

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61472

Première édition
First edition
1998-11

**Travaux sous tension –
Distances minimales d’approche –
Méthode de calcul**

**Live working –
Minimum approach distances –
Method of calculation**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61472:1998

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60 000.

Publications 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.

Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- **«Site web» de la CEI***
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60 000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. 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.

Validity of this publication

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 the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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 to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61472

Première édition
First edition
1998-11

**Travaux sous tension –
Distances minimales d'approche –
Méthode de calcul**

**Live working –
Minimum approach distances –
Method of calculation**

© IEC 1998 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

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

V

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application	6
2 Références normatives.....	6
3 Définitions.....	8
4 Méthodologie	10
5 Facteurs intervenant dans les calculs	10
6 Evaluation des risques	24
7 Calcul de la distance minimale d'approche	24
Annexes	
A Surtensions.....	28
B Tenue diélectrique de l'air	38
C Facteur d'intervalle k_g	42
D Prise en compte des conditions atmosphériques.....	46
E Travaux sous tension près des isolations polluées, endommagées ou humides.....	56
F Diminution des distances en dessous de la valeur calculée.....	60
G Distance ergonomique.....	64
H Bibliographie.....	68

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Definitions	9
4 Methodology	11
5 Factors influencing calculations	11
6 Evaluation of risks	25
7 Calculation of minimum approach distance	25
Annexes	
A Overvoltages	29
B Dielectric strength of air	39
C Gap factor k_g	43
D Allowing for atmospheric conditions	47
E Live working near contaminated, damaged or moist insulation	57
F Reduction of distances below the calculated value	61
G Ergonomic distance	65
H Bibliography	69

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRAVAUX SOUS TENSION – DISTANCES MINIMALES D'APPROCHE – MÉTHODE DE CALCUL

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique 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, 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 61472 a été établie par le comité d'études 78 de la CEI: Travaux sous tension.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
78/252/FDIS	78/258/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.

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**LIVE WORKING –
MINIMUM APPROACH DISTANCES –
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 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 61472 has been prepared by technical committee 78: Live working.

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

FDIS	Report on voting
78/252/FDIS	78/258/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.

Annexes A to H are for information only.

TRAVAUX SOUS TENSION – DISTANCES MINIMALES D'APPROCHE – MÉTHODE DE CALCUL

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie une méthode de calcul de la distance minimale d'approche, en travaux sous tension entre 1 kV et 800 kV, requise pour protéger les opérateurs des surtensions du réseau. Cette norme traite des surtensions de réseau et des distances dans l'air pour le travail entre les parties et/ou les opérateurs à potentiels différents.

Le calcul des distances pour les tensions continues est actuellement à l'étude.

Il est recommandé d'utiliser les valeurs de la tension de tenue requise et de la distance minimale d'approche calculées suivant la méthode décrite dans cette norme seulement si les conditions de travail suivantes sont présentes:

- les opérateurs sont formés et qualifiés pour travailler sous tension ou près des conducteurs sous tension;
- les conditions d'exploitation sont adaptées de manière que la surtension statistique ne dépasse pas la valeur choisie pour la détermination de la tension de tenue 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 observé 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.

NOTE – Dans certains pays, des procédures spéciales ont été développées pour permettre les travaux sous tension sur les réseaux de distribution (au-dessous de 50 kV) avec une présence d'humidité sur la surface des outils isolants.

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. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et 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. 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*

LIVE WORKING – MINIMUM APPROACH DISTANCES – METHOD OF CALCULATION

1 Scope

This International Standard specifies a method for calculating the minimum approach distance for live working, at voltages between 1 kV and 800 kV, required to protect workers from system overvoltages. This standard addresses system overvoltages, and the working air distances between parts and/or workers at different potentials.

The calculation of distances for d.c. voltages is presently under consideration.

The required withstand voltage and minimum approach distances calculated by the method described in this standard are recommended for use only if the following working conditions prevail:

- workers are trained for, and skilled in, working live lines or close to live conductors;
- the operating conditions are adjusted so that the statistical overvoltage does not exceed the value selected for the determination of the required withstand voltage;
- transient overvoltages are the determining overvoltages;
- tool insulation has no continuous film of moisture present on the surface;
- no lightning is observed within 10 km of the work site;
- allowance is made for the effect of conducting components of tools;
- the effect of altitude on the electrical strength is taken into consideration.

NOTE – In some countries, special procedures have been developed to permit live working with surface moisture on tools at distribution voltages (below 50 kV).

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, though referenced in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and 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. 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*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes s'appliquent.

3.1

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 normale (tension entre phases)

NOTE – Ces valeurs ne tiennent pas compte des variations transitoires par exemple dues aux manoeuvres dans le réseau, ni des variations temporaires accidentelles de la tension. [VEI 601-01-23 modifiée]

3.2

surtension transitoire

surtension de courte durée ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie. [VEI 604-03-13]

3.3

tension de cinquante pour cent de décharge disruptive (U_{50})

valeur de crête d'une tension de choc qui a une probabilité de 50 % de provoquer une décharge disruptive à chaque fois qu'elle est appliquée lors d'essais diélectriques. [VEI 604-03-43]

3.4

tension de tenue statistique (U_{90})

surtension pour laquelle l'isolation présente une probabilité de tenue de 90 %

3.5

surtension statistique (U_2)

surtension ayant une probabilité de 2 % d'être dépassée

3.6

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} , u_{p2} , u_{e1} , u_{p1} définies ci-après.

3.7

distance minimale d'approche (D_A)

distance minimale dans l'air qui doit être maintenue entre n'importe quelle partie corps du monteur, ou tout outil conducteur qu'il manipule, et les parties portées à des potentiels différents. Cette distance de travail minimale varie en fonction des composantes électriques et ergonomiques choisies.

3.8

distance électrique (D_U)

distance dans l'air qui protège d'un claquage pendant le travail sous tension. En termes génériques, la composante électrique de la distance minimale de travail entre deux électrodes qui représentent les parties actives et/ou à la terre, est celle requise pour empêcher un amorçage sous la contrainte électrique la plus sévère qui puisse survenir dans des conditions choisies.

3.9

distance ergonomique (D_E)

distance qui prend en compte les mouvements involontaires et les erreurs de jugement des distances pendant l'exécution du travail. Cette distance prend en compte aussi bien les actions de personnes que les outils utilisés et manipulés.

3 Definitions

For the purpose of this International Standard, the following definitions apply.

3.1

highest voltage of a system (U_s)

the 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 for example to switching operations and abnormal operation and abnormal temporary variations of voltage, are not taken into account. [IEV 601-01-23 modified]

3.2

transient overvoltage

a short duration overvoltage of a few milliseconds or less, oscillatory or non-oscillatory, usually highly damped. [IEV 604-03-13]

3.3

fifty per cent disruptive discharge voltage (U_{50})

the 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]

3.4

statistical withstand voltage (U_{90})

the overvoltage at which the insulation exhibits a 90 % probability of withstand

3.5

statistical overvoltage (U_2)

the overvoltage that has a 2 % probability of being exceeded

3.6

per unit value (u)

the 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} , u_{p2} , u_{et} and u_{pt} defined below.

3.7

minimum approach distance (D_A)

the minimum distance in air to be maintained between any part of the body of a worker, or any conductive tool being directly handled, and any part at different potentials. This minimum working distance will vary depending upon the chosen electrical and ergonomic components.

3.8

electrical distance (D_U)

the distance in air which protects against electrical breakdown during live working. In generic terms, the electrical component of the minimum working distance between two electrodes which represent live and/or earthed parts, required to prevent sparkover under the most severe electrical stress that will arise under the chosen conditions.

3.9

ergonomic distance (D_E)

the distance which allows for inadvertent movement or errors in appraising distances while performing work. This distance takes into consideration the actions of the persons as well as the tools that are to be used and manipulated.

4 Méthodologie

La méthodologie du calcul de la distance minimale 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 requise de l'isolation dans la zone de travail (U_{90});
- calculer la distance électrique minimale D_U correspondant à 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 déterminée par:

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

où

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

D_E est la distance ergonomique qui tient compte de la maîtrise de la distance minimale d'approche mise en oeuvre au cours des procédures de travail, du niveau de formation, de la qualification des opérateurs, du type de construction, et des éléments fortuits tels que des gestes involontaires et des erreurs d'appréciation des distances. La valeur choisie pour la distance ergonomique D_E diffère suivant les utilisateurs. Trois variations de D_E avec la tension du réseau ont été utilisées: augmentation, diminution et maintien constant. La valeur de D_E sera propre à chaque utilisateur mais en général elle se trouve comprise entre 0,2 m et 1 m (voir l'annexe G pour plus de précisions).

La représentation des composantes de la distance minimale d'approche D_A est donnée à la figure 1.

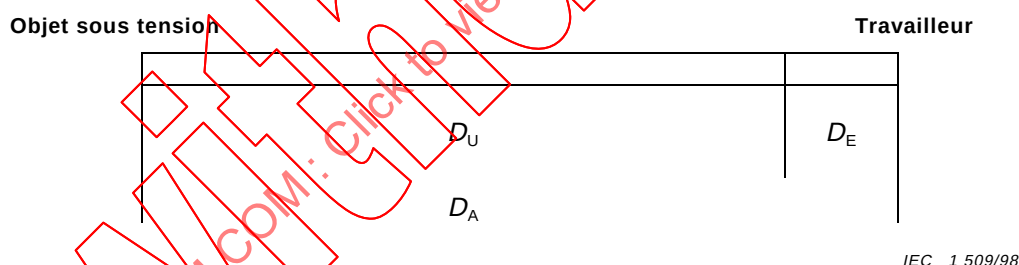


Figure 1 – Représentation des composantes de D_A

5 Facteurs intervenant dans les calculs

5.1 Actions sur les surtensions du réseau

L'amplitude maximale des surtensions arrivant dans la zone de travail peut être réduite par la pratique courante de neutralisation des ré-enclencheurs ou par l'usage d'éclateurs ou de parafoudres. Les éclateurs sont utilisés sur les réseaux de transport aux tensions supérieures à 69 kV. Ils sont installés de préférence près de la zone de travail ou aux extrémités des équipements.

4 Methodology

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

- to establish the statistical overvoltage expected in the work area (U_2) and from this determine the required statistical withstand voltage of the insulation in the work area (U_{90});
- to calculate the minimum electrical distance D_U related to 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:

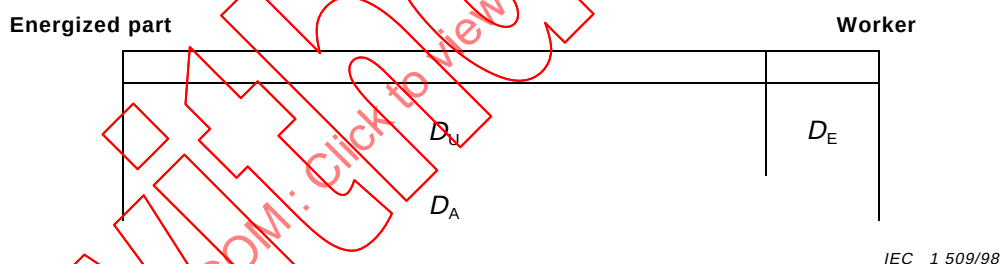
$$D_A = D_U + D_E \quad (1)$$

where

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

D_E is the ergonomic distance which allows for the control of the minimum approach distance developed through work procedures, level of training, skill of the workers, type of construction, and such contingencies as inadvertent movement, and errors in appraising distances. The value chosen for the ergonomic distance D_E differs between users. Three variations of D_E with system voltage have been used: increasing, decreasing and constant. The value of D_E will be specific to each user but it generally falls within the range of 0,2 m to 1 m (see annex G for details).

The illustration of the components of the minimum approach distance D_A is shown in figure 1.



IEC 1 509/98

Figure 1 – Illustration of components of D_A

5 Factors influencing calculations

5.1 Control of system overvoltages

The maximum amplitude of overvoltages arriving in the work area can be reduced by the usual practice of making the circuit-breaker reclosing devices inoperative, or by using protective gaps or surge arresters. Protective gaps are used on transmission systems at voltages above 69 kV. They are preferably installed close to the work area, or at equipment terminations.

5.2 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 est la tension la plus élevée du réseau;

u_{e2} est la surtension statistique phase-terre exprimée par unité.

De la même manière:

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

où

u_{p2} est la surtension statistique phase-phase exprimée par unité.

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

$$u_{p2} = 1,33 u_{e2} \pm 0,4 \quad (4)$$

Les surtensions transitoires à prendre en compte sont celles causées par des défauts dans le réseau ou par des manoeuvres, qu'elles se produisent sur les lignes sur lesquelles on travaille, sur les lignes voisines ou sur le matériel associé.

Les valeurs des surtensions statistiques doivent être celles mesurées ou déterminées à l'aide d'études sur un analyseur de transitoire de réseau (TNA) ou sur ordinateur. Si de telles études ne fournissent pas les surtensions statistiques (valeur à 2 %) mais seulement les valeurs tronquées sans connaissance de la distribution statistique, le passage des valeurs tronquées aux valeurs à 2 % peut être réalisé (voir annexe A). Des valeurs typiques de surtension statistiques sont données à l'annexe A pour être utilisées quand aucune autre valeur n'est disponible.

5.3 Tenue de l'intervalle

Pour la détermination de la distance minimale d'approche, 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 phase-phase et en combinant l'équation (5) avec les équations (2) et (3) on obtient:

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

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

5.2 Statistical overvoltage

The electrical stress at the work area shall be known. The electrical stress is described as the statistical overvoltage that may be present at the work area. In a 3-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 is the highest voltage of the system;

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

Similarly:

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

where

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

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

$$u_{p2} = 1,33 u_{e2} + 0,4 \quad (4)$$

The transient overvoltages to be considered are those caused by system faults and switching operations, whether they occur on the lines being worked, or on adjacent lines or associated equipment.

The values of statistical overvoltages shall be those measured or determined by transient network analyzer (TNA) or digital computer studies. If such studies do not provide the statistical overvoltages (2 % values) but only the "truncated values", without the statistical distribution, the transformation of the truncated values into 2 % values can be made (see annex A). Typical values of statistical overvoltages are shown in annex A, for use when no other values are available.

5.3 Gap strength

For the determination of the minimum approach 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:

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

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

où

U_{90} est une tension de tenue statistique (la surtension pour laquelle l'isolation a une probabilité de tenue de 90 %);

U_2 est la surtension statistique à 2 %;

K_S est un facteur statistique;

U_{e90} et U_{p90} sont respectivement les tensions de tenue statistique phase-terre et phase-phase;

u_{e2} et u_{p2} sont les surtensions statistiques correspondantes exprimées par unité.

5.4 Calcul des distances électriques

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 :

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

où F est la distance pour les objets flottants (voir 5.4.4).

K_t est donné par:

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

5.4.1 Facteur de dispersion conventionnelle k_s

Le facteur d'intervalle k_s prend en compte la nature statistique de la tension de claquage. À moins que la valeur de la dispersion conventionnelle normalisée, s_e , ne soit connue à partir d'essais représentant la configuration de l'intervalle et de la distance utilisée, une valeur de 0,936 pourra être utilisée. Cette valeur est basée sur une dispersion conventionnelle normalisée de 5 % pour une onde de choc positive (voir annexe B).

5.4.2 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 C).

NOTE 1 – À moins qu'un facteur d'intervalle ne puisse être obtenu à partir de configurations de réseaux existants pour un niveau de tension donné, une valeur conservatrice de $k_g = 1,2$ est recommandée pour tenir compte des diverses configurations.

NOTE 2 – La brochure 72 de la CIGRÉ [1]* et la CEI 60071-2 [2] fournissent plus d'informations concernant la détermination de k_g pour différentes configurations d'intervalle.

5.4.3 Facteur atmosphérique k_a

La contrainte électrique dans l'air dans la zone de travail est 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 D.1 ou calculée avec la méthode donnée à l'annexe D pour une altitude spécifique et un U_{90} donné, comme étant une altitude de référence en-dessous de laquelle les travaux sous tension seront exécutés.

* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie donnée dans l'annexe H.

where

U_{90} is a statistical withstand voltage (the overvoltage at which the insulation exhibits a 90 % probability of withstand);

U_2 is the 2 % statistical overvoltage;

K_s is the statistical factor;

U_{e90} and U_{p90} are the statistical withstand voltages phase-to-earth and phase-to-phase, respectively,

u_{e2} and u_{p2} are the corresponding statistical overvoltages, expressed in per unit.

5.4 Calculation of electrical distances

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 :

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

where F is the floating object distance (see subclause 5.4.4)

K_t is given by:

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

5.4.1 Conventional deviation factor k_s

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

5.4.2 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 C).

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 $k_g = 1,2$ is recommended, to allow for a variety of configurations.

NOTE 2 – CIGRE Brochure 72 [1]* and IEC 60071-2 [2] provide more information concerning the determination of k_g for various gap configurations.

5.4.3 Atmospheric factor k_a

The electric strength of the air insulation in the work area is 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 D.1 or calculated for a specific altitude and U_{90} by the method given in annex D, for a reference altitude below which most live work is done.

* Figures in square brackets refer to the bibliography given in annex H.

Il est recommandé 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 D. Si l'altitude de référence choisie est de 1 000 m, les valeurs applicables du facteur de correction d'altitude peuvent être prises dans le tableau D.2.

5.4.4 Facteur d'objet à potentiel flottant k_f

Les objets à potentiel flottants peuvent décroître ou accroître la tenue électrique de l'intervalle à cause de 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 des objets flottants, de leurs dimensions, de leur forme et de leur position géométrique dans l'intervalle. Toutefois, la présence d'un ou de plusieurs objets flottants réduit la longueur électrique nette de l'intervalle d'air.

Pour calculer les effets des objets flottants, il est recommandé que tous les chemins possibles d'une décharge disruptive soient pris en compte pour déterminer k_f et F .

Les effets des objets flottants sur la tenue de l'intervalle sont pris en compte par un facteur d'objet flottant k_f , et une longueur 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), comme suit:

- a) quand aucun objet flottant n'est présent, $k_f = 1$ et $F = 0$;
- b) le facteur d'objet flottant $k_f = 0,85$ doit être utilisé dans les trois cas suivants:
 - $U_s < 72,5$ kV, $L > 150$ mm, objet flottant fixe;
 - $U_s < 72,5$ kV, $L > 300$ mm, objet flottant mobile;
 - $U_s > 72,5$ kV, $L > 300$ mm, objet flottant fixe ou mobile.

où L est la plus grande dimension de l'un quelconque des objets flottants mesurée suivant l'axe de l'intervalle.

- c) dans tous les autres cas le facteur $k_f = 1$ doit être utilisé.

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

Pour plus de précisions, voir l'annexe F.

5.4.5 Isolateurs

Quand il n'y a pas d'isolateurs détériorés, $k_i = 1,0$. 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 E).

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 D. If a reference altitude of 1 000 m is chosen, the applicable values of the altitude correction factor can be taken from table D.2.

5.4.4 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.

When calculating the effects of floating objects, all possible disruptive discharge paths should be considered in determining the factors k_f and F .

The effects of floating objects on the strength of a gap are accounted for by the floating 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), based on the following configuration:

- a) when no floating object is present, $k_f = 1$ and $F = 0$;
- b) the floating object factor $k_f = 0,85$ shall be applied in the following three cases:
 - $U_s < 72,5$ kV, $L > 150$ mm, floating object stationary;
 - $U_s < 72,5$ kV, $L > 300$ mm, floating object moving;
 - $U_s > 72,5$ kV, $L > 300$ mm, floating object moving or stationary;

where L is the greatest value of any floating object length, taken in the direction along the gap axis;

- c) in all other cases the factor, $k_f = 1$ shall be applied.

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

See annex F for more details.

5.4.5 Insulators

When there is no damaged insulator present, $k_i = 1,0$. 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 E).

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'une quantité minimale d'éléments d'isolation en bon état existe toujours pendant le travail 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 les spécifications minimales d'isolement du réseau ne soient connues 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 minimale d'approche.

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

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 est compris entre 0 et 1 pour les isolateurs en porcelaine, avec $k_d = 0,75$ comme valeur moyenne.

Il faut tenir compte de l'espacement des cornes d'amorçage et des anneaux de répartition (voir annexe E).

L'effet des cornes d'amorçage et des anneaux de répartition est de masquer, dans une certaine mesure, les 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 1 – Les éléments masqués 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 des chaînes simples.

NOTE 2 – Il apparaît, au moins pour les chaînes doubles, que la diminution la plus importante de la tenue diélectrique se produit quand les isolateurs détériorés sont en partie sur une chaîne, en partie sur une autre et ne sont pas en vis-à-vis.

Pour les isolateurs composites, il n'y a pas de méthode établie pour déterminer leur tenue électrique en service. Le risque d'amorçage pendant le travail sous tension ne peut donc pas être déterminé.

5.4.6 Exemple de configurations de travail relatives aux valeurs de k_f et k_g

Quand l'isolation d'un réseau comprend un ensemble d'isolateurs simples qui peuvent être jugés comme étant défectueux, il devient évident qu'ils peuvent tenir la tension du réseau, mais il n'est pas possible de les vérifier pour savoir s'ils peuvent résister à une surtension sans contournement. La décision d'établir s'il est sûr de travailler sur ces isolateurs doit être laissée à l'expérience de l'entreprise qui doit réaliser les travaux.

La figure 2 illustre plusieurs opérations différentes de travail sous tension et les configurations dans lesquelles elles sont réalisées.

Le tableau 1 fournit la plage des valeurs de k_f et k_g pour les configurations représentées à la figure 2.

The effect of damaged insulation on the withstand voltage in the work area shall be allowed for by ensuring that a minimum amount of undamaged system insulation 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 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 minimum approach distance.

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

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 E).

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 1 – 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.

NOTE 2 – It appears that, at least for duplex strings, the most severe reduction of the dielectric strength occurs when damaged insulators are partly in one string, partly in the other, and not in adjacent positions in each string.

For non-ceramic insulators, there is no established method for determining their electrical strength while in service. The risk of flashover during live work can therefore not be determined.

5.4.6 Examples of work configuration relative to values of k_f and k_g

When the system insulation comprises only single insulators which are suspected to be damaged, it is clear that they will sustain the power frequency voltage, but it is not possible to determine whether or not they will sustain overvoltages without a flashover. The decision as to whether it is safe to work on these insulators has to be left to the experience of the companies undertaking the work.

Figure 2 illustrates various distinct live working tasks and the configurations in which they can occur.

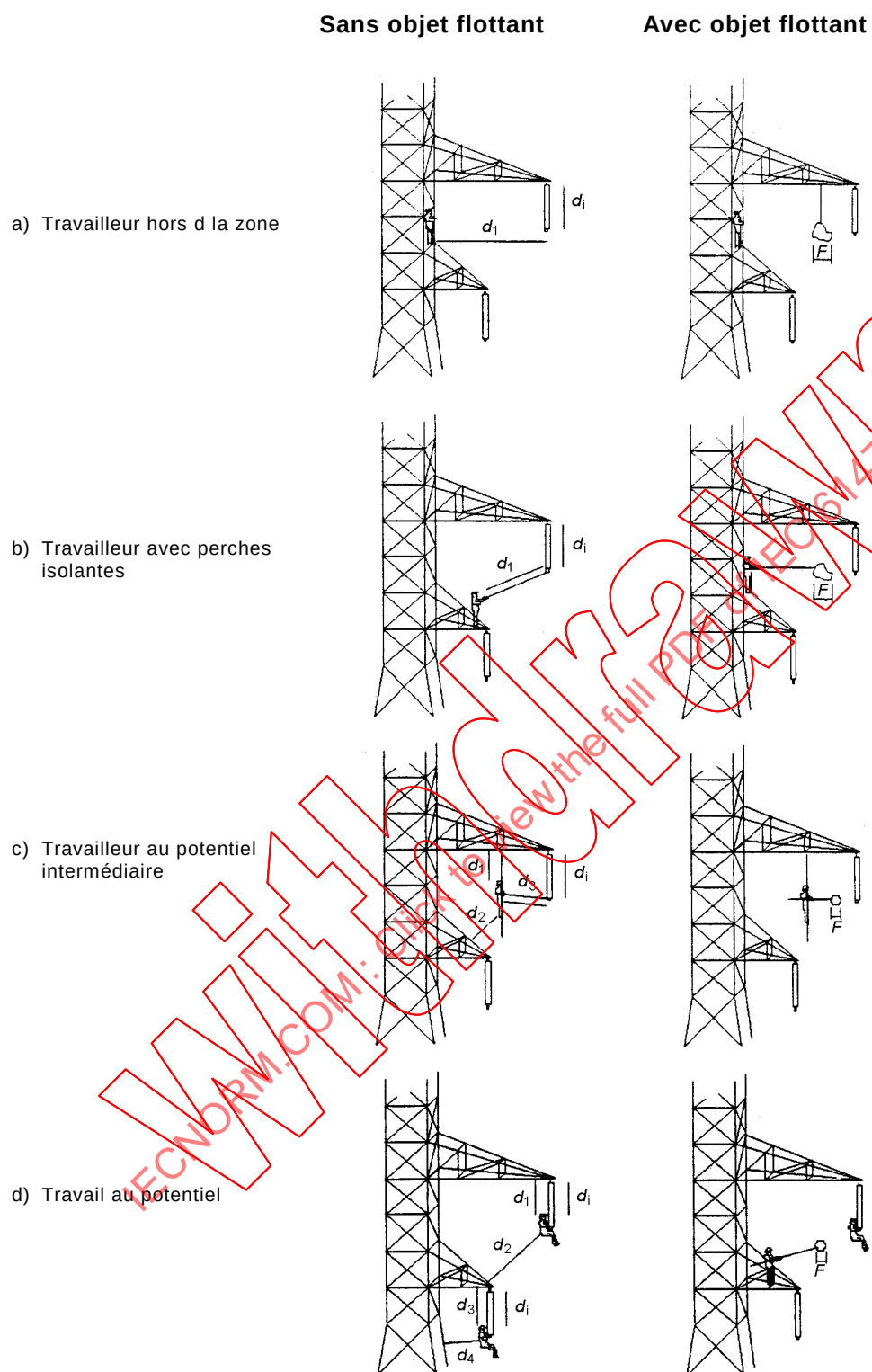
Table 1 provides ranges of values of k_f and k_g for the configurations illustrated in figure 2.

Tableau 1 – Distance pour les opérations de la figure 2 (phase-terre)

Figure 2	Cas de base $k_f^{(1)}$	Objet flottant $k_f^{(2)}$	$k_g^{(3)}$	Distance minimale
a)	1,0	0,85	1,1 à 1,6	$d_1 > D_A$
b)	1,0	0,85	1,1 à 1,6	$d_1 > D_A$
c)	0,85	0,85	1,1 à 1,45	$D_A < \text{à la plus petite distance entre } d_1 + d_3 \text{ ou } d_2 + d_3$
d)	1,0	0,85	1,0 à 1,45	$D_A < \text{à la plus petite distance entre } d_1 \text{ ou } d_2, \text{ et } d_3 \text{ ou } d_4$
NOTE 1 – Dans tous les cas, il est recommandé que tous les isolateurs détériorés soient pris en compte par k_i. NOTE 2 – Avec un objet flottant dans l'intervalle d'air, additionner la dimension maximale F de l'objet pour obtenir D_U.				
1) Se réfère à la colonne de gauche des croquis de la figure 2. 2) Se réfère à la colonne de droite des croquis de la figure 2. 3) Plage des valeurs; voir annexe C pour calculer k_g.				

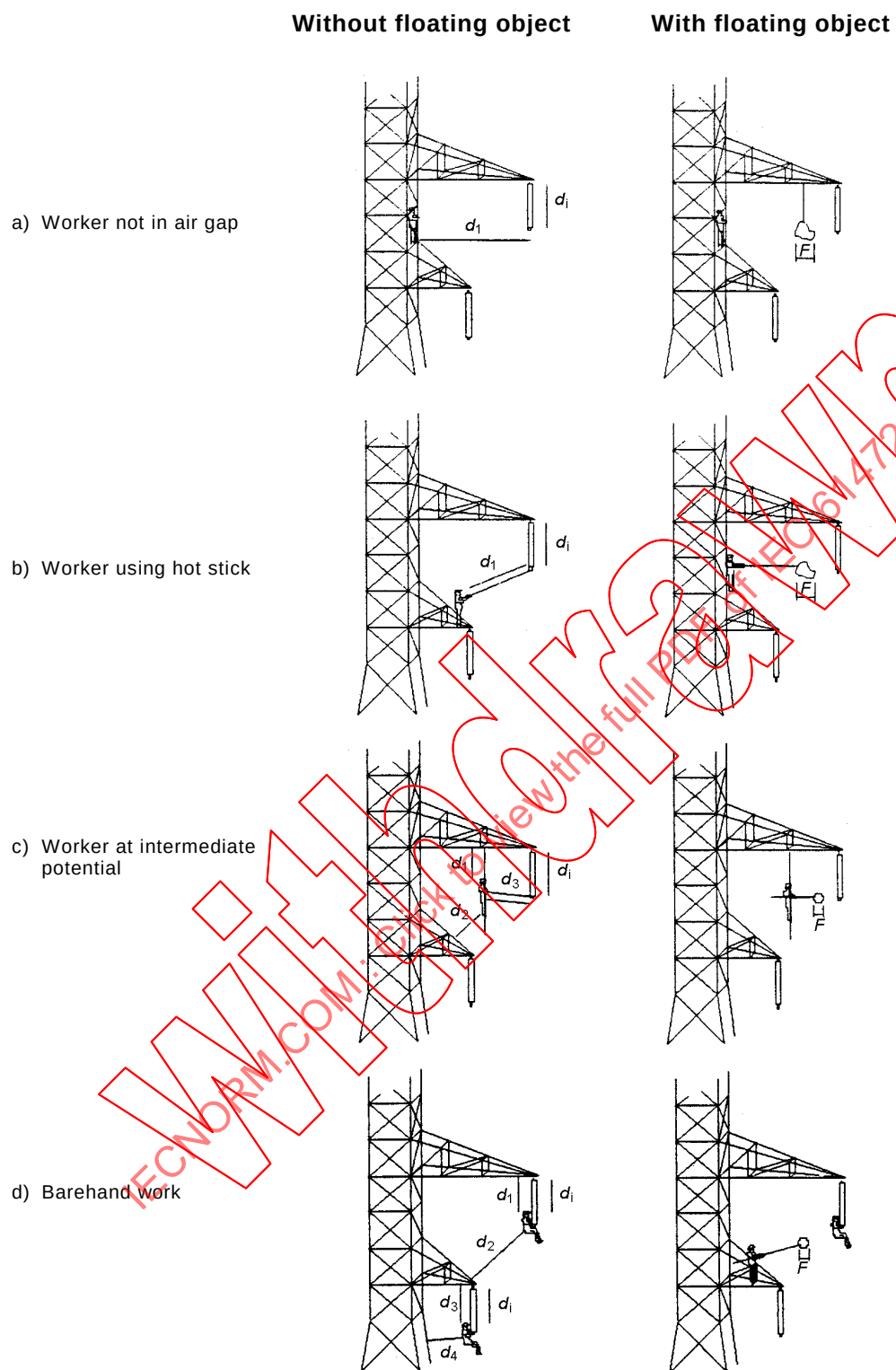
Table 1 – Distances for tasks of figure 2 (phase-to-earth)

Figure 2	Base case $k_f^{(1)}$	Floating object $k_f^{(2)}$	$k_g^{(3)}$	Minimum distance
a)	1,0	0,85	1,1 to 1,6	$d_1 > D_A$
b)	1,0	0,85	1,1 to 1,6	$d_1 > D_A$
c)	0,85	0,85	1,1 to 1,45	$D_A < \text{the smallest distance between } d_1 + d_3 \text{ or } d_2 + d_3$
d)	1,0	0,85	1,0 to 1,45	$D_A < \text{the smallest distance between } d_1 \text{ or } d_2, \text{ and } d_3 \text{ or } d_4$
NOTE 1 – In each case, any damaged insulators should be taken into account by k_f .				
NOTE 2 – With floating objects in the air gap, add the maximum dimension F of the object to obtain D_U .				
1) Refers to the left column of sketches in figure 2.				
2) Refers to the right column of sketches in figure 2.				
3) Overall range of values; see annex C to calculate k_g .				



