

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61865

Première édition
First edition
2001-07

**Lignes aériennes –
Calcul de la composante électrique
de la distance entre les parties sous
tension et les obstacles –
Méthode de calcul**

**Overhead lines –
Calculation of the electrical component
of distance between live parts and obstacles –
Method of calculation**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61865:2001

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/catlg-f.htm) 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/JP.htm) 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/catlg-e.htm) 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/JP.htm) 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

61865

Première édition
First edition
2001-07

**Lignes aériennes –
Calcul de la composante électrique
de la distance entre les parties sous
tension et les obstacles –
Méthode de calcul**

**Overhead lines –
Calculation of the electrical component
of distance between live parts and obstacles –
Method of calculation**

© IEC 2001 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
Telefax: +41 22 919 0300

e-mail: inmail@iec.ch

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

S

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
1 Domaine d'application.....	10
2 Références normatives	12
3 Termes, définitions et symboles.....	12
3.1 Définitions	12
3.2 Symboles.....	16
4 Démarche utilisée pour déterminer la distance électrique.....	18
5 Surtensions.....	20
5.1 Classification des surtensions.....	20
5.2 Surtensions temporaires	20
5.3 Surtensions à front lent.....	22
5.4 Surtensions à front rapide.....	22
6 Tension de tenue spécifiée de l'intervalle d'air	24
6.1 Généralités	26
6.2 Calcul de la tension de tenue spécifiée	30
7 Calcul de la distance associée aux surtensions.....	32
Annexe A (informative) Relation entre U_{50} et la longueur d d'un intervalle.....	34
Annexe B (informative) Exemple de calcul de la composante électrique	38
Bibliographie	44
Tableau 1 – Ondes à front lent: probabilité de décharge.....	26
Tableau 2 – Ondes à front rapide: probabilité de décharge.....	28
Tableau B.1 – Récapitulatif des résultats.....	42

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61865:2001

CONTENTS

FOREWORD	5
INTRODUCTION	9
1 Scope	11
2 Normative references	13
3 Terms, definitions and symbols	13
3.1 Definitions	13
3.2 Symbols	17
4 Approach used to derive the electrical distance	19
5 Overvoltages	21
5.1 Classification of overvoltages	21
5.2 Temporary overvoltages	21
5.3 Slow-front overvoltages	23
5.4 Fast-front overvoltages	23
6 Required withstand voltage of the air gap	25
6.1 General	27
6.2 Calculation of the required withstand voltage	31
7 Calculation of the distance associated with the overvoltages	33
Annex A (informative) Relationship between U_{50} and the gap length, d	35
Annex B (informative) Example of the calculation of the electrical component	39
Bibliography	45
Table 1 – Slow-front waves: probability of discharge	27
Table 2 – Fast-front waves: probability of discharge	29
Table B.1 – Summary of the results	43

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

LIGNES AÉRIENNES – CALCUL DE LA COMPOSANTE ÉLECTRIQUE DE LA DISTANCE ENTRE LES PARTIES SOUS TENSION ET LES OBSTACLES – MÉTHODE DE CALCUL

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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 61865 a été établie par le comité d'études 11 de la CEI: Lignes aériennes.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
11/161/FDIS	11/162/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 3.

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**OVERHEAD LINES –
CALCULATION OF THE ELECTRICAL COMPONENT OF
DISTANCE BETWEEN LIVE PARTS AND OBSTACLES –
METHOD OF CALCULATION**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61865 has been prepared by IEC technical committee 11: Overhead lines.

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

FDIS	Report on voting
11/161/FDIS	11/162/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 3.

Annexes A and B are for information only.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2005-11. A cette date, la publication sera

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61865:2001

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2005-11. At this date, the publication will be

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61865:2001

INTRODUCTION

Les distances minimales à respecter entre les conducteurs de lignes aériennes et les objets proches sont généralement spécifiées dans les normes nationales ou les règlements. Ces distances minimales se décomposent généralement comme suit:

- une distance électrique, qui est une distance d'isolation dans l'air permettant d'éviter un amorçage électrique entre les conducteurs et les autres objets, même en présence de surtensions sur les conducteurs de la ligne aérienne;
- une distance additionnelle pour prendre en compte dans une large mesure certaines situations (telles que les activités humaines, la taille des objets pouvant normalement se trouver sous la ligne, le déplacement des conducteurs dû à la température, à la charge ou aux conditions environnementales), plus une marge de sécurité pour tenir compte des incertitudes.

Il est important que ces deux distances soient spécifiées de façon correcte.

La méthode proposée dans cette Norme internationale pour calculer la distance électrique est surtout destinée à être utilisée lors de la mise à jour ou de la révision de distances électriques existantes (par exemple quand on ajoute de nouveaux niveaux de tension). La méthode utilise les surtensions qui apparaissent sur les lignes en présence de conditions atmosphériques prépondérantes (y compris les effets de l'altitude, etc.) pour déterminer la composante électrique de la distance. La méthode est particulièrement adaptée au cas des ondes à front lent, mais est également applicable au cas des ondes à front rapide et des surtensions temporaires.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61865:2001

INTRODUCTION

The minimum distances to be maintained between overhead line conductors and objects close to them are usually specified in national standards or regulations. Such minimum distances normally comprise

- an electrical distance, i.e. an air insulation distance which prevents an electrical discharge between the conductors and other objects, even when there are overvoltages present on the overhead line conductors;
- an additional distance to account for an extreme range of certain conditions (such as human activities, sizes of objects that may normally come under a line, movement of conductors due to temperature, load or environmental conditions) plus a safety margin to allow for uncertainties.

It is important that the two distances are specified correctly.

The method presented in this International Standard for calculating the electrical distance is mainly for use when reviewing or revising existing electrical distances (for example, to add new voltage levels). The method uses the overvoltages which occur on the lines together with the prevailing atmospheric conditions (including the effects of altitude, etc.) to derive the electrical component of the distance. The method is especially suited to the case of slow-fronted waves but is extended to cover the case of fast-front waves and temporary overvoltages.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61865:2001

LIGNES AÉRIENNES – CALCUL DE LA COMPOSANTE ÉLECTRIQUE DE LA DISTANCE ENTRE LES PARTIES SOUS TENSION ET LES OBSTACLES – MÉTHODE DE CALCUL

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale est essentiellement un guide pour calculer les distances électriques nécessaires entre les éléments sous tension et les éléments à la terre afin d'éviter tout amorçage d'intervalle d'air pouvant constituer un danger pour le public se trouvant dans une situation normale à proximité d'éléments sous tension. Elle ne s'applique qu'aux lignes aériennes conçues pour fonctionner à une tension entre phases supérieure à 45 kV en courant alternatif. Elle traite de la composante électrique des distances entre les conducteurs et les objets ou véhicules évoluant sur le sol, les embarcations sur l'eau, les personnes situées sur le point haut d'une structure ou sur le sol, les animaux sur le sol (mais pas en vol), etc.

Cette norme ne traite pas de l'aspect sécurité pour le public ou les travailleurs dans les cas suivants:

- les objets fixes, les structures en dessous ou à côté des lignes, arbres, contour du sol, etc. Ces cas nécessitent en général de prendre en compte le fait que l'on puisse grimper sur la structure, la taille que peut atteindre l'arbre etc;
- la distance minimale d'approche pour les travaux sous tension, qui est traitée dans la norme CEI 61472;
- couplage capacitif ou induction magnétique d'une ligne aérienne, par exemple les tensions induites dans les véhicules situés sous une ligne, ou dans un pipeline souterrain suivant le même tracé;
- répartition dans le sol des courants provenant des lignes et provoquant des tensions de pas ou de toucher autour des structures lors de défauts sur la ligne ou de coups de foudre;
- amorçage des isolateurs ou des éclateurs ou amorçage entre phases provoquant du bruit acoustique et électrique et des arcs importants;
- claquage de l'air entre les conducteurs et le sol lors d'incendies importants au-dessous des conducteurs de la ligne;
- spécification de distances minimales pour éviter un amorçage avec des conducteurs voisins de lignes électriques ou de communication.

Cette norme ne spécifie pas les distances électriques pour la conception des structures de lignes aériennes. De même elle ne spécifie pas les distances pour les structures qui sont par nécessité accessibles aux travailleurs alors que la ligne est sous tension (par exemple les distances pour travaux sur la ligne, travaux de peinture). Les distances entre les conducteurs et les structures sont généralement définies pour satisfaire la fiabilité de service requise pour la ligne. Il est possible que cette distance ne permette pas toujours de réaliser des travaux sous tension ou dans certains cas, l'accès aux travailleurs sur certaines parties de la structure proche des conducteurs sous tension.

OVERHEAD LINES – CALCULATION OF THE ELECTRICAL COMPONENT OF DISTANCE BETWEEN LIVE PARTS AND OBSTACLES – METHOD OF CALCULATION

1 Scope

This International Standard provides guidance for the calculation of electrical distances between live and earthed parts required to prevent air-gap breakdown which may endanger members of the public who legitimately come close to live parts. It is applicable only to overhead lines designed to operate at more than 45 kV phase-to-phase a.c. It deals with the electrical component of distances between conductors and movable objects – vehicles on the ground, vessels on water, persons on top of objects or on the ground, wildlife on the ground (but not airborne), etc.

This standard does not deal with the following public and worker safety aspects:

- stationary objects – structures beneath or next to lines, trees, ground contours, etc. These, in general, require consideration as to whether the structure can be climbed on, the extent to which the tree will grow, etc;
- minimum approach distance for live working, which is dealt with in IEC 61472;
- capacitive coupling or magnetic induction by overhead lines, such as voltages induced in vehicles under a line, or in pipelines buried alongside it;
- currents flowing in the ground that originate from lines and result in step and touch voltages around structures during line faults or lightning strikes;
- flashover of line insulators or spark gaps, or a phase-to-phase discharge, resulting in audible and electrical noise and intense arcs;
- dielectric breakdown of the air between the conductors and the ground due to large fires beneath conductors;
- minimum electrical distances required to prevent discharge to adjacent overhead power or communication circuits.

This standard does not give the electrical distance requirements for the design of overhead line structures. Neither does it give the distance requirements for overhead line structures which need to be accessible to workers while the line is energized (for example, distances to line workers or painters). Distances between conductors and the structure of the tower are normally chosen to meet the required operating reliability of the line. It is possible that this distance may not always be adequate to allow live working or, in some cases, access for workers to parts of the structure near to live conductors.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(601):1985, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 601: Production, transport et distribution de l'énergie électrique – Généralités*

CEI 60050(604):1987, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 604: Production, transport et distribution de l'énergie électrique – Exploitation*

CEI 60060-1:1989, *Techniques des essais à haute tension – Première partie: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais*

CEI 60071-1:1993, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

CEI 60071-2:1996, *Coordination de l'isolement – Partie 2: Guide d'application*

CEI 61472:1998, *Travaux sous tension – Distances minimales d'approche – Méthode de calcul*

3 Termes, définitions et symboles

Pour les besoins de la présente norme internationale, des définitions de la CEI 60050(601) et de la CEI 60050(604) s'appliquent, ainsi que les définitions suivantes.

3.1 Définitions

3.1.1

tension nominale d'un réseau

valeur arrondie appropriée de la tension utilisée pour dénommer ou identifier un réseau [VEI 601-01-21]

NOTE Voir également VEI 601-01-29: tension entre phases.

3.1.2

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 [VEI 601-01-23]

NOTE 1 Voir également VEI 601-01-29: tension entre phases.

NOTE 2 Ces valeurs ne tiennent pas compte des variations transitoires, par exemple dues aux manoeuvres sur le réseau ou à un fonctionnement anormal ni des variations temporaires accidentelles de la tension.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(601):1985, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 601: Generation, transmission and distribution of electricity – General*

IEC 60050(604):1987, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 604: Generation, transmission and distribution of electricity – Operation*

IEC 60060-1:1989, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60071-1:1993, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60071-2:1996, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

IEC 61472:1998, *Live working – Minimum approach distances – Method of calculation*

3 Terms, definitions and symbols

For the purposes of this International Standard, certain definitions from IEC 60050(601) and IEC 60050(604) as well as the following definitions apply.

3.1 Definitions

3.1.1

nominal voltage of a system

suitable approximate value of voltage used to designate or identify a system
[IEV 601-01-21]

NOTE See also IEC 601-01-29: phase-to-phase voltage.

3.1.2

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
[IEV 601-01-23]

NOTE 1 See also IEC 601-01-29: phase-to-phase voltage.

NOTE 2 Transient overvoltages due, for example, to switching operations and abnormal operation, as well as abnormal temporary variations of voltage, are not taken into account.

3.1.3

surtension temporaire

surtension oscillatoire à fréquence industrielle, apparaissant en un point donné d'un réseau, de durée relativement longue et qui est non amortie ou faiblement amortie
[VEI 604-03-12, modifié]

NOTE Les surtensions temporaires sont habituellement occasionnées par des manoeuvres ou par l'apparition de défauts (par exemple: séparation brusque de charges importantes, défauts monophasés) et/ou par des non-linéarités (effets de ferorésonance, harmoniques).

3.1.4

tension de cinquante pour cent de décharge disruptive

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]

3.1.5

tension de tenue à fréquence industrielle

valeur efficace de la tension sinusoïdale à fréquence industrielle que l'isolation du matériel considéré peut supporter lors d'essais faits dans des conditions spécifiées et pendant une durée spécifiée
[VEI 604-03-40]

3.1.6

surtension de foudre

surtension transitoire dont la forme peut être assimilée, en ce qui concerne la coordination des isollements, à celle de la tension de choc de foudre normalisée
[VEI 604-03-30]

3.1.7

front d'une tension de choc

partie de la tension de choc précédant le passage par la crête
[VEI 604-03-16]

3.1.8

distance électrique D_{el}

distance de référence qui assure que le claquage électrique est effectivement évité entre toute partie sous tension de l'installation et une personne du public, ou tout outil conducteur ou objet avec lesquels il est raisonnable de s'attendre à ce que le public entre en contact

3.1.9

temps de présence à la distance électrique T_{occ}

nombre d'heures pendant lesquelles une personne ou tout élément conducteur avec lequel elle est en contact se trouve à la limite de la distance électrique

NOTE Pour le cas de référence, T_{occ} est pris égal à 1 h par an.

3.1.10

probabilité annuelle d'amorçage de l'intervalle d'air R_a

probabilité qu'un amorçage se produise

NOTE Pour le temps de présence de référence de 1 h par an à la distance électrique (D_{el}), la valeur R_a est de 10^{-7} .

3.1.11

tension de tenue statistique U_{90}

valeur de la surtension, avec la forme de surtension représentative, pour laquelle la probabilité de tenue de l'isolation est de 90 %

3.1.3**temporary overvoltage**

oscillatory overvoltage (at power frequency) at a given location, of relatively long duration and which is undamped or weakly damped
[IEV 604-03-12, modified]

NOTE Temporary overvoltages usually originate from switching operations or faults (for example, sudden load rejection, single phase-to-earth faults and/or from non-linearities (ferro-resonance effects, harmonics)).

3.1.4**fifty per cent disruptive discharge voltage**

peak value of an impulse test voltage having a 50 % probability of initiating a disruptive discharge each time the dielectric testing is performed
[IEV 604-03-43]

3.1.5**power-frequency withstand voltage**

r.m.s. value of sinusoidal power frequency voltage that the equipment can withstand during tests made under specified conditions and for a specified time
[IEV 604-03-40]

3.1.6**lightning overvoltage**

transient overvoltage, the shape of which can be regarded for insulation coordination purposes as similar to that of the standard lightning impulse
[IEV 604-03-30]

3.1.7**front of a voltage impulse**

that part of an impulse which occurs prior to the peak
[IEV 604-03-16]

3.1.8**electrical distance D_{el}**

reference distance which ensures that the electrical breakdown between any live part of the electrical installation to the body of a member of the public, or any conductive tool or object which they could reasonably be expected to be in contact with, is effectively avoided

3.1.9**occupancy at electrical distance T_{occ}**

number of hours, at which the individual or any conductive part to which he/she is in contact, is taken to be at the limit of the electrical distance

NOTE As a reference, T_{occ} is taken to be 1 h per year.

3.1.10**annual probability of breakdown of air gap R_a**

probability of sparkover

NOTE For a reference occupancy of 1 h per year at the electrical distance, D_{el} , the value R_a is taken to be 10^{-7} .

3.1.11**statistical withstand voltage U_{90}**

overvoltage, with the shape of the representative overvoltage, at which the insulation exhibits a 90 % probability of withstand

3.1.12

surtension statistique à deux pour-cent U_2

valeur de surtension ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée, déduite de la distribution statistique des surtensions générées par le système de puissance

3.1.13

surtension à deux pour-cent par unité u_{e2}

valeur de surtension statistique phase-terre (exprimée en par unité ou p.u.) ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée

3.1.14

facteur statistique K_S

facteur à appliquer à la surtension statistique à 2 % pour obtenir la tension de tenue statistique 90 %

NOTE C'est le facteur de coordination statistique K_{CS} donné en 3.3.2.2 de la CEI 60071-2, et le facteur statistique (K_S) donné en 5.3 de la CEI 61472.

3.1.15

probabilité de décharge statistique R_S

probabilité qu'un intervalle amorce lorsqu'on lui applique une surtension suivant une distribution statistique donnée

3.1.16

facteur de correction atmosphérique k_a

facteur à appliquer à la tension de tenue pour prendre en compte la différence entre les conditions atmosphériques moyennes en exploitation et les conditions atmosphériques normalisées

NOTE Il s'applique à une zone donnée et peut ne pas être constant sur tout le territoire géographique d'un réseau électrique.

3.1.17

facteur de correction d'atténuation k_m

facteur prenant en compte le fait qu'en pratique le niveau de probabilité réel est réduit (voir 6.1.3)

3.1.18

facteur d'intervalle k_g

rapport entre la tenue diélectrique aux ondes à front lent pour des électrodes d'une géométrie donnée et celle d'une configuration pointe-plan dans laquelle la pointe est soumise à la polarité positive (voir Guide CIGRE n° 72)

3.2 Symboles

Δt	(s)	durée moyenne des surtensions temporaires
k_g	(–)	facteur d'intervalle
k_m	(–)	facteur de correction d'atténuation
k_{mSF}	(–)	facteur de correction d'atténuation pour les ondes à front lent
k_{mFF}	(–)	facteur de correction d'atténuation pour les ondes à front rapide
K_S	(–)	facteur statistique ou rapport entre U_{90} et U_2
k_a	(–)	facteur de correction atmosphérique
n_t	(an ⁻¹)	nombre annuel de surtensions temporaires
n_{SF}	(an ⁻¹)	nombre annuel de surtensions à front lent dues aux manoeuvres
n_{SFR}	(an ⁻¹)	nombre annuel de surtensions à front lent dues aux réenclenchements
n_{FF}	(an ⁻¹)	nombre annuel de surtensions à front rapide

3.1.12**two per cent statistical overvoltage U_2**

overvoltage having a 2 % probability of being exceeded, derived from the statistical distribution of overvoltages generated by the power system

3.1.13**per unit two per cent overvoltage u_{e2}**

statistical overvoltage phase-to-earth (expressed in per unit or p.u.) having a 2 % probability of being exceeded

3.1.14**statistical factor K_s**

factor to be applied to the value of the 2 % statistical overvoltage to obtain the 90 % statistical withstand voltage

NOTE This is the statistical coordination factor, K_{CS} , of 3.3.2.2 of IEC 60071-2 and the statistical factor, K_s , of 5.3 of IEC 61472.

3.1.15**statistical probability of discharge R_s**

probability that a gap will spark over when an overvoltage with a certain statistical distribution is applied to it

3.1.16**atmospheric correction factor k_a**

factor to be applied to the withstand voltage to account for the difference between the average atmospheric conditions in service and standard atmospheric conditions

NOTE This applies to a specific area and may not be constant for the entire geographical territory of a power system.

3.1.17**mitigating correction factor k_m**

factor that accounts for the fact that, in practice, the actual level of probability is reduced (see 6.1.3)

3.1.18**gap factor k_g**

ratio of the dielectric strength for slow-fronted waves of a given electrode geometry to that of a rod-plane configuration in which the point has positive polarity (see CIGRE Guide No. 72)

3.2 Symbols

Δt	(s)	the mean time duration of temporary overvoltages
k_g	(–)	gap factor
k_m	(–)	mitigating correction factor
k_{mSF}	(–)	mitigating correction factor for slow-front surges
k_{mFF}	(–)	mitigating correction factor for fast-front surges
K_s	(–)	statistical factor or the ratio of U_{90} to U_2
k_a	(–)	atmospheric correction factor
n_t	(year ⁻¹)	number of temporary overvoltages per year
n_{SF}	(year ⁻¹)	number of slow-front overvoltages due to switching operations per year
n_{SFR}	(year ⁻¹)	number of slow-front overvoltages due to reclosing operations per year
n_{FF}	(year ⁻¹)	number of fast-front overvoltages per year

N	(–)	nombre d'heures dans l'année – pris égal à 8 760 h
R_S	(–)	probabilité de décharge statistique
R_a	(an^{-1})	probabilité annuelle d'amorçage de l'intervalle d'air
R_{aSF}	(an^{-1})	probabilité annuelle d'amorçage de l'intervalle d'air due à une onde à front lent
R_{aFF}	(an^{-1})	probabilité annuelle d'amorçage de l'intervalle d'air due à une onde à front rapide
R_{aT}	(an^{-1})	probabilité annuelle d'amorçage de l'intervalle d'air due à une surtension transitoire
s_2	(–)	coefficient de variation de la distribution des surtensions à U_2
s_{2SF}	(–)	coefficient de variation de la distribution des surtensions à front lent à U_{2SF}
s	(–)	coefficient de variation de la distribution des tensions d'amorçage sous forme de fraction de U_{50}
s_{SF}	(–)	coefficient de variation de la distribution des tensions d'amorçage pour les ondes à front lent (typiquement 0,05)
s_{FF}	(–)	coefficient de variation de la distribution des tensions d'amorçage pour les ondes à front rapide (typiquement 0,03)
T_{occ}	(h)	temps de présence à la distance électrique
U_S	(kV eff.)	valeur efficace de la tension la plus élevée du réseau (entre phases)
U_{50}	(kV)	tension 50 % de décharge disruptive
U_{90}	(kV)	tension de tenue statistique
U_2	(kV)	surtension ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée
U_{2SF}	(kV)	surtension à front lent ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée
U_{2FF}	(kV)	surtension à front rapide ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée
u_{2SF}	(–)	surtension à front lent ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée p.u.
u_{2FF}	(–)	surtension à front rapide ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée p.u.
U_T	(kV)	valeur de crête des surtensions temporaires

4 Démarche utilisée pour déterminer la distance électrique

La démarche et les hypothèses suivantes, considérées comme étant représentatives des réseaux de puissance, ont été effectuées dans cette norme, mais elles peuvent être revues si l'on dispose de meilleures informations.

- En général au cours d'une année, une personne ne s'approche pas de la limite de la distance électrique pendant de longues périodes. Pour les calculs, on suppose qu'une personne se trouve située à la distance électrique pendant 1 h par an, mais la méthode permet d'utiliser toute autre durée.
- Les tensions et surtensions qui proviennent du réseau doivent être tenues par la distance électrique pour annuler effectivement la possibilité d'amorçage électrique pendant la durée de présence à cette distance.
- Du fait que les paramètres concernés sont des variables statistiques, il est nécessaire de calculer une probabilité d'amorçage de l'intervalle d'air qui a été fixée à $R_a = 10^{-7}$ par an pour les calculs. Mais des valeurs supérieures ou inférieures peuvent être utilisées.

N	(–)	number of hours in a year – taken to be 8 760 h
R_S	(–)	statistical probability of discharge
R_a	(year ⁻¹)	annual probability of breakdown of air gap
R_{aSF}	(year ⁻¹)	annual probability of breakdown of air gap due to a slow-front surge
R_{aFF}	(year ⁻¹)	annual probability of breakdown of air gap due to a fast-front surge
R_{aT}	(year ⁻¹)	annual probability of breakdown of air gap due to a transient overvoltage
s_2	(–)	coefficient of variation of the distribution of overvoltages at U_2
s_{2SF}	(–)	coefficient of variation of the distribution of slow-front overvoltages at U_{2SF}
s	(–)	coefficient of variation of the distribution of sparkover voltages as a fraction of U_{50}
s_{SF}	(–)	coefficient of variation of the distribution of sparkover voltages for slow-front waves (typically 0,05)
s_{FF}	(–)	coefficient of variation of the distribution of sparkover voltages for fast-front waves (typically 0,03)
T_{occ}	(h)	occupancy at electrical distance
U_S	(kV r.m.s.)	highest r.m.s. voltage of the system (phase-to-phase)
U_{50}	(kV)	fifty per cent disruptive discharge voltage
U_{90}	(kV)	statistical withstand voltage
U_2	(kV)	overvoltage having a 2 % probability of being exceeded
U_{2SF}	(kV)	slow-front overvoltage having a 2 % probability of being exceeded
U_{2FF}	(kV)	fast-front overvoltage having a 2 % probability of being exceeded
u_{2SF}	(–)	slow-front overvoltage having a 2 % probability of being exceeded in p.u.
u_{2FF}	(–)	fast-front overvoltage having a 2 % probability of being exceeded in p.u.
U_T	(kV)	peak value of temporary overvoltages

4 Approach used to derive the electrical distance

The following approach and assumptions are considered to be representative of power systems, but they are open to review if better information is available.

- In general an individual does not come to the limit of the electrical distance for long periods in any one year. For the purpose of calculation, the individual is assumed to be at the electrical distance for 1 h per year, but the method allows for other times to be used.
- The voltages and overvoltages which are generated by the network have to be resisted by the electrical distance such that the probability of an electrical breakdown of the insulation becomes effectively zero during the occupation time.
- Because the parameters involved are statistical variables it is necessary to calculate a probability of breakdown of the air gap. For the purpose of calculation, this is taken as $R_a = 10^{-7}$ per annum although higher or lower values may be considered.

5 Surtensions

La distance minimale d'approche pour le public est déterminée par les surtensions qui peuvent se produire sur le réseau électrique. Les causes de surtensions sont les suivantes: modifications rapides de la tension sur le réseau, manoeuvres, conditions de résonance, défauts, coups de foudre, etc.

5.1 Classification des surtensions

La tenue diélectrique d'un intervalle d'air dépend de la forme de l'onde de tension à ses bornes. La CEI 60071-2 définit les types de surtensions et leurs causes. Chacune d'elles correspond en principe à une tension d'amorçage différente, pour le même intervalle d'air.

Les trois types de formes d'onde de surtension utilisées dans cette norme sont:

- les surtensions temporaires ;
- les surtensions à front lent ;
- les surtensions à front rapide.

Pour calculer la distance électrique, il est nécessaire de connaître à partir d'essais ou d'études la valeur maximale de la surtension ou la valeur qui peut être dépassée dans 2 % des cas pour les trois types de surtensions. Si ces valeurs ne sont pas disponibles, on peut utiliser les recommandations de l'article 2 de la CEI 60071-2. Les valeurs 2 % peuvent se déduire des valeurs maximales (i.e. de troncature) (voir CEI 61472, annexe A).

La valeur maximale d'une surtension s'exprime normalement en par unité (p.u.) qui est la valeur ramenée à la référence $U_S \sqrt{\frac{2}{3}}$ où U_S est la tension la plus élevée du réseau.

Du fait de la nature statistique des valeurs de surtensions, la valeur maximale prise en compte est la surtension statistique 2 %, U_2 (ou u_2 exprimée en par unité), c'est-à-dire la surtension qui a une probabilité de 2 % d'être dépassée. U_2 est associée à un coefficient de variation s_2 (c'est-à-dire l'écart-type exprimé sous la forme d'un pourcentage de la valeur moyenne). U_2 est donnée par les formules générales:

$$U_2 = u_2 U_S \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

$$U_{2SF} = u_{2SF} U_S \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$U_{2FF} = u_{2FF} U_S \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

5.2 Surtensions temporaires

Lors de l'apparition de surtensions temporaires, les variations statistiques à la fois en amplitude et en durée ne sont pas très bien connues, mais normalement la valeur de crête, la durée et le nombre annuel d'événements sont connus ou peuvent être estimés. Le nombre annuel d'apparitions de surtensions temporaires, n_t , leur durée moyenne, Δt , et leur valeur crête, U_T , sont nécessaires pour assurer la sécurité vis-à-vis de ces surtensions à moins que la distance D_{el} ne soit suffisamment grande pour annuler toute possibilité d'amorçage.

En pratique, il est peu probable que les surtensions temporaires soient le paramètre déterminant pour définir D_{el} sur les lignes de transport et de distribution.

5 Overvoltages

The minimum approach distance for the public is determined by the overvoltages which can occur on the electrical system. The causes of overvoltages include the following: short-term voltage changes on the power system, switching operations, resonance conditions, faults, lightning strikes, etc.

5.1 Classification of overvoltages

The dielectric strength of an air gap depends on the shape of the voltage stress across it. IEC 60071-2 defines the types of overvoltages and their origins, each of which leads, in principle, to a different breakdown voltage for the same air gap.

The three types of overvoltage wave shape used in this standard are as follows:

- temporary overvoltages;
- slow-front overvoltages;
- fast-front overvoltages.

In order to make a calculation of electrical distance, the maximum value of the overvoltage, or the values which are exceeded by 2 % of overvoltages, for the three types of overvoltage, are required from tests or studies. If values are not available, clause 2 of IEC 60071-2 can be used for guidance. The 2 % values can be derived from the maximum (i.e. truncated) values (see annex A of IEC 61472).

The maximum value of an overvoltage is normally expressed in per unit (p.u.), that is, the value referred to $U_S \sqrt{\frac{2}{3}}$, where U_S is the highest system voltage.

Because of the statistical variability of overvoltages, the maximum overvoltage considered here is the 2 % overvoltage, U_2 , (or u_2 when expressed in per unit) i.e. the overvoltage having a 2 % probability of being exceeded. U_2 has an associated coefficient of variation, s_2 (i.e. the standard deviation expressed as a percentage of the mean value). U_2 is then given by the general expression:

$$U_2 = u_2 U_S \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

$$U_{2SF} = u_{2SF} U_S \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$U_{2FF} = u_{2FF} U_S \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

5.2 Temporary overvoltages

There is a statistical variability in the occurrence of temporary overvoltages, both in amplitude and over time. In general, this is not well known for power systems but normally the peak amplitude, the duration and the number of occurrences per year are known or can be estimated. The annual number of occurrences of temporary overvoltages, n_t , their mean time duration, Δt , and the peak voltage, U_T , are needed to ensure safety from these overvoltages unless the distance, D_{el} , is sufficiently large for there to be no probability of sparkover.

In practice, it is unlikely that temporary overvoltages will be the determining parameter for D_{el} on practical transmission or distribution lines.

5.3 Surtensions à front lent

La distribution statistique des surtensions à front lent est une fonction généralement représentée par une distribution normale (gaussienne) autour de la surtension statistique U_{2SF} (u_{2SF} exprimée en p.u.) qui a une probabilité de 2 % d'être dépassée. Autour de U_{2SF} une distribution normale peut être ajustée avec un coefficient de variation s_{2SF} . Si on ne dispose pas de meilleure information, il est suggéré d'utiliser la valeur de 20 % pour s_{2SF} .

La fréquence d'apparition annuelle d'une surtension à front lent due aux opérations normales de manoeuvre et aux réenclenchements automatiques après défaut, n_{SF} , dépend de l'exploitation de la ligne. Une valeur typique est probablement située entre 1 et 100 surtensions par an.

En plus des manoeuvres normales, sur une ligne sous tension, les défauts (par exemple suite à un coup de foudre ou à un amorçage dû à la pollution) apparaissant sur la ligne, déclenchent l'ouverture puis la refermeture afin d'interrompre le passage du courant.

Dans le cas où le réenclenchement automatique du disjoncteur est utilisé (avec un temps mort de quelques secondes), les charges piégées sur la ligne ont commencé à s'écouler et si l'écoulement est terminé, la surtension de réenclenchement est à peu près égale à celle de l'enclenchement. Dans le cas où une grande vitesse de réenclenchement est utilisée, des surtensions plus élevées peuvent apparaître. Le nombre annuel de réenclenchements est noté n_{SFR} . La fréquence d'apparition annuelle d'une surtension de manoeuvre à front lent due au réenclenchement influe sur le taux de défaut sur la ligne qui dépend de paramètres tels que la construction de la ligne, la densité de foudroiement, le niveau de pollution, les contacts entre conducteurs etc. Une valeur typique de taux de défaut est de l'ordre de 1 à 2 par 100 km de ligne et par an.

5.4 Surtensions à front rapide

La distribution de probabilité réelle des surtensions à front rapide apparaissant sur une ligne n'est pas toujours connue des compagnies d'électricité ou des concepteurs de ligne. Il n'est alors pas possible d'appliquer complètement la procédure de l'article 6. Ce qui suit donne des conseils pour estimer l'amplitude et la distribution des surtensions à front rapide.

La foudre constitue la principale source de surtensions à front rapide et sa fréquence d'apparition est connue (que ce soit sous forme de densité de foudroiement au sol ou de niveau kéraunique). Les ondes de foudre peuvent apparaître suite à un coup de foudre direct sur la ligne, un amorçage en retour des chaînes d'isolateurs ou à l'induction. Leurs amplitudes décroissent et les durées jusqu'à la crête augmentent d'autant plus que l'onde se propage le long de la ligne, de part et d'autre du point d'impact. Ceci provient de l'énergie de l'onde dissipée par la production de décharges dues à l'effet couronne.

Les ondes de foudre qui dépassent le niveau d'isolement de la ligne se dissipent pour une grande part vers le sol au niveau des pylônes adjacents au point d'impact de foudre, de sorte que toute surtension résiduelle à front rapide aura une amplitude relativement faible. Celles qui sont inférieures au niveau d'isolation de la ligne peuvent se propager le long de la ligne jusqu'à ce qu'elles soient dissipées par la production de décharges dues à l'effet couronne ou elles peuvent provoquer un amorçage sur le pylône à cause de la nature statistique aléatoire des intervalles d'air entre les conducteurs et la structure métallique du pylône. La probabilité d'amorçage avec les parties mises à la terre près du conducteur au milieu d'une portée soumise à un coup direct n'est pas prise en compte ici.

5.3 Slow-front overvoltages

Slow-front overvoltages are statistically distributed according to a function which can frequently be approximated by a normal (Gaussian) distribution in the vicinity of the statistical overvoltage, U_{2SF} , (and u_{2SF} expressed on a per unit basis) which has only a 2 % probability of being exceeded. In the vicinity of U_{2SF} a normal distribution can be fitted with a coefficient of variation, s_{2SF} . If better information is not available, a suggested value for s_{2SF} is 20 %.

The annual frequency of the occurrence of a slow-front overvoltage due to normal switching operations and to delayed auto-reclosure operations after faults, n_{SF} , will depend upon the operation of the line. A typical value is likely to be 1 to 100 overvoltages per year.

In addition to normal switching operations when the line is energized, faults (for example due to lightning and pollution flashover) will occur on the line, and, in these cases, the breaker opening and reclosing will interrupt the passage of current.

In the event that delayed auto-reclosure is used (with a dead time of several seconds) the trapped charge on the line will have decayed to some extent and, if the decay is to zero, the overvoltage on re-energization will be essentially that of the line energization. In the event that high-speed reclosure is used, the overvoltages are potentially higher. The annual number of reclose operations is denoted by n_{SFR} . The annual frequency of the occurrence of a slow-front overvoltage due to reclosing is related to the fault rate of the line which will depend upon parameters such as line construction, lightning ground-flash density, pollution levels, conductor clashing incidents, etc. A typical annual fault rate is of the order of 1 to 2 per 100 km of line per year.

5.4 Fast-front overvoltages

The actual probability distribution of fast-front overvoltages occurring on a line is usually not known by utilities or line designers. It is thus not possible to apply completely the procedure set out in clause 6. The following provides guidance for assessing the magnitude and frequency distribution of fast-front overvoltages.

The major source of fast-front overvoltages is from lightning and the frequency of occurrence of this (either in the form of ground-flash density or thunderstorm days) is known. Lightning surges can arise due to direct lightning strokes to the line, back flashover of insulator strings, or induction. Their amplitude decreases and their time to peak increases as the surge travels along the line in each direction away from the stroke. This is because the energy in the surge is dissipated by the production of corona discharges.

Lightning surges that exceed the insulation level of the line will be largely dissipated to ground at towers adjacent to the lightning stroke, so that any residual fast-front surge will then be relatively small. However, lightning surges which are below the insulation level of the line are able to propagate until they are dissipated by the generation of corona discharges, or result in sparkover at a tower because of the statistical variability of the gaps between conductors and the towers' steelwork. The probability of discharge to earthed parts near the conductor within any span where a direct stroke occurs is not considered here.

En l'absence d'autre information, il est recommandé que la surtension à front rapide à prendre en compte soit la tension qui peut se propager le long de la ligne (c'est-à-dire qui ne provoque pas d'amorçage sur le pylône le plus proche). Cette tension est la valeur U_{90} de l'intervalle d'air entre le conducteur et le pylône pour les ondes à front rapide. Si la valeur de U_{90} n'est pas connue, elle peut être estimée à partir de la longueur de l'intervalle d'air entre les parties sous tension et les parties mises à la terre du pylône (voir l'article A.3). Pour déterminer la distance électrique (article 7) en l'absence d'autre information, il est recommandé d'utiliser la valeur U_{90} de l'intervalle conducteur-pylône comme valeur de U_{2FF} de la distribution des surtensions devant être tenues par la distance électrique et de considérer que c'est la valeur de toutes les surtensions.

Le nombre de surtensions à front rapide peut être estimé à partir de l'activité kéraunique autour de la ligne. Le nombre de coups tombant à proximité qui provoquent des surtensions induites et le nombre de coups sur la ligne (à la fois sur les parties à la terre ou sous tension) peut être estimé à partir du niveau kéraunique ou de la densité de foudroiement au sol.

Dans le cas où un câble de garde est utilisé, la plupart des coups sur la ligne s'écoulent à la terre sans provoquer de surtension significative sur les conducteurs de phase. Le pourcentage des coups qui provoquent des surtensions significatives sur les conducteurs de phase dépend de la construction et de la conception de la ligne; il est de l'ordre de 5 % à 100 %. On doit distinguer les cas suivants:

- a) défauts d'écran provoquant un amorçage proche du point d'impact – ce qui n'entraîne pas de surtension notable se propageant le long de la ligne;
- b) défauts d'écran ne provoquant pas d'amorçage proche du point d'impact – les surtensions peuvent alors se propager jusqu'à ce qu'un amorçage se produise sur un pylône à proximité, avec un objet proche de la ligne ou qu'elles soient dissipées par les décharges dues à l'effet couronne (on se limite pour les décharges par effet couronne sur une distance en général inférieure à 10 km). Cette classe de surtension est donc susceptible d'être importante pour la détermination de D_{el} ;
- c) amorçages en retour – qui résultent d'amorçage proche du point d'impact, mais une surtension se propage – elle peut se propager jusqu'à ce qu'un amorçage se produise sur un pylône à proximité, avec un objet proche de la ligne ou se dissiper par les décharges dues à l'effet couronne (on se limite pour les décharges par effet couronne sur une distance en général inférieure à 10 km). Cette classe de surtension est donc susceptible d'être importante pour la détermination de D_{el} .

Le taux de coups induits est lié à l'activité kéraunique autour de la ligne mais étant donné que les surtensions sont généralement inférieures à 200 kV, elles concernent peu les hautes tensions de transport.

Le taux d'apparition des ondes à front rapide est généralement lié au taux de défaut de la ligne, plus qu'au nombre de coups directs sur la ligne. Les coups qui tombent sur une distance jusqu'à 10 km de la personne provoquent les surtensions qui doivent être prises en compte dans la détermination de D_{el} .

6 Tension de tenue spécifiée de l'intervalle d'air

Cette valeur est définie de façon statistique et connue sous le nom de tension de tenue statistique, U_{90} , qui est déterminée par le produit de la surtension statistique à deux pour-cent U_2 , avec un facteur de sécurité statistique K_S . La valeur de K_S est choisie en fonction d'un niveau de probabilité donné de décharge disruptive de l'air.

In the absence of other information, it is recommended that the fast-front voltage to be considered is the voltage which can propagate along the line (i.e. that which does not result in sparkover at the nearest tower). This voltage is the U_{90} value of the gap between the conductor and the tower for fast-front waves. If the value of U_{90} is not known, it can be estimated from the length of the air gap between the live parts and the earthed (grounded) parts of the tower (see clause A.3). For establishing the electrical distance (clause 7) in the absence of other information, it is recommended that the U_{90} value of the conductor-to-tower gap is used as U_{2FF} of the overvoltage distribution to be withstood by the electrical distance, and that all surges have this value.

The number of fast-front overvoltages can be estimated from the lightning activity in the vicinity of the line. The number of nearby strikes which will result in an induced overvoltage and the number to the line (earthed parts and live parts together) can be estimated from the keraunic level or the lightning ground-flash density.

If an earth wire (ground wire) is installed, most strikes to the line will be conducted to earth without generating significant voltages on the phase conductors. The percentage of strikes, which result in significant overvoltages on the phase conductors, will depend on the construction and design of the line and is likely to be in the range of 5 % to 100 %. The following cases shall be distinguished:

- a) shielding failure which results in sparkover near to the point of strike – this will not lead to overvoltages being propagated along the line;
- b) shielding failures which do not result in sparkover near to the point of strike – these can propagate until sparkover occurs at a nearby tower, to an object near the line, or are dissipated by corona discharges (the range is likely to be limited to under 10 km by corona discharges). This class of overvoltages is thus potentially important for determining the value of D_{el} ;
- c) back flashovers – these result in sparkover near to the point of strike but a surge will propagate. Such a surge can propagate until sparkover occurs at a nearby tower, to an object near the line, or are dissipated by corona discharges (the range is likely to be limited to under 10 km by corona discharges). This class of overvoltage is thus potentially important for determining the value of D_{el} .

The rate of induced strikes is related to the lightning activity in the vicinity of the line but, as the overvoltage is generally under 200 kV, these are of little concern for the higher transmission voltages.

The rate of occurrence of fast-front waves on the line is thus likely to be related to the fault rate of the line rather than to the number of strikes to the line. Those strikes that are within a distance of 10 km of the person result in overvoltages which shall be considered in the determination of D_{el} .

6 Required withstand voltage of the air gap

This value is defined statistically and known as the statistical withstand voltage, U_{90} , which is determined by multiplying the 2 % statistical overvoltage, U_2 , by a statistical safety factor, K_S . The value of K_S is chosen to provide a particular level of probability of disruptive discharge of the air gap.

6.1 Généralités

La distance électrique, D_{el} , utilisée dans cette norme est la distance pour laquelle la probabilité d'amorçage pour chacun des trois types de surtensions est à un niveau acceptable pour la durée de présence considérée.

En pratique, la distance électrique est généralement définie par les surtensions de foudre pour les réseaux pour lesquels U_S est inférieure ou égale à 245 kV, et par les surtensions de manoeuvre pour les réseaux pour lesquels U_S est supérieur à 245 kV.

6.1.1 Probabilité de décharge disruptive pour les ondes à front lent

On peut calculer pour chaque type de surtension la probabilité d'amorçage R_S , généralement comme le présente la CEI 60071-2. Connaissant la fonction de densité de probabilité des surtensions $f(U)$ et la fonction de probabilité de la tension d'amorçage $P(U)$, on peut calculer R_S , suivant: (voir 3.3.2.2, équation (8) de la CEI 60071-2):

$$R_S = \int_0^{\infty} f(U)P(U)dU \quad (4)$$

Pour les ondes à front lent, et avec certaines hypothèses, on peut déterminer la fonction $f(U)$ à partir de la surtension à deux pour-cent U_2 et du coefficient de variation s_2 . La fonction $P(U)$ peut se déduire de la tension de tenue statistique U_{90} et le coefficient de variation approprié s_{90} (qu'on peut prendre égal à 5 % ou 6 % pour les ondes à front lent et à 3 % pour les ondes à front rapide). La CEI 60071-2 donne des conseils d'application de l'équation (4).

Puisque $U_{90} = K_S U_2$, la probabilité d'amorçage dépend du facteur de sécurité statistique K_S . Cette probabilité peut être calculée à partir de l'équation (4) en supposant que chaque fonction suit une distribution de Weibull. Les valeurs résultantes sont données par ailleurs (voir la CEI 60071-2, 3.3.2.2, figure 8), les valeurs approximatives tirées de cette figure sont données au tableau 1. Il est recommandé d'utiliser les valeurs provenant des études de surtension lorsque celles-ci sont disponibles, sinon les valeurs de la figure 8 de la CEI 60071-2 sont utilisées.

Tableau 1 – Ondes à front lent: probabilité de décharge

K_S	Probabilité R_S
1,0	1×10^{-2}
1,07	1×10^{-3}
1,13	1×10^{-4}
1,2	1×10^{-5}

6.1.2 Probabilité de décharge disruptive pour les ondes à front rapide

La distribution des surtensions de foudre est choisie de façon à avoir la tension U_{90} de l'intervalle d'air entre conducteur et pylône. La probabilité de décharge disruptive dépend alors du nombre écarts-types entre U_{90} et U_{50} de la distance D_{el} . Des valeurs approximatives sont données dans le tableau 2 pour une distribution normale des tensions d'amorçage de l'intervalle d'air.

6.1 General

The electrical distance, D_{el} , is that distance where the probability of discharge from each of the three types of electrical stress is an acceptable level for the time of occupancy.

In practical terms, the electrical distance is generally determined by lightning overvoltages for systems where U_S does not exceed 245 kV, and by switching overvoltages for systems where U_S is above 245 kV.

6.1.1 Probability of disruptive discharge for slow-front waves

The probability of discharge, R_S , can then be calculated for each type of overvoltage, generally as described in IEC 60071-2. Knowing the probability density function of the overvoltage, $f(U)$, and the probability function of the discharge voltage, $P(U)$, one can calculate R_S from (see 3.3.2.2, equation (8) of IEC 60071-2):

$$R_S = \int_0^{\infty} f(U)P(U)dU \quad (4)$$

Under certain assumptions and for slow-front surges, function $f(U)$ can be determined from the 2 % overvoltage, U_2 , and the associated coefficient of variation, s_2 . Function $P(U)$ can be derived from the statistical withstand voltage, U_{90} , and the relevant coefficient of variation, s_{90} (which can be taken to be 5 % or 6 % for slow-front waves and 3 % for fast-front waves). Guidance in the application of equation (4) is provided by IEC 60071-2.

Since $U_{90} = K_S U_2$, the probability of sparkover is related to the statistical safety factor, K_S . This probability can be calculated using equation (4) and assuming a Weibull distribution for each function. The resulting values are given elsewhere (see 3.3.2.2, figure 8 of IEC 60071-2), approximate values derived from this figure are shown in table 1. It is recommended that values from overvoltage studies are used, when these are available, otherwise the values from figure 8 of IEC 60071-2 are used.

Table 1 – Slow-front waves: probability of discharge

K_S	Probability R_S
1,0	1×10^{-2}
1,07	1×10^{-3}
1,13	1×10^{-4}
1,2	1×10^{-5}

6.1.2 Probability of disruptive discharge for fast-front waves

The distribution of the lightning overvoltages is taken to be such that all have a voltage of U_{90} of the gap between the conductor and the tower. The probability of a disruptive discharge thus depends on the number of standard deviations between U_{90} and U_{50} of the gap, D_{el} . Approximate values are given in table 2, based on a normal distribution for the gap.

Tableau 2 – Ondes à front rapide: probabilité de décharge

K_S	Probabilité R_S
1,0	$9,7 \times 10^{-2}$
1,01	$5,3 \times 10^{-2}$
1,02	$2,7 \times 10^{-2}$
1,03	$1,3 \times 10^{-2}$
1,04	$5,7 \times 10^{-3}$
1,05	$2,4 \times 10^{-3}$
1,06	$9,3 \times 10^{-4}$

6.1.3 Facteur d'atténuation

En réalité la probabilité est réduite d'un coefficient k_m qui représente les facteurs d'atténuation. Cette réduction de la probabilité est spécifique pour chaque type de surtension. Pour les surtensions à front rapide et les surtensions temporaires, il est recommandé de prendre la valeur k_m égale à 1,0 en l'absence d'autre information. Pour les surtensions à front lent, k_m peut prendre une valeur inférieure à l'unité car:

- environ la moitié des surtensions à front lent sont de polarité négative, ce qui est moins contraignant pour la géométrie correspondant à la détermination de D_{el} ;
- U_2 est calculé sur la base de la tension la plus élevée du réseau U_S , qui suit elle même des variations statistiques qui ne sont pas prises en compte dans cette procédure;
- la durée de front réelle des surtensions à front lent est généralement moins contraignante que la durée de front critique sur laquelle est basée la formule donnant l'amorçage de l'intervalle d'air.

L'ensemble de ces facteurs d'atténuation peut réduire la probabilité d'amorçage d'un facteur supérieur à 3 et dans ce cas $k_m = 0,33$.

6.1.4 Choix de K_S

Pour rester en deçà du niveau de probabilité annuel acceptable, on doit choisir un facteur de sécurité statistique approprié K_S associé à R_S . Pour n surtensions, la probabilité totale annuelle R_a est donnée par la formule:

$$R_a = nT_{occ}k_m \frac{R_S}{N} \quad (5)$$

La probabilité réelle d'amorçage de la distance électrique au cours d'une année, R_a , est la somme des contributions des surtensions à front lent, des surtensions à front rapide et des surtensions temporaires (de durée Δt) c'est-à-dire:

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} \{ (n_{FF}R_{SFF}k_{mFF}) + (n_{SF}R_{SSF}k_{mSF}) + (n_{SFR}R_{SSFR}k_{mSF}) + (n_T \Delta t R_T) \} \quad (6)$$

Si la contribution des surtensions temporaires n'est pas significative dans la détermination de D_{el} , comme cela est normalement le cas, l'expression se réduit à:

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} \{ (n_{FF}R_{SFF}k_{mFF}) + (n_{SF}R_{SSF}k_{mSF}) + (n_{SFR}R_{SSFR}k_{mSF}) \} \quad (7)$$

Table 2 – Fast-front waves: probability of discharge

K_S	Probability R_S
1,0	$9,7 \times 10^{-2}$
1,01	$5,3 \times 10^{-2}$
1,02	$2,7 \times 10^{-2}$
1,03	$1,3 \times 10^{-2}$
1,04	$5,7 \times 10^{-3}$
1,05	$2,4 \times 10^{-3}$
1,06	$9,3 \times 10^{-4}$

6.1.3 Mitigating factors

In reality, the probability is further reduced by the term k_m that defines the reduction resulting from mitigating factors. The reduction in probability is specific to each overvoltage type and for fast-front and temporary overvoltages it is recommended that k_m is set to 1,0 in the absence of other information. For slow-front waves, k_m can have a value less than unity because

- about half the slow-front overvoltages are of negative polarity, which is less severe for geometries relevant to the determination of D_{el} ;
- U_2 is calculated on the basis of the highest voltage of the system, U_S , which in itself has a statistical variation that is not taken into account in this procedure;
- the actual time-to-peak of slow-front overvoltages will usually be less stressful than the so-called critical time-to-peak on which the gap discharge formula is based.

Together, these mitigating factors could reduce the probability of disruptive discharge by a factor of more than 3 and in this case $k_m = 0,33$.

6.1.4 Choosing K_S

To stay below the annual acceptable probability level, the appropriate statistical safety factor, K_S , associated with R_S has to be selected. For n overvoltages, the overall annual probability, R_a , is then given by the formula:

$$R_a = nT_{occ}k_m \frac{R_S}{N} \quad (5)$$

The actual probability of sparkover of the electrical distance in a year, R_a , is the sum of contributions from slow-front overvoltages, fast-front overvoltages and temporary overvoltages (of duration Δt). That is:

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} \{ (n_{FF}R_{SFF}k_{mFF}) + (n_{SF}R_{SSF}k_{mSF}) + (n_{SFR}R_{SSFR}k_{mSF}) + (n_T\Delta tR_T) \} \quad (6)$$

If the temporary overvoltages are not significant in determining D_{el} as is normally the case, this reduces to

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} \{ (n_{FF}R_{SFF}k_{mFF}) + (n_{SF}R_{SSF}k_{mSF}) + (n_{SFR}R_{SSFR}k_{mSF}) \} \quad (7)$$

La procédure pour déterminer la distance électrique D_{el} prend en compte le fait que R_S est une fonction de la longueur de l'intervalle d'air et sa valeur est choisie petite (l'ordre de grandeur de R_S est de 10^{-3} pour R_a valant 10^{-7}).

D'un point de vue pratique, il est préférable de calculer la distance électrique D_{el} , suivant l'article 7, pour les surtensions à front rapide, les surtensions de manoeuvre et de réenclenchement, et les surtensions temporaires. La distance électrique résultante est la plus grande de ces valeurs, en général.

NOTE Il est prudent de vérifier que la probabilité globale n'est pas plus grande que la valeur spécifiée pour R_a (c'est-à-dire 10^{-7}) et si cela est le cas, il convient d'augmenter D_{el} devrait être augmenté en conséquence.

Si l'on utilise cette approche pratique, R_{SFF} , R_{SSF} , R_{SSFR} , R_t se calculent à partir des équations suivantes:

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_{FF} R_{SFF} k_{mFF}) \quad (8)$$

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_{SF} R_{SSF} k_{mSF}) \quad (9)$$

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_{SFR} R_{SSFR} k_{mSF}) \quad (10)$$

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_T \Delta I R_T) \quad (11)$$

6.2 Calcul de la tension de tenue spécifiée

La tension de tenue à 90 % peut être déterminée en multipliant la tension U_2 par le facteur de sécurité statistique K_S , pour obtenir la probabilité désirée de tenue de l'intervalle d'air (R_{SFF} , R_{SSF} , R_{SSFR}):

$$U_{90} = K_S U_2 \quad (12)$$

La tension de tenue statistique 50 % U_{50} est déterminée à partir de:

$$U_{50} = \frac{U_{90}}{(1 - 1,3 s)} \quad (13)$$

$$U_{50} = \frac{K_S U_2}{(1 - 1,3 s)} \quad (14)$$

D'où les tensions de tenue statistique pour chaque type de surtension, qui peuvent être déterminées par les formules suivantes:

front lent:
$$U_{50SF} = \frac{K_{SSF} U_{2SF}}{(1 - 1,3 s_{SF})} \quad (15)$$

front lent sur réenclenchement:
$$U_{50SFR} = \frac{K_{SSFR} U_{2SFR}}{(1 - 1,3 s_{SFR})} \quad (16)$$

The procedure to derive the electrical distance, D_{el} , recognizes that R_S is a function of the length of the gap and is selected to be a small value (for example, R_S will be of order 10^{-3} for R_a of 10^{-7}).

From a practical point of view, it is best to calculate the electrical distance, D_{el} , in clause 7, for fast-front overvoltages, switching overvoltages, reclosing overvoltages and temporary overvoltages. The overall electrical distance, D_{el} , will then be the greater of these distances, in general.

NOTE It is prudent to confirm that the overall risk is not then greater than the specified value for R_a (for example, 10^{-7}) and if this is the case, D_{el} should be increased accordingly.

If this practical point of view is followed, R_{SFF} , R_{SSF} , R_{SSFR} and R_t are derived from the following equations:

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_{FF} R_{SFF} k_{mFF}) \quad (8)$$

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_{SF} R_{SSF} k_{mSF}) \quad (9)$$

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_{SFR} R_{SSFR} k_{mSFR}) \quad (10)$$

$$R_a = \frac{T_{occ}}{N} (n_T \Delta I R_T) \quad (11)$$

6.2 Calculation of the required withstand voltage

From the voltage U_2 , the 90 % withstand voltage of the air gap can be determined by multiplying by the appropriate value of K_S , the statistical safety factor, to give the desired probability of withstand of the gap (R_{SFF} , R_{SSF} , R_{SSFR})

$$U_{90} = K_S U_2 \quad (12)$$

The (50 %) statistical withstand voltage, U_{50} , is then determined from:

$$U_{50} = \frac{U_{90}}{(1-1,3 \text{ s})} \quad (13)$$

$$U_{50} = \frac{K_S U_2}{(1-1,3 \text{ s})} \quad (14)$$

Hence the 50 % statistical withstand voltages can be determined for each overvoltage by the following formulae:

slow-front:
$$U_{50SF} = \frac{K_{SSF} U_{2SF}}{(1-1,3 \text{ s}_{SF})} \quad (15)$$

slow-front reclosing:
$$U_{50SFR} = \frac{K_{SSFR} U_{2SFR}}{(1-1,3 \text{ s}_{SFR})} \quad (16)$$

front rapide:

$$U_{50FF} = \frac{K_{SFF} U_{2FF}}{(1 - 1,3 s_{FF})} \quad (17)$$

où K_{SSF} , K_{SSFR} et K_{SFF} sont les facteurs de sécurité statistique et s_{SF} , s_{SFR} et s_{FF} les coefficients de variation à appliquer dans chaque cas.

7 Calcul de la distance associée aux surtensions

Une fois calculée la tension U_{50} spécifiée pour l'intervalle d'air, on peut déterminer la longueur de ce dernier.

La tension U_{50} que peut tenir un intervalle d'air sans amorçage dépend de trois facteurs principaux:

- la forme d'onde de la tension appliquée;
- la distance séparant les électrodes constituant l'intervalle d'air et leur forme;
- les conditions atmosphériques: densité d'hygrométrie de l'air (la densité de l'air dépend principalement de l'altitude au-dessus du niveau de la mer et de la température).

L'effet de ces facteurs a été déterminé par des essais de chocs réalisés par de nombreux laboratoires depuis des décennies. Dans ces essais, la tension de tenue disruptive 50 %, U_{50} , a normalement été définie pour une certaine longueur de l'intervalle d'air ainsi que son écart-type s . Une expression générale de U_{50} pour un intervalle d'air de longueur d est:

$$U_{50} = k_g k_a f(d) \quad (18)$$

où

$f(d)$ est une expression des variations de U_{50} avec la distance d , et qui dépend de la forme d'onde de la tension (généralement donnée en fonction de la tension d'amorçage U_{50RP} d'un intervalle pointe – plan de référence).

k_g est le facteur d'intervalle. Il peut être exprimé en fonction de k_{gSF} , facteur d'intervalle pour les ondes à front lent et permet de prendre en compte l'influence de la géométrie des électrodes. Le facteur d'intervalle pour les surtensions à front lent peut être utilisé pour déterminer le facteur d'intervalle réel pour les tensions alternatives et les surtensions à front rapide (voir annexe A). Pour un intervalle conducteur-plan, le facteur d'intervalle en onde à front lent est compris entre 1,1 et 1,15, mais pour de nombreux objets courants situés sous les lignes, on est plus proche d'un intervalle pointe-conducteur (dont la valeur typique est 1,6). Il est recommandé d'utiliser le facteur d'intervalle approprié à la configuration pour laquelle on spécifie la distance électrique. Dans de nombreux cas pour lesquels on manque d'information, on peut utiliser un facteur d'intervalle de 1,2 pour calculer la distance électrique de nombreuses configurations, mais il faut se rappeler qu'il peut y avoir des valeurs supérieures ou inférieures;

k_a est un facteur de correction atmosphérique pour prendre en compte les conditions atmosphériques non standards (autres que 20 °C, 101 kPa, 325 kPa et un degré hygrométrique de 0,011 kg·m⁻³).

Le comportement de l'isolement dans l'air vis-à-vis des trois types de surtensions est décrit dans l'annexe G de la CEI 60071-2; il est résumé dans l'annexe A de la présente norme. La relation entre D et U_{50} est donnée à l'article A.5.

Un exemple de calcul de D_{el} est donné à l'annexe B.

fast-front:
$$U_{50FF} = \frac{K_{SFF}U_{2FF}}{(1 - 1,3 s_{FF})} \quad (17)$$

where K_{SSF} , K_{SSFR} and K_{SFF} are the statistical safety factors; s_{SF} , s_{SFR} and s_{FF} are the applicable coefficients of variation, in each case.

7 Calculation of the distance associated with the overvoltages

Once the required U_{50} of the gap has been calculated, the length of the air gap can be determined.

The U_{50} voltage that an air gap of a given length can sustain without discharge depends on three main factors:

- the waveshape of the applied voltage;
- the separation and shape of the electrodes forming the air gap;
- the atmospheric conditions: air density and humidity (air density is markedly affected by altitude above sea-level and by temperature).

The effect of these factors has been determined in impulse tests conducted by many laboratories over many decades. In these tests, the 50 % disruptive withstand voltage, U_{50} , and often also its statistical conventional deviation, s , have normally been determined for a certain air-gap length. A general expression for U_{50} of an air gap of length d is:

$$U_{50} = k_g k_a f(d) \quad (18)$$

where

$f(d)$ is an expression for the variation of U_{50} with distance d , depending on voltage shape (usually given in terms of the discharge voltage, U_{50RP} , of a rod-plane reference gap);

k_g is the gap factor and can be expressed in terms of k_{gSF} , the slow-front gap factor, and allows for the influence of the electrode geometry. The gap factor for the slow-front overvoltage can be used to determine the effective gap factor for the a.c. and fast-front overvoltages (see annex A). The slow-front gap factor for a conductor over a plane is 1,1 to 1,15 but for many practical objects under a line, the gap is nearer to a rod-conductor gap (for which the gap factor is typically 1.6). It is recommended that the gap factor appropriate to the configuration for which the electrical distance is required be used. In many cases where there is an absence of other information, a gap factor of 1,2 can be used for calculating the electrical distance for many configurations, but it should be borne in mind that higher and lower values can occur;

k_a is an atmospheric correction factor to allow for non-standard atmospheric conditions (i.e. other than at 20 °C, 101 kPa, 325 kPa and a moisture content of 0,011 kg·m⁻³).

The response of air insulation to the three types of overvoltages is described in annex G of IEC 60071-2, and summarized in annex A of this standard. The relationship between D and U_{50} is given in clause A.5.

The example in annex B demonstrates the derivation of D_{el} .

Annexe A (informative)

Relation entre U_{50} et la longueur d d'un intervalle

A.1 Surtensions temporaires

$$f(d): \quad U_{50RP} = 750 \ln(1 + 0,55 d^{1,2}) \quad \text{voir note 1 (A.1)}$$

$$\text{facteur d'intervalle} \quad k_{gA} = 1,35 k_{gSF} - 0,35 k_{gSF}^2 \quad \text{voir note 2 (A.2)}$$

le coefficient de variation pour les surtensions temporaires, $s_A = 0,03$ à $0,04$;

k_{gSF} est le facteur d'intervalle en onde à front lent.

NOTE 1 U est en kilovolts eff. et d en mètres. Pour les intervalles supérieurs à 2 m la valeur crête est supérieure d'environ 20 % à 30 % à la valeur correspondante pour les surtensions à front lent.

NOTE 2 Pour les intervalles inférieurs à 2 m, k_{gA} est généralement inférieur à celui des surtensions à front lent; il est proche de l'unité pour les intervalles d'environ 1 m.

A.2 Surtensions à front lent

$$f(d): \quad U_{50RP} = 1\,080 \ln(0,46 d + 1) \quad \text{voir note 1 (A.3)}$$

$$\text{facteur d'intervalle} \quad k_{gSF} = 1,0 \text{ à } 2,0 \quad \text{voir note 2}$$

s_{SF} est le coefficient de variation pour les ondes à front lent (= 0,05) voir note 3

NOTE 1 U est en kilovolts et d en mètres. L'équation (A.3) est valable pour les polarités positives, les ondes à front critique et les intervalles compris entre 1 m et 24 m. Dans les cas de polarité négative, la tenue est 1,8 à 2,4 fois supérieure qu'en polarité positive pour les intervalles de 2 m à 14 m; ces cas peuvent de ce fait être négligés.

NOTE 2 Voir tableau G.1 de la CEI 60071-2.

NOTE 3 5 % pour les ondes positives; et jusqu'à 8 % pour les ondes négatives (CIGRE Guide N° 72).

A.3 Surtensions à front rapide

En polarité positive:

$$f(d): \quad U_{50RP} = 530 d \quad \text{(A.4)}$$

$$\text{facteur d'intervalle:} \quad k_{gFF} = 0,74 + 0,26 k_{gSF} \quad \text{(A.5)}$$

s_{FF} est le coefficient de variation pour les ondes à front rapide (= 0,03).

NOTE 1 L'équation (A.4) s'applique pour les intervalles jusqu'à 8 m, d est en mètres et U en kilovolts.

L'expression suivante donne U_{90} pour un intervalle conducteur-pylône (dont la longueur est notée D_{LT} en mètres) pour un facteur d'intervalle en onde à front lent associé k_{gSF} , un coefficient de variation en onde à front rapide s_{FF} et un facteur de correction atmosphérique k_a .

$$U_{90FF} = 530 D_{LT} (0,74 + 0,26 k_{gSF}) (1 - 1,3 s_{FF}) k_a \quad \text{(A.6)}$$

NOTE 2 La distance D_{LT} considérée est celle entre un conducteur et une structure qui peut amorcer lorsqu'une onde à front rapide est appliquée sur le conducteur. L'amorçage peut avoir lieu au niveau d'une chaîne d'isolateurs ou sur un intervalle d'air avec un point quelconque du pylône.

Annex A (informative)

Relationship between U_{50} and the gap length, d

A.1 Temporary overvoltages

$$f(d): \quad U_{50RP} = 750 \ln(1 + 0,55 d^{1,2}) \quad \text{see note 1 (A.1)}$$

$$\text{gap factor:} \quad k_{gA} = 1,35 k_{gSF} - 0,35 k_{gSF}^2 \quad \text{see note 2 (A.2)}$$

the coefficient of variation for temporary overvoltages, $s_A = 0,03$ to $0,04$;

k_{gSF} is the slow-front gap factor.

NOTE 1 U is in kilovolts r.m.s. and d in metres. For gaps greater than 2 m, the peak value is about 20 % to 30 % higher than the corresponding value for slow-front overvoltage.

NOTE 2 For gaps less than 2 m, k_{gA} is generally lower than for slow-front overvoltage, and is quite close to unity for gaps up to about 1 m.

A.2 Slow-front overvoltages

$$f(d): \quad U_{50RP} = 1\,080 \ln(0,46 d + 1) \quad \text{see note 1 (A.3)}$$

$$\text{gap factor:} \quad k_{gSF} = 1,0 \text{ to } 2,0 \quad \text{see note 2}$$

s_{SF} is the coefficient of variation for slow-front waves (= 0,05) see note 3

NOTE 1 U is in kilovolts and d in metres. Equation (A.3) is valid for positive polarity, critical-front waves and gaps in the range of 1 m to 24 m. The negative polarity strength is 1,8 to 2,4 times higher than positive polarity for gaps from 2 m to 14 m, and can therefore generally be ignored.

NOTE 2 See table G.1 of IEC 60071-2.

NOTE 3 Five per cent for positive impulses; up to 8 % for negative (CIGRE Guide No 72).

A.3 Fast-front overvoltages

Positive polarity:

$$f(d): \quad U_{50RP} = 530 d \quad \text{(A.4)}$$

$$\text{gap factor:} \quad k_{gFF} = 0,74 + 0,26 k_{gSF} \quad \text{(A.5)}$$

s_{FF} is the coefficient of variation for fast-front waves (= 0,03).

NOTE 1 Equation (A.4) is valid for gaps up to 8 m, d is in metres and U in kilovolts.

The following derivation is of the U_{90} of the conductor-to-tower gap (which is taken to have a distance of D_{LT} in metres), an associated slow-front gap factor of k_{gSF} , a fast-front coefficient of variation, s_{FF} , and an atmospheric correction factor, k_a .

$$U_{90FF} = 530 D_{LT} (0,74 + 0,26 k_{gSF}) (1 - 1,3 s_{FF}) k_a \quad \text{(A.6)}$$

NOTE 2 The distance D_{LT} to be considered is that between the conductor and the structure which discharges when fast-front impulses are applied to the conductor; the discharge occurs either along the insulator string or across the air gap to the tower.

Par exemple, $D_{LT} = 2,8$ m, $k_{gSF} = 1,4$, $s_{FF} = 0,03$ et un facteur de correction atmosphérique $k_a = 1$

$$U_{90FF} = 1\,574 \text{ kV} \quad (\text{A.7})$$

A.4 Facteur de correction atmosphérique k_a

Pour chaque type de surtension, la tenue diélectrique dépend de la température, de la pression et de l'hygrométrie absolue, chacun de ces paramètres étant sujet à variation dans le temps. Ceci est pris en compte par le facteur de correction atmosphérique k_a , dont la valeur dépend principalement de l'altitude. La valeur du facteur de correction peut être extraite de la CEI 60060-1, en prenant la pression atmosphérique et la température au point considéré, ou bien de la CEI 61472.

A.5 Calcul de la distance électrique

Les équations précédentes permettent de déduire les expressions des distances et à partir des équations données en 6.2 donnant U_{50} pour chaque type de surtension, on obtient les expressions suivantes:

a) pour les surtensions temporaires

$$U_{50A} = 750 (1,35 k_{gSF} - 0,35 k_{gSF}^2) k_a \ln(1 + 0,55 D_{el}^{1,2}) \quad (\text{A.8})$$

d'où:
$$D_{el} = 1,65 \left[\exp\left(\frac{U_{50}}{x}\right) - 1 \right]^{0,833} \quad (\text{A.9})$$

où:
$$x = 750 k_a (1,35 k_{gSF} - 0,35 k_{gSF}^2) \quad (\text{A.10})$$

b) pour les surtensions à front lent (polarité positive)

$$U_{50SF} = 1\,080 k_{gSF} k_a \ln(0,46 D_{SF} + 1) \quad (\text{A.11})$$

d'où:
$$D_{SF} = 2,17 \left\{ \exp\left(\frac{U_{50}}{1\,080 k_{gSF} k_a}\right) - 1 \right\} \quad (\text{A.12})$$

c) pour les surtensions à front rapide (polarité positive)

$$U_{50F} = 530 \{0,74 + 0,26 k_{gSF}\} k_a D_F \quad (\text{A.13})$$

d'où:
$$D_F = \frac{U_{50F}}{530 (0,74 + 0,26 k_{gSF}) k_a} \quad (\text{A.14})$$