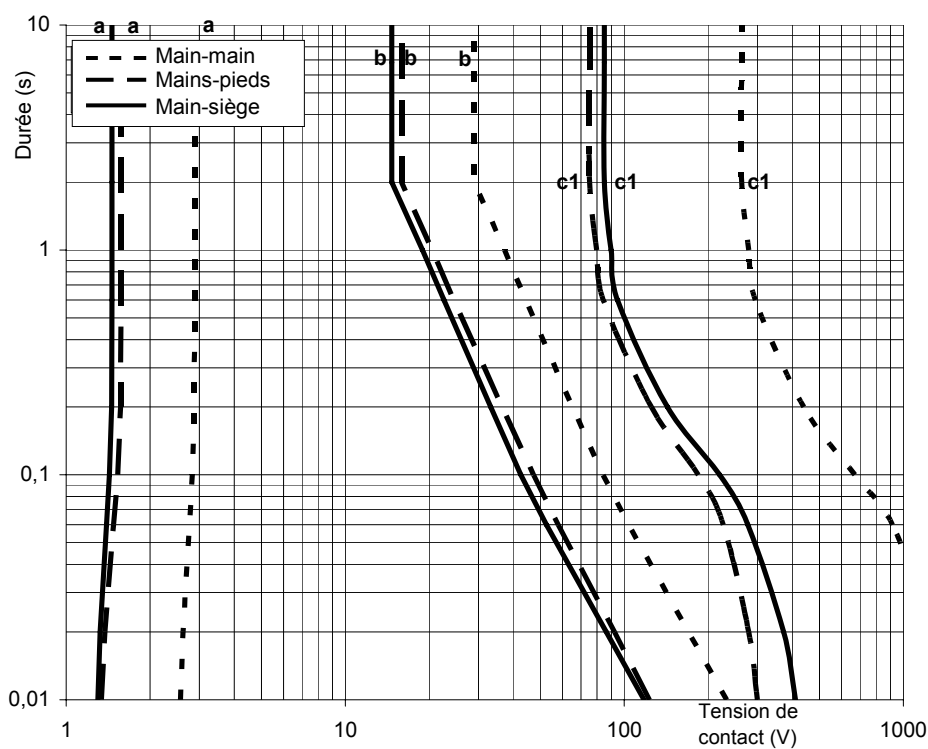


Figure 17 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions humides et pour une grande surface de contact

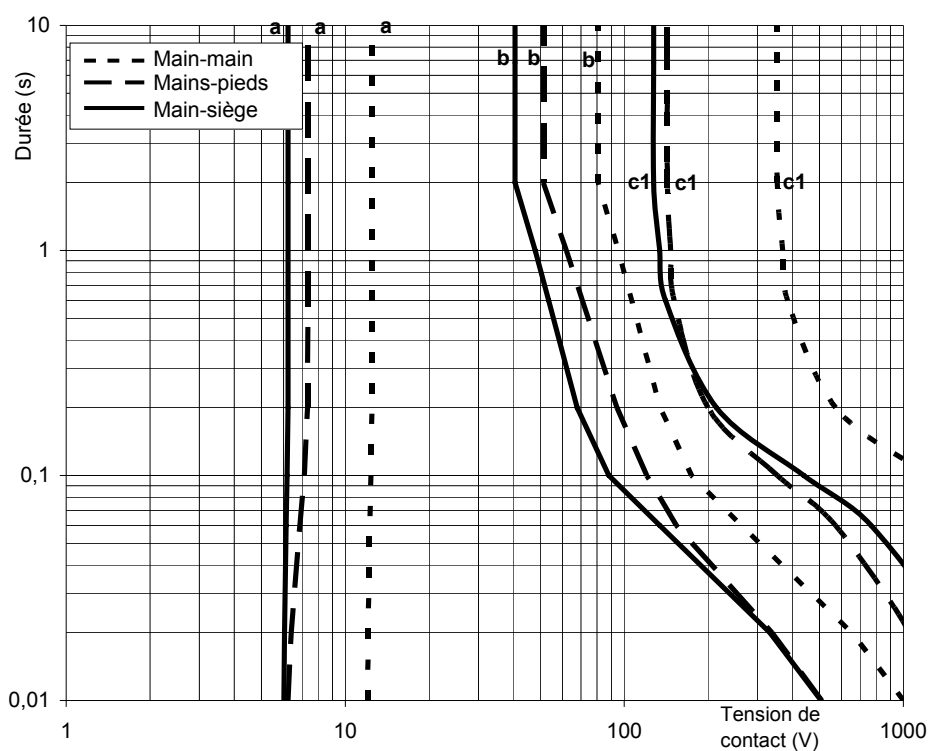


Figure 18 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions humides et pour une surface moyenne de contact

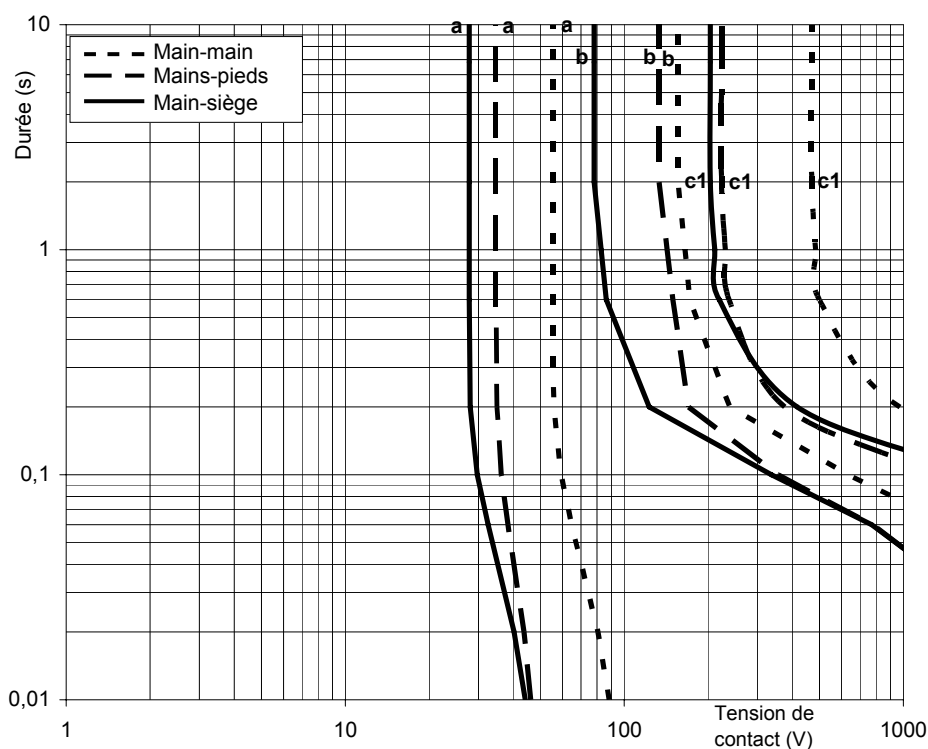


Figure 19 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions humides et pour une petite surface de contact

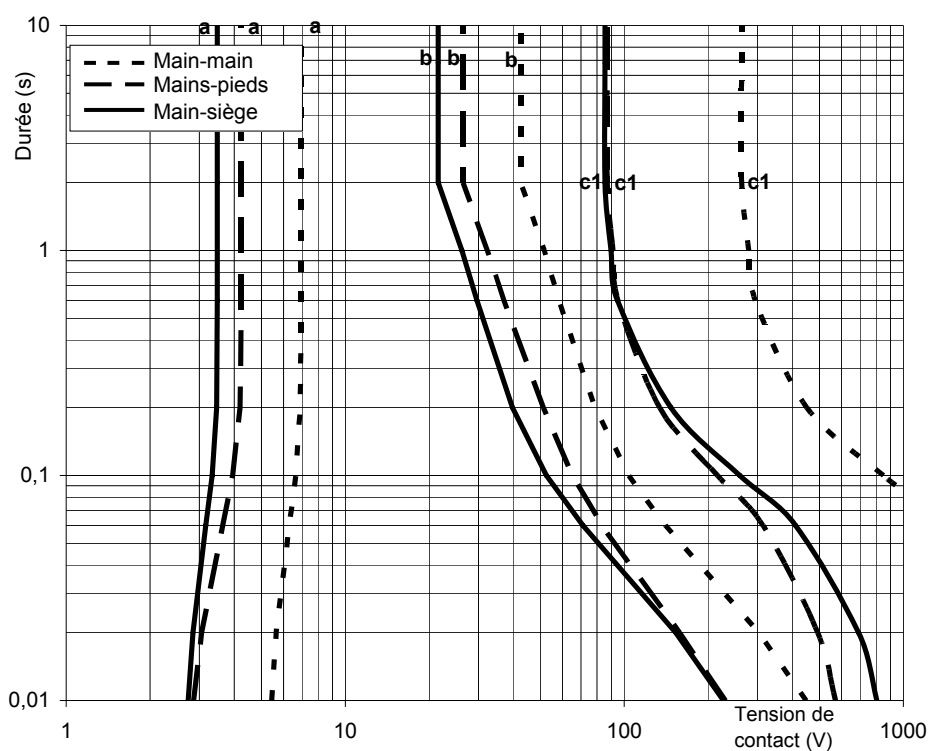


Figure 20 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions sèches et pour une grande surface de contact