IEC 1 510/98

Figure 2 – Tâches types de travail sous tension



IEC 1510/98

Figure 2 – Typical live working tasks

6 Evaluation des risques

Le risque global de claquage de l'isolation sur le site 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;
- le front réel de l'onde de surtension transitoire est moins contraignant que le front critique;
- environ la moitié des surtensions transitoires sont de polarité négative et sont moins sévères;
- la fréquence et l'amplitude des surtensions transitoires sont réduites par la neutralisation des ré-enclencheurs.

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 ne survienne durant le travail sous tension, lorsqu'une distance ergonomique D_E est retenue, 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_A 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 calculée 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 d'obtenir le même risque de contournement.

7 Calcul de la distance minimale d'approche

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

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

où

F est la longueur de l'objet à potentiel flottant (voir 5.4.4);

$U_{90} = K_S U_2$ provient de (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 G), la distance minimale d'approche D_A , peut alors être déterminée par l'équation (1):

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

NOTE – Les valeurs de distances ergonomiques choisies diffèrent suivant les utilisateurs. Elles sont généralement comprises entre 0,2 m et 1 m (voir annexe G).

6 Evaluation of risks

The overall risk of breakdown of the insulation at the work area 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;
- 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 reclosure 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 area 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 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.

7 Calculation of minimum approach distance

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

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

where

F is the floating object length (see 5.4.4);

$U_{90} = K_S U_2$ (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 G), 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 G).

Un exemple de résultat de calcul est donné à la figure 3 pour les valeurs des différents paramètres. La distance électrique D_U est tracée en fonction de la tension la plus élevée du réseau, U_S , pour différentes valeurs à 2 % de la surtension de manoeuvre u_{e2} et pour $K_t = 1,1$; $k_s = 0,936$; $k_g = 1,2$; k_a tiré du tableau D.1 pour une altitude de 1 000 m; k_f et $k_i = 1,0$ et $F = 0$.

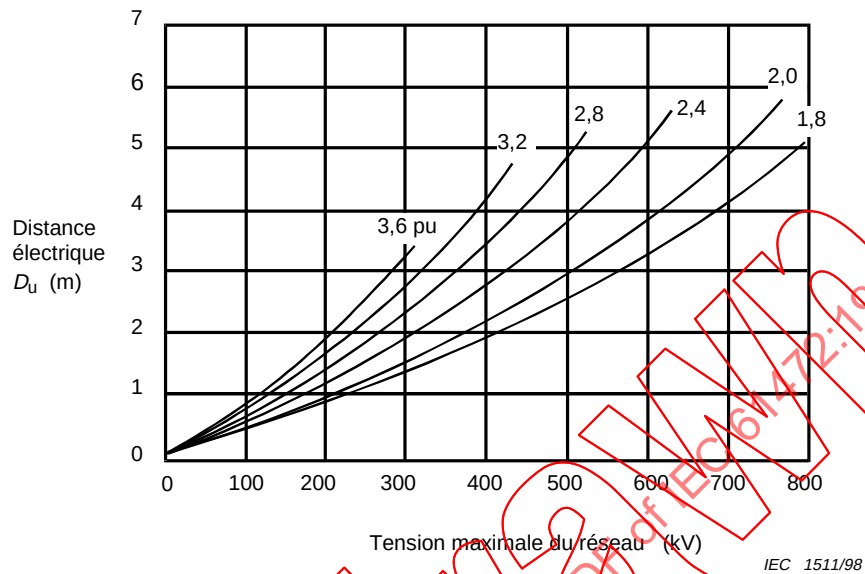


Figure 3 – Calcul de la distance minimale d'approche

An example of the calculation results is shown in figure 3 for values of the various factors. The electrical distance D_U is plotted against highest system voltage U_s for various levels of 2 % switching overvoltage u_{e2} , and for $K_t = 1,1$; $k_s = 0,936$; $k_g = 1,2$; k_a taken from table D.1 for 1 000 m altitude; k_f and $k_i = 1,0$ and $F = 0$.

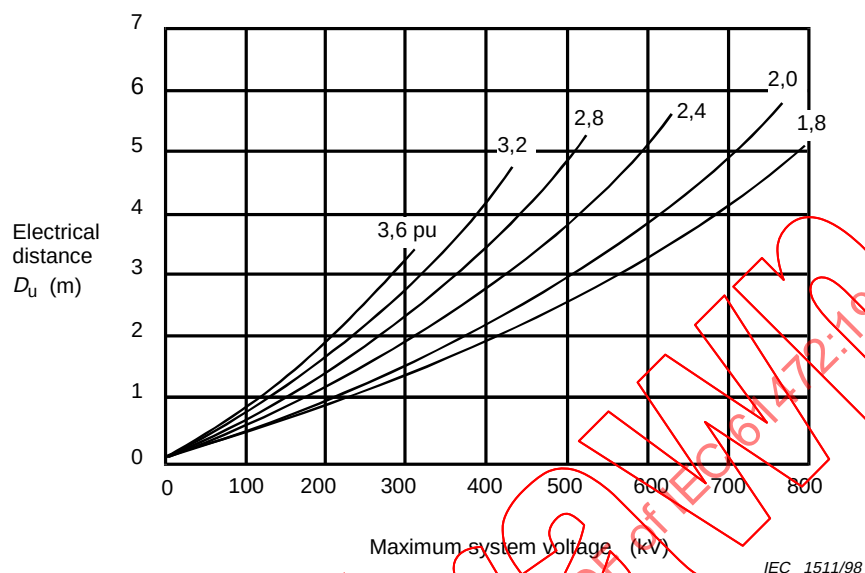


Figure 3 – Calculation of minimum approach distance

Annexe A **(informative)**

Surintensions

Dans la détermination de la distance minimale d'approche, cinq types distincts de contrainte électrique doivent être considérés. Chaque type de contrainte a ses propres effets et tous peuvent ne pas être présents en même temps. Les cinq types sont les suivants:

- la tension nominale du réseau (voir CEI 60038 [3]);
- la tension la plus élevée du réseau (U_s) [VEI 601-01-23];
- la surtension temporaire [VEI 604-03-12],
- la surtension transitoire [VEI 604-03-13]:
 - de manoeuvre,
 - de foudre,
- la tension induite
 - électrique à fréquence industrielle (capacitive),
 - magnétique à fréquence industrielle (inductive),
 - transitoire.

Suit une discussion des points essentiels associés avec chaque contrainte électrique, en rapport avec la distance minimale d'approche.

A.1 Tension nominale du réseau

Les tensions nominales de réseau sont données dans la CEI 60038. Ces tensions sont associées à des domaines normalisés. La tension réelle du réseau peut ne pas être conforme à ce guide.

A.2 Tension la plus élevée d'un réseau

En réalité, le calcul de la surtension est basé sur la tension la plus élevée du réseau, U_s , qui est spécifique au réseau exploité et qui peut être ou ne pas être connue. A moins que sa valeur réelle ne soit connue, U_s peut être déterminée à partir de la tension nominale du réseau en utilisant la valeur correspondante de la tension la plus élevée pour le matériel, U_m , donnée dans la CEI 60038, c'est-à-dire la valeur efficace la plus élevée de la tension phase-phase pour laquelle le matériel est conçu.

A.3 Surtension temporaire

Une surtension temporaire peut être causée par des défauts du réseau, résonance, déconnexion soudaine de charge et d'autres conditions d'exploitation. Son usage le plus significatif et le plus commun dans la détermination de la distance minimale d'approche concerne la surtension résultant des défauts à la terre et qui survient sur les phases non en défaut et peut atteindre 1,7 par unité (pu) à l'endroit du défaut sur certains réseaux.

Annex A (informative)

Overvoltages

In establishing the minimum approach distance five distinct types of electrical stresses shall be considered. Each type of stress has its own influence; all may not be present at any one time. They are as follows:

- nominal system voltage (see IEC 60038 [3]);
- highest voltage of a system U_s [IEV 601-01-23];
- temporary overvoltage [IEV 604-03-12];
- transient overvoltage [IEV 604-03-13]:
 - switching;
 - lightning;
- induced voltage:
 - power frequency electrical (capacitive);
 - power frequency magnetic (inductive);
 - transient.

A discussion follows of the essential points associated with each electrical stress as related to minimum approach distance.

A.1 Nominal system voltage

Nominal system voltages are presented in IEC 60038. These voltages are associated with standard ranges. Actual system voltage may not follow these guidelines.

A.2 Highest voltage of a system

In reality, the calculation of the overvoltage is based on the highest voltage of a system U_s which is specific to the operating system and may or may not be known. Unless its actual value is known U_s may be derived from the nominal voltage of the system by using the corresponding value of the highest voltage for equipment U_m , given in IEC 60038, i.e. the highest r.m.s. value of phase-to-phase voltage for which the equipment is designed.

A.3 Temporary overvoltage

A temporary overvoltage can be generated by system faults, resonance, sudden load rejection and some other operating conditions. Its most common and significant use in establishing minimum approach distance is for earth fault-generated overvoltage, which arises on the unfaulted phases and can reach 1,7 per unit (pu) at the fault point on some systems.

A.4 Surtension transitoire

Une surtension transitoire a une forme dont on peut tenir compte pour la distance minimale d'approche dans la mesure où elle est en relation avec un certain nombre de facteurs, y compris:

- la mise sous tension;
- l'apparition d'un défaut;
- l'élimination d'un défaut;
- la mise hors tension et la re-connexion d'une partie du réseau de transmission ou de son matériel (par exemple transformateur ou batteries de condensateurs).

Dans les réseaux avec un facteur de défaut à la terre élevé (par exemple dans un réseau compensé par bobine d'extinction ou à neutre isolé) les surtensions transitoires dues aux défauts à la terre doivent aussi être prises en compte.

La forme et l'amplitude des surtensions transitoires qui peuvent apparaître sur le lieu de travail varient considérablement, mais généralement ces surtensions sont très amorties et de faible durée.

A.4.1 Surtension de manoeuvre

Les surtensions de manoeuvre maximales qui peuvent atteindre le lieu de travail sont habituellement dues aux manoeuvres sur la ligne ou le matériel sur lequel le travail est en cours. Quand cela est possible, les dispositifs de ré-enclenchement sont mis hors service pendant le travail de façon à ce que la ligne ne soit pas ré-alimentée si elle est déclenchée pendant le travail. Il y a deux raisons à cela. Premièrement, s'il y a un amorçage accidentel sur le site de travail, cela donne le temps aux opérateurs de le protéger avant la ré-alimentation de l'installation. Deuxièmement, cela limite l'origine des surtensions maximales aux transitoires de déclenchement de mise hors tension, à l'exception des cas très rares de ré-amorçage d'un disjoncteur.

L'amplitude de la surtension de manoeuvre dépend des performances du disjoncteur et des caractéristiques électriques de la ligne. Aussi varie-t-elle d'un réseau à l'autre. L'amplitude est fortement réduite, avec des disjoncteurs disposant de résistances à la fermeture, au ré-enclenchement et à l'ouverture, ou lorsque des parafoudres à oxyde métallique sont installés et fonctionnent convenablement.

La valeur des surtensions de manoeuvre pour chaque niveau de tension d'un réseau d'alimentation peut être déterminée par des études avec un analyseur de transitoire de réseau (TNA) ou avec un ordinateur. De telles études devraient fournir une valeur de la surtension statistique à 2 %, U_2 , à partir de laquelle la distance minimale d'approche peut être déterminée. Cependant, si seulement la surtension maximale globale pu est connue, cette valeur est prise comme valeur tronquée, c'est-à-dire la valeur au-delà de laquelle aucune surtension ne peut se produire et qui est prise comme étant à trois écarts types au-dessus de la moyenne (CEI 60071-2).

Les relations empiriques suivantes données dans la CEI 60071-2 peuvent être utilisées pour estimer la surtension statistique à 2 %, U_2 à partir des valeurs tronquées (en employant dans chaque cas la méthode «valeur crête» par phase).

A.4 Transient overvoltage

A transient overvoltage has a shape which can be regarded for minimum approach distance as that associated with a number of factors, including:

- energization;
- fault initiation;
- fault clearing;
- de-energizing and reclosing of a portion of the transmission system or its equipment (e.g. transformers or capacitor banks).

In systems with high earth fault factors (e.g. in resonant earthed or unearthed neutral systems), transient overvoltages due to earth faults shall also be considered.

Transient overvoltages that can appear at the work site vary considerably in shape and magnitude, but they are generally highly damped and of short duration.

A.4.1 Switching overvoltage

The maximum switching overvoltages that can reach the work site are usually due to switching of the line or equipment on which work is being performed. When feasible, the reclosing devices are made inoperative during live working, so that the line is not re-energized should it trip while work is in progress. This serves two purposes. Firstly, should there be an accidental flashover in the work area, it allows time for workers to safeguard the work area before re-energization of the installation. Secondly, it limits the source of maximum overvoltages to de-energizing transients, except in the exceptionally rare instance of a circuit-breaker restriking.

The magnitude of the switching overvoltage depends on the performance of the circuit-breaker and the electrical characteristics of the line. Therefore, it varies from one system to another. With circuit-breakers using closing, reclosing and opening resistors, or when metal oxide surge arresters are installed and operating properly, the magnitude is highly reduced.

The value of switching overvoltages for each voltage level of a power system can be determined by a transient network analyser (TNA) or a digital computer study. Such a study should provide a value for the 2 % statistical overvoltage U_2 from which the minimum approach distance can then be determined. However, if only the overall maximum pu overvoltage is known, this value is taken to be the truncated value, that is the value beyond which no overvoltages occur and which is taken (IEC 60071-2) to be three deviations above the mean.

The following empirical relationships given in IEC 60071-2 can then be used to estimate the 2 % statistical overvoltage U_2 from the truncated values (using the "phase-peak" method in each case).

Cas des surtensions phase-terre:

Pour la surtension statistique à 2 % u_{e2} par unité (pu)

écart type	$\sigma_e = 0,25 (u_{e2} - 1)$
valeur tronquée	$u_{et} = 1,25 u_{e2} - 0,25$

d'où:

$$u_{e2} = (u_{et} + 0,25) / 1,25$$

Cas des surtensions phase-phase:

Pour la surtension statistique phase-phase à 2 % u_{p2} :

écart type	$\sigma_p = 0,25 (u_{p2} - 1,73)$
valeur tronquée	$u_{pt} = 1,25 u_{p2} - 0,43$

d'où:

$$u_{p2} = (u_{pt} + 0,43) / 1,25$$

Si aucune donnée sur les surtensions phase-phase n'est disponible, une valeur pour u_{p2} peut être estimée en utilisant le diagramme donné dans la CEI 60071-2.

Pour les tensions de réseaux inférieures à 72,5 kV, si la valeur de la surtension maximale de manoeuvre par unité n'est pas connue à partir d'études ou d'essais sur le réseau, il est recommandé d'utiliser les valeurs de surtension statistique (2 %) figurant dans les tableaux A.3 et A.4.

A.4.2 Surtensions de foudre

Il est recommandé qu'un travail sur ou à proximité d'une ligne ou d'un matériel sous tension ou hors tension ne soit pas effectué quand la foudre est perçue dans le voisinage immédiat (par exemple 5 km à 10 km). Un orage éloigné, non perceptible par les opérateurs peut causer des surtensions sur les installations sous tension. Une telle surtension est atténuée au cours de sa propagation vers la zone de travail. Elle peut aussi doubler à une extrémité éloignée et ouverte de la ligne. Pour un travail en sécurité, la surtension doit être inférieure à la valeur de la tension de tenue sur l'aire de travail U_{90} . C'est le cas lorsque la zone de travail est à plus de 10 km du coup de foudre, même avec une ligne ayant une extrémité ouverte. Puisque la foudre peut généralement être détectée visuellement ou de façon audible à cette distance, il est recommandé que le travail sous tension ne soit pas réalisé si les éclairs sont vus ou si le tonnerre est entendu.

NOTE – Si la foudre provoque un défaut quelque part sur le réseau, il y aura une surtension causée par ce défaut, et aussi une surtension de déclenchement; si les ré-enclencheurs ne sont pas hors service, une surtension plus sévère de fermeture se produira. Ces phénomènes solliciteront toute l'isolation dans la zone de travail.

Si des éclateurs sont utilisés dans la zone de travail, la valeur U_{90} sera grandement limitée par ces éclateurs et un amorçage de l'intervalle peut survenir même si le coup de foudre est beaucoup plus loin que 10 km.

Bien que l'éclateur apporte de cette manière une protection complémentaire contre les contournements dus à la foudre sur la zone de travail, il peut aussi causer des mises hors service prolongées indésirables, conséquence de la suppression des ré-enclencheurs.

For phase-to-earth overvoltages:

For the 2 % statistical overvoltage u_{e2} in per unit (pu):

$$\begin{aligned} \text{standard deviation} & \quad \sigma_e = 0,25 (u_{e2} - 1) \\ \text{truncated value} & \quad u_{et} = 1,25 u_{e2} - 0,25 \end{aligned}$$

hence:

$$u_{e2} = (u_{et} + 0,25) / 1,25$$

For phase-to-phase overvoltages:

For the 2 % statistical overvoltage phase-to-phase u_{p2} :

$$\begin{aligned} \text{standard deviation} & \quad \sigma_p = 0,25 (u_{p2} - 1,73) \\ \text{truncated value} & \quad u_{pt} = 1,25 u_{p2} - 0,43 \end{aligned}$$

hence:

$$u_{p2} = (u_{pt} + 0,43) / 1,25$$

If no phase-to-phase overvoltage data is available a value for u_{p2} can be estimated using the diagram given in IEC 60071-2.

For system voltages above 72,5 kV, if the value of the maximum per unit switching overvoltage is not known from system tests or studies, the statistical (2 %) overvoltage values shown in tables A.3 and A.4 should be used.

A.4.2 Lightning overvoltages

Work on or near live or dead lines or equipment should not be done when lightning is perceived in the immediate vicinity (e.g. 5 km to 10 km). A remote storm, not noticeable to the workers, may cause an overvoltage on the live installations. Such an overvoltage is attenuated as it travels toward the work area. It may also double at the remote open end of a line. For safe working, the overvoltage shall be less than the value of the withstand strength at the work area U_{90} . This is the case when the work area is more than 10 km away from the source of the lightning strike, even with an open-ended line. Since lightning can usually be visually or audibly detected at this distance, live work should not be conducted if lightning can be seen or thunder heard.

NOTE – If lightning causes a fault anywhere on a system, there will be a fault-generated overvoltage, an opening overvoltage and, if reclosing is not inoperative, a more severe closing overvoltage will also result. These events stress all the insulation at the work area.

If protective gaps are used at the work area the U_{90} value will be greatly limited by the gaps and a gap flashover can occur even if the lightning strike is much further away than 10 km.

While the gap thus provides added protection against lightning flashover in the work area, it can also cause undesirable sustained outages, due to the auto reclosing device being inoperative.

A.5 Tension induite

Une installation qui est déconnectée de sa source normale d'alimentation (à la terre ou non) est soumise à de l'induction provenant des autres installations alimentées. Lorsqu'un travail doit être réalisé sur de telles installations, il convient de maintenir une distance minimale d'approche suffisante pour le niveau de tension induite. Pour ces installations, la tension maximale induite par couplage capacitif est généralement inférieure à 30 % de la tension phase-terre des installations alimentées voisines. Si la tension induite de l'installation sur laquelle on travaille n'est pas connue, il convient d'utiliser la valeur de 30 %.

Pour des installations présentant des conditions de couplages importants tel le cas d'une ligne aérienne par rapport à une ligne souterraine, la tension réelle dans la zone de travail doit être déterminée avant que la partie soumise à l'induction soit approchée. Il est recommandé de tenir compte de la possibilité de défaut survenant sur l'installation sous tension. Dans ce cas, la tension transitoire induite par couplage sera aussi importante.

**Tableau A.1 – Tensions de réseau jusqu'à 72,5 kV –
Tensions typiques de tenue au choc de manoeuvre phase-terre**

Tension la plus élevée du réseau U_s kV (eff.)	Surtension de manoeuvre à 2 % u_{e2} pu			Tension de tenue de 90 % au choc de manoeuvre U_{90} kV ¹⁾			Distance électrique pour u_{e2} normal D_U cm ²⁾
	Basse	Normale	Haute	Basse	Normale	Haute	
1,0	2,2	2,7	3,5	2	2,4	3,1	5
7,2	2,2	2,7	3,5	14	17	23	5
17,5	2,2	2,7	3,5	35	42	55	7
24,0	2,2	2,7	3,5	47	58	75	11
26,4	2,2	2,7	3,5	52	64	83	12
36,0	2,2	2,7	3,5	71	87	113	19
40,5	2,2	2,7	3,5	80	98	127	21
52,0	2,2	2,7	3,5	103	126	163	29
72,5	2,2	2,7	3,5	143	176	228	42

1) Calculée en utilisant la formule: $U_{90} = 1,1 \sqrt{2} / \sqrt{3} U_s u_{e2}$.

2) En utilisant l'équation (2) avec 5 cm au minimum et $k_a = 0,901$ (altitude de référence 1 000 m).

A.5 Induced voltage

An installation that is disconnected from its normal source of supply (either earthed or unearthed) may be subjected to induction from other energized installations. When work is performed on such an installation, a minimum approach distance sufficient for the induced voltage level should be maintained. For these installations, the maximum voltage induced by capacitive coupling is generally less than 30 % of the phase-to-earth voltage of the adjacent energized installation. If the induced voltage on the installation being worked on is not known, the 30 % value should be used.

For installations with a significant induced coupling situation such as an aerial to underground line, the actual voltage at the work area shall be established before the energized part is approached. Consideration should be given to the possibility of a fault occurring on the live installation, in which case the transient coupled induced voltage will also be significant.

**Table A.1 – System voltages up to 72,5 kV –
Typical switching impulse withstand voltages phase-to-earth**

Highest system voltage U_s kV (r.m.s.)	2 % switching overvoltage u_{e2} pu			90 % switching impulse withstand voltage U_{90} (kV ¹⁾)			Electrical distance for common u_{e2} D_U cm ²⁾
	Low	Common	High	Low	Common	High	
1,0	2,2	2,7	3,5	2	2,4	3,1	5
7,2	2,2	2,7	3,5	14	17	23	5
17,5	2,2	2,7	3,5	35	42	55	7
24,0	2,2	2,7	3,5	47	58	75	11
26,4	2,2	2,7	3,5	52	64	83	12
36,0	2,2	2,7	3,5	71	87	113	19
40,5	2,2	2,7	3,5	80	98	127	21
52,0	2,2	2,7	3,5	103	126	163	29
72,5	2,2	2,7	3,5	143	176	228	42

1) Calculated using formula $U_{90} = 1,1 \sqrt{2} / \sqrt{3} U_s u_{e2}$.

2) Using equation (2) with 5 cm minimum and $k_a = 0,901$ (1 000 m reference altitude).

**Tableau A.2 – Tensions de réseau jusqu'à 72,5 kV –
Tensions typiques de tenue au choc de manoeuvre phase-phase**

Tension la plus élevée du réseau U_s kV (eff.)	Surtension de manoeuvre à 2 % u_{p2} pu ¹⁾			Tension de tenue de 90 % au choc de manoeuvre U_{90} kV ³⁾			Distance électrique pour u_{p2} normal D_U cm ²⁾
	Basse	Normale	Haute	Basse	Normale	Haute	
1,0	3,3	4,0	5,1	3	3,6	4,6	5
7,2	3,3	4,0	5,1	21	26	33	5
17,5	3,3	4,0	5,1	52	63	80	12
24,0	3,3	4,0	5,1	71	86	110	18
26,4	3,3	4,0	5,1	78	95	121	21
36,0	3,3	4,0	5,1	107	129	165	30
40,5	3,3	4,0	5,1	120	146	186	34
52,0	2,2	2,7	3,5	154	187	238	45
72,5	2,2	2,7	3,5	215	260	332	64

1) Calculée en utilisant la formule: $u_{p2} = 1,33 u_{e2} + 0,4$
2) En utilisant l'équation (2) avec 5 cm minimum et $k_a = 0,901$ (altitude de référence 1 000 m).
3) Calculée en utilisant la formule: $U_{90} = 1,1 \sqrt{2} / \sqrt{3} U_s u_{e2}$.

**Tableau A.3 – Tension de réseaux au-dessus de 72,5 kV –
Surtensions typiques de manoeuvre à 2 % phase-terre**

Tension la plus élevée du réseau U_s kV (eff.)	Surtension de manoeuvre à 2 % u_{e2} pu			
	Fermeture		Ré-enclenchement des trois phases	
	Sans résistance	Avec résistance	Sans résistance	Avec résistance
>72,5 à 245	2,3	–	3,0	–
300 à 550	2,2	1,8	2,6	2,1
800	–	1,8	–	2,0

**Tableau A.4 – Tension de réseaux au-dessus de 72,5 kV –
Surtensions typiques de manoeuvre à 2 % phase-phase**

Tension la plus élevée du réseau U_s kV (eff.)	Surtension de manoeuvre à 2 % u_{p2} pu			
	Fermeture		Ré-enclenchement des trois phases	
	Sans résistance	Avec résistance	Sans résistance	Avec résistance
>72,5 à 245	3,5	–	4,5	–
300 à 550	3,4	2,9	3,9	3,2
800	–	2,9	–	3,2

**Table A.2 – System voltages up to 72,5 kV –
Typical switching impulse withstand voltages phase-to-phase**

Highest system voltage U_s kV (r.m.s.)	2 % switching overvoltage u_{p2} pu ¹⁾			90 % switching impulse withstand voltage U_{90} kV ³⁾			Electrical distance for common u_{p2} D_U cm ²⁾
	Low	Common	High	Low	Common	High	
1,0	3,3	4,0	5,1	3	3,6	4,6	5
7,2	3,3	4,0	5,1	21	26	33	5
17,5	3,3	4,0	5,1	52	63	80	12
24,0	3,3	4,0	5,1	71	86	110	18
26,4	3,3	4,0	5,1	78	95	121	21
36,0	3,3	4,0	5,1	107	129	165	30
40,5	3,3	4,0	5,1	120	146	186	34
52,0	2,2	2,7	3,5	154	187	238	45
72,5	2,2	2,7	3,5	215	260	332	64

1) Calculated using formula $u_{p2} = 1,33 u_{e2} + 0,4$.

2) Using equation (2) with 5 cm minimum and $k_a = 0,901$ (1 000 m reference altitude).

3) Calculated using formula $U_{90} = 1,1 \sqrt{2} / \sqrt{3} U_s u_{e2}$.

**Table A.3 – System voltages over 72,5 kV –
Typical 2 % switching overvoltages phase-to-earth**

Highest system voltage U_s kV (r.m.s.)	2 % switching overvoltage u_{e2} pu			
	Closing		Three-phase reclosing	
	Without resistors	With resistors	Without resistors	With resistors
>72,5 to 245	2,3	–	3,0	–
300 to 550	2,2	1,8	2,6	2,1
800	–	1,8	–	2,0

**Table A.4 – System voltages over 72,5 kV –
Typical 2 % switching overvoltages phase-to-phase**

Highest system voltage U_s kV (r.m.s.)	2 % switching overvoltage u_{p2} pu			
	Closing		Three-phase reclosing	
	With resistors	Without resistors	Without resistors	With resistors
>72,5 to 245	3,5	–	4,5	–
300 to 550	3,4	2,9	3,9	3,2
800	–	2,9	–	3,2

Annexe B (informative)

Tenue diélectrique de l'air

L'onde de la tension de choc de manoeuvre 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 manoeuvre 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 est recommandé que la distance minimale d'approche soit déterminée en supposant une forme d'onde avec une durée jusqu'à la crête critique.

D'après un résultat des nombreux essais aux ondes de choc, 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 jusqu'à 25 m, la tenue diélectrique U_{50RP} à une onde de polarité positive ayant un temps de front critique, est donnée par (formule 4.5 de la brochure 72 de la CIGRÉ)

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

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 coefficient K_t comme suit:

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

soit:

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

En transformant l'équation (B.3) et en prenant en compte la dimension 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). La dispersion conventionnelle de cette distribution varie avec la forme d'onde, la polarité de la surtension, la géométrie de l'intervalle et les conditions atmosphériques.

Annex B (informative)

Dielectric strength of air

The shape of a standard switching impulse used for tests has a 250 μ s time-to-crest and a 2 500 μ s tail. The switching overvoltages arising on operating power systems have a time-to-crest ranging from 50 μ s to 2 000 μ s. 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 wave form 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 up to 25 m, the positive-polarity critical-front-time dielectric strength U_{50RP} is given by (formula 4.5 of CIGRÉ Brochure 72):

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

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_f as follows:

$$U_{90} = K_f U_{50RP} \quad (\text{B.2})$$

that is:

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

By transforming equation (B.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 wave form, polarity of the overvoltage, gap geometry and atmospheric conditions.

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

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

où s_e est la valeur normalisée de la dispersion conventionnelle de U_{50} , exprimée en pour-cent. En définissant k_s comme:

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

l'équation (B.4) devient:

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

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 concerné, il est recommandé qu'une valeur de $s_e = 5 \%$ soit retenue. L'équation (B.5) devient alors:

$$k_g = 0,936 \quad (\text{B.7})$$

Withd 2013
 IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61472:1998

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

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

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

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

equation (B.4) becomes:

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

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 (B.5) then becomes:

$$k_g = 0,936 \quad (\text{B.7})$$

Annexe C (informative)

Facteur d'intervalle k_g

La forme et la dimension des parties conductrices reliées à la source de tension et à la terre sont les caractéristiques qui ont la plus grande influence sur la tenue électrique de l'intervalle 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 manoeuvre de polarité positive appliqué à la tige.

Si la partie conductrice mise à la terre n'est pas un plan et/ou si la partie conductrice reliée à la source de tension est plus grosse qu'une tige, U_{50} est plus grande 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 barre) et plus elle est loin de la terre plane, plus la valeur de k_g est grande et se rapproche de la valeur limite correspondant à la configuration isolée conducteur tige qui conduit à la tenue électrique la plus grande.

Les valeurs typiques de facteur d'intervalle pour les configurations courantes figurent dans le tableau C.1 extrait de la CIGRÉ 72 et figurent aussi dans la CEI 60071-2. Le tableau C.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.

Il est suggéré de choisir une valeur typique de facteur d'intervalle à partir des valeurs apparaissant dans le tableau C.1 pour calculer la distance électrique. Dans certaines circonstances, comme celles d'un travail sur un ancrage fixé sur une structure importante 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 importantes, 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.

Annex C (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 and/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 C.1, reproduced from CIGRÉ 72, and also in IEC 60071-2. Table C.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 C.1, to calculate the electrical distance. Under certain circumstance, 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.

Table C.1 – Facteurs d'entrefer pour des configurations types

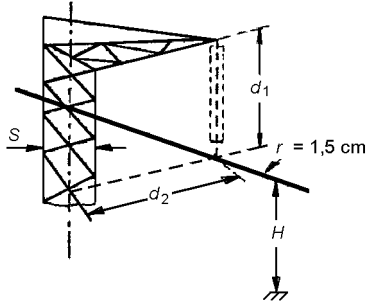
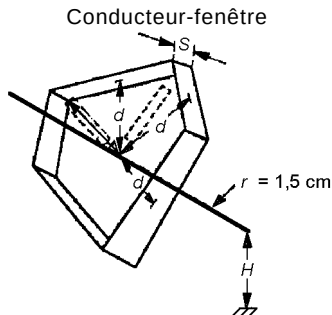
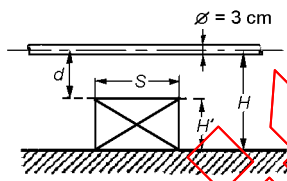
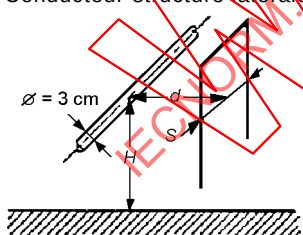
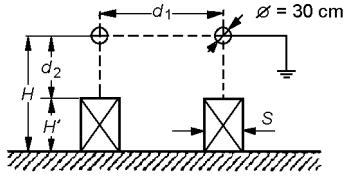
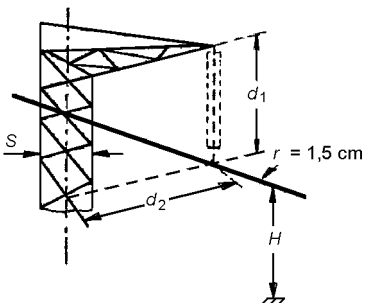
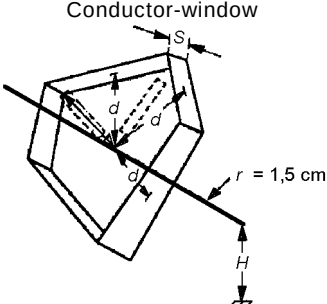
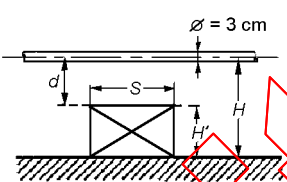
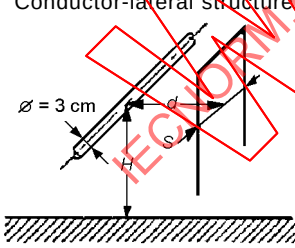
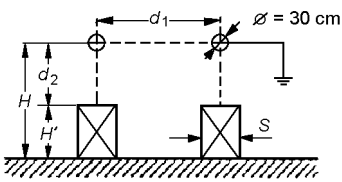
Configuration	Formule	Valeur typique
Conducteur-console 	$k = 1,45 + 0,015 \left(\frac{H}{d_1} - 6 \right) + 0,35 (e^{-8 S/d_1} - 0,2) + 0,135 \left(\frac{d_2}{d_1} - 15 \right)$ Valide dans les limites de: $d_1 = 2 \div 10 \text{ m} \quad d_2/d_1 = 1 \div 2$ $S/d_1 = 0,1 \div 1 \quad H/d_1 = 2 \div 10$	$k = 1,45$
Conducteur-fenêtre 	$k = 1,25 + 0,005 \left(\frac{H}{d} - 6 \right) + 0,25 (e^{-8 S/d} - 0,2)$ Valide dans les limites de: $d = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d = 0,1 \div 1 \quad H/d = 2 \div 10$	$k = 1,25$
Conducteur-support en dessous 	$k = 1,15 + 0,81 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,167} + 0,02 \frac{H'}{d}$ $- A \left[1,209 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,167} + 0,03 \left(\frac{H'}{H} \right) \right] (0,67 - e^{-2 S/d})$ où $A = 0$ si $S/d < 0,2$ et $A = 1$ si $S/d > 0,2$ Valide dans les limites de: $d = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d = 0 \div \infty \quad H'/H = 0 \div 1$	$k = 1,15$ pour conducteur de 1,5 et plus
Conducteur-structure latérale 	$k = 1,45 + 0,024 \left(\frac{H'}{H} \right) - 6 + 0,35 (e^{-8 S/d} - 0,2)$ Valide dans les limites: $d = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d = 0,1 \div 1 \quad H/d = 2 \div 10$	$k = 1,45$
Configuration tige-tige (disjoncteur ouvert) 	Configuration tige-tige dans le plan horizontal $k_1 = 1,35 - 0,1 \frac{H'}{H} - \left(\frac{d_1}{H} - 0,5 \right)$ Tige-support en dessous $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H} - A \frac{1093}{H} (0,549 - e^{-3 S/d_2})$ où $A = 0$ si $S/d_2 < 0,2$ et $A = 1$ si $S/d_2 > 0,2$ Valide dans les limites de: $(k_1) \quad d_1 = 2 \div 10 \text{ m} \quad d_1/H = 0,1 \div 0,8 \quad d_1 < d_2$ $(k_2) \quad d_2 = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d_2 = 0 \div \infty \quad d_2 < d_1$	$k_1 = 1,3$ $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H}$

Table C.1 – Gap factor for some actual configurations

Configuration	Formula	Typical value
Conductor-cross-arm 	$k = 1,45 + 0,015 \left(\frac{H}{d_1} - 6 \right) + 0,35 (e^{-8 S/d_1} - 0,2) + 0,135 \left(\frac{d_2}{d_1} - 15 \right)$ Applicable in the range: $d_1 = 2 \div 10 \text{ m} \quad d_2/d_1 = 1 \div 2$ $S/d_1 = 0,1 \div 1 \quad H/d_1 = 2 \div 10$	$k = 1,45$
Conductor-window 	$k = 1,25 + 0,005 \left(\frac{H}{d} - 6 \right) + 0,25 (e^{-8 S/d} - 0,2)$ Applicable in the range: $d = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d = 0,1 \div 1 \quad H/d = 2 \div 10$	$k = 1,25$
Conductor-lower structure 	$k = 1,15 + 0,81 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,167} + 0,02 \frac{H'}{d}$ $- A \left[1,209 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,167} + 0,03 \left(\frac{H'}{H} \right) \right] (0,67 - e^{-2 S/d})$ where $A = 0$ if $S/d < 0,2$ and $A = 1$ if $S/d > 0,2$ Applicable in the range: $d = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d = 0 \div \infty \quad H'/H = 0 \div 1$	$k = 1,15$ for conductor-plane to 1,5 or more
Conductor-lateral structure 	$k = 1,45 + 0,024 \left(\frac{H'}{H} \right) - 6 + 0,35 (e^{-8 S/d} - 0,2)$ Applicable in the range: $d = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d = 0,1 \div 1 \quad H/d = 2 \div 10$	$k = 1,45$
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 $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H} - A \frac{1093}{H} (0,549 - e^{-3 S/d_2})$ where $A = 0$ if $S/d_2 < 0,2$ and $A = 1$ if $S/d_2 > 0,2$ Applicable in the range: $(k_1) d_1 = 2 \div 10 \text{ m} \quad d_1/H = 0,1 \div 0,8 \quad d_1 < d_2$ $(k_2) d_2 = 2 \div 10 \text{ m} \quad S/d_2 = 0 \div \infty \quad d_2 < d_1$	$k_1 = 1,3$ $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H}$

Annexe D (informative)

Prise en compte des conditions atmosphériques

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 contrainte électrique d'un intervalle particulier, déterminée empiriquement, comme par exemple par l'équation (B.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 [4]. 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.

D.1 Densité de l'air

L'effet de la densité de l'air est prise 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 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 peut être pris en compte par un exposant, m , de la densité relative d'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.

Annex D (informative)

Allowing for atmospheric conditions

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 (B.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 [4]. 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.

D.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 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.

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 investigations menées jusqu'à 3 000 m et qui est établie, avec les tensions de chocs de manoeuvre positives, pour être en accord avec les données de diverses configurations d'intervalle d'air:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{0,8 [1 + T(1-d)] (d - 0,2 g_0)}{(1 - 0,2 g_0) a} + 0,2 \quad (\text{D.1})$$

où U_0 est la tension de claquage dans les conditions normales, en kilovolts.

$$T = 1,4 \frac{1 - 0,8 g_0}{1 - 0,2 g_0} (k_g)^{1,6} \quad (\text{D.2})$$

$$g_0 = \frac{U_0}{500 d \left[1 + \frac{k_g - 1}{3} \right]} \quad (\text{D.3})$$

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

D.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 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.

D.3 Altitude

La tenue électrique d'un intervalle d'air est affaiblie à haute altitude. Cela est 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:

$$p/p_0 = e^{-(H/8\,150)} \quad (\text{D.4})$$

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.

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:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{0,8 [1 + T(1-d)] (d - 0,2 g_0)}{(1 - 0,2 g_0) a} + 0,2 \quad (\text{D.1})$$

where U_0 is the breakdown voltage in standard conditions, in kilovolts.

$$T = 1,4 \frac{1 - 0,8 g_0}{1 - 0,2 g_0} (k_g)^{1,6} \quad (\text{D.2})$$

$$g_0 = \frac{U_0}{500 d \left[1 + \frac{k_g - 1}{3} \right]} \quad (\text{D.3})$$

where d is the air gap length, in metres.

D.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.

D.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:

$$p/p_0 = e^{-(H/8\,150)} \quad (\text{D.4})$$

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.

Cependant, puisque la température et l'humidité moyennes diminuent généralement avec l'altitude, il est recommandé que le facteur de correction atmosphérique global, k_a , le prenne en compte. L'importance des variations de température et d'humidité dépend probablement de 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.

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, y compris dans la CEI 60038. Mais certains réseaux sont situés à des altitudes bien inférieures à 1 000 m, aussi le tableau D.1 contient des valeurs pour les altitudes plus basses de façon qu'une valeur plus élevée et moins restrictive de k_a puisse alors être employée.

D.4 Facteur global de correction atmosphérique

Comme une température basse (densité d'air élevée) est toujours associée à une faible humidité, les facteurs de correction de la densité et de l'humidité de l'air se contrebalancent partiellement, et le facteur global de correction atmosphérique pour un lieu donné varie peu dans le temps. Le facteur global de correction peut être décrit statistiquement par une valeur moyenne, k_a , et une dispersion conventionnelle normalisée relativement petite, au plus environ 1,5 %. La valeur moyenne est presque entièrement déterminée par l'altitude. La dispersion conventionnelle normalisée, s_a , de k_a peut être combinée avec celle de la tension de claquage de l'intervalle d'air, s , par :

$$s_t = \sqrt{\left(\frac{s_a}{k_a}\right)^2 + s^2}$$

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 une valeur plus grande que 1,5 %.

Les valeurs de k_a données dans le tableau D.1 peuvent être retrouvées en employant les équations (D.1) à (D.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 coefficient 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.

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.

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, including in IEC 60038. But some power systems are situated at altitudes well below the 1 000 m elevation, thus table D.1 shows values for lower altitudes so that a higher and less restrictive value of k_a can then be used.

D.4 Total atmospheric correction factor

As low temperature (high air density) is always associated with low humidity, the air density and humidity correction factors partially cancel each other, and the total atmospheric correction factor for any given location varies only little with time. The total correction factor can be described statistically by a mean value k_a and a relatively small normalized conventional deviation of up to about 1,5 %. The mean value is almost entirely determined by the altitude. The normalized conventional 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 D.1 can be derived using equations (D.1) to (D.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.

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

Altitude	Domaine de U_{90}						
	kV						
m	<199	200-399	400-599	600-799	800-999	1 000-1 190	>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

D.5 Correction pour les altitudes plus grandes que 1 000 m

Pour les travaux sous tension à des altitudes plus grandes que l'altitude de référence, D_U doit être multiplié par un facteur de correction d'altitude, qui peut être calculé en utilisant les équations (D.1) à (D.4). Si l'altitude de référence choisie est de 1 000 m, la valeur du facteur de correction d'altitude applicable peut être tirée du tableau D.1.

**Tableau D.2 – Facteur de correction d'altitude pour des altitudes
au-dessus de l'altitude référence de 1 000 m**

Altitude	Distance électrique D_U						
	m						
m	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
1 000	1,050	1,045	1,041	1,038	1,035	1,033	1,028
2 000	1,103	1,094	1,087	1,081	1,076	1,071	1,064
2 500	1,161	1,148	1,137	1,129	1,122	1,115	1,105
3 000	1,224	1,206	1,193	1,182	1,173	1,166	1,153

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

Altitude	Range of U_{90}						
	kV						
m	<199	200-399	400-599	600-799	800-999	1 000-1 190	>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

D.5 Correction for altitudes greater than 1 000 m

For live work at altitudes greater than the reference altitude D_U shall be multiplied by an altitude correction factor which can be calculated using the equations (D.1) to (D.4). If a reference altitude of 1 000 m is chosen, the applicable value of the altitude correction factor can be taken from table D.1.

**Table D.2 – Altitude correction factor for altitudes
above a reference altitude of 1 000 m**

Altitude	Electrical distance D_U						
	m						
m	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
1 000	1,050	1,045	1,041	1,038	1,035	1,033	1,028
2 000	1,103	1,094	1,087	1,081	1,076	1,071	1,064
2 500	1,161	1,148	1,137	1,129	1,122	1,115	1,105
3 000	1,224	1,206	1,193	1,182	1,173	1,166	1,153

D.6 Méthode de calcul des valeurs du tableau D.1

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

- a) U_{90} est la valeur la plus basse dans le domaine (par exemple 200 kV dans le domaine 200 kV à 399 kV);
- b) $U_0 = U_{50} = U_{90} / 0,936$ est la tension de claquage dans les conditions normales;
- c) prendre $k_g = 1,2$;
- d) $d = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,k_s\,k_g)} - 1)$ (équation 8) c'est-à-dire l'intervalle avec $k_g = 1,2$ qui tiendrait U_{90} aux conditions atmosphériques normales ($k_s = 0,936$);
- e) calculer g_0 en utilisant l'équation (D.3);
- f) calculer T en utilisant l'équation (D.2);
- g) calculer $\delta (= p/p_0)$ pour l'altitude en utilisant l'équation (D.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);
- h) calculer $k_a (= U/U_0)$ en utilisant l'équation (D.1).

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC61472:1998
 Withd2AM

D.6 Method of calculation of values in table D.1

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

- a) U_{90} is the lower value in the range (e.g. 200 kV in the 200 kV to 399 kV range);
- b) $U_0 = U_{50} = U_{90} / 0,936$ is the breakdown voltage for standard conditions;
- c) let $k_g = 1,2$;
- d) $d = 2, 17 (e^{U_{90}/(1\,080\,k_s\,k_g)} - 1)$ (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_0 using equation (D.3);
- f) calculate T using equation (D.2);
- g) calculate $\delta (= p/p_0)$ for the altitude using equation (D.4) (this assumes that δ changes only with mean pressure and there is no change in mean temperature with altitude);
- h) calculate $k_a (= U/U_0)$ using equation (D.1).

Annexe E **(informative)**

Travaux sous tension près des isolations polluées, endommagées ou humides

E.1 Isolation polluée

Quand il y a de la pollution, la réaction des isolations externes à la tension à fréquence industrielle devient importante et peut avoir des conséquences sur la conception de l'isolation externe. Si un nettoyage significatif n'intervient pas, le contournement de l'isolation se produit généralement quand la surface est polluée et devient humide par suite de pluie légère, de neige, de givre, de rosée ou de brouillard.

Le travail sous tension peut être entrepris à condition que:

- la ligne de fuite réelle des isolateurs dans la zone de travail ait été vérifiée en prenant en compte la ligne de fuite de construction et sa possible réduction due aux isolateurs détériorés, ainsi que la tension d'exploitation du réseau;
- les conditions réelles de pollution et d'humidité existantes au moment où le travail sous tension doit être fait soient vérifiées au regard de l'écart avec les conditions de pollution et d'humidité retenues à la conception, et il est établi que la conception est compatible avec ce niveau de pollution.

En outre, le contournement dû à la pollution est un phénomène progressif précédé d'effluves visibles, de décharges audibles et d'un éventuel cheminement partiel, de sorte qu'il y a un avertissement préalable. Si ces phénomènes se produisent, il est recommandé d'interrompre le travail sous tension.

E.2 Isolateurs à capot et à tige défectueux

Beaucoup de travaux sous tension sont consacrés à remplacer des chaînes d'isolateurs à capot et à tige endommagées. Ainsi, il est important de savoir jusqu'à quel degré de détérioration il est possible de travailler sur ou près des isolateurs sans risque de contournement. La tenue électrique résiduelle d'une chaîne d'isolateurs à capot et à tige qui comprend des éléments détériorés peut varier de façon significative suivant le type d'isolateur, le nombre et l'emplacement des éléments détériorés dans la chaîne et leur degré de détérioration.

Les règles générales de ces variations sont conformes à ce qui suit.

- la dispersion de la réduction de la tenue est significativement plus grande avec les isolateurs en porcelaine qu'avec ceux en verre. Cela résulte de ce que les isolateurs en verre trempé se détruisent toujours complètement, laissant un moignon nu, alors que les isolateurs en porcelaine peuvent être cassés de différentes façons, de sorte que la tenue dépend beaucoup de la portion de jupe de porcelaine qui reste;
- a position des éléments détériorés la plus défavorable est généralement celle près de l'extrémité côté conducteur. La tenue est plus grande si le même nombre d'éléments détériorés est à l'extrémité côté support, et encore plus grande s'ils sont au milieu de la chaîne. Cependant, les conditions exactes de la réduction maximale de la tenue de l'isolation dépend aussi de la distribution du champ électrique le long de la chaîne, du type d'armement à l'extrémité côté conducteur (par exemple des anneaux de répartition) et du type de support.

Annex E (informative)

Live working near contaminated, damaged or moist insulation

E.1 Contaminated insulation

When contamination is present, the response of the external insulation to power frequency voltage becomes important and may dictate external insulation design. Flashover of insulation generally occurs when the surface is contaminated and becomes moist due to light rain, snow, ice, dew or fog, if significant washing does not occur.

Live working may be carried out provided that:

- the actual creepage length of the insulators in the work area has been checked, taking into account the design length and possible reduction by damaged insulators, and the system operating voltage;
- the actual conditions of contamination and humidity existing when live working is to be done are checked for deviation from the conditions assumed for design purposes, and it is found that the design allows for this contamination level.

Besides, contamination flashover is a gradual process, preceded by visible scintillation, audible discharges and eventual partial flashover, so that there is prior warning. If these phenomena occur live work should not be carried out.

E.2 Defective cap and pin insulators

A large amount of live working is devoted to the replacement of damaged cap and pin insulator strings. Thus it is important to know the extent of insulation damage up to which it is possible to work on or near the system insulation without risk of flashover. The residual electrical strength of a string of cap and pin insulators that includes damaged units can vary significantly depending upon the type of insulators, the number and location in the string of the damaged units, and their degree of damage.

The general trend of these variations is as follows:

- the dispersion of the strength reduction is significantly larger with porcelain than with glass insulators. This is due to the fact that prestressed toughened glass insulators always shatter completely, leaving a bare hub, while porcelain insulators may be broken in different ways, so that the strength depends very much on the portion of porcelain skirts that remains;
- the worst position of damaged units is generally near the line end. The strength is higher if the same number of damaged units is at the structure end, and still higher if they are in the middle of the string. However, the exact conditions of the maximum reduction in insulation strength depends also on the electric field distribution along the string, that is, on the length of the string, the type of fittings at the line end (e.g. grading rings) and the type of structure.

Naturellement, plus le nombre d'éléments détériorés est grand, plus la réduction de la tenue est grande. Mais si tous les isolateurs sont détériorés, une chaîne d'isolateur sèche conserve encore 20 % de sa tenue. La variation de la tenue en fonction du nombre d'éléments détériorés peut être considérée en première approximation comme linéaire, et l'analyse d'un grand nombre de résultats d'essai mène à l'équation (10).

Exemple d'utilisation de $k_i < 1,0$:

Considérant un réseau de 220 kV, avec une tension de tenue requise pour les travaux sous tension (U_{90}) de 565 kV crête, équipé de 14 isolateurs en verre ($k_d = 1$) par chaîne. En supposant $k_a = 0,931$; $k_g = 1,2$; $k_s = 0,936$ et $k_f = 1$, les valeurs suivantes de la longueur minimale d'isolation requise du réseau, D_U , peuvent alors être calculées à partir de l'équation (8):

Tableau E.1

n	n_d/n_o	k_i	D_U
1	0,071	0,943	1,23
2	0,143	0,886	1,35
3	0,214	0,829	1,47
4	0,286	0,771	1,61
5	0,357	0,714	1,79
6	0,429	0,657	2,00
7	0,500	0,600	2,26

Avec un pas des isolateurs de 146 mm, la longueur de la chaîne est d'environ 2,0 m. Pour enlever ou changer la chaîne avec plus de six éléments détériorés, on a besoin de prendre des mesures pour réduire l'amplitude de la surtension (par exemple en neutralisant le ré-enclenchement ou en employant des éclateurs de protection).

Obviously, the larger the number of damaged units, the greater the reduction of strength. But, even if all the insulators are damaged, a dry insulator string still maintains 20 % of its strength. The variation of the strength as a function of the number of damaged units can be assumed to be linear as a first approximation, and analysis of a large amount of test data leads to equation (10).

Example of the use of $k_i < 1,0$:

Taking a 220 kV system, with a required withstand voltage for live working (U_{90}) of 565 kV_{peak} and using 14 glass insulator units ($k_d = 1$) per string. Assume $k_a = 0,931$, $k_g = 1,4$; $k_s = 0,936$ and $k_f = 1$, the following values of the minimum required system insulation length D_U can then be calculated using equation (8):

Table E.1

n	n_d/n_o	k_i	D_U
1	0,071	0,943	1,23
2	0,143	0,886	1,35
3	0,214	0,829	1,47
4	0,286	0,771	1,61
5	0,357	0,714	1,79
6	0,429	0,657	2,00
7	0,500	0,600	2,26

For 146 mm long units the string length is about 2,0 m. In order to remove or change insulator strings with more than six damaged units, measures shall be taken to reduce the maximum overvoltage magnitude (e.g. by preventing reclosing or by using protective gaps).

Annexe F (informative)

Diminution des distances en dessous de la valeur calculée

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 pièces d'assemblage métalliques, ou différents équipements conducteurs nécessaires pour la réalisation du travail. Pendant le travail au potentiel, l'opérateur avec un vêtement conducteur est à un moment donné transféré du support à la terre au conducteur sous tension et réciproquement. Qui plus est, quand l'opérateur est sur le conducteur, l'intervalle d'air conducteur-terre est modifié, ce qui peut altérer le facteur d'intervalle et la tenue diélectrique qui dépend de la taille et de la position des objets conducteurs introduits dans l'intervalle.

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

La tenue électrique des outils de 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 de revêtements appropriés de la surface est aussi une technique valable (par exemple l'emploi de revêtements de silicone). En tout 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 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 métalliques 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 leur dimensions maximales, F , mesurées suivant l'axe de l'intervalle, de la longueur totale de l'intervalle d'air, D , et de déterminer la tension de claquage de l'intervalle d'air qui en résulte en utilisant l'équation:

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

F.3 Pièces conductrices de grandes dimensions

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

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: