

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61472

Deuxième édition
Second edition
2004-07

**Travaux sous tension –
Distances minimales d'approche
pour des réseaux à courant alternatif
de tension comprise entre 72,5 kV
et 800 kV –
Une méthode de calcul**

**Live working –
Minimum approach distances
for a.c. systems in the voltage range
72,5 kV to 800 kV –
A method of calculation**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61472:2004

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61472

Deuxième édition
Second edition
2004-07

**Travaux sous tension –
Distances minimales d'approche
pour des réseaux à courant alternatif
de tension comprise entre 72,5 kV
et 800 kV –
Une méthode de calcul**

**Live working –
Minimum approach distances
for a.c. systems in the voltage range
72,5 kV to 800 kV –
A method of calculation**

© IEC 2004 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
1 Domaine d'application.....	10
2 Termes, définitions et symboles	10
3 Méthodologie	16
4 Facteurs intervenant dans les calculs.....	18
5 Evaluation des risques	26
6 Calcul de la distance minimale d'approche D_A	28
Annexe A (informative) Distance ergonomique	36
Annexe B (informative) Surtensions.....	40
Annexe C (informative) Tenue diélectrique de l'air	48
Annexe D (informative) Facteur d'intervalle k_g	52
Annexe E (informative) Prise en compte des conditions atmosphériques.....	56
Annexe F (informative) Effet des objets à potentiel flottant sur la tenue diélectrique	64
Annexe G (informative) Travaux sous tension près des isolations polluées, endommagées ou humides.....	78
Bibliographie	84
Figure 1 – Illustration de deux objets flottants de différentes dimensions et à des distances différentes de l'axe de l'intervalle (voir 4.3.4)	32
Figure 2 – Tâches types de travail sous tension (voir Article 2 et 4.3.4).....	34
Figure B.1 – Gammes de u_{e2} en bout de ligne ouverte due à la fermeture et à la refermeture conformément au type de réseau (maillé ou antenne) avec et sans résistances de fermeture et inductances shunt (voir B.2.1.1)	46
Figure F.1 – Réduction de la tension de décharge de l'intervalle d'air due à l'altération du champ électrique causée par la présence d'un objet conducteur à potentiel flottant dans une position critique le long de l'axe de l'intervalle (configuration tige-tige phase- terre) – Impulsion de 250 μ s / 2 500 μ s (voir F.3.1.2 et F.3.1.3)	72
Figure F.2 – Réduction de la tension de décharge de l'intervalle d'air due à l'altération du champ électrique causée par la présence d'un objet conducteur à potentiel flottant dans une position critique le long de l'axe de l'intervalle (configuration conducteur- conducteur entre phases) – Impulsion de 250 μ s / 2 500 μ s (voir F.3.1.2 et F.3.1.3).....	74
Figure F.3 – Réduction de la tenue diélectrique en fonction de la distance D pour une valeur constante de β – Configuration tige-tige phase-terre (voir F.3.1.3 et F.3.2)	76
Figure F.4 – Réduction de la tenue diélectrique en fonction de la distance D pour une valeur constante de β – Configuration conducteur-conducteur entre phases (voir F.3.1.3 et F.3.2)	76

CONTENTS

FOREWORD.....	7
1 Scope.....	11
2 Terms, definitions and symbols	11
3 Methodology.....	17
4 Factors influencing calculations	19
5 Evaluation of risks	27
6 Calculation of minimum approach distance D_A	29
Annex A (informative) Ergonomic distance.....	37
Annex B (informative) Overvoltages	41
Annex C (informative) Dielectric strength of air	49
Annex D (informative) Gap factor k_g	53
Annex E (informative) Allowing for atmospheric conditions	57
Annex F (informative) Influence of electrically floating objects on the dielectric strength	65
Annex G (informative) Live working near contaminated, damaged or moist insulation	79
Bibliography.....	85
Figure 1 – Illustration of two floating objects of different dimensions and at different distances from the axis of the gap (see 4.3.4).....	33
Figure 2 – Typical live working tasks (see Clause 2 and 4.3.4)	35
Figure B.1 – Ranges of U_{e2} at the open ended line due to closing and reclosing according to the type of network (meshed or antenna) with and without closing resistors and shunt reactors (see B.2.1.1).....	47
Figure F.1 – Reduction in the discharge voltage of the air gap due to alteration in the electric field caused by the presence of a floating-potential conductive object in critical position along the axis of the gap (phase to earth rod-rod configuration) – 250 μ s / 2 500 μ s impulse (see F.3.1.2 et F.3.1.3)	73
Figure F.2 – Reduction in the discharge voltage of the air gap due to alteration in the electric field caused by the presence of a floating-potential conductive object in critical position along the axis of the gap (phase to phase conductor-conductor configuration) – 250 μ s / 2 500 μ s impulse (see F.3.1.2 et F.3.1.3)	75
Figure F.3 – Reduction of the dielectric strength as a function of the clearance D for constant values of β – Phase to earth rod-rod configuration (see F.3.1.3 and F.3.2)	77
Figure F.4 – Reduction of the dielectric strength as a function of the clearance D for constant values of β – Phase to phase conductor-conductor configuration (see F.3.1.3 and F.3.2)	77

Tableau 1 – Facteur d'objet à potentiel flottant k_f	24
Tableau 2 – Exemple de calcul de distance électrique pour quelques valeurs de surtension de manœuvre.....	30
Tableau B.1 – Classification des surtensions conformément à la CEI 60071-1	44
Tableau D.1 – Facteurs d'intervalle pour des configurations phase-terre réelles.....	54
Tableau E.1 – Facteur atmosphérique k_a pour différentes altitudes et valeurs de U_{90} de référence	60
Tableau G.1 – Exemple de calcul du nombre maximal d'isolateurs endommagés (facteur d'intervalle 1,4)	80
Tableau G.2 – Exemple de calcul du nombre maximal d'isolateurs endommagés (facteur d'intervalle 1,2)	82

Withdrawing
IEC NORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61472:2004

Table 1 – Floating object factor k_f	25
Table 2 – Example of calculation of electrical distance for some switching overvoltage values.....	31
Table B.1 – Classification of overvoltages according to IEC 60071-1	45
Table D.1 – Gap factors for some actual phase to earth configurations.....	55
Table E.1 – Atmospheric factor k_a for different reference altitudes and values of U_{90}	61
Table G.1 – Example of maximum number of damaged insulators calculation (gap factor 1,4).....	81
Table G.2 – Example of maximum number of damaged insulators calculation (gap factor 1,2).....	83

Withdawn
 IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61472:2004

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRAVAUX SOUS TENSION – DISTANCES MINIMALES D'APPROCHE POUR DES RÉSEAUX À COURANT ALTERNATIF DE TENSION COMPRISE ENTRE 72,5 kV ET 800 kV – UNE MÉTHODE DE CALCUL

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 Norme internationale CEI 61472 a été établie par le comité d'études 78 de la CEI: Travaux sous tension.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition de la CEI 61472, publiée en 1998. Cette deuxième édition constitue une révision technique.

Cette norme a été rédigée en conformité avec les exigences de la CEI 61477: *Travaux sous tension – Exigences minimales pour l'utilisation des outils, dispositifs et équipements*, lorsque cela s'applique.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**LIVE WORKING –
MINIMUM APPROACH DISTANCES FOR AC SYSTEMS
IN THE VOLTAGE RANGE 72,5 kV TO 800 kV –
A METHOD OF CALCULATION****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.

International Standard IEC 61472 has been prepared by technical committee 78: Live working.

This second edition cancels and replaces the first edition of IEC 61472 published in 1998. This second edition constitutes a technical revision.

This document has been prepared according to the requirements of IEC 61477: *Live working – Minimum requirements for the utilization of tools, devices and equipment*, where applicable.

Les modifications techniques majeures par rapport à la première édition sont les suivantes:

- révision du domaine d'application de cette méthode de calcul à 72,5 kV et plus;
- élaboration en détail du calcul de l'influence des objets à potentiel flottant;
- référence étroite aux brochures appropriées du CIGRE et à la CEI 60071-2.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
78/582/FDIS	78/586/RVD

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

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

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.

Le contenu des corrigenda de mai 2005 et novembre 2006 ont été pris en considération dans cet exemplaire.

Significant changes with regard to the first edition are the following: this second edition

- revises the application range of this method of calculation to 72,5 kV and above;
- expands in a detailed manner the calculation of the influence of floating objects;
- refers closely to the relevant brochures of CIGRE and to IEC 60071-2.

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

FDIS	Report on voting
78/582/FDIS	78/586/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard 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.

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.

The contents of the corrigenda of May 2005 and November 2006 have been included in this copy.

TRAVAUX SOUS TENSION – DISTANCES MINIMALES D'APPROCHE POUR DES RÉSEAUX À COURANT ALTERNATIF DE TENSION COMPRISE ENTRE 72,5 kV ET 800 kV – UNE MÉTHODE DE CALCUL

1 Domaine d'application

La présente Norme Internationale décrit une méthode de calcul des distances minimales d'approche pour des travaux sous tension réalisés à des tensions maximales comprises entre 72,5 kV et 800 kV. Cette norme traite des surtensions de réseau et des distances de travail dans l'air entre des pièces et/ou des travailleurs à des potentiels différents.

La tension de tenue requise et les distances minimales d'approche calculées suivant la méthode décrite dans cette norme sont évaluées en prenant en compte ce qui suit:

- les travailleurs sont formés et qualifiés pour travailler dans la zone de travail sous tension;
- les surtensions attendues ne dépassent pas la valeur choisie pour la détermination de la distance minimale d'approche requise;
- les surtensions transitoires sont les surtensions déterminantes;
- l'isolation des outils ne présente pas sur la surface un film continu d'humidité;
- aucun éclair n'est vu ni entendu à moins de 10 km du lieu de travail;
- l'influence des parties conductrices des outils est prise en compte;
- l'effet de l'altitude sur la tenue électrique est pris en compte.

Pour des conditions autres que celles ci-dessus, l'évaluation des distances minimales d'approche peut exiger des données spécifiques, provenant d'autres calculs ou obtenues à partir d'études additionnelles en laboratoire sur la situation concrète.

2 Termes, définitions et symboles

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

2.1 Termes et définitions

2.1.1

tension la plus élevée d'un réseau

U_s

valeur la plus élevée de la tension qui se présente à un instant et en un point quelconque du réseau dans des conditions d'exploitation normales (tension entre phases)

NOTE Les surtensions transitoires, par exemple dues aux manœuvres dans le réseau et à des variations temporaires accidentelles de la tension, ne sont pas prises en compte.

[VEI 601-01-23, modifiée]

2.1.2

surtension transitoire

surtension de courte durée, ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie

[VEI 604-03-13]

LIVE WORKING – MINIMUM APPROACH DISTANCES FOR AC SYSTEMS IN THE VOLTAGE RANGE 72,5 kV TO 800 kV – A METHOD OF CALCULATION

1 Scope

This International Standard describes a method for calculating the minimum approach distances for live working, at maximum voltages between 72,5 kV and 800 kV. This standard addresses system overvoltages, and the working air distances between parts and/or workers at different potentials.

The required withstand voltage and minimum approach distances calculated by the method described in this standard are evaluated taking into consideration the following:

- workers are trained for, and skilled in, working in the live working zone;
- the anticipated overvoltages do not exceed the value selected for the determination of the required minimum approach distance;
- transient overvoltages are the determining overvoltages;
- tool insulation has no continuous film of moisture present on the surface;
- no lightning is seen or heard within 10 km of the work site;
- allowance is made for the effect of conducting components of tools;
- the effect of altitude on the electric strength is taken into consideration.

For conditions other than the above, the evaluation of the minimum approach distances may require specific data, derived by other calculation or obtained from additional laboratory investigations on the actual situation.

2 Terms, definitions and symbols

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

2.1 Terms and definitions

2.1.1

highest voltage of a system

U_s

highest value of operating voltage which occurs under normal operating conditions at any time and any point in the system (phase to phase voltage)

NOTE Transient overvoltages due e.g. to switching operations and abnormal temporary variations of voltage are not taken into account.

[IEV 601-01-23, modified]

2.1.2

transient overvoltage

short duration overvoltage of few milliseconds or less, oscillatory or non-oscillatory, usually highly damped

[IEV 604-03-13]

2.1.3

tension de cinquante pour-cent de décharge disruptive

U_{50}

valeur de crête d'une tension de choc qui a une probabilité de 50 pour-cent de provoquer une décharge disruptive chaque fois qu'elle est appliquée lors d'essais diélectriques

[VEI 604-03-43]

2.1.4

tension à quatre vingt dix pour-cent de tenue statistique aux chocs

U_{90}

valeur de crête d'une tension de choc appliquée au cours d'essais diélectriques pour laquelle l'isolation présente, dans certaines conditions, une probabilité de tenue de 90 %

NOTE Ce concept s'applique aux isolations autorégénératrices.

[VEI 604-03-42, modifiée]

2.1.5

surtension statistique à deux pour-cent

U_2

valeur de crête d'une surtension transitoire ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée

[VEI 651-01-23, modifiée]

2.1.6

niveau d'isolement requis pour un travail sous tension

tension de tenue statistique aux chocs de l'isolation dans la zone de travail nécessaire pour réduire le risque de claquage vis-à-vis des surtensions à un niveau acceptable

NOTE Il est généralement admis qu'un niveau acceptable est atteint lorsque la tension de tenue statistique aux chocs est égale ou supérieure à une surtension ayant une probabilité de dépassement qui n'excède pas 2 %.

[VEI 651-01-17, modifiée]

2.1.7

valeur par unité

u

expression de la valeur par unité de l'amplitude d'une surtension (ou d'une tension) rapportée à $U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$

NOTE Cela s'applique à u_{e2} et u_{p2} définies à l'Article 4.

2.1.8

distance minimale d'approche

D_A

distance minimale dans l'air à maintenir entre le corps du travailleur, y compris les objets (à l'exception des outils appropriés pour les travaux sous tension) qu'il manipule, et les parties portées à des potentiels différents

NOTE Les « outils appropriés » sont les outils pour travaux sous tension convenables à la tension nominale maximale des parties actives.

[Définition 2.7.1 de la CEI 60743 et VEI 651-01-20, modifiées]

2.1.9

distance électrique

D_U

distance dans l'air requise pour empêcher un amorçage entre les parties sous tension entre elles ou entre les parties sous tension et les parties à la terre pendant le travail sous tension

[Définition 2.7.2 de la CEI 60743 et VEI 651-01-21, modifiée]

2.1.3**fifty per cent disruptive discharge voltage** U_{50}

peak value of an impulse test voltage having a 50 per cent probability of initiating a disruptive discharge each time the dielectric testing is performed

[IEV 604-03-43]

2.1.4**ninety per cent statistical impulse withstand voltage** U_{90}

peak value of an impulse test voltage at which insulation exhibits, under specified conditions, a 90 % probability of withstand

NOTE This concept is applicable to self-restoring insulation.

[IEV 604-03-42, modified]

2.1.5**two per cent statistical overvoltage** U_2

peak value of a transient overvoltage having a 2 % statistical probability of being exceeded

[IEV 651-01-23, modified]

2.1.6**required insulation level for live working**

statistical impulse withstand voltage of the insulation at the work location necessary to reduce the risk of breakdown of this insulation to an acceptably low level

NOTE It is generally considered that an acceptable low level is reached when the value of the statistical withstand voltage is greater or equal to the statistical overvoltage having a probability of being exceeded by no more than 2 %.

[IEV 651-01-17]

2.1.7**per unit value** u

expression of the per unit value of the amplitude of an overvoltage (or of a voltage) referred to $U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$

NOTE This applies to u_{e2} and u_{p2} defined in Clause 4.

2.1.8**minimum approach distance** D_A

minimum distance in air to be maintained between any part of the body of a worker, including any object (except appropriate tools for live working) being directly handled, and any parts at different potentials

NOTE The “appropriate tools” are tools for live working suitable for the maximum nominal voltage of the live parts.

[Definition 2.7.1 of IEC 60743 and IEC 651-01-20, modified]

2.1.9**electrical distance** D_U

distance in air required to prevent a disruptive discharge between energized parts or between energized parts and earthed parts during live working

[Definition 2.7.2 of IEC 60743 and IEC 651-01-21, modified]

2.1.10

distance ergonomique

D_E

distance dans l'air tenant compte des mouvements involontaires et des erreurs de jugement des distances pendant l'exécution du travail

[Définition 2.7.3 de la CEI 60743 et VEI 651-01-22]

2.1.11

partie

tout élément présent dans la zone de travail, autre que les travailleurs, les outils pour travaux sous tension et l'isolation du réseau

2.1.12

partie active

conducteur ou partie conductrice destiné à être sous tension en service normal, y compris le conducteur de neutre, mais par convention, excepté le conducteur PEN [VEI 195-02-12], le conducteur PEM [VEI 195-02-13] ou le conducteur PEL [VEI 195-02-14]

NOTE Cette notion n'implique pas nécessairement un risque de choc électrique.

[Définition 2.1.2 de la CEI 60743 et VEI 651-01-03]

2.1.13

zone de travail

tout local, emplacement ou zone où des travaux vont être, sont, ou ont été réalisés

[VEI 651-01-08]

2.2 Symboles utilisés dans la partie normative de ce document

β	rapport de la longueur totale de l'objet ou des objets flottant(s) par rapport à la longueur de l'intervalle d'air d'origine
D	longueur de l'intervalle d'air restant entre phase et terre
D_A	distance minimale d'approche
D_E	distance ergonomique
D_U	distance électrique nécessaire pour obtenir U_{90}
d_1, d_2, d_3, d_4	distances entre le ou les travailleurs et des parties de l'installation à des potentiels électriques différents (voir Figure 2)
F	somme de toutes les dimensions, dans la direction de l'axe de l'intervalle, des objets flottants dans cet intervalle d'air (en mètres)
K_s	facteur de sécurité statistique
K_t	facteur combinant des considérations différentes influençant la tenue de l'intervalle
k_a	facteur atmosphérique
k_d	coefficient caractérisant l'état moyen des isolateurs détériorés
k_f	facteur d'objet à potentiel flottant
k_g	facteur d'intervalle

2.1.10**ergonomic distance** **D_E**

distance in air to take into account inadvertent movement and errors in judgement of distances while performing work

[Definition 2.7.3 of IEC 60743 and IEC 651-01-22]

2.1.11**part**

any element present in the work location, other than workers, live working tools and system insulation

2.1.12**live part**

conductor or conductive part intended to be energized in normal operation, including a neutral conductor, but by convention not a PEN conductor [IEV 195-02-12] or PEM conductor [IEV 195-02-13] or PEL conductor [IEV 195-02-14]

NOTE This concept does not necessarily imply a risk of shock.

[Definition 2.1.2 of IEC 60743 and IEC 651-01-03, modified]

2.1.13**work location**

any site, place or area where a work activity is to be, is being, or has been carried out

[IEV 651-01-08]

2.2 Symbols used in the normative part of the document

β	ratio of the total length of the floating object(s) to the original air gap length
D	length of the remaining air gap phase to earth
D_A	minimum approach distance
D_E	ergonomic distance
D_U	electrical distance necessary to obtain U_{90}
d_1, d_2, d_3, d_4	distances between the worker(s) and parts of the installation at different electric potentials (see Figure 2)
F	sum of all dimensions, in the direction of the gap axis, of the floating objects in the air gap (in metres)
K_s	statistical safety factor
K_t	factor combining different considerations influencing the strength of the gap
k_a	atmospheric factor
k_d	coefficient characterizing the average state of the damaged units
k_f	floating object factor
k_g	gap factor

k_i	facteur de chaîne d'isolateurs
k_s	facteur de l'écart-type statistique normalisé
L_f	longueur de l'intervalle d'air d'origine
n_d	nombre d'éléments détériorés dans une chaîne d'isolateurs de n_o éléments
n_o	nombre d'éléments d'une chaîne d'isolateurs qui ne sont pas shuntés par les cornes d'amorçage ou les anneaux de répartition
P	longueur de l'intervalle d'air restant entre deux phases
r	distance d'un objet conducteur par rapport à l'axe de l'intervalle
s_e	valeur normalisée de l'écart type de U_{50} exprimée en pour-cent
U_2	surtension statistique à deux pour-cent
U_{50}	tension de cinquante pour-cent de décharge disruptive
U_{90}	tension à quatre vingt dix pour-cent de tenue statistique aux chocs
U_{e2}	surtension statistique à deux pour-cent entre phase et terre
U_{e90}	tension à quatre vingt dix pour-cent de tenue statistique aux chocs entre phase et terre
U_{p2}	surtension statistique à deux pour-cent entre deux phases
U_{p90}	tension à quatre vingt dix pour-cent de tenue statistique aux chocs entre deux phases
u_{e2}	valeur par unité de la surtension statistique à deux pour-cent entre phase et terre
u_{p2}	valeur par unité de la surtension statistique à deux pour-cent entre deux phases
U_s	tension la plus élevée d'un réseau entre deux phases

3 Méthodologie

La méthodologie du calcul des distances minimales d'approche repose sur trois considérations:

- déterminer la surtension statistique attendue dans la zone de travail (U_2) et, à partir de celle-ci, déterminer la tension de tenue statistique aux chocs de l'isolation requise dans la zone de travail (U_{90});
- calculer la distance électrique D_U requise pour la tension de tenue aux chocs U_{90} ;
- ajouter une distance additionnelle pour prendre en compte les facteurs ergonomiques associés au travail sous tension tels que les mouvements involontaires.

La distance minimale d'approche D_A est ainsi déterminée par:

$$D_A = D_U + D_E \quad (1)$$

où

D_U est la distance électrique nécessaire pour obtenir U_{90} ;

D_E est la distance ergonomique requise et est dépendante des procédures de travail, du niveau de formation, de la qualification des travailleurs, du type de construction, et des éléments fortuits tels que des gestes involontaires et des erreurs d'appréciation des distances (voir Annexe A pour plus de détails).

k_i	insulator strings factor
k_s	standard statistical deviation factor
L_f	original air gap length
n_d	number of damaged units in a string of n_o units
n_o	number of units in an insulator string that are not shunted by arcing horns or grading rings
P	length of the remaining gap phase to phase
r	distance of a conductive object from the axis of the gap
s_e	normalized value of the standard deviation of U_{50} expressed in percent
U_2	two per cent statistical overvoltage
U_{50}	fifty per cent disruptive discharge voltage
U_{90}	ninety per cent statistical impulse withstand voltage
U_{e2}	two per cent statistical overvoltage between phase and earth
U_{e90}	ninety per cent statistical impulse withstand voltage phase to earth
U_{p2}	two per cent statistical overvoltage between two phases
U_{p90}	ninety per cent statistical impulse withstand between two phases
u_{e2}	per unit value of the two per cent statistical overvoltage phase to earth
u_{p2}	per unit value of the two per cent statistical overvoltage between two phases
U_s	highest voltage of a system between two phases

3 Methodology

The methodology of the calculation of the minimum approach distances is based on three considerations:

- to determine the statistical overvoltage expected in the work location (U_2) and from this, determine the required statistical impulse withstand voltage of the insulation in the work location (U_{90});
- to calculate the electrical distance D_U required for the impulse withstand voltage U_{90} ;
- to add an additional distance to allow for ergonomic factors associated with live working, such as inadvertent movement.

The minimum approach distance D_A is thus determined by:

$$D_A = D_U + D_E \quad (1)$$

where

D_U is the electrical distance necessary to obtain U_{90} ;

D_E is the required ergonomic distance and is dependent on work procedures, level of training, skill of the workers, type of construction, and such contingencies as inadvertent movement, and errors in appraising distances (see Annex A for details).

4 Facteurs intervenant dans les calculs

4.1 Surtension statistique

La contrainte électrique dans la zone de travail doit être connue. La contrainte électrique est caractérisée par la surtension statistique qui peut exister dans la zone de travail. Dans un réseau alternatif triphasé, la surtension statistique U_{e2} entre phase et terre est:

$$U_{e2} = (\sqrt{2} / \sqrt{3}) U_s u_{e2} \quad (2)$$

où

U_s ($\sqrt{2}/\sqrt{3}$) est la tension crête la plus élevée entre phase et terre du système exprimée en kV, u_{e2} est la surtension statistique phase-terre exprimée par unité.

La surtension statistique U_{p2} entre deux phases est:

$$U_{p2} = (\sqrt{2} / \sqrt{3}) U_s u_{p2} \quad (3)$$

où u_{p2} est la surtension statistique entre phases exprimée par unité.

Si la valeur par unité de la surtension entre phases n'est pas disponible, une valeur approchée peut être trouvée à partir de u_{e2} par la formule suivante:

$$u_{p2} = 1,35 u_{e2} + 0,45 \quad (4)$$

Les surtensions transitoires à prendre en compte sont les surtensions maximales causées par des défauts dans le réseau ou par des manœuvres, qu'elles se produisent sur le lieu de travail ou sur l'installation sur laquelle on travaille (voir Annexe B).

4.2 Tenue de l'intervalle

Pour la détermination de la distance électrique, la tension de tenue requise pour le travail sous tension est prise égale à la tension U_{90} , déterminée à partir de l'expression générale

$$U_{90} = K_s U_2 \quad (5)$$

En considérant séparément les tensions phase-terre et entre phases et en combinant l'équation (5) avec les équations (2) et (3), on obtient:

$$U_{e90} = K_s (\sqrt{2} / \sqrt{3}) U_s u_{e2} \quad (6)$$

$$U_{p90} = K_s (\sqrt{2} / \sqrt{3}) U_s u_{p2} \quad (7)$$

où

K_s est le facteur de sécurité statistique (1,1 pour les formules (5), (6) et (7)) (voir Article 5);

U_{e90} et U_{p90} sont respectivement les tensions de tenue statistique phase-terre et entre phases, exprimées en kV.

4.3 Calcul de la distance électrique D_U

La tenue de l'intervalle est influencée par une série de facteurs qui peuvent être exprimés par un facteur K_t utilisé dans la formule suivante pour calculer D_U (en mètres):

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1080K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

4 Factors influencing calculations

4.1 Statistical overvoltage

The electrical stress at the work location shall be known. The electrical stress is described as the statistical overvoltage that may be present at the work location. In a three-phase a.c. power system the statistical overvoltage U_{e2} between phase and earth is:

$$U_{e2} = (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{e2} \quad (2)$$

where

$U_s (\sqrt{2}/\sqrt{3})$ is the highest phase to earth peak voltage, of the system expressed in kV, and

u_{e2} is the statistical overvoltage phase to earth expressed in per unit.

The statistical overvoltage U_{p2} between two phases is:

$$U_{p2} = (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{p2} \quad (3)$$

where u_{p2} is the statistical overvoltage phase to phase expressed in per unit.

If the per unit phase to phase data are not available, an approximate value can be derived from u_{e2} by the following formula:

$$u_{p2} = 1,35 u_{e2} + 0,45 \quad (4)$$

The transient overvoltages to be considered are the maximum that can occur, either on the installation being worked on or at the work site, whether caused by system faults or by switching (see Annex B).

4.2 Gap strength

For the determination of the electrical distance, the required withstand voltage for live working is taken to be equal to the voltage U_{90} , determined from the general expression

$$U_{90} = K_s U_2 \quad (5)$$

Considering the phase to earth and phase to phase voltages separately and combining equation (5) with equations (2) and (3) gives:

$$U_{e90} = K_s (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{e2} \quad (6)$$

$$U_{p90} = K_s (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{p2} \quad (7)$$

where

K_s is the statistical safety factor (1,1 for formula (5), (6) and (7)) (see Clause 5);

U_{e90} and U_{p90} are respectively the statistical impulse withstand voltages phase to earth and phase to phase, expressed in kV.

4.3 Calculation of electrical distance D_U

The strength of the gap is influenced by a series of considerations which can be combined in a factor K_t used in the following formula for calculating D_U (in metres):

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080 K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

où

F est la distance pour les objets à potentiel flottant en mètres (voir 4.3.4);

U_{90} est la tension d'impulsion de tenue statistique phase-terre ou entre phases en kV;

K_t est donné par:

$$K_t = k_s k_g k_a k_f k_i \quad (9)$$

4.3.1 Ecart-type statistique normalisé k_s

Le facteur k_s prend en compte la nature statistique de la tension de claquage. À moins que la valeur de l'écart-type, s_θ , ne soit connue à partir d'essais représentant la configuration de l'intervalle, une valeur de 0,936, basée sur un écart-type de 5 % pour des tensions de choc positives, peut être utilisée (voir Annexe C).

4.3.2 Facteur d'intervalle k_g

Le facteur d'intervalle k_g tient compte des effets de la configuration de l'intervalle sur la tenue diélectrique de l'air (voir Annexe D).

NOTE 1 A moins qu'un facteur d'intervalle ne puisse être obtenu pour les configurations de structures existantes au niveau de tension de réseau donné, une valeur générale et conservatrice de $k_g = 1,2$ entre phase et terre et $k_g = 1,45$ entre phases est recommandée pour tenir compte des diverses configurations.

NOTE 2 La brochure 72 de la CIGRÉ et la CEI 60071-2 fournissent plus d'informations concernant la détermination de k_g pour différentes configurations d'intervalle.

4.3.3 Facteur atmosphérique k_a

Le facteur atmosphérique prend en compte l'effet de densité de l'air. La densité de l'air est influencée par la température, l'humidité et l'altitude. L'effet de la température et de l'humidité est négligeable en comparaison avec l'effet d'altitude.

La tenue électrique de l'air dans la zone de travail est principalement affectée par l'altitude au-dessus du niveau de la mer. Cet effet, qui varie dans une certaine mesure avec la longueur de l'intervalle et réciproquement avec la tension de tenue, est traduit par le facteur atmosphérique k_a . La valeur appropriée de k_a peut être tirée du Tableau E.1 ou calculée avec la méthode donnée à l'Annexe E pour une altitude spécifique et un U_{90} donné, pour une altitude de référence en dessous de laquelle la plupart des travaux sous tension seront exécutés.

Il convient que la distance électrique D_U soit augmentée quand le travail sous tension est réalisé dans des endroits plus élevés que l'altitude de référence, pour tenir compte de la pression atmosphérique moyenne plus basse. Cela peut être réalisé en multipliant D_U par un facteur de correction d'altitude qui peut être calculé en utilisant les équations données à l'Annexe E.

4.3.4 Facteur d'objet à potentiel flottant k_f

Les objets à potentiel flottant peuvent décroître ou accroître la tenue électrique d'un intervalle par la déformation du champ.

Un objet conducteur placé entre deux électrodes à potentiel différent, et non connecté à aucune d'elles, est électriquement flottant et prend un potentiel intermédiaire. L'importance de l'influence de ces objets conducteurs flottants sur la tenue électrique de l'intervalle varie en fonction du nombre d'objets flottants, de leurs dimensions, de leurs formes et de leurs positions géométriques dans l'intervalle. Toutefois, la présence d'un ou de plusieurs objets flottants réduit la longueur électrique nette de l'intervalle d'air.

where

F is the floating object distance in metres (see 4.3.4);

U_{90} is the phase to earth or the phase to phase statistical impulse withstand voltage in kV;

K_t is given by:

$$K_t = k_s k_g k_a k_f k_i \quad (9)$$

4.3.1 Standard statistical deviation factor k_s

Factor k_s accounts for the statistical nature of the breakdown voltage. Unless the value of the standard deviation, s_e , is known from tests representing the gap configuration, a value of 0,936, based on a standard deviation of 5 %, for positive impulses, can be used (see Annex C).

4.3.2 Gap factor k_g

The gap factor k_g takes into account the effect of the gap configuration on the dielectric strength of air (see Annex D).

NOTE 1 Unless an appropriate gap factor can be selected for the structure configurations that exist at the system voltage being considered, a generally conservative value of $k_g = 1,2$ for phase to earth and $k_g = 1,45$ for phase to phase are recommended, to allow for a variety of configurations.

NOTE 2 CIGRÉ Brochure 72 and IEC 60071-2 provide more information concerning the determination of k_g for various gap configurations.

4.3.3 Atmospheric factor k_a

The atmospheric factor takes into account the effect of air density. Air density is influenced by temperature, humidity and altitude. The effect of temperature and humidity is negligible in comparison with the effect of altitude.

The electric strength of the air insulation in the work location is mainly affected by the altitude above sea level. This effect, which varies to some extent with the gap length, or conversely with the withstand voltage, is accounted for by the atmospheric factor k_a . The appropriate value of k_a can be selected from Table E.1 or calculated for a specific altitude and U_{90} by the method given in Annex E, for a reference altitude below which most live work is done.

The electrical distance D_U should be increased when live work is carried out in locations higher than the reference altitude in order to account for the lower mean atmospheric pressure. This can be done by multiplying D_U by an altitude correction factor, which can be calculated using the equations given in Annex E.

4.3.4 Floating object factor k_f

Floating objects can decrease, or increase, the electric strength of a gap by field distortion.

A conductive object placed between two electrodes at different potentials, and not connected to either one, is electrically floating and acquires an intermediate potential. The extent of the influence these conductive floating objects have on the electric strength of the gap varies depending on the number of floating objects, their dimensions, shapes and geometrical positions in the gap. Nevertheless, the presence of the floating object(s) reduces the net electrical length of the air gap.

Pour calculer les effets des objets flottants, il convient que tous les chemins possibles d'une décharge disruptive soient pris en compte pour déterminer un facteur d'objet flottant k_f , et une distance d'objet flottant F (somme de toutes les dimensions, dans la direction de l'axe de l'intervalle, des objets flottants dans cet intervalle d'air).

Le facteur k_f dépend de la dimension F de l'objet flottant conducteur dans la direction de l'axe de l'intervalle, de la longueur D de l'intervalle restant et de la distance latérale r de l'objet conducteur par rapport à l'axe de l'intervalle (voir Figure 1). Il faut noter que D est obtenu en soustrayant la longueur F de l'intervalle d'air d'origine L_f , c'est-à-dire $D = L_f - F$. Des documents de niveau international (voir Annexe F) donnent les critères d'évaluation du facteur k_f en fonction de F et D (P lorsque la distance entre phases est prise en compte), en introduisant le paramètre

$$\beta = F/(D + F)$$

(ou $\beta = F/(P + F)$ lorsque les distances entre phases sont prises en compte).

Ces études et d'autres études expérimentales ont montré que, dans les cas les plus défavorables représentatifs des configurations de travaux sous tension sur ligne, le coefficient k_f peut être aussi bas que 0,75 pour des intervalles phase-terre au-delà de 1,2 m.

Le Tableau 1 rapporte un critère simplifié pour la détermination de k_f en fonction de β et L_f . Les valeurs de k_f dérivent de l'interpolation des données montrées à l'Annexe F. Le Tableau 1 présente des valeurs de β en fonction de l'intervalle d'air d'origine L_f et non en fonction de la longueur D de l'intervalle restant parce que l'intervalle d'air d'origine L_f est une des quantités importantes qui caractérisent la construction d'un réseau alternatif.

When calculating the effects of floating objects, all possible disruptive discharge paths should be considered in determining the object factor k_f and a floating object distance F (sum of all dimensions, in the direction of the gap axis, of the floating objects in the air gap).

The k_f factor depends on the dimension F of the conductive floating object in the direction of the axis of the gap, on the length D of the remaining gap and on the lateral distance r of the conductive object from the axis of the gap (see Figure 1). It must be pointed out that D is obtained by subtracting the length F from the original air gap L_f , i.e. $D = L_f - F$. Papers of international level (see Annex F) provide evaluation criteria of the k_f factor as a function of F and D (P when phase to phase distances are considered), by introducing the parameter

$$\beta = F/(D + F)$$

(or $\beta = F/(P + F)$ when phase to phase distances are considered).

These studies and other experimental investigations have shown that, in the more critical cases representative of live line working configurations, the k_f coefficient may be as low as 0,75 for phase to earth gap distances over 1,2 m.

Table 1 reports a simplified criterion for the k_f determination in dependence of β and L_f . The k_f values derive from the interpolation of the data shown in Annex F. Table 1 contains the values of β in function of the original gap length L_f rather than in function of the remaining air gap length D because the original gap length L_f is one of the important quantities that characterise the constructed a.c. system.

Tableau 1 – Facteur d'objet à potentiel flottant k_f

Intervalles entre phase et terre						Intervalles entre phases					
β^{**}	L_f^* m				k_f	β^{**}	L_f^* m				k_f
	Au-delà	Jusqu'à	Au-delà	Jusqu'à			Au-delà	Jusqu'à	Au-delà	Jusqu'à	
0,1	---	0,9	3,9	---	1	0,05	---	0,9	5,7	---	1
	0,9	3,9	---	---	0,95		0,9	2,1	3,8	5,7	0,95
0,15	---	0,5	4,7	---	1	0,1	2,1	3,8	---	---	0,9
	0,5	1	3,3	4,7	0,95		---	0,6	6	---	1
	1	1,2	2,7	3,3	0,9		0,6	1,6	4,6	6	0,95
	1,2	2,7	---	---	0,85		1,6	2,2	3,6	4,6	0,9
0,2	---	0,4	4,9	---	1	0,2	2,2	3,6	---	---	0,85
	0,4	0,9	3,7	4,9	0,95		---	0,4	6,3	---	1
	0,9	1	3,1	3,7	0,9		0,4	1,4	5,1	6,3	0,95
	1	1,2	2,6	3,1	0,85		1,4	1,8	4,4	5,1	0,9
	1,2	2,6	---	---	0,8		1,8	2,3	3,5	4,4	0,85
0,25	---	0,3	5,1	---	1	0,25	2,3	3,5	---	---	0,8
	0,3	0,8	3,8	5,1	0,95		* L_f = Longueur initiale de l'intervalle d'air.				
	0,8	0,9	3,2	3,8	0,9		** β = Rapport de la longueur totale de l'objet ou des objets flottant(s) par rapport à la longueur de l'intervalle d'air d'origine.				
	0,9	1,1	2,8	3,2	0,85		NOTE Les valeurs de β excédant les valeurs du tableau ne sont pas réalistes.				
	1,1	1,3	2,4	2,8	0,8						
	1,3	2,4	---	---	0,75						

Dans la mesure où l'influence de la distance des objets flottants par rapport à l'axe de l'intervalle est considérée, il peut être présumé que la réduction de la tenue électrique devient négligeable lorsque

$$r > 2,5 F$$

L'influence des capots et des tiges métalliques des isolateurs de suspension est négligeable et doit être ignorée.

L'approche de l'Annexe F donne des critères généraux pour la détermination de k_f . L'influence réelle des objets flottants requiert une analyse détaillée (voir Annexe F).

La Figure 2 illustre différents travaux sous tension et les configurations dans lesquelles ils peuvent avoir lieu. Conformément à la configuration considérée, il convient de déterminer une valeur correcte de k_g et de k_f .

Voir l'Annexe F pour plus de détails.

Table 1 – Floating object factor k_f

Phase to earth gaps						Phase to phase gaps					
β^{**}	L_f^* m				k_f	β^{**}	L_f^* m				k_f
	Over	Up to	Over	Up to			Over	Up to	Over	Up to	
0,1	---	0,9	3,9	---	1	0,05	---	0,9	5,7	---	1
	0,9	3,9	---	---	0,95		0,9	2,1	3,8	5,7	0,95
0,15	---	0,5	4,7	---	1	0,1	2,1	3,8	---	---	0,9
	0,5	1	3,3	4,7	0,95		---	0,6	6	---	1
	1	1,2	2,7	3,3	0,9		0,6	1,6	4,6	6	0,95
	1,2	2,7	---	---	0,85		1,6	2,2	3,6	4,6	0,9
0,2	---	0,4	4,9	---	1	0,2	2,2	3,6	---	---	0,85
	0,4	0,9	3,7	4,9	0,95		---	0,4	6,3	---	1
	0,9	1	3,1	3,7	0,9		0,4	1,4	5,1	6,3	0,95
	1	1,2	2,6	3,1	0,85		1,4	1,8	4,4	5,1	0,9
	1,2	2,6	---	---	0,8		1,8	2,3	3,5	4,4	0,85
0,25	---	0,3	5,1	---	1	0,25	2,3	3,5	---	---	0,8
	0,3	0,8	3,8	5,1	0,95		* L_f = Original air gap length.				
	0,8	0,9	3,2	3,8	0,9		** β = Ratio of the total length of the floating object(s) to the original air gap length.				
	0,9	1,1	2,8	3,2	0,85		NOTE β values over the ones tabulated are not practical.				
	1,1	1,3	2,4	2,8	0,8						
	1,3	2,4	---	---	0,75						

As far as the influence of the distance of the floating objects from the axis of the gap is considered, it may be assumed that the reduction of the electric strength becomes negligible when

$$r > 2,5 F$$

The influence of metallic caps and pins of suspension insulators is negligible and shall be ignored.

The approach in Annex F gives general criteria for the determination of k_f . The real influence of the floating objects requires a detailed analysis (see Annex F).

Figure 2 illustrates various distinct live working tasks and the configurations in which they can occur. According to the considered configuration, a correct value of k_g and k_f should be determined.

See Annex F for more details.

4.3.5 Facteur de chaîne d'isolateurs k_i

Quand il n'y a pas d'isolateurs détériorés, k_i est égal à 1,0. A tout moment, des précautions doivent être prises pour que la tenue électrique de l'ensemble d'isolateurs ne soit pas diminuée par la présence d'outils en parallèle, d'humidité ou de pollution à la surface et d'isolateurs détériorés (voir Annexe G).

Les effets de la détérioration de l'isolation sur la tension de tenue dans la zone de travail doivent être pris en compte en s'assurant qu'un nombre minimal d'isolateurs en bon état existe toujours pendant le travail sous tension près de l'isolation. La longueur minimale d'isolement du réseau doit être déterminée à partir de l'équation (8) en utilisant une valeur de k_i donnée dans la formule empirique et conservatrice (10), à moins que la distance minimale d'isolement du réseau exigée ne soit connue par des essais ou d'autres moyens. La valeur calculée de D_U est la longueur minimale d'isolation mesurée entre les électrodes sous tension et à la terre. Dans ce cas, cette valeur n'est pas la distance électrique.

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

$$k_i = 1 - 0,8k_d(n_d/n_o) \quad (10)$$

où

n_d est le nombre d'éléments détériorés dans une chaîne de n_o éléments;

k_d est un coefficient caractérisant l'état moyen des éléments détériorés;

$k_d = 1$ pour des isolateurs en verre trempé,

$k_d = 0$ à 1 pour les isolateurs en porcelaine, avec $k_d = 0,75$ comme valeur moyenne.

On doit aussi tenir compte de l'espacement des cornes d'amorçage ou des anneaux de répartition (voir Annexe G).

L'effet des cornes d'amorçage ou des anneaux de répartition est de faire écran, dans une certaine mesure, aux éléments d'isolation à l'intérieur de ceux-ci. Il convient d'en tenir compte pour déterminer k_i . Cela peut être réalisé en utilisant l'équation (10), avec n_o le nombre d'éléments d'une chaîne d'isolateurs qui ne sont pas shuntés par les cornes d'amorçage ou les anneaux de répartition et n_d le nombre d'éléments détériorés inclus dans n_o .

NOTE Les éléments shuntés par les cornes ou les anneaux ne contribuent pas significativement à la tenue diélectrique de la chaîne; en conséquence, les détériorations dans cette zone sont moins importantes et ces éléments peuvent être court-circuités pendant le travail.

Le cas de chaînes multiples ou de chaînes en V est plus complexe que celui d'une chaîne simple.

4.3.6 Isolateur composite

Pour les isolateurs composites, une méthode permettant de déterminer les rigidités électrique et mécanique lorsqu'ils sont en service est à l'étude.

5 Evaluation des risques

Le risque global de claquage de l'isolation dans la zone de travail est en relation avec un certain nombre de situations décrites ci-après. Quand elles sont associées, ces situations réduisent le risque global de claquage. Ce sont les suivantes:

- la tension réelle du réseau n'est pas toujours à la valeur maximale;
- il est peu probable que l'emplacement du travail corresponde à l'endroit où la surtension transitoire a la valeur maximale;

4.3.5 Insulator strings factor k_i

When there is no damaged insulator present, k_i is equal to 1,0. At all times, care shall be taken that the electrical integrity of the insulator assembly is not impaired by tools in parallel, moisture or contamination on the surface and damaged insulators (see Annex G).

The effect of damaged insulation on the withstand voltage in the work location shall be allowed for by ensuring that a minimum number of undamaged insulators is always present while working live near the insulation. The minimum system insulation length shall be determined from equation (8) using a value of k_i given in the empirically-derived and conservative formula (10), unless the minimum system insulation distance requirement is known from test data or by other means. The calculated value of D_U is the minimum insulation length measured between live and earth electrodes. In this case, it is not the electrical distance.

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

$$k_i = 1 - 0,8k_d(n_d/n_o) \quad (10)$$

where

n_d is the number of damaged units in a string of n_o units;

k_d is a coefficient characterizing the average state of the damaged units;

$k_d = 1$ for toughened glass insulators;

$k_d = 0$ to 1 for porcelain insulators, with $k_d = 0,75$ as an average value.

Consideration of arcing horn or grading ring spacing shall also be taken into account, (see Annex G).

The effect of arcing horns or grading rings is to shield to some extent the insulator units between them. Consideration should be given to this when determining k_i . This can be done by using equation (10), with n_o the number of units in an insulator string that are not shunted by arcing horns or grading rings, and n_d the number of damaged units included in n_o .

NOTE Units shielded by horns or rings do not significantly contribute to the dielectric strength of the string, hence damage in this area is less important and the units can be shorted during work.

The situation with multiple string assemblies and vee-strings is more complex than for a single string.

4.3.6 Composite insulator

For composite insulators, a method for determining the electrical and mechanical strength while in service is under consideration.

5 Evaluation of risks

The overall risk of breakdown of the insulation at the work location is associated with a number of situations described below. These situations, when combined, reduce the overall risk of breakdown. They are as follows:

- the actual system voltage is not always at a maximum value;
- the location of the work is not likely to correspond to the place where a transient overvoltage is at the maximum value;

- le front réel de l'onde de surtension transitoire est moins contraignant que le front critique;
- environ la moitié des surtensions transitoires seront de polarité négative et sont moins sévères;
- la fréquence et l'amplitude des surtensions transitoires sont réduites en neutralisant la refermeture des disjoncteurs.

Aussi, la valeur de 1,1 pour K_s est recommandée pour ramener le risque global de claquage de l'isolation à un niveau cohérent avec les autres travaux électriques.

Le risque global qu'un claquage survienne durant le travail sous tension, lorsqu'une distance ergonomique D_E est incorporée, sera plus bas, puisqu'il est improbable qu'une surtension survienne dans la zone de travail au moment où la distance ergonomique est complètement dépassée par un geste involontaire de l'opérateur ou par un objet. C'est pourquoi une valeur de $K_s = 1,0$ peut être utilisée quand une distance ergonomique définie D_E est incluse et est assez grande pour que la valeur de D_A soit toujours plus grande que la valeur de D_U (qui équivaut à D_U lorsque D_E est zéro) calculée en prenant $K_s = 1,1$, c'est-à-dire:

$$D_U(K_s = 1,0) + D_E > D_U(K_s = 1,1)$$

où $D_U(K_s = 1,0)$ et $D_U(K_s = 1,1)$ sont D_U calculées en prenant respectivement $K_s = 1,0$ et $K_s = 1,1$.

Mais, dans un tel cas, la distance ergonomique utile, D_E , est réduite et doit être davantage contrôlée afin de conserver le même risque global de contournement.

6 Calcul de la distance minimale d'approche D_A

La distance électrique D_U est calculée (en mètres) à partir de:

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1,080 K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

où

F est la longueur de l'objet à potentiel flottant (voir 4.3.4);

$U_{90} = K_s U_2$ (provenant de l'équation (5));

K_t est obtenue à partir de l'équation (9) $K_t = k_s k_g k_a k_f k_i$.

Après avoir choisi une valeur appropriée pour la distance ergonomique, D_E , (voir Annexe A), la distance minimale d'approche D_A peut alors être déterminée par l'équation (1):

$$D_A = D_U + D_E \quad (1)$$

NOTE La valeur de distance ergonomique choisie diffère suivant les utilisateurs. Elle est généralement comprise entre 0,2 m et 1 m (voir Annexe A).

Un exemple des résultats de calcul est donné dans le Tableau 2 pour des valeurs des différents facteurs. La distance électrique D_U est calculée en fonction de la tension la plus élevée du réseau, U_s , pour différentes valeurs de la surtension de manœuvre à 2 % u_{e2} , et pour $K_s = 1,1$; $k_s = 0,936$; $k_g = 1,2$; k_a tiré du Tableau E.1 pour une altitude de 1 000 m; k_f et $k_i = 1,0$ et $F = 0$.

- the stress of the actual transient overvoltage wavefront is less than the critical front;
- approximately half of the transient overvoltages will be of negative polarity, and are less severe;
- the frequency and amplitude of transient overvoltages are reduced by restricting reclosing of circuit breakers.

Thus, the value of 1,1 is recommended for K_s to reduce the overall risk of breakdown of the insulation to a level that correlates with other electrical work operations.

The overall risk of a breakdown occurring during live working, when an ergonomic distance D_E is incorporated, will be lower because an overvoltage is unlikely to arise at the work location at that instant where the ergonomic distance is entirely breached by inadvertent movement of the worker or object. Because of this, a value of $K_s = 1,0$ can be used when a defined ergonomic distance D_E is included and is great enough that the value of D_A is always greater than the value of D_A (equivalent to D_U when D_E is zero) calculated using $K_s = 1,1$ i.e.:

$$D_{U(K_s = 1,0)} + D_E > D_{U(K_s = 1,1)}$$

where $D_{U(K_s = 1,0)}$ and $D_{U(K_s = 1,1)}$ are D_U calculated using $K_s = 1,0$ and $K_s = 1,1$ respectively.

But, in doing so, the effective ergonomic distance, D_E , is reduced and shall then be more tightly controlled to retain the same overall risk of breakdown.

6 Calculation of minimum approach distance D_A

The electrical distance D_U is calculated (in metres) from:

$$D_U = 2,17 \left(e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1 \right) + F \quad (8)$$

where

F is the floating object length (see 4.3.4);

$U_{90} = K_s U_2$ (from equation (5));

K_t is obtained in equation (9) $K_t = k_s k_g k_a k_f k_i$.

After selecting an appropriate value for the ergonomic distance D_E (see Annex A), the minimum approach distance D_A can then be determined by equation (1):

$$D_A = D_U + D_E \quad (1)$$

NOTE The value chosen for the ergonomic distance differs between users. It generally falls in the range of 0,2 m to 1 m (see Annex A).

An example of the calculation results is shown in Table 2 for values of the various factors. The electrical distance D_U is calculated against highest system voltage U_s for various levels of 2 % switching overvoltage u_{e2} , and for $K_s = 1,1$; $k_s = 0,936$; $k_g = 1,2$; k_a taken from Table E.1 for 1 000 m altitude; k_f and $k_i = 1,0$ and $F = 0$.

**Tableau 2 – Exemple de calcul de distance électrique
pour quelques valeurs de surtension de manœuvre**

U_s kV	u_{e2} p.u.	D_U mm	u_{e2} p.u.	D_U mm	u_{e2} p.u.	D_U mm	u_{e2} p.u.	D_U mm
72,50	2,20	304	2,30	319	2,70	379	3,50	495
82,50	2,20	350	2,30	367	2,70	429	3,50	572
100,00	2,20	423	2,30	444	2,70	530	3,50	711
123,00	2,20	532	2,30	559	2,70	669	3,50	905
145,00	2,20	639	2,30	673	2,70	809	3,50	1 081
170,00	2,20	767	2,30	808	2,70	958	3,50	1 315
245,00	2,20	1 163	2,30	1 229	2,70	1 505	3,50	2 085
300,00	2,20	1 501	2,30	1 561	2,70	1 930	3,50	2 733
420,00	2,20	2 276	2,30	2 423	2,70	3 011	3,50	4 457
525,00	2,20	3 095	2,30	3 311	2,70	4 198	3,50	6 589
765,00	2,20	5 620	2,30	6 085	2,70	8 243	3,50	14 398

**Table 2 – Example of calculation of electrical distance
for some switching overvoltage values**

U_s kV	u_{e2} p.u.	D_U mm	u_{e2} p.u.	D_U mm	u_{e2} p.u.	D_U mm	u_{e2} p.u.	D_U mm
72,50	2,20	304	2,30	319	2,70	379	3,50	495
82,50	2,20	350	2,30	367	2,70	429	3,50	572
100,00	2,20	423	2,30	444	2,70	530	3,50	711
123,00	2,20	532	2,30	559	2,70	669	3,50	905
145,00	2,20	639	2,30	673	2,70	809	3,50	1 081
170,00	2,20	767	2,30	808	2,70	958	3,50	1 315
245,00	2,20	1 163	2,30	1 229	2,70	1 505	3,50	2 085
300,00	2,20	1 501	2,30	1 561	2,70	1 930	3,50	2 733
420,00	2,20	2 276	2,30	2 423	2,70	3 011	3,50	4 457
525,00	2,20	3 095	2,30	3 311	2,70	4 198	3,50	6 589
765,00	2,20	5 620	2,30	6 085	2,70	8 243	3,50	14 398

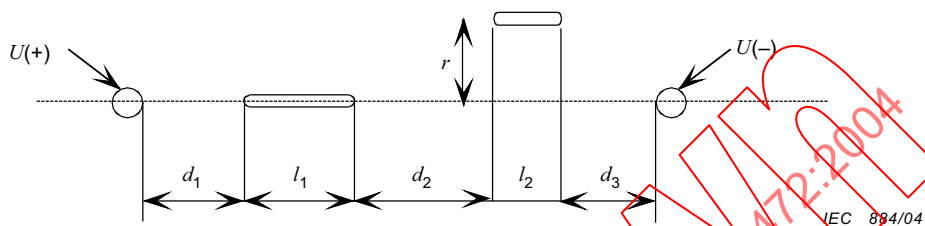
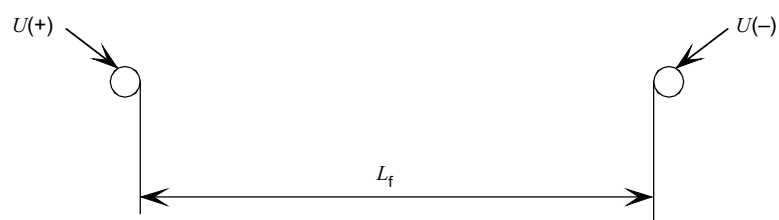


Figure 1 – Illustration de deux objets flottants de différentes dimensions et à des distances différentes de l'axe de l'intervalle (voir 4.3.4)

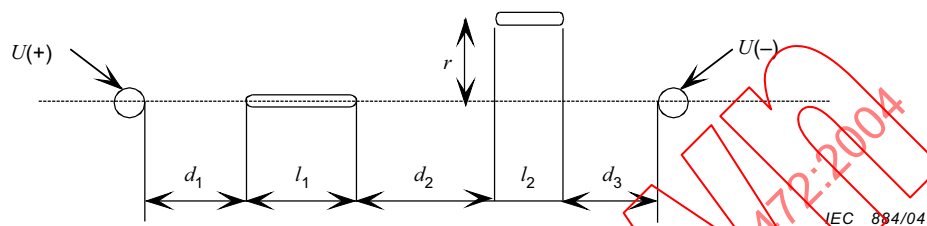
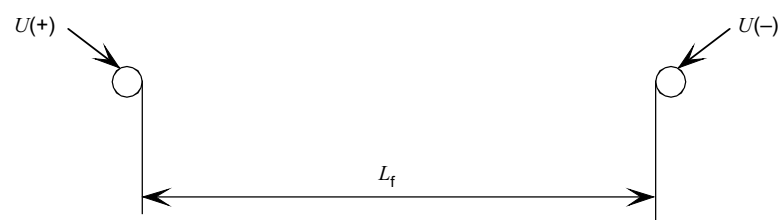
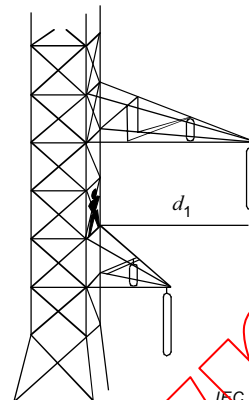


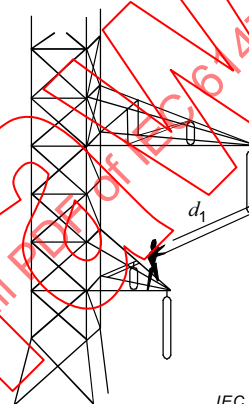
Figure 1 – Illustration of two floating objects of different dimensions and at different distances from the axis of the gap (see 4.3.4)

a) Travailleur hors de l'intervalle d'air
 $d_1 > D_A$



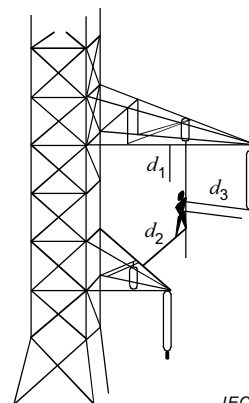
IEC 885/04

b) Travailleur utilisant une perche isolante
 $d_1 > D_A$



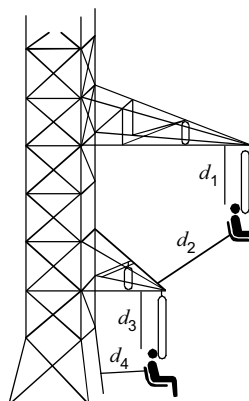
IEC 886/04

c) Travailleur au potentiel intermédiaire
La distance la plus courte entre
 $d_1 + d_3$ ou $d_2 + d_3 > D_A$



IEC 887/04

d) Travail au potentiel
La distance la plus courte entre
 d_1 ou d_2 et d_3 ou $d_4 > D_A$

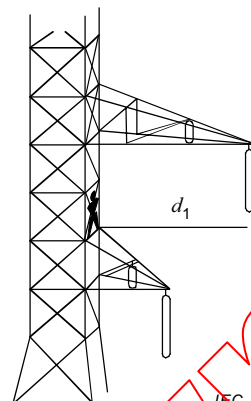


IEC 888/04

Figure 2 – Tâches types de travail sous tension (voir Article 2 et 4.3.4)

a) Worker not in the air gap

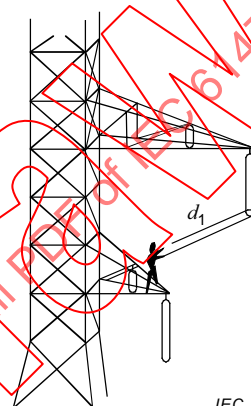
$$d_1 > D_A$$



IEC 885/04

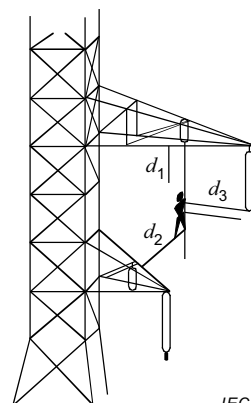
b) Worker using hot stick

$$d_1 > D_A$$



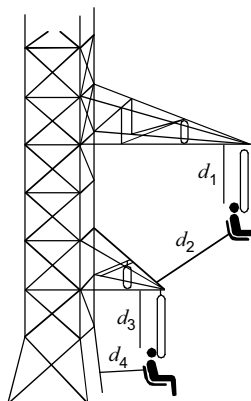
IEC 886/04

c) Worker at intermediate potential
The smallest distance between
 $d_1 + d_3$ or $d_2 + d_3 > D_A$



IEC 887/04

d) Barehand work
The smallest distance between
 d_1 or d_2 and d_3 or $d_4 > D_A$



IEC 888/04

Figure 2 – Typical live working tasks (see Clause 2 and 4.3.4)

Annexe A (informative)

Distance ergonomique

A.0 Introduction

Deux approches, ou un mélange des deux, peuvent être employées pour établir une distance ergonomique requise:

- spécifier seulement une distance minimale d'approche absolue, et laisser le travailleur qualifié décider de la distance supplémentaire requise pour le travail particulier à faire;
- spécifier une distance minimale d'approche complète assurant une marge de sécurité suffisante pour prendre en compte toutes les éventualités possibles.

Un certain nombre de facteurs sont à examiner avant de spécifier la distance minimale d'approche, ou de commencer le travail près d'un conducteur sous tension. Comme il est irréaliste et inopportun de recommander ici une distance ergonomique, les points suivants sont présentés pour servir de guide aux organisations particulières.

A.1 Formation, connaissance et qualification

La base du travail sous tension est la connaissance des risques et les moyens de protection personnelle, par des distances minimales d'approche ou d'autres méthodes. Les travailleurs doivent aussi avoir été formés de façon complète au travail sous tension et au travail en question. Pendant le travail l'attention doit être partagée entre le travail proprement dit et le respect de la distance minimale d'approche. Une formation adaptée et un entraînement aux procédures de travail réduiront la possibilité que l'attention soit détournée de l'observation du respect de la distance minimale d'approche par des événements inattendus.

A.2 Barrières de protection

Des barrières placées entre les travailleurs et les conducteurs sous tension peuvent fournir le niveau d'isolement requis, ou simplement servir de barrière mécanique. Seules des barrières entièrement isolantes, ayant une tenue mécanique appropriée, peuvent être placées à une distance des conducteurs sous tension inférieure à la distance électrique.

A.3 Possibilité d'erreur

La possibilité que des erreurs soient commises durant le travail dépend de la procédure de travail utilisée, de facteurs personnels, des effets de l'environnement et de la mesure dans laquelle les actions des travailleurs sont surveillées par d'autres.

A.4 Procédure de travail

Différentes positions et méthodes de travail exigeront des précautions différentes quant aux gestes involontaires. La stabilité de la position du travailleur peut aussi varier d'un travail à un autre, par exemple, un travail en élévation par rapport à un travail au sol. Une tâche complexe ou fatigante accroît aussi le risque que l'attention de l'opérateur soit détournée de l'observation du respect de la distance minimale d'approche.

A cause de ces facteurs, on pourrait considérer la possibilité d'employer une distance ergonomique différente pour des situations de travail ou des procédures différentes.

Annex A (informative)

Ergonomic distance

A.0 Introduction

Two approaches, or a blend of both, can be used to establish an ergonomic distance required:

- specify only an absolute minimum approach distance and let the skilled worker decide the extra distance required for the particular job to be done;
- specify a complete minimum approach distance allowing a sufficient safety margin to account for all possible contingencies.

A number of factors have to be considered before specifying the minimum approach distance, or commencing work close to a live conductor. As it is impractical and inappropriate to recommend an ergonomic distance here, the following points are provided as guidelines for consideration by individual organisations.

A.1 Training, knowledge and skill

Basic to live working is knowledge of the hazards and means of personal protection, by minimum approach distances and other methods. Workers shall have been thoroughly trained in live work and in the job at hand. During work, attention shall be shared between the work and observing the minimum approach distance. Adequate training and practice in the work procedure will reduce the possibility of attention being diverted from observing the minimum approach distance by unexpected situations.

A.2 Protective barriers

Barriers placed between the workers and the live conductors may provide the required insulation level, or merely serve as a mechanical barrier. Only fully insulating barriers with adequate mechanical strength can be placed closer to the live conductors than the electrical distance.

A.3 Possibility of error

The possibility of errors being committed during the work depends on the work procedure being used, personal factors, effects of the environment and the extent to which the workers' actions are monitored by others.

A.4 Work procedure

Different work positions and methods will require different allowances for unintentional movement. The stability of the worker's position can also vary from task to task, e.g. working above the earth, compared with working on the earth. A complex or strenuous job is also more likely to divert the worker's attention away from observing the minimum approach distance.

Because of these factors, consideration could be given to using a different ergonomic distance for different work situations or procedures.

A.5 Facteurs personnels

Les états physique, mental et émotionnel d'un travailleur sont aussi des causes possibles de gestes involontaires. Ces facteurs sont à leur tour influencés par la durée et la vigueur du travail, par exemple. Le travail sous tension demande une attention constante, à la fois aux procédures et à la distance minimale d'approche, attention qui peut être facilement distraite par des facteurs personnels. Pour cette raison, un bon contrôle de soi et une conscience de la sécurité sont des aptitudes essentielles pour travailler à la distance minimale d'approche.

L'aptitude d'un travailleur à estimer la distance minimale d'approche correctement est aussi importante. Pour cette raison, il peut être bénéfique d'accroître la distance ergonomique avec la tension. Cependant, une distance trop grande à de hautes tensions rendra les petites pièces sur les conducteurs sous tension difficiles à voir et les outils plus lourds à manipuler.

Il convient que les travailleurs ne portent pas des vêtements avec des parties mal ajustées qui pourraient tomber, voler ou se balancer près des conducteurs sous tension.

A.6 Facteurs d'environnement

Certaines conditions d'environnement sont généralement prises en compte en interdisant le travail à la distance minimale d'approche quand elles sont présentes. Par exemple, le travail n'est normalement pas autorisé pendant des orages proches, ou quand il y a un film continu d'eau à la surface des outils isolants.

Des conditions défavorables peuvent aussi être créées par d'autres conditions d'environnement, soit directement, soit en détournant l'attention des procédures de travail autorisées. Des vents violents déplacent dangereusement les conducteurs, les supports ou le matériel (par exemple les dispositifs aériens). Les tempêtes de poussière constituent un risque pour les yeux. La glace sur les supports rend les prises pour les pieds peu sûres. Les trous de pivot présentent un risque à l'escalade. La brume ou les embruns marins peuvent entraîner un risque de détérioration de l'isolation des outils ou du réseau. Les surfaces lisses peuvent être glissantes. L'obscurité ou la lumière éblouissante peuvent diminuer la vision. Il convient de prendre également en compte l'effet de température élevée et d'humidité pour la fatigue du travailleur. Ces conditions sont des conditions d'influence de l'environnement sur le travail près des conducteurs sous tension, dont certaines nécessiteront d'être prises en compte pour déterminer les distances minimales d'approche.

A.7 Surveillance

Pour prévenir les travailleurs des situations dangereuses qui peuvent se présenter pendant le travail, il peut être parfois bénéfique d'exiger une surveillance continue par un observateur. A défaut de cela, il convient que les travailleurs soient encouragés à se décrire les uns aux autres à haute voix chaque étape de la procédure de travail avant de l'entreprendre. Il convient aussi que la procédure à suivre soit décrite et discutée entre le chef d'équipe et les travailleurs avant de commencer le travail.

A.5 Personal factors

A worker's physical, mental and emotional states are also possible causes for unintentional movement. These factors are, in turn, influenced by the duration and strenuousness of the job, for instance. Live working requires constant attention, both to the procedures and the minimum approach distance, attention which can be readily distracted by personal factors. For this reason, self control and safety awareness are essential skills to work at the minimum approach distance.

A worker's ability to judge the minimum approach distance correctly is also important. For this reason it may be beneficial to increase the ergonomic distance with the voltage. However, too large a distance at high voltages will make small components on the live conductors difficult to see, and tools heavier to handle.

Workers should not wear clothing with loose parts that could fall, blow or swing close to the live conductors.

A.6 Environmental factors

Certain environmental influences are generally taken into account by prohibiting work at the minimum approach distance under those conditions. For instance, work is normally not permitted during nearby thunderstorms, or when there is a continuous film of water on the surface of insulating tools.

Adverse conditions may also be created by other environmental conditions, either directly, or by diverting attention away from the authorized work procedures. Strong winds move conductors, supports or equipment (e.g. aerial devices) dangerously. Dust storms are an eye hazard. Ice on structures will make footing insecure. Woodpecker holes present a climbing hazard. Mist or sea spray may pose a hazard to system or tool insulation. Smooth surfaces may be slippery. Darkness or glare may impair vision. Consideration should also be given to the effect of high temperature and humidity to worker fatigue. These are some of the environmental influences on work close to live conductors, some of which will need to be taken into account when establishing minimum approach distances.

A.7 Monitoring

To warn workers of dangerous situations arising during the work, it can be sometimes beneficial to require continuous monitoring by an observer. Failing that, the workers should be encouraged to describe aloud to one another each step in the work procedure before taking it. The procedure to be followed should also be detailed and discussed between the foreman and workers before commencing work.

Annexe B (informative)

Surtensions

B.1 Les différents types de surtensions

Les valeurs de surtension sont exprimées en p.u., et 1 p.u. est égal à $U_s \sqrt{2/\sqrt{3}}$ (voir 2.7).

Conformément à la CEI 60071-1, les tensions et surtensions sont divisées en classes, indiquées dans le Tableau B.1.

Pour les applications de travaux sous tension, les surtensions présentant le plus d'intérêt, dans la gamme de tension visée, sont des surtensions à front lent dues à des manœuvres. Les transitoires à front rapide, telles que les surtensions de foudre, ne sont généralement pas importantes, car les travaux sous tension ne sont normalement pas réalisés dans des conditions de temps défavorables. Les surtensions permanentes et temporaires à basse fréquence ne sont habituellement aussi pas prises en compte, car elles ne sont pas critiques pour les intervalles d'air requis pour tenir des surtensions de manœuvre pendant les travaux sous tension.

B.2 Surtensions transitoires à front lent

Les amplitudes de surtension à front lent dépendent de plusieurs paramètres tels que les caractéristiques du système, le point du système, le type d'événement considéré. De plus, au même point et pour la même famille d'événements, les surtensions ont une nature statistique. Ainsi les amplitudes de surtension à front lent sont évaluées sur la base d'une approche statistique: la référence est habituellement faite sur la surtension ayant une probabilité de 2 % d'être atteinte ou dépassée (U_{e2} entre phase et terre et U_{p2} entre phases) et à l'écart-type de la distribution statistique, présumée gaussienne, σ .

Les familles de surtension les plus communes sont examinées ci-après.

B.2.1 Origines et valeurs types

B.2.1.1 Surtensions phase-terre

Les surtensions de fermeture et de re fermeture sont parmi les surtensions les plus fréquentes.

Les amplitudes des surtensions phase-terre dépendent de plusieurs paramètres: réseau d'alimentation (puissance de court circuit, rapport d'impédance de la composante homopolaire à la composante directe, configuration, niveau de tension présente sur le jeu de barres d'alimentation), ligne interrompue (longueur, caractéristiques électriques, niveau de tension résiduelle laissée par l'alimentation antérieure), compensation shunt de ligne, lignes parallèles sous tension, disjoncteurs (largeur de pôle, préamorçage, angle de phase au moment de la commutation), point le long de la ligne interrompue (la distribution de tension le long de la ligne augmente du poste à l'extrémité opposée).

La Figure B.1 résume les gammes d'amplitude maximale de surtensions phase-terre lors de l'alimentation d'une ligne en fonction des différentes conditions prises en compte. La gamme de u_{e2} est assez étendue, allant d'environ 1,2 jusqu'à environ 2,8 pour des opérations de fermeture et d'environ 1,5 jusqu'à environ 3,8 pour des opérations de re fermeture.

Annex B (informative)

Overvoltages

B.1 The different types of overvoltages

The overvoltage values are expressed in p.u., and 1 p.u. is equal to $U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$ (see 2.7).

According to IEC 60071-1, voltages and overvoltages are divided in the classes shown in Table B.1.

For live working applications, the overvoltages of major concern, in the voltage range of interest, are the slow front overvoltages due to switching operations. Fast front transients, such as lightning overvoltages, are not generally of importance, since live work is not normally performed under conditions of inclement weather. Permanent and temporary low frequency overvoltages are usually also not of concern, since they are not critical for the air gaps which are required to withstand switching overvoltages during live work.

B.2 Transient slow-front overvoltages

Slow-front overvoltage amplitudes depend on many parameters such as the characteristics of the system, the point of the system, the type of event considered. Moreover, even at the same point and for the same family of events, the overvoltages have a statistical nature. So slow-front overvoltage amplitudes are evaluated on the basis of a statistical approach: reference is usually made to the overvoltage having the probability of 2 % to be reached or exceeded (U_{e2} for phase to earth and U_{p2} for phase to phase) and to the standard deviation of the statistical distribution, assumed as gaussian, σ .

The most common overvoltage families are examined in the following.

B.2.1 Origin and typical values

B.2.1.1 Phase to earth overvoltages

Closing and reclosing overvoltages are among the most frequent type of overvoltages.

The amplitudes of the phase to earth overvoltages depend on many parameters: feeding network (short circuit power, zero to positive sequence impedance ratio, configuration, actual voltage level on the feeding busbar), switched line (length, electrical characteristics, level of residual voltage left by previous energization), line shunt compensation, energized parallel lines, circuit breakers (pole span, prestrike, phase angle at the instant of switching), point along the switched line (the voltage distribution along the line is rising from the substation to the opposite end).

Figure B.1 summarizes the maximal amplitude ranges of phase to earth overvoltages at line energization depending on the various conditions considered. The range of u_{e2} is quite large ranging from about 1,2 to about 2,8 for closing operations and from about 1,5 to about 3,8 for reclosing operations.

D'autres moyens de réduire les surtensions, non considérées dans la Figure B.1, sont les parafoudres ou la commutation synchronisée.

Les surtensions dues à l'ouverture d'une charge capacitive sont en général moins sévères que celles dues à la fermeture. Une estimation prudente de leur valeur peut donc être obtenue à partir des valeurs de surtension de fermeture.

Les surtensions provenant de l'amorçage d'un défaut peuvent atteindre 1,6 p.u. à 1,7 p.u. dans les conditions de fonctionnement normales, et leurs amplitudes ne peuvent pas être facilement atténuées.

Les surtensions provenant de l'élimination d'un défaut peuvent atteindre 1,7 p.u. à 1,8 p.u.

B.2.1.2 Surtensions entre phases

Comme entre phase et terre, l'amplitude U_{p2} des surtensions entre phases dépend considérablement des moyens adoptés pour les réduire.

Normalement, lorsque aucun moyen de réduction n'est adopté ou lorsque les surtensions sont contrôlées par des résistances de fermeture, la relation entre la surtension entre phases et la surtension phase-terre peut être donnée par la formule ci-dessous:

$$U_{p2} = 1,35 U_{e2} + 0,45$$

avec un écart-type:

$$\sigma_{pp} = \sigma_{pe} \sqrt{2}$$

La relation peut être différente lorsque les surtensions sont contrôlées par des parafoudres.

B.2.2 Surtensions en conditions anormales

Parmi les conditions anormales possibles qui peuvent mener à des surtensions très élevées, des réamorçages entre les contacts des disjoncteurs pendant l'ouverture sont pris en compte et, en particulier, les conditions suivantes peuvent être préoccupantes:

- ouverture de lignes non chargées monophasées ou triphasées;
- élimination triphasée d'un défaut entre une ligne et la terre.

De telles situations anormales peuvent mener à des amplitudes de surtension du même ordre ou même d'un ordre supérieur à celles d'un réenclenchement triphasé.

Cependant la probabilité de réamorçage des disjoncteurs est normalement faible, et est vraiment très faible pour les disjoncteurs modernes. Ainsi, la faible probabilité de ces événements n'est pas de nature à influencer la distribution de la probabilité de la famille considérée (ouverture ou élimination d'un défaut) ni la valeur U_{e2} correspondante.

Other means to reduce overvoltages, not considered in Figure B.1, are surge arresters or synchronized switching.

Overvoltages due to opening capacitive loads are usually less severe than those due to closing. A conservative estimate of their value may be thus obtained from closing overvoltage values.

Overvoltages from fault initiation may reach 1,6 p.u.-1,7 p.u. in normal operating conditions, and their amplitudes may not be easily mitigated.

Overvoltages from fault clearing may reach 1,7 p.u.-1,8 p.u.

B.2.1.2 Phase to phase overvoltages

As for phase to earth, the amplitude U_{p2} of the phase to phase overvoltages depends remarkably on the reduction means adopted.

Normally, when no reduction means are adopted or when the overvoltages are controlled by closing resistors, the relation between the phase to phase overvoltage and the phase to earth one may be given by the following relation:

$$U_{p2} = 1,35 U_{e2} + 0,45$$

with a standard deviation:

$$\sigma_{pp} = \sigma_{pe} \sqrt{2}$$

The relationship may be different when the overvoltages are controlled by surge arresters.

B.2.2 Overvoltages under abnormal conditions

Among the possible abnormal conditions which can lead to very high overvoltages, restrikes between the contacts of circuit breakers during opening is considered, and in particular the following conditions may be of concern:

- single or three-phase opening of no load lines;
- three-phase clearing of line-to-earth fault.

Such abnormal behaviour may lead to overvoltage amplitudes of the same order or even higher than those under three-phase reclosing.

However, the restrike probability of circuit breakers is normally low, and is very low for the modern circuit breaker. So the low probability of these events is not such as to influence the probability distribution of the family considered (opening or fault clearing) and thus the relevant U_{e2} value.

B.3 Surtensions d'un intérêt particulier pour les travaux sous tension

Comme montré précédemment, en fonction de la tension nominale du réseau, le rapport de l'amplitude maximale de la surtension à front lent et de la tension maximale du système peut fortement varier en fonction de la philosophie de contrôle adoptée, laquelle peut changer avec la tension du système.

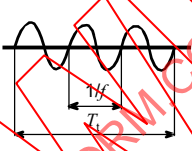
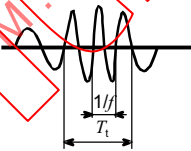
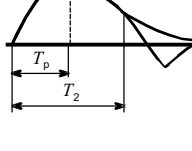
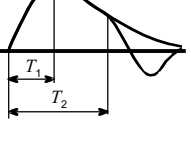
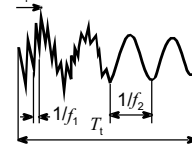
Plusieurs procédures de travaux sous tension inhibent les fermetures ou les reouvertures pendant le travail sous tension. Dans ce cas, il convient de ne prendre en compte que les surtensions dues à l'ouverture, à l'amorçage d'un défaut et à l'élimination d'un défaut, et leurs valeurs peuvent varier dans une large gamme (d'environ 1,6 p.u. à 2,8 p.u.).

En outre, il doit être pris en compte que des techniques de contrôle de surtension sont appliquées pour les tensions élevées de réseau et ne le sont pas pour les faibles tensions de réseau: de cette façon, généralement u_{e2} (p.u.) décroît lorsque la tension de réseau augmente.

En général l'amplitude des surtensions dépend de plusieurs paramètres et nécessite une analyse poussée pour le système considéré. C'est la raison pour laquelle aucune valeur de surtensions n'est proposée dans cette annexe.

Finalement, une approche additionnelle pour contrôler les surtensions dans la zone de travail doit être mentionnée, laquelle consiste à installer temporairement des dispositifs limiteurs de tension pendant la durée du travail. Le dispositif limiteur de tension souvent utilisé est un intervalle tige-tige, lequel est installé sur la phase sur laquelle le travail sous tension est réalisé, de préférence sur la ou les structures immédiatement voisines. Cet intervalle, qui a été conçu et utilisé pour la première fois à la fin des années 1960, est portable et est installé seulement pour la durée du travail sous tension.

Tableau B.1 – Classification des surtensions conformément à la CEI 60071-1

Classe	Basse fréquence		Transitoire		
	Permanente	Temporaire	A front lent	A front rapide	A front très rapide
Forme de tension					
Domaine des formes de tension	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz $T_1 \leq 3\,600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_1 \leq 3\,600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$3 \text{ ns} < T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 30 \text{ MHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Forme normalisée de tension	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz T_1^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Essai de tenue normalisé	*	Essai de courte durée à fréquence industrielle	Essai aux chocs de manoeuvre	Essai aux chocs de foudre	*

* A spécifier par le comité de produit concerné.

B.3 Overvoltages of special concern for live working

As shown previously, depending on the nominal voltage of the network, the ratio of the slow-front overvoltage maximum amplitude and the maximum voltage of the system can vary widely depending on the control philosophy adopted, which may change with the system voltage.

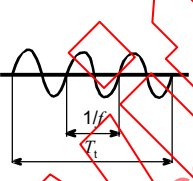
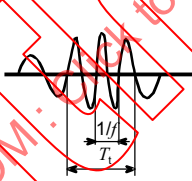
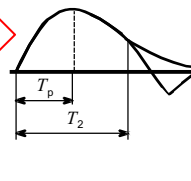
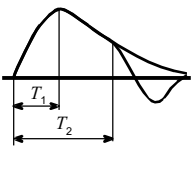
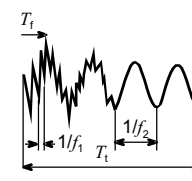
Many live working procedures inhibit closing or reclosing operations during live work. In this case, only overvoltages due to opening, fault initiation and fault clearing should be considered and their value may vary in a wide range (from about 1,6 p.u. to 2,8 p.u.).

Furthermore, it has to be considered that overvoltage control techniques are applied for the high system voltages which are not applied in the lower system voltages: thus generally u_{e2} (p.u.) decreases when the system voltage is increased.

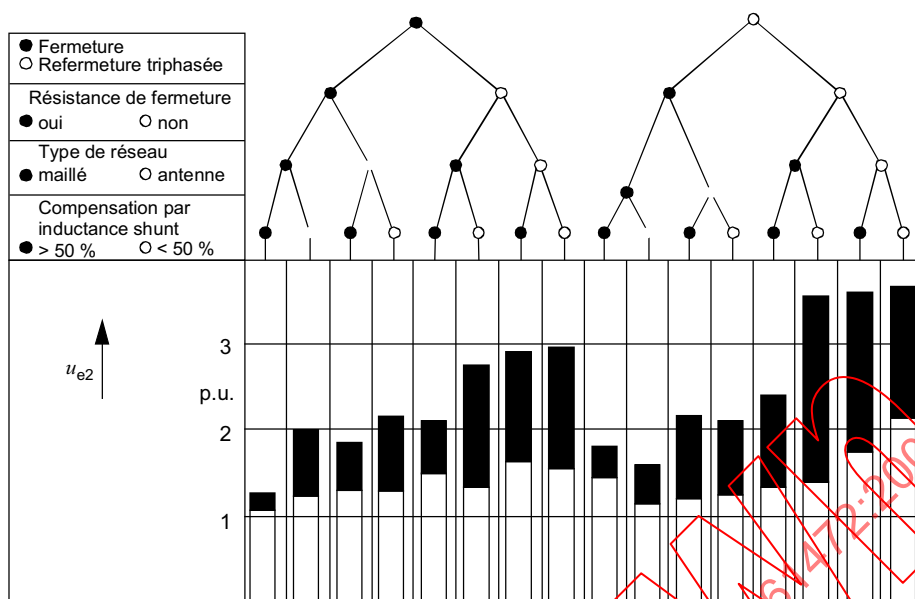
In general, the amplitude of overvoltages depends on many parameters and needs an in-depth analysis for the specific system considered. This is the reason why preferential overvoltage values are not proposed in this annex.

Finally, a further approach to controlling worksite overvoltages is to be mentioned, which consists of installing temporary voltage limiting devices for the duration of the work. The voltage-limiting device often used is the rod-rod gap, which is installed on the phase on which live work is performed, preferably on immediately adjacent structure(s). This gap, which was conceived and first used in the late 1960s, is portable and is installed only for the duration of the live work.

Table B.1 – Classification of overvoltages according to IEC 60071-1

Class	Low frequency		Transient		
	Permanent	Temporary	Slow front	Fast front	Very fast front
Voltage shape					
Range of voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_t \leq 3\,600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_t \leq 3\,600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$3 \text{ ns} < T_t \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 30 \text{ MHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Standard voltage shape	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Standard withstand test	*	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	*

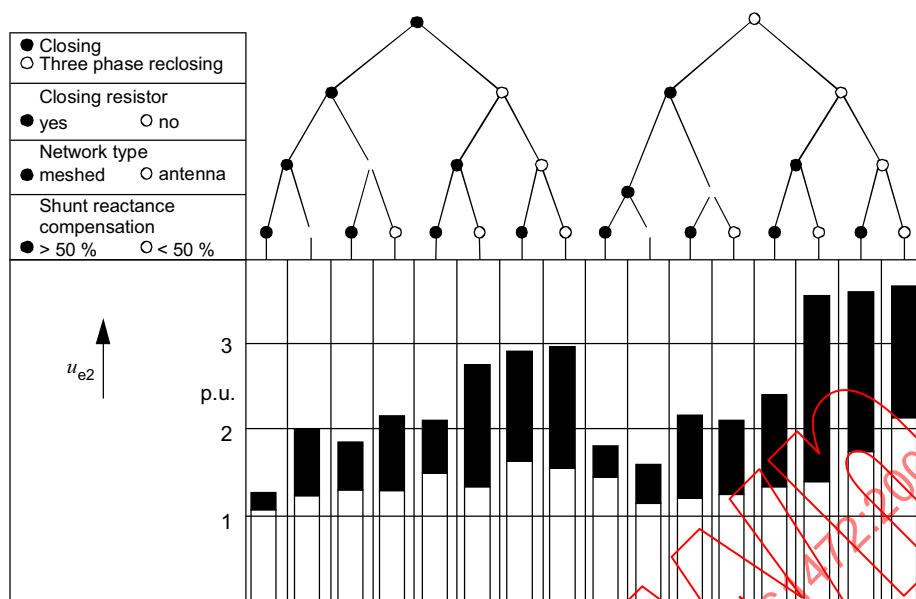
* To be specified by the relevant apparatus committees.



NOTE Les niveaux les plus élevés correspondent à la ligne la plus longue.

IEC 889/04

Figure B.1 – Gammes de u_{e2} en bout de ligne ouverte due à la fermeture et à la refermeture conformément au type de réseau (maillé ou antenne) avec et sans résistances de fermeture et inductances shunt (voir B.2.1.1)



NOTE The highest levels correspond to the longest line.

IEC 889/04

Figure B.1 – Ranges of u_{e2} at the open ended line due to closing and reclosing according to the type of network (meshed or antenna) with and without closing resistors and shunt reactors (see B.2.1.1)

Annexe C (informative)

Tenue diélectrique de l'air

La forme d'une tension de choc de manœuvre normalisée utilisée dans les essais a une durée jusqu'à la crête de 250 µs et une durée de queue de 2 500 µs. Les surtensions de manœuvre se produisant dans les réseaux en exploitation ont une durée jusqu'à la crête comprise entre 50 µs et 2 000 µs. La durée jusqu'à la crête de cette surtension a une influence considérable sur la tension de décharge disruptive, U_{50} , d'un intervalle d'air et varie avec la longueur de l'intervalle. L'amplitude de cette tension est minimale pour une valeur de la durée jusqu'à la crête dite critique. Il convient que la distance minimale d'approche soit déterminée en supposant une forme d'onde avec une durée jusqu'à la crête critique.

Par suite des nombreux essais aux ondes de choc de manœuvre, les intervalles d'air peuvent être caractérisés par la tenue minimale qui est observée avec la surtension transitoire de durée jusqu'à la crête critique, en fonction des caractéristiques géométriques de l'intervalle, principalement l'écartement et la configuration des électrodes. Parmi les différents intervalles de même écartement, d (en mètres), l'intervalle tige-plan en polarité positive présente la tenue la plus faible et est utilisé comme référence. Pour des intervalles tige-plan d'écartement entre 0,5 m et 12 m, la tenue diélectrique U_{50RP} à une onde de polarité positive ayant un temps de front critique, est donnée par (formule 3 de la brochure 151 du CIGRÉ):

$$U_{50RP} = 1\,080 \ln(0,46d + 1) \text{ kV} \quad (\text{C.1})$$

Pour d'autres configurations d'intervalle et pour prendre en compte d'autres influences, la tension de tenue statistique U_{90} peut être déterminée en appliquant un facteur K_t comme suit:

$$U_{90} = K_t U_{50RP} \quad (\text{C.2})$$

soit:

$$U_{90} = K_t 1\,080 \ln(0,46d + 1) \quad (\text{C.3})$$

En transformant l'équation (C.3) et en prenant en compte la distance F d'objet à potentiel flottant, on obtient l'équation (8) pour la distance électrique D_U .

Pour chaque distance d'intervalle, et sous les mêmes conditions atmosphériques, il y a une dispersion statistique des tensions de claquage. D'après les essais, la probabilité de claquage est habituellement supposée avoir une distribution normale (gaussienne). L'écart-type de cette distribution varie avec la forme d'onde, la polarité de la surtension, la géométrie de l'intervalle et les conditions atmosphériques.

La relation entre la tension de tenue statistique, U_{90} , et la tension de décharge disruptive à 50 %, U_{50} , est:

$$U_{90} = U_{50} - 0,0128 s_e U_{50} \quad (\text{C.4})$$

où s_e est la valeur normalisée de l'écart-type de U_{50} , exprimée en pourcentage. En définissant k_s comme:

$$k_s = 1 - 0,0128 s_e \quad (\text{C.5})$$

Annex C (informative)

Dielectric strength of air

The shape of a standard switching impulse used for tests has a 250 µs time-to-crest and a 2 500 µs tail. The switching overvoltages arising on operating power systems have a time-to-crest ranging from 50 µs to 2 000 µs. The time-to-crest of this overvoltage has a considerable influence on the disruptive withstand voltage U_{50} of an air gap and varies with the air gap distance. The magnitude of the voltage is least at a so-called critical time-to-crest. A waveform with a critical time-to-crest should be assumed in determining the minimum approach distance.

As a result of numerous switching impulse tests, air gaps can be characterized by the minimum strength observed for the critical time-to-crest of the transient overvoltage, as a function of the geometrical characteristics of the air gap, which are mainly the gap spacing and the electrode configuration. Among different gaps of the same spacing, d (in metres), the positively stressed rod-plane gap has the lowest strength and is used as a reference. For practical rod-plane gaps of length between 0,5 m and 12 m, the positive polarity critical-front-time dielectric strength U_{50RP} is given by (formula 3 of CIGRÉ Brochure 151):

$$U_{50RP} = 1\,080 \ln(0,46d + 1) \text{ kV} \quad (\text{C.1})$$

For other gap configurations, and to take account of other effects, the statistical withstand voltage U_{90} can be determined by applying a factor K_t as follows:

$$U_{90} = K_t U_{50RP} \quad (\text{C.2})$$

that is:

$$U_{90} = K_t 1\,080 \ln(0,46d + 1) \quad (\text{C.3})$$

By transforming equation (C.3) and taking into account the floating object distance F , one obtains equation (8) for the electrical distance D_U .

For each gap distance, and under the same atmospheric conditions, there is a statistical variation in breakdown voltage. The probability of breakdown is usually assumed to have a normal (Gaussian) distribution based on tests. The conventional deviation of this distribution varies with waveform, polarity of the overvoltage, gap geometry and atmospheric conditions.

The relationship between the statistical withstand voltage U_{90} and the 50 % disruptive discharge voltage U_{50} is:

$$U_{90} = U_{50} - 0,0128 s_e U_{50} \quad (\text{C.4})$$

where s_e is the normalized value of the standard deviation of U_{50} expressed in percent. Defining k_s as:

$$k_s = 1 - 0,0128 s_e \quad (\text{C.5})$$

l'équation (C.4) devient:

$$U_{90} = k_s U_{50} \quad (\text{C.6})$$

A moins que la valeur de s_e ne soit connue à partir d'essais représentatifs de la configuration et de la longueur de l'intervalle concernées, il convient de retenir une valeur de $s_e = 5 \%$. L'équation (C.5) devient alors:

$$k_s = 0,936 \quad (\text{C.7})$$

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61472:2004

equation (C.4) becomes:

$$U_{90} = k_s U_{50} \quad (\text{C.6})$$

Unless the value of s_e is known from tests representative of the gap configuration and distance concerned, a value of $s_e = 5 \%$ should be assumed. Equation (C.5) then becomes:

$$k_s = 0,936 \quad (\text{C.7})$$

Withdrawing
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61472:2004

Annexe D (informative)

Facteur d'intervalle k_g

La forme et la dimension des parties conductrices sous tension et à la terre sont les caractéristiques qui ont la plus grande influence sur la tenue électrique d'intervalles de plus de 1 m. La configuration d'intervalle qui a la tenue la plus faible est la configuration tige-plan avec un choc de manœuvre de polarité positive appliqué à la tige.

Si la partie conductrice mise à la terre n'est pas un plan ou si la partie conductrice sous tension est plus grosse qu'une tige, U_{50} est plus élevée que la valeur correspondant à la configuration tige-plan dans un rapport k_g appelé « facteur d'intervalle ». Plus la partie conductrice reliée à la terre est petite (par exemple pylône, support de jeu de barres) et plus elle est loin du plan de terre, plus la valeur de k_g est grande et se rapproche de la valeur limite correspondant à la configuration isolée conducteur-tige, qui a la tenue électrique la plus grande.

Les valeurs types de facteur d'intervalle pour des configurations courantes figurent dans le Tableau D.1 extrait de la CIGRÉ 72 et figurent aussi dans la CEI 60071-2. Le Tableau D.1 donne aussi des expressions du facteur d'intervalle k_g (donné comme « k » ici) permettant son calcul pour différentes configurations d'intervalle. Se référer à la CIGRÉ 72 pour avoir plus de précisions concernant la détermination du facteur d'intervalle.

Pour calculer la distance électrique, il est suggéré de choisir une valeur type de facteur d'intervalle à partir des valeurs apparaissant dans le Tableau D.1 (pour phase-terre). Dans certaines circonstances, comme celle d'un travail sur un ancrage fixé sur une structure large et n'ayant pas d'anneaux de répartition (peu probable pour des réseaux au-dessus de 300 kV) ou pour un travail près de conducteurs passant au-dessus de structures étendues, le facteur d'intervalle peut être aussi bas que 1,1. D'autre part, pour des structures étroites, le facteur d'intervalle peut s'approcher de 1,6. Le facteur d'intervalle peut être général et convenir pour plusieurs structures.

Pour une configuration entre phases, la gamme est 1,45 à 1,6.

Annex D (informative)

Gap factor k_g

One of the greatest influences on the electrical strength of gaps above 1 m is the shape and size of the energized and the earthed conductive parts. The weakest of the gap configurations is the rod-plane with a positive switching impulse applied to the rod.

If the earthed conductive part is different from a plane or the live conductive part is larger than a rod, U_{50} is greater than for the rod-plane configuration by a so-called "gap factor" k_g . The smaller the earthed conductive part (e.g., tower, bus support structure) and the further it is from the earth plane, the greater the value of k_g , up to the limit where the configuration becomes an isolated conductor-rod gap, which has the greatest electrical strength.

Typical gap factor values for common configurations are shown in Table D.1, reproduced from CIGRÉ 72, and also in IEC 60071-2. Table D.1 also gives expressions for the gap factor k_g (shown here as " k ") permitting its calculation for different gap configurations. Refer to CIGRÉ 72 for further details regarding determination of the gap factor.

It is suggested that a gap factor be chosen from the range of values given in Table D.1 (for phase to earth), to calculate the electrical distance. Under certain circumstances, such as a conductor dead-ending on a wide structure and having no grading rings (unlikely for systems above 300 kV), or for work near conductors passing over large structures, the gap factor may be as low as 1,1. Conversely, for narrow structures, the gap factor may approach 1,6. The gap factor may be general and may cover several structure types.

For phase to phase configuration, the range is 1,45 to 1,6.

Tableau D.1 – Facteurs d'intervalle pour des configurations phase-terre réelles

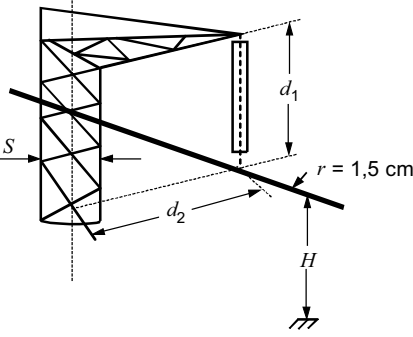
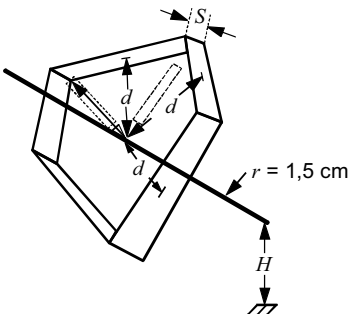
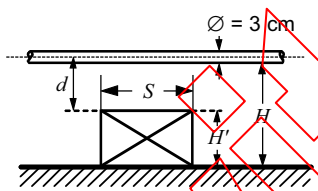
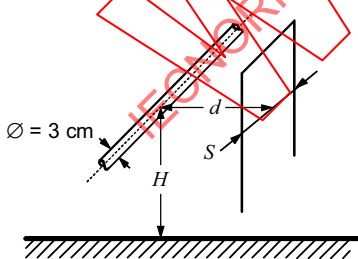
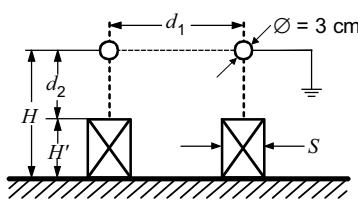
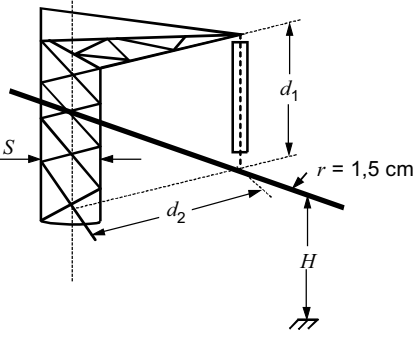
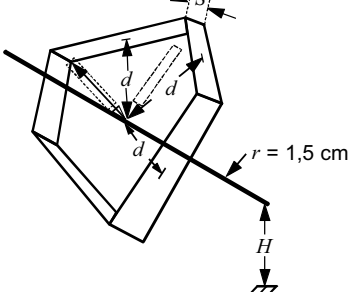
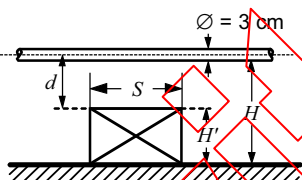
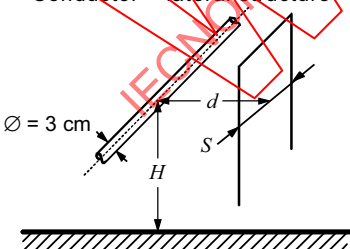
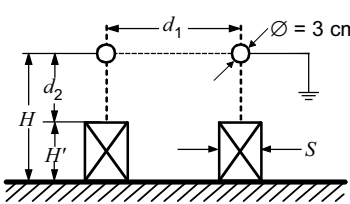
Configuration	Formule	Valeur type
Conducteur - console 	$k = 1,45 + 0,015 \left(\frac{H}{d_1} - 6 \right) + 0,35 \left(e^{-8S/d_1} - 0,2 \right) + 0,135 \left(\frac{d_2}{d_1} - 1,5 \right)$ Valide dans la gamme: $d_1 = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$ $d_2/d_1 = 1 \text{ à } 2$ $S/d_1 = 0,1 \text{ à } 1$ $H/d_1 = 2 \text{ à } 10$	$k = 1,45$
Conducteur - fenêtre 	$k = 1,25 + 0,005 \left(\frac{H}{d} - 6 \right) + 0,25 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Valide dans la gamme: $d = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$ $S/d = 0,1 \text{ à } 1$ $H/d = 2 \text{ à } 10$	$k = 1,25$
Conducteur - structure inférieure 	$k = 1,15 + 0,81 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,167} + 0,02 \frac{H'}{d} - A \left[1,209 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,16} + 0,03 \left(\frac{H'}{H} \right) \right] \left(0,67 - e^{-2S/d} \right)$ où $A = 0$ si $S/d < 0,2$ et $A = 1$ si $S/d > 0,2$ Valide dans la gamme: $d = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $S/d = 0 \text{ à } \infty$, $H'/H = 0 \text{ à } 1$	$k = 1,15$ pour conducteur-plan à 1,5 ou plus
Conducteur - structure latérale 	$k = 1,45 + 0,024 \left(\frac{H'}{H} \right) - 6 + 0,35 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Valide dans la gamme: $d = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $S/d = 0,1 \text{ à } 1$, $H'/H = 2 \text{ à } 10$	$k = 1,45$
Structure tige - tige (appareillage de connexion ouvert) 	Structure tige-tige dans un plan horizontal $k_1 = 1,35 - 0,1 \frac{H'}{H} - \left(\frac{d_1}{H} - 0,5 \right)$ Tige – structure inférieure $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H} - A 1,093 \frac{H'}{H} \left(0,549 - e^{-3S/d_2} \right)$ où $A = 0$ si $S/d_2 < 0,2$ et $A = 1$ si $S/d_2 > 0,2$ Valide dans la gamme: $(k_1) d_1 = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $d_1/H = 0,1 \text{ à } 0,8$, $d_1 < d_2$ $(k_2) d_2 = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $S/d_2 = 0 \text{ à } \infty$, $d_2 < d_1$	$k_1 = 1,3$ $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H}$

Table D.1 – Gap factors for some actual phase to earth configurations

Configuration	Formula	Typical value
Conductor – cross-arm 	$k = 1,45 + 0,015 \left(\frac{H}{d_1} - 6 \right) + 0,35 \left(e^{-8S/d_1} - 0,2 \right) + 0,135 \left(\frac{d_2}{d_1} - 1,5 \right)$ Applicable in the range: $d_1 = 2$ m to 10 m $d_2/d_1 = 1$ to 2 $S/d_1 = 0,1$ to 1 $H/d_1 = 2$ to 10	$k = 1,45$
Conductor – window 	$k = 1,25 + 0,005 \left(\frac{H}{d} - 6 \right) + 0,25 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Applicable in the range: $d = 2$ m to 10 m $S/d = 0,1$ to 1 $H/d = 2$ to 10	$k = 1,25$
Conductor – lower structure 	$k = 1,15 + 0,81 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,167} + 0,02 \frac{H'}{d} - A \left[1,209 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,16} + 0,03 \left(\frac{H'}{H} \right) \right] \left(0,67 - e^{-2S/d} \right)$ where $A = 0$ if $S/d < 0,2$ and $A = 1$ if $S/d > 0,2$ Applicable in the range: $d = 2$ m to 10 m, $S/d = 0$ to ∞, $H'/H = 0$ to 1	$k = 1,15$ for conductor-plane to 1,5 or more
Conductor – lateral structure 	$k = 1,45 + 0,024 \left(\frac{H'}{H} \right) - 6 + 0,35 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Applicable in the range: $d = 2$ m to 10 m, $S/d = 0,1$ to 1, $H'/d = 2$ to 10	$k = 1,45$
Rod – rod structure (open switchgear) 	Horizontal rod-rod-structure $k_1 = 1,35 - 0,1 \frac{H'}{H} - \left(\frac{d_1}{H} - 0,5 \right)$ Rod-lower structure $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H} - A 1,093 \frac{H'}{H} \left(0,549 - e^{-3S/d_2} \right)$ where $A = 0$ if $S/d_2 < 0,2$ and $A = 1$ if $S/d_2 > 0,2$ Applicable in the range: (k_1) $d_1 = 2$ m to 10 m, $d_1/H = 0,1$ to 0,8, $d_1 < d_2$ (k_2) $d_2 = 2$ m to 10 m, $S/d_2 = 0$ to ∞, $d_2 < d_1$	$k_1 = 1,3$ $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H}$

Annexe E (informative)

Prise en compte des conditions atmosphériques

E.0 Introduction

La tenue de l'isolation d'un intervalle d'air donné croît avec la densité et l'humidité de l'air jusqu'au moment où il y a condensation à la surface des isolateurs. La tenue électrique d'intervalles particuliers, déterminée empiriquement, comme par exemple par l'équation (C.1), est valable habituellement pour les conditions atmosphériques normales (20 °C, 101,3 kPa, humidité 11 g/m³). Mais, pour que les distances minimales d'approche soient valables pour toutes les conditions atmosphériques qui se présenteront, le domaine d'influence de ces trois facteurs atmosphériques sur la tenue électrique de l'intervalle d'air doit être connu.

La méthode utilisée ici pour prendre en compte les conditions atmosphériques défavorables est celle définie dans la CEI 60060-1. Conformément à cette dernière, le facteur de correction atmosphérique, K , est donné par:

$$K = k_1 k_2$$

où

k_1 est le facteur de correction de la densité de l'air;

k_2 est le facteur de correction de l'humidité.

E.1 Densité de l'air

L'effet de la densité de l'air est pris en compte par la densité relative de l'air, δ , donnée par:

$$\delta = (p/p_0) [(273 + t_0) / (273 + t)]$$

où

t et p sont la température et la pression atmosphérique réelles;

t_0 et p_0 sont la température et la pression normales de 20 °C et 101,3 kPa.

D'où:

$$\delta = 2,89 p / (273 + t)$$

Le facteur de correction de densité de l'air, k_1 , dépend de la configuration de l'intervalle et du type de surtension, qui peuvent être pris en compte par un exposant, m , appliqué à la densité relative de l'air, c'est à dire:

$$k_1 = \delta^m$$

La combinaison de la température et de la pression donnant la plus basse densité de l'air et donc la tension de claquage la plus basse est celle d'une température élevée et d'une basse pression. Cependant, il est improbable que la température la plus élevée et la pression la plus basse attendues surviennent simultanément.

La CIGRÉ 72 propose deux méthodes, plus précises, de correction pour la densité de l'air: une méthode physique et l'expression empirique suivante qui est basée sur des études menées jusqu'à 3 000 m et qui fut établie, avec les tensions de chocs de manoeuvre positives, pour être en accord avec les données de diverses configurations d'intervalle d'air:

Annex E (informative)

Allowing for atmospheric conditions

E.0 Introduction

The insulation strength of a given air gap increases with air density and with the humidity of the air up to the point where condensation forms on insulator surfaces. The empirically determined electrical strength of particular gaps, as described by equation (C.1) for instance, is normally applicable at standard atmospheric conditions (20 °C, 101,3 kPa, 11 g/m³ humidity). But, for minimum approach distances to be appropriate for all anticipated atmospheric conditions, the range of influence of these three atmospheric factors on the electrical strength of the air gap shall be known.

The method used here, to allow for adverse atmospheric conditions, is as defined in IEC 60060-1. Accordingly, the atmospheric correction factor K is given by:

$$K = k_1 k_2$$

where

k_1 is the air density correction factor;

k_2 is the humidity correction factor.

E.1 Air density

The effect of air density is accounted for by the relative air density δ given by:

$$\delta = (p/p_0) [(273 + t_0)/(273 + t)]$$

where

t and p are the actual temperature and barometric pressure;

t_0 and p_0 are the standard temperature and pressure of 20 °C and 101,3 kPa.

Hence:

$$\delta = 2,89 p/(273 + t)$$

The air density correction factor k_1 depends on the gap configuration and type of overvoltage which can be accounted for by an exponent m applied on the relative air density, i.e.:

$$k_1 = \delta^m$$

The combination of temperature and air pressure giving the lowest air density and hence the lowest gap breakdown voltage is high temperature and low pressure. However, the highest expected temperature and lowest pressure are unlikely to occur simultaneously.

CIGRÉ 72 proposes two more accurate methods of correcting for air density: a physical method, and the following empirical expression which is based on investigations conducted up to 3 000 m and was derived for positive switching impulses to fit data for various air gap configurations:

$$\frac{U}{U_o} = \frac{0,8 [1 + T (1 - \delta)] (\delta - 0,2 g_o)}{(1 - 0,2 g_o)} + 0,2 \quad (\text{E.1})$$

où U_o est la tension de claquage dans les conditions normales, en kilovolts.

$$T = 1,4 \frac{1 - 0,8 g_o}{1 - 0,2 g_o} (k_g)^{1,6} \quad (\text{E.2})$$

$$g_o = \frac{U_o}{500 d \left[1 + \frac{k_g - 1}{3} \right]} \quad (\text{E.3})$$

où d est la distance d'intervalle d'air, en mètres.

E.2 Humidité

L'effet de l'humidité sur la tension de claquage est complexe. Il est couramment pris en compte par un facteur appelé k dans la CEI 60060-1, dont la valeur est reliée empiriquement à l'humidité, et par un exposant, w , qui dépend de la distance et de la configuration de l'intervalle ainsi que de la forme d'onde. Ainsi, le facteur de correction de l'humidité, k_2 , est:

$$k_2 = k^w$$

La valeur de w , aussi bien que celle de m pour la densité relative de l'air, peut être déterminée par la méthode donnée dans la CEI 60060-1.

E.3 Altitude

La tenue électrique d'un intervalle d'air est affaiblie à haute altitude, dû à la diminution de la pression, bien que la baisse de la température et de l'humidité en modifient les effets. La diminution de la pression avec l'altitude peut être calculée à partir de l'expression:

$$p/p_o = e^{-(H/8150)} \quad (\text{E.4})$$

où H est la hauteur au-dessus du niveau de la mer, en mètres.

La pression moyenne d'air à une certaine altitude peut alors être prise par hypothèse égale à la pression normale (101,3 kPa) corrigée pour l'altitude considérée, les variations de pression se produisant autour de cette valeur.

Cependant, puisque la température et l'humidité moyennes diminuent généralement avec l'altitude, il convient que le facteur de correction atmosphérique global, k_a , le prenne en compte. Les variations de température et d'humidité varieront fort probablement avec la localisation géographique, et une valeur précise du facteur moyen de correction de l'altitude en un lieu donné peut seulement être déterminée par l'analyse des données météorologiques locales. Le facteur de correction déterminé de cette façon dépend aussi de la longueur de l'intervalle et de sa configuration ainsi que du front d'onde de la surtension.

$$\frac{U}{U_o} = \frac{0,8 [1 + T (1 - \delta)] (\delta - 0,2 g_o)}{(1 - 0,2 g_o)} + 0,2 \quad (\text{E.1})$$

where U_o is the breakdown voltage in standard conditions, in kilovolts.

$$T = 1,4 \frac{1 - 0,8 g_o}{1 - 0,2 g_o} (k_g)^{1,6} \quad (\text{E.2})$$

$$g_o = \frac{U_o}{500 d \left[1 + \frac{k_g - 1}{3} \right]} \quad (\text{E.3})$$

where d is the air gap length, in metres.

E.2 Humidity

The effect of humidity on the breakdown voltage is complex. It is usually accounted for by a factor defined as k in IEC 60060-1, the value of which is empirically related to humidity, and an exponent w , which depends on the gap length and configuration, and on the waveshape. Thus, the humidity correction factor k_2 is:

$$k_2 = k^w$$

The value of w , as well as the exponent m for the relative air density, can be determined by the methods given in IEC 60060-1.

E.3 Altitude

The electrical strength of an air gap is weakened at higher altitude, due to the reduced air pressure, although the reduced temperature and humidity have a modifying effect. The reduction in pressure with altitude can be calculated from the expression:

$$p/p_o = e^{-(H/8150)} \quad (\text{E.4})$$

where H is the height above sea level, in metres.

The mean air pressure at a certain altitude can then be assumed to be the standard pressure (101,3 kPa) corrected for altitude, with variations in pressure occurring around this value.

However, because the average temperature and humidity generally decrease with altitude, the overall atmospheric correction factor k_a should take this into account. The temperature and humidity variations are likely to vary depending on geographical location, and a precise value of the mean correction factor for the altitude of a given location can only be determined by analysis of local weather data. The correction factor determined in this way also depends on the gap length and configuration, and overvoltage wavefront.

Pour éviter d'avoir à appliquer une correction d'altitude pour chaque installation dans un réseau, un facteur commun de correction est habituellement pris pour tous les équipements installés jusqu'à une altitude de référence au-dessous de laquelle la majorité du réseau est située. D'autres facteurs de correction peuvent alors être déterminés pour des domaines supplémentaires d'altitude au-dessus de l'altitude de référence. Une altitude de référence de 1 000 m est proposée ici puisque cette valeur est couramment retenue. Mais certains réseaux sont situés à des altitudes bien inférieures à 1 000 m, aussi le Tableau E.1 contient des valeurs pour des altitudes plus basses de façon qu'une valeur plus élevée et moins restrictive de k_a puisse alors être employée.

E.4 Facteur global de correction atmosphérique

Le facteur global de correction peut être décrit statistiquement par une valeur moyenne, k_a , et un écart-type normalisé relativement petit, au plus d'environ 1,5 %. L'écart-type normalisé, s_a , de k_a peut être combiné avec celui de la tension de claquage de l'intervalle d'air, s , par:

$$s_t = \sqrt{(s_a^2 + s^2)}$$

Puisque la valeur 1,5 % de s_a est petite comparée à la valeur proposée de 5 % pour s , s_a a seulement une petite influence sur la dispersion totale s_t . Il convient de noter, cependant, que pour des altitudes supérieures à 1 000 m, s_a peut avoir des valeurs supérieures à 1,5 %.

Les valeurs de k_a données dans le Tableau E.1 peuvent être retrouvées en employant les équations (E.1) à (E.4), basées sur les conditions normales de température et d'humidité (20 °C et 11 g/m³) et en employant l'équation (8) avec $k_g = 1,2$ pour déterminer le facteur g_0 . Il faut remarquer que les longueurs d'intervalle plus grandes donnent des valeurs de k_a plus grandes.

On a trouvé que lorsque k_a est calculé en utilisant les données climatiques réelles provenant de stations météorologiques situées à différentes altitudes (au lieu de prendre par hypothèse les valeurs normales d'humidité et de température 11 g/m³ et 20 °C), les valeurs de k_a sont plus grandes que la valeur calculée ci-dessus, de telle sorte que les valeurs calculées de k_a sont probablement conservatrices. Des valeurs de k_a plus précises et probablement plus élevées peuvent être déterminées par l'analyse de données météorologiques réelles.

**Tableau E.1 – Facteur atmosphérique k_a
pour différentes altitudes et valeurs de U_{90} de référence**

Altitude m	Gamme de U_{90} kV						
	<199	200-399	400-599	600-799	800-999	1 000-1 199	>1 200
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,990	0,992	0,993	0,995	0,996	0,998	0,999
300	0,970	0,975	0,980	0,984	0,988	0,992	0,995
500	0,950	0,958	0,966	0,973	0,980	0,985	0,991
1 000	0,901	0,916	0,931	0,944	0,955	0,966	0,976
1 500	0,853	0,875	0,894	0,912	0,928	0,943	0,956
2 000	0,807	0,833	0,857	0,879	0,899	0,917	0,933
2 500	0,763	0,792	0,820	0,845	0,868	0,888	0,908
3 000	0,720	0,752	0,782	0,810	0,835	0,858	0,880

To avoid having to apply an altitude correction for every installation in a power system, a common correction factor is usually taken for all installations at elevations up to an appropriate reference altitude, below which most of the power system is located. Other correction factors can then be determined for further ranges of altitude above this reference altitude. A reference altitude of 1 000 m is suggested here since it is commonly used. But some power systems are situated at altitudes well below the 1 000 m elevation; thus Table E.1 shows values for lower altitudes so that a higher and less restrictive value of k_a can then be used.

E.4 Total atmospheric correction factor

The total correction factor can be described statistically by a mean value k_a and a relatively small normalized standard deviation of up to about 1,5 %. The normalized standard deviation s_a of k_a can be combined with the deviation of the air gap breakdown voltage s by:

$$s_t = \sqrt{(s_a^2 + s^2)}$$

Since the s_a of 1,5 % is small compared with the suggested value of s of 5 %, it has only little effect on the total deviation s_t . It should be noted, however, that for altitudes above about 1 000 m, s_a may have values greater than 1,5 %.

The values of k_a given in Table E.1 can be derived using equations (E.1) to (E.4), based on standard temperature and humidity (20 °C and 11 g/m³) and using equation (8) with $k_g = 1,2$ to determine the factor g_0 . Note that larger gap lengths give larger values of k_a .

It has been found that when k_a is calculated using actual climate data from meteorological stations located at different altitudes (instead of assuming standard values of humidity and temperature of 11 g/m³ and 20 °C), the values of k_a are higher than the value calculated above, so that the calculated values of k_a are probably conservative. More precise, and probably higher, values of k_a can be determined by analysis of actual meteorological data.

Table E.1 – Atmospheric factor k_a for different reference altitudes and values of U_{90}

Altitude m	Range of U_{90} kV						
	<199	200-399	400-599	600-799	800-999	1 000-1 199	>1 200
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,990	0,992	0,993	0,995	0,996	0,998	0,999
300	0,970	0,975	0,980	0,984	0,988	0,992	0,995
500	0,950	0,958	0,966	0,973	0,980	0,985	0,991
1 000	0,901	0,916	0,931	0,944	0,955	0,966	0,976
1 500	0,853	0,875	0,894	0,912	0,928	0,943	0,956
2 000	0,807	0,833	0,857	0,879	0,899	0,917	0,933
2 500	0,763	0,792	0,820	0,845	0,868	0,888	0,908
3 000	0,720	0,752	0,782	0,810	0,835	0,858	0,880

E.5 Méthode de calcul des valeurs du Tableau E.1

Les étapes suivantes sont utilisées pour calculer chacune des valeurs données dans le Tableau E.1:

- U_{90} est la valeur la plus basse dans la gamme (par exemple 200 kV dans la gamme 200 kV à 399 kV);
- $U_o = U_{50} = U_{90} / 0,936$ est la tension de claquage dans les conditions normales;
- prendre $k_g = 1,2$;
- $d = 2,17 \left(e^{U_{90}/(1080 k_s k_g)} - 1 \right)$ (équation (8)) c'est-à-dire l'intervalle avec $k_g = 1,2$ qui tiendrait U_{90} aux conditions atmosphériques normales ($k_s = 0,936$);
- calculer g_o en utilisant l'équation (E.3);
- calculer T en utilisant l'équation (E.2);
- calculer δ ($= p/p_o$) pour l'altitude en utilisant l'équation (E.4) (cela suppose que δ varie seulement avec la pression moyenne et qu'il n'y a aucune variation de la température moyenne avec l'altitude);
- calculer k_a ($= U/U_o$) en utilisant l'équation (E.1).

E.5 Method of calculation of values in Table E.1

The following steps were used to calculate each of the values given in Table E.1:

- a) U_{90} is the lower value in the range (e.g. 200 kV in the 200 kV to 399 kV range);
- b) $U_o = U_{50} = U_{90} / 0,936$ is the breakdown voltage for standard conditions;
- c) let $k_g = 1,2$;
- d) $d = 2,17 \left(e^{U_{90} / (1080 k_s k_g)} - 1 \right)$ (equation 8), i.e. the gap with $k_g = 1,2$ that would withstand U_{90} at standard atmospheric conditions ($k_s = 0,936$);
- e) calculate g_o using equation (E.3);
- f) calculate T using equation (E.2);
- g) calculate $\delta (= p/p_o)$ for the altitude using equation (E.4) (this assumes that δ changes only with mean pressure and there is no change in mean temperature with altitude);
- h) calculate $k_a (= U/U_o)$ using equation (E.1).

Withdorm.com: Click to view the full PDF of IEC 61472:2004
 IEC NORM.COM

Annexe F (informative)

Effet des objets à potentiel flottant sur la tenue diélectrique

F.1 Effets des outils pour les travaux sous tension

Pendant le travail sous tension, la tenue de l'isolement du réseau peut être diminuée par l'introduction, dans l'intervalle d'air, d'outils avec des embouts métalliques ou différents matériels conducteurs nécessaires pour la réalisation du travail. Pendant le travail au potentiel, le travailleur vêtu d'un vêtement conducteur est à un moment donné transféré du support mis à la terre au conducteur sous tension et réciproquement. Qui plus est, quand le travailleur est sur le conducteur, l'intervalle d'air conducteur-terre est modifié, ce qui peut altérer le facteur d'intervalle et la tenue diélectrique selon la taille et la position des objets conducteurs introduits dans l'intervalle.

L'influence des outils ou du travailleur ne peut être calculée correctement, mais il convient de la déterminer par des essais de laboratoire sur des configurations représentatives.

La tenue électrique des outils pour travaux sous tension est aussi diminuée quand ils sont mouillés, bien que cela puisse être combattu, pour certains outils employés pour travailler à moyenne tension seulement, en utilisant des jupes. L'utilisation d'un revêtement de surface approprié est aussi une technique valable (par exemple l'emploi de revêtements au silicone). Dans tous les cas, la surface de tous les outils doit toujours être maintenue propre et en bon état.

F.2 Pièces conductrices de petites dimensions

La longueur de l'intervalle d'air est diminuée de la longueur (suivant l'axe de l'intervalle) des pièces conductrices qui y sont introduites ou y sont déjà présentes. Ces pièces peuvent être introduites ou être déjà présentes à l'extrémité sous tension ou à l'extrémité terre de l'isolation, ou peuvent être à un potentiel flottant dans l'intervalle. Mais quel que soit leur emplacement, la tenue de l'intervalle décroît quand le nombre et/ou la longueur des pièces croît. En conséquence, il est important que les éléments conducteurs soient aussi petits et aussi peu nombreux que possible.

Pour prendre en compte la présence de ces petites pièces conductrices, il est suffisant, sur le plan pratique, de soustraire la somme de leurs dimensions maximales, F , mesurées suivant l'axe de l'intervalle, de la longueur totale de l'intervalle d'air, L_f , et de déterminer la tension de claquage de l'intervalle d'air qui en résulte en utilisant l'équation:

$$U_{50} = 1\,080 \ln(0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.1})$$

où L_f et F sont exprimées en mètres.

F.3 Objets conducteurs de grandes dimensions

La présence d'un corps humain conducteur dans l'intervalle d'air ou d'objets conducteurs ayant une grande dimension, L , par rapport à la longueur de l'intervalle d'air, crée une distorsion du champ électrique dans l'intervalle.

Annex F (informative)

Influence of electrically floating objects on the dielectric strength

F.1 Effect of tools for live working

During live working, the strength of the system insulation can be reduced by the introduction, into the air gap, of tools with metallic fittings or various conducting equipment required for the work in progress. During bare hand work, the worker in conductive clothing is transferred, at a given time, from the earthed structure to the live conductor, and vice versa. Furthermore, when the worker is at the conductor, the conductor-earth air gap is changed, which may alter the gap factor and the dielectric strength depending on the size and position of the conductive objects introduced into the air gap.

The influence of tools or worker cannot be correctly calculated but should be determined by laboratory tests on representative configurations.

The electrical strength of tools for live working is also reduced by wetting, although this can be combated, for some tools used for work up to medium voltage only, by the use of weather sheds. Proper coating of the surface is also a valid technique (e.g. the use of silicone coatings). In any case, the surface of all tools shall always be kept clean and in good condition.

F.2 Small conductive pieces

The length of the air gap is reduced by the length (along the gap axis) of conductive pieces introduced into, or already present in, the gap. These pieces can be introduced or present at the live end or the dead end of the insulation, or they can be at a floating potential within the gap. But, whatever the location, the strength of the gap decreases as the number and/or length of the pieces increase. Consequently, it is important that any conductive components be as small and few as possible.

To take into account the presence of these small conductive pieces, it is sufficient, from a practical point of view, to subtract the sum of their maximum dimensions F measured along the gap axis, from the overall length of the air gap L_f and to determine the resulting breakdown voltage of the air gap using the equation:

$$U_{50} = 1\,080 \ln (0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.1})$$

where L_f and F are expressed in metres.

F.3 Large conductive objects

The presence of a conductive body in the air gap, or of conductive objects of large dimension L compared to the length of the air gap, creates a distortion of the electric field in the gap.

Dans ce cas, et en fonction de la taille et de la forme de l'objet flottant, ainsi que de sa position dans l'intervalle, la distorsion du champ peut conduire soit à diminuer soit à accroître la tenue de l'intervalle. Les conditions les plus défavorables conduisant à diminuer la tenue sont observées quand:

- l'objet présente des saillies faisant face à la structure à la terre;
- l'objet se trouve sur l'axe de l'intervalle ou près de celui-ci;
- la distance entre l'objet et le conducteur sous tension est comprise entre un quart et un tiers de la longueur totale de l'intervalle.

Comme pour les pièces conductrices de petites dimensions, il est plus facile de comparer cette tenue à celle d'un intervalle d'air ayant une longueur totale d'air égale à $L_f - L$, ou $L_f - F$, F étant la somme des dimensions L de toutes les électrodes flottantes présentes dans l'intervalle.

La tenue minimale de l'intervalle en présence d'un objet flottant peut être déterminée avec l'équation (F.2), où k_f est une constante applicable aux électrodes flottantes.

$$U_{50} = 1\,080\, k_f \ln (0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.2})$$

Un aperçu de l'information disponible à ce moment est reporté dans ce qui suit, et une proposition est faite pour la généralisation basée sur une simple analyse des données et modèles expérimentaux.

F.3.1 Analyse de données expérimentales

La plupart des études ont montré que les impulsions de manoeuvre de polarité positive sont plus critiques que celles de polarité négative, bien que pour des intervalles d'air avec objets conducteurs, le pourcentage de diminution de la tenue diélectrique observé avec des impulsions de polarité négative est plus grand que celui observé avec des impulsions de polarité positive.

Les objets conducteurs à potentiel flottant ont deux principales influences:

- ils réduisent la distance nette de l'intervalle d'air. Cette réduction de distance peut être très importante dans le cas d'objets de grandes dimensions. Cet effet est pris en compte en considérant la tenue diélectrique de l'intervalle d'air net résultant (ou la distance réduite $L_f - F$). La distance réduite $L_f - F$ est obtenue en soustrayant la longueur des objets conducteurs de la distance de l'intervalle d'air d'origine sans l'objet ;
- ils peuvent affecter la tenue diélectrique de l'intervalle d'air net résultant, caractérisé par un facteur d'intervalle de référence k_g , dû à la modification de la distribution du champ à l'intérieur de l'intervalle. Cet effet est pris en compte en introduisant le facteur de correction k_f .

L'influence des électrodes flottantes est un peu compliquée dès lors qu'elle dépend de plusieurs paramètres, comme illustré dans ce qui suit.

F.3.1.1 L'influence des objets à potentiel électrique flottant sur la tenue diélectrique de l'intervalle dépend de la position de l'objet dans l'intervalle

Tous les essais réalisés montrent que la tension de tenue d'un intervalle contenant un objet à potentiel flottant est réduite.

Lorsque les configurations phase-terre sont prises en compte, la tenue minimale est atteinte lorsque l'objet à potentiel flottant est voisin de l'électrode sous tension.

Lorsque les configurations entre phases sont prises en compte, la tenue minimale est atteinte lorsque l'objet à potentiel flottant est voisin de l'électrode positive.

In this case, and depending on the size and shape of the floating object and its position in the gap, the field distortion can lead to either a decrease or an increase in the strength of the gap. The most severe conditions leading to decrease in strength are obtained when:

- the object has protrusions on the side facing the earthed structure;
- the object is on or near the gap axis;
- the distance between the object and the live conductor lies between a quarter and a third of the total air gap length.

As for small conductive pieces, it is easier to compare this strength to one of an air gap having the total length of air equal to $L_f - L$, or $L_f - F$, F being the sum of the dimensions L of all the floating electrodes present in the gap.

The minimum strength of the gap in the presence of a floating object can then be predicted by equation (F.2), where k_f is a constant applicable to floating electrodes.

$$U_{50} = 1\,080\, k_f \ln (0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.2})$$

A survey of the information available at the time is reported in the following, and a proposal is made for generalisation based on simple analysis of the experimental data and models.

F.3.1 Analysis of experimental data

Most studies have shown that switching impulses of positive polarity are more critical than those of negative polarity, although the observed percentage decrease in dielectric strength of gaps with conductive objects is greater when they are stressed with negative polarity impulses than with positive polarity impulses.

Electrically floating conductive objects have two main influences:

- they reduce the net air gap distance. This reduction in distance can be very significant in the case of physically large objects. This effect is taken into account by considering the dielectric strength of the resulting net air gap (or reduced distance $L_f - F$). The reduced distance $L_f - F$ is obtained by subtracting the length of the conductive objects from the original air gap distance without the object;
- they may affect the dielectric strength of the resulting net air gap, characterised by a reference gap factor k_g , due to the modification of the field distribution within the gap. This effect is taken into account by introducing the correction coefficient k_f .

The influence of floating electrodes is quite complicated since it depends on a number of parameters, as shown in the following.

F.3.1.1 The influence of electrically floating objects on the dielectric strength of the gap depends on the position of the object within the gap

All the tests performed show that the withstand voltage of a clearance containing a floating object is reduced.

When phase to earth configurations are considered, the minimum strength is reached when the floating object is in the vicinity of the live electrode.

When phase to phase configurations are considered, the minimum strength is reached when the floating object is in the vicinity of the positive electrode.

F.3.1.2 L'influence des électrodes flottantes dépend de la longueur des objets flottants

Le graphique de la Figure F.1, qui donne la valeur de k_f basée sur la configuration tige-tige phase-terre préalablement considérée comme une fonction du rapport $\beta = F/(D + F)$, (ou $\beta = F/L_f$), indique qu'en présence d'un objet conducteur en position critique dans l'intervalle d'air, l'altération du champ électrique produit une réduction de la tenue diélectrique qui est affectée par β . Pour chaque valeur de D essayée, l'effet de réduction de la tenue diélectrique est pratiquement nul pour $\beta < 0,1$ et augmente ensuite progressivement lorsque β augmente, avec une tendance proche de la saturation pour les fortes valeurs de β .

La Figure F.2 illustre le comportement d'une configuration conducteur-conducteur, entre phases.

NOTE La longueur de l'objet flottant F est toujours ajoutée lors du calcul de la distance électrique D_U (voir l'équation (8) de 4.3).

F.3.1.3 L'influence des électrodes à potentiel flottant dépend de la distance D

Des exemples de l'influence de D sont donnés dans les Figures F.1 et F.2. Pour une valeur de β fixée, l'influence des objets à potentiel flottant montre à la fois entre phase et terre et entre phases une forme en U (voir les Figures F.3 et F.4). Le minimum de k_f (influence maximale des objets flottants) est atteint pour une distance D égale à 2 m et à 3 m respectivement pour les configurations phase-terre et entre phases.

F.3.1.4 L'influence des objets à potentiel flottant peut dépendre de la forme et du nombre d'électrodes dans l'intervalle

L'examen de données expérimentales mène aux considérations suivantes:

- la présence de multiple objets conducteurs dans l'intervalle d'air, au lieu d'un seul, le plus grand, dans la position critique, paraît, en comparaison avec les conditions précédentes, entraîner une plus petite réduction de la tenue diélectrique de l'intervalle d'air;
- les objets conducteurs en forme de double T, étant de grandes dimensions transversales comparées aux barres (10 fois plus grandes), pour une même longueur mesurée le long de l'axe de l'intervalle d'air, semblent produire des réductions de tenue diélectrique comparables à celles causées par la barre elle-même. Autrement, lorsque la distance dans l'air est divisée par un objet conducteur parfaitement sphérique, l'altération dans le champ électrique apparaît virtuellement nulle.

F.3.1.5 L'influence des électrodes à potentiel flottant dépend du déplacement par rapport à l'axe de l'intervalle

La réduction de la tenue diélectrique causée par l'objet conducteur semblerait être annulée lorsque cet objet, déplacé parallèlement à lui-même, est éloigné d'une distance r par rapport à l'axe de l'intervalle d'air de telle façon que $r > 2,5 F$.

F.3.1.6 L'influence des objets à potentiel flottant dépend du facteur d'intervalle k_g

L'influence augmente avec l'augmentation du facteur d'intervalle et est plus grande pour les configurations phase-terre que pour les configurations entre phases.

F.3.2 Evaluation de l'influence des électrodes à potentiel flottant sur la tenue diélectrique aux impulsions de manoeuvre

L'application de l'équation (F.2) requiert l'évaluation de k_f . L'approche la plus directe est de tirer une généralisation par interpolation et par extrapolation des données expérimentales disponibles.