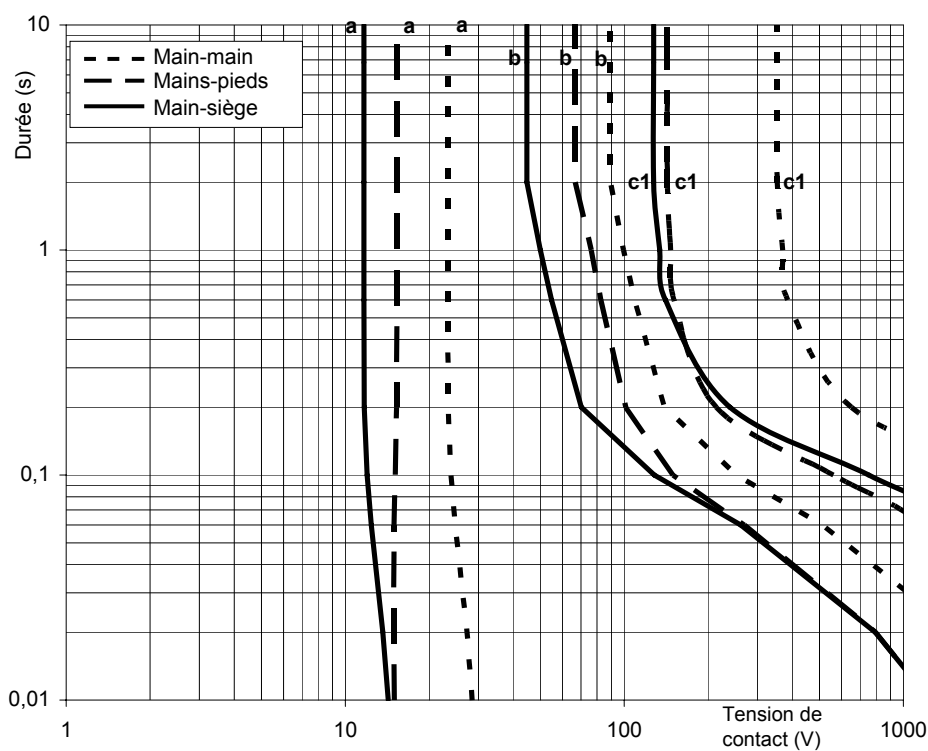


Figure 21 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions sèches et pour une surface moyenne de contact

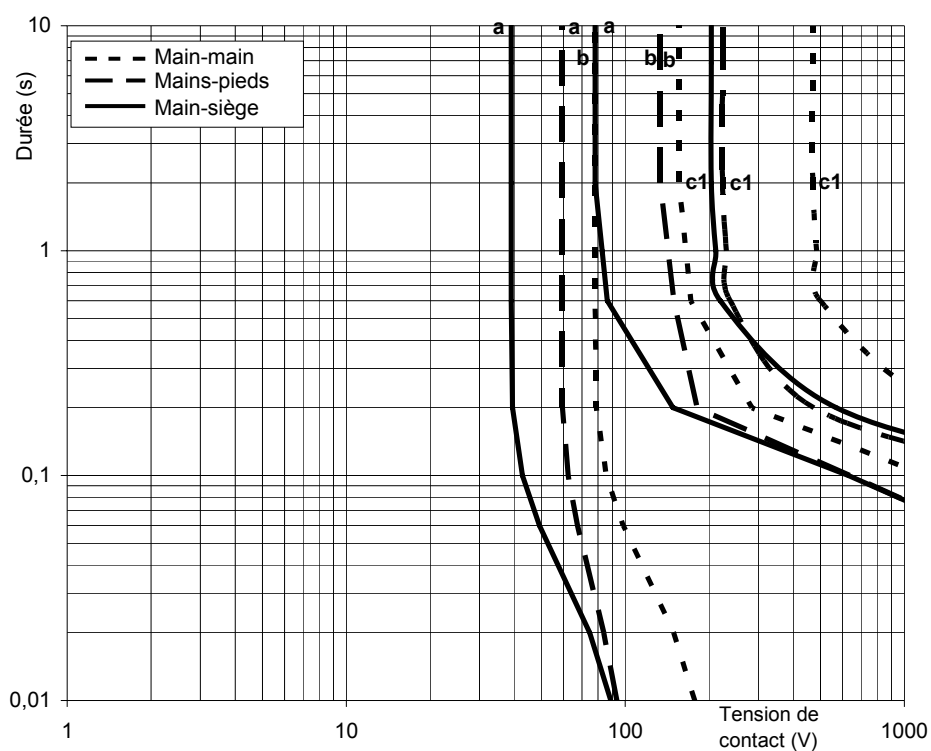


Figure 22 – Zones temps/tension conventionnelles des effets d'un courant continu sur une personne pour des conditions sèches et pour une petite surface de contact

Annexe A (informative)

Impédance du corps humain

A.1 Valeurs de l'impédance du corps humain

Plusieurs tableaux de la CEI/TS 60479-1 montrent les valeurs de l'impédance totale pour un trajet main-main correspondantes à 5 %, 50 % et 95 % de la population pour des conditions sèches, humides ou mouillées-salées. Des électrodes de grande surface de contact pour un contact pleine main, des électrodes de surface moyenne de contact et des électrodes de petite surface de contact y sont considérées. Certains tableaux contiennent les valeurs pour des tensions alternatives à 50/60 Hz, d'autres tableaux contiennent les valeurs pour des tensions continues.

Seules les valeurs correspondant à 5 % de la population (représentant plus de 95 % de la population) sont considérées dans ce rapport. Les valeurs de l'impédance du corps humain correspondant à ce pourcentage de la population sont inférieures à celles correspondant au pourcentage le plus élevé de la population. C'est pourquoi il a été considéré que les valeurs correspondant à 5 % de la population sont plus conventionnelles d'un point de vue de la sécurité car elles correspondent à des valeurs plus élevées du courant dans le corps humain.

Lorsque la tension est appliquée au corps humain, la peau subit localement de nombreuses dégradations de ses propriétés d'isolement électrique. Ce procédé résulte en une baisse de la résistance totale de la peau, et demande un certain temps pour se produire, généralement un temps supérieur à plusieurs dizaines de millisecondes. Plus la tension change, plus la résistance de la peau change. L'impédance mesurée du corps humain rapportée dans les sources de données disponibles s'applique pour des temps spécifiques lorsque les mesures ont été effectuées après application de la tension au corps humain. Par exemple, des mesures sur des cadavres ont été effectuées après 3 s de circulation du courant de contact. Pour une personne vivante volontaire, le temps de la mesure était parfois effectué lorsque l'impédance était encore en décroissance après application de la tension, mais il fallait prendre en compte le confort et la sécurité du volontaire. Des mesures sur des sujets vivants ont été effectuées après 0,1 s ou 20 ms à 25 ms de circulation du courant de contact, en fonction du potentiel de douleur du sujet. Ceci peut être considéré comme une source d'incertitude pour les valeurs utilisées dans les calculs de tension de contact car les conditions d'état stable peuvent ne pas avoir été atteintes. Les modifications de la résistance de peau sont rapidement réversibles pour des niveaux bas de tension lorsque les dommages permanents de la peau ne sont pas encore apparus.

Les valeurs de l'impédance totale du corps humain pour un trajet main-main pour la population (5 %, 50 % et 95 %) pour une même large surface de contact, mais correspondant à un courant continu (sans composante continue) sont reportées dans le Tableau 10 de la CEI/TS 60479-1.

Les tableaux ci-dessous sont des exemples des valeurs utilisées de la CEI/TS 60479-1.

Tableau A.1 – Impédance totale du corps humain en ohms pour des conditions sèches, un trajet main-main, en courant alternatif (50/60 Hz), grande surface de contact (Tableau 1 de la CEI/TS 60479-1)

Tension de contact V	Valeurs en ohms qui ne sont pas dépassées par le pourcentage de la population		
	5 % de la population	50 % de la population	95 % de la population
25	1 750	3 250	6 100
50	1 375	2 500	4 600
75	1 125	2 000	3 600
100	990	1 725	3 125
125	900	1 550	2 675
150	850	1 400	2 350
175	825	1 325	2 175
200	800	1 275	2 050
225	775	1 225	1 900
400	700	950	1 275
500	625	850	1 150
700	575	775	1 050
1 000	575	775	1 050
Valeur asymptotique	575	775	1 050

Tableau A.2 – Impédance totale du corps humain en ohms pour des conditions sèches, un trajet main-main, en courant continu, grande surface de contact (Tableau 10 de la CEI/TS 60479-1)

Tension de contact V	Valeurs en ohms qui ne sont pas dépassées par le pourcentage de la population		
	5 % de la population	50 % de la population	95 % de la population
25	2 100	3 875	7 275
50	1 600	2 900	5 325
75	1 275	2 275	4 100
100	1 100	1 900	3 350
125	975	1 675	2 875
150	875	1 475	2 475
175	825	1 350	2 225
200	800	1 275	2 050
225	775	1 225	1 900
400	700	950	1 275
500	625	850	1 150
700	575	775	1 050
1 000	575	775	1 050
Valeur asymptotique	575	775	1 050

Les valeurs asymptotiques indiquées dans les Tableaux A.1 et A.2 correspondent aux valeurs minimales de l'impédance du corps humain lorsque l'impédance de peau est complètement éliminée, comme c'est le cas lorsque la tension appliquée au corps est très élevée. A ces tensions très élevées, la peau est détruite donnant une impédance de peau nulle. Par la suite, sans peau, l'impédance totale du corps humain est égale à la résistance interne du corps.

A.2 Modèle d'impédance du corps humain

Le modèle d'impédance du corps humain utilisé pour cette étude pour représenter le corps d'une personne consiste en un modèle à trois composantes comprenant une résistance en série avec la mise en parallèle d'une résistance et d'une capacité. La résistance interne est représentée par la résistance série. La mise en parallèle d'une résistance et d'une capacité représente la peau en entrée et en sortie du courant de contact. Dans le but de simplifier les calculs qui peuvent être ardues lorsque deux ou plusieurs résistances dépendant de la tension fonctionnent à des tensions différentes, il est supposé que:

- soit les caractéristiques de peau en entrée et en sortie ont les mêmes valeurs en surface, en condition d'humidité, etc. dans le but de rendre le modèle symétrique, ou
- l'impédance de peau pour une seule surface de contact est beaucoup plus grande que l'impédance de peau pour l'autre surface de contact et par conséquent il est possible de négliger la plus faible impédance dans les calculs en ne conservant qu'une résistance dépendant de la tension.

Un modèle d'impédance du corps humain à cinq composants traitant indépendamment de la peau en entrée et en sortie devrait être plus souple et donc plus utile pour traiter plus de situations concrètes. Cependant la complexité mathématique nécessaire pour la résolution de ce modèle serait amenée à un niveau supérieur.

La Figure A.1 montre le modèle dans le cas d'un contact main-main qui est utilisé dans toutes les mesures d'impédance totale du corps humain. Les deux contacts entre la peau de la main et les électrodes sont identiques, et par conséquent ils peuvent être combinés dans le modèle en une seule combinaison parallèle d'une résistance et d'une capacité. (Lorsque les deux impédances de peau sont identiques, la ligne a-b, indiquée dans la figure ci-dessous dans le coin en bas à gauche du diagramme représentant le circuit, ne sera traversée par aucun courant en raison de l'équilibre des constituants et donc cette ligne équipotentielle a-b peut être supprimée.) La capacité de peau dans le modèle à trois composants est la moitié de la capacité réelle de chaque main car les deux capacités des mains sont en série. La résistance de peau dans le modèle devient le double de la résistance de contact de peau de chaque main. La tension de peau dans le modèle est le double de la tension réelle de peau de chaque main. La résistance série dans le modèle est égale à la résistance réelle interne du corps humain (valeur asymptotique de l'impédance du corps humain dans le tableau) pour un passage main-main.

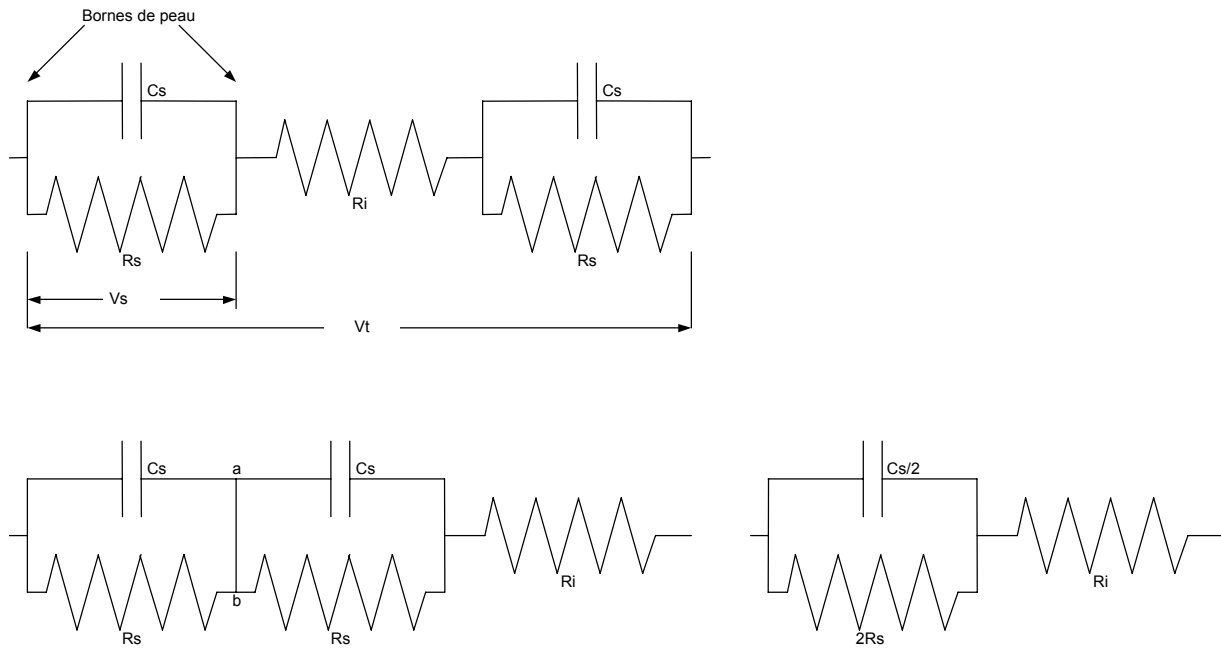


Figure A.1 – Modèle pour un contact main-main

Dans la Figure A.2, le quadruple contact de peau mains-pieds avec des électrodes est identique, et donc il peut être combiné tel qu'indiqué dans l'association parallèle de résistances et de capacités du modèle. Lorsque les impédances de peau sont identiques, la ligne a-b indiquée dans le coin en bas à gauche du diagramme ne sera traversée par aucun courant en raison de l'équilibre des constituants et donc cette ligne peut être supprimée. La capacité de peau dans ce modèle est égale à la capacité réelle de contact de peau de chaque main. La résistance de peau dans le modèle est égale à la résistance réelle de contact de peau de chaque main. La tension de peau est égale au double de la tension réelle de contact de peau pour chaque main. La résistance série dans le modèle est égale à la résistance réelle interne du corps humain (valeur asymptotique de l'impédance du corps humain) pour un passage main-main corrigée par un facteur issu de la Figure 3 de la CEI/TS 60479-1 et qui est le rapport de la résistance deux-mains-deux-pieds et de la résistance main-main.

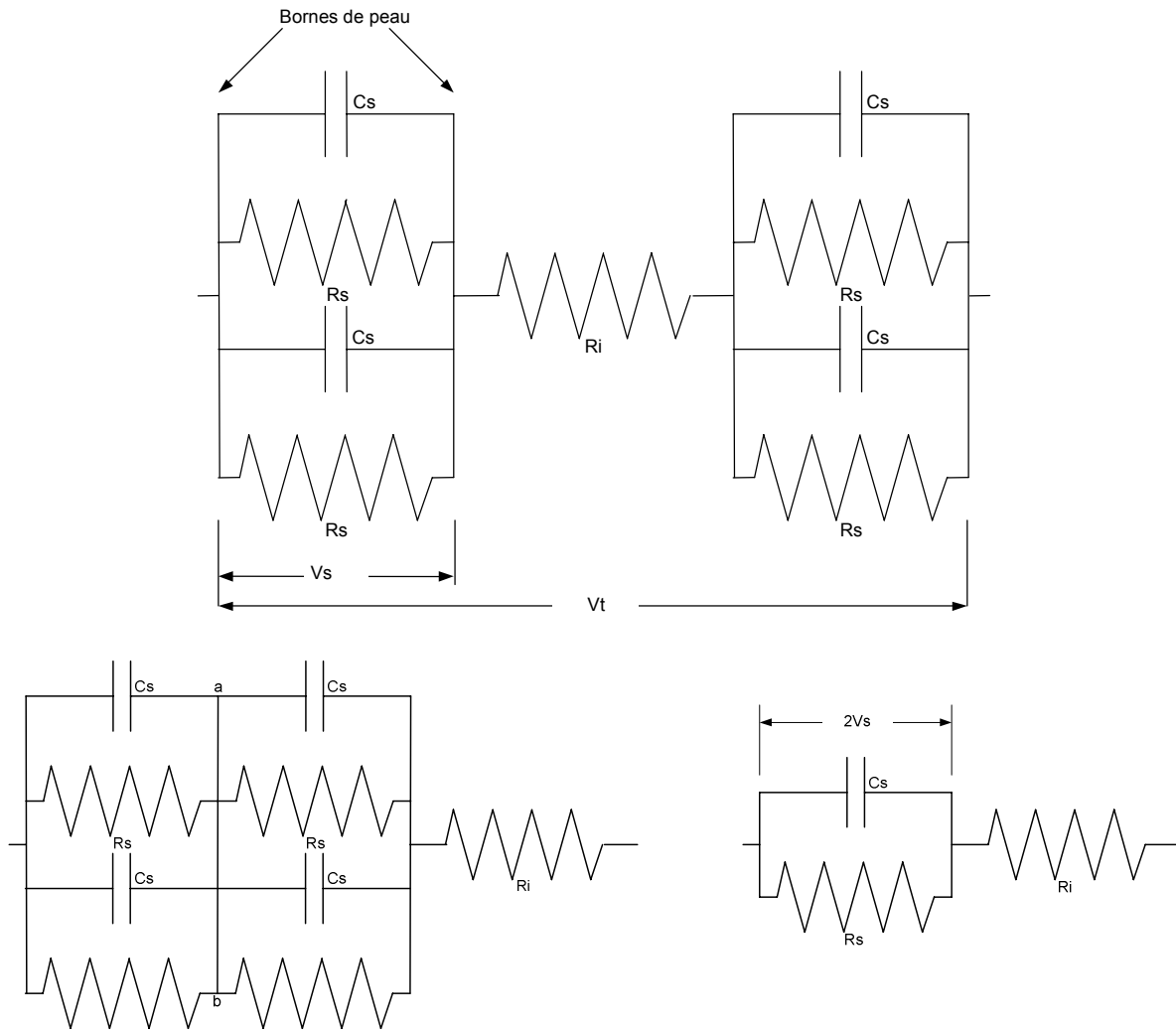


Figure A.2 – Modèle pour un contact deux-mains-deux-pieds

Dans la Figure A.3, l'impédance de contact de peau avec l'électrode au niveau du siège est supposée être très faible en comparaison avec l'impédance de contact de peau de la main. Par conséquent, l'impédance de siège est négligée dans le modèle. La capacité de peau dans le modèle est égale à la capacité réelle de contact de peau d'une main. La résistance de peau dans le modèle est égale à la capacité réelle de contact de peau d'une main. La tension de peau dans le modèle est égale à la tension réelle de contact de la peau. La résistance série dans le modèle est égale à la résistance réelle interne du corps humain (valeur asymptotique de l'impédance du corps humain) pour un passage main-main corrigé par un facteur issu de la Figure 3 de la CEI/TS 60479-1 et qui est le rapport de la résistance main-torse et de la résistance main-main.

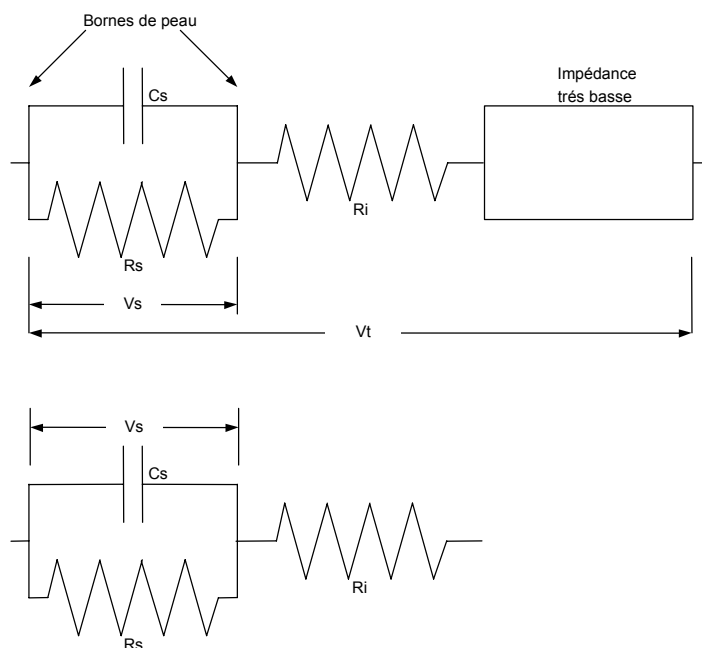


Figure A.3 – Modèle pour un contact main-siège

La valeur de la résistance interne du corps humain pour un cheminement main-main est supposée être égale à la valeur asymptotique de l'impédance du corps humain donnée dans les tableaux de la CEI/TS 60479-1. Dans chaque tableau, la valeur asymptotique correspond à la plus faible valeur de l'impédance du corps humain pour une tension élevée telle qu'il devient possible de considérer que la peau n'a plus aucune contribution dans l'impédance totale du corps humain. Cette valeur est corrigée en fonction des rapports suggérés par la Figure 3 de la CEI/TS 60479-1 dans la mesure où le cheminement du courant de contact est changé.

Les valeurs de la résistance de peau peuvent varier dans une large gamme de valeurs dépendant de la surface de contact de peau et de l'humidité et des impuretés associées à ce contact.

Annexe B (informative)

Tension de contact – Explication de la méthode de calcul des seuils de tension de contact pour la réaction de tressaillement, les forts effets musculaires et la fibrillation ventriculaire à partir des tableaux d'impédances et des limites de courant de la CEI/TS 60479-1

B.1 Généralités

La CEI/TS 60479-1 contient des informations au sujet des impédances du corps humain et des seuils de courant de contact. Dans cette annexe, l'analyse suggère une méthode de combinaison des informations sur les impédances du corps humain et les informations concernant les seuils de courants afin d'estimer les seuils de tension de contact entièrement compatibles avec la CEI/TS 60479-1.

Cette annexe informative passe en revue les explications concernant l'approche adoptée pour développer de nouveaux seuils de tension de contact basés sur de nouvelles informations contenues dans la CEI/TS 60479-1.

En accord avec les modèles du corps humain, des personnes grandes physiquement ont tendance à posséder une impédance interne du corps plus faible comparée à des personnes plus petites physiquement. Des études menées ont montré que l'impédance totale du corps humain est largement indépendante du poids de cette personne. Cependant, une faible corrélation entre ces variables rend les méthodes usuelles de statistique d'estimation des seuils de tension de contact inappropriées. La méthode utilisée dans ce rapport consiste à supposer cette indépendance en utilisant les valeurs correspondant à 5 % de la population, de la CEI/TS 60479-1. Il s'agit probablement d'une approche plus raisonnable mais moins conventionnelle.

B.2 Méthodes de calcul

B.2.1 Nombre de paramètres

En fonction des variables qui contribuent au calcul des seuils de tension de contact, le nombre de combinaisons qu'il est nécessaire de considérer peut être très élevé.

Selon la CEI/TS 60479-1, de nombreux paramètres influencent les valeurs de l'impédance du corps humain. Les paramètres considérés dans cette étude comme particulièrement influents sont présentés dans les Tableaux B.1 et B.2.

Tableau B.1 – Nature et nombre des paramètres influençant l'impédance du corps humain considérés par la CEI/TS 60479-1

Paramètres influençant	Type	Nombre de paramètres	Nombre cumulé de combinaisons
Nature du courant	Alternatif Continu	2	2
Cheminement du courant	Main-main Deux-mains-deux-pieds Main-siège	3	6
Condition de peau	Condition sèche Condition humide Condition humide et salée	3	18
Surface de contact de peau	Grande surface Moyenne surface Petite surface	3	54
Tension de contact	25 V, 50 V, 75 V, 100 V, 125 V, 150 V, 175 V, 200 V, 225 V, 400 V, 500 V, 700 V et 1 000 V	13	702
Pourcentage de la population	5 %	1	702

D'autres paramètres peuvent ensuite être introduits dans le calcul des tensions de contact tels que:

Tableau B.2 – Paramètres additionnels influençant l'impédance du corps humain

Paramètres influençant	Type	Nombre de paramètres	Nombre cumulé de combinaisons
Seuils physiologiques	Réaction de tressaillement Forts effets musculaires Fibrillation ventriculaire	3	2 106
Capacité de peau	0,01 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 0,03 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 0,05 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$	3	6 318
Durée de passage du courant dans le corps humain *	0,01 s, 0,02 s, 0,06 s, 0,1 s, 0,2 s, 0,6 s, 1 s, 2 s, 7 s et 10 s	10	63 180
* Les durées indiquées ont été choisies pour une définition optimale des courbes logarithmiques.			

Ceci signifie qu'il est nécessaire d'effectuer 63 180 calculs individuels. L'utilisation d'une feuille de calcul sur ordinateur est une bonne façon d'effectuer un grand nombre de calculs à partir des valeurs de base discrètes.

B.2.2 Méthode générale

La CEI/TS 60479-1 fournit des valeurs d'impédance du corps humain pour toutes les situations décrites dans le Tableau B.1 mais uniquement pour un passage du courant main-main.

Par conséquent, toutes les valeurs d'impédances du corps humain correspondant aux deux autres cheminements du courant (deux-mains-deux-pieds et main-siège) ont été déterminées pour chaque condition de peau et pour chaque tension de contact. A partir de ces estimations, il devient possible de calculer les tensions de contact par interpolation pour

chaque seuil de courant. Cette comparaison est faite pour chaque durée de passage du courant.

B.2.3 Hypothèse et limite de calcul

B.2.3.1 Détermination de la capacité de peau

La première opération consiste en l'évaluation de la capacité de peau qui vient des expériences [3] à [8]. Ces valeurs expérimentales de capacité de peau sont comprises dans la gamme de $0,01 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ à $0,05 \mu\text{F}/\text{cm}^2$.

En prenant en compte cette gamme, les calculs ont été menés en considérant les trois valeurs suivantes de capacité:

- valeur minimale: $0,01 \mu\text{F}/\text{cm}^2$
- valeur moyenne: $0,03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$
- valeur maximale: $0,05 \mu\text{F}/\text{cm}^2$

A partir de ces valeurs et de la surface de contact de peau, il est possible d'obtenir les valeurs de la capacitance de peau pour chaque surface de contact. Les résultats du calcul des tensions de contact ont montré que de petites différences existent pour la gamme de capacitances de peau; par conséquent, une seule valeur de capacitance de peau a été choisie afin de rester en accord avec les valeurs d'impédance de corps humain telles que fournies par la CEI/TS 60479-1.

B.2.3.2 Résistance de peau comme fonction du temps

La tension appliquée à la peau est nulle avant que le courant ne commence à circuler dans la peau, mais dès le départ, la tension de contact est présente et le courant commence à circuler. Il faut une fraction de seconde pour que la résistance de peau s'ajuste à la différence de tension au niveau de la peau. A partir de résultats d'essai il est possible d'estimer qu'une décroissance exponentielle de la résistance de peau peut être estimée comme une approximation acceptable du phénomène. Dans ce rapport technique, une constante de temps de 50 ms est utilisée [9]. Voir la Figure B.1.

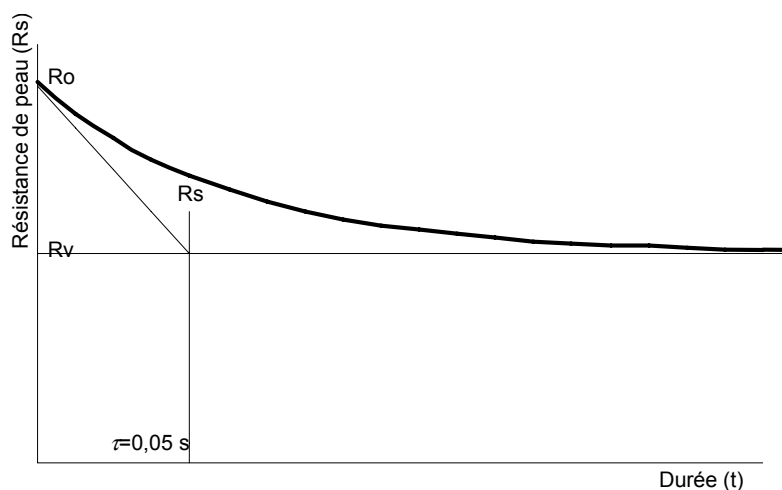


Figure B.1 – Estimation de la variation de la résistance de peau en fonction de la durée de choc électrique

$$(R_s(t) - R_v) = (R_0 - R_v) e^{-t/0,05} \quad (\text{B.1})$$

où

$R_s(0)$ est la résistance de peau en l'absence de tension de contact;

R_v est la résistance de peau après un temps infini d'application de la tension;

τ est la constante de temps.

La valeur de R_s est ainsi une fonction de la durée de passage du courant au travers du corps humain. Cette valeur $R_s(t)$ est donnée par la formule suivante.

$$R_s(t) = R_v + (R_s(0) - R_v) e^{-t/\tau} \quad (\text{B.2})$$

Dès le départ le courant change dès que la résistance de peau s'ajuste jusqu'à la valeur finale de la tension. Pour de courtes durées, le courant s'arrête avant que la résistance de peau ne soit pleinement ajustée. Cette équation est utilisée entre le démarrage de la circulation du courant jusqu'à la coupure du courant. Cette équation introduit une correction pour les courtes durées jusqu'à trois fois la constante de temps.

B.2.3.3 Méthode de mesure de l'impédance du corps humain

Les valeurs d'impédance du corps humain fournies par la CEI/TS 60479-1 sont supposées correspondre à de longues durées de contact. La résistance de peau dépend de la tension directement appliquée à la peau. Mais en cas de contact avec des tensions « élevées » dans des conditions sévères (telles que peau humide et pour une grande surface de contact de peau) les mesures faites sur des volontaires pour la détermination des impédances du corps humain sont très douloureuses. Dans le but d'éviter trop de souffrance et de risque pour ces personnes, la durée d'application de la tension de contact a été réduite. Dans ce cas, les impédances mesurées peuvent être plus élevées que les impédances réelles qui pourraient être atteintes si la tension était appliquée à la peau pour une durée plus longue.

B.2.3.4 Valeurs limites des impédances du corps humain

La CEI/TS 60479-1 fournit les impédances du corps humain, mais elle ne fournit pas tous les cas de figure nécessaires au calcul des tensions de contact correspondant aux effets physiologiques. Ils doivent être calculés de façon indirecte.

- La mesure de l'impédance du corps humain a été effectuée à partir des tensions minimales de 25 V. Mais selon B.2.3.2, il est nécessaire de déterminer la valeur de R_0 . Dans ce rapport, une extrapolation linéaire à partir des valeurs de 25 V et de 50 V a été utilisée afin d'estimer de façon sécurisante l'impédance du corps humain à 0 V.
- Pour des conditions sévères (peau humide ou humide et salée) aucune mesure n'a été faite pour des tensions de contact supérieures à 200 V. Ces conditions d'essais sont très sévères à cause de très fortes douleurs ressenties par les volontaires. Pour des tensions de contact de l'ordre de 1 000 V, seule l'impédance interne est considérée sans l'impédance de peau.

B.2.3.5 Interpolations

La comparaison entre le courant circulant dans le corps humain et les seuils de courant pour différents effets physiologiques peut demander des interpolations entre des valeurs calculées qui ont été reportées sur un diagramme logarithmique.

B.2.3.6 Précision

A cause du comportement statistique des données de base, il n'est pas possible d'estimer la précision des valeurs de seuils de tension de contact calculées.

B.3 Calcul

B.3.1 Algorithmes de calcul de l'impédance en courant alternatif

Toutes les formules utilisées dans ce paragraphe sont directement issues du modèle décrit en Annexe A pour chaque cheminement du courant.

B.3.1.1 Cheminement main-main

a) Cheminement main-main du courant

Le point de départ correspond aux valeurs fournies par la CEI/TS 60479-1 pour l'impédance du corps humain Z_{h-h} pour un cheminement main-main du courant et pour chaque tension de contact $V_{t\ h-h}$ (main-main).

Le courant main-main I_{h-h} est donné par la formule:

$$I_{h-h} = \frac{V_{t\ h-h}}{Z_{h-h}} \quad (B.3)$$

Pour d'autres calculs correspondant à d'autres cheminements de courant, il est nécessaire de calculer les composantes de l'impédance du corps humain.

b) Résistance interne

La résistance interne $R_{i\ h-h}$ correspond à la résistance des tissus situés entre les deux mains. Ils incluent les bras et le torse lorsque le courant circule transversalement. Il est difficile de mesurer une telle résistance, mais cependant il est possible d'en obtenir indirectement une estimation. Pour des tensions plus élevées, les mesures de l'impédance main-main deviennent asymptotiques à une valeur correspondant à cette résistance interne pour ce cheminement considéré du courant. Ceci est expliqué par le claquage de la peau à cette tension court-circuitant totalement les capacités et les résistances de peau.

D'un point de vue pratique, il sera considéré que la résistance interne est égale à l'impédance totale du corps humain mesurée à une tension de l'ordre de 1 000 V.

$$R_{i\ h-h} = Z_{h-h} \text{ à } \approx 1\ 000\ \text{V} \quad (B.4)$$

c) Capacitance de peau

Il est nécessaire d'estimer l'impédance de peau. Pour cela il faut estimer la capacitance de peau C_s . Cette capacitance de peau est calculée à partir de la capacité de peau par unité de surface C_s/S_s (de l'ordre de 0,01 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ à 0,05 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$) et à partir de la surface de contact S_c :

$$C_s = S_c \times \left(\frac{C_s}{S_s} \right) \Bigg|_{C_s/S_s=0,01\ \mu\text{F}/\text{cm}^2}^{C_s/S_s=0,05\ \mu\text{F}/\text{cm}^2} \quad (B.5)$$

d) Résistance de peau

Le calcul de la résistance de peau est plus difficile et doit être effectué par approximations successives, ce qui peut être résolu par un logiciel de calcul.

La résistance de peau est une partie de l'impédance du corps humain. Mais cette résistance dépend de la tension directement appliquée à la peau, qui elle-même dépend de la répartition de l'impédance totale du corps humain.

De ceci, il résulte que la recherche de la bonne valeur de résistance de peau R_s est telle que Z_{h-h} donnée par la formule suivante devienne égale à la valeur donnée dans la CEI/TS 60479-1.

$$Z_{h-h} = \frac{R_{i h-h} \sqrt{(2\pi f)^2 + \left(\frac{R_{i h-h} + 2R_s}{R_{i h-h} \times 2R_s \times \frac{C_s}{2}} \right)^2}}{\sqrt{(2\pi f)^2 + \left(\frac{1}{2R_s \times \frac{C_s}{2}} \right)^2}} \quad (\text{B.6})$$

où

f est la fréquence du courant passant par le corps humain.

NOTE Dans quelques cas, il a été impossible d'estimer la valeur correcte de R_s pour qu'elle coïncide avec la valeur fournie par la CEI/TS 60479-1. Ceci vient de la valeur de la capacitance de peau qui devient trop faible. Pour cette raison ce rapport utilise la valeur minimale de capacitance de peau.

La formule pour Z_{h-h} dépend également de $R_{i h-h}$, qui correspond à la résistance des tissus internes pour un cheminement du courant main-main.

e) Réajustement de la résistance de peau

La valeur trouvée pour R_s correspond à la résistance pour une longue durée d'application de la tension de contact (il a été supposé que la valeur de l'impédance du corps humain Z_{h-h} correspond à une longue durée d'application de la tension de contact, assez longue pour que R_s puisse s'ajouter d'elle-même à la tension directement appliquée à la peau). Pour des durées plus courtes (moins de trois fois la constante de temps) la résistance de peau n'a pas le temps suffisant pour s'ajuster complètement. Ce calcul ajuste la courbe comme une fonction du temps comme indiqué en B.2.3.2.

$$R_s(t) = R_s + (R_s(0) - R_s) e^{-t/0,05} \quad (\text{B.7})$$

Afin d'appliquer cet algorithme, il faut une estimation de $R_s(0)$ qui est la résistance de peau avant le choc électrique.

f) Estimation de la résistance initiale de peau

Une extrapolation linéaire de la courbe donnant Z_{h-h} en fonction de V_t fournit une estimation de la valeur initiale de $Z_{h-h}(0)$ qui permet le calcul de $R_s(0)$.

Le graphique ci-dessous (Figure B.2) permet l'estimation de la valeur initiale de l'impédance $Z_{h-h}(0)$ pour un trajet main-main. Une extrapolation linéaire donne une valeur de 2 125 Ω pour une impédance du corps humain entre main-main à 0 V.

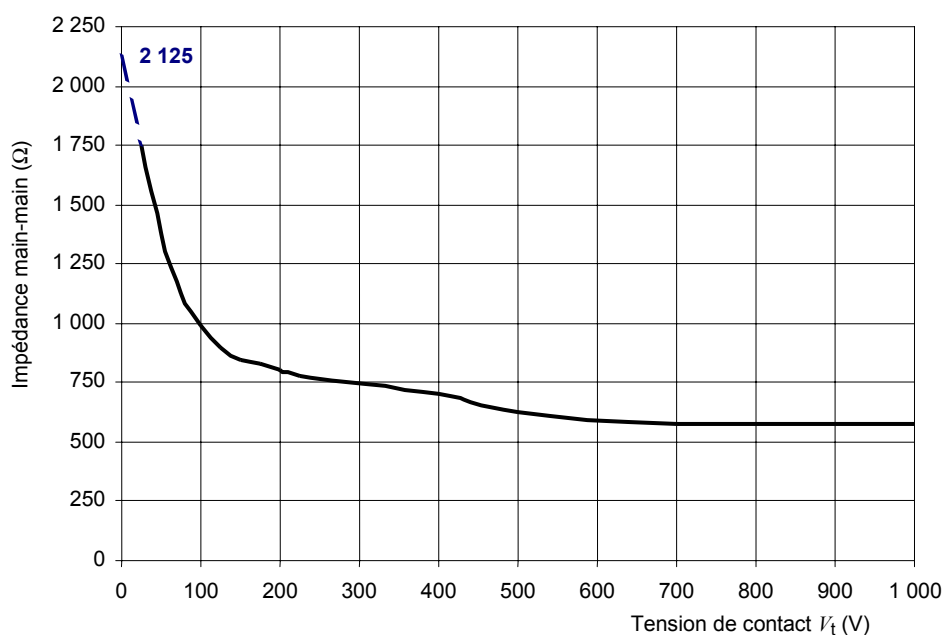


Figure B.2 – Exemple d'extrapolation de l'impédance main-main à 0 V dans des conditions sèches avec une large surface de contact

g) Impédance de peau

Une fois la résistance et la capacitance de peau connues, il est possible d'estimer l'impédance de peau $Z_s(t)$, pour certaines durées du passage du courant, en utilisant l'équation suivante:

$$Z_{sh-h}(t) = \frac{\left(\frac{1}{C_s} \right)}{\sqrt{(2f\pi)^2 + \left(\frac{1}{R_s(t) \times C_s} \right)^2}} \quad (\text{B.8})$$

h) Tension de peau

A partir de la valeur de l'impédance de peau, il est possible d'estimer la valeur directement appliquée à la peau $V_s(t)$ (aux « bornes » de la peau). Cette tension dépend du courant circulant au travers de la peau et qui pour un cheminement main-main est égal au courant main-main calculé en a):

$$V_s(t) = Z_s(t) \times I_{h-h} \quad (\text{B.9})$$

Cette valeur de $V_s(t)$ sera utilisée pour d'autres cheminements de courant au travers du corps humain.

Tous ces calculs doivent être répétés pour des valeurs différentes et des combinaisons des paramètres suivants:

- tension de contact;
- densité de capacitance de peau;
- conditions de peau (sèche, humide, humide et salée);

- durée de circulation du courant.

B.3.1.2 Cheminement deux-mains-deux-pieds

a) Calcul de la résistance interne

Pour un cheminement différent du courant, la résistance interne des tissus a une valeur différente. La nouvelle valeur $R_{i\ h-f}$ pour un trajet du courant entre les deux mains et les deux pieds peut être estimée à partir de la résistance interne correspondant à un cheminement du courant main-main ($R_{i\ h-h}$) par la méthode suivante.

Toutes les valeurs d'impédance totale fournies par la CEI/TS 60479-1 correspondent à un cheminement du courant entre main-main. Les tissus internes au travers desquels le courant circule correspondent aux tissus internes des deux bras et du tronc lorsqu'il est traversé par un courant transversal. Voir la Figure B.3.

La CEI/TS 60479-1 fournit également la possibilité de trouver les valeurs de la résistance interne correspondant aux différents cheminements du courant en utilisant un pourcentage de la résistance interne pour un courant circulant entre main-main.

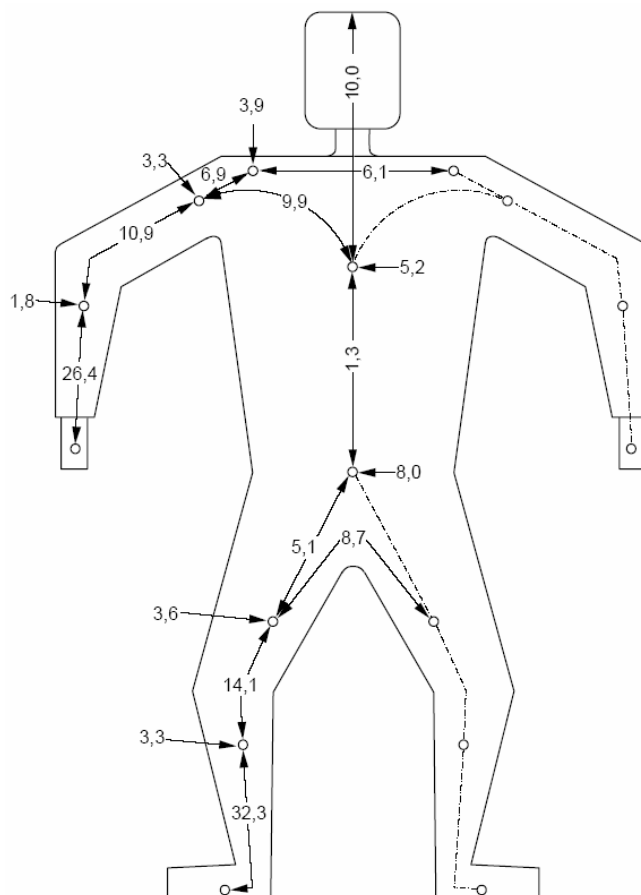


Figure B.3 – Pourcentage de la résistance interne d'un corps humain pour la partie concernée

- Pourcentage pour un cheminement du courant entre main-main:

$$26,4 \% + 10,9 \% + 6,9 \% + 6,1 \% + 6,9 \% + 10,9 \% + 26,4 \% = 94,5 \%$$

- Pourcentage pour un cheminement du courant entre deux mains et deux pieds:

$$\frac{(26,4 \% + 10,9 \% + 9,9 \%)}{2} + 1,3 \% + \frac{(5,1 \% + 14,1 \% + 32,3 \%)}{2} = 50,65 \%$$

Comme la référence correspond à un passage du courant entre main-main, en ce qui concerne un cheminement du courant entre deux mains et deux pieds, la valeur de l'impédance interne correspond à $\frac{50,65\%}{94,5\%} = 0,536$ fois la valeur de la résistance interne pour un passage du courant entre main-main.

Il est possible d'estimer la résistance interne $R_{i\ h-f}$ d'un corps humain entre deux mains et deux pieds à partir de la résistance interne $R_{i\ h-h}$ pour un passage du courant entre main-main, comme suit:

$$R_{i\ h-f} = R_{i\ h-h} \times 0,536 \quad (B.10)$$

b) Courant entre deux-mains-deux-pieds

Pour la valeur de l'impédance de peau $Z_{s\ h-h}(t)$ calculée pour un cheminement main-main et pour une tension de peau $V_s(t)$ également calculée pour un cheminement du courant main-main, il est possible de calculer la valeur correspondante du courant circulant au travers du corps humain pour un cheminement du courant entre deux-mains-deux-pieds I_{h-f} à partir de la formule suivante:

$$I_{h-f} = 2 \times \frac{V_s(t)}{Z_{s\ h-h}(t)} \quad (B.11)$$

Le coefficient 2 vient du fait que le courant au travers du torse est double du courant au travers d'un bras, car dans cette situation les deux mains sont en contact avec une partie sous tension ayant la même tension (voir modèle décrit à la Figure A.2 de l'Annexe A).

c) Impédance totale

Il devient maintenant possible de calculer la nouvelle valeur de l'impédance totale du corps humain en utilisant la formule suivante:

$$Z_{h-f} = \frac{R_{i\ h-f} \times \sqrt{(2f\pi)^2 + \frac{(R_{i\ h-f} + R_s(t))^2}{(R_{i\ h-f} \times R_s(t) C_s)^2}}}{\sqrt{(2f\pi)^2 + \left(\frac{1}{R_s(t) C_s}\right)^2}} \quad (B.12)$$

De toute évidence, cette nouvelle valeur de l'impédance du corps humain deux-mains-aux-deux-pieds ne correspond pas à la même tension de contact telle que calculée pour un passage du courant entre main-main. Les nouvelles valeurs de tension de contact correspondent à une tension de contact estimée pour un cheminement du courant main-main.

d) Tension de contact

La nouvelle valeur de la tension de contact $V_{t\ h-f}$ peut être calculée de la façon suivante:

$$V_{t\ h-f} = Z_{h-f} \times I_{h-f} \quad (B.13)$$

Une nouvelle fois, ces calculs doivent être effectués pour chaque paramètre mentionné ci-dessus.

B.3.1.3 Cheminement main-siège

a) Calcul de la résistance interne

D'une façon similaire à celle expliquée en B.3.1.2 a), il est possible de calculer la résistance interne du corps humain pour ce cheminement particulier à partir de la résistance interne correspondant à un cheminement main-main.

Le pourcentage pour un passage du courant entre main-siège est:

$$26,4 \% + 10,9 \% + 9,9 \% + 1,3 \% = 48,5 \%$$

Pour un cheminement main-siège, la valeur de l'impédance interne correspond à $\frac{48,5 \%}{80,7 \%} = 0,601$ fois la valeur de la résistance interne pour un passage main-main.

Par conséquent, il est possible d'estimer la résistance interne $R_{i\ h-f}$ du corps humain pour un cheminement du courant entre main-siège à partir de la résistance interne $R_{i\ h-h}$ pour un passage du courant main-main, comme suit:

$$R_{i\ h-s} = R_{i\ h-h} \times 0,601 \quad (B.14)$$

b) Impédance totale

La méthode est similaire à celle utilisée pour le courant deux-mains-deux-pieds, avec quelques modifications.

La nouvelle valeur de l'impédance totale du corps humain est donnée par la formule suivante:

$$Z_{h-s} = \frac{R_{i\ h-s} \times \sqrt{(2f\pi)^2 + \frac{(R_{i\ h-f} + R_s(t))^2}{(R_{i\ h-f} \times R_s(t)C_s)^2}}}{\sqrt{(2f\pi)^2 + \left(\frac{1}{R_s(t)C_s}\right)^2}} \quad (B.15)$$

Comme pour le cheminement du courant deux-mains-deux-pieds, cette nouvelle valeur de l'impédance main-siège du corps humain ne correspond pas à la même tension de contact que celle calculée pour le cheminement main-main.

c) Courant main-siège

A partir de la valeur de l'impédance $Z_{s\ h-h}(t)$ calculée pour un passage du courant entre main-main et à partir de la tension de contact $V_s(t)$ également calculée pour un cheminement du courant main-main, il est possible de calculer la valeur correspondante du courant circulant au travers du corps humain pour un cheminement du courant main-siège à partir de la formule suivante:

$$I_{h-s} = \frac{V_s(t)}{Z_{s\ h-h}(t)} \quad (B.16)$$

Dans cette situation, le courant au travers du torse est égal au courant au travers de la main (voir le modèle décrit à la Figure A.3 de l'Annexe A).

d) Tension de contact

La nouvelle tension de contact $V_{t\ h-s}$ est calculée de la façon suivante:

$$V_{t\ h-s} = Z_{h-s} \times I_{h-s} \quad (B.17)$$

De nouveaux calculs doivent être effectués pour les différents paramètres mentionnés ci-dessus.

B.3.2 Algorithmes de calcul du seuil de tension en courant alternatif

B.3.2.1 Cheminement main-main

Pour chaque tension de contact $V_{t\ h-h}$, les valeurs de Z_{h-h} et de I_{h-h} ont été calculées. Il est maintenant possible de tracer les graphiques représentant les courants au travers du corps humain en fonction des tensions de contact V_{h-h} .

De plus, les valeurs des seuils minimaux correspondant à l'effet physiologique considéré doivent être ajoutées. Tableau B.3 donne les seuils pour un cheminement du courant main-main sont les suivants:

Tableau B.3 – Seuils maximaux du courant alternatif correspondant à une durée de circulation du courant pour chaque effet considéré et pour un cheminement du courant main-main

Seuil en courant (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Réaction de tressaillement	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Fort effet musculaire	200	135	73	55	37	20	15	10	5	5
Fibrillation ventriculaire	1 250	1 238	1 175	1 000	650	200	125	105	100	100

Pour une durée de passage du courant de 200 ms, la ligne du courant de contact coupe la courbe en courant 0,5 mA représentant le seuil de réaction de tressaillement (SR) à 0,5 V, la courbe en courant 37 mA représentant le seuil pour un fort effet musculaire (ME) à 35 V et la courbe en courant 650 mA représentant le seuil de fibrillation ventriculaire à 438 V (voir Figure C.1).

Le courant de contact est fonction de la tension de contact et correspond à la caractéristique de l'impédance du corps humain.

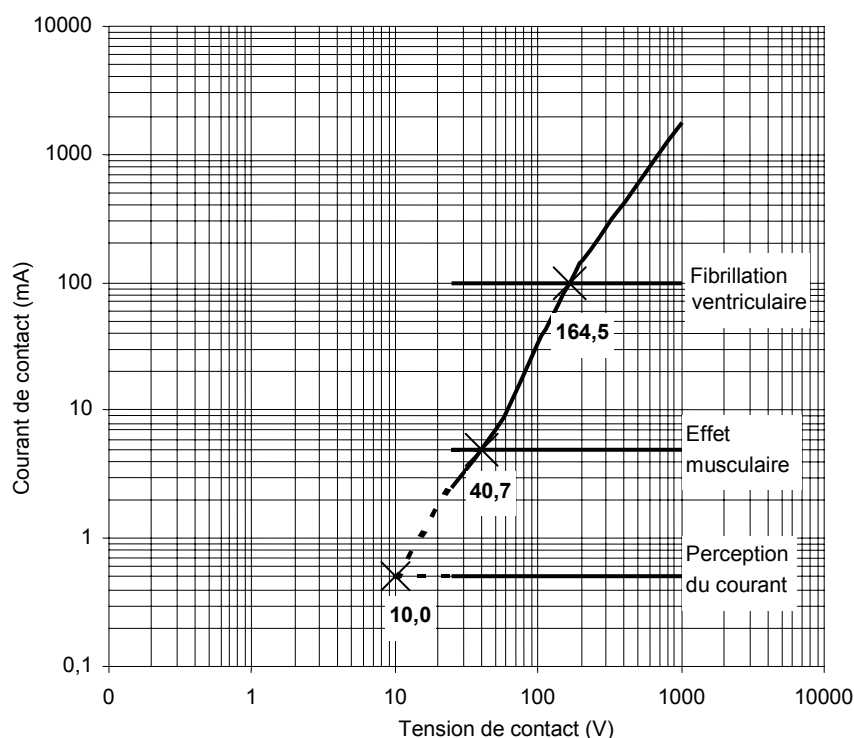


Figure B.4 – Exemple de diagramme utilisé pour le calcul des seuils de réaction de tressaillement, de fort effet musculaire et de fibrillation ventriculaire en courant alternatif pour un passage du courant main-main, avec de grandes surfaces de contact dans des conditions sèches et pour une durée de passage du courant de 10 ms

Dans l'exemple donné à la Figure B.4, les courbes tracées en échelle log-log semblent être rectilignes. Ainsi, il peut être pertinent de calculer les valeurs correspondant aux intersections des courbes par des interpolation logarithmiques.

Tous ces calculs décrits ci-dessus doivent être effectués pour les différentes valeurs des paramètres suivants :

- état de la peau (sèche, humide, humide et salée);
- surface de contact de la peau (petite, moyenne, grande);
- durée de passage du courant.

B.3.2.2 Cheminement deux-mains-deux-pieds

Une méthode similaire est appliquée à celle utilisée pour ce passage du courant au travers du corps humain. Le Tableau B.4 donne des valeurs différentes sont utilisées pour les seuils minimaux en courant :

Tableau B.4 – Seuils maximaux en courant alternatif pour des durées de passage du courant entre deux-mains-deux-pieds et pour chaque effet du courant

Seuil en courant (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Réaction de tressaillement	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Fort effet musculaire	400	270	146	110	74	40	30	20	10	10
Fibrillation ventriculaire	500	495	470	400	260	80	50	42	40	40

Ici encore, les calculs doivent être effectués pour toutes les valeurs des paramètres mentionnés ci-dessus.

B.3.2.3 Cheminement main-siège

Le Tableau B.5 propose la même méthode que précédemment avec les valeurs minimales de seuils de courant suivantes.

Tableau B.5 – Seuils maximaux en courant alternatif pour des durées de passage du courant entre main-siège et pour chaque effet du courant

Seuil en courant (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Réaction de tressaillement	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Fort effet musculaire	200	135	73	55	37	20	15	10	5	5
Fibrillation ventriculaire	714	707	671	571	371	114	71	60	57	57

Ici encore, les calculs doivent être effectués pour toutes les valeurs des paramètres mentionnés ci-dessus.

B.3.2.4 Courbes temps/tension

Une fois que l'ensemble des calculs décrits ci-dessus a été effectué, il est alors possible de tracer les courbes temps/tension en rassemblant les valeurs correspondant aux applications similaires (cheminement du courant, condition de la peau, surface de contact de peau) mais pour des durées croissantes de passage du courant.

Quelques simplifications sont nécessaires:

Tous ces calculs ont été effectués pour trois valeurs de la densité de capacité de peau (faible, moyenne et forte) (voir B.2.2.1). Pour des raisons de sécurité des personnes, il est possible de choisir la valeur de la capacité correspondant au seuil minimal de tension.

Grâce à cette hypothèse simplificatrice, il devient maintenant possible de tracer les courbes des seuils temps/tension correspondant aux seuils temps/courant de la CEI/TS 60479-1. Toutes ces courbes sont fournies dans l'Article 5.

B.3.3 Algorithmes de calcul des impédances en courant continu

Les calculs en courant continu sont plus simples que ceux en courant alternatif car il est possible de négliger l'influence des capacités de peau. La méthode utilisée est similaire à celle utilisée en courant alternatif.

B.3.3.1 Cheminement main-main

a) Courant main-main

La CEI/TS 60479-1 fournit les valeurs de la résistance du corps humain R_{h-h} pour un cheminement du courant entre main et main et ceci pour chaque tension de contact V_{th-h} (main-main).

Le courant main-main I_{h-h} est donné par:

$$I_{h-h} = \frac{V_{th-h}}{Z_{h-h}} \quad (B.18)$$

b) Résistance interne

Comme en courant alternatif, la résistance interne R_{ih-h} correspond à la valeur asymptotique de la courbe d'impédance main-main donnée comme fonction de la tension de contact. En fait les mêmes effets physiologiques apparaissent en courant continu.

$$R_{ih-h} = Z_{h-h}(1\ 000) \quad (\text{B.19})$$

c) Résistance de peau

La résistance du corps humain est égale à la somme des deux résistances de peau de chaque main et de la résistance des tissus internes. Cependant il est maintenant possible d'estimer la résistance de peau d'une seule main grâce à la formule suivante:

$$R_s = \frac{Z_{h-h} - R_{ih-h}}{2} \quad (\text{B.20})$$

d) Ajustement de la résistance de peau

De la même manière qu'en courant alternatif, la résistance de peau nécessite une fraction de seconde pour s'ajuster correctement à sa valeur finale, dépendant de la tension qui lui est directement appliquée. La résistance de peau $R_s(t)$ à un instant donné t est calculée en utilisant la formule suivante:

$$R_s(t) = R_s + (R_s(0) - R_s) e^{-t/0,05} \quad (\text{B.21})$$

dans laquelle $R_s(0)$ correspond à la valeur initiale de R_s lorsque la tension de peau est nulle.

e) Calcul de la résistance initiale de peau

Ce calcul est possible par extrapolation linéaire de la courbe fournissant R_{h-h} en fonction de V_t pour une valeur de V_t égale à 0 V.

De cette valeur initiale de la résistance main-main $R_{h-h}(0)$, un calcul similaire à c) et d) est possible pour déterminer la valeur initiale de la résistance de peau $R_s(0)$.

f) Tension de peau

Ici encore il est possible de calculer la tension directement appliquée à la peau V_s . Cette tension est calculée de la même manière qu'en courant alternatif.

$$V_s = R_s(t) \times I_{h-h} \quad (\text{B.22})$$

De nouveau cette valeur de V_s pourra être utilisée pour d'autres cheminements du courant au travers du corps humain.

Tous ces calculs décrits ci-dessus doivent être effectués pour différentes valeurs des paramètres suivants:

- tension de contact;
- condition de peau (sèche, humide, humide et salée);
- surface de contact (petite, moyenne, grande);
- durée de passage du courant.

B.3.3.2 Cheminement deux-mains-deux-pieds

a) Résistance interne

Pour un cheminement différent du courant, l'impédance interne, assimilée à une résistance, est différente. Le facteur de correction appliqué pour le courant alternatif est aussi applicable pour le courant direct.

$$R_{ih-f} = R_{ih-f} \times 0,628 \quad (\text{B.23})$$

b) Courant deux-mains-deux-pieds

Le courant deux-mains-deux-pieds est calculé de manière identique qu'en courant alternatif.

$$I_{h-f} = 2 \times \frac{V_s}{Z_{h-h}} \quad (\text{B.24})$$

Le même coefficient 2 s'applique également ici.

c) Impédance totale

Le calcul de la résistance totale est beaucoup plus simple dans ce cas, qu'en courant alternatif car les déphasages occasionnés par la présence de la capacité de peau ne doivent pas être pris en considération. La formule suivante s'applique:

$$R_{m-p} = 2 \times R_p(t) + R_{im-p} \quad (\text{B.25})$$

d) Tension de contact

La nouvelle tension de contact $V_{c\ m-p}$ est obtenue de la façon suivante:

$$V_{c\ m-p} = R_{m-p} \times I_{m-p} \quad (\text{B.26})$$

Néanmoins, ces calculs doivent être effectués pour les différentes valeurs des paramètres mentionnés ci-dessus.

B.3.3.3 Cheminement main-siège

a) Résistance interne

Comme pour le passage du courant mains-pieds qui diffère du cheminement main-main qui représente notre référence pour les calculs, la résistance interne est différente. Le même coefficient correctif utilisé en courant alternatif s'applique également ici en courant continu.

$$R_{ih-s} = R_{ih-h} \times 0,601 \quad (\text{B.27})$$

b) Courant main-siège

Il est maintenant possible de calculer le courant main-siège par la formule suivante:

$$I_{h-s} = \frac{V_s}{Z_{h-h}} \quad (\text{B.28})$$

Il est nécessaire de se rappeler que dans ce cas le courant au travers du torse est égal au courant au travers de la main.

c) Résistance totale

La nouvelle valeur de la résistance totale du corps humain est simplement la somme algébrique de la résistance de peau et de la résistance interne:

$$R_{h-s} = R_{ih-s} + R_s(t) \quad (\text{B.29})$$

d) Tension de contact

La nouvelle tension de contact V_{th-s} s'obtient de la façon suivante:

$$V_{th-s} = R_{h-s} \times I_{h-s} \quad (\text{B.30})$$

Néanmoins, ces calculs doivent de nouveau être effectués pour les différentes valeurs des paramètres mentionnés ci-dessus.

B.3.4 Algorithmes de calcul pour les seuils de tension en courant continu

B.3.4.1 Cheminement main-main

De la même manière que pour le courant alternatif, les valeurs de R_{h-h} et de I_{h-h} pour chaque valeur de V_{h-h} ont été estimées. Il devient maintenant possible de tracer les courbes fournissant le courant au travers du corps humain I_{h-h} en fonction de la tension de contact V_{h-h} .

Si, sur ces courbes, les valeurs des seuils en courant pour un effet physiologique donné sont superposées, il est alors possible d'estimer les valeurs des seuils de tension en calculant l'abscisse des points d'intersection de ces courbes.

Les valeurs minimales des seuils en courant pour ce cheminement du courant sont donnés dans le Tableau B.6.

Tableau B.6 – Seuils maximaux en courant continu correspondant à une durée de passage du courant pour chaque effet physiologique considéré et pour un cheminement main-main

Seuil en courant (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Réaction de tressaillement	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Fort effet musculaire	200	153	99	81	62	40	33	25	25	25
Fibrillation ventriculaire	1 250	1 238	1 175	1 000	650	400	375	350	350	350

Dans cet exemple, les courbes tracées en échelle log-log semblent être rectilignes. Il peut alors être opportun de calculer les valeurs correspondant aux intersections des courbes par une interpolation logarithmique. Cependant, les courbes ne sont pas toujours rectilignes dans ce système d'axes log-log, c'est pourquoi il est judicieux d'utiliser les deux types connus d'interpolation (voir 4.2.4).

Il est nécessaire d'effectuer tous ces calculs pour toutes les valeurs des paramètres suivants:

- condition de peau (sèche, humide, humide et salée);
- surface de contact (petite, moyenne, grande);

- pourcentage de la population;
- durée de passage du courant.

B.3.4.2 Cheminement deux-mains-deux-pieds

La même méthode s'applique pour ce cheminement du courant au travers du corps humain. Comme indiqué dans le Tableau B.7, des valeurs différentes pour les seuils minimaux en courant doivent être utilisées.

Tableau B.7 – Seuils maximaux en courant continu correspondant à une durée de passage du courant pour chaque effet considéré et pour un cheminement deux-mains-deux-pieds

Seuil en courant (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Réaction de tressaillement	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Fort effet musculaire	200	153	99	81	62	40	33	25	25	25
Fibrillation ventriculaire	500	495	470	400	260	160	150	140	140	140

Une fois de plus, les mêmes calculs doivent être effectués pour toutes les valeurs des paramètres listés ci-dessus.

B.3.4.3 Cheminement main-siège

De nouveau, les méthodes similaires à celles utilisées précédemment s'appliquent avec des valeurs minimales de seuils en courant, comme indiqué au Tableau B.8).

Tableau B.8 – Seuils maximaux en courant continu correspondant à une durée de passage du courant pour chaque effet considéré et pour un cheminement du courant main-siège

Seuil en courant (mA)	0,01 s	0,02 s	0,06 s	0,1 s	0,2 s	0,6 s	1 s	2 s	6,8 s	10 s
Réaction de tressaillement	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Fort effet musculaire	200	153	99	81	62	40	33	25	25	25
Fibrillation ventriculaire	714	707	671	571	371	229	214	200	200	200

Une fois de plus, les mêmes calculs doivent être effectués pour toutes les valeurs des paramètres listés ci-dessus.

B.3.4.4 Courbes temps/tension

Comme pour le courant alternatif, il est maintenant possible de tracer les courbes temps/tension en rassemblant les valeurs correspondantes pour une même application (cheminement du courant, condition de peau, surface de contact) mais pour des valeurs croissantes des durées de passage du courant.

Quelques simplifications sont ici nécessaires pour le courant continu en ce qui concerne le choix d'interpolation parmi deux types possibles. Comme pour le courant alternatif, et pour favoriser la sécurité des personnes, le choix se portera sur le type d'interpolation fournissant la plus faible valeur du seuil de tension.

Avec cette hypothèse simplificatrice, il est maintenant possible de tracer les courbes des zones de temps/tension correspondant aux zones temps/courant de la CEI/TS 60479-1. Toutes les courbes sont données dans l'Article 5.

Annexe C (informative)

Détermination des seuils de tension dans certaines conditions

C.1 Exemples simplifiés

Pour les situations remplissant les critères suivants :

- passage du courant entre mains-pieds,
- grande surface de contact,

le Tableau C.1 donne un exemple des résultats.

Tableau C.1 – Exemple de seuils de tension pour un courant alternatif et continu correspondant à de forts effets musculaires et à la fibrillation ventriculaire pour les conditions environnementales mentionnées ci-dessus

Tension de contact minimale V		Condition humide	Condition sèche
Réaction de tressaillement	c.a.	0,4	1
	c.c.	2	4
Fort effet musculaire	c.a.	7	11
	c.c.	16	26
Fibrillation ventriculaire	c.a.	24	33
	c.c.	75	87

Ces situations correspondent aux Figures 8, 9, 17 et 20.

C.2 Situations usuelles

Les exemples suivants correspondant aux situations usuelles illustrent la façon d'utiliser le Tableau 2.

a) Salle de bains:

Une personne main et pied nus peut se tenir debout sur un sol humide. En agrippant un sèche-serviette électrique défectueux, une tension de contact n'excédant pas 24 V a.c. ne générera pas de fibrillation ventriculaire.

b) Enceintes conductrices exiguës

Une personne réparant de l'intérieur un large réservoir métallique peut être en contact permanent avec le réservoir métallique d'une main et toucher un conducteur actif de l'autre main. En supposant que cette personne ne soit pas en sueur, une tension de contact inférieure à 104 V c.a. ne causera pas d'effet tel que l'incapacité de lâcher. Cette valeur correspond à des conditions sèches et à un courant main-main pour de petites surfaces de contact.

c) Piscines

L'eau des piscines contient des produits chimiques qui accroissent la conductivité, et les nageurs ont les mains et les pieds nus. En jouant, des personnes mouillées peuvent toucher des matériels électriques et peuvent supporter pendant de longues durées une tension inférieure à 11 V c.a., ce qui correspond à une moyenne surface de contact et ce pour un effet tel que l'incapacité de lâcher. Pour des nageurs immergés dans l'eau de la piscine, les tensions de contact admissibles sont beaucoup plus faibles.

Annexe D (informative)

Limite d'utilisation

D.1 Courants et tensions alternatives de fréquence plus élevée

Ce rapport technique traite uniquement les tensions sinusoïdales alternatives à 50/60 Hz ainsi que les tensions purement continues sans composante alternative significative. Les tensions alternatives à fréquence plus élevée comprenant des sources complexes de fréquences mixtes ainsi que des formes d'onde composites alternative et continue nécessitent un modèle d'impédance du corps humain plus compliqué et certains ajustements des seuils de courant pour les effets physiologiques non désirés.

Lorsque la fréquence augmente à partir de 50/60 Hz, l'impédance du corps humain décroît (voir Figure 12 de la CEI/TS 60479-1) alors que l'effet physiologique du courant décroît [2]. Cependant, l'impédance du corps humain ne commence à diminuer qu'à partir d'une fréquence plus faible que celle à laquelle le seuil de courant pour l'effet physiologique ne commence à augmenter. Il en résulte que dès que la fréquence augmente à partir de 50/60 Hz, le seuil de tension de contact pour un effet physiologique tel que la réaction de tressaillement, l'incapacité de lâcher ou la fibrillation ventriculaire commence à décroître avant de croître à nouveau avec l'augmentation de la fréquence.

La CEI 60990 permet une mesure correcte des courants de contact à haute fréquence selon les conditions données dans la CEI/TS 60479-1. Le modèle d'impédance du corps humain est conçu pour des tensions de 100 V à 240 V, mais peut présenter une trop grande simplification pour d'autres conditions.

D.2 Immersion

Les seuils de tensions ne sont pas facilement utilisables pour des applications impliquant l'immersion de certaines parties du corps, telles que pour les matériels utilisés dans les piscines, les stations thermales, les baignoires et similaires. L'une des difficultés consiste dans le fait que la présence du corps humain dans l'eau perturbe le champ électrique dans l'eau. Une autre difficulté réside dans le grand nombre de cheminements possibles pour le courant en entrant et en sortant du corps humain par de grandes surfaces de contact de peau. Le mouvement du corps dans l'eau par rapport à la direction de champ électrique peut modifier le courant de contact et par conséquent les effets du champ électrique dans le corps humain. L'orientation du corps humain par rapport au champ électrique détermine l'amplitude du courant au travers des différentes parties du corps, et ceci affecte les types d'effets physiologiques pouvant se produire comme conséquence du champ électrique.

Le passage du courant électrique au travers du corps humain d'un nageur immergé peut également inclure la tête de cette personne. L'effet du courant au travers de la tête peut interférer avec la capacité de cette personne à nager. La noyade peut survenir en plus des autres effets physiologiques comprenant les effets musculaires qui sont normalement pris en compte.

Sans limitation de courant dans la source électrique, des effets défavorables peuvent survenir lorsqu'une personne est immergée dans l'eau avec seulement quelques volts de tension. Les matériels utilisés en immersion devraient généralement utiliser la limitation en courant et testés comme tel. Cependant ce rapport ne traite pas les situations où un corps humain est immergé.

D.3 Applications médicales

Il faut tenir compte de certaines considérations en environnement médical pouvant comprendre des patients fortement sensibles au courant (par exemple les patients avec des sondes). Les seuils en courant et en tension peuvent être très différents dans de telles situations. Les informations sur les seuils de tension développées dans ce travail ne sont pas prévues pour s'appliquer aux matériels médicaux ni à un environnement médical.

Bibliographie

- [1] WHITAKER, H.B. *“Electric shock as it pertains to the Electric fence”*, 1939 Underwriters Laboratories Inc.
 - [2] HART, W. F., *“A Five-Part Resistor-Capacitor Network for Measurement of Voltage and Current Levels Related to Electric Shock and Burns”*, in J. E. Bridges, G. L. Ford, I. A. Sherman, and M. Vainberg (eds.) *“Electrical Shock Safety Criteria”*, 1985, Pergamon Press, New York
 - [3] FREIBURGER, H. *“The electrical resistance of the human body to commercial direct and alternating currents”*, Springer 1934
 - [4] CONRAD, HAGGARD and TEARE, *“Electrical studies of living tissues”*, Electrical engineering, July 1936
 - [5] BIEGELMEIER, *“Experiments on the electrical impedance of human body”*, IEC, TC64 WG4, October 1976
 - [6] OSYPKA, *“Quantitative investigation of current strength, duration and routing in a.c. electrocution accidents involving human beings and animals: their evaluation and application to power installations”*, Elektromedizin band 8/1963, Nr3
 - [7] BARNETT, *“The phase angle of normal human skin”*, J. Physiol. 1938 Vol 93
 - [8] REILLY, *“Electrical stimulation and electropathology”*, Cambridge university press 1992
 - [9] Underwriters Laboratories Inc, *“Development of test equipment and methods for measuring potentially lethal and otherwise damaging current levels”*, CPSC-C-79-1034, 1981, revised 1982
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
P.O. Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch