

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60826

Troisième édition
Third edition
2003-10

**Critères de conception des lignes
aériennes de transport**

**Design criteria of overhead
transmission lines**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60826:2003

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

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

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

- IEC Just Published

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

- Service clients

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

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

Publication numbering

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

Consolidated editions

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

Further information on IEC publications

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

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

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

- IEC Just Published

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

- Customer Service Centre

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

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60826

Troisième édition
Third edition
2003-10

**Critères de conception des lignes
aériennes de transport**

**Design criteria of overhead
transmission lines**

© IEC 2003 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XF

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	10
1 Domaine d'application.....	14
2 Références normatives	14
3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés.....	16
3.1 Termes et définitions	16
3.2 Symboles et termes abrégés.....	20
4 Principes généraux	26
4.1 Objectif.....	26
4.2 Conception du système	28
4.3 Fiabilité du système.....	28
5 Critères généraux de conception	30
5.1 Méthodologie.....	30
5.2 Prescriptions relatives à la relation charge climatique/résistance.....	36
6 Charges.....	40
6.1 Description	40
6.2 Charges climatiques, vent et températures associées.....	42
6.3 Charges climatiques, givre sans vent.....	60
6.4 Charges climatiques, vent et givre combinés.....	70
6.5 Charges de construction et d'entretien (sécurité du personnel).....	78
6.6 Charges à prendre en compte pour la limitation des défaillances (sécurité structurale).....	82
7 Résistance des composants et états limites.....	86
7.1 Généralités.....	86
7.2 Equations générales de résistance des composants.....	88
7.3 Données relatives au calcul des composants.....	92
Annexe A (informative) Informations techniques.....	102
A.1 Relations entre charge et résistance	102
A.2 Résistance des composants de ligne	142
A.3 Mesurage des températures et interprétation des mesures.....	144
A.4 Détermination de la vitesse de référence météorologique du vent.....	148
A.5 Givrage atmosphérique	166
A.6 Charges de vent et de givre combinées.....	180
Annexe B (informative) Application des fonctions de distribution statistique au calcul de la charge et de la résistance des lignes aériennes.....	184
B.1 Généralités	184
B.2 Charges climatiques.....	184
B.3 Résistance des composants.....	196
B.4 Effet de la variation des portées sur la relation charge-résistance – Calcul du facteur d'utilisation de portée	200

CONTENTS

FOREWORD	11
1 Scope	15
2 Normative references.....	15
3 Terms, definitions, symbols and abbreviations	17
3.1 Terms and definitions	17
3.2 Symbols and abbreviations	21
4 General	27
4.1 Objective	27
4.2 System design	29
4.3 System reliability	29
5 General design criteria.....	31
5.1 Methodology.....	31
5.2 Climatic load-strength requirements.....	37
6 Loadings.....	41
6.1 Description	41
6.2 Climatic loads, wind and associated temperatures	43
6.3 Climatic loads, ice without wind	61
6.4 Climatic loads, combined wind and ice loadings	71
6.5 Loads for construction and maintenance (safety loads).....	79
6.6 Loads for failure containment (security requirements).....	83
7 Strength of components and limit states	87
7.1 Generalities	87
7.2 General equations for the strength of components	89
7.3 Data related to the calculation of components.....	93
Annex A (informative) Technical information	103
A.1 Relations between load and strength.....	103
A.2 Strength of line components.....	143
A.3 Temperature measurements and their interpretation	145
A.4 Determination of the meteorological reference wind speed.....	149
A.5 Atmospheric icing.....	167
A.6 Combined wind and ice loadings	181
Annex B (informative) Application of statistical distribution functions to load and strength of overhead lines	185
B.1 General.....	185
B.2 Climatic loads	185
B.3 Strength of components	197
B.4 Effect of span variation on load-strength relationship – Calculation of span use factor	201

Annexe C (informative) Distributions statistiques et leur application à la conception probabiliste des lignes de transport.....	214
C.1 Distributions statistiques classiques.....	214
C.2 Distribution normale (distribution de Gauss).....	214
C.3 Distribution log-normale	218
C.4 Distribution de Gumbel.....	222
C.5 Distribution de Weibull	226
C.6 Distribution gamma	230
C.7 Distribution bêta, premier type	236
C.8 La fonction gamma et ses relations	240
Figure 1 – Schéma d'une ligne de transport	28
Figure 2 – Méthodologie pour la conception des lignes de transport.....	32
Figure 3 – Facteur combiné de vent G_C pour les conducteurs, en fonction de différentes catégories de terrains et hauteurs au-dessus du sol	50
Figure 4 – Facteur de portée G_L	50
Figure 5 – Facteur combiné de vent G_t applicable aux supports et aux chaînes d'isolateurs	52
Figure 6 – Définition de l'angle d'incidence du vent.....	56
Figure 7 – Coefficient de traînée C_{xt} pour les supports réalisés en treillis composés de barres à bords plats	56
Figure 8 – Coefficient de traînée C_{xt} pour les supports réalisés en treillis et composés de barres arrondies.....	58
Figure 9 – Coefficient de traînée C_{xtC} d'éléments cylindriques de diamètre important	60
Figure 10 – Facteur K_d relatif au diamètre du conducteur	64
Figure 11 – Facteur K_h relatif à la hauteur des conducteurs.....	66
Figure 12 – Types de supports.....	68
Figure 13 – Forme cylindrique équivalente du dépôt de givre	76
Figure 14 – Simulation de la charge longitudinale exercée sur un conducteur (pour un support à un seul circuit).....	86
Figure 15 – Schéma des états limites des composants de lignes.....	88
Figure A.1 – Relations entre charge et résistance	104
Figure A.2 – Relations entre charge et résistance	118
Figure A.3 – Probabilité de défaillance $P_f = (1 - P_s)$ pour différentes distributions de Q et R , avec $T = 50$ ans.....	120
Figure A.4 – Probabilité de défaillance $P_f = (1 - P_s)$ pour différentes distributions de Q et R , avec $T = 150$ ans.....	120
Figure A.5 – Probabilité de défaillance $P_f = (1 - P_s)$ pour différentes distributions de Q et R , avec $T = 500$ ans.....	122
Figure A.6 – Coordination de résistance par le recours à des limites d'exclusion différentes.....	132
Figure A.7 – Relation entre les vitesses météorologiques du vent à 10 m de hauteur, en fonction de la catégorie de terrain et de la période d'intégration.....	152
Figure A.8 – Action du vent sur les conducteurs et charge de vent résultante sur le support.....	160

Annex C (informative) Statistical distribution and their application in probabilistic design of transmission lines	215
C.1 Classical statistical distributions.....	215
C.2 Normal distribution (Gaussian distribution).....	215
C.3 Log-normal distribution.....	219
C.4 Gumbel distribution	223
C.5 Weibull distribution.....	227
C.6 Gamma distribution	231
C.7 Beta distribution, first type	237
C.8 Gamma function and its relationships	241
Figure 1 – Diagram of a transmission line	29
Figure 2 – Transmission line design methodology	33
Figure 3 – Combined wind factor G_C for conductors for various terrain categories and heights above ground.....	51
Figure 4 – Span factor G_L	51
Figure 5 – combined wind factor G_t applicable to supports and insulator strings	53
Figure 6 – Definition of the angle of incidence of wind.....	57
Figure 7 – Drag coefficient C_{xt} for lattice supports made of flat sided members	57
Figure 8 – Drag coefficient C_{xt} for lattice supports made of rounded members.....	59
Figure 9 – Drag coefficient C_{xtc} of cylindrical elements having a large diameter	61
Figure 10 – Factor K_d related to the conductor diameter	65
Figure 11 – Factor K_h related to the conductor height	67
Figure 12 – Typical support types.....	69
Figure 13 – Equivalent cylindrical shape of ice deposit.....	77
Figure 14 – Simulated longitudinal conductor load (case of a single circuit support).....	87
Figure 15 – Diagram of limit states of line components.....	89
Figure A.1 – Relations between load and strength.....	105
Figure A.2 – Relations between loads and strengths	119
Figure A.3 – Failure probability $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 50$ years.....	121
Figure A.4 – Failure probability $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 150$ years.....	121
Figure A.5 – Failure probability $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 500$ years.....	123
Figure A.6 – Coordination of strength by using different exclusion limits	133
Figure A.7 – Relationship between meteorological wind velocities at a height of 10 m depending on terrain category and on averaging period	153
Figure A.8 – Wind action on conductors and resultant wind load on support.....	161

Figure A.9 – Types de givre formé par le brouillard givrant, en fonction de la vitesse du vent et de la température	172
Figure A.10 – Synoptique de la stratégie d'utilisation de données météorologiques, des modèles de givrage et des mesures sur site des charges de givre	176
Figure B.1 – Ajustement de la distribution de Gumbel avec un histogramme des données de vent.....	186
Figure B.2 – Ajustement de la distribution de Gumbel et d'un histogramme des températures minimales annuelles	192
Figure B.3 – Ajustement de la distribution gamma et d'un histogramme de charge de givre.....	194
Figure B.4 – Ajustement de données relatives au brouillard givrant à la distribution de Gumbel	196
Figure B.5 – Ajustement de la distribution de Weibull aux données sur la résistance des supports en treillis	198
Figure C.1 – Fonction de densité de probabilité de la distribution normale standardisée	218
Figure C.2 – Fonction de densité de probabilité de la distribution log-normale standardisée	222
Figure C.3 – Fonction de densité de probabilité de la distribution de Gumbel standardisée	226
Figure C.4 – Fonction de densité de probabilité de la distribution de Weibull standardisée pour un paramètre $p_3 = 0,5, 1,0$ et $2,0$	230
Figure C.5 – Fonction de densité de probabilité de la distribution gamma standardisée pour un paramètre $p_3 = 0,5; 1,0$ et $2,0$	234
Figure C.6 – Fonction de densité de probabilité de la distribution bêta standardisée pour des paramètres $r = 5,0, t = 5,5; 6,0$ et $7,0$	238
Tableau 1 – Niveaux de fiabilité relatifs aux lignes de transport	34
Tableau 2 – Facteurs γ utilisables par défaut pour ajuster les charges climatiques par rapport à la période de retour T de 50 ans	38
Tableau 3 – Prescriptions de conception du système	38
Tableau 4 – Classification des catégories de terrain.....	44
Tableau 5 – Facteur de correction τ de la pression dynamique du vent de référence q_0 due à l'altitude et aux températures	46
Tableau 6 – Cas de charge de givre non uniformes.....	70
Tableau 7 – Période de retour de la charge combinant vent et givre.....	72
Tableau 8 – Coefficient de traînée des conducteurs givrés	76
Tableau 9 – Dispositions de sécurité structurale supplémentaires	86
Tableau 10 – Nombre de supports soumis à l'intensité de charge maximale pendant un événement climatique quelconque.....	88
Tableau 11 – Facteur de résistance Φ_N lié au nombre N de composants ou d'éléments exposés à la charge critique.....	90
Tableau 12 – Valeurs de Φ_{S2}	90
Tableau 13 – Coordination de résistance typique de composants d'une ligne.....	92
Tableau 14 – Limites d'endommagement et de défaillance des supports	92
Tableau 15 – Limites d'endommagement et de défaillance des fondations	94
Tableau 16 – Limites d'endommagement et de défaillance des conducteurs et câbles de garde	94
Tableau 17 – Limites d'endommagement et de défaillance des composants d'interface.....	96

Figure A.9 – Type of accreted in-cloud icing as a function of wind speed and temperature	173
Figure A.10 – Strategy flow chart for utilizing meteorological data, icing models and field measurements of ice loads	177
Figure B.1 – Fitting of Gumbel distribution with wind data histogram	187
Figure B.2 – Fitting of Gumbel distribution with yearly minimum temperature histogram	193
Figure B.3 – Fitting of Gamma distribution with ice load histogram	195
Figure B.4 – Fitting data from in-cloud icing with Gumbel distribution	197
Figure B.5 – Fitting of Weibull distribution with strength data of lattice supports	199
Figure C.1 – Probability density function of standardized normal distribution	219
Figure C.2 – Probability density function of standardized log-normal distribution	223
Figure C.3 – Probability density function of standardized Gumbel distribution	227
Figure C.4 – Probability density function of standardized Weibull distribution for parameter $p_3 = 0,5; 1,0$ and $2,0$	231
Figure C.5 – Probability density function of standardized Gamma distribution for parameter $p_3 = 0,5; 1,0$ and $2,0$	235
Figure C.6 – Probability density function of standardized beta distribution for parameters $r = 5,0$, $t = 5,5; 6,0$ and $7,0$	239
Table 1 – Reliability levels for transmission lines	35
Table 2 – Default γ_T factors for adjustment of climatic loads in relation to return period T vs. 50 years	39
Table 3 – Design requirements for the system	39
Table 4 – Classification of terrain categories	45
Table 5 – Correction factor τ of dynamic reference wind pressure q_0 due to altitude and temperatures	47
Table 6 – Non-uniform ice loading conditions	71
Table 7 – Return period of combined ice and wind load	73
Table 8 – Drag coefficients of ice-covered conductors	77
Table 9 – Additional security measures	87
Table 10 – Number of supports subjected to maximum load intensity during any single occurrence of a climatic event	89
Table 11 – Strength factor ϕ_N related to the number N of components or elements subjected to the critical load intensity	91
Table 12 – Values of ϕ_{S2}	91
Table 13 – Typical strength coordination of line components	93
Table 14 – Damage and failure limits of supports	93
Table 15 – Damage and failure limits of foundations	95
Table 16 – Damage and failure limits of conductors and ground wires	95
Table 17 – Damage and failure limit of interface components	97

Tableau 18 – Valeurs par défaut des coefficients de variation (c.v.) de la résistance.....	96
Tableau 19 – Facteurs u pour la fonction de distribution log-normale lorsque $e = 10\%$	98
Tableau 20 – Valeur du facteur de qualité Φ_Q pour les pylônes à treillis	98
Tableau A.1 – Fiabilité annuelle correspondant à différentes hypothèses de charge et de résistance	116
Tableau A.2 – Relation entre niveaux de fiabilité et périodes de retour des charges limites	124
Tableau A.3 – Coordination de résistance typique.....	128
Tableau A.4 – Valeurs du coefficient central de sécurité α et du facteur de coordination de résistance Φ_S nécessaires pour assurer avec une probabilité de 90 % que la défaillance du composant R_2 n'interviendra qu'après celle du composant R_1	136
Tableau A.5 – Facteur de résistance Φ_N relatif à N composants en série soumis à la charge critique	142
Tableau A.6 – Valeurs de u_e associées aux limites d'exclusion.....	144
Tableau A.7 – Définition des catégories de terrain	150
Tableau A.8 – Facteurs décrivant l'action du vent en fonction de la catégorie de terrain	152
Tableau A.9 – Valeurs de la vitesse de référence du vent V_R	156
Tableau A.10 – Propriétés physiques du givre.....	170
Tableau A.11 – Paramètres météorologiques influençant la formation du givre	172
Tableau A.12 – Paramètres statistiques des charges de givre.....	178
Tableau A.13 – Charges de vent et de givre combinées.....	182
Tableau A.14 – Coefficients de traînée et densité des conducteurs givrés.....	182
Tableau B.1 – Rapports de $x / \bar{x}$ pour une fonction de distribution de Gumbel, T correspondant à la période de retour en années de l'événement de charge, n au nombre d'années comportant des observations et v_x au coefficient de variation.....	192
Tableau B.2 – Paramètres d'une distribution de Weibull.....	198
Tableau B.3 – Paramètres statistiques $\bar{U}$ et σ_U pour la variation des portées vent.....	202
Tableau B.4 – Paramètres statistiques $\bar{U}$ et σ_U pour la variation des portées-poids.....	204
Tableau B.5 – Valeurs du coefficient du facteur d'utilisation γ_U en fonction de U et N pour $v_R = 0,10$	208
Tableau B.6 – Coefficient du facteur d'utilisation γ_U pour différents coefficients de variation de la résistance	210
Tableau C.1 – Paramètres C_1 et C_2 de la distribution de Gumbel	226
Tableau C.2 – Valeurs de u_1 pour des valeurs données de la fonction $F(u_1) = I(u_1, p_3 - 1)$	234

Table 18 – Default values for strength coefficients of variation (COV)	97
Table 19 – u factors for log-normal distribution function for $e = 10\%$	99
Table 20 – Value of quality factor ϕ_Q for lattice towers	99
Table A.1 – Yearly reliability corresponding to various assumptions of load and strength ...	117
Table A.2 – Relationship between reliability levels and return periods of limit loads	125
Table A.3 – Typical strength coordination	129
Table A.4 – Values of central safety factor α and strength coordination factor ϕ_S required to insure that component R_2 will fail after component R_1 with a 90 % probability	137
Table A.5 – Strength factor ϕ_N related to N components in series subjected to the critical load	143
Table A.6 – Values of u_e associated to exclusion limits	145
Table A.7 – Definition of terrain category	151
Table A.8 – Factors describing wind action depending on terrain category	153
Table A.9 – Values of reference wind speed V_R	157
Table A.10 – Physical properties of ice	171
Table A.11 – Meteorological parameters controlling ice accretion	173
Table A.12 – Statistical parameters of ice loads	179
Table A.13 – Combined wind and ice loading conditions	183
Table A.14 – Drag coefficients and density of ice-covered conductors	183
Table B.1 – Ratios of $x / \bar{x}$ for a Gumbel distribution function, T return period in years of loading event, n number of years with observations, v_x coefficient of variation	193
Table B.2 – Parameters of Weibull distribution	199
Table B.3 – Statistical parameters $\bar{U}$ and σ_U of wind span variation	203
Table B.4 – Statistical parameters $\bar{U}$ and σ_U of weight span variation	205
Table B.5 – Values of use factor coefficient γ_U as a function of U and N for $v_R = 0,10$	209
Table B.6 – Use factor coefficient γ_U for different strength coefficients of variation	211
Table C.1 – Parameters C_1 and C_2 of Gumbel distribution	227
Table C.2 – Values of u_1 for given values of function $F_{(u_1)} = I(u_1, p_3 - 1)$	235

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CRITÈRES DE CONCEPTION DES LIGNES AÉRIENNES DE TRANSPORT

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications, la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60826 a été établie par le comité d'études 11 de la CEI: Lignes aériennes.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition, parue comme rapport technique en 1991. Elle constitue une révision technique qui conduit au statut de Norme internationale.

Cette révision consiste principalement en la division de la norme en deux parties, une normative et une autre informative, en plus d'une simplification de son contenu et de l'amélioration de certaines exigences de conception en conformité avec les récents progrès technologiques.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

DESIGN CRITERIA OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60826 has been prepared by IEC technical committee 11: Overhead lines.

This third edition cancels and replaces the second edition which was issued as a technical report in 1999. It constitutes a technical revision and now have the status of an International Standard.

This revision consists mainly of splitting the standard into two sections, normative and informative, in addition to simplifying its contents and improving some specific design requirements in accordance with recent technical advances.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
11/175/FDIS	11/177/RVD

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

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2008. A cette date, la publication sera

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60826:2003

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

FDIS	Report on voting
11/175/FDIS	11/177/RVD

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

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

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2008. At this date, the publication will be

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

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60826:2003

CRITÈRES DE CONCEPTION DES LIGNES AÉRIENNES DE TRANSPORT

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie les critères de charge et de résistance mécanique des lignes aériennes en s'inspirant de principes de conception fondés sur la fiabilité. Ces critères sont valables pour les lignes présentant une tension nominale supérieure ou égale à 45 kV, mais peuvent aussi s'appliquer aux lignes dont la tension nominale est plus faible.

La présente norme sert également de cadre à l'élaboration de normes nationales traitant des lignes de transport à partir de notions de fiabilité et au moyen de méthodes probabilistes ou semi-probabilistes. Il incombera à ces normes nationales de déterminer les données climatiques locales à prendre en compte pour l'utilisation et l'application de la présente norme, en sus des autres données spécifiquement nationales.

Les critères de calcul énoncés dans la présente norme s'appliquent aux lignes nouvelles, mais un grand nombre des notions abordées peuvent également servir à répondre aux exigences de fiabilité des lignes existantes qui ont besoin d'être renouvelées ou dont les performances sont à améliorer.

Cette norme ne porte pas sur les détails de conception de composants de lignes tels que pylônes, fondations, conducteurs ou isolateurs.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60652:2002, *Essais mécaniques des structures de lignes aériennes*

CEI 61089:1991, *Conducteurs pour lignes aériennes à brins circulaires, câblés en couches concentriques*

CEI 61773:1996, *Lignes aériennes – Essais de fondations des supports*

CEI 61774:1997, *Lignes aériennes – Données météorologiques pour calculer les charges climatiques*

CEI 61284:1997, *Lignes aériennes – Exigences et essais pour le matériel d'équipement*

DESIGN CRITERIA OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

1 Scope

This International Standard specifies the loading and strength requirements of overhead lines derived from reliability based design principles. These requirements apply to lines 45 kV and above, but can also be applied to lines with a lower nominal voltage.

This standard also provides a framework for the preparation of national standards dealing with overhead transmission lines, using reliability concepts and employing probabilistic or semi-probabilistic methods. These national standards will need to establish the local climatic data for the use and application of this standard, in addition to other data that are country specific.

Although the design criteria in this standard apply to new lines, many concepts can be used to address the reliability requirements for refurbishment and uprating of existing lines.

This standard does not cover the detailed design of line components such as towers, foundations, conductors or insulators.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60652:2002, *Loading tests on overhead line structures*

IEC 61089:1991, *Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors*

IEC 61773:1996, *Overhead lines – Testing of foundations for structures*

IEC 61774:1997, *Overhead lines – Meteorological data for assessing climatic loads*

IEC 61284:1997, *Overhead lines – Requirements and tests for fittings*

3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés

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

3.1 Termes et définitions

3.1.1

résistance caractéristique

résistance garantie, résistance minimale, charge de rupture minimale

R_c

valeur garantie dans les normes applicables

NOTE Cette valeur est généralement assortie d'une limite d'exclusion comprise entre 2 % et 5 %, 10 % étant en pratique la limite supérieure (raisonnable).

3.1.2

coefficient de variation

c.v.

rapport entre l'écart type et la valeur moyenne

NOTE Les c.v. de résistance et de charge sont respectivement notés v_R et v_F .

3.1.3

composants

différentes parties d'un système de ligne de transport ayant une fonction particulière

NOTE Les composants types sont les pylônes, les fondations, les conducteurs et les chaînes d'isolateurs.

3.1.4

limite d'endommagement (d'un composant)

état limite de service

résistance limite d'un composant, correspondant à un plafond défini de déformation permanente (ou inélastique) au-delà duquel le système est endommagé

NOTE Cette limite est aussi appelée état limite de service dans les codes de la construction fondés sur le calcul aux états limites.

3.1.5

état d'endommagement (du système)

état dans lequel il y a lieu de réparer le système parce qu'un de ses composants a dépassé sa limite d'endommagement

NOTE Il y a besoin de faire cette réparation du fait que ce système n'est plus capable de remplir la fonction qui lui est assignée sous les charges de conception ou par suite d'une réduction éventuelle des distances de conception (au sol ou à la masse, notamment).

3.1.6

éléments

différentes parties d'un composant

NOTE Par exemple, les éléments d'un pylône en treillis sont les cornières en acier, les goussets et les boulons.

3.1.7

limite d'exclusion

e %

valeur d'une variable prise à partir de sa fonction de distribution et correspondant à une probabilité de e % de ne pas être dépassée

3 Terms, definitions, symbols and abbreviations

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

3.1 Terms and definitions

3.1.1

characteristic strength

guaranteed strength, minimum strength, minimum failing load

R_c

value guaranteed in appropriate standards

NOTE This value usually corresponds to an exclusion limit, from 2 % to 5 %, with 10 % being an upper practical (and conservative) limit.

3.1.2

coefficient of variation

COV

ratio of the standard deviation to the mean value

NOTE The COV of load and strength are respectively denoted by v_Q and v_R .

3.1.3

components

different parts of a transmission line system having a specified purpose

NOTE Typical components are towers, foundations, conductors and insulator strings.

3.1.4

damage limit (of a component)

serviceability limit state

strength limit of a component corresponding to a defined limit of permanent (or inelastic) deformation of this component which leads to damage to the system if it is exceeded

NOTE This limit is also called the serviceability limit state in building codes based on limit states design.

3.1.5

damage state (of the system)

state where the system needs repairing because one of its components has exceeded its damage limit

NOTE The system needs repairing because it is not capable of fulfilling its task under design loads or because design clearances may be reduced (e.g. conductor to ground).

3.1.6

elements

different parts of a component

NOTE For example, the elements of a steel lattice tower are steel angles, plates and bolts.

3.1.7

exclusion limit

e %

value of a variable taken from its distribution function and corresponding to a probability of e % of not being exceeded

3.1.8

limite de rupture (d'un composant)

état limite ultime

résistance limite d'un composant causant la défaillance du système en cas de dépassement

NOTE Si cette résistance est dépassée, le système passe à une condition dite « état limite ultime » telle que définie dans les codes de la construction fondés sur le calcul aux états limites.

3.1.9

état de rupture (du système)

état d'un système dans lequel un composant majeur est défectueux parce qu'un de ses composants a atteint sa limite de rupture (par suite d'une rupture, d'un flambement ou d'un renversement, par exemple)

NOTE Cet état empêche la ligne de transporter de l'énergie et impose une réparation.

3.1.10

état intact

état dans lequel un système peut accomplir sa fonction et supporter les charges limites de conception

3.1.11

charges limites

charges climatiques correspondant à une période de retour, T , et utilisée à des fins de conception, sans facteurs de charge supplémentaires

NOTE Voir 5.2.1.

3.1.12

facteur de charge

γ

facteur que l'on multiplie par les charges limites pour concevoir les composants de lignes

3.1.13

durée d'exploitation

mesure générale de la durée de vie utile (ou économique)

NOTE Les durées d'exploitation types des lignes de transport varient de 30 ans à 80 ans.

3.1.14

vitesse de référence du vent

V_R

vitesse du vent à une hauteur de 10 m correspondant à une période d'intégration moyenne de 10 min et présentant une période de retour T

NOTE Lorsque cette vitesse du vent est mesurée sur un terrain de rugosité B, ce qui est le cas le plus courant dans le secteur, la vitesse de référence du vent est notée V_{RB} .

3.1.15

fiabilité (structurale)

probabilité pour un système de remplir une fonction donnée dans certaines conditions d'exploitation pendant une période spécifiée

NOTE La fiabilité est, par conséquent, une mesure de la capacité du système d'accomplir sa tâche. Le complémentaire de la fiabilité est la probabilité de défaillance ou défiabilité.

3.1.16

période de retour (d'un événement climatique)

intervalle moyen de récurrence d'un événement climatique d'une intensité définie

NOTE L'inverse de la période de retour est la fréquence annuelle qui correspond à la probabilité de dépassement de cet événement climatique dans une année.

3.1.8**failure limit (of a component)**

ultimate limit state

strength limit of a component which leads to the failure of the system if this limit is exceeded.

NOTE If this strength limit is exceeded, the system will reach a state called “ultimate limit state” as defined in building codes based on limit states design.

3.1.9**failure state (of the system)**

state of a system in which a major component has failed because one of its components has reached its failure limit (such as by rupture, buckling, overturning)

NOTE This state leads to the termination of the ability of the line to transmit power and needs to be repaired.

3.1.10**intact state**

state in which a system can accomplish its required function and can sustain limit loads

3.1.11**limit loads**

climatic loads corresponding to a return period, T , used for design purposes without additional load factors

NOTE Refer to 5.2.1.

3.1.12**load factor**

γ

factor to be multiplied by limit loads in order to design line components

3.1.13**operating period**

general measure of useful (or economical) life

NOTE Typical operating periods of transmission lines vary from 30 years to 80 years.

3.1.14**reference wind speed**

V_R

wind speed at 10 m in height, corresponding to an averaging period of 10 min and having a return period T

NOTE When this wind speed is taken in a terrain type B, which is the most common case in the industry, the reference wind speed is identified as V_{RB} .

3.1.15**reliability (structural)**

probability that a system performs a given task, under a set of operating conditions, during a specified time

NOTE Reliability is thus a measure of the success of a system in accomplishing its task. The complement to reliability is the probability of failure or unreliability.

3.1.16**return period (of a climatic event)**

average occurrence of a climatic event having a defined intensity

NOTE The inverse of the return period is the yearly frequency which corresponds to the probability of exceeding this climatic event in a given year.

3.1.17

sécurité

capacité d'un système à ne pas provoquer des dommages corporels ou des pertes de vies humaines

NOTE Dans le cadre de la présente norme, ce terme se rapporte principalement à la protection du personnel lors des travaux de construction et d'entretien. La sécurité du public et de l'environnement en général est couverte par les réglementations nationales.

3.1.18

sécurité (structurale)

capacité d'un système à se protéger contre une avarie majeure (effet de cascade) à la suite de la défaillance d'un composant donné

NOTE La sécurité structurale est une notion déterministe, tandis que la fiabilité est une notion probabiliste.

3.1.19

facteur de résistance

Φ

facteur applicable à la résistance caractéristique d'un composant

NOTE Ce facteur tient compte de la coordination de résistance, du nombre de composants soumis à la charge maximale, de la qualité et des paramètres statistiques des composants.

3.1.20

système

ensemble de composants reliés entre eux pour former la ligne de transport

3.1.21

tâche

fonction du système (ligne de transport), à savoir transporter de l'énergie entre ses deux extrémités

3.1.22

indisponibilité

incapacité d'un système à accomplir sa tâche

NOTE L'indisponibilité des lignes de transport peut être due à un manque de fiabilité structurale (défiabilité) ainsi qu'à une défaillance due à d'autres événements tels que glissements de terrain, impacts d'objets, sabotage ou défauts des matériaux.

3.1.23

facteur d'utilisation

rapport entre la charge réelle (in situ) et la charge limite d'un composant

NOTE Pour les pylônes de suspension, il est approximativement égal au rapport entre les portées réelles et les portées-poids et vent maximales; pour les pylônes d'angle, il inclut également le rapport des sinus des demi-angles en ligne (angle réel par rapport à l'angle de calcul).

3.2 Symboles et termes abrégés

a	Action unitaire de la vitesse du vent sur les éléments de ligne (Pa ou N/m ²)
A_c	Force du vent agissant sur un conducteur (N)
A_i	Force du vent agissant sur un isolateur (N)
A_t	Force du vent agissant sur un tronçon de pylône composé de cornières en acier, A_{tc} pour celle agissant sur les barres cylindriques (N)
B_i	Facteur de réduction de la vitesse de référence du vent en présence combinée de vent et de givre

3.1.17**safety**

ability of a system not to cause human injuries or loss of lives

NOTE In this standard, safety relates mainly to protection of workers during construction and maintenance operations. The safety of the public and of the environment in general is covered by national regulations.

3.1.18**security (structural)**

ability of a system to be protected from a major collapse (cascading effect) if a failure is triggered in a given component

NOTE Security is a deterministic concept as opposed to reliability which is a probabilistic concept.

3.1.19**strength factor**

ϕ

factor applied to the characteristic strength of a component

NOTE This factor takes into account the coordination of strength, the number of components subjected to maximum load, quality and statistical parameters of components.

3.1.20**system**

set of components connected together to form the transmission line

3.1.21**task**

function of the system (transmission line), i.e. to transmit power between its two ends

3.1.22**unavailability**

inability of a system to accomplish its task

NOTE Unavailability of transmission lines results from structural unreliability as well as from failure due to other events such as landslides, impact of objects, sabotage, defects in material, etc.

3.1.23**use factor**

ratio of the actual load (as built) to limit load of a component

NOTE For tangent towers, it is virtually equal to the ratio of actual to maximum design spans (wind or weight) and for angle towers, it also includes the ratio of the sines of the half angles of deviation (actual to design angles).

3.2 Symbols and abbreviations

a	Unit action of wind speed on line elements (Pa or N/m ²)
A_c	Wind force on conductors (N)
A_i	Wind force on insulators (N)
A_t	Wind force acting on a tower panel made of steel angles, A_{tc} for cylindrical tower members (N)
B_i	Reduction factor of the reference wind speed for wind and ice combinations

C_x	Coefficient de traînée (forme générale)
C_i	Coefficient de traînée des conducteurs givrés (C_{iL} en cas de faible probabilité, et C_{iH} en cas de probabilité élevée)
C_{xc}	Coefficient de traînée des conducteurs
C_{xi}	Coefficient de traînée des isolateurs
C_{xt}	Coefficient de traînée des supports C_{xt1} , C_{xt2} pour chaque face du pylône (C_{xtc} pour les barres cylindriques)
c.v.	Coefficient de variation, également représenté par v_x (rapport de l'écart type à la valeur moyenne)
d	Diamètre du conducteur (m)
d_{tc}	Diamètre des barres cylindriques du pylône (m)
D	Diamètre équivalent des conducteurs givrés (D_H en cas de probabilité élevée et D_L en cas de faible probabilité) (m)
e	Limite d'exclusion (%)
e_N	Limite d'exclusion de N composants en série (%)
$f_{(x)}$	Fonction de densité de probabilité de la variable x
$F_{(x)}$	Fonction de répartition de la variable x
G	Facteur de vent (forme générale)
G_c	Facteur combiné de vent des conducteurs
G_t	Facteur combiné de vent des pylônes
G_L	Facteur de portée pour les calculs du vent
g	Poids unitaire du givre (N/m)
$\bar{g}$	Valeur moyenne de la charge maximale annuelle de givre (N/m)
g_{max}	Poids maximal du givre observé par unité de longueur sur un certain nombre d'années (N/m)
g_R	Poids de conception de référence du givre (N/m)
g_H	Charge de givre assortie d'une probabilité d'occurrence élevée (N/m)
g_L	Charge de givre assortie d'une faible probabilité d'occurrence (N/m)
h	Hauteur du centre de gravité d'un tronçon faisant partie d'un pylône en treillis (m)
K_R	Coefficient de rugosité du terrain
K_d	Facteur relatif à l'influence du diamètre du conducteur
K_h	Facteur à multiplier par $\bar{g}$ pour rendre compte de l'influence de la hauteur des conducteurs au-dessus du sol
K_n	Facteur à multiplier par $\bar{g}$ pour rendre compte de l'influence du nombre d'années où le givre a été mesuré
l_e	Longueur d'une barre de support (m)
L	Longueur de portée ou portée-vent (m)
L_m	Portée moyenne (m)
n	Nombre d'années d'observation d'un événement climatique
N	Nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale
P_f	Probabilité de défaillance (%)
P_{fi}	Probabilité de défaillance du composant i (%)
P_s	Probabilité de survie (%)
P_{si}	Probabilité de survie du composant i (%)

C_x	Drag coefficient (general form)
C_i	Drag coefficient of ice covered conductors (C_{iL} for low probability and C_{iH} for a high probability)
C_{xc}	Drag coefficient of conductors
C_{xi}	Drag coefficient of insulators
C_{xt}	Drag coefficient of supports C_{xt1} , C_{xt2} for each tower face (C_{xtc} on cylindrical tower members)
COV	Coefficient of variation, also identified as v_x (ratio of standard deviation to mean value)
d	Conductor diameter (m)
d_{tc}	Diameter of cylindrical tower members (m)
D	Equivalent diameter of ice covered conductors (D_H for high probability and D_L for low probability) (m)
e	Exclusion limit (%)
e_N	Exclusion limit of N components in series (%)
$f_{(x)}$	Probability density function of variable x
$F_{(x)}$	Cumulative distribution function of variable x
G	Wind factor (general form)
G_c	Combined wind factor of conductors
G_t	Combined wind factor of towers
G_L	Span factor for wind calculations
g	Unit weight of ice (N/m)
$\bar{g}$	Mean value of yearly maximum ice load (N/m)
g_{max}	Maximum weight of ice per unit length observed during a certain number of years (N/m)
g_R	Reference design ice weight (N/m)
g_H	Ice load having a high probability (N/m)
g_L	Ice load having a low probability (N/m)
h	Height of centre of gravity of a panel in a lattice tower (m)
K_R	Terrain roughness factor
K_d	Factor related to the influence of conductor diameter
K_h	Factor to be multiplied by $\bar{g}$ to account for the influence of height above ground
K_n	Factor to be multiplied by $\bar{g}$ to account for the influence of the number of years with icing observations
l_e	Length of a support member (m)
L	Span length or wind span (m)
L_m	Average span (m)
n	Number of years of observation of a climatic event
N	Number of components subjected to maximum loading intensity
P_f	Probability of failure (%)
P_{fi}	Probability of failure of component i (%)
P_s	Probability of survival (%)
P_{si}	Probability of survival of component i (%)

Q	Expression générale servant à identifier les effets des charges liées aux conditions climatiques sur les lignes et leurs composants
Q_T	Charge limite d'un système correspondant à une période de retour T
q_0	Pression dynamique de référence due à la vitesse de référence du vent V_R (q_{0L} , q_{0H} pour les cas de faible et forte probabilités, respectivement) (Pa ou N/m ²)
Re	Nombre de Reynolds
R	Résistance (mécanique)
$\bar{R}$	Résistance moyenne
R_c	Résistance caractéristique
$(e)R$	Limite d'exclusion (e) de la résistance
CSR	Charge statique résiduelle
S_i	Surface projetée des isolateurs (m ²)
S_t	Surface projetée d'un tronçon de pylône (m ²)
t	Charge de givre exprimée par l'épaisseur du manchon répartie uniformément autour du conducteur (mm)
t_R	Charge de givre de référence exprimée par l'épaisseur du manchon répartie uniformément autour du conducteur (mm)
T	Période de retour, en années
u	Nombre d'écarts types entre la résistance moyenne et la résistance caractéristique
U	Facteur d'utilisation
v_x	Coefficient de variation (c.v.) de la variable x
V_m	Vitesse maximale annuelle du vent (m/s)
$\bar{V}_m$	Valeur moyenne des vitesses maximales annuelles du vent (m/s)
V_G	Vent géostrophique maximal annuel du vent (m/s)
$\bar{V}_G$	Valeur moyenne du vent géostrophique maximal annuel du vent (m/s)
V_R	Vitesse de référence du vent (m/s)
V_{iL}	Vitesse de référence du vent liée au givrage et assortie d'une faible probabilité d'occurrence (m/s)
V_{iH}	Vitesse de référence du vent liée au givrage et assortie d'une probabilité élevée d'occurrence (m/s)
w	Poids unitaire du conducteur ou du câble de garde (N/m)
$\bar{x}$	Valeur moyenne de la variable x
Y	Distance horizontale entre les fondations d'un support (m)
z	Hauteur des conducteurs du centre de gravité des tronçons de pylônes ou des chaînes d'isolateurs au-dessus du sol (m)
γ	Facteur de charge (forme générale)
γ_U	Coefficient du facteur d'utilisation
γ_{TW}	Facteur de charge destiné à ajuster la vitesse du vent avec une période de retour T de 50 ans
γ_{Tit}	Facteur de charge destiné à ajuster l'épaisseur du givre avec une période de retour T de 50 ans

Q	General expression used to identify the effects of weather related loads on lines and their components
Q_T	The system limit load corresponding a return period T
q_0	Dynamic reference wind pressure due to reference wind speed V_R (q_{0L} , q_{0H} for low and high probability) (Pa or N/m ²)
Re	Reynolds number
R	Strength
$\bar{R}$	Mean strength
R_c	Characteristic strength
$(e)R$	Exclusion limit (e) of strength
RSL	Residual static load
S_i	Projected area of insulators (m ²)
S_t	Projected area of a tower panel (m ²)
t	Ice load expressed in uniform radial ice thickness around the conductor (mm)
t_R	Reference ice load expressed in uniform radial thickness around the conductor (mm)
T	Return period in years
u	Number of standard deviations between mean strength and characteristic strength
U	Use factor
v_x	Coefficient of variation (COV) of variable x
V_m	Yearly maximum wind speed (m/s)
$\bar{V}_m$	Mean yearly maximum wind speed (m/s)
V_G	Yearly maximum gradient wind speed (m/s)
$\bar{V}_G$	Mean yearly maximum gradient wind speed (m/s)
V_R	Reference wind speed (m/s)
V_{iL}	Low probability reference wind speed associated with icing (m/s)
V_{iH}	High probability reference wind speed associated with icing (m/s)
w	Unit weight of conductor or ground wire (N/m)
$\bar{x}$	Mean value of variable x
Y	Horizontal distance between foundations of a support (m)
z	Height above ground of conductors, centre of gravity of towers panels, or insulator strings (m)
γ	Load factor (general form)
γ_U	Use factor coefficient
γ_{TW}	Load factor to adjust the 50 year wind speed to a return period T
γ_{Tit}	Load factor to adjust the 50 year ice thickness to a return period T

γ_{TiW}	Facteur de charge destiné à ajuster le poids du givre avec une période de retour T de 50 ans
δ	Densité de givre (kg/m^3)
Φ	Facteur de résistance (forme générale)
Φ_R	Facteur de résistance globale
Φ_N	Facteur de résistance dû au nombre de composants soumis à une charge d'intensité maximale
Φ_S	Facteur de résistance dû à la coordination de résistance
Φ_Q	Facteur de résistance relatif à la qualité
Φ_c	Facteur de résistance relatif à la résistance caractéristique R_c
σ_x	Ecart type de la variable x
μ	Masse volumique de l'air (kg/m^3)
τ	Facteur de correction relatif à la densité de l'air
ν	Viscosité cinématique de l'air (m^2/s)
Ω	Angle d'incidence de la direction du vent par rapport au conducteur (degrés)
θ	Angle d'incidence de la direction du vent par rapport au tronçon du pylône (degrés)
θ	Angle d'incidence de la direction du vent par rapport aux éléments cylindriques du pylône (degrés)
χ	Rapport de compacité d'un tronçon de pylône

4 Principes généraux

4.1 Objectif

La présente norme sert l'un ou l'autre des objectifs suivants:

- Fournir des critères de conception pour les lignes aériennes en se fondant sur des notions de fiabilité. Cette méthode faisant appel à la fiabilité est surtout utile dans les zones pour lesquelles il est facile de se procurer un volume significatif de données relatives à la météorologie et à la résistance mécanique. Elle peut aussi s'appliquer aux lignes conçues pour supporter des charges climatiques déterminées à partir de l'expérience ou par étalonnage sur des lignes existantes pour lesquelles on dispose d'un long historique de fonctionnement satisfaisant. On obtiendra alors une cohérence de conception entre les résistances mécaniques de ces composants, sans toutefois forcément connaître le niveau réel de fiabilité, en particulier en l'absence de preuve ou d'expérience relatives à des défaillances de lignes.

Il importe de noter que les critères de conception de la présente norme ne constituent pas un manuel complet de conception des lignes de transport. Celles-ci s'attachent en revanche à donner des conseils sur les moyens d'accroître la fiabilité de telles lignes là où c'est nécessaire, et d'adapter la résistance mécanique des différents composants, de manière à obtenir la coordination souhaitée de la résistance entre ces composants.

Ce document fournit également des prescriptions minimales de sécurité du personnel, afin d'éviter tout dommage corporel et de garantir un niveau acceptable de continuité de service (conception sûre et économique).

- Fournir un cadre pour l'élaboration de Normes nationales sur les lignes de transport, en utilisant des notions de fiabilité et en employant des méthodes probabilistes ou semi-probabilistes. Il incombera à ces Normes nationales de déterminer les données climatiques pertinentes pour l'utilisation et l'application de la présente norme, ainsi que les autres données spécifiques au pays concerné.

γ_{TiW}	Load factor to adjust the 50 year ice weight to a return period T
δ	Ice density (kg/m ³)
Φ	Strength factor (general form)
Φ_R	Global strength factor
Φ_N	Strength factor due to number of components subjected to maximum load intensity
Φ_S	Strength factor due to coordination of strength
Φ_Q	Strength factor due to quality
Φ_c	Strength factor related to the characteristic strength R_c
σ_x	Standard deviation of variable x
μ	Mass of air per unit volume (kg/m ³)
τ	Air density correction factor
ν	Kinetic air viscosity (m ² /s)
Ω	Angle between wind direction and the conductor (degrees)
θ	Angle of incidence of wind direction with the tower panel (degrees)
θ'	Angle of incidence of wind direction with cylindrical elements of tower (degrees)
χ	Solidity ratio of a tower panel

4 General

4.1 Objective

This standard serves either of the following purposes:

- a) It provides design criteria for overhead lines based on reliability concepts. The reliability based method is particularly useful in areas where significant amounts of meteorological and strength data are readily available. This method may however be used for lines designed to withstand specific climatic loads, either derived from experience or through calibration with existing lines that had a long history of satisfactory performance. In these cases, design consistency between strengths of line components will be achieved, but actual reliability levels may not be known, particularly if there has been no evidence or experience with previous line failures.

It is important to note that the design criteria in this standard do not constitute a complete design manual for transmission lines. However, guidance is given on how to increase the line reliability if required, and to adjust the strength of individual components to achieve a desired coordination of strength between them.

This standard also provides minimum safety requirements to protect people from injury, as well as to ensure an acceptable level of service continuity (safe and economical design).

- b) It provides a framework for the preparation of national standards for transmission lines using reliability concepts and employing probabilistic or semi-probabilistic methods. These national standards will need to establish the climatic data for the use and application of this standard in addition to other data specific to each country.

Les critères de conception figurant dans la présente norme s'appliquent aux lignes nouvelles. Nul n'ignore toutefois que les lignes de transport sont sujettes au vieillissement, et que leur résistance mécanique diminue avec le temps. Cette perte de résistance due à l'âge est néanmoins difficile à généraliser, car elle varie selon les composants, et dépend en outre de la nature des matériaux employés, des procédés de fabrication et de l'influence du milieu. L'étude de cette question a été confiée à des organismes techniques compétents.

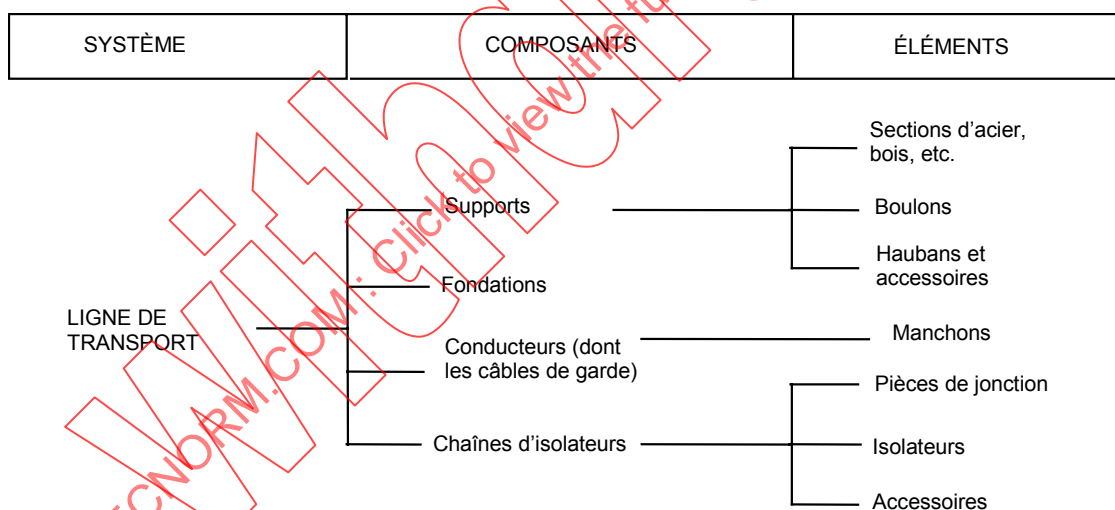
Les prescriptions sont énoncées dans le corps de la présente norme, tandis que les annexes A à C présentent des informations supplémentaires et des explications.

4.2 Conception du système

Une ligne de transport est conçue comme un système lui-même fait de composants: supports, fondations, conducteurs, isolateurs et chaînes d'isolateurs. Cette notion fonde la méthodologie de la présente norme. Cette approche permet au concepteur de coordonner les résistances des composants à l'intérieur du système. Elle admet en outre qu'une ligne de transport est une série de composants dans laquelle la défaillance de tout composant pourrait faire disparaître la capacité de transport de puissance. Elle est censée conduire à une conception globale économique sans discordance indésirable.

De par cette approche systémique de la conception, on admet que la fiabilité d'une ligne dépend de celle de son composant le moins fiable.

Comme le montre la Figure 1, une ligne de transport peut être divisée en quatre composants principaux, dont chacun peut à son tour être décomposé en éléments.



IEC 2165/03

Figure 1 – Schéma d'une ligne de transport

4.3 Fiabilité du système

Les critères de conception décrits dans la présente norme visent à assurer la fiabilité et la sécurité des lignes. On parvient à une telle fiabilité en prescrivant des résistances des composants supérieures aux effets chiffrables de charges spécifiées liées aux conditions climatiques. La présente norme précise quelles sont ces charges, et fournit des moyens de calculer leurs effets sur les lignes de transport. Cependant, il faut aussi admettre que d'autres phénomènes, qui ne sont pas directement envisagés lors de la conception, peuvent entraîner la défaillance d'une ligne: chocs causés par des objets, défauts des matériaux, etc. De ce fait, certaines dispositions, appelées prescriptions de sécurité, sont prévues par la présente norme afin de conférer aux lignes une résistance suffisante pour réduire les dommages et, le cas échéant, leur propagation.

The design criteria in this standard apply to new line conditions. It is however a fact of life that transmission lines age and lose strength with time. The amount of strength reduction due to ageing is difficult to generalize, as it varies from one component to another, and also depends on the type of material, the manufacturing processes and the environmental influences. This issue is currently being studied by relevant technical bodies.

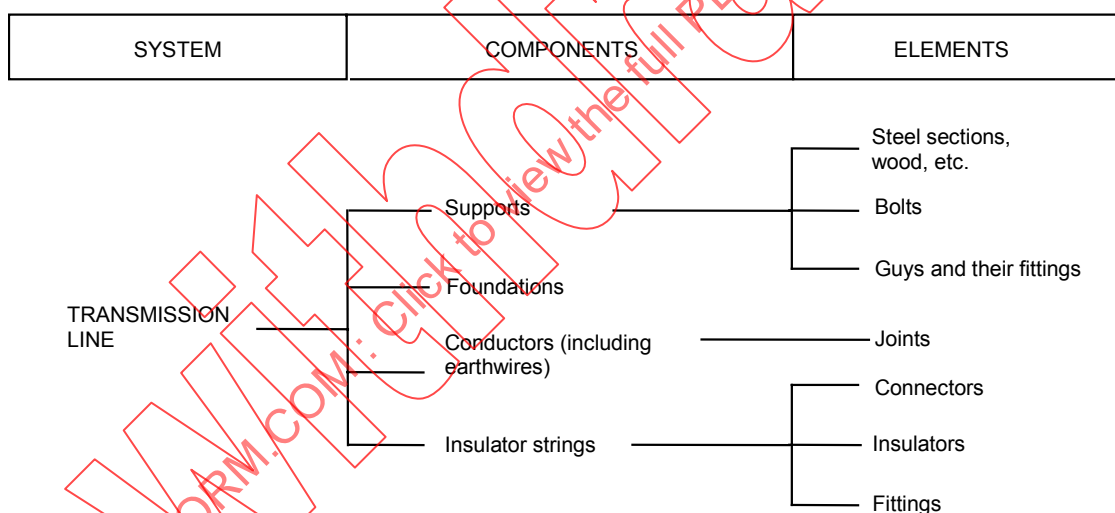
The requirements are specified in this standard, while, in Annexes A to C, additional informative data and explanations are given.

4.2 System design

The methodology is based on the concept whereby a transmission line is designed as a system made of components such as supports, foundations, conductors and insulator strings. This approach enables the designer to coordinate the strengths of components within the system and recognizes the fact that a transmission line is a series of components where the failure of any component could lead to the loss of power transmitting capability. It is expected that this approach should lead to an overall economical design without undesirable mismatch.

As a consequence of such a system design approach, it is recognized that line reliability is controlled by that of the least reliable component.

An overhead transmission line can be divided into four major components as shown in Figure 1. Subsequently, each component may be divided into elements.



IEC 2165/03

Figure 1 – Diagram of a transmission line

4.3 System reliability

The objective of design criteria described in this standard is to provide for reliable and safe lines. The reliability of lines is achieved by providing strength requirements of line components larger than the quantifiable effects of specified weather related loads. These climatic loads are identified in this standard as well as means to calculate their effects on transmission lines. However, it has to be recognized that other conditions, not dealt with in the design process, can occur and lead to line failure such as impact of objects, defects in material, etc. Some measures, entitled security requirements, included in this standard provide lines with enough strength to reduce damage and its propagation, should it occur.

5 Critères généraux de conception

5.1 Méthodologie

La méthodologie conseillée pour le calcul des lignes de transport est résumée à la Figure 2 et peut être décrite de la manière suivante:

- a) Collecte des données préliminaires relatives à la conception de la ligne et aux conditions climatiques.

NOTE 1 Certains pays font figurer dans leurs Normes nationales la vitesse de référence du vent (avec une période de retour de 50 ans, par exemple).

- b1) Choix du niveau de fiabilité en termes de période de retour des charges limites.

NOTE 2 Certaines réglementations et/ou certains codes de bonne pratique nationaux comportent parfois, directement ou indirectement, des prescriptions de conception susceptibles de restreindre le choix offert aux concepteurs.

- b2) Sélection des prescriptions de sécurité structurale (limitation de défaillance).
- b3) Compilation des prescriptions de sécurité imposées par la réglementation obligatoire et par les charges à prendre en compte pendant l'édification et l'entretien.
- c) Calcul des variables climatiques correspondant à la période de retour choisie pour les charges limites.
- d1) Calcul des charges climatiques limites sur les composants.
- d2) Calcul des charges correspondant aux prescriptions de sécurité structurale.
- d3) Calcul des charges relatives aux prescriptions relatives à la sécurité du personnel pendant la construction et l'entretien.
- e) Détermination de la coordination de résistance appropriée entre les composants de la ligne.
- f) Sélection des facteurs de charge et de résistance appropriés applicables aux équations de charge et de résistance.
- g) Calcul des résistances caractéristiques nécessaires pour les composants.
- h) Calcul des composants pour les prescriptions de charge et de résistance citées ci-dessus.

La présente norme traite des points b) à g). Les points a) et h) ne font pas partie de son domaine d'application. Ils sont repérés par un cadre grisé à la Figure 2.

5 General design criteria

5.1 Methodology

The recommended methodology for designing transmission line components is summarized in Figure 2 and can be described as follows:

- a) Collect preliminary line design data and available climatic data.

NOTE 1 In some countries, reference wind speed, such as the 50 year return period, is given in national standards.

- b) Select the reliability level in terms of return period of limit loads.

NOTE 2 Some national regulations and/or codes of practice, sometimes impose directly or indirectly, design requirements that may restrict the choice offered to designers.

- b2) Select the security requirements (failure containment).

- b3) List safety requirements imposed by mandatory regulations and construction and maintenance loads.

- c) Calculate climatic variables corresponding to selected return period of limit loads.

- d1) Calculate climatic limit loads on components.

- d2) Calculate loads corresponding to security requirements.

- d3) Calculate loads related to safety requirements during construction and maintenance.

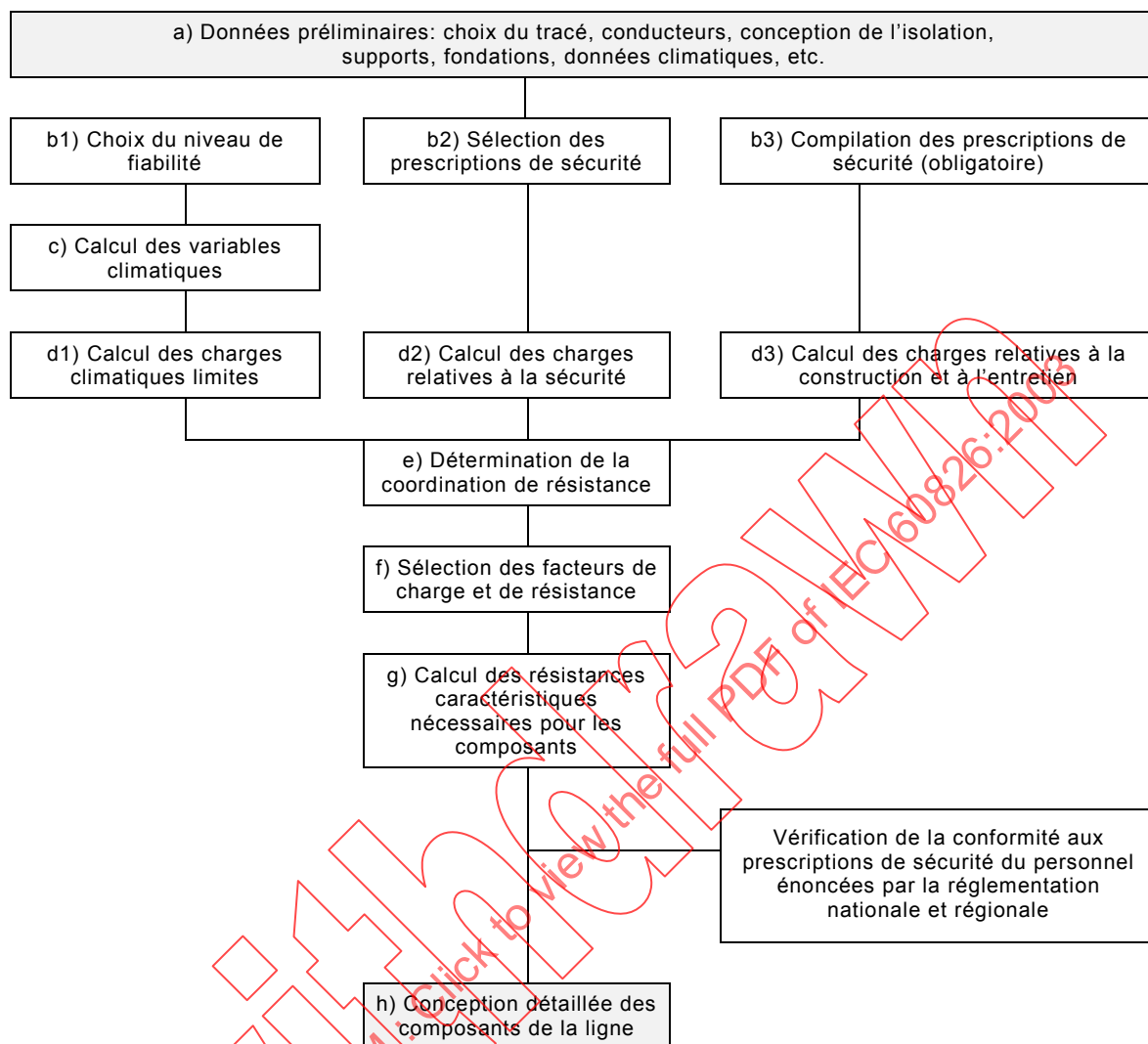
- e) Determine the suitable strength coordination between line components.

- f) Select appropriate load and strength factors applicable to load and strength equations.

- g) Calculate the characteristic strengths required for components.

- h) Design line components for the above strength requirements.

This standard deals with items b) to g). Items a) and h) are not part of the scope of this standard. They are identified by a shaded frame in Figure 2.



IEC 2166/03

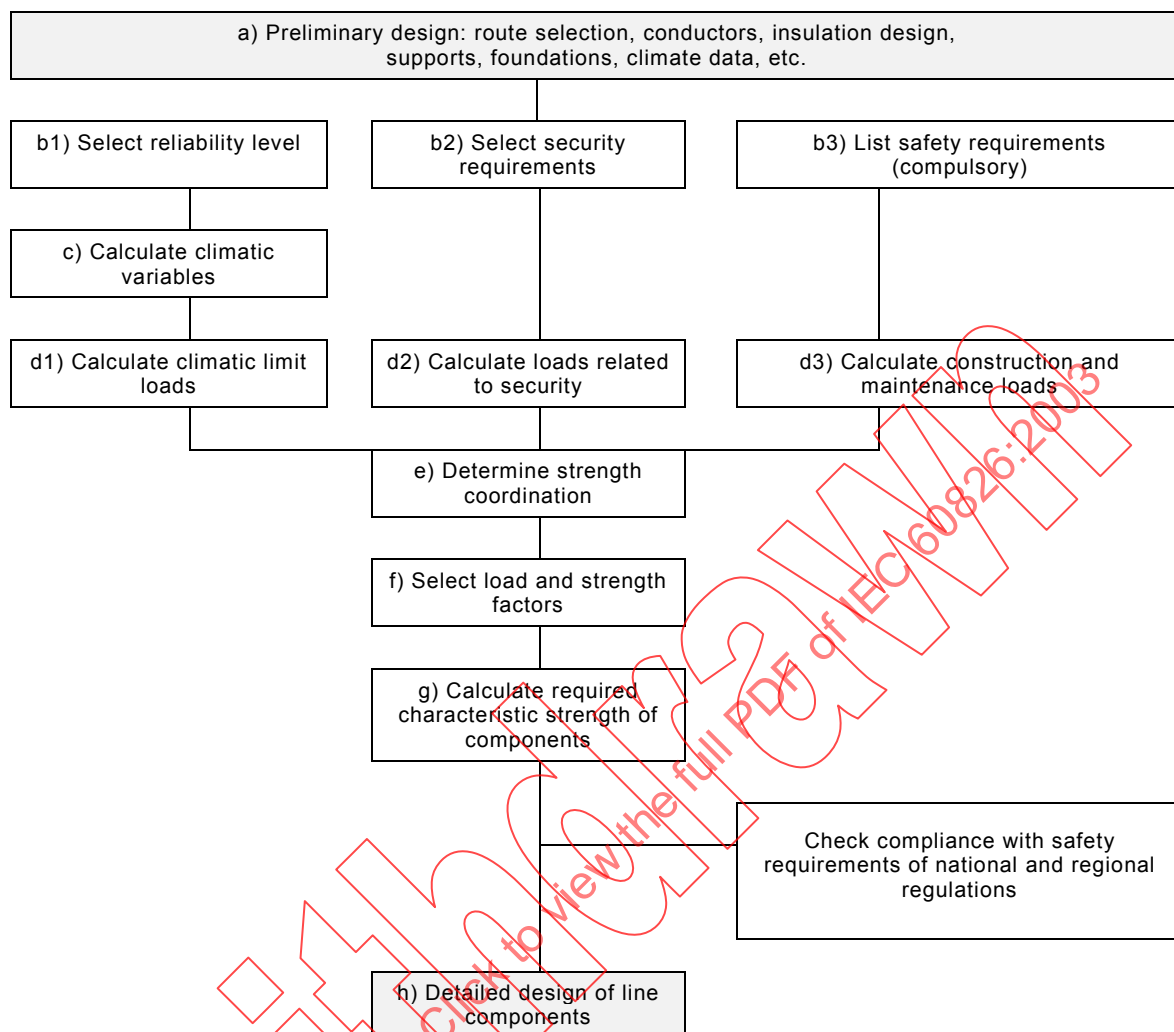
Figure 2 – Méthodologie pour la conception des lignes de transport

5.1.1 Prescriptions liées à la fiabilité

5.1.1.1 Niveaux de fiabilité (charges climatiques)

Les prescriptions liées à la fiabilité visent à garantir que les lignes sont à même, pendant leur durée de vie prévisionnelle, de supporter les charges climatiques limites définies (vent, givre, givre plus vent, compte tenu d'une période de retour T) ainsi que les charges liées à ces événements et d'assurer la continuité de service dans ces conditions.

On peut concevoir les lignes de transport selon différents niveaux (ou classes) de fiabilité. Dans le cadre de la présente norme, le niveau de fiabilité de référence correspond à la fiabilité d'une ligne conçue pour supporter un événement climatique dont la période de retour est de 50 ans, assortie d'une limite d'exclusion de 10 % relative à la résistance mécanique (appliquée aux composants sélectionnés comme étant les moins fiables). On considère généralement ce niveau de fiabilité de référence acceptable en termes de continuité de service et de sécurité du personnel.



IEC 2166/03

Figure 2 – Transmission line design methodology**5.1.1 Reliability requirements****5.1.1.1 Reliability levels (weather related loads)**

Reliability requirements aim to ensure that lines can withstand the defined climatic limit loads (wind, ice, ice and wind, with a return period T) and the loads derived from these events during the projected life cycle of the system and can provide service continuity under these conditions.

Transmission lines can be designed for different reliability levels (or classes). For the purposes of this standard, the reference reliability level is defined as the reliability of a line designed for a 50 year return period climatic event associated with a 10 % exclusion limit of strength (applies to the components selected as the least reliable). This reference reliability level is generally regarded as providing an acceptable reliability level in respect of continuity of service and safety.

Pour concevoir une ligne offrant un niveau de fiabilité supérieur, on allonge la période de retour T des événements climatiques considérés. Ce niveau supérieur peut se justifier, par exemple, par le rôle de la ligne au sein du réseau. La présente norme propose trois niveaux de fiabilité, censés couvrir la plage de valeurs à prendre en compte pour la plupart des lignes de transport. Ces niveaux sont exprimés par rapport à la période de retour des charges climatiques limites indiquée au Tableau 1. Pour les lignes édifiées à titre temporaire, certains poteaux en bois ou les lignes d'importance mineure, il peut être approprié de choisir une période de retour de l'ordre de 25 ans.

Tableau 1 – Niveaux de fiabilité relatifs aux lignes de transport

Niveaux de fiabilité	1	2	3
T , période de retour des charges climatiques limites, en années	50	150	500

NOTE Certaines réglementations et/ou certains codes de bonne pratique nationaux comportent parfois, directement ou indirectement, des prescriptions de conception susceptibles de restreindre le choix offert aux concepteurs.

T peut prendre d'autres valeurs, dans la plage comprise entre 50 ans et 500 ans: 100 ans, 200 ans ou 400 ans, par exemple, si les conditions locales le justifient.

Il arrive que les prescriptions d'une entreprise d'électricité dictent d'autres niveaux de fiabilité, en fonction de l'optimisation recherchée entre le coût initial de la ligne et le coût d'un sinistre à venir, ainsi que des incertitudes liées aux paramètres de conception initiaux.

5.1.1.2 Valeurs approchées de la fiabilité annuelle

Les charges (Q) comme les résistances (R) sont des variables stochastiques et la fiabilité combinée pour ces deux facteurs peut être calculée dès lors que sont connues les fonctions statistiques de la charge Q et de la résistance R . Une ligne est jugée fiable lorsque les effets des charges sont inférieurs à sa résistance mécanique. Cette fiabilité se traduit par l'équation suivante:

Fiabilité annuelle (probabilité de survie) = $1 - \text{probabilité de rupture sur un an} =$

$$1 - \int_{-0}^{+\infty} f_{(Q)} \times F_{(R)} \times dQ$$

où

$f_{(Q)}$ correspond à la fonction de densité de probabilité de la charge Q ;

$F_{(R)}$ correspond à la fonction de répartition de la résistance R .

NOTE La fonction de répartition correspond à l'intégrale de la fonction de densité de probabilité. En d'autres termes,

$$F_{(R)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{(R)} \times dR$$

Lorsque la résistance caractéristique, qui, par convention, présente une probabilité de dépassement de 90 % (la limite d'exclusion est donc de 10 %), est considérée comme étant égale à la charge Q_T (assortie d'une période de retour T), différentes combinaisons probabilistes conduisent à une fiabilité annuelle minimale théorique d'environ $(1 - 1/2T)$. La fiabilité réelle peut être différente si les données initiales de charge et de résistance ne sont pas suffisamment précises, ou font défaut (voir A.1.2 pour plus de détails sur la variation de la probabilité de défaillance). Dans ce cas, la fiabilité absolue peut être inconnue, mais il est possible de calculer sa valeur par rapport à une conception de référence, à condition que les paramètres relatifs à la ligne nouvelle soient comparables aux valeurs de référence.

Lines can be designed for higher reliability levels by increasing the return period T of climatic events. A higher reliability can be justified for example by the importance of the line in the network. Three reliability levels are proposed in this standard and are assumed to cover the range of values to be considered for most transmission lines. These levels are expressed in terms of return periods of climatic limit loads as shown in Table 1. For temporary lines, some wooden poles or lines of limited importance, return periods of about 25 years may be appropriate.

Table 1 – Reliability levels for transmission lines

Reliability levels	1	2	3
T , return period of climatic limit loads, in years	50	150	500

NOTE Some national regulations and/or codes of practice, sometimes impose, directly or indirectly, design requirements that may restrict the choice offered to designers.

Other values of T in the range of 50-500 years, such as 100, 200 and 400 years, can be used if justified by local conditions.

In some cases, individual utility's requirements can dictate other reliability levels depending on the proper optimization between initial cost of the line and future cost of damage, as well as on uncertainties related to input design parameters.

5.1.1.2 Approximate values for yearly reliability

Both loads (Q) and strengths (R) are stochastic variables and the combined reliability is computable if the statistical functions of load Q and strength R are known. The condition for a line to be reliable is when loads effects are less than the strength withstand of the line. The reliability condition translates into the following equation:

Yearly reliability (probability of survival) = 1 - yearly probability of failure =

$$1 - \int_{-0}^{+\infty} f_{(Q)} \times F_{(R)} \times dQ$$

where

$f_{(Q)}$ is the probability density function of load Q ;

$F_{(R)}$ is the cumulative distribution function of strength R .

NOTE The cumulative distribution function is the integral of the probability density function, i.e.

$$F_{(R)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{(R)} \times dR$$

When the characteristic strength, deemed to be the strength being exceeded with 90 % probability (i.e. the exclusion limit is 10 %), is set equal to the load Q_T (having a return period T), various probabilistic combinations lead to a theoretical yearly minimum reliability of around $(1 - 1/2T)$. The actual reliability can be different if input data of load and strength are not sufficiently accurate or available (refer to A.1.2 for further discussions on the variation of probability of failure). In the latter case, the absolute reliability may not be known, but its value relative to a reference design may be computed if new line parameters are comparable to the reference values.

5.1.2 Prescriptions relatives à la sécurité structurale

Les prescriptions de sécurité structurale correspondent à des charges et/ou à des dispositions particulières destinées à réduire le risque de défaillances graduelles (ou en cascade) qui sont susceptibles de se propager bien au-delà d'une défaillance initiale. Ces dispositions sont détaillées en 6.6.

NOTE Certaines dispositions de sécurité structurale, notamment celles consistant à mettre en œuvre une résistance longitudinale aux charges dues à la rupture d'un conducteur afin de limiter les effets d'une défaillance, peuvent accroître le taux de fiabilité de la résistance aux charges dissymétriques de givre.

5.1.3 Prescriptions relatives à la sécurité du personnel

Les prescriptions concernant la sécurité du personnel prennent la forme de charges particulières en fonction desquelles les composants des lignes (principalement les barres des supports) doivent être conçus de façon que les opérations de construction et d'entretien n'exposent pas le personnel à des dangers supplémentaires. Les dispositions correspondantes sont détaillées en 6.5.

5.2 Prescriptions relatives à la relation charge climatique/résistance

5.2.1 Charge limite

Les charges liées aux phénomènes climatiques sont des variables aléatoires. On distingue trois cas de charge associés aux conditions climatiques: vent, givre et vent plus givre combinés. Lorsqu'on dispose de données statistiques sur le vent et/ou le givre, on peut calculer la charge climatique correspondant à la période de retour T retenue, désignée Q_T , pour chaque composant exposé à l'événement climatique considéré. Lors de ce calcul, il convient de tenir compte de l'espace occupé par la ligne et des tendances directionnelles calculables, notamment. Il faut par ailleurs noter que la présente norme n'énonce pas de prescriptions relatives à d'autres phénomènes, tels que les séismes.

Dans le texte de la présente norme, la charge Q_T représente la charge limite du système ayant une période de retour T .

Dans le processus de calcul de chaque composant, la condition suivante doit être vérifiée:

$$\text{Charge limite de conception} < \text{résistance de conception} \quad (1)$$

ou, plus précisément:

Facteur de charge $\gamma \times$ effet de la charge limite $Q_T < \text{facteur de résistance } \phi \times \text{résistance caractéristique } R_c$.

Dans le cadre de l'approche proposée, la conception intègre les charges climatiques limites Q_T sans facteurs de charge supplémentaires. En conséquence, on considère que γ est égal à 1.

La relation énoncée plus haut devient alors:

$$\text{effet de } Q_T < \phi \times R_c \quad (2)$$

Pour les charges climatiques, les effets de Q_T sont détaillés de 6.2 à 6.4.

L'équation (3) sert à calculer la résistance caractéristique minimale R_c que doit présenter chaque composant pour pouvoir supporter les charges limites.

$$R_c > (\text{effet de } Q_T) / \phi \quad (3)$$

5.1.2 Security requirements

Security requirements correspond to special loads and/or measures intended to reduce risk of uncontrollable progressive (or cascading) failures that may extend well beyond an initial failure. These measures are detailed in 6.6.

NOTE Some security measures, such as those providing longitudinal strength of broken conductor loads for failure containment can lead to an increase in reliability to withstand unbalanced ice loads.

5.1.3 Safety requirements

Safety requirements consist of special loads for which line components (mostly support members) have to be designed, to ensure that construction and maintenance operations do not pose additional safety hazards to people. These measures are detailed in 6.5.

5.2 Climatic load-strength requirements

5.2.1 Limit load

Loads associated with climatic events are random variables. Three weather-related loading conditions are recognized: wind, ice, and wind and ice combined. When statistical data of wind and/or ice are available, these can be used to compute the climatic load corresponding to the selected return period T , designated Q_T , for each component exposed to the climatic event under consideration. In the computation process, consideration should be given to the spatial extent of the line, computable directional trends, etc. It is noted that requirements for other events such as earthquakes are not covered in this standard.

Throughout the present standard, the loading Q_T is called the system limit load having a return period T .

In the calculation process for each component, the following condition has to be checked:

$$\text{Design limit load} < \text{design strength} \quad (1)$$

or, more precisely,

$$\text{Load factor } \gamma \times \text{effect of limit load } Q_T < \text{strength factor } \phi \times \text{characteristic strength } R_c.$$

With the approach proposed, climatic limit loads Q_T are used for design without additional load factors. Consequently, γ is taken equal to 1.

Thus the previous relation becomes:

$$\text{effect of } Q_T < \phi \times R_c \quad (2)$$

For weather related loads, the effects of Q_T are detailed in 6.2 to 6.4.

Equation (3) is used to compute the minimum value of characteristic strength R_c for each component in order to withstand limit loads.

$$R_c > (\text{effect of } Q_T) / \phi \quad (3)$$

Q_T peut être obtenu à partir de l'analyse statistique des données climatiques, conformément aux techniques détaillées dans les Annexes A à C. Certaines normes nationales spécifient une variable climatique de référence (qui correspond généralement à une période de retour de 50 ans). Dans ce cas, il est possible d'estimer la variable climatique pour toute période de retour T (années) en multipliant la valeur de référence 50 ans par le facteur de charge γ_T , indiqué au Tableau 2.

Tableau 2 – Facteurs γ_T utilisables par défaut pour ajuster les charges climatiques par rapport à la période de retour T de 50 ans

Période de retour T années	Vitesse du vent	Variable de givre	
	γ_{TW}	γ_{Tit} (épaisseur du manchon de givre)	ou γ_{TiW} (poids du manchon de givre)
50	1	1	1
150	1,10	1,15	1,20
500	1,20	1,30	1,45

NOTE Les valeurs de γ indiquées dans le tableau ci-dessus sont suffisamment précises pour un coefficient de variation pouvant atteindre 0,16 pour la vitesse du vent, 0,30 pour l'épaisseur du manchon de givre et 0,65 pour le poids unitaire du manchon de givre. Elles sont déduites de la fonction de distribution de Gumbel.

5.2.2 Prescriptions de conception relatives au système

La vérification doit s'effectuer selon trois critères de conception: fiabilité, sécurité structurale et sécurité du personnel. Le Tableau 3 résume le contexte des charges, les performances exigées et les états limites liés à chaque critère.

Tableau 3 – Prescriptions de conception du système

Critère (ou prescription)	Type de charges	Fonctionnement requis	Etat limite correspondant
Fiabilité	Charges climatiques dues au vent, au givre, à la combinaison du vent et du givre, pour une période de retour T	Garantir l'aptitude à transporter l'énergie de manière fiable et sûre	Limite d'endommagement
Sécurité structurale	Charges exercées en torsion, verticalement et longitudinalement	Réduire la probabilité d'une propagation incontrôlable des défaillances (limitation de défaillance)	Limite de rupture
Sécurité du personnel	Charges liées à la construction et à la maintenance	Garantir la sécurité des conditions de construction et de maintenance	Limite d'endommagement

5.2.3 Equation de conception pour chaque composant

Lors de la conception des différents composants, l'équation (2) peut être développée de la manière suivante:

$$\gamma_U \times \text{effet de } Q_T < \phi_R \times R_c \quad (4)$$

γ_U correspond au coefficient du facteur d'utilisation. Cette grandeur est déduite de la fonction de distribution du facteur d'utilisation U et exprime la relation entre les conditions ou paramètres effectifs (réels) et de conception (initiaux). Le facteur d'utilisation U est une variable aléatoire égale au rapport de la charge limite constatée exercée sur un composant du fait d'un événement climatique (situation réelle de la ligne) à la charge limite de conception prévue pour ce composant en présence du même phénomène climatique (en se fondant sur les paramètres maximaux). Le recours à γ_U se justifie par le fait que les composants sont

Q_T can be obtained from the statistical analysis of climatic data in accordance with techniques detailed in Annexes A to C. In some national standards, a reference (usually a 50 year return period value) climatic variable is specified. In such case, the climatic variable for any return period T (years) can be estimated by multiplying the 50 year reference value of the climatic variable by the load factor γ_T , given in Table 2.

Table 2 – Default γ_T factors for adjustment of climatic loads in relation to return period T vs. 50 years

Return period T years	Wind speed	Ice variable	
	γ_{TW}	γ_{Tit} (ice thickness)	or γ_{TiW} (ice weight)
50	1	1	1
150	1,10	1,15	1,20
500	1,20	1,30	1,45

NOTE The above γ values are sufficiently accurate for a COV of up to 0,16 for wind speed, 0,30 for ice thickness and 0,65 for unit ice weight and are derived from the Gumbel distribution function.

5.2.2 Design requirements for the system

Three types of design conditions shall be checked: reliability, security and safety. Table 3 summarizes the context of loads, the required performance and the limit states associated with each condition.

Table 3 – Design requirements for the system

Condition (or requirement)	Type of load	Required performance	Corresponding limit state
Reliability	Climatic loads due to wind, ice, ice plus wind, with a return period T	To ensure reliable and safe power transmission capability	Damage limit
Security	Torsional, vertical, and longitudinal loads	To reduce the probability of uncontrollable propagation of failures (failure containment)	Failure limit
Safety	Construction and maintenance loads	To ensure safe construction and maintenance conditions	Damage limit

5.2.3 Design equation for each component

When designing individual line components, Equation (2) can be expanded into:

$$\gamma_U \times \text{effect of } Q_T < \phi_R \times R_c \quad (4)$$

γ_U is the use factor coefficient. It is derived from the distribution function of the use factor U and expresses the relationship between effective (actual) and design (original) conditions or parameters. The use factor U is a random variable equal to the ratio of the effective (actual line conditions) limit load applied to a component by a climatic event to the design limit load

conçus comme des familles de produits, et non pas individuellement. Cependant, puisque cette conception intervient généralement avant que l'on ait spécifiquement connaissance des paramètres applicables en conditions réelles, il est admissible d'utiliser $\gamma_U = 1$ pour la conception des lignes nouvelles.

NOTE Cela revient à considérer que la conception est tributaire de la portée la plus longue de la ligne.

Il importe d'observer que cette simplification ne peut qu'avoir une incidence positive sur la fiabilité. Cependant, l'influence de γ_U sur la fiabilité peut être pleinement prise en compte pour les lignes existantes, pour lesquelles les paramètres d'utilisation des composants sont bien connus. Pour un examen détaillé de ce sujet, voir l'Article B.4.

R_c correspond à la résistance caractéristique. C'est la valeur garantie indiquée dans les normes relatives aux composants neufs. Sa probabilité est généralement comprise entre 90 % et 98 %. Cette valeur est aussi appelée résistance garantie, résistance minimale ou charge de rupture minimale. Si elle n'est pas spécifiée ou calculée, on peut raisonnablement estimer la limite d'exclusion de R_c à 10 % (les valeurs typiques sont comprises entre 2 % et 10 %). On admet généralement que les composants d'une ligne sont sujets au vieillissement, tout comme ceux de n'importe quelle structure, ce qui entraîne une diminution de leur résistance. La présente norme ne traite pas du chiffrage de cette perte de résistance due au temps et les valeurs suggérées dans ce document concernant la fiabilité se réfèrent à une ligne neuve.

Très souvent, les normes n'associent qu'une seule valeur normative à la défaillance d'un composant. L'approche adoptée ici nécessite en revanche de considérer deux limites: d'endommagement et de défaillance. Si la limite d'endommagement correspondant à R_c n'est pas spécifiée dans les normes, on peut se référer aux Tableaux 14 à 17.

ϕ_R est un facteur de résistance global applicable au composant en cours de conception et tenant compte des points suivants:

a) Aspects relatifs au système

- le nombre (N) de composants exposés à la charge limite Q_T lors de toute survenue de ce phénomène, (d'où ϕ_N);
- la coordination des résistances sélectionnées entre les composants, (d'où ϕ_S).

b) Aspects relatifs au composant

- la différence de qualité du composant entre l'essai sur prototypes et la mise en place effective, (d'où ϕ_Q);
- la différence entre la limite d'exclusion effective de R_c et la valeur e supposée = 10 %, (d'où ϕ_c);

Sachant que ces facteurs sont statistiquement indépendants:

$$\phi_R = \phi_N \times \phi_S \times \phi_Q \times \phi_c \quad (5)$$

Tous les facteurs de résistance ϕ énoncés ci-dessus sont détaillés en 7.2.

6 Charges

6.1 Description

Cet article définit les charges structurales prises en compte dans la conception des composants des lignes de transport.

for this component under the same climatic event (using maximum parameters). Symbol γ_U is introduced because components are designed by families, not individually. However, since components are usually designed prior to specific knowledge of their real line parameters, it is admissible to use $\gamma_U = 1$ for new lines design.

NOTE This is equivalent to considering that design is influenced by the maximum span in the line.

It is important to note this simplification will certainly have a positive influence on reliability. However, the influence of γ_U on reliability can be fully considered for existing lines, where use parameters of components are fully known. For a detailed discussion on the subject, refer to Clause B.4.

R_c is the characteristic strength. It is the value guaranteed in appropriate standards for new components, usually with a 90 % to 98 % probability. This value is also called the guaranteed strength, the minimum strength or the minimum failing load. When not specified or calculated, the exclusion limit of R_c can be conservatively taken as 10 % (typical values are in the range of 2 % to 10 %). It is generally accepted that line components will age with time, just like any structural components, and will suffer a reduction in their strength. This quantification of loss of strength with time is not covered in this standard and the reliability values suggested herein are based on new line conditions.

Very often, standards only provide a single normative value usually associated with failure of the component, while the approach mentioned above requires the consideration of two limits: damage and failure limits. If the damage limit corresponding to R_c is not specified in the standards, Tables 14 to 17 can be used to provide such values.

ϕ_R is a global strength factor applicable to the component being designed that takes into account:

- a) Features related to the system
 - the number (N) of components exposed to the limit load Q_T during any single occurrence of this load event, (hence ϕ_N);
 - the coordination of strengths selected between components, (hence ϕ_S).
- b) Features related to the component
 - the difference in the quality of the component during prototype testing and actual installation, (hence ϕ_Q);
 - the difference between the actual exclusion limit of R_c and the supposed $e = 10$ %, (hence ϕ_e);

As these factors are statistically independent:

$$\phi_R = \phi_N \times \phi_S \times \phi_Q \times \phi_e \quad (5)$$

All the above strength factors ϕ are detailed in 7.2.

6 Loadings

6.1 Description

This clause defines structural loadings considered for the design of transmission line components.

Comme l'indique 5.2.1, trois catégories de charges sont envisagées:

- a) Charges dues aux événements climatiques ou toute charge découlant indirectement de ces événements et déterminant la fiabilité de la ligne sur sa durée de vie prévisionnelle.

Ces charges seront analysées dans les paragraphes suivants:

- charges de vent (6.2) ;
- givre sans vent (6.3) ;
- givre avec vent (6.4).
- b) Charges liées aux exigences de sécurité du personnel (construction et entretien) (6.5);
- c) Charges liées aux exigences de sécurité structurale (limitation de défaillance) (6.6).

6.2 Charges climatiques, vent et températures associées

Le présent paragraphe définit les procédures permettant d'évaluer les effets du vent et des températures afférentes sur les composants et éléments des lignes (conducteurs, chaînes d'isolateurs, supports).

6.2.1 Champ d'application

Bien que la méthode présentée dans ce paragraphe soit, dans son principe, applicable à toute ligne aérienne, elle est plus précisément définie pour des conditions suivantes:

- Portées d'une longueur comprise entre 200 m et 800 m. Hors de cette fourchette, le calcul des divers coefficients (de rafale, en particulier) doit être vérifié. Pour les portées supérieures à 800 m, on pourra, toutefois, sans mettre en péril la sécurité des travailleurs, adopter un coefficient de rafale correspondant à une portée de 800 m. Pour les portées de moins de 200 m, il est possible d'utiliser les valeurs applicables à la portée de 200 m.
- Supports d'une hauteur inférieure à 60 m. Des supports plus hauts pourraient être calculés selon les mêmes principes, mais la valeur des efforts de vent demande vérification. La fréquence propre de vibration des structures de plus de 60 m, en particulier, aura souvent pour effet d'accroître le facteur de réponse à la rafale.
- Altitude des régions traversées ne dépassant pas 1 300 m au-dessus du niveau moyen de l'environnement topographique, sauf là où des résultats d'études particulières sont disponibles.
- Terrains ne présentant pas de caractéristiques topographiques dont la taille et la forme sont susceptibles d'affecter de manière significative le profil du vent de la région considérée.

Il importe de noter que la présente norme ne traite pas spécifiquement des prescriptions relatives aux vents associés à des phénomènes localisés tels que les tornades. Or, ces vents peuvent causer d'importants dégâts aux lignes de transport, que ce soit directement (du fait de leur force) ou indirectement (par suite d'impact d'objets ainsi transportés). En outre, les effets d'accélération dus au phénomène d'entonnoir entre des collines ou à la pente de terrains ne sont pas non plus envisagés dans ce document. Des études spécifiques peuvent donc se révéler nécessaires pour évaluer ces effets.

6.2.2 Rugosité du terrain

La vitesse et la turbulence du vent dépendent de la rugosité du terrain. Plus cette rugosité est forte, plus la turbulence augmente et plus la vitesse du vent à proximité du sol diminue. La présente norme envisage quatre catégories de terrains, par ordre croissant de rugosité (voir Tableau 4).

As indicated in 5.2.1, three load categories are considered:

- a) Loads due to climatic events or any loads derived from them which govern the reliability of the line for the expected life time.

These loads will be analysed in the following subclauses:

- wind loads (6.2);
- ice without wind (6.3);
- ice with wind (6.4).

- b) Loads related to safety requirements (construction and maintenance) (6.5);

- c) Loads related to security requirements (failure containment) (6.6).

6.2 Climatic loads, wind and associated temperatures

This subclause defines the procedures to evaluate the wind and associated temperature effects on line components and elements (conductors, insulator strings, supports).

6.2.1 Field of application

Although this subclause applies in principle to any overhead line, it is most accurately defined for the following conditions:

- Span lengths between 200 m and 800 m. Calculations of the various coefficients (in particular for gusty winds) have to be checked for span lengths outside this range. However, for span lengths greater than 800 m, a gust coefficient corresponding to 800 m span could be safely chosen. For span lengths less than 200 m, the values applicable to 200 m span can be applied.
- Height of supports less than 60 m. Taller supports could be designed following the same principles, but the calculated wind actions would need to be checked. In particular, the eigen frequency of structures above 60 m will often increase the gust response factor.
- Altitude of crossed areas not exceeding 1 300 m above the average level of the topographic environment, except where specific study results are available
- Terrain without local topographical features whose size and shape are likely to significantly affect the wind profile of the region under consideration.

It is important to note that requirements for winds associated with localized events such as tornadoes are not specifically covered in this standard. These winds can cause serious damage to transmission lines either directly (due to wind forces) or indirectly (due to impact of wind carried objects). Furthermore, the effects of acceleration due to funnelling between hills or due to sloping grounds are not covered and may require specific studies to assess such influences.

6.2.2 Terrain roughness

Wind speed and turbulence depends on the terrain roughness. With increasing terrain roughness, turbulence increases and wind speed decreases near ground level. Four types of terrain categories, with increasing roughness values, are considered in this standard as indicated in Table 4.

Tableau 4 – Classification des catégories de terrain

Catégories de terrain	Caractéristiques de rugosité	K_R
A	Vastes étendues d'eau exposées au vent, zones côtières plates	1,08
B	Paysages de rase campagne avec très peu d'obstacles: aéroports ou champs cultivés comportant très peu d'arbres ou de bâtiments, par exemple	1,00
C	Terrain comportant de nombreux petits obstacles de faible hauteur (haies, arbres et constructions)	0,85
D	Zones suburbaines ou terrains comportant des arbres grands et nombreux	0,67

Le facteur de rugosité K_R du Tableau 4 doit être multiplié par la vitesse de référence du vent, pour permettre la conversion d'une catégorie de terrain à une autre. L'utilisation de K_R est détaillée en 6.2.3, tandis que l'Article A.4 décrit les caractéristiques définissant la rugosité du terrain.

6.2.3 Vitesse de référence du vent V_R

V_R est défini comme étant la vitesse de référence du vent (m/s) correspondant à une période de retour T . V_R peut être déterminé par une analyse statistique des données relatives à la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol, intégrées sur une période de 10 min. V_R est généralement mesuré dans des stations météorologiques typiques des terrains de type B, tels que les aéroports, et s'écrit alors V_{RB} . Lorsque les données disponibles relatives au vent s'écartent de ces hypothèses, il convient d'appliquer les méthodes de conversion décrites à l'Article A.4. Si l'on connaît seulement la vitesse de référence du vent pour les terrains de catégorie B, V_{RB} , il est possible de déterminer V_R en appliquant la formule suivante: $V_R = K_R V_{RB}$, où K_R correspond au facteur de rugosité.

NOTE Certains pays, tels que les Etats-Unis, calculent depuis peu la vitesse moyenne du vent sur 3 s. La conversion entre cette période de mesure sur 3 s et celle sur 10 min peut être déduite des statistiques de vent, s'il en existe, ou, à défaut, de la Figure A.7.

6.2.4 Combinaison de la vitesse du vent et de la température

Sauf à établir une corrélation fortement positive entre la vitesse du vent et la température, on suppose que la vitesse maximale du vent ne coïncide pas habituellement avec la température minimale. En conséquence, seules deux combinaisons doivent normalement être prises en compte au titre de la conception. La première allie la vitesse maximale du vent à la moyenne des températures minimales journalières et la seconde associe vent réduit et température minimale la plus basse.

En pratique, il importe de vérifier les deux combinaisons suivantes:

a) Grand vent plus température de référence

Les vitesses du vent définies plus haut à des fins de calcul doivent être considérées comme survenant lorsque la température de l'air est égale à la moyenne des températures minimales journalières sur le site considéré.

b) Vitesse du vent réduite plus température minimale

b1) Vitesse du vent réduite

La vitesse du vent réduite est égale à la vitesse de référence du vent V_R multipliée par un coefficient choisi en fonction des conditions météorologiques locales. En l'absence de connaissances fiables sur ces conditions locales, il est suggéré d'adopter une valeur de 0,6 pour ce coefficient.

Table 4 – Classification of terrain categories

Terrain category	Roughness characteristics	K_R
A	Large stretch of water upwind, flat coastal areas	1,08
B	Open country with very few obstacles, for example airports or cultivated fields with few trees or buildings	1,00
C	Terrain with numerous small obstacles of low height (hedges, trees and buildings)	0,85
D	Suburban areas or terrain with many tall trees	0,67

In Table 4, the roughness factor K_R represents a multiplier of the reference wind speed for conversion from one terrain category to another. The use of K_R is detailed in 6.2.3. A description of terrain roughness characteristics is given in Clause A.4.

6.2.3 Reference wind speed V_R

V_R is defined as the reference wind speed (m/s) corresponding to a return period T . V_R can be determined from a statistical analysis of relevant wind speed data at 10 m above ground and with an averaging period of 10 min. Usually V_R is measured in weather stations typical of terrain type B, such as airports. In such cases, V_R is identified as V_{RB} . Where available wind data differs from these assumptions, refer to Clause A.4 for conversion methods. If the reference wind speed for terrain category B, V_{RB} is only known, V_R can be determined with $V_R = K_R V_{RB}$, where K_R is the roughness factor.

NOTE Some countries, such as the USA, have recently switched to the 3 s averaging period. The conversion from the 3 s to the 10 min wind can be derived from available wind statistics, or if lacking, from Figure A.7

6.2.4 Combination of wind speed and temperatures

Unless a strong positive correlation is established between wind speed and temperature, it is assumed that maximum wind speed does not usually occur with minimum temperature. Consequently, only two combinations shall normally be considered for design purposes; the first being maximum wind at average daily minimum temperature and the second being reduced wind at the extreme minimum temperature.

In practice, the following two combinations need to be checked:

a) High wind speed plus reference temperature condition

The wind velocities defined above for computation shall be considered as occurring at an air temperature equal to the average of the daily minimum temperatures, peculiar to the site.

b) Reduced wind speed at the minimum low temperature condition

b1) Reduced wind speed

The reduced wind speed is equal to the reference wind speed V_R multiplied by a coefficient chosen according to local meteorological conditions. When there is no reliable knowledge of local conditions a value of 0,6 for this coefficient is suggested.

b2) Température associée à la vitesse du vent réduite

La température minimale doit être considérée comme étant égale à la valeur annuelle minimale assortie d'une période de retour de T ans.

Il est à noter que la combinaison de la vitesse du vent réduite et des températures minimales n'a pas, en règle générale, d'incidence sur la conception des lignes de transport. On peut donc faire l'impasse sur ce cas de charge, sauf en ce qui concerne les supports assortis de portées très courtes (généralement moins de 200 m) et les températures minimales très basses (généralement en deçà de -30 °C) ou les supports d'arrêt.

6.2.5 Action unitaire de la vitesse du vent sur un composant ou élément de ligne quelconque

La valeur caractéristique a de l'effort unitaire en Pa (N/m^2), dû à un vent soufflant à angle droit par rapport à un composant ou élément quelconque de la ligne (conducteurs, chaînes d'isolateurs, tout ou partie du support) est donnée par l'expression suivante:

$$a = q_0 C_x G \quad (6)$$

q_0 correspond à la pression dynamique de référence (en Pa ou en N/m^2). Cette grandeur est donnée en termes de vitesse de référence du vent V_R modifiée par le facteur de rugosité K_R (voir Tableau 4) correspondant à la catégorie de terrain à l'emplacement de la ligne:

$$q_0 = \frac{1}{2} \mu (K_R V_{RB})^2 \quad (V_{RB} \text{ est exprimé en m/s, et } q_0 \text{ en } \text{N/m}^2) \quad (7)$$

μ est la masse volumique de l'air (égale à $1,225\text{ kg/m}^3$ à la température de 15 °C et sous la pression atmosphérique normale de $101,3\text{ kPa}$ au niveau de la mer);

τ est le facteur de correction de la densité de l'air. Lorsqu'on sait qu'il existe une forte corrélation entre les vitesses limites du vent et une altitude et/ou une température qui diffèrent significativement des hypothèses fixées à 15 °C et au niveau de la mer, le facteur de correction τ indiqué au Tableau 5 peut être appliqué à la pression q_0 . Dans les autres cas, τ est considéré comme étant égal à 1;

C_x est le coefficient de traînée (ou de pression) dépendant de la forme et des propriétés surfaciques de l'élément considéré;

G est le facteur combiné de vent tenant compte de l'influence de la hauteur de l'élément au-dessus du sol, de la catégorie de terrain, des rafales et de la réponse dynamique (effet provenant du composant). Dans le cas des charges affectant les conducteurs, ce facteur doit être divisé en deux sous-facteurs: G_L et G_C .

Ces facteurs doivent être considérés séparément pour chaque composant ou élément de la ligne.

Tableau 5 – Facteur de correction τ de la pression dynamique du vent de référence q_0 due à l'altitude et aux températures

Température °C	Altitude m			
	0	1 000	2 000	3 000
30	0,95	0,84	0,75	0,66
15	1,00	0,89	0,79	0,69
0	1,04	0,94	0,83	0,73
-15	1,12	0,99	0,88	0,77
-30	1,19	1,05	0,93	0,82

NOTE La valeur de référence correspond à une altitude de 0 m et à une température de 15 °C .

b2) Temperature associated with the reduced wind speed

The minimum temperature shall be considered as being equal to the minimum yearly value, having a return period of T years.

It is noted that the design of transmission lines is not generally controlled by the combination of reduced wind speed and minimum low temperatures. This loading case may therefore be omitted, except for cases of supports with very short spans (typically less than 200 m) and minimum low temperatures (typically below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$), or dead-end supports.

6.2.5 Unit action of the wind speed on any line component or element

The characteristic value a of the unit action in Pa (N/m^2), due to the wind blowing at right angles to any line component or element (conductors, insulator strings, all or part of the support) is given by the following expression:

$$a = q_0 C_x G \quad (6)$$

q_0 is the dynamic reference wind pressure (in Pa or N/m^2) and is given in terms of the reference wind speed V_R modified by roughness factor K_R (see Table 4) corresponding to the terrain category at the location of the line:

$$q_0 = \frac{1}{2} \tau \mu (K_R V_{RB})^2 \quad (V_{RB} \text{ in m/s, and } q_0 \text{ in N/m}^2) \quad (7)$$

μ is the air mass per unit volume equal to $1,225\text{ kg/m}^3$ at a temperature of $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ and an atmospheric pressure of $101,3\text{ kPa}$ at sea level;

τ is the air density correction factor. When limit wind speeds are known to be strongly correlated with an altitude and/or temperature significantly different from the assumptions of $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ and sea level, the correction factor τ given in Table 5 can be applied to the pressure q_0 , otherwise, τ is considered to be equal to 1;

C_x is the drag (or pressure) coefficient depending on the shape and surface properties of the element being considered;

G is the combined wind factor, taking into account the influences of the height of the element above ground level, terrain category, wind gusts and dynamic response (component effect). In the case of conductor loads, this factor shall be split into two factors G_L and G_C .

These factors shall be considered separately for each line component or element.

Table 5 – Correction factor τ of dynamic reference wind pressure q_0 due to altitude and temperatures

Temperature $^{\circ}\text{C}$	Altitude m			
	0	1 000	2 000	3 000
30	0,95	0,84	0,75	0,66
15	1,00	0,89	0,79	0,69
0	1,04	0,94	0,83	0,73
-15	1,12	0,99	0,88	0,77
-30	1,19	1,05	0,93	0,82

NOTE The reference value corresponds to 0 m altitude and a temperature of $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.2.6 Evaluation des charges de vent sur les éléments et composants des lignes

6.2.6.1 Charges de vent sur les conducteurs

Le vent agit sur les conducteurs par des charges dues à la pression qu'il exerce et en augmentant la tension mécanique.

La charge (A_c), en N, due à la pression du vent sur une portée de longueur L (portée-vent), appliquée au niveau du support et soufflant à un angle Ω par rapport aux conducteurs, se calcule au moyen de l'expression suivante, en reprenant la grandeur q_0 de l'équation (7).

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega \quad (8)$$

où

C_{xc} est le coefficient de traînée du conducteur, considéré comme étant égal à 1,00 pour les conducteurs toronnés et les vitesses de vent généralement considérées. On peut également utiliser d'autres valeurs, issues de mesurages directs ou d'essais en soufflerie.

G_c est le facteur combiné de vent pour les conducteurs (voir Figure 3), et dépendant de la hauteur z et du type de terrain.

G_L est le facteur de portée (voir Figure 4).

d est le diamètre du conducteur (m).

L est la portée-vent du support, égale à la moitié de la somme des longueurs des portées adjacentes au support.

Ω est l'angle d'incidence du vent par rapport au conducteur (Figure 6).

L'effet total du vent sur les conducteurs en faisceaux sera considéré comme égal à la somme des efforts sur les sous-conducteurs, sans tenir compte de l'effet de masque possible d'un des sous-conducteurs sur un autre.

La hauteur à prendre en compte pour les conducteurs est le centre de gravité des conducteurs suspendus. Elle se situe théoriquement au niveau du tiers inférieur de la flèche. Dans les calculs concernant les supports des lignes de transport, on peut admettre que z est égal à la hauteur du point de fixation du conducteur au support (armement en nappe) ou du conducteur central (lignes à deux circuits). Ces hypothèses relatives aux conducteurs sont prudentes et compensent la hauteur accrue du câble de garde au faite du support.

L'équation générale destinée à calculer les forces exercées par le vent sur un conducteur porté par un support d'angle est fournie en A.4.6.

Des valeurs autres que celles des Figures 3 et 4 peuvent être utilisées dès lors que l'on dispose des données pertinentes et de modèles validés.

6.2.6 Evaluation of wind loads on line components and elements

6.2.6.1 Wind loads on conductors

Wind effects on conductors consist of loads due to wind pressure as well as the effect of the increase in the mechanical tension.

The load (A_c) in N due to the effect of the wind pressure upon a wind span L , applied at the support and blowing at an angle Ω with the conductors, is given by the following expression, using q_0 of Equation (7).

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega \quad (8)$$

where

C_{xc} is the drag coefficient of the conductor taken equal to 1.00 for the generally considered stranded conductors and wind velocities. Other values can be used if derived from direct measurements or wind tunnel tests.

G_c is the combined wind factor for the conductors given in Figure 3, which depends on height z and terrain categories.

G_L is the span factor given in Figure 4.

d is the diameter of the conductor (m).

L is the wind span of the support, equal to half the sum of the length of adjacent spans of the support.

Ω is the angle between the wind direction and the conductor (Figure 6).

The total effect of the wind upon bundle conductors shall be taken as equal to the sum of the actions on the sub-conductors without accounting for a possible masking effect of one of the sub-conductors on another.

The height to be considered for conductors is the center of gravity of the suspended conductor theoretically located at the lower third of the sag. For the purpose of transmission support calculations, it is acceptable to consider z equal to the height of attachment point of the conductor at the support (for flat configuration) or of the middle conductor (for double circuit configuration). These assumptions for conductors are conservative and compensate for the increased height of the ground wire on top of the support.

The general equation for computing conductor wind forces on an angle support is given in A.4.6.

Values different from Figures 3 and 4 can be used if supported by data and validated models.

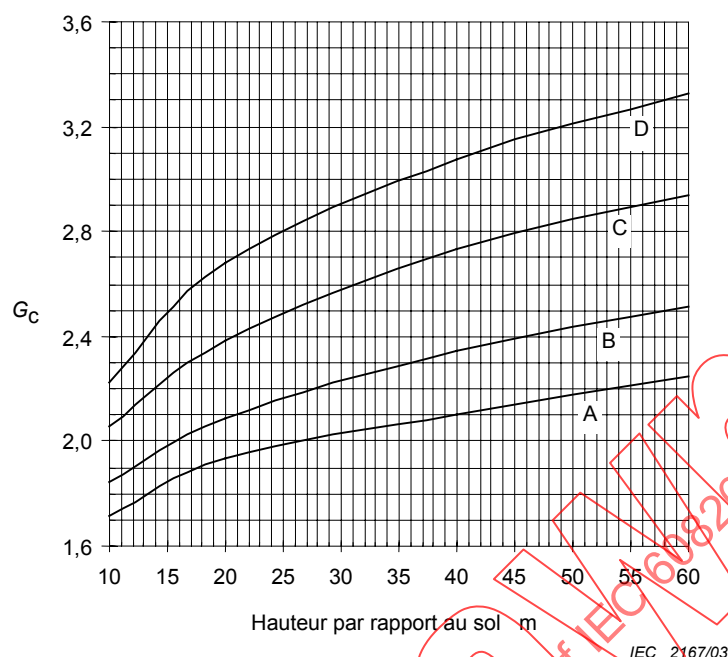


Figure 3 – Facteur combiné de vent G_c pour les conducteurs, en fonction de différentes catégories de terrains et hauteurs au-dessus du sol

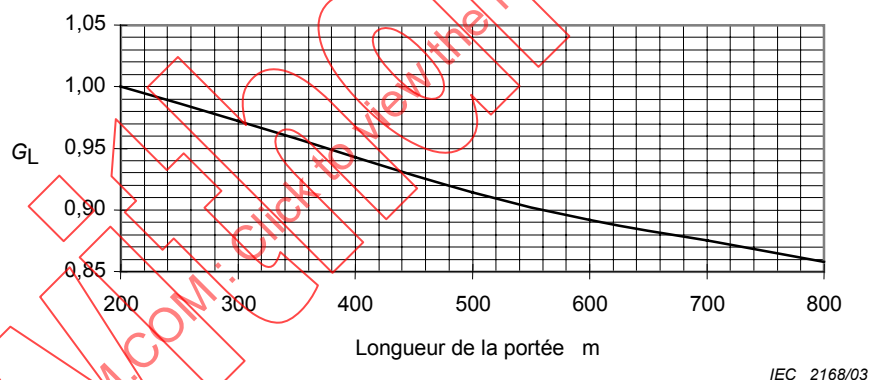


Figure 4 – Facteur de portée G_L

6.2.6.2 Effets du vent sur la tension mécanique des conducteurs

Les efforts dus au vent sur les conducteurs accroissent la tension mécanique de ces éléments dans des proportions qui peuvent être calculées par des méthodes standard de calcul de la flèche ou de la tension mécanique. Comme l'indique 6.2.4, deux combinaisons de vent et de température doivent être prises en considération à cet égard.

En présence d'une série de portées séparées par des isolateurs de suspension, la notion de portée équivalente peut être utilisée dans les calculs de la tension mécanique. Fait important, cette notion implique que la pression du vent est la même sur toutes les portées situées entre deux chaînes d'ancrage. Cette hypothèse gagne en prudence avec le nombre de portées en suspension et la longueur des chaînes d'isolateurs. La charge de vent calculée au moyen de l'équation 8 peut, dans certains cas, être réduite sur la foi de l'expérience ou des données disponibles. Cependant, cette réduction ne doit jamais dépasser 40 %. Par ailleurs, aucune réduction n'est applicable aux câbles de garde, parce que l'absence de chaînes d'isolateurs de suspension empêche l'équilibrage des tensions horizontales, et ce, même au niveau des supports de suspension. Cette absence interdit donc d'appliquer, pour ce cas, le concept de portée équivalente.

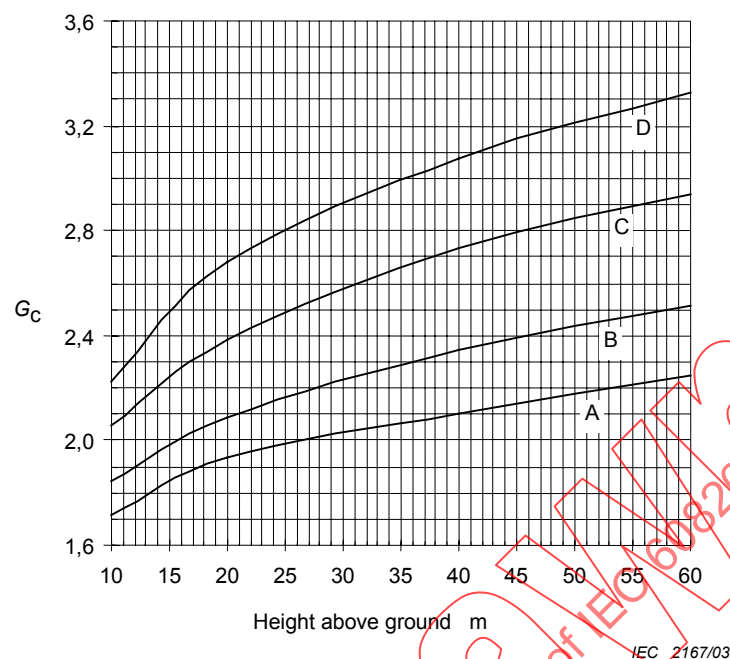


Figure 3 – Combined wind factor G_c for conductors for various terrain categories and heights above ground

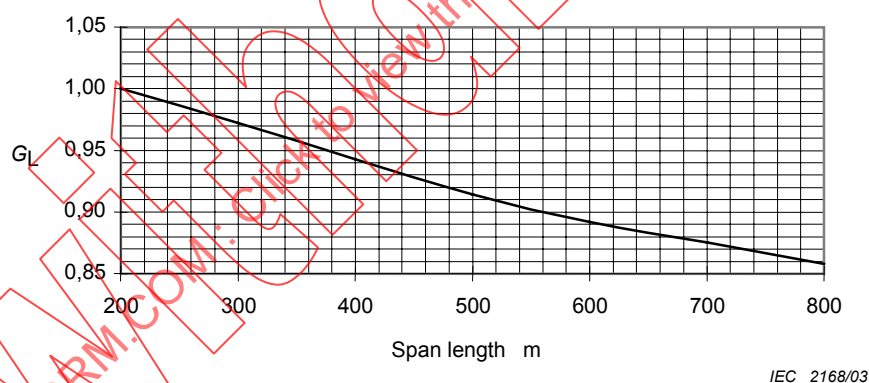


Figure 4 – Span factor G_L

6.2.6.2 Wind effect on conductor tension

Wind acting on conductors will cause an increase in their mechanical tension that can be computed with standard sag-tension methods. Two cases of wind and temperature combinations shall be checked, as stated in 6.2.4.

If a series of spans is separated by suspension insulators, the ruling span concept may be used for tension calculations. It is important to note that the ruling span concept implies that the same wind pressure applies to all spans between dead-end insulators. This assumption becomes more conservative with an increasing number of suspension spans and length of insulator strings. In some cases the wind load calculated with Equation 8 can be reduced, if supported by experience or data, but in no case by more than 40 %. With regard to ground wires, no reduction of wind pressure is applicable because the absence of suspension insulator strings prevents equilibrium of horizontal tensions even at suspension supports, hence, results in the inapplicability of the ruling span concept.

NOTE 1 La portée équivalente d'une série de portées en suspension entre deux ancrages est égale à $(\sum L^3 / \sum L)^{1/2}$.

NOTE 2 Il convient d'être prudent dans l'application du facteur de réduction susmentionné (jusqu'à 40 %) parce que certains supports peuvent être implantés dans des cantons comprenant un petit nombre de portées en suspension, ou même former une seule portée entre deux pylônes d'arrêt, auquel cas aucun facteur de réduction n'est appliqué.

6.2.6.3 Charges de vent sur les chaînes d'isolateurs

Les efforts dus au vent sur les chaînes d'isolateurs résultent de la charge A_c , transférée par les conducteurs, et de la pression du vent agissant directement sur les chaînes d'isolateurs. Cette charge est considérée, par convention, comme s'appliquant au point d'accrochage sur le pylône, dans la direction du vent. Sa valeur (en N) s'obtient par la formule suivante:

$$A_i = q_0 C_{xi} G_t S_i \quad (9)$$

où

q_0 est la pression dynamique de référence en Pa (N/m²);

C_{xi} est le coefficient de traînée des isolateurs, considéré comme étant égal à 1,20;

G_t est le facteur combiné de vent (voir Figure 5), variant selon la rugosité du terrain et la hauteur du centre de gravité de la chaîne d'isolateurs au-dessus du terrain environnant. On peut utiliser la même hauteur moyenne que pour les conducteurs.

S_i est l'aire de la chaîne d'isolateurs projetée horizontalement sur un plan vertical parallèle à l'axe de la chaîne (m²). En présence de plusieurs chaînes, on peut considérer, par prudence, que l'aire totale équivaut à la somme des aires de chaque chaîne.

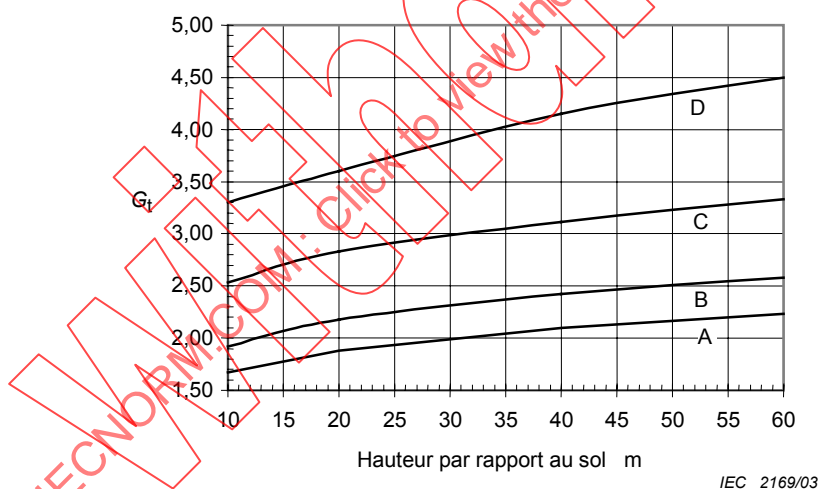


Figure 5 – Facteur combiné de vent G_t applicable aux supports et aux chaînes d'isolateurs

Il est à noter que la pression du vent sur les chaînes d'isolateurs n'a qu'un effet minime sur la conception des supports. En conséquence, il peut être acceptable de simplifier, pour la plupart des lignes, le calcul de la pression due au vent en adoptant, par prudence, la même pression que celle qui s'exerce sur les supports.

6.2.6.4 Charges de vent sur les supports

Le vent agit sur les supports par l'intermédiaire des charges qu'il exerce sur les conducteurs et les isolateurs et par les charges qu'il applique directement sur le support.

NOTE 1 The ruling span of a series of suspension spans between dead-ends, is equal to $(\Sigma L^3 / \Sigma L)^{1/2}$.

NOTE 2 Caution should be exerted when using the above reduction factor of up to 40 % because some supports may be used in sections with few suspension spans and even as a single span between dead-end towers, in such case, no reduction factor is applied.

6.2.6.3 Wind loads on insulator strings

Wind loads acting on insulator strings originate from the load A_c transferred by the conductors and from the wind pressure acting directly on the insulator strings. The latter load is applied conventionally at the attachment point to the support in the direction of the wind and its value (in N) is given by:

$$A_i = q_0 C_{xi} G_t S_i \quad (9)$$

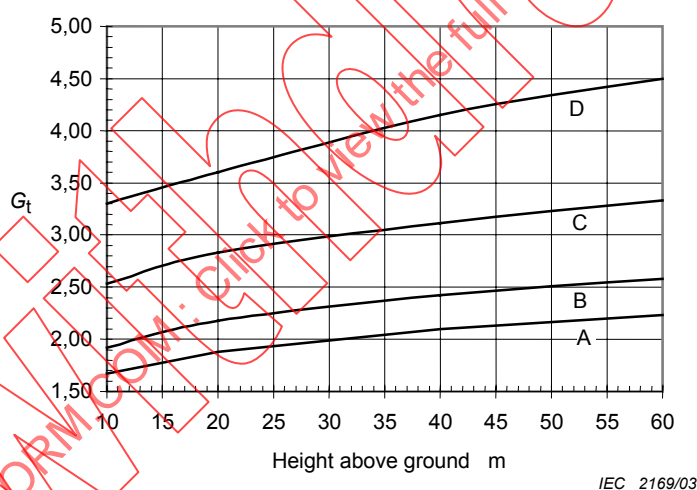
where

q_0 is the dynamic reference wind pressure in Pa (N/m^2);

C_{xi} is the drag coefficient of the insulators, considered equal to 1,20;

G_t is the combined wind factor given in Figure 5, variable with the roughness of the terrain, and with the height of the centre of gravity of the insulator string above the surrounding land. The same average height of conductors can be used.

S_i is the area of the insulator string projected horizontally on a vertical plane parallel to the axis of the string (m^2). In the case of multiple strings, the total area can be conservatively taken as the sum of all strings.



IEC 2169/03

Figure 5 – combined wind factor G_t applicable to supports and insulator strings

It is noted that wind on insulator strings has a small effect on design of supports. Consequently, it may be acceptable for most lines to simplify the calculation of wind pressure by conservatively adopting the same pressure as the one applied to supports.

6.2.6.4 Wind loads on supports

Wind loads on the supports consist of the wind loads transmitted by conductors and insulators as well as the wind loads acting on the support itself.

La méthode de calcul des charges de vent sur les supports eux-mêmes n'est donnée dans cette norme que pour les types de supports les plus répandus, c'est-à-dire ceux en treillis ou comportant des éléments cylindriques. Cette méthode peut néanmoins s'appliquer à d'autres types de supports.

Lors de la conception détaillée des supports, le calcul des charges de vent sur ces composants nécessite le recours à un processus itératif. Cela tient au fait que la surface projetée des barres n'est connue qu'après l'achèvement de la conception détaillée.

6.2.6.4.1 Pylônes à section rectangulaire en treillis

Pour déterminer l'effet du vent sur le pylône en treillis lui-même, ce dernier est décomposé en différents tronçons. La hauteur prise en compte pour chaque tronçon est normalement celle atteinte entre les intersections des membrures et des croisillons.

Pour un pylône à section carrée ou rectangulaire, réalisé en treillis, l'effort du vent A_t (en N) dans la direction de celui-ci, appliqué au centre de gravité de ce tronçon, constitué de différentes barres, est égal à:

$$A_t = q_0 (1 + 0,2 \sin^2 2\theta) (S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta) G_t \quad (10)$$

où

q_0 est la pression dynamique de référence du vent, exprimée en Pa (N/m^2), voir l'équation (7);

θ est l'angle d'incidence du vent par rapport à la perpendiculaire de la face 1 du tronçon de pylône dans un plan horizontal (Figure 6) ;

S_{t1} est la surface totale projetée normalement à la face 1 du tronçon (m^2);

S_{t2} est la surface totale projetée normalement à la face 2 des barres de la face 2 du même tronçon (m^2). Les projections des éléments de contreventement des faces adjacentes et des barres de contreventement de ceinture peuvent être négligées pour la détermination de la surface projetée d'une face.

C_{xt1}, C_{xt2} sont les coefficients de traînée propres aux faces 1 et 2 pour un vent perpendiculaire à chaque face. C_{xt1}, C_{xt2} sont donnés à la Figure 7, pour des tronçons de pylône où tout ou partie des barres présentent des surfaces planes, et à la Figure 8, quand toutes les barres sont de section circulaire.

χ est le rapport de compacité d'un tronçon, égal à la surface projetée des barres de ce dernier, divisée par la surface totale du tronçon. Le rapport de compacité χ d'une face est le rapport entre la surface totale des barres (S_{t1} ou S_{t2}) définie ci-dessus et la surface circonscrite de la face du tronçon considéré.

G_t est le facteur combiné de vent pour les supports envisagés à la Figure 5. La hauteur au-dessus du sol est mesurée au niveau du centre de gravité du tronçon.

The method of determination of wind loadings on the support itself is only given in this standard for the most common types of supports, i.e. lattice towers and towers with cylindrical elements. This method can, however, be applied to other types of supports.

During detailed design of supports, an iterative process is required in order to compute wind loads on supports. This is due to the fact that the projected area of members is only known after completion of the detailed design.

6.2.6.4.1 Lattice towers of rectangular cross-section

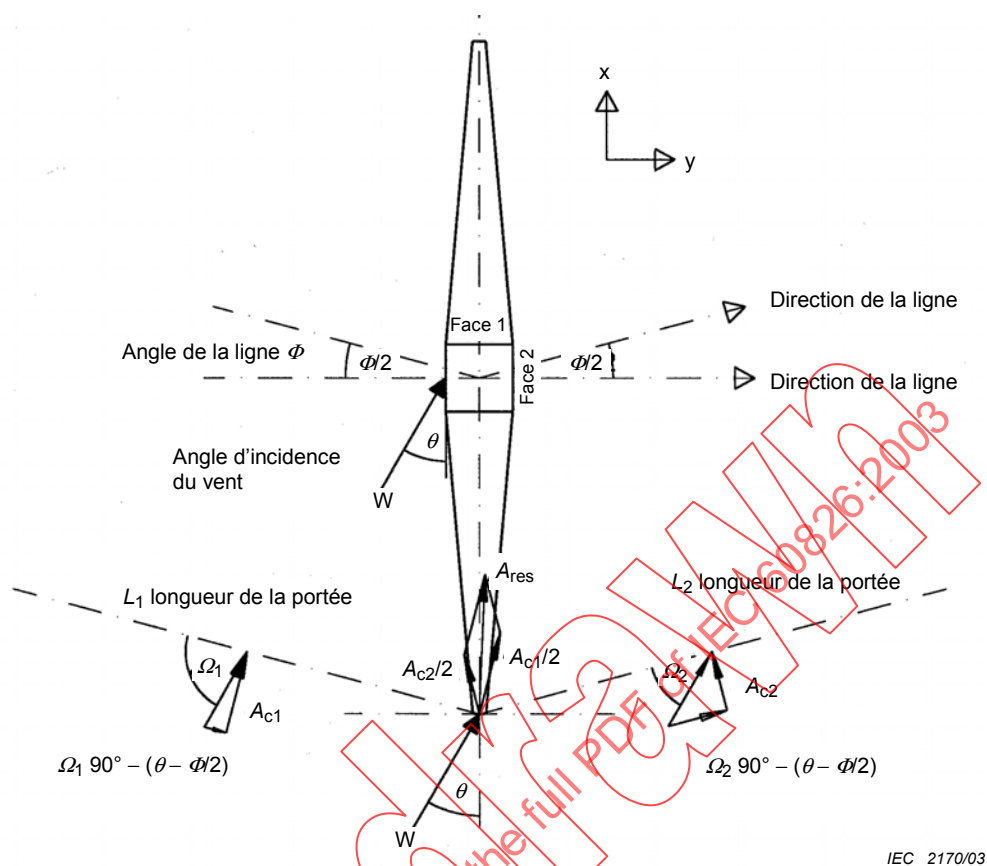
In order to determine the effect of the wind on the lattice tower itself, the latter is divided into different panels. Panel heights are normally taken between the intersections of the legs and bracing.

For a lattice tower of square/rectangular cross-section, the wind loading A_t (in N), in the direction of the wind, applied at the centre of gravity of this panel, made up of various support members, is equal to:

$$A_t = q_0 (1 + 0,2 \sin^2 2\theta) (S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \theta) G_t \quad (10)$$

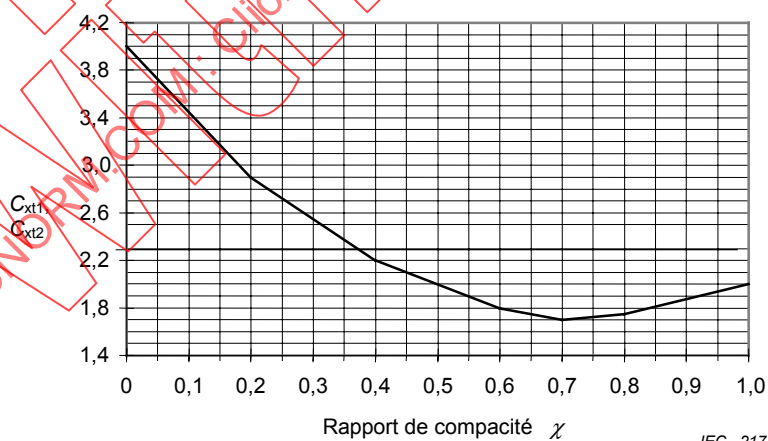
where

- q_0 is the dynamic reference wind pressure Pa (N/m²), see Equation (7);
- θ is the angle of incidence of the wind direction with the perpendicular to face 1 of the panel in a horizontal plane (Figure 6);
- S_{t1} is the total surface area projected normally on face 1 of the panel (m²);
- S_{t2} is the total surface area projected normally on face 2 of the support members of face 2 of the same panel (m²). The projections of the bracing elements of the adjacent faces and of the diaphragm bracing members can be neglected when determining the projected surface area of a face.
- C_{xt1}, C_{xt2} are the drag coefficients peculiar to faces 1 and 2 for a wind perpendicular to each face. C_{xt1}, C_{xt2} are given in Figure 7 for panels of the tower where all or some of the members exposed have plane surfaces, and in Figure 8 where all support members have a circular section.
- χ is the solidity ratio of a panel equal to the projected area of members divided by the total panel area. The solidity ratio χ of one face is the ratio between the total surface of the support members (S_{t1} or S_{t2}), defined above, and the circumscribed area of the face of the considered panel.
- G_t is the combined wind factor for the supports given in Figure 5. The height above ground is measured at the centre of gravity of the panel.



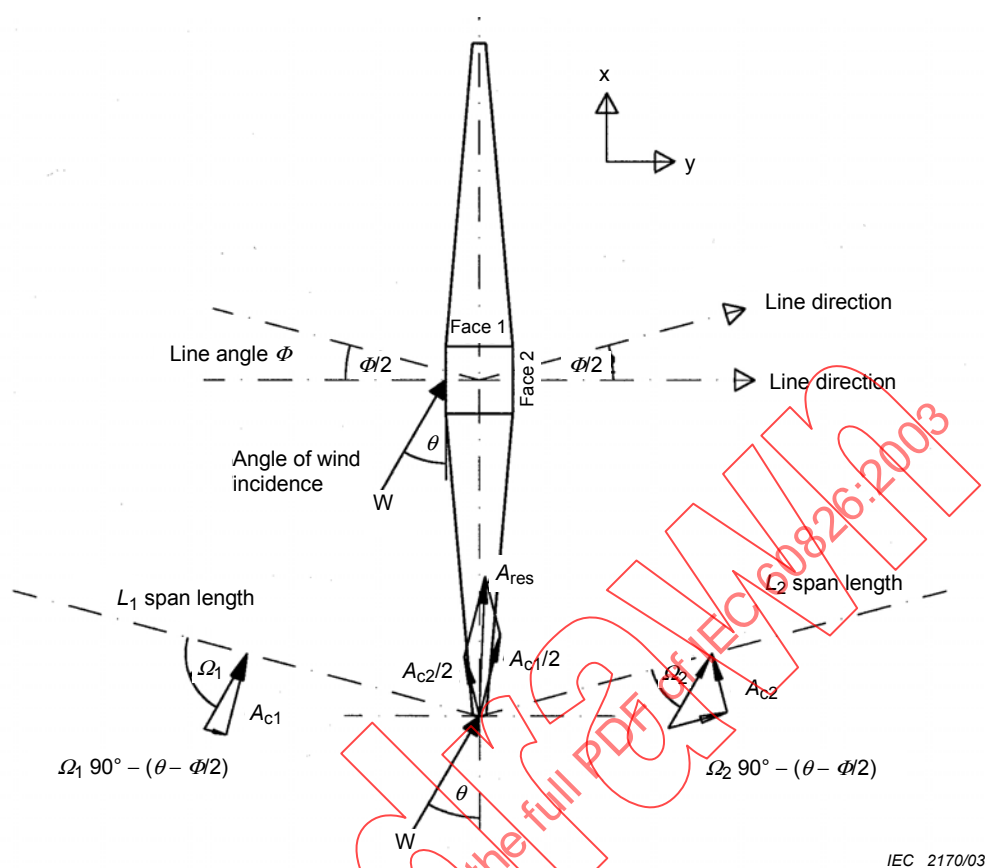
IEC 2170/03

Figure 6 – Définition de l'angle d'incidence du vent



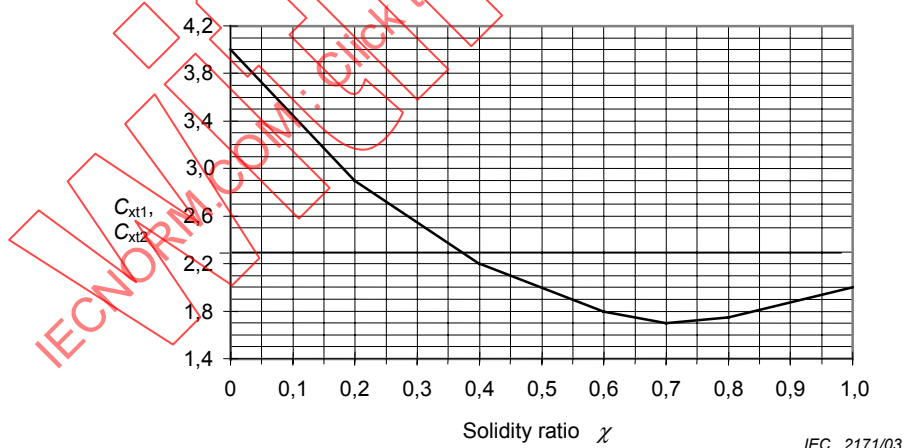
IEC 2171/03

Figure 7 – Coefficient de traînée C_{xt} pour les supports réalisés en treillis composés de barres à bords plats



IEC 2170/03

Figure 6 – Definition of the angle of incidence of wind



IEC 2171/03

Figure 7 – Drag coefficient C_{xt} for lattice supports made of flat sided members

6.2.6.4.2 Supports comportant des barres cylindriques de diamètre important ($d_t > 0,2$ m)

Pour ces supports, la charge de vent (en N) dans la direction de celui-ci, sur chaque barre de longueur l_e , appliquée au centre de gravité de cette barre, est égale à:

$$A_{tc} = q_0 C_{xt} G_t d_t l_e \sin^3 \theta' \quad (11)$$

où

θ' est l'angle d'incidence du vent par rapport à l'axe du cylindre;

d_t est le diamètre du cylindre (m);

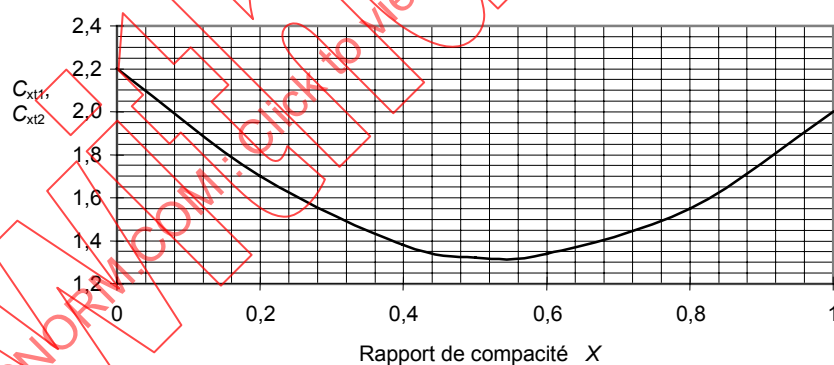
l_e est la longueur de la barre (m);

G_t est le facteur combiné de vent, fonction du type de terrain et de la hauteur h du centre de gravité de la barre par rapport au sol (Figure 5);

C_{xtc} est le coefficient de traînée, pour un vent perpendiculaire à l'axe du cylindre. La valeur de C_{xtc} dépend du nombre de Reynolds Re correspondant à la vitesse des rafales à la hauteur considérée, et de la rugosité du cylindre. Une simplification acceptable consiste à considérer le cas le plus défavorable, celui d'un cylindre rugueux. La valeur de C_{xtc} est donnée à la Figure 9, en fonction de Re , qui correspond à la vitesse de référence du vent V_R à la hauteur h considérée (les corrections relatives à la hauteur sont décrites en A.4). Elle correspond à la formule suivante:

$$Re = \frac{d_t \times V_R}{\nu} \quad (12)$$

ν est la viscosité cinématique de l'air ($\nu = 1,45 \times 10^{-5}$ m²/s à 15 °C)



IEC 2172/03

Figure 8 – Coefficient de traînée C_{xt} pour les supports réalisés en treillis et composés de barres arrondies

6.2.6.4.2 Supports with cylindrical members having a large diameter ($d_t > 0,2$ m)

For such supports the effect of the wind loading (in N) in the direction of the wind, on each member l_e long, applied at the centre of gravity of the member, is equal to:

$$A_{tc} = q_0 C_{xt} G_t d_t l_e \sin^3 \theta' \quad (11)$$

where

θ' is the angle formed by the direction of the wind and the cylinder axis;

d_t is the diameter of the cylinder (m);

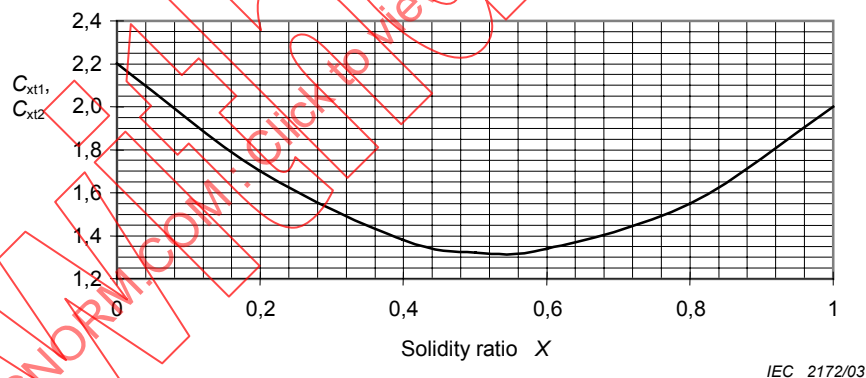
l_e is the length of the member (m);

G_t is the combined wind factor, a function of the terrain category and the height h of the centre of gravity of the member above the ground (Figure 5);

C_{xtc} is the drag coefficient for a wind perpendicular to the axis of the cylinder. The value of C_{xtc} depends on the Reynolds number Re corresponding to the gust speed at this height, and on the roughness of the cylinder. An acceptable simplification is to consider the most unfavourable case of a rough cylinder. The value of C_{xtc} is given in Figure 9 in terms of Re that corresponds to the reference wind speed V_R at this height h (corrections with height are described in A.4) and is given by:

$$Re = \frac{d_t \times V_R}{\nu} \quad (12)$$

ν is the kinetic air viscosity ($\nu = 1,45 \times 10^{-5}$ m²/s at 15 °C)



IEC 2172/03

Figure 8 – Drag coefficient C_{xt} for lattice supports made of rounded members

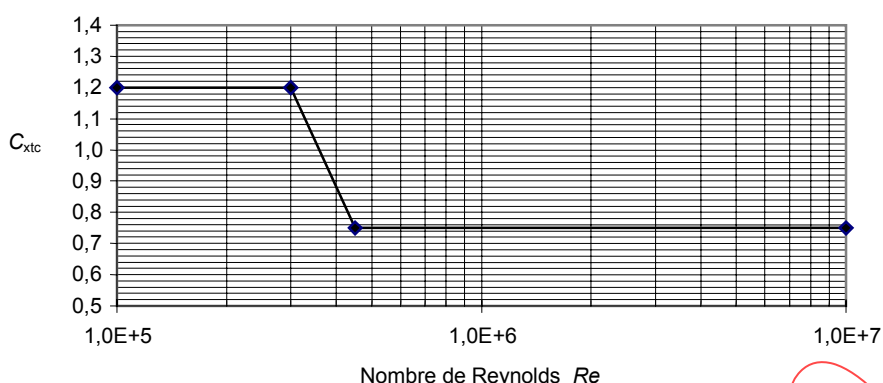


Figure 9 – Coefficient de traînée C_{xtc} d'éléments cylindriques de diamètre important

6.3 Charges climatiques, givre sans vent

6.3.1 Description

Les charges de givre renvoient à toutes les combinaisons découlant de l'adhérence d'eau gelée aux lignes de transport: pluie verglaçante, brouillard givrant, neige collante, etc. (voir l'Article A.5). La présente norme traite principalement de deux types de givrage: le givrage par précipitation et le brouillard givrant.

En montagne, ou dans les régions où ces deux types de givrage peuvent se présenter, les données relatives à l'un et à l'autre peuvent être traitées séparément, avec des distributions statistiques distinctes pour fournir la base des charges à prendre en compte pour la conception. En cas de différence significative entre ces charges pour les deux types de givre, la plus faible de ces deux valeurs pourra être négligée, et la plus élevée couvrira normalement les occurrences conjointes.

Bien que des charges significatives de givre puissent être accompagnées de vent pendant et après le phénomène de givrage, seul le givre est considéré dans un premier temps pour établir les conditions de référence qui serviront de base aux combinaisons de charges de givre et de vent données en 6.4 et aux conditions de givre non uniformes données en 6.3.6.3.

6.3.2 Données relatives au givre

La charge de givre est une variable aléatoire, généralement exprimée en poids par unité de longueur du conducteur, g (N/m), ou en épaisseur radiale uniforme du manchon de givre t (mm) entourant les conducteurs et les câbles de garde. En situation réelle, la forme comme la densité de ces manchons sont aléatoires et dépendent du type d'accrétion comme cela est indiqué au Tableau A.10 de A.5.4. Cependant, pour simplifier les calculs, on convertit ces grandeurs en une épaisseur radiale équivalente (t), en attribuant aux manchons une densité relative δ de 0,9. L'équation (13) exprime la relation entre g et t :

$$g = 9,82 \times 10^{-3} \delta \pi t (d + t/1\,000) \quad (13)$$

où

g est le poids du manchon de givre par unité de longueur (N/m);

δ est la densité du givre (kg/m^3);

t est l'épaisseur radiale du manchon de givre, supposée uniforme autour du conducteur (mm);

d est le diamètre du conducteur (m).

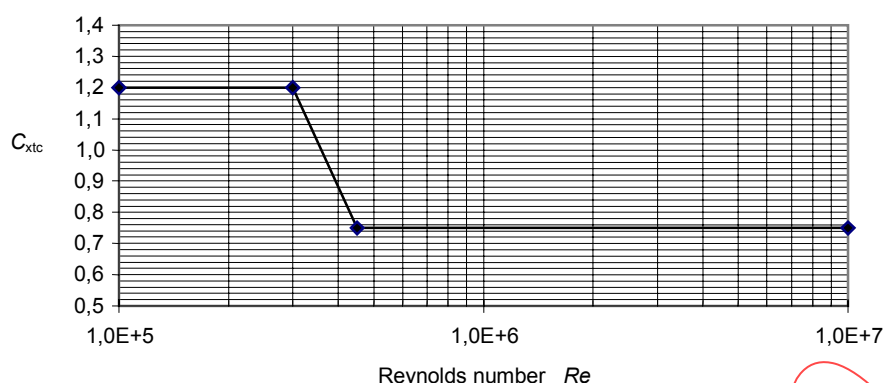


Figure 9 – Drag coefficient C_{xtc} of cylindrical elements having a large diameter

6.3 Climatic loads, ice without wind

6.3.1 Description

Ice loads consist of all combinations of frozen water that adheres to transmission lines such as freezing rain, in-cloud-icing, wet snow, etc. (see description in Clause A.5). This standard covers two main types of icing: precipitation icing and in-cloud icing.

In mountains or regions where both types of icing may occur, the different data for the two types may be treated separately, with separate distributions to provide the basis for the design load. If a difference between the design loads for the two types of ice is apparent, the less important may be ignored, and the more important may take care of combined occurrences.

Although significant loadings due to the presence of ice also involve some wind during and after an icing event, ice only is first considered here, to establish reference conditions that will serve as a basis for the wind and ice combined loadings given in 6.4 as well as non-uniform ice conditions described in 6.3.6.3.

6.3.2 Ice data

Ice load is a random variable that is usually expressed either as a weight per unit length of conductor, g (N/m), or as a uniform radial thickness t (mm) around conductors and ground wires. In real conditions, ice accretion is random in both shape and density and depends on the type of accretion as indicated in Table A.10 in A.5.4. However, for ease of calculations, these are converted to an equivalent radial ice thickness (t) around conductors with a relative density δ of 0,9. Equation (13) expresses the relation between g and t :

$$g = 9,82 \times 10^{-3} \delta \pi t (d + t/1\,000) \quad (13)$$

where

g is the ice weight per unit length (N/m);

δ is the ice density (kg/m³);

t radial ice thickness, assumed uniform around the conductor (mm);

d is the conductor diameter (m).

Pour une densité de givre $\delta = 900 \text{ kg/m}^3$, l'équation (13) prend la forme:

$$g = 27,7 \text{ t } (d + t/1\ 000)$$

Lorsque t et d sont tous deux exprimés en mm et que $\delta = 900 \text{ kg/m}^3$, l'équation (13) devient:

$$g = 0,0277 \text{ t } (t + d)$$

sachant que g est exprimé en N/m.

Dans l'idéal, il convient que la charge de givre soit obtenue à partir de mesurages effectués sur des conducteurs et des sites représentatifs de la ligne. Les techniques de mesurage à cet effet sont décrites dans la CEI 61774. Des modèles de formation de manchons de givre peuvent aussi compléter ces mesurages directs des données relatives au givre, mais nécessitent une validation appropriée, au moyen de données réelles.

La nature du terrain est très importante dans la formation du givre. Il est difficile de transposer les connaissances acquises d'un site à un autre car la configuration du terrain influence fortement le mécanisme de givrage.

Pour les besoins de la conception, l'idéal est de disposer de données de givrage provenant de stations de mesure situées à proximité ou sur le tracé de la ligne. Néanmoins, cette situation est rare, et l'on pourra tirer profit de l'expérience en service des équipements existants.

Il convient également de prendre en compte la formation de givre sur les structures (A.5.8.2 propose une méthode à cette fin).

NOTE Il faut garder à l'esprit que le poids du givre sur les structures d'acier en treillis peut être très significatif. Si l'épaisseur radiale du manchon de givre est supérieure à 30-40 mm, ce poids peut atteindre, voire dépasser celui de la structure elle-même.

6.3.3 Evaluation de la charge annuelle maximale de givre par analyse des données météorologiques

Des valeurs suffisantes pour l'approche statistique proposée dans la présente norme peuvent être obtenues par une analyse des données météorologiques et climatologiques standard sur une période de 20 ans ou plus, combinée avec au moins cinq années d'observation du givrage sur le tracé de la ligne de transport.

Si l'on dispose d'un modèle fiable de formation des manchons de givre permettant d'estimer la charge maximale annuelle de givre sur un certain nombre d'années, ce même modèle peut servir à produire des données relatives au givre, qui seront utilisées dans l'analyse statistique. Les informations sur les sites traversés par la ligne, nécessaires pour valider et ajuster le modèle prédictif, peuvent provenir de données antérieures sur des lignes de transport ou de distribution existantes, d'observations *in situ* et de l'examen de l'effet du givre sur la végétation.

Ces méthodes de prévision peuvent être assez simples, ou plus complexes, selon l'importance du givrage, le terrain, la météorologie locale et le nombre ou le type de sites de collecte de données relatives au givrage.

For an ice density $\delta = 900 \text{ kg/m}^3$, Equation (13) becomes:

$$g = 27,7 \text{ t } (d + t/1\,000)$$

When both t and d are expressed in mm and $\delta = 900 \text{ kg/m}^3$, Equation (13) becomes:

$$g = 0,0277 \text{ t } (t + d)$$

with g in N/m.

Ice load should ideally be deduced from measurements taken from conductors and locations representative of the line. These measurement techniques are described in IEC 61774. Ice accretion models can also supplement direct ice data measurement, but require appropriate validation with real data.

A very important factor with ice accretion is the effect of the terrain. It is difficult to transfer knowledge acquired from one site to another because the terrain strongly influences the icing mechanism.

For design purposes, icing data from measuring stations near or identical to the line site are ideally required. Very often, this will not be the case and service experience with existing installations will provide additional input.

Ice accretion on structures should be considered (refer to A.5.8.2 for suggested method).

NOTE It is noted that weight of ice on lattice steel structures can be quite significant and can reach or exceed the weight of the structure itself in case of radial ice thickness greater than 30-40 mm.

6.3.3 Evaluation of yearly maximum ice load by means of meteorological data analysis

Sufficient data for using the statistical approach in this standard may be obtained by means of an analysis of available standard weather or climatological data over a period of 20 years or more, combined with at least five years of ice observation on the transmission line sites.

If a reliable ice accretion model is available to estimate values for yearly maximum ice loads during a certain number of years, this model can be used to generate ice data which will be used in the statistical analysis. Information about the line site which is necessary to validate and adjust the predicting model may be taken from past experience with existing transmission or distribution lines, from field observations or from the effect of icing on vegetation.

Such a predicting model can be rather simple or become sophisticated, depending on icing severity, terrain, local weather, number or types of ice data collecting sites.

6.3.4 Charge limite de givre de référence

6.3.4.1 Détermination à partir de données statistiques

La charge de calcul de référence g_R , ou t_R si c'est l'épaisseur du manchon de givre qui est choisie comme variable représentant le givre, désigne les charges limites de givre de référence correspondant à la période de retour T choisie (qui dépend du niveau de fiabilité de la ligne). Les valeurs de g_R ou t_R peuvent être obtenues directement à partir de l'analyse statistique de données provenant de mesurages directs, de modèles de givrage ou d'une combinaison appropriée de ces deux sources.

NOTE 1 Les figures et équations données dans ce paragraphe considèrent que la variable représentant le givre est g_R (N/m). Cependant, si c'est t_R qui est choisi à cet égard, il est possible d'utiliser l'équation (13) pour convertir g_R en t_R .

Si les données sont mesurées (ou le modèle simulé) sur des diamètres de conducteurs et des hauteurs typiques de la ligne, il n'est pas nécessaire de corriger cette valeur. Si, en revanche, les données sont mesurées à la hauteur hypothétique de référence de 10 m et en fonction d'un conducteur de 30 mm de diamètre, il convient de corriger g_R en le multipliant par un facteur relatif à l'influence du diamètre K_d et par un autre, relatif à l'influence de la hauteur K_h , et correspondant à la situation réelle de la ligne.

K_d est indiqué à la Figure 10.

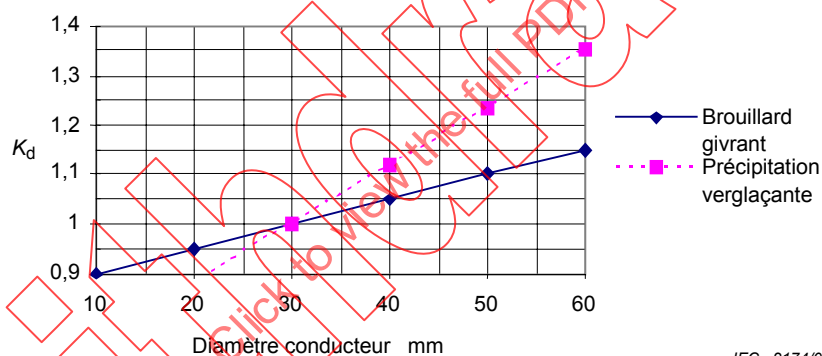


Figure 10 – Facteur K_d relatif au diamètre du conducteur

Pour les deux formes de givrage considérées, la valeur de K_d cesse d'augmenter lorsque $K_d \times \bar{g}$ dépasse 100 N/m. Si $\bar{g}$ (moyenne des valeurs maximales annuelles de g) est supérieur à 100 N/m, et d supérieur à 30 mm, K_d est considéré comme égal à 1,0.

K_h décrit la variation de g en fonction de la hauteur des conducteurs par rapport au sol. Sa valeur est indiquée à la Figure 11.

6.3.4 Reference limit ice load

6.3.4.1 Based on statistical data

The reference design load g_R , or t_R if ice thickness is chosen as the ice variable, are the reference limit ice loads corresponding to the selected return period T (function of the reliability level of the line). The g_R or t_R values can be directly obtained from the statistical analysis of data obtained either from direct measurements, icing models, or appropriate combinations of both.

NOTE 1 The figures and equations given in this subclause are based on g_R (N/m) being the ice variable. However, Equation (13) can be used to convert from g_R to t_R if the latter is chosen as the ice variable.

If data is measured (or model simulated) on conductor diameters and heights typical of the line, there will not be any further adjustment to this value. However, if data is measured at the assumed reference height of 10 m on a 30 mm conductor diameter, g_R should be adjusted by multiplying it with a diameter factor K_d and a height factor K_h applicable to the actual line conditions.

K_d is given in Figure 10.

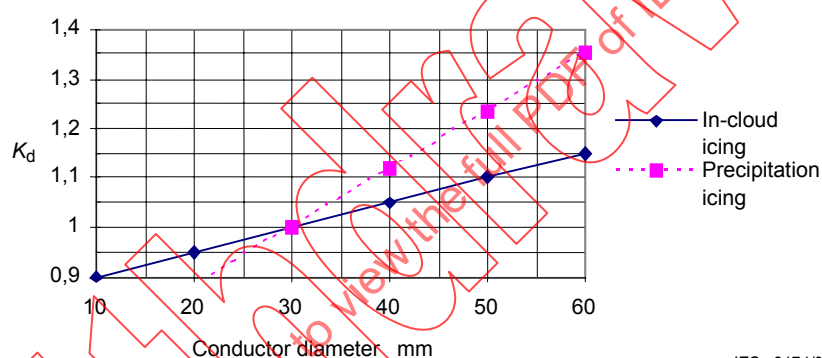


Figure 10 – Factor K_d related to the conductor diameter

For both types of icing, when $K_d \times \bar{g}$ exceeds 100 N/m, the value of K_d is no longer increased. If $\bar{g}$ (average of yearly maximum values of g) is above 100 N/m and d greater than 30 mm, K_d is considered equal 1,0.

K_h describes the variation of g with the height of conductors above the ground. Its value is given in Figure 11.

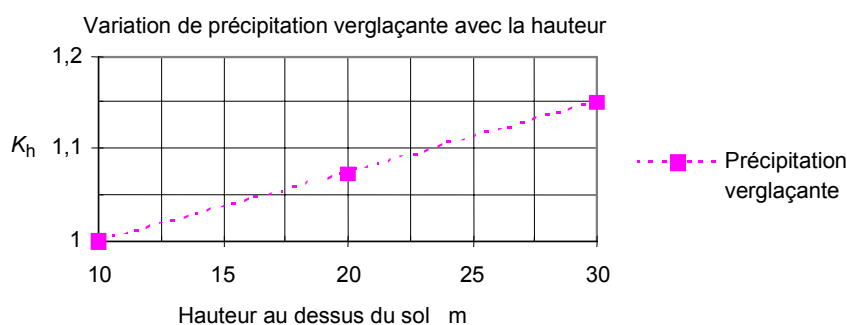


Figure 11 – Facteur K_h relatif à la hauteur des conducteurs

A titre de simplification, on suggère que la valeur g_R soit la même pour les conducteurs de phase et les câbles de garde implantés sur la même portée. Cependant, de plus en plus de constats sur le terrain tendent à prouver que le câble de garde, parce qu'il est situé plus haut, peut accumuler davantage de givre dans certains cas de givrage. En ce qui concerne la variation de l'accrétion due aux brouillards givrants avec la hauteur, se référer à la note de A.5.8.2.

NOTE 2 Des études récentes laissent à penser que les conducteurs en faisceau peuvent attirer moins de neige collante ou de givre déposé par brouillard que les conducteurs posés isolément, en raison d'une différence de comportement en torsion. Cette question est actuellement à l'étude.

6.3.4.2 Détermination à partir de l'expérience en service

En l'absence de données sur le givrage ou de modèles fiables relatifs à la formation des manchons de givre, la seule solution consiste à tenir compte de l'expérience en service, en se fondant sur les charges de givre effectivement observées sur les conducteurs ou déduites des défaillances constatées. Dans les deux cas, ni la période de retour des charges de givre, ni le niveau de fiabilité ne seront connus.

6.3.5 Température concomitante au givrage

La température à considérer dans les conditions de givre doit être de -5 °C .

6.3.6 Charges exercées sur les supports

Trois situations de givrage des conducteurs doivent être prises en compte lors de la détermination des charges exercées sur le support. On considère qu'il s'agit des plus significatives et qu'elles englobent la majorité des situations de givrage susceptibles de se présenter:

- formation de givre uniforme: condition de charges due au poids;
- formation de givre non uniforme: condition de charges longitudinal et transversal de flexion;
- formation de givre non uniforme: condition de torsion.

6.3.6.1 Description des cas de charge

Dans la description des différents cas de charge, les valeurs des charges de givre sont données en fonction de la charge de référence g_R . Il importe de garder à l'esprit que g_R peut varier d'une portée à l'autre à l'intérieur d'un même canton en fonction des conditions locales du terrain, ce qui entraîne des conditions de givre non uniforme. Le présent paragraphe a pour objet de proposer des cas de charge conventionnels permettant de calculer les tensions mécaniques des conducteurs caractérisant les circonstances connues des charges de givre.

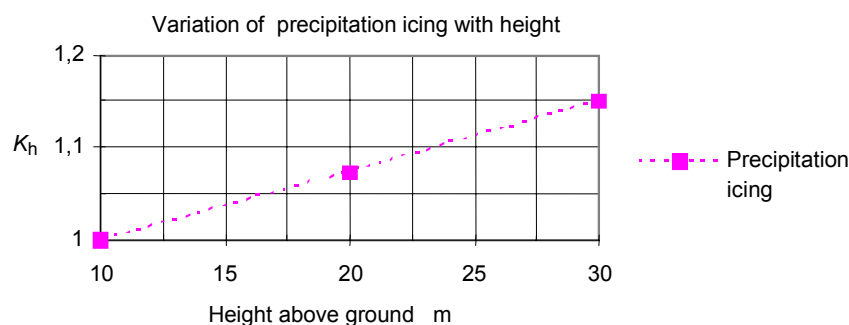


Figure 11 – Factor K_h related to the conductor height

As a simplification, it is suggested that the value g_R be the same for phase conductors and ground wires in the same span, but there is growing evidence that the higher ground wire may accumulate more ice for some types of ice accretion. For variation of in-cloud icing accretion with height, refer to comments in A.5.8.2.

NOTE 2 Some recent studies suggest that bundled conductors may collect less wet snow or in-cloud ice than single conductors due to the difference in torsional behaviour. This matter is currently under investigation.

6.3.4.2 Based on service experience

Where icing data or reliable ice accretion models are not available, the only alternative is to rely on service experience based on actual ice loads observed on the conductors or deduced from failure events. In both cases, neither the return period of the ice loads, nor the level of reliability will be known.

6.3.5 Temperature during icing

The temperature to be considered with ice conditions shall be $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.3.6 Loads on support

Three different icing conditions on the conductors shall be considered when determining the loads on the support. These are considered to be the most significant and encompass the majority of the icing conditions that are likely to occur:

- uniform ice formation: weight condition;
- non-uniform ice formation: longitudinal and transverse bending condition;
- non-uniform ice formation: torsion condition.

6.3.6.1 Loading cases description

In the description of the different loading conditions, the value of the ice loads are given as functions of the reference design ice load g_R . It is important to be aware of the fact that g_R may vary from one span to another in a section of a line, due to local terrain effects, giving non-uniform situations. The aim is to propose conventional loading conditions for the purpose of calculating conductor tensions which are typical for known occurrences of ice loading.

Pour le calcul des efforts appliqués à un support par les conducteurs, l'effet du balancement des chaînes d'isolateurs sur la tension mécanique, la déviation ou la rotation du support et/ou des fondations ainsi que l'interaction avec les autres conducteurs doivent être pris en considération.

L'accumulation et la décharge du givre peuvent ne pas s'effectuer uniformément sur des portées adjacentes. On définit une charge de givre non uniforme comme une charge qui correspond à la probabilité de formation de givre sur un maximum de trois portées d'un côté du support, tandis que, sur les autres portées du canton, la surcharge de givre est réduite à un certain pourcentage de cette valeur.

NOTE Tout phénomène de givrage s'accompagne de dissymétries de la charge de givre, survenant lors de la formation ou de la décharge des manchons. Les statistiques relatives aux charges de givre dissymétriques étant rares, les recommandations formulées dans la présente norme seront normalement suffisantes pour simuler les charges typiques survenant dans de telles situations.

6.3.6.2 Formation d'un manchon de givre uniforme – Condition de charges maximales dues au poids

On suppose que la charge maximale due à la formation d'un manchon uniforme sur les conducteurs se produit lorsque la charge de givre sur ces conducteurs équivaut à la charge limite de givre de référence (g_R). La surcharge par unité de longueur est notée g_R (N/m), et la charge totale par unité de longueur du conducteur = $w + g_R$ (w est le poids unitaire du conducteur, en N/m).

6.3.6.3 Formation d'un manchon de givre non uniforme sur les conducteurs de phase et les câbles de garde

Les dissymétries dans l'accumulation ou la décharge du givre sur des portées adjacentes induisent des charges longitudinales critiques de déséquilibre sur les supports. Ces charges de givre dissymétriques peuvent se manifester soit lors de la formation des manchons de givre (présence de brouillard givrant en situation de variations significatives de hauteur ou d'exposition, par exemple) ou lors de la décharge des manchons.

Le Tableau 6 propose les configurations relatives aux situations de givrage non uniforme pour les types de supports représentés à la Figure 12.

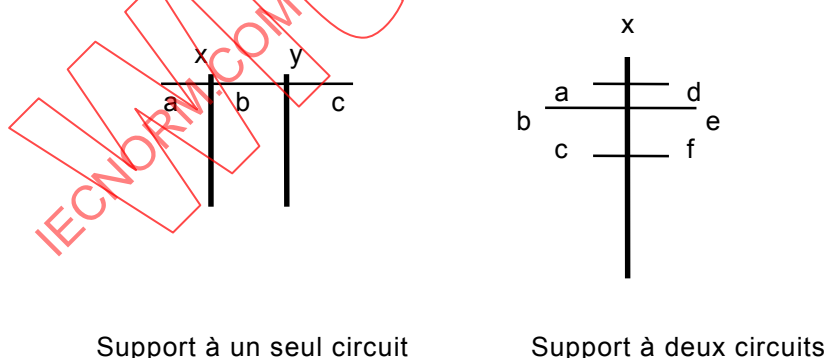


Figure 12 – Types de supports

IEC 2176/03

NOTE Pour les lignes à plusieurs circuits, le nombre de phases sujettes à la formation d'un manchon de givre non uniforme peut être différent, mais jamais inférieur à celui indiqué pour les lignes à deux circuits.

When computing loads on a support from conductors, the effects of the swing of the insulator set, deflection or rotation of the support and/or foundations and the interaction with other conductors shall be considered.

Ice may not accumulate or shed uniformly from adjacent spans. A non-uniform ice formation is defined as an ice load corresponding to the probability of an ice accretion on up to three spans on one side of the support, whilst on the other spans in the clause the ice is reduced to a certain percentage of that value.

NOTE Unbalanced ice loads due to unequal accretion or ice shedding will invariably occur during icing events. Statistics of unbalanced ice loads are not usually available; however, the recommendations given in this standard should be sufficient to simulate typical unbalanced ice loads that occur such conditions.

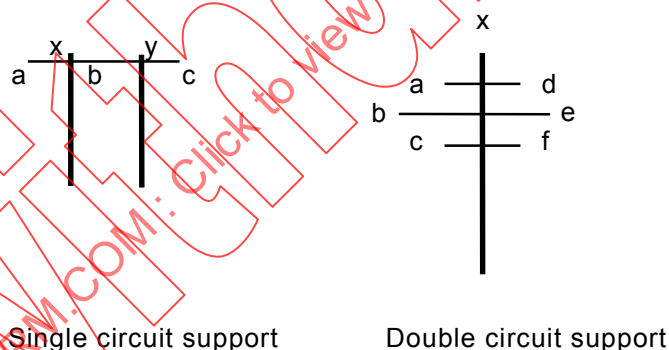
6.3.6.2 Uniform ice formation – Maximum weight condition

The maximum uniform ice loading on the conductors is assumed to occur, when the conductor ice loading is equivalent to the reference limit ice load (g_R). The overload per unit length is g_R (N/m), and the total conductor load per unit length = $w + g_R$ (w is the unit weight of conductors in N/m).

6.3.6.3 Non-uniform ice formation on phase conductors and ground wires

Unequal ice accumulations or shedding in adjacent spans will induce critical out-of-balance longitudinal loads on the supports. Unbalanced ice loads can occur either during ice accretion, e.g. in-cloud icing with significant changes in elevation or exposure, or during ice shedding.

Suggested configurations of non-uniform icing conditions are described in Table 6 for support types shown in Figure 12.



IEC 2176/03

Figure 12 – Typical support types

NOTE For multi-circuit lines, the number of phases subject to non-uniform ice can be different, but not less than that given for double circuit lines.

Tableau 6 – Cas de charge de givre non uniformes

Types de supports	Effort de flexion longitudinal		Effort de flexion transversal		Effort de torsion	
	Portée gauche	Portée droite	Portée gauche	Portée droite	Portée gauche	Portée droite
Un circuit	xyabc	XYABC	XYabC	xYabC	XYabC	XYABC
Deux circuits	xabcdef	XABCDEF	XabcDEF	XabcDEF	XabcDEF	XABCDEF

NOTE Dans ce tableau, les lettres A, B, C, D, E, F, X, Y représentent les conducteurs et les portées supportant une charge de $0,7 g_R$, tandis que les lettres a, b, c, d, e, f, x, y représentent les conducteurs et les portées supportant une charge de $0,4 \times 0,7 g_R$. Les facteurs 0,7 et 0,4 sont des suggestions, d'autres valeurs pouvant être utilisées en fonction de l'expérience.

Dans les zones où l'exposition de la ligne à son milieu change d'une portée à l'autre, il convient de prendre en compte des charges dissymétriques plus importantes que celles décrites ci-dessus. Lors du calcul des charges longitudinales exercées sur les structures du fait de charges de givre dissymétriques, la souplesse des structures et le mouvement des isolateurs doivent être pris en compte pour le calcul des forces longitudinales. Le recours à des hypothèses simplifiées est admissible dès lors que celles-ci conduisent à des résultats plus prudents.

Lorsque des sections spécifiques d'une ligne aérienne sont exposées à un épais brouillard givrant et que des portées adjacentes sont soumises à des niveaux différents de vents chargés d'humidité, il peut être judicieux de prendre en considération la charge de givre maximale d'un côté du support et des conducteurs nus de l'autre côté.

6.4 Charges climatiques, vent et givre combinés

Les charges combinées de vent et de givre envisagées dans ce paragraphe sont liées à l'effet du vent sur les conducteurs recouverts de givre. Le vent sur les supports et les chaînes d'isolateurs givrés peut, si nécessaire, être traité de façon analogue, en portant une attention particulière aux coefficients de traînée.

6.4.1 Probabilités combinées – Principe proposé

L'action du vent sur les conducteurs givrés met en jeu au moins trois variables: vitesse du vent associé aux conditions givrantes, poids et forme du manchon de givre (effet du coefficient de traînée). Ces actions provoquent des charges transversales et verticales.

Idéalement, il convient d'utiliser les statistiques relatives à la vitesse du vent en présence de givre sur les conducteurs pour déterminer les efforts cumulés (givre plus vent) correspondant au niveau de fiabilité choisi. Sachant qu'il est rare de disposer de données et d'observations détaillées quant au poids et à la forme du manchon de givre, ainsi qu'au vent concomitant à ces phénomènes, il est proposé d'associer ces variables de manière que les combinaisons relatives à la charge résultante présentent les mêmes périodes de retour T que celles adoptées pour chaque niveau de fiabilité.

En supposant que les charges maximales sont très probablement liées à des combinaisons faisant intervenir une valeur maximale d'au moins une des variables (vitesse du vent, poids ou forme du manchon de givre), on propose une méthode simplifiée: à une valeur d'une variable ayant une faible probabilité d'occurrence (indice L) sont associées les valeurs des deux autres variables ayant une forte probabilité d'occurrence (indice H), comme le montre le Tableau 7 ci-dessous. Cette simplification équivaut à associer une variable (par exemple la charge de givre) assortie d'une période de retour T à la moyenne des valeurs annuelles de toutes les autres variables liées au cas de charge considéré (vent plus givrage ou coefficient de traînée, par exemple).

Table 6 – Non-uniform ice loading conditions

Type of supports	Longitudinal bending condition		Transverse bending condition		Torsional condition	
	Left span	Right span	Left span	Right span	Left span	Right span
Single circuit	xyabc	XYABC	XYabC	xYabC	XYabC	XYABC
Double circuit	xabcdef	XABCDEF	XabcDEF	XabcDEF	XabcDEF	XABCDEF

NOTE In this table, the letters A, B, C, D, E, F, X, Y represent conductors and spans loaded with $0,7 g_R$, while the letters a, b, c, d, e, f, x, y represent conductors and spans loaded with $0,4 \times 0,7 g_R$. Factors 0,7 and 0,4 are suggested and other values can be used as substantiated by experience.

Where the exposure of the line to its surroundings changes from one span to another, unbalanced loads larger than those described above should be considered. During calculations of longitudinal loads on structures due to unbalanced ice loads, the flexibility of structures and insulator movement shall be taken into account to calculate the resulting longitudinal forces. Use of simplified assumptions is accepted as long as they lead to conservative results.

Where specific sections of an OHL are exposed to severe in-cloud icing and adjacent spans have different levels of moisture-laden winds, it may be applicable to consider maximum ice loading on one side of the support and bare conductors on the other side.

6.4 Climatic loads, combined wind and ice loadings

The combined wind and ice loadings treated in this subclause relate to wind on ice-covered conductors. Wind on ice-covered supports and insulator strings can, if necessary, be treated in a similar way with special attention to drag coefficients.

6.4.1 Combined probabilities – Principle proposed

The action of wind on ice-covered conductors involves at least three variables: wind speed that occurs in presence with icing, ice weight and ice shape (effect of drag coefficient). This action results in both transversal and vertical loads.

Ideally, statistics of wind speed during ice presence on conductors should be used to generate the combined loadings of ice and wind corresponding to the selected reliability level. Since detailed data and observations on ice weight, ice shape and coincident wind, are not commonly available, it is proposed to combine these variables in such a way that the resulting load combinations will have the same return periods T as those adopted for each reliability level.

Assuming that maximum loads are most likely to be related to combinations involving at least one maximum value of a variable (either of wind speed, ice weight or ice shape), a simplified method is proposed: a low probability (index L) value of a variable is combined with high probability (index H) values of the other two variables, as is shown in Table 7. This simplification is equivalent to associating one variable (e.g. ice load) having a return period T with the average of yearly values of all the other variables related to this loading case, such as wind during icing or the drag coefficient.

Tableau 7 – Période de retour de la charge combinant vent et givre

Niveau de fiabilité	Période de retour T années	Période de retour de la variable à faible probabilité d'occurrence (indice L)	Période de retour des autres variables (indice H)
1	50	50	Moyenne des valeurs maximales annuelles
2	150	150	Moyenne des valeurs maximales annuelles
3	500	500	Moyenne des valeurs maximales annuelles

La densité du givre varie en fonction de sa nature et il est recommandé d'associer les faibles densités de givre aux coefficients de traînée les plus élevés et vice versa.

En règle générale, la combinaison, d'une part, d'un coefficient de traînée à faible probabilité (valeur maximale de C_{iL} ou C_{iL}) et, d'autre part, d'un manchon de givre et d'un vent à forte probabilité ne constitue pas un cas de charge critique. Cependant, si l'expérience antérieure en service ou le calcul confirment que cette combinaison peut être critique, il convient d'en tenir compte dans la conception.

En conséquence, la présente norme considère deux combinaisons de charges: faible probabilité de givre (période de retour T) associé à la moyenne des vents maximaux annuels au moment du givrage, et faible probabilité de vent pendant le givrage (période de retour T) associé à la moyenne des valeurs de givrage maximales annuelles.

Les paragraphes précédents ont déjà traité séparément de la faible probabilité (valeurs de référence) de givre ou de vent. Il convient que les valeurs retenues correspondent à la période de retour T choisie pour la conception.

Concernant le vent, il importe de noter que les données à considérer sont celles valables en présence de givre sur les conducteurs. De telles données étant rarement disponibles, il est généralement acceptable de les déduire des statistiques de vent annuelles.

6.4.2 Détermination de la charge de givre

Les deux principaux types de givrage, par précipitation et par brouillard givrant, nécessitent une détermination séparée de la charge de givre maximale liée au vent.

S'il n'y a pratiquement pas de données sur les phénomènes combinés de vent et de givre, on peut supposer que $g_L = g_R$ et que $g_H = 0,40 g_R$. Si de telles données sont disponibles, il est possible de recourir à des méthodes statistiques pour estimer les valeurs relatives aux variables combinées correspondant à la période de retour T choisie ou à la moyenne des valeurs maximales liées au vent.

6.4.3 Détermination de la température coïncidente

La température à considérer concernant la combinaison du vent et du givre doit être de -5 °C pour tous les types de givrage.

6.4.4 Détermination de la vitesse du vent associée au givrage

6.4.4.1 Pluie verglaçante (givrage par précipitation)

Les vitesses du vent à associer aux épisodes de givrage peuvent se calculer en utilisant les données existantes ou, si celles-ci sont quasiment absentes ou limitées, à partir des hypothèses suivantes. Dans ce dernier cas, la vitesse de référence du vent est multipliée par le facteur de réduction B_1 de la manière indiquée ci-dessous:

Table 7 – Return period of combined ice and wind load

Reliability level	Return period T years	Return period of the variable having a low probability of occurrence (index L)	Return period of remaining variables (index H)
1	50	50	Average of yearly maximum values
2	150	150	Average of yearly maximum values
3	500	500	Average of yearly maximum values

The density of ice varies with the type of icing and it is recommended that low density ice be combined with the high probability drag coefficient and vice-versa.

Usually, the combination of a low probability drag coefficient (highest value of C_{iL} or C_{iL}) with a high probability ice and a high probability wind does not constitute a critical loading case. However, if previous service experience or calculation confirms that this load combination can be critical, it should be considered for design purposes.

Consequently two loading combinations will be considered in this standard: Low ice probability (return period T) associated with the average of yearly maximum winds during icing presence, and low probability wind during icing (return period T) associated with the average of the maximum yearly icing.

The low probability (reference values) of ice or wind have already been dealt with separately in the previous paragraphs. These should correspond to the return period T selected for design purposes.

With regard to wind, it is important to note that wind data to be considered is when icing is present on conductors. Such data is not usually available and it is generally accepted to deduce it from the yearly wind statistics.

6.4.2 Determination of ice load

The two main types, precipitation and in-cloud icing, require a separate determination of the maximum ice load associated with wind.

If there is almost no data on combined wind and ice, it can be assumed that $g_L = g_R$ and $g_H = 0,40 g_R$. If combined wind and ice data are available, statistical methods can be used to estimate values for combined variables corresponding to the selected return period T or to the average of yearly maximum winds.

6.4.3 Determination of coincident temperature

The temperature to be considered for combined wind and ice conditions shall be -5 °C for all types of icing.

6.4.4 Determination of wind speed associated with icing conditions

6.4.4.1 Freezing rain (precipitation icing)

Wind velocities associated with icing episodes can be calculated from data, if available or, when there is little or no data, from the following assumptions. In the latter case, the reference wind speed is multiplied by a reduction factor B_i as indicated below:

$V_{iL} = B_i \times V_R$, où $B_i = (0,60 \text{ à } 0,85)$. Cette plage de variation de B_i est censée correspondre à la vitesse de référence du vent ($T = 50, 150$ ou 500 ans) en cas de givrage persistant sur les conducteurs.

$V_{iH} = B_i \times V_R$, où $B_i = (0,4 \text{ à } 0,5)$. Cette plage de variation de B_i est censée correspondre à la moyenne des vitesses maximales annuelles du vent en cas de givrage persistant sur les conducteurs.

La plage de valeurs indiquée dans les équations ci-dessus renvoie à des vitesses du vent typiques en période de givrage et tient compte de la rareté relative des vitesses de vent maximales durant ces périodes.

Lorsqu'on dispose de données combinées, il est possible d'utiliser le procédé décrit pour les charges de vent ou de givre afin de sélectionner une valeur correspondant à une période de retour T pour chacun des types de givrage prévisibles.

En l'absence de corrélation étroite entre les données relatives à la vitesse du vent et celles liées au givrage, il convient de déterminer la vitesse maximale du vent associée en utilisant la vitesse maximale annuelle du vent enregistrée pendant les périodes de givrage et les périodes consécutives où la température de l'air reste inférieure à 0°C (une période maximale de 72 h est conseillée).

6.4.4.2 Neige collante (givrage par précipitation)

Sous réserve des conditions météorologiques locales et de l'expérience, la réduction de la vitesse du vent (V_R) peut être déterminée d'une manière analogue à celle décrite en cas de pluie verglaçante (voir 6.4.4.1). En l'absence d'expérience ou de données spécifiques, il est conseillé d'utiliser les mêmes facteurs de réduction que pour la pluie verglaçante.

6.4.4.3 Neige sèche (givrage par précipitation)

En l'absence de données spécifiques relatives à la neige sèche, il est possible d'utiliser les mêmes valeurs que celles indiquées pour la neige collante.

6.4.4.4 Givre dur (brouillard givrant)

Dans certaines zones, au sommet d'une colline par exemple, la quantité maximale de givre déposée sur les conducteurs coïncide généralement avec la vitesse maximale du vent associée aux brouillards givrants. Dans d'autres, néanmoins, cette quantité maximale est globalement associée à des vitesses de vent plus relatives.

Il convient d'utiliser les informations de base relatives à la météorologie et au terrain afin d'évaluer la probabilité de forts brouillards givrants sur le tracé de la ligne, et d'introduire les données correspondantes dans les calculs. Faute d'informations à cet égard, il est possible de recourir aux valeurs indiquées pour la pluie verglaçante.

6.4.5 Coefficients de traînée des conducteurs givrés

Chaque fois que cela est possible, il convient que les coefficients de traînée relatifs aux conducteurs givrés proviennent des valeurs effectivement mesurées. En l'absence de telles données, les coefficients de traînée et les densités de givre à prendre en compte sont fournis au Tableau 8.

$V_{iL} = B_i \times V_R$, where $B_i = (0,60 \text{ to } 0,85)$. This range of B_i is assumed to correspond to the reference wind speed ($T = 50, 150 \text{ or } 500 \text{ years}$) during icing persistence on conductors.

$V_{iH} = B_i \times V_R$, where $B_i = (0,4 \text{ to } 0,5)$. This range of B_i is assumed to correspond to the average of yearly maximum wind speed during icing persistence on the conductors.

The given range of values in the above equations represents typical values of wind speed during icing periods and takes into account the relative rarity of maximum wind speed during icing periods.

When combined data are available, the process described for wind or ice loading can be used to select a value corresponding to a return period T for each of the expected types of icing.

When wind speed data is not strictly correlated with icing, one should determine the associated maximum wind speed by using the yearly maximum wind speed recorded during freezing precipitation and the following period whilst the air temperature remains below 0°C (suggested maximum period 72 h).

6.4.4.2 Wet snow (precipitation icing)

Based on both local meteorological conditions and experience, the reduction in the wind speed (V_R) can be determined in a similar manner to that described for freezing rain (see 6.4.4.1). In the absence of specific experience or data, it is suggested to use the same reduction factors as for freezing rain.

6.4.4.3 Dry snow (precipitation icing)

In the absence of any specific data for dry snow, the same values stated for wet snow may be used.

6.4.4.4 Hard rime (in-cloud icing)

In certain areas, hill tops, for example, the maximum rime ice accretion on the conductors usually occurs with the maximum wind speed associated with in-cloud icing. However, in other areas the maximum ice accretion usually occurs under relative load wind speeds.

Basic meteorological and terrain information should be used to evaluate the probability of severe in-cloud icing along the line route, and the corresponding data should be introduced in the calculations. Otherwise, the values given for freezing rain may be used.

6.4.5 Drag coefficients of ice-covered conductors

Wherever possible, drag coefficients for ice covered conductors should be based on actual measured values. In the absence of this data, the effective drag coefficients and ice densities are given in Table 8.

Tableau 8 – Coefficient de traînées des conducteurs givrés

	(Précipitation) Neige collante	(Brouillard givrant) Givre léger	(Brouillard givrant) Givre compact	(Précipitation) Glace
Coefficient de traînée effectif C_{iH}	1,0	1,2	1,1	1,0
Densité de givre associée δ (kg/m ³)	600	600	900	900

Le coefficient de traînée effectif est un multiplicateur affecté à la forme supposée cylindrique correspondant au volume de givre spécifié (voir Figure 13). Deux facteurs corroborent l'hypothèse d'un coefficient de traînée accru lorsque les conducteurs sont recouverts de givre: le premier tient à l'effet du diamètre équivalent et le second à la forme du manchon lui-même, par rapport à un cylindre rond et lisse.

NOTE L'épaisseur uniforme du manchon entourant le conducteur correspond au plus petit diamètre global, c'est-à-dire à la surface projetée la plus compacte.

On suppose que la valeur de C_i est la même pour les dépôts de givre relatifs à $T = 50, 150$ et 500 ans.

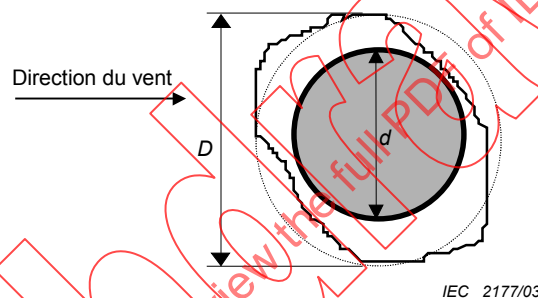


Figure 13 – Forme cylindrique équivalente du dépôt de givre

6.4.6 Détermination des charges exercées sur les supports

6.4.6.1 Action unitaire du vent sur les conducteurs givrés

Conformément à 6.2.5, la valeur caractéristique (a) de l'action unitaire du vent (soufflant à l'horizontale et perpendiculairement à la ligne) sur les conducteurs givrés est donnée par l'expression suivante:

$$a = q_0 C_i G_c G_L$$

$$q_{oL} = \frac{1}{2} \mu \tau K_R^2 V_{iL}^2 \quad \text{ou} \quad q_{oH} = \frac{1}{2} \mu \tau K_R^2 V_{iH}^2 \quad \text{Pa (N/m}^2\text{)}$$

selon le cas de charge, et en appliquant la relation $C_i = C_{iL}$ ou C_{iH}

G_c est le facteur combiné de vent des conducteurs, tel que défini en 6.2.6.1;

G_L est le facteur de portée défini en 6.2.6.1;

τ est le facteur de correction de la densité défini en 6.2.5.1.

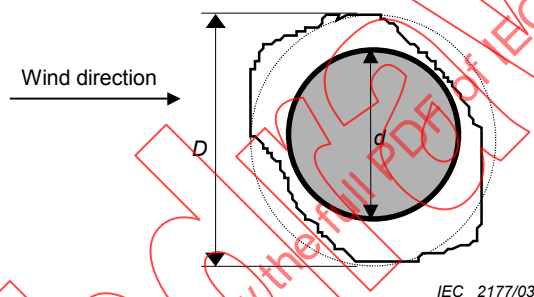
Table 8 – Drag coefficients of ice-covered conductors

	(Precipitation) Wet snow	(In-cloud) Soft rime	(In-cloud) Hard rime	(Precipitation) Glaze ice
Effective drag coefficient C_{iH}	1,0	1,2	1,1	1,0
Associated ice density δ (kg/m ³)	600	600	900	900

The effective drag coefficient is a multiplying factor on the assumed cylindrical shape for the specified ice volume (see Figure 13). There is evidence to support the increase in the drag coefficient for ice covered conductors for two reasons: the first due to the effect of the equivalent diameter and the second due to the ice shape itself as opposed to the round and smooth cylinder.

NOTE The uniform thickness of ice around the conductor corresponds to the minimum overall diameter, i.e. the most compact projected area.

It is assumed that the value of C_i is the same for the ice coverings related to $T = 50, 150, 500$ years.

**Figure 13 – Equivalent cylindrical shape of ice deposit**

6.4.6 Determination of loads on supports

6.4.6.1 Unit action of the wind on the ice-covered conductors

With reference to 6.2.5 the characteristic value (a) of the unit wind action on ice covered conductors with the wind blowing horizontally and perpendicular to the line, is given by the expression:

$$a = q_0 C_i G_c G_L$$

$$q_{oL} = \frac{1}{2} \mu \tau K_R^2 V_{iL}^2 \quad \text{or} \quad q_{oH} = \frac{1}{2} \mu \tau K_R^2 V_{iH}^2 \quad \text{Pa (N/m}^2\text{)}$$

dependent on the loading condition, and with appropriate $C_i = C_{iL}$ or C_{iH}

G_c is the combined wind factor of conductors as defined in 6.2.6.1;

G_L is the span factor as defined in 6.2.6.1;

τ is the density correction factor given in 6.2.5.1.

6.4.6.2 Charges appliquées aux supports

Il convient de considérer deux cas de charge alliant vent et givre, avec les charges verticales coïncidentes.

La charge (A_c), exprimée en N, due à l'effet du vent sur une portée-vent L , appliquée au support et soufflant à un angle d'incidence Ω par rapport aux conducteurs, est donnée par l'équation suivante, utilisant la grandeur q_0 définie à l'équation (7).

NOTE 1 La portée-vent L d'un support est égale à la moitié de la somme des longueurs des portées adjacentes

$$A_c = q_0 C_i G_c G_L D L \sin^2 \Omega$$

Pour les deux cas de charge recommandés, la force du vent sur les conducteurs givrés doit être la suivante:

- **Cas 1** (valeur maximale de la charge de givre, à associer à la moyenne des vitesses maximales annuelles du vent en présence de givre persistant):

$$A_{c1} = q_{0H} C_{iH} G_c G_L D_L L \sin^2 \Omega$$

$$D_L = (d^2 + 4g_L/9,82\pi\delta)^{0,5}$$

- **Cas 2** (valeur maximale de la vitesse du vent en présence de givre persistant, à associer à la moyenne des charges de givre maximales annuelles):

$$A_{c2} = q_{0L} C_{iH} G_c G_L D_H L \sin^2 \Omega$$

$$D_H = (d^2 + 4g_H/9,82\pi\delta)^{0,5}$$

NOTE 2 On constate en général que ces deux cas sont les plus critiques. S'il convient de tenir compte d'autres situations, il est recommandé de se reporter à l'Annexe A.

Dans les équations ci-dessus, D_L , D_H correspondent aux diamètres (m) des formes cylindriques équivalentes pour les types de givre considérés.

g_L et g_H = charge de givre (N/m)

où

δ est la densité la plus forte pour le type de givre considéré (kg/m³);

Ω est l'angle d'incidence du vent par rapport au conducteur.

Dans le cas où les membrures du pylône sont critiques sous des charges verticales moindres appliquées par les conducteurs, il convient de tenir compte de l'effet de ces charges verticales réduites et des forces aérodynamiques de portance. On propose d'admettre que la force portante par unité de longueur ne dépasse probablement pas 50 % de la force de traînée par unité de longueur des conducteurs givrés.

6.5 Charges de construction et d'entretien (sécurité du personnel)

6.5.1 Généralités

C'est lors des travaux de construction et d'entretien que la défaillance d'un composant de ligne est la plus susceptible de provoquer blessures ou mort d'homme. Il convient donc de réglementer ces opérations de manière à éliminer les charges superflues et temporaires qui seraient susceptibles d'imposer un renforcement coûteux de tous les supports, en particulier dans les zones exemptes de givre.

Les règlements nationaux et/ou les règles de construction énoncent généralement des règles de sécurité minimales relatives à la sécurité du personnel et des exigences concernant celle du public.

6.4.6.2 Loads on supports

Two combined wind and ice loading conditions should be considered with their coincident vertical loading.

The load (A_c) in N due to the effect of the wind upon a wind span L , applied at the support and blowing at an angle Ω with the conductors, is given by the following expression, using q_0 of Equation (7).

NOTE 1 The wind span L of a support is equal to half the sum of the length of adjacent spans

$$A_c = q_0 C_i G_c G_L D L \sin^2 \Omega$$

For the two recommended loading conditions, the wind force on ice-covered conductors shall be:

- **Condition 1** (highest value of ice load to be combined with average of yearly maximum wind speed during ice persistence):

$$A_{c1} = q_{0H} C_{iH} G_c G_L D_L L \sin^2 \Omega$$

$$D_L = (d^2 + 4g_L/9,82\pi\delta)^{0,5}$$

- **Condition 2** (highest value of wind speed during ice persistence to be combined with average of yearly maximum ice load):

$$A_{c2} = q_{0L} C_{iH} G_c G_L D_H L \sin^2 \Omega$$

$$D_H = (d^2 + 4g_H/9,82\pi\delta)^{0,5}$$

NOTE 2 These two conditions were found, in general, to be most critical. Should other conditions be required, the information contained in Annex A may be used.

In the above equations, D_L , D_H are diameters (m) of the equivalent cylindrical shapes for the types of ice being considered.

g_L and g_H = ice load (N/m)

where

δ is the highest density for type of ice being considered (kg/m^3);

Ω is the angle between wind direction and the conductor.

Where support members are critical for lower conductor vertical loads at the supports, the effect of reduced vertical loads and the presence of aerodynamic lift forces should be considered. It is suggested that the lift force per unit length is not likely to exceed 50 % of the drag force per unit length of ice covered conductors.

6.5 Loads for construction and maintenance (safety loads)

6.5.1 General

Construction and maintenance operations are the occasions when failure of a line component is most likely to cause injury or loss of life. These operations should be regulated to eliminate unnecessary and temporary loads which would otherwise demand expensive reinforcing of all supports, especially in ice-free areas.

National regulations and/or codes of practice generally provide minimum safety rules and requirements with respect to public safety.

En outre, la présente norme établit des cas de charge relatifs à la construction et à l'entretien suivant les recommandations ci-après. Les contraintes exercées sur le système par ces charges ne doivent pas être supérieures à la limite d'endommagement et la résistance mécanique des supports doit normalement être vérifiée par des essais (voir CEI 60652) ou par des méthodes de calcul fiables.

6.5.2 Levage des supports

La résistance mécanique de tous les points de levage et de tous les composants doit être vérifiée pour au moins deux fois les efforts statiques produits par la méthode de levage proposée. Un facteur de 1,5 peut être utilisé lorsque les opérations de levage font l'objet d'un contrôle attentif.

6.5.3 Déroulage et réglage lors de la construction

6.5.3.1 Tension des câbles

Les tensions mécaniques doivent être calculées à la température minimale autorisée pour les opérations de déroulage et de réglage. Il est recommandé d'utiliser, dans le calcul des charges appliquées aux structures, des tensions de conducteurs égales au moins à deux fois les tensions de réglage pour les conducteurs en cours de déroulage et 1,5 fois pour la totalité des câbles en place.

6.5.3.2 Charges verticales

La charge supplémentaire appliquée aux supports doit être calculée à partir des angles verticaux et des tensions de conducteurs données en 6.5.3.1. Ces charges doivent s'exercer aux points d'accrochage des conducteurs ou aux points de déroulage de ces derniers (s'ils sont différents), et doivent tenir compte de toutes les séquences possibles de déroulage des conducteurs pour toutes les combinaisons, avec et sans charge sur les différents points d'accrochage, représentant la séquence de déroulage des câbles.

6.5.3.3 Charges transversales

Les structures d'angle doivent être capables de supporter les charges transversales produites par les tensions des conducteurs données en 6.5.3.1.

Bien que l'on puisse rencontrer des vents faibles pendant la construction et l'entretien, l'effet de ces phénomènes est négligé dans ces calculs.

6.5.3.4 Charges longitudinales (et verticales) sur les supports d'arrêt provisoire

a) Charges longitudinales

Les supports utilisés comme structures d'arrêt pendant le déroulage et le réglage doivent être capables de résister aux efforts longitudinaux résultant des tensions de réglage indiquées en 6.5.3.1, dans toute combinaison (avec ou sans effort), sur les différents points d'accrochage représentant les séquences de déroulage des câbles.

b) Charges verticales

Si ces structures sont renforcées par des haubans provisoires pour obtenir la résistance longitudinale nécessaire, ces haubans accroîtront les charges verticales aux points d'accrochage. S'ils sont utilisés sur un pylône rigide, ils doivent préalablement recevoir une tension mécanique adéquate. Il sera donc nécessaire de contrôler la tension mécanique dans ces haubans et de prendre en compte les charges verticales ainsi appliquées aux points d'accrochage.

NOTE Cette précontrainte est nécessaire du fait des différences de déformation des haubans et des consoles en treillis lorsque qu'ils sont soumis à des charges.

In addition, construction and maintenance loading cases will be established in this standard as recommended hereafter. The system stress under these loadings shall not exceed the damage limit, and the strength of the supports shall be verified either by testing (see IEC 60652) or by reliable calculation methods.

6.5.2 Erection of supports

The strength of all lifting points and of all components shall be verified for at least twice the static loads produced by the proposed erection method. A factor of 1,5 can be used if the operations are carefully controlled.

6.5.3 Construction stringing and sagging

6.5.3.1 Conductor tensions

The tensions shall be calculated at the minimum temperature allowed for stringing and sagging operations. It is recommended that, in the calculation of loads on the structures, conductor tensions of at least twice the sagging tensions be used for conductors being moved and 1,5 times for all conductors in place.

6.5.3.2 Vertical loads

The extra load applied to the supports shall be calculated from the vertical angles, with the conductor tensions given in 6.5.3.1. The loading shall be applied to the conductor attachment points or conductor stringing points (if different), and shall consider all possible conductor stringing sequences in any combination of load and no load at the several support points that represent the conductor stringing sequence.

6.5.3.3 Transverse loads

Angle structures shall be capable of resisting the transverse loads produced by the conductor tensions given in 6.5.3.1.

Although light winds can occur during construction and maintenance, their effect is neglected for these calculations.

6.5.3.4 Longitudinal (and vertical) loads on temporary dead-end supports

a) Longitudinal loads

Supports used as dead-ends during stringing and sagging shall be capable of resisting longitudinal loads resulting from the sagging tensions given in 6.5.3.1 in any combination of load and no load at the several support points that represent the conductor stringing sequences.

b) Vertical loads

If such structures are reinforced by temporary guys to obtain the required longitudinal strength, these guys will increase the vertical loads at the attachment points and shall be adequately pre-stressed if attached to a rigid tower. It will therefore be necessary to check the tension in the guys and take account of the vertical loads applied to the attachment points.

NOTE Pre-stressing is required because of differences in deformation of guys vs. lattice crossarm when both are subjected to load.

6.5.3.5 Charges longitudinales sur les supports de suspension

Tant que le conducteur est sur les poulies de déroulage, une charge longitudinale doit être appliquée aux supports. Celle-ci aura une valeur égale au poids unitaire du conducteur de phase w (N/m), multiplié par la différence de hauteur entre les points bas des portées adjacentes (m). Cette charge (en N) sera négligeable et très inférieure aux efforts considérés pour limiter les ruptures, indiqués en 6.6.3, sauf pour les portées exceptionnelles où on doit vérifier que la structure peut supporter au moins deux fois cette charge.

Au cours d'opérations telles que l'ancrage des conducteurs au sol, des charges sont appliquées sur tous les points des conducteurs et doivent être prises en compte.

6.5.4 Charges liées à l'entretien

Tous les points d'accrochage des conducteurs doivent être capables de supporter une charge verticale au moins égale à deux fois celle du câble nu aux tensions de réglage.

Des points d'ancrage ou de levage provisoires à proximité des points d'accrochage normaux des conducteurs servent aux travaux d'entretien ou aux travaux sous tension. Ils doivent être capables de supporter au moins deux fois les charges appliquées par le câble nu aux tensions de réglage.

Un facteur de 1,5 au lieu de 2 peut être utilisé pour les charges ci-dessus lorsque les interventions font l'objet d'un contrôle attentif.

Les responsables des opérations d'entretien doivent spécifier des modalités de manutention qui ne surchargent pas la structure.

Toutes les barres de la structure susceptibles de supporter un monteur doivent être capables de tenir une charge de 1 500 N (à vérifier par le calcul), appliquée verticalement en leur milieu, cette charge étant combinée par convention avec les contraintes accompagnant une intervention d'entretien. Ces calculs sont généralement conduits pour l'hypothèse de vent nul et de température minimale prise en compte dans les opérations d'entretien.

6.6 Charges à prendre en compte pour la limitation des défaillances (sécurité structurale)

6.6.1 Généralités

Les dispositions de sécurité structurale visent à minimiser la probabilité d'une propagation incontrôlée des défaillances susceptibles de s'étendre (en cascade) bien au-delà du canton défaillant, quelle que soit la gravité de la défaillance initiale.

Les dispositions détaillées ci-dessous correspondent à un minimum de sécurité structurale. Viennent s'y ajouter une liste d'options envisageables lorsqu'une sécurité accrue se justifie.

Les charges prescrites en 6.6.3 donnent aux structures classiques en treillis les moyens de minimiser le risque de défaillances en cascade. Ces exigences sont tirées de l'expérience acquise sur ces structures classiques, mais peuvent aussi s'appliquer à d'autres types de structures. Néanmoins, l'expérience en service accumulée au contact de structures ou de matériaux différents peut dicter ou suggérer des précautions différentes ou supplémentaires, qui peuvent alors se substituer aux exigences ci-dessus.

Les contraintes exercées sur les systèmes par ces charges ne doivent pas être supérieures à la limite de rupture.

6.5.3.5 Longitudinal loads on suspension supports

While the conductor is in the stringing sheaves, a longitudinal load shall be applied to the supports. This load is equal in value to the unit weight of the phase conductor, w (N/m), multiplied by the difference in elevation of the low points of adjacent spans (m). This load (in N) will be negligible and much less than the containment loads derived in 6.6.3. except for unusual spans, where it shall be verified that the structure can resist at least twice this load.

In operations such as conductor tie-downs, loads are applied at all conductor points and shall be taken into account.

6.5.4 Maintenance loads

All conductor support points shall be able to resist at least twice the bare conductor vertical loads at sagging tensions.

Temporary lift or tension points, close to the normal attachment points of conductors and used for maintenance or live line operations, shall also be able to resist at least twice the bare conductor loads at sagging tensions.

A factor of 1,5 instead of 2 for the above loads can be used if the operations are carefully controlled.

Those responsible for maintenance shall specify lifting arrangements which will not overstress the structure.

All structural members that may be required to support a lineman shall, by calculation, be able to support a 1 500 N load, applied vertically at their midpoint, conventionally combined with the stresses present during maintenance. These are usually based on still air at the minimum temperature assumed for maintenance operations.

6.6 Loads for failure containment (security requirements)

6.6.1 General

The objective of security measures is to minimize probability of uncontrolled propagation of failures (cascades) which might otherwise extend well beyond the failed section, whatever the extent of the initial failure.

The security measures detailed below provide for minimum security requirements and a list of options which may be used whenever higher security is justified.

The loads prescribed in 6.6.3 provide conventional lattice structures with the means of minimizing the probability of cascade failures. These requirements are derived from experience on conventional lattice structures, but should also be applicable to other types of structures. Service experience using different types of structures or materials could dictate or require different or additional precautions that can be substituted to the above requirements.

The system stress under these loads shall not exceed the failure limit.

6.6.2 Prescriptions relatives à la sécurité structurale

En l'absence de limiteurs spéciaux, les charges spécifiées en 6.6.3 doivent être considérées comme des prescriptions minimales applicables à la plupart des lignes de transport.

Lorsqu'une augmentation de la sécurité structurale est justifiée ou nécessaire (par exemple sur des lignes d'importance stratégique, au niveau de traversées de cours d'eau ou en présence de charges de givre maximales), il est possible d'adopter des dispositions ou des charges supplémentaires, en fonction des pratiques locales et de l'expérience passée. Le paragraphe 6.6.3.3 énumère de telles dispositions.

6.6.3 Charges relatives à la sécurité structurale – Charges de torsion, charges longitudinales et dispositions de sécurité structurale supplémentaires

6.6.3.1 Charges de torsion

On appliquera à tout point d'accrochage des conducteurs de phase ou du câble de garde (le cas échéant) la charge statique résiduelle (CSR) résultant de la rupture de toute une phase ou d'un câble de garde dans une portée adjacente. Cette CSR doit être considérée aux températures de réglage, en l'absence de toute charge de vent ou de givre.

La CSR relative aux supports de suspension doit être calculée pour des portées moyennes, à la tension de réglage, en tenant compte de la détente due à tout balancement des chaînes d'isolateurs, à la déformation ou à la rotation du support, des fondations, des consoles pivotantes ou des supports articulés et de l'interaction avec les autres phases ou câbles de garde susceptibles d'influer sur cette charge.

La valeur de la CSR peut être limitée par des dispositifs spéciaux (pincés à glissement par exemple), auquel cas il convient de corriger en conséquence les prescriptions de sécurité minimales.

Les charges produites par les conducteurs nus aux tensions de réglage doivent être appliquées à tous les autres points d'accrochage.

6.6.3.2 Charges longitudinales

Des charges longitudinales doivent être appliquées simultanément à tous les points d'accrochage. Elles doivent être égales aux charges dissymétriques résultant de la tension mécanique des conducteurs nus dans toutes les portées situées d'un côté du support et, de l'autre côté, par la tension des conducteurs ayant une surcharge fictive égale à leur propre poids, w , dans toutes les portées. On doit à cet égard prendre en compte les portées moyennes des conducteurs nus à la tension de réglage et considérer tout effet de détente approprié, tels que ceux mentionnés en 6.6.3.1. Voir Figure 14.

Une autre solution consisterait à prendre en compte environ 50 % de la tension de réglage à chaque point d'accrochage

6.6.2 Security requirements

Unless special limiting devices are used, the loadings specified in 6.6.3 shall be considered as minimum requirements applicable for most transmission lines.

In cases where increased security is justified or required (for example on very important lines, river crossings or lines subjected to maximum ice loads), additional measures or loadings can be used according to local practice and past experience. A list of such measures appears in 6.6.3.3.

6.6.3 Security related loads – Torsional, longitudinal and additional security measures

6.6.3.1 Torsional load

At any one ground wire or phase conductor attachment point the relevant, if any, residual static load (RSL) resulting from the release of the tension of a whole phase conductor or of a ground wire in an adjacent span shall be applied. This RSL shall be considered at sagging temperatures without any wind or ice loads.

The RSL for suspension structures shall be calculated for average spans and at sagging tensions, allowance being made for the relaxation of the load resulting from any swing of the insulator strings assemblies, deflection or rotation of the structure, foundations, articulated crossarms or articulated supports, and the interaction with other phases conductors or wires that may influence this load.

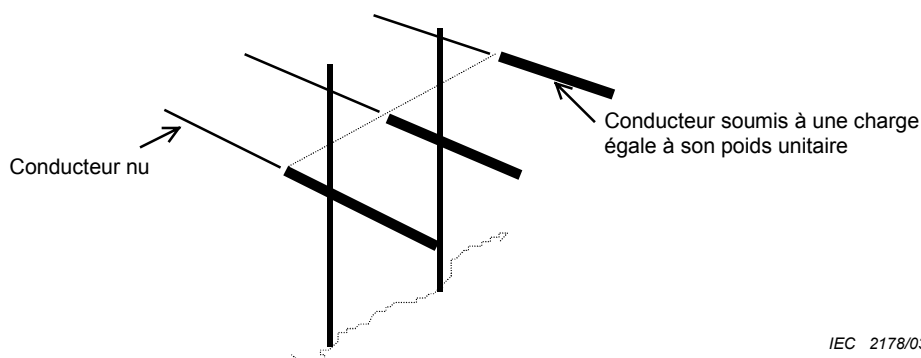
The value of the RSL may be limited by special devices (slipping clamps, for example), in which case, the minimum security requirements should be adjusted accordingly.

Coincident bare conductor loads at sagging tensions shall be applied at all other attachments points.

6.6.3.2 Longitudinal loads

Longitudinal loads shall be applied simultaneously at all attachment points. They shall be equal to the unbalanced loads produced by the tension of bare conductors in all spans in one direction from the structure and with a fictitious overload equal to the weight, w , of the conductors in all spans in the other direction. Average spans shall be considered with the bare conductors at sagging tension and any appropriate relaxation effects, as mentioned in 6.6.3.1 shall be considered. See Figure 14.

An alternative proposal would be to consider about 50 % of the sagging tension at each attachment point.



IEC 2178/03

Figure 14 – Simulation de la charge longitudinale exercée sur un conducteur (pour un support à un seul circuit)

6.6.3.3 Dispositions de sécurité structurale supplémentaires

Le concepteur peut augmenter la sécurité structurale en adoptant certaines des prescriptions énumérées au Tableau 9.

Tableau 9 – Dispositions de sécurité structurale supplémentaires

Description de dispositions de sécurité structurale supplémentaires	Commentaires
Multiplier la CSR par 1,5 en n'importe quel point	Lignes pour lesquelles une plus grande sécurité structurale se justifie
Augmenter le nombre de points de charge de torsion ou flexion avec par exemple deux phases ou deux câbles de garde où la CSR est appliquée	Recommandé pour les lignes à deux ou à circuits multiples
Calculer la CSR pour des tensions supérieures à la charge quotidienne en utilisant la charge de vent ou de givre correspondant à une période de retour de 3 ans conjointement au cas de charge considéré	Recommandé pour les structures en angle ou les lignes exposées à des conditions climatiques sévères
Insertion de pylônes anticascades à intervalles réguliers, généralement tous les 10 pylônes. Ces structures doivent être conçues pour résister à la rupture de tous les conducteurs à leur charge limite	A envisager pour les lignes importantes dans des zones exposées à un givrage sévère

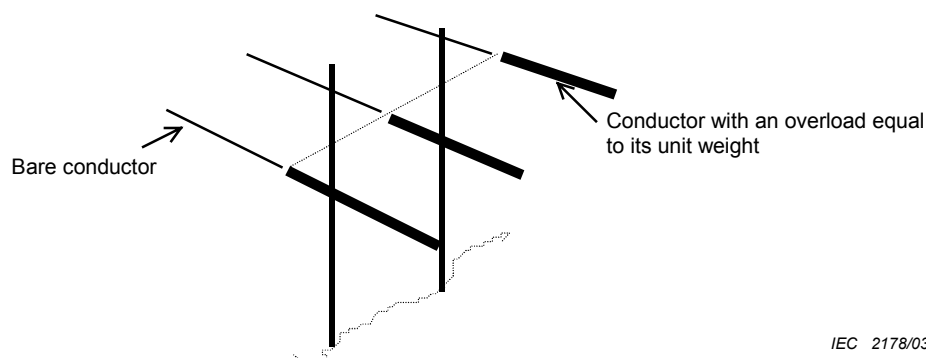
7 Résistance des composants et états limites

7.1 Généralités

Cet article a pour objet de définir les états limites des composants des lignes, ainsi que leurs paramètres statistiques communs.

Les composants des lignes soumis à des charges accrues peuvent, lorsque ces efforts atteignent un certain niveau, présenter une déformation permanente, en particulier si le mode de défaillance fait intervenir la notion de ductilité. Ce niveau est appelé état limite d'endommagement ou de service. Si la charge augmente au-delà de ce niveau, une défaillance se produit, à un niveau appelé état limite ultime ou de défaillance.

La ligne de transport est considérée comme intacte lorsque les contraintes qui pèsent sur ses composants en cours d'utilisation sont inférieures à la limite d'endommagement de ces derniers. Elle est dite endommagée (en état d'endommagement) si ses composants ont dépassé leur état limite d'endommagement. Enfin, on juge qu'elle est en situation de défaillance lorsque ses composants ont atteint leur limite de rupture. Ces situations sont représentées graphiquement à la Figure 15.



IEC 2178/03

Figure 14 – Simulated longitudinal conductor load (case of a single circuit support)

6.6.3.3 Additional security measures

The designer can increase the security by adopting some of the requirements listed in Table 9.

Table 9 – Additional security measures

Description of additional security measures	Comment
Increase the RSL by a factor of 1,5 at any one point	Lines where higher security is justified
Increase the number of torsional/flexural load points to either two phases or two ground wires where the residual static load (RSL) is applied	Advisable for double or multi-circuit lines
Calculate the RSL for tensions higher than the every day load by using wind or ice load corresponding to a 3 year return period in conjunction with this loading case	Advisable for angle structures or lines subjected to severe climatic conditions
Insertion of anti-cascading towers at intervals, typically every tenth tower. These towers shall be designed for all broken conductors with limit loads	To be considered for important lines in heavy icing areas

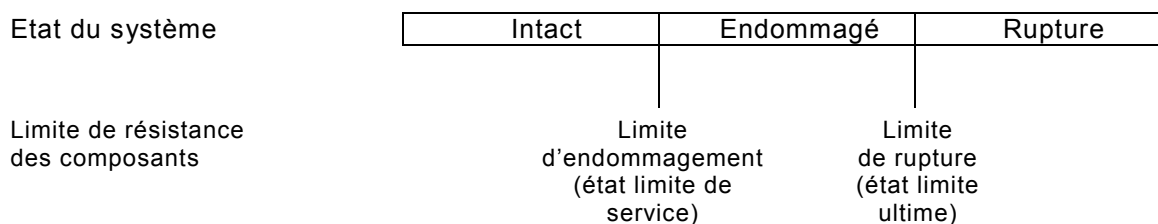
7 Strength of components and limit states

7.1 Generalities

The purpose of this clause is to define limit states of line components and their common statistical parameters.

When subjected to increasing loads, line components may exhibit at some load level a permanent deformation, particularly if the failure mode is ductile. This level is called the damage or serviceability limit state. If the load is further increased, failure of the component occurs at a level called the failure or ultimate limit state.

The transmission line is considered intact when its components are used at stresses below their damage limit. It is considered in a damaged state if its components have exceeded their damage limit state. Finally the line is considered to have failed if its components have reached their failure limit. The graphical interpretation is shown on Figure 15.



IEC 2179/03

Figure 15 – Schéma des états limites des composants de lignes

7.2 Equations générales de résistance des composants

En rapport avec les équations (3) et (4):

$$(\text{effet de } Q_T) < \Phi_N \times \Phi_S \times \Phi_Q \times \Phi_C \times R_c$$

La conception doit faire en sorte que chaque composant satisfasse aux prescriptions énoncées en termes de charge et de résistance concernant la fiabilité, la sécurité structurale et la sécurité du personnel. En pratique, deux séries d'équations (fiabilité et sécurité du personnel) déterminent la résistance caractéristique à l'endommagement nécessaire pour le composant considéré, et une troisième série (sécurité structurale) détermine la résistance caractéristique à la défaillance requise pour ce composant. Dans ces équations, les conditions de fiabilité doivent normalement être déterminantes pour les principaux composants.

7.2.1 Valeurs du facteur de résistance Φ_N

Dès lors qu'il faut s'attendre à ce qu'un nombre N de composants soient soumis à la même charge critique Q_T lors d'un événement climatique quelconque, la résistance caractéristique individuelle des composants doit être multipliée par un facteur de résistance Φ_N . Ce facteur dépend de N et des caractéristiques de la fonction de distribution (type et coefficient de variation v_R) de la résistance R .

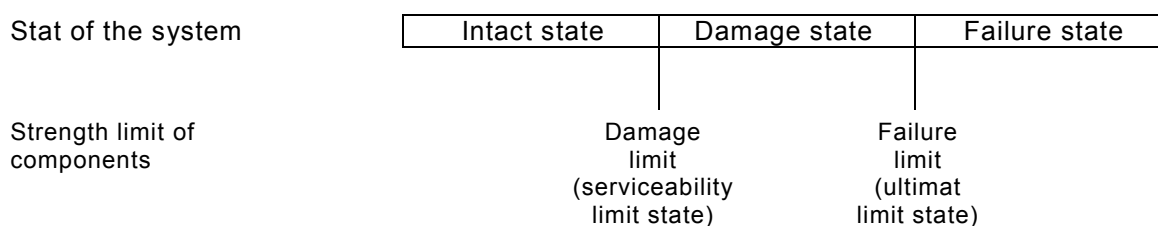
En l'absence d'expérience spécifique, le nombre N de supports soumis à l'intensité de charge maximale lors d'un événement climatique quelconque peut être déduit du Tableau 10.

Tableau 10 – Nombre de supports soumis à l'intensité de charge maximale pendant un événement climatique quelconque

Charge	Terrain plat à onduleux	Relief montagneux
Maximale due à un vent soufflant en rafales	1 (1 à 5)	1 (1 à 2)
Maximale de givre	20 (10 à 50)	2 (1 à 10)
Maximale de givre et de vent	1 (1 à 5)	1 (1 à 5)
NOTE Les chiffres entre parenthèses représentent la quantité typique de supports déterminée par une portée de 400 m.		

Le nombre de composants autres que les supports peut être calculé directement à partir du nombre des supports ainsi déterminé.

Les valeurs de Φ_N sont indiquées au Tableau 11. Elles se fondent sur une fonction de distribution normale. Dans le même tableau, les valeurs entre parenthèses se fondent sur la fonction de distribution log-normale. Les valeurs déduites d'autres fonctions de distribution peuvent être utilisées si elles sont plus représentatives du composant en cours de conception.



IEC 2179/03

Figure 15 – Diagram of limit states of line components

7.2 General equations for the strength of components

With reference to Equations (3) and (4):

$$(\text{effect of } Q_T) < \Phi_N \times \Phi_S \times \Phi_Q \times \Phi_C \times R_c$$

During design, each component shall satisfy load and strength requirements for reliability, security and safety conditions. In practice, two sets of equations (reliability and safety) determine the damage characteristic strength required for the component, and a third set of equations (security) determines the failure characteristic strength required for the component. In these equations, the reliability conditions shall normally be the governing condition for the main components.

7.2.1 Values of strength factor Φ_N

Whenever a number N of components are expected to be subjected to the same critical load Q_T during a single occurrence of a climatic event, the characteristic strength of individual components shall be de-rated (multiplied) by a strength factor Φ_N . This factor depends on N and on characteristics of the strength distribution function (type and coefficient of variation v_R) of strength R .

In the absence of specific experience, the number N of supports subjected to the maximum load intensity during a single occurrence of climatic events can be derived from Table 10.

Table 10 – Number of supports subjected to maximum load intensity during any single occurrence of a climatic event

Loading	Flat to rolling terrain	Mountains
Maximum gust wind	1 (1 to 5)	1 (1 to 2)
Maximum ice	20 (10 to 50)	2 (1 to 10)
Maximum ice and wind	1 (1 to 5)	1 (1 to 5)
NOTE Values in brackets represent the typical range of supports based on a span of 400 m.		

The number of components other than supports can be directly derived from the number of supports thus selected.

Values of Φ_N are given in Table 11 and are based on a normal distribution function. In the same table, the values within brackets are based on the log-normal distribution function. Values derived from other distribution functions can be used if more representative of the component being designed.

Lorsque v_R et N prennent des valeurs élevées (voir les cellules ombrées, caractères italiques dans le Tableau 11), la valeur de Φ_N est très sensible au choix de la fonction de distribution. Il convient donc de faire appel au jugement d'experts et aux résultats des essais de résistance dans le choix de la fonction de distribution. Les chiffres du Tableau 11 qui ne figurent pas dans la zone ombrée proviennent, par prudence, de la courbe de distribution normale. Si l'on connaît la courbe de distribution de la résistance, on peut se rapporter à l'Annexe A pour obtenir les valeurs spécifiques relatives aux distributions normale et log-normale.

Tableau 11 – Facteur de résistance Φ_N lié au nombre N de composants ou d'éléments exposés à la charge critique

N	Coefficient de variation de la résistance v_R						
	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,98	0,98	0,97	0,94	0,91	0,87	0,84
5	0,96	0,94	0,92	0,85	0,80	0,72 (0,83)	0,64 (0,80)
10	0,94	0,92	0,89	0,81	0,72 (0,82)	0,62 (0,77)	0,51 (0,73)
20	0,93	0,90	0,85	0,77 (0,83)	0,66 (0,77)	0,53 (0,73)	0,38 (0,68)
40	0,92	0,87	0,83	0,72 (0,80)	0,59 (0,74)	0,44 (0,69)	0,26 (0,64)
80	0,91	0,86	0,79 (0,84)	0,68 (0,77)	0,53 (0,71)	0,36 (0,65)	0,16 (0,60)
160	0,90	0,85	0,79 (0,83)	0,67 (0,76)	0,52 (0,69)	0,34 (0,62)	0,13 (0,57)

7.2.2 Facteur de résistance Φ_S lié à la coordination de résistance

Il est souvent économique de prévoir, lors de la conception, une fiabilité supérieure pour certains composants, afin de minimiser les conséquences (durée de réparation ou défaillance secondaire, par exemple) d'une éventuelle défaillance due à un événement climatique.

Afin de réaliser cette coordination de résistance, on applique un facteur de réduction Φ_{S2} à la résistance du composant R_2 , choisi pour présenter une fiabilité supérieure, tandis qu'un facteur $\Phi_{S1} = 1,0$ est appliqué au premier composant défaillant. Le facteur Φ_{S2} , qui dépend du coefficient de variation des deux composants, est indiqué au Tableau 12. Il se fonde sur un niveau de confiance de 90 %, pour que le second composant R_2 ne subisse pas de défaillance avant le premier R_1 . Cette valeur de 90 % correspond donc au seuil de confiance relatif à la séquence de défaillance recherchée.

Tableau 12 – Valeurs de Φ_{S2}

		c.v. de R_1			
		0,05	0,075	0,10	0,20
c.v. de R_2	0,05-0,10	0,92	0,87	0,82	0,63
	0,10-0,40	0,94	0,89	0,86	0,66

NOTE Dans ce tableau, R_2 correspond au composant conçu pour être plus fiable que R_1 .

Les critères permettant de choisir entre les coordinations de résistance possibles sont envisagés à l'Annexe A, et le Tableau 13 présente une coordination de résistance généralement admise. Ce tableau prévoit, dans un premier temps, la coordination de résistance entre les composants majeurs, avant de préciser la coordination qui en découle pour les divers éléments d'un composant majeur.

In the case of high values of v_R and N (see the shaded cells with italic figures in Table 11), the value of Φ_N is very sensitive to the choice of the distribution function. Thus, engineering judgement and strength test results should be used in the selection of the appropriate distribution function. In Table 11 the values outside the shaded area are conservatively taken from the normal distribution curve. Should the strength distribution curve be known, Annex A can be used to provide the specific values for the normal and log-normal distributions.

Table 11 – Strength factor Φ_N related to the number N of components or elements subjected to the critical load intensity

N	Coefficient of variation of strength v_r						
	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,98	0,98	0,97	0,94	0,91	0,87	0,84
5	0,96	0,94	0,92	0,85	0,80	0,72 (0,83)	0,64 (0,80)
10	0,94	0,92	0,89	0,81	0,72 (0,82)	0,62 (0,77)	0,51 (0,73)
20	0,93	0,90	0,85	0,77 (0,83)	0,66 (0,77)	0,53 (0,73)	0,38 (0,68)
40	0,92	0,87	0,83	0,72 (0,80)	0,59 (0,74)	0,44 (0,69)	0,26 (0,64)
80	0,91	0,86	0,79 (0,84)	0,68 (0,77)	0,53 (0,71)	0,36 (0,65)	0,16 (0,60)
160	0,90	0,85	0,79 (0,83)	0,67 (0,76)	0,52 (0,69)	0,34 (0,62)	0,13 (0,57)

7.2.2 Strength factor Φ_S related to the coordination of strength

It is often cost-effective to design some components to be more reliable than others in order to minimize the consequences (i.e. repair time, secondary failure, etc.) of a possible failure due to climatic event.

In order to achieve such strength coordination, a strength reduction factor Φ_{S2} is applied to the strength of components R_2 chosen to be more reliable while a factor $\Phi_{S1} = 1,0$ is applied to the first component to fail. Factor Φ_{S2} depends on the coefficient of variation of both components and is given in Table 12. It is based on a confidence of 90 % that the second component R_2 will not fail before the first R_1 . Thus, 90 % is the confidence level on the target sequence of failure.

Table 12 – Values of Φ_{S2}

		COV of R_1			
		0,05	0,075	0,10	0,20
COV of R_2	0,05-0,10	0,92	0,87	0,82	0,63
	0,10-0,40	0,94	0,89	0,86	0,66

NOTE In the above table, R_2 is the component designed more reliable than R_1 .

Criteria for deciding on a preferred strength coordination are discussed in Annex A, and a usually accepted strength coordination is given in Table 13. This table provides first for the strength coordination between major components and, subsequently, provides for a subsequent coordination within the various elements of a major component.

Tableau 13 – Coordination de résistance typique de composants d'une ligne

	Composant majeur	Coordination au sein des composants majeurs*
Moins fiable	Pylône de suspension	<u>Pylône</u> , fondations, interfaces
Plus fiable (seuil de confiance de 90 %)	Pylône d'ancrage	<u>Pylône</u> , fondations, interfaces
	Pylône d'arrêt	<u>Pylône</u> , fondations, interfaces
	Conducteurs**	<u>Conducteurs</u> , isolateurs, interfaces
* Dans la colonne des composants majeurs, le composant souligné est le moins fiable à un seuil de confiance de 90 %.		
** Compte tenu des limites de résistance spécifiées au Tableau 16, les conducteurs sont généralement le composant le plus fiable de la ligne.		

7.3 Données relatives au calcul des composants

7.3.1 Etats limites des composants de lignes

Les Tableaux 14 à 17 spécifient des limites d'endommagement et de défaillance des composants de lignes dans l'optique de l'ensemble du système. En l'absence de données plus précises, ces valeurs constituent des limites de conception acceptables. Les données locales et l'expérience nationale peuvent, le cas échéant, être utilisées pour améliorer et compléter ces tableaux.

Tableau 14 – Limites d'endommagement et de défaillance des supports

Supports			Limite d'endommagement	Limite de défaillance
Type	Matériau ou éléments	Mode de chargement		
Pylônes à treillis, autoportants ou haubanés	Tous les éléments sauf les haubans	Traction	Limite élastique	Contrainte ultime de traction (rupture)
		Cisaillement	90 % de la limite de cisaillement (élastique)	Contrainte de cisaillement (de rupture)
		Compression (flambement)	Déformation non élastique de $l/500$ à $l/100$	Effondrement dû à l'instabilité
	Haubans en acier	Traction	La plus petite des valeurs suivantes: – limite élastique (70 % à 75 % de la contrainte ultime de traction) – déformation correspondant à une réduction de 5 % de la résistance du pylône – nécessité de réajuster la tension mécanique	Contrainte ultime de traction
Poteaux	Acier	Moments	1 % de déformation non élastique au sommet, ou déformation élastique empiétant sur les distances d'isolement	Flambement local en compression ou contrainte ultime de traction
		Compression (flambement)	Déformation non élastique de $l/500$ à $l/100$	Ruine due à l'instabilité
	Bois	Moments	3 % de déplacement non élastique au sommet	Contrainte ultime de traction
		Compression (flambement)	Déformation non élastique de $l/500$ à $l/100$	Ruine due à l'instabilité
	Béton	Charges permanentes ou non permanentes	Fissuration après relâchement des charges, ou 0,5 % de déformation non élastique	Ruine du poteau
NOTE 1 La déformation des éléments en compression correspond à la flèche maximale par rapport à la droite joignant les extrémités. Pour les éléments soumis à des moments, il s'agit du déplacement de l'extrémité libre par rapport à la verticale.				
NOTE 2 l correspond à la longueur libre de l'élément considéré.				
NOTE 3 La largeur des fissures pour les poteaux en béton devant faire l'objet d'un accord.				

Table 13 – Typical strength coordination of line components

	Major component	Coordination within major components *
Less reliable	Suspension tower	<u>Tower</u> , foundations, interfaces
More reliable with 90 % confidence	Tension tower	<u>Tower</u> , foundations, interfaces
	Dead-end tower	<u>Tower</u> , foundations, interfaces
	Conductors**	<u>Conductors</u> , insulators, interfaces
* Within each major component, the underlined component is the least reliable with 90 % confidence.		
** With the strength limits specified in Table 16, conductors are usually the most reliable component of the line.		

7.3 Data related to the calculation of components

7.3.1 Limit states for line components

Tables 14 to 17 specify damage limits and failure limits for line components with regard to the system. In the absence of relevant data, these values constitute acceptable design limits. If local data and national experience is available, it can be used to improve and complete the tables.

Table 14 – Damage and failure limits of supports

Supports			Damage limit	Failure limit
Type	Material or elements	Loading mode		
Lattice towers, self-supporting or guyed	All elements, except guys	Tension	Yield (elastic) stress	Ultimate (breaking) tensile stress
		Shear	90 % (elastic) shear stress	Shear (breaking) stress
		Compression (buckling)	Non-elastic deformation from $l/500$ to $l/100$	Collapse by instability
	Steel guys	Tension	Lowest value of: – yield stress (70 % to 75 % UTS) – deformation corresponding to 5 % reduction in tower strength – need to readjust tension	Ultimate tensile stress
Poles	Steel	Moments	1 % non-elastic deformation at the top, or elastic deformation that impairs clearances	Local buckling in compression or ultimate tensile stress in tension
		Compression (buckling)	Non elastic deformation from $l/500$ to $l/100$	Collapse by instability
	Wood	Moments	3 % non-elastic displacement at the top	Ultimate tensile stress
		Compression (buckling)	Non-elastic deformation from $l/500$ to $l/100$	Collapse by instability
	Concrete	Permanent or non- permanent loads	Crack opening after release of loads, or 0,5 % non-elastic deformation	Collapse of the pole
NOTE 1 The deformation of compression elements is the maximum deflection from the line joining end points. For elements subjected to moments, it is the displacement of the free end from the vertical.				
NOTE 2 l is the free length of the element.				
NOTE 3 The width of crack for concrete poles to be agreed upon.				

Tableau 15 – Limites d'endommagement et de défaillance des fondations

Fondations			Limite d'endommagement	Limite de défaillance
Type	Type de support	Mouvement isostatique		
Arrachement	Haubanés	Oui	Nécessité de réajuster la tension des haubans	Mouvement de soulèvement excessif hors plan (le plan étant formé par les trois autres fondations) de l'ordre de 5 cm à 10 cm
		Non	Réduction de 5 % de la résistance du support	
	Autoportant	Oui	Rotation de 1° (degré) du support	
		Non	Déplacement vertical différentiel compris entre Y/300 et Y/500, avec un maximum de 2 cm	
Compression	Tous types	Oui	Déplacement correspondant à une réduction de 5 % de la résistance du support	Tassement excessif hors plan (le plan étant formé par les trois autres fondations), de l'ordre de 5 à 10 cm
		Non	Déplacement vertical différentiel compris entre Y/300 et Y/500, avec un maximum de 2 cm	
Moments (rotation)	Poteaux	Oui	Rotation de 2° (degrés) du support	Rotation excessive de l'ordre de 5° à 10°
		Non	Rotation correspondant à une augmentation de 10 % du moment total due a l'excentricité	
NOTE 1 Tient compte de l'interaction entre le support et ses fondations.				
NOTE 2 Un mouvement est isostatique lorsqu'il n'induit pas d'efforts internes dans la structure. Ainsi, le déplacement d'une des fondations d'un support à trois pieds constitue un mouvement déterminé, alors que celui d'un support à quatre pieds est un mouvement indéterminé.				
NOTE 3 Y correspond à la distance horizontale entre les fondations.				
NOTE 4 Certaines fondations rigides (pieux, par exemple) peuvent nécessiter des limites plus basses.				

Tableau 16 – Limites d'endommagement et de défaillance des conducteurs et câbles de garde

Conducteurs et câbles de garde	Limite d'endommagement	Limite de défaillance
Tous types	La plus faible des valeurs suivantes: - limite de vibration, ou - empiètement sur les distances d'isolement critiques définies par la réglementation en vigueur, ou - 75 % de la résistance caractéristique ou de la résistance nominale à la traction (plage typique: de 70 % à 80 %)	Contrainte ultime de traction (défaillance)

Table 15 – Damage and failure limits of foundations

Foundations			Damage limit	Failure limit
Type	Support type	Statically determinate movement		
Uplift	Guyed	Yes	Need to readjust tension in guys	Excessive out-of-plane uplift movement (plane formed by the other three foundations) in the order of 5-10 cm
		No	5 % reduction in support strength	
	Self-supporting	Yes	1° (degree) rotation of the support	
		No	Differential vertical displacement equal to $Y/300$ to $Y/500$ with a maximum of 2 cm	
Compression	All types	Yes	Displacement corresponding to a 5 % reduction in the support strength	Excessive out-of-plane settlement (plane formed by the other three foundations) (in the order of 5-10 cm)
		No	Differential vertical displacement equal to $Y/300$ to $Y/500$ with a maximum of 2 cm	
Moments (rotations)	Poles	Yes	2° (degree) rotation of the support	Excessive rotation in the order of 5° to 10°
		No	Rotation corresponding to a 10 % increase in the total moment due to eccentricity	

NOTE 1 Takes into account the interaction between the support and its foundation.

NOTE 2 A determinate movement is one that does not induce internal efforts in the structure. For example the displacement of one foundation of a three-legged support is a determinate movement, while the displacement of a four-legged support is an indeterminate movement.

NOTE 3 Y is the horizontal distance between foundations.

NOTE 4 Some rigid foundations (e.g. pile) may require lower limits.

Table 16 – Damage and failure limits of conductors and ground wires

Conductors and ground wires	Damage limit	Failure limit
All types	Lowest of: - vibration limit, or - the infringement of critical clearances defined by appropriate regulations, or - 75 % of the characteristic strength or rated tensile strength (typical range in 70 % to 80 %)	Ultimate tensile stress (rupture)

Tableau 17 – Limites d'endommagement et de défaillance des composants d'interface

Type de composant d'interface	Limite d'endommagement	Limite de défaillance
Manchons de câbles – accessoires d'ancrage et de jonction – accessoires de suspension	Déformation permanente inacceptable (y compris le glissement)	Rupture
Isolateurs (porcelaine et verre)	70 % de la résistance assignée ou rupture de l'aillette (verre uniquement)	Rupture de la tige, du capot, du ciment ou de l'aillette
Accessoires	Déformation permanente critique	Rupture d'accessoires ou cisaillement de boulons
NOTE 1 Les accessoires sont, normalement, conçus de manière à réduire ou à éliminer la possibilité d'usure. Lorsqu'il y a lieu de s'attendre à de l'usure sous l'effet d'un contact de point à point, il convient que ce phénomène soit intégré dans la conception. Dans ce cas, la limite d'endommagement devient 'le dépassement de l'usure prévue'.		
NOTE 2 La déformation permanente critique est définie comme l'état dans lequel les accessoires ne peuvent pas être démontés facilement.		

7.3.2 Données relatives à la résistance des composants de lignes

Pour des raisons pratiques, on suppose que la fonction de densité normale décrit de manière appropriée la distribution statistique de la résistance des composants formant la ligne. Comme il est indiqué plus haut, on peut aussi utiliser une fonction de densité log-normale pour caractériser la variation de la résistance et cela, principalement pour les composants ayant un comportement fragile ou soumis à un contrôle de qualité rigoureux.

Cette hypothèse d'une fonction de densité normale se vérifie bien pour un grand nombre de composants de lignes, en particulier ceux qui présentent un faible coefficient de variation.

En l'absence d'essais spécifiques, on pourra déterminer la résistance caractéristique R_c à partir des normes en vigueur; on peut supposer que R_c correspond à $e = 10\%$. Le Tableau 18 indique des valeurs typiques de coefficients de variation de la résistance v_R , qui peuvent être utilisés comme valeurs par défaut faute de données plus précises.

Si l'on dispose de résultats d'essais, $R_c = (10\%)$, $R = (1 - u \times v_R) \bar{R}$; dans l'hypothèse d'une distribution normale de R , $u = 1,28$, ou indiqué au Tableau 19 pour la fonction de distribution log-normale.

NOTE La valeur de $u = 1,28$ correspond à un grand nombre d'échantillons. Lorsque ceux-ci sont moins nombreux, il est possible d'utiliser des valeurs différentes, déduites des propriétés statistiques de la fonction de distribution normale.

Tableau 18 – Valeurs par défaut des coefficients de variation (c.v.) de la résistance

Composant	c.v.
Conducteurs et câbles de garde (résistance généralement limitée par les manchons)	0,03
Accessoires	0,05
Isolateurs	0,05
Poteaux en acier	0,05
Poteaux en béton	0,15
Poteaux en bois	0,20
Pylônes à treillis	0,10
Ancrages rocheux injectés	0,10
Fondations sur pieux	0,25
Fondations à redan ou à remblai compacté mécaniquement	0,20
Fondation à remblai non compacté	0,30

Table 17 – Damage and failure limit of interface components

Type of interface components	Damage limit	Failure limit
Cable joints – dead-end and junction fittings – suspension fittings	Unacceptable permanent deformation (including slippage)	Rupture
Insulators (porcelain and glass)	70 % strength rating or broken shed (glass only)	Rupture of pin, cap, cement or shed
Fittings	Critical permanent deformation	Rupture of fittings or shear of bolts
NOTE 1 Normally, fittings are designed in a manner to reduce or eliminate wear. Should wear be expected because of point-to-point contact, it should be considered in the design. In such case, the damage limit becomes 'exceeding the expected wear'.		
NOTE 2 The critical permanent deformation is defined as the state where the fittings cannot be easily taken apart.		

7.3.2 Strength data of line components

For practical considerations, it is assumed that the normal density function is adequate for the statistical distribution of the strength of line components. As indicated earlier, log-normal density function can also be used to characterize strength variation, mainly for components with brittle behaviour or subjected to stringent quality control.

This assumption of normal density function is quite true for many line components, particularly those having a low coefficient of variation.

If no specific tests are available, the characteristic strength R_c will be found in ruling standards; R_c may be assumed to correspond to $e = 10\%$. Table 18 gives typical strength coefficient of variation v_R to be used as default value in the absence of relevant data.

If tests are available, $R_c = (10\%)$, $R = (1 - u \times v_R) \bar{R}$; if R is assumed normally distributed, $u = 1,28$, or given in Table 19 for log-normal distribution function.

NOTE The value of $u = 1,28$ corresponds to a large number of samples. For fewer samples, different values derived from statistical properties of the normal distribution function can be used

Table 18 – Default values for strength coefficients of variation (COV)

Component	COV
Conductors and ground wires (strength usually limited by joints)	0,03
Fittings	0,05
Insulators	0,05
Steel poles	0,05
Concrete poles	0,15
Wood poles	0,20
Lattice towers	0,10
Grouted rock anchors	0,10
Pile foundation	0,25
Foundation with undercut or machine-compacted backfill	0,20
Foundation with uncompacted backfill	0,30

Tableau 19 – Facteurs u pour la fonction de distribution log-normale lorsque $e = 10 \%$

C.V.	u
0,05	1,26
0,10	1,24
0,20	1,19
0,30	1,14
0,40	1,08

7.3.3 Résistance de conception des supports

Les supports doivent être conçus pour d'une résistance caractéristique R_c égale à :

$$R_c \geq \frac{\text{Charges de conception des supports}}{\Phi_N \Phi_S \Phi_Q \Phi_C}$$

Les charges de conception des structures comprennent les charges de poids propre et les charges extérieures.

Φ_N est choisi selon 7.2.1.

Φ_S est déduit du Tableau 12. Cette grandeur est égale à 1,0 si le support est choisi pour être le composant le moins fiable. Il peut être envisageable de concevoir des parties de pylônes telles que les consoles en treillis et les chevalets de câble de garde pour une séquence de ruine définie et limitée à ces éléments afin d'éviter que leur défaillance entraîne celle du corps du pylône.

Φ_Q pour les pylônes à treillis, le Tableau 20 indique des valeurs recommandées pour Φ_Q , afin de tenir compte de la qualité mise en œuvre dans la méthode de calcul, la fabrication et le montage. Pour les autres supports, des coefficients Φ_Q du même ordre peuvent être estimés en se référant aux situations locales.

Φ_C peut être pris égal à 1,0, en particulier lorsque la résistance caractéristique correspond à une limite d'exclusion de 10 %. Lorsque cette limite d'exclusion diffère fortement de cette valeur, il convient de se référer à l'Annexe A pour d'éventuelles corrections.

Tableau 20 – Valeur du facteur de qualité Φ_Q pour les pylônes à treillis

Contrôle de qualité	Φ_Q
Contrôle de qualité très rigoureux avec, par exemple, une inspection par des tiers	1,00
Contrôle de qualité rigoureux	0,95
Contrôle de qualité moyen	0,90

Les structures soumises à des essais en grandeur réelle (essais de type) doivent supporter des charges équivalant à R_c . Les essais doivent être conformes à la dernière version de la CEI 60652.

7.3.4 Résistance de conception des fondations

Les réactions maximales aux efforts exercés sur les fondations sont déterminées à partir de la conception des structures soumises aux charges définies dans la présente norme. Cette détermination fait appel aux méthodes d'analyse classiques et se fonde sur les combinaisons appropriées entre portée-vent et portée-poids, pieds et extensions de pylônes. Les réactions obtenues sont considérées comme étant les charges de conception des fondations. Lorsque des essais sur les fondations sont requis, ceux-ci doivent être exécutés en conformité avec la dernière version de la CEI 61773.

Table 19 – u factors for log-normal distribution function for $e = 10\%$

COV	u
0,05	1,26
0,10	1,24
0,20	1,19
0,30	1,14
0,40	1,08

7.3.3 Support design strength

Supports shall be designed for a characteristic strength R_c equal to:

$$R_c \geq \frac{\text{Support design loads}}{\Phi_N \Phi_S \Phi_Q \Phi_C}$$

Structure design loads comprise the dead loads and external loads.

Φ_N is selected according to 7.2.1.

Φ_S is derived from Table 12. It is equal to 1,0 if the support is selected as the least reliable component. Note that it may be advisable to design tower parts such as crossarms and ground wire peaks, with a sub-sequence of failure within the tower so that failure of these parts will not cause failure of main tower body.

Φ_Q for lattice towers, Table 20 gives recommended values for Φ_Q , to take into account the quality in calculation method, fabrication and erection. For other supports, coefficients Φ_Q of the same order can be estimated by view of local conditions.

Φ_C can be taken equal to 1,0, especially when the characteristic strength corresponds to a 10 % exclusion limit. If the exclusion limit varies greatly from 10 %, refer to Annex A for possible adjustments.

Table 20 – Value of quality factor Φ_Q for lattice towers

Quality control	Φ_Q
Very good quality control such as involving third party inspection	1,00
Good quality control	0,95
Average quality control	0,90

Structures subjected to full scale (type) tests shall withstand loads equivalent to R_c . Tests shall conform to the latest version of IEC 60652.

7.3.4 Foundation design strength

The maximum reactions on foundations are obtained from the design of structures subjected to the loads defined in this standard using conventional methods of analysis and appropriate wind-weight span combinations, tower legs and body extensions. The reactions thus obtained are considered to be the design loads on foundations. When foundation tests are required, these shall be performed in accordance with the latest version of IEC 61773.

La résistance caractéristique des fondations R_c doit satisfaire à l'exigence suivante:

$$R_c \geq \frac{\text{Charges de conception des fondations}}{\Phi_N \Phi_S \Phi_Q \Phi_C}$$

Φ_N dépend du nombre d'éléments de fondation soumis à l'intensité de charge maximale lors d'une tempête donnée. Ainsi, si $N = 2$ et c.v. = 0,20, le résultat $\Phi_N = 0,91$ peut être obtenu en s'aidant du Tableau 11.

Φ_S peut être déterminé au moyen du Tableau 12, en se fondant sur le c.v. attendu. Pour les valeurs par défaut du c.v., voir le Tableau 18.

Si la résistance caractéristique R_c est déterminée à partir d'essais typiques de la construction réelle de la ligne, alors $\Phi_Q = 1$. En revanche, si les essais sur les fondations ont été effectués dans un environnement contrôlé qui n'est pas typique de cette construction, il est conseillé de considérer que $\Phi_Q = 0,9$.

Φ_C peut être pris égal à 1,0, en particulier lorsque la résistance caractéristique correspond à une limite d'exclusion de 10 %. C'est généralement le cas lorsque R_c est déduit d'essais sur les fondations. Lorsque cette limite d'exclusion diffère fortement de cette valeur, il convient de se référer à l'Annexe A pour d'éventuelles corrections.

7.3.5 Critères de conception relatifs aux conducteurs et au câble de garde

Les conducteurs et les câbles de garde sont conçus pour résister aux charges résultantes les plus critiques par unité de longueur, appliquées à la portée équivalente correspondante.

Dans ce cas, $\Phi_N = \Phi_S = \Phi_Q = 1,0$ et la tension maximale du conducteur ne doit pas dépasser R_c tel que défini au Tableau 16.

Lorsque requis, les essais sur conducteurs doivent se conformer à la dernière édition de la CEI 61089.

7.3.6 Critères de conception relatifs aux chaînes d'isolateurs

Le calcul des chaînes d'isolateurs est lié aux conducteurs auxquels ils sont reliés. On procède alors de la même manière que pour la relation entre support et fondation. La charge critique de conception doit être déduite de la charge maximale calculée pour les conducteurs auxquels ces composants sont reliés.

Φ_N doit être déterminé selon le Tableau 11.

$\Phi_S = \Phi_{S2} = 0,90$ pour toutes les chaînes d'isolateurs pour lesquelles le c.v. demeure généralement inférieur à 7 % (voir Tableaux 12 et 17).

$\Phi_C = 1,0$ et $\Phi_Q = 1,0$ (sauf en présence de matériaux de qualité médiocre).

Outre les prescriptions mentionnées ci-dessus, il est recommandé de choisir, pour les isolateurs d'ancrage, des résistances caractéristiques au moins aussi élevées que la résistance caractéristique R_c des conducteurs qui y sont attachés et cela, en particulier dans les pays connaissant des charges de givre. Dans le même esprit, il est recommandé de concevoir les accessoires d'ancrage de manière à leur permettre de supporter, à la rupture, une charge supérieure d'environ 15 % à la résistance caractéristique R_c du conducteur. Lorsqu'ils sont requis les essais sur le matériel d'équipement doivent se conformer à la dernière édition de la CEI 61284.

The characteristic strength of foundations R_c , shall meet the following requirement:

$$R_c \geq \frac{\text{Foundation design loads}}{\Phi_N \Phi_S \Phi_Q \Phi_C}$$

Φ_N depends on the number of foundations subjected to maximum load intensity in a given storm event. For example, if $N = 2$, and $\text{COV} = 0,20$, $\Phi_N = 0,91$ can be obtained from Table 11.

Φ_S can be obtained from Table 12, based on the expected strength COV. For default COV values, refer to Table 18.

If characteristic strength R_c is derived from tests typical of actual line construction, then $\Phi_Q = 1$. However, if foundation tests were carried out in a controlled environment not typical of line construction, then it is suggested to consider $\Phi_Q = 0,9$.

Φ_C can be taken equal to 1,0, specially when the characteristic strength corresponds to a 10 % exclusion limit. This is usually the case when R_c is deducted from foundation tests. In case the exclusion limit varies greatly from 10 %, refer to Annex A for possible adjustments.

7.3.5 Conductor and ground wire design criteria

Conductors and ground wires are designed for the most critical resultant load(s) per unit length applied to the corresponding ruling span.

In this case, $\Phi_N = \Phi_S = \Phi_Q = 1,0$ and the maximum conductor tension shall not exceed R_c as defined in Table 16.

When required, conductor tests shall comply with the latest version of IEC 61089.

7.3.6 Insulator string design criteria

The calculation of the insulator strings is based on their relationship to the conductors to which they are attached. These are dealt with in the same way as for the support/foundation relationship. The critical design loading shall be derived from the maximum calculated conductor loading to which the components are attached.

Φ_N shall be derived in accordance with Table 11.

$\Phi_S = \Phi_{S2} = 0,90$ for all insulator strings, for which the COV generally remains under 7 % (see Tables 12 and 17).

$\Phi_C = 1,0$, and $\Phi_Q = 1,0$ (unless poor quality material).

In addition to the above requirements, it is advisable, particularly for countries subjected to ice loads, to select the characteristic strengths of dead-end insulators at least as high as the characteristic strength R_c of attached conductors. Similarly, it is advisable to design the dead-end fittings to withstand, at failure, about 15 % more than the conductor characteristic strength R_c . When required, tests for fittings shall comply with the latest edition of IEC 61284.

Annexe A (informative)

Informations techniques

A.1 Relations entre charge et résistance

A.1.1 Estimation de la fiabilité de la ligne

A.1.1.1 Combinaisons de probabilités

La fiabilité d'un système¹ est fonction de la fiabilité de ses composants. Lorsque ceux-ci sont disposés en série, la fiabilité annuelle du système (P_{ss}) est égale au produit des probabilités annuelles de survie de chacun des composants (P_{si}):

$$P_{ss} = P_{s1} P_{s2} \dots P_{sn} = \prod_{i=1}^n P_{si} \quad (\text{A.1})$$

Lorsque la défiabilité des composants est inférieure à 10^{-2} , ce qui est habituellement le cas sur les lignes de transports typiques, et que le composant le moins fiable présente une probabilité de défaillance ou un taux de défiabilité supérieur d'environ un ordre de grandeur à celui des autres composants, on peut considérer, par approximation, que la fiabilité du système est celle du composant le moins fiable.

Cette situation se rencontre naturellement dans de nombreuses lignes de transport. Ainsi, dans les zones non exposées au givre, la limitation de la tension mécanique des conducteurs destinée à pallier les problèmes de vibration peut limiter la tension maximale sous le vent à environ 50 % de la résistance à la traction des conducteurs. Cela augmente par conséquent dans des proportions très importantes la probabilité de survie des conducteurs par rapport aux supports. De ce fait, dans les zones exemptes de givre, les conducteurs convenablement installés et protégés contre les vibrations sont naturellement plus fiables que d'autres composants.

Du point de vue théorique, la fiabilité (probabilité de survie) d'une ligne de transport peut être estimée par la procédure suivante.

- Pour chaque type de charge d'origine climatique, on commence par établir la fonction de densité de probabilité de la charge f_Q . On ajuste cette fonction de façon à refléter l'intensité de charge maximale susceptible de survenir à l'intérieur de l'espace occupé par la ligne. Toutes les tendances directionnelles attestées, susceptibles d'affecter cette intensité de charge, peuvent également être pondérées dans la fonction de charge f_Q . Si ce n'est pas le cas, la charge est supposée agir dans la direction la plus critique.
- On détermine ensuite la fonction de densité de probabilité de la résistance f_R de la ligne considérée en tant que système. Cette fonction peut être complexe sauf lorsque la conception des lignes fait appel à la coordination de résistance (voir A.1.3.1). Dans ce cas, lorsque cette approche a été choisie, on peut déterminer approximativement la fonction f_R par la fonction de densité de résistance du composant le plus faible. Il convient de mentionner que la densité de la charge et la fonction de densité de la résistance doivent toutes deux renvoyer à la même action critique, par exemple la force de compression et la résistance au flambement de la barre la plus fortement sollicitée.

¹ Des informations additionnelles sur cette annexe ainsi que celles qui suivent, relatives à la conception des lignes aériennes sur une base de fiabilité, se trouvent dans les publications et brochures thématiques suivantes de la CIGRÉ: Brochures 109 et 179 et publications dans *Electra* 1991-137 et 2000-189.

Annex A (informative)

Technical information

A.1 Relations between load and strength

A.1.1 Estimate of line reliability

A.1.1.1 Combinations of probabilities

The reliability of a system¹ is a function of the reliability of its components. When these components are in series, the yearly reliability of the system (P_{ss}) is equal to the product of the yearly probabilities of survival of the individual components (P_{si}):

$$P_{ss} = P_{s1} P_{s2} \dots P_{sn} = \prod_{i=1}^n P_{si} \quad (\text{A.1})$$

In cases where the unreliability of components is smaller than 10^{-2} , which is usually the case with typical transmission lines, and where the least reliable component has a failure probability or a rate of unreliability which is approximately one order of magnitude higher than that of other components, the reliability of the system can be approximated by that of the least reliable component.

This situation occurs naturally in many transmission lines. For example, in non-icing areas, conductor tension limitations of every day stress to obviate vibration problems may limit the maximum tension under wind to about 50 % of the tensile strength of the conductors. This in turn increases very substantially the probability of survival of conductors as compared to supports. Consequently, conductors in non-icing areas properly installed and protected from vibration damage are naturally more reliable than other components.

On a theoretical basis, the reliability (probability of survival) of a transmission line can be estimated using the following procedure.

- For each type of climatically produced load, the probability density function of load f_Q , is first established. This function is adjusted to reflect the maximum loading intensity that might occur within the space covered by the line. Any proven directional tendencies which might affect load intensity may also be weighted in the load function f_Q , otherwise the load is assumed to act in the most critical direction.
- Then the probability density function of strength, f_R , of the line as a system is established. The function can be complex except when lines are designed with a strength coordination approach (see A.1.3.1). In this case, function f_R can be approximated by the strength density function of the weakest component. It should be mentioned that both the load density and the strength density function must refer to the same critical action, e.g. the compression force of the highest strained member and its buckling strength. Practically

¹ Additional information and background data on this annex as well as on the following annexes related to reliability based design of overhead lines can be found in the following CIGRÉ publications and brochures: Brochures 109 and 179, *Electra* papers 1991-137 and 2000-189.

En termes pratiques, cela revient à exprimer la charge et la résistance au moyen des mêmes unités: forces (kN) ou contraintes (N/mm²). Si les charges climatiques sont exprimées en termes de vitesse du vent, le terme des équations relatif à la charge peut être exprimé sous la forme des «effets de la vitesse du vent».

Pour mieux se rapprocher des conditions pratiques, il est préférable d'utiliser la fonction de répartition de la résistance F_R , plutôt que la fonction de densité f_R . Cette fonction cumulative F_R est donnée par l'équation:

$$F_R(x) = \int_0^x f_R(\xi) d\xi \quad (\text{A.2})$$

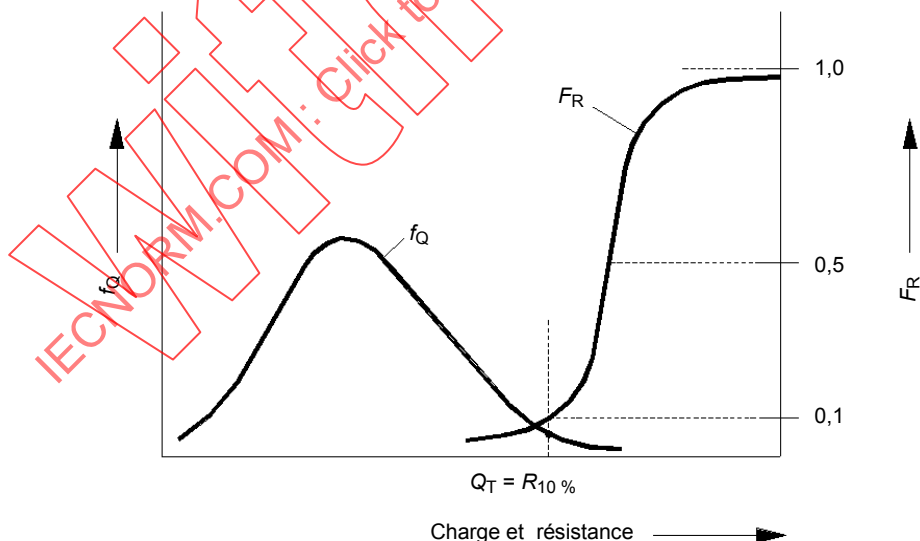
- L'étape suivante consiste à définir la position relative des deux courbes f_Q et F_R .
On peut, par exemple, déterminer cette position relative par une relation traduisant l'équivalence entre une charge dont la probabilité annuelle de retour est de $1/T$ et une résistance ayant une limite d'exclusion de 10 % ou, de manière analytique:

$$Q_T = (10 \%) R \quad (\text{A.3})$$

Le choix de la période de retour T de la charge Q_T dépend du degré de fiabilité désiré.

On peut démontrer que l'équation (A.3) conduit à une fiabilité presque constante entre $(1-1/T)$ et $(1-1/2T)$, quels que soient l'allure des courbes de charge et de résistance ou le coefficient de variation de chacune de ces variables (voir A.1.2.3).

La Figure A.1 représente les positions relatives de la densité de probabilité de la charge et de la fonction de répartition de la résistance. Les positions des deux fonctions sont choisies de façon à être conforme à l'équation (A.3). Les fonctions f_Q et F_R sont disposées de manière que la charge Q_T , assortie d'une période de retour T donnée, soit égale à la résistance, compte tenu d'une limite d'exclusion de 10 % ($F_R = 0,1$).



IEC 2180/03

Légende

f_Q fonction de densité de probabilité des charges maximales annuelles

F_R fonction cumulative de répartition de la résistance

Q_T charge dont la période de retour a été fixée à T , par exemple 50 ans

Figure A.1 – Relations entre charge et résistance

speaking this corresponds to having both load and strength expressed in the same units: such as forces (kN) or stresses (N/mm²). If climatic loads are expressed in terms of wind speed, the load side of the equations can be expressed as “effects of wind speed”.

For a better practical evidence, it is preferable to use the cumulative distribution function of strength, F_R , instead of the density function f_R . The cumulative function F_R is given by the equation

$$F_R(x) = \int_0^x f_R(\xi) d\xi \quad (\text{A.2})$$

- In the next step the relative position of the two curves f_Q and F_R has to be defined.

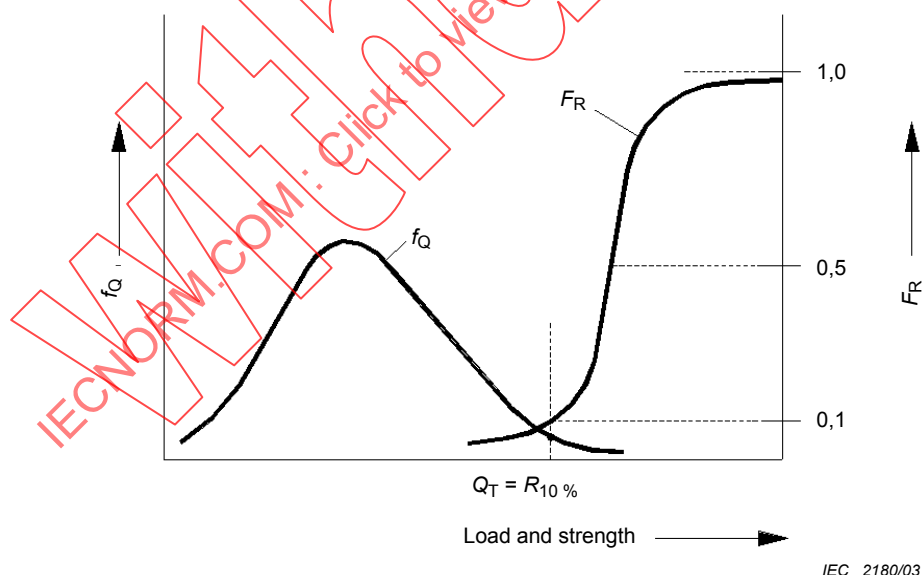
This relative position can be found through a relation such as: a load with a yearly probability of occurrence $1/T$ is set equal to the strength with a 10 % exclusion limit, or analytically:

$$Q_T = (10\%) R \quad (\text{A.3})$$

The choice of the return period T of load Q_T depends on the desired degree of reliability.

It can be demonstrated that equation (A.3) leads to an almost constant reliability between $(1-1/T)$ and $(1-1/2T)$, independent of the shape of the load and strength curves and the coefficients of variation of each variable (see A.1.2.3).

Figure A.1 depicts relative positions of load density and cumulative strength. The positions of the two functions are chosen to comply with equation (A.3). The functions f_Q and F_R are arranged such that the load Q_T having a selected return period T is equal to the strength with an exclusion limit of 10 % ($F_R = 0,1$).



Key

f_Q probability density function of yearly maximum loads

F_R cumulative distribution function of strength

Q_T load having a selected return period T , e.g. 50 years

Figure A.1 – Relations between load and strength

En pratique, la fiabilité résultant de la relation exprimée dans l'équation (A.3) peut être considérée comme une valeur minimale et l'on peut affiner les calculs par l'introduction de facteurs de correction se rapportant aux points suivants:

- **facteurs d'utilisation des composants:** le fait que l'on n'utilise pas tous les composants à leur capacité maximale de conception (portée-vent, portée-poids, hauteur du support, angle en ligne) contribue à accroître la fiabilité;
- **résistance caractéristique:** sur les lignes réelles, la résistance caractéristique de la plupart des composants correspond à une limite d'exclusion inférieure à 10 %. Si l'on adopte, à la conception, l'hypothèse d'une valeur de 10 %, la fiabilité en résultant sera donc plus grande;
- **coordination de résistance:** le choix d'une coordination de résistance se traduit par une augmentation de la résistance ou de la tenue de certains composants;
- **nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale:** en cas de tempête ou de fort givrage, toutes les structures ne sont pas soumises aux charges maximales, étant donné que les événements sont limités dans l'espace;
- **contrôle de qualité pendant la fabrication et l'édification:** ces dispositions permettent d'éliminer les matériaux de qualité médiocre. L'utilisation de tout composant dont la résistance est inférieure à un seuil donné sera interdite;
- **direction du vent:** en cas de charges de vent, on suppose que le vent à sa vitesse maximale agit dans la direction la plus défavorable. Cependant, les vents maximaux sont distribués en fonction des secteurs angulaires. Des calculs approchés effectués par le groupe de travail CIGRÉ CE 22.06 ont montré que le recours à des hypothèses plus réalistes pouvait réduire la probabilité de défaillance d'un ordre de grandeur.

Les facteurs énoncés ci-dessus contribuent certes généralement à l'obtention d'une fiabilité réelle supérieure aux valeurs théoriques. Cependant, d'autres facteurs pourraient tout aussi bien aboutir aux effets inverses, c'est-à-dire à une réduction de la fiabilité. Le vieillissement de certains composants de lignes et la fatigue engendrée par la répétition d'un grand nombre de cycles de charge ont ainsi une incidence négative sur la fiabilité.

Il est à noter que la probabilité de ruine décrite ci-dessus n'est qu'une des composantes de l'indisponibilité totale de la ligne telle que décrite en 3.1.22.

A.1.1.2 Charges

On peut séparer les charges sur les lignes de transport en trois catégories: charges extérieures, charges de poids propre et charges spéciales.

- **Charges extérieures:** Les charges extérieures sont des charges à caractère aléatoire dues à la présence de vent et de givre, considérés séparément ou ensemble. On peut modéliser leur survenance et leur amplitude au moyen de fonctions statistiques appropriées.

Lorsqu'on dispose de statistiques sur les valeurs maximales annuelles de givre ou de vent, il est communément admis que ces variables climatiques suivent une fonction de distribution des extrêmes telle que la distribution de Gumbel, type I décrite à l'Article C.4. Certaines études récentes suggèrent aussi des distributions avec seuil ou normalisées de Pareto dans certains cas où les accrétions de glace ou de neige ne surviennent pas chaque année. La fonction de distribution de Gumbel type I peut être définie au moyen de deux paramètres: valeur moyenne et écart type de la variable envisagée. Cependant, cette valeur moyenne et cet écart type doivent être déterminés par l'évaluation de mesures effectuées sur un certain nombre d'années. En outre, le nombre des années comportant des observations affecte la distribution, en particulier en ce qui concerne la prédiction d'événements dont la période de retour T est longue.

In practice, the reliability resulting from the relationship expressed in Equation (A.3), can be considered as a minimum value and calculations can be further refined through the introduction of correction factors related to the following items:

- **use factors of components:** the fact that all components are not used at their maximum design parameter (wind span, weight span, height of support, line angle) contributes to an increase of the reliability;
- **characteristic strength:** in actual lines, the characteristic strength of most components corresponds to an exclusion limit less than 10 %. If it is assumed to be equal to 10 % in case of design, then the resulting reliability of the line will be higher;
- **strength coordination:** a selected strength coordination results in an increase of strength or withstand resistance of some components;
- **number of components subjected to maximum loading intensity:** whenever a storm or severe icing occurs, not all structures will be subjected to maximum loads, since the storm is limited in spatial extension;
- **quality control during fabrication and construction:** by these measures low quality material will be eliminated. No components with strengths below a certain limit will be used;
- **wind direction:** in case of wind loads it is assumed that maximum wind velocities also act in the most unfavourable direction. However, maximum winds are distributed in angle sectors. Approximate calculations carried out by the CIGRE Working Group SC 22.06 showed that more realistic assumptions could reduce the probability of failure by one order of magnitude.

While the above-mentioned factors contribute to the actual reliability usually being higher than the theoretical values, other factors could lead to opposite effects, i.e. a reduction in reliability. The ageing of some line components and the fatigue by a large number of loading cycles will have a negative effect on reliability.

It is noted that the above probability of failure is only one of the components of the total line unavailability as described in 3.1.22.

A.1.1.2 Loadings

Loadings on transmission lines can be separated into three groups: external loads, dead loads and special loads.

- **External loads:** External loads are random loads due to wind and ice, taken separately or combined together. Occurrence and magnitude of external loads can be modelled by appropriate statistical functions.

When statistics of annual maximum values of ice or wind are available, it is commonly accepted that these climatic variables follow an extreme distribution function such as Gumbel type I distribution as described in Clause C.4. For particular cases where ice or snow accretions are not observed each year, some recent studies also suggest that threshold methods and a generalized Pareto distribution may be used. The Gumbel type I distribution function can be defined using two parameters: the mean value and the standard deviation of the applicable variable. However, mean value and standard deviation have to be acquired by evaluation of measurements carried out over a certain period of years. The number of years with observations affects the distribution as well, in particular regarding prediction of events having a long return period T .

- **Charges de poids propre:** Les charges de poids propre sont des charges dues au poids propre des supports, des conducteurs et des chaînes d'isolateurs. Bien que de nature permanente, ces charges statiques varient d'un support à l'autre en raison des différences de hauteur de ces supports et des portées-poids des conducteurs.

Il est recommandé que la fiabilité des lignes exposées aux seules charges de poids propre soit pratiquement égale à 100 %. Elle découle des prescriptions de sécurité structurale, qui exigent de dimensionner les supports de façon à leur permettre de résister à deux fois la charge statique verticale due aux conducteurs et aux chaînes d'isolateurs. Ces prescriptions prennent ainsi en compte l'augmentation des charges verticales survenant au cours de la construction et de l'entretien, pendant les travaux sur des conducteurs tels que le déroulage, le levage ou l'abaissement des conducteurs.

Le poids mort des conducteurs repris par les supports est le produit du poids nu par unité de longueur, lequel est constant, et de la portée-poids. La portée poids peut varier en fonction de l'espacement et de la dénivellation entre les supports, ainsi que de la tension mécanique des conducteurs qui fluctue suivant la température. Dans tous les cas, la portée-poids d'un type de support donné a une valeur nominale maximale qui est celle prise en compte pour la conception des supports. Il existe également une valeur minimale pour les considérations de soulèvement des chaînes de suspension et d'arrachement des fondations.

Il est rare que tous les supports d'une ligne de transport soient utilisés aux valeurs maximales de leurs portées vent et poids de conception. Négliger cette différence de portées contribue à augmenter la fiabilité. Pour l'évaluation, on définit le rapport de la portée réelle à la portée maximale comme étant le facteur d'utilisation de portée U (voir l'Article B.4).

La variable U a été modélisée de manière à permettre d'inclure son influence dans les calculs de fiabilité, moyennant l'ajout de facteurs de correction appropriés γ_u , appliqués aux charges exercées sur les supports.

Il arrive parfois que la conception des supports intervienne avant que l'on connaisse la distribution des portées, ou que ces supports soient susceptibles d'être utilisés lors de projets ultérieurs. Lorsque les données sur les facteurs d'utilisation ne sont ni disponibles ni prévisibles, l'influence de U peut être négligée et γ_u considéré comme égal à 1,0. On obtient ainsi des structures d'une plus grande fiabilité. Lorsqu'en revanche, des données sur le facteur d'utilisation de la portée sont disponibles ou prévisibles, on peut utiliser la méthodologie décrite à l'Article B.4 pour réduire l'investissement lié à certaines lignes.

- **Charges spéciales:** Les charges spéciales sont des charges extérieures pouvant se manifester pendant la construction et l'entretien de la ligne, ainsi que des charges longitudinales et verticales prévues à des fins de sécurité structurale, pour éviter des défaillances en cascade. Si les charges extérieures sont supérieures aux charges limites sur l'ensemble du tracé ou sur un tronçon important de la ligne, la prise en compte des charges spéciales ne permettra pas d'éviter des défaillances en cascade sur les sections considérées.

Les charges de construction et d'entretien sont traitées de manière déterministe et considérées comme constantes. Elles sont établies de façon à ne pas risquer d'être dépassées pendant des travaux de construction et d'entretien normaux. Si l'ampleur des charges spéciales est telle qu'elles sont plus critiques que celles spécifiées aux paragraphes « **charges extérieures** » et « **charges de poids propre** », la fiabilité globale de la ligne s'en trouve modifiée.

- **Dead loads:** Dead loads are loads due to the dead weight of support, conductors and insulator strings. Although they are permanent in nature, dead loads vary from one support to another due to variation of support height and weight span of conductors.

Reliability of lines subjected only to dead loads should be practically 100 %. This reliability is provided by the safety requirements where it is specified that support should be designed for twice the vertical dead load of conductors with insulator strings. These requirements cover the increase in vertical loads during construction and maintenance that occurs during operations on conductors such as stringing, lifting or lowering.

The dead weight of conductors maintained by supports is the product of bare weight per unit length, which is constant, and the weight span which may vary according to the support spacing, and difference of elevation, and conductor tension, which varies with conductor temperature. In all cases, the weight span of a given support type has a maximum assigned value which is the one considered for the design of supports. There is also a minimum value for uplift considerations of suspension insulator strings and uplift of foundations.

Since all supports of a transmission line are usually not used at their maximum design spans for weight and wind loads, this variation of spans, if neglected, contributes to an increase in reliability. For evaluation purposes the ratio of actual span to maximum span is defined as being the span use factor U (see Clause B.4).

Variable U was modelled so that its influence in reliability calculations through appropriate correction factors γ_u , can be applied to support loads.

Sometimes, supports are designed prior to knowing the span distribution or in other cases the same supports could be used in future projects. In cases where data on use factors are not available or cannot be predicted, the influence of U can be neglected and γ_u is considered equal to 1,0. This will result in more reliable structures. In other cases where data on span use factor are available or can be predicted, the methodology appearing in Clause B.4 can be used in order to achieve some line investment reductions.

- **Special loads:** Special loads consist of external loads that might occur during line construction and maintenance as well as longitudinal and vertical loads provided as a security measure for the prevention of cascading failures. If the external loads exceeded the limit loads along the total line, or a long section of the line, then the provision of special loads would not prevent cascades to occur in these sections.

Construction and maintenance loads are treated in a deterministic manner and are considered constant. They are established in such a way that their magnitude is not likely to be exceeded under normal construction and maintenance operations. If the magnitude of special loads is such that they are more critical than loadings described in 'external loads' and 'dead loads', overall reliability of the line will be altered.

A.1.1.3 Résistance

- **Fonctions de distribution de la résistance des composants:** La résistance mécanique des composants de lignes conçus pour être utilisés dans les mêmes conditions et construits en conséquence n'est pas constante comme le montrent les essais de conception, de routine et de réception. Cette résistance doit donc faire l'objet d'un traitement statistique. La description statistique peut utiliser une distribution normale ou log-normale. La distribution normale (de Gauss) convient à la plupart des matériaux ductiles, alors que la distribution log-normale s'applique davantage aux matériaux fragiles. La fonction de distribution des composants peut être modifiée par la réalisation d'un contrôle de qualité rigoureux. Elle tend alors à devenir une fonction log-normale. En l'absence de données pertinentes en contradiction, on peut considérer que la distribution normale convient à la plupart des composants de ligne, dès lors qu'il s'agit de déterminer la fiabilité globale d'une ligne ou de concevoir des lignes conformément à la méthodologie proposée.

- **Composants ou éléments en série:** Lorsqu'un composant est constitué d'une série d'éléments, la fonction de distribution de sa résistance tend à être une fonction de loi des valeurs extrêmes (minima). En présence d'un nombre croissant d'éléments en série, la moyenne et l'écart type de résistance de la série sont tous deux diminués et la fonction de distribution en résultant peut être représentée de manière approchée par une distribution extrême.

Les paramètres statistiques de résistance d'une série de N composants ou éléments peuvent être déduits des méthodes statistiques disponibles. Le paragraphe A.1.3.5 comporte une description de ces méthodes, ainsi qu'un calcul du facteur de correction Φ_N dû au nombre de composants ou d'éléments soumis à l'intensité de charge maximale.

- **Résistance caractéristique R_c :** Cette résistance est aussi appelée valeur garantie ou c'est simplement la valeur spécifiée dans les normes pertinentes. L'établissement de la résistance caractéristique amène à envisager deux éventualités:
 - les composants ou éléments destinés à une ligne donnée font l'objet d'essais spécifiques de résistance,
 - de tels essais ne sont pas réalisés.

- **Absence d'essais:** Dans les normes nationales, la spécification de la plupart des composants se fonde sur une résistance nominale, minimale ou garantie. C'est également le cas des supports conçus au moyen d'une méthode de calcul éprouvée reposant sur les caractéristiques mécaniques minimales des éléments.

La résistance d'un composant est généralement fixée de manière que les prescriptions minimales soient satisfaites par la majorité des composants. Des études récentes, ainsi que l'analyse d'un grand nombre de résultats d'essais, indiquent que la probabilité que des composants de ligne ne satisfassent pas à la résistance spécifiée (c'est-à-dire la limite d'exclusion) se situe généralement entre 1 % et 10 %. La limite d'exclusion e varie donc à l'intérieur de ces limites.

Par conséquent, dès lors que la résistance spécifiée d'un composant, compte non tenu de sa limite d'exclusion e , est prise comme résistance caractéristique, l'hypothèse de $e = 10 \%$ pour la résistance caractéristique de ce composant conduit à une fiabilité plus grande de la ligne, ou simplement à des résultats prudents.

- **Avec essais:** Lorsqu'on réalise des essais pour déterminer la résistance d'un composant, ainsi que sa distribution statistique, il est possible d'obtenir la résistance caractéristique à partir des résultats des essais après avoir calculé la valeur moyenne $\bar{R}$ et le coefficient de variation $v_R = \sigma_R / \bar{R}$, où σ_R correspond à l'écart type.

La résistance R en fonction d'une limite d'exclusion e (%) peut être obtenue à partir de la distribution statistique. Pour la distribution de Gauss (voir C.2.1), la relation est la suivante:

$$R_{e \%} = \bar{R}(1 - u_e v_R) \quad (\text{A.4})$$

A.1.1.3 Strength

- **Distribution functions of strength of components:** The strength of line components designed for the same conditions and manufactured accordingly is not constant, as can be observed during routine, sample and type testing. Therefore, the strength has to be treated statistically. The strength of line components can be statistically described either by a normal or a log-normal distribution. The normal (Gaussian) distribution is appropriate for most ductile materials, while the log-normal distribution applies more to brittle materials. With stringent quality control, the distribution function of components may be altered and tends to be a log-normal function. Unless otherwise substantiated by relevant data, the normal distribution can be assumed adequate for most line components so far as the determination of the overall line reliability or designing lines in accordance with the proposed methodology are concerned.
- **Components or elements in series:** When a component is made up of a series of elements, its strength distribution function tends to be an extreme function (minima). With an increasing number of elements in series, both the mean and the standard deviation of the strength of the series are reduced and the resulting distribution function can be approximated by an extreme distribution.

The statistical parameters of the strength of a series of N components or elements can be derived using available statistical methods. A description of these methods and a derivation of the correction factor ϕ_N due to the number of components or elements subjected to maximum load intensity are given in A.1.3.5.

- **Characteristic strength R_c :** This strength is also called guaranteed value or is simply the value specified in relevant standards. In order to establish the characteristic strength, two cases are considered:
 - specific strength tests are performed on the components or elements to be used in a certain line;
 - no such tests are performed.
- **Without tests:** Most components are specified in national standards based on nominal, minimum or guaranteed strength. This is also the case for supports designed with a proven method of calculation based on the minimum mechanical characteristics of the elements.

The strength of a component is usually set so that these minimum requirements are met by the majority of the components. Recent studies, as well as the analysis of a large number of test results, indicate that the probability of line components not meeting the specified strength (i.e. the exclusion limit) is usually between 1 % and 10 %, therefore the exclusion limit e varies within these limits.

Consequently, whenever the specified strength of a component, without reference to its exclusion limit e , is taken as the characteristic strength, the assumption of $e = 10\%$ for the characteristic strength of this component leads to higher reliability of the line, or simply to conservative results.

- **With tests:** Whenever tests are performed to determine the strength of a component and its statistical distribution, the characteristic strength can be obtained from the test results after having calculated the mean value $\bar{R}$ and the coefficient of variation $v_R = \sigma_R / \bar{R}$, where σ_R is the standard deviation..

The strength R according to an exclusion limit e (%) can be obtained from the statistical distribution. For the Gaussian distribution (see C.2.1) the relation is:

$$R_e \% = \bar{R}(1 - u_e v_R) \quad (\text{A.4})$$

Le facteur u_e est la variable de la distribution de Gauss $F_R(u)$ correspondant à la limite d'exclusion e . C'est le nombre d'écarts types de la variable R en deçà de la valeur moyenne R .

$$F_R(u_e) = e (\%) / 100 \quad (\text{A.5})$$

Résultats:

Pour	$e = 2 \%$,	$u_e = 2,054$
	$e = 5 \%$,	$u_e = 1,645$
	$e = 10 \%$,	$u_e = 1,282$

Une probabilité de 10 % de n'être pas atteint correspond donc à une valeur de 1,28 écart type sous la moyenne:

$$\text{si} \quad R_c = (10 \%) R, \quad (\text{A.6})$$

$$\text{alors} \quad R_c = \bar{R} (1 - 1,28 \nu_R) \quad (\text{A.7})$$

La valeur 1,28 suppose l'existence d'une distribution normale et d'un nombre infini d'échantillons. En pratique, elle peut être utilisée si $N > 10$. En présence d'un nombre d'échantillons inférieur, d'autres valeurs peuvent être utilisées pour tenir compte de l'incertitude statistique, conformément aux techniques statistiques admises.

A.1.2 Calcul de la fiabilité

A.1.2.1 Généralités

La charge Q et la résistance R des composants de lignes de transport sont des variables aléatoires, ayant chacune sa fonction de distribution spécifique. Des études techniques (Article B.2) ont permis d'établir que les variables de givre et de vent peuvent être représentées par une fonction extrême de type I (distribution de Gumbel), tandis que les résistances des composants de lignes de transport suivent généralement des fonctions normales ou normales logarithmiques.

Lorsqu'on connaît les paramètres statistiques de charge et de résistance, il est possible de calculer, ou d'estimer, la probabilité de survie ou fiabilité annuelle, P_s au moyen de modèles analytiques ou par approximation. Dans les relations suivantes, F_Q et F_R sont définies comme étant les fonctions cumulatives de distribution de Q et de R alors que f_R et f_Q représentent la fonction de densité de probabilité de ces mêmes variables, par exemple la charge exercée sur une barre au niveau d'un pied de support et la résistance de cet élément.

La fiabilité annuelle est égale à:

$$P_s = P(R - Q > 0) = \int_0^\infty f_Q(x) F_R(x) dx \quad (\text{A.8})$$

On peut aisément obtenir la valeur de P_s par voie logicielle si l'on connaît les courbes de f_Q et de F_R . Si l'on connaît seulement la valeur moyenne et l'écart type des variables R et Q , on peut déterminer P_s en se fondant sur l'équation (A.8) ainsi qu'en supposant une distribution de Gumbel pour les charges, et une loi de Gauss pour les résistances. Cependant, on peut aussi procéder à l'estimation de P_s , plus couramment appelée analyse du premier ordre, dans chacun de ces cas, en appliquant l'une ou l'autre des méthodes suivantes, F_N représentant la fonction de répartition normale:

$$P_s = F_N(+\beta) \quad (\text{A.9})$$

The factor u_e is the variable of the Gaussian distribution $F_R(u)$ that corresponds to the exclusion limit e . It is the number of standard deviation of the variable R below the mean value R .

$$F_R(u_e) = e (\%) / 100 \quad (\text{A.5})$$

Result

For	$e = 2 \%$,	$u_e = 2,054$
	$e = 5 \%$,	$u_e = 1,645$
	$e = 10 \%$,	$u_e = 1,282$

Therefore, a 10 % probability of being not achieved corresponds to a value of 1,28 standard deviations below the mean value:

$$\text{if} \quad R_c = (10 \%) R, \quad (\text{A.6})$$

$$\text{then} \quad R_c = \bar{R} (1 - 1,28 v_R) \quad (\text{A.7})$$

The value of 1,28 assumes a normal distribution and an infinite number of samples. In practice, it may be used if $N > 10$. For a reduced number of samples, other values could be used to account for statistical uncertainty, as indicated by accepted statistical techniques.

A.1.2 Calculation of reliability

A.1.2.1 General

Load Q and strength R of transmission line components are random variables having each their specific distribution functions. Through technical studies (Clause B.2), it has been recognized that ice and wind variables may be represented by an extreme type I function (Gumbel distribution) while strengths of transmission line components generally follow normal or log-normal functions.

When statistical parameters of load and strength are known, it is possible to calculate or estimate the yearly reliability or probability of survival, P_s , through analytical models or approximate methods. In the following relations, F_Q and F_R are defined as the cumulative distribution functions (CDF) of Q and R while f_Q and f_R are the probability density functions (PDF) of the same variables, e.g. the load of a support leg member and its strength.

The yearly reliability is:

$$P_s = P(R - Q > 0) = \int_0^{\infty} f_Q(x) F_R(x) dx \quad (\text{A.8})$$

The value of P_s can be easily obtained by computer programs if f_Q and F_R curves are known. When only the mean and standard deviation of R and Q variables are known, P_s can be obtained from Equation (A.8) as well by assuming the Gumbel distribution for the loads and the Gaussian law for the strengths. However, an estimate of P_s , this is usually called first order analysis, can be obtained in each case through either of the following methods, with F_N being the normal cumulative distribution function:

$$P_s = F_N(+\beta) \quad (\text{A.9})$$

où

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (\text{A.10})$$

ou bien

$$\beta = \frac{\ln(\bar{R}/\bar{Q})}{\sqrt{v_R^2 + v_Q^2}} \quad (\text{A.11})$$

Si la charge Q correspond à une distribution de Gumbel et la résistance R à une fonction normale (de Gauss), alors:

- le format $(R - Q)$ de l'équation (A.10) donne de bons résultats quelle que soit la valeur de v_Q et lorsque $v_R > 0,15$, et
- le format logarithmique (R/Q) de l'équation (A.11) est admissible lorsque $v_Q = 0,2$ et $v_R \leq 0,15$.

Cependant, lorsque la ou les valeurs moyennes et le ou les écarts types de Q et R sont connus, il est aussi admissible de supposer, respectivement, une fonction de Gumbel et une distribution de Gauss, et de continuer sur la voie de ces hypothèses pour calculer la probabilité de survie P_s au moyen de l'équation (A.8).

Outre ces méthodes, une autre technique s'est révélée donner des résultats très proches de ceux obtenus par la théorie. Elle consiste à représenter la courbe de charge f_Q et la courbe de résistance f_R au moyen de distributions normales en choisissant les paramètres $\bar{Q}$, σ_Q et $\bar{R}$, σ_R de manière à faire correspondre la queue supérieure de la courbe de charge Q et la queue inférieure de la courbe de résistance R aux distributions données. On peut ensuite utiliser les équations (A.10) et (A.11) en prenant les paramètres des distributions ajustées pour déterminer la fiabilité annuelle.

Le format d'ajustement de la queue inférieure des courbes est admissible quelle que soit la valeur type de v_Q et v_R .

A.1.2.2 Combinaisons charge/résistance

La fiabilité dépend des paramètres de charge Q et de résistance R . On considère quatre cas pour illustrer les combinaisons éventuelles, chaque cas correspondant à une hypothèse:

- Cas 1: la charge Q et la résistance R ont des valeurs constantes (Figure A.2a).
- Cas 2: la charge Q est constante et la résistance R est une variable à distribution statistique (Figure A.2b).
- Cas 3: la charge Q est une variable à distribution statistique et la résistance R est constante (Figure A.2c).
- Cas 4: la charge Q et la résistance R sont des variables à distribution statistique (Figure A.2d). C'est de toute évidence le cas le plus général et le plus représentatif des lignes de transport.

where

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (\text{A.10})$$

or

$$\beta = \frac{\ln(\bar{R} / \bar{Q})}{\sqrt{v_R^2 + v_Q^2}} \quad (\text{A.11})$$

If the load Q follows a Gumbel distribution and the strength R a Gaussian function then

- the format $(R - Q)$ of Equation (A.10) gives good results for all values of v_Q and when $v_R > 0,15$ and
- the format log-normal (R/Q) of Equation (A.11) is acceptable when $v_Q = 0,2$ and $v_R \leq 0,15$.

However, when the mean value(s) and standard deviation(s) of Q and R are known, it is also acceptable to assume a Gumbel function and a Gaussian distribution, respectively, and proceed with these assumptions to calculate the probability of survival P_s using Equation (A.8).

In addition to the above methods, another technique has been found to give results very close to the theoretical ones: it consists of representing the load curve f_Q and the strength curve f_R by normal distributions by choosing the parameters $\bar{Q}$, σ_Q and $\bar{R}$, σ_R such that the upper tail of the load curve f_Q and the lower tail of strength curve f_R match well the given distributions. Then Equations (A.10) and (A.11) can be used with the parameters of the adjusted distributions to determine the yearly reliability.

This tail adjustment format is acceptable for all typical values of v_Q and v_R .

A.1.2.2 Combinations of load and strength

Reliability depends on the parameters of load Q and strength R . For possible combinations, four cases are considered, each one corresponding to different assumptions:

- Case 1: load Q and strength R have constant values (Figure A.2a).
- Case 2: load Q is constant and strength R is a statistically distributed variable (Figure A.2b).
- Case 3: load Q is a statistically distributed variable and strength R is constant (Figure A.2c).
- Case 4: load Q and strength R are statistically distributed variables (Figure A.2d). This is obviously the most general case and typical of transmission lines.

Tableau A.1 – Fiabilité annuelle correspondant à différentes hypothèses de charge et de résistance

Cas	Charge Q			Résistance R			Fiabilité P_s
	Valeur moyenne	c.v.	Charge de conception	Valeur moyenne	c.v.	Résistance de conception	
1	Q	0	Q	R	0	$R > Q$	1,0
2	Q	0	Q	$\bar{R}$	v_R	$\bar{R}(1 - u_e v_R)$	$1 - \int_{-\infty}^{R_c} f_R dL =$ $1 - F_R(u_e) = 0,90$ (pour $u_e = 1,28$)
3	$\bar{Q}$	v_Q	Q_T	R	0	R	$1 - \int_{Q_T}^{+\infty} f_Q dL = 1 - 1/T$
4	$\bar{Q}$	v_Q	Q_T	$\bar{R}$	v_R	$\bar{R}(1 - u_e v_R)$	$1 - \int_{Q_T}^{+\infty} f_Q F_R dL \approx 1 - 1/2T$

- Cas 1: Sachant que la charge Q et la résistance R sont constantes, et que la résistance R est supérieure à la charge Q , la fiabilité est de un, ou de 100 %.
- Cas 2: Sachant que la charge Q est constante et que la résistance de conception R_e %, qui obéit à la limite d'exclusion e , est égale à la charge constante Q , la fiabilité annuelle P_s est égale à $F_R(u_e)$ et vaut 0,90 si la limite d'exclusion relative à la résistance est de 10 %. P_s correspond à la probabilité que la charge Q soit inférieure à la résistance R .
- Cas 3: Sachant que la résistance R est constante et égale à la charge Q_T , la fiabilité annuelle dépend uniquement de la période de retour T (Figures A.3 à A.5). La fiabilité est alors de $(1 - 1/T)$.
- Cas 4: Sachant que la charge Q et la résistance R sont des variables à distribution statistique et qu'on peut établir entre elles une équivalence au moyen de la relation $\bar{R}(1 - u_e v_R) = Q_T$, la fiabilité annuelle dépend des paramètres des termes exprimant, respectivement, la charge et la résistance. Lorsque le c.v. est compris entre 0,20 et 0,50 côté charge et entre 0,05 et 0,20 côté résistance, la fiabilité dépend de ces données. Comme le montrent les Figures A.3 à A.5, on peut obtenir une valeur approchée de cette fiabilité au moyen de la formule $1 - 1/2T$ pour un c.v. de la résistance de 0,10 appliqué aux supports de lignes aériennes.

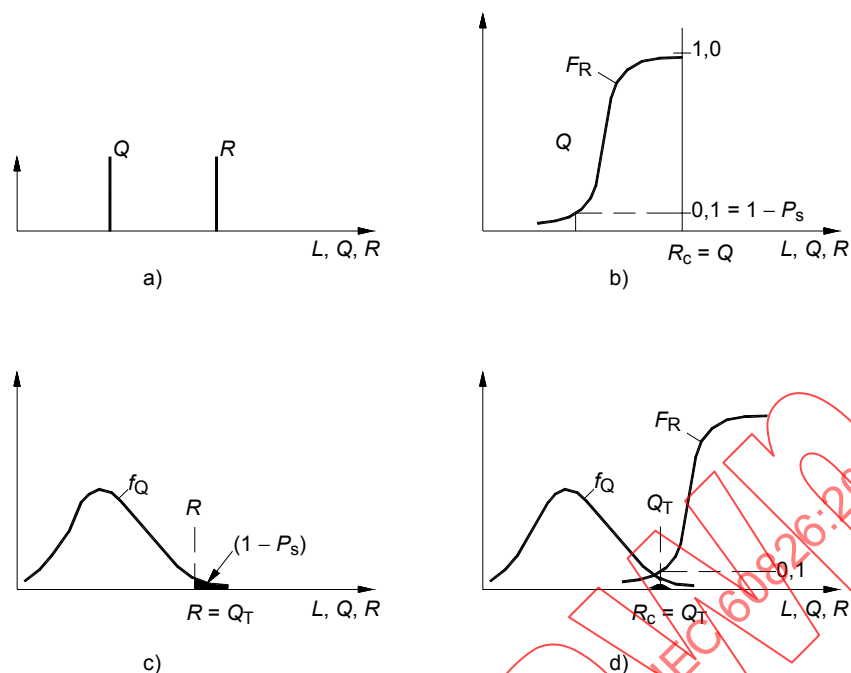
Les fiabilités annuelles indiquées au Tableau A.1 sont valables lorsque la conception intègre une limite d'exclusion de 10 %.

Table A.1 – Yearly reliability corresponding to various assumptions of load and strength

Case	Load Q			Strength R			Reliability P_s
	Mean value	COV	Design load	Mean value	COV	Design strength	
1	Q	0	Q	R	0	$R > Q$	1,0
2	Q	0	Q	$\bar{R}$	v_R	$\bar{R}(1-u_e v_R)$	$1 - \int_{-\infty}^{R_c} f_R dL =$ $1 - F_R(u_e) = 0,90$ (for $u_e = 1,28$)
3	$\bar{Q}$	v_Q	Q_T	R	0	R	$1 - \int_{Q_T}^{+\infty} f_Q dL = 1 - 1/T$
4	$\bar{Q}$	v_Q	Q_T	$\bar{R}$	v_R	$\bar{R}(1-u_e v_R)$	$1 - \int_{-\infty}^{+\infty} f_Q F_R dL \approx 1 - 1/2T$

- Case 1: Since load Q and strength R are constant and strength R is greater than load Q the reliability is one or 100 %.
- Case 2: Since load Q is constant the design strength R_e % according to the exclusion limit e is equal to the constant load Q , the yearly reliability P_s is equal to $F_R(u_e)$ and is 0,90 if the exclusion limit for strength is 10 %. P_s is the probability that load Q will be less than strength R .
- Case 3: Since strength R is constant and equal to the load Q_T the yearly reliability depends only on the return period T (Figures A.3 to A.5). The reliability is $(1 - 1/T)$.
- Case 4: Since load Q and strength R are statistically distributed variables and matched by the relation $\bar{R}(1 - u_e v_R) = Q_T$ the yearly reliability depends on the parameters of the load and the strength side. For COV of 0,20 to 0,50 on the load and 0,05 to 0,20 on the strength side the reliability depends on these data. As can be seen from Figures A.3 to A.5, the reliability can be approximated by $1 - 1/2T$ for COV of strength of 0,10 that applies to supports of overhead lines.

The yearly reliabilities given in Table A.1 apply for design with an exclusion limit of 10 %.



IEC 2181/03

- a) cas 1, la charge Q et la résistance R sont constantes, $R > Q$
b) cas 2, la charge Q est constante et la résistance R est variable $\bar{R}(1 - u_e v_R) = Q$
c) cas 3, la charge Q est variable et la résistance R est constante $R = Q_T$
d) cas 4, la charge Q et la résistance R sont variables $\bar{R}(1 - u_e v_R) = Q_T$
 f_Q fonction de densité de probabilité des charges maximales annuelles
 F_R fonction de répartition de la résistance (concerne généralement le support)
 Q_T charge correspondant à la période de retour T

Figure A.2 – Relations entre charge et résistance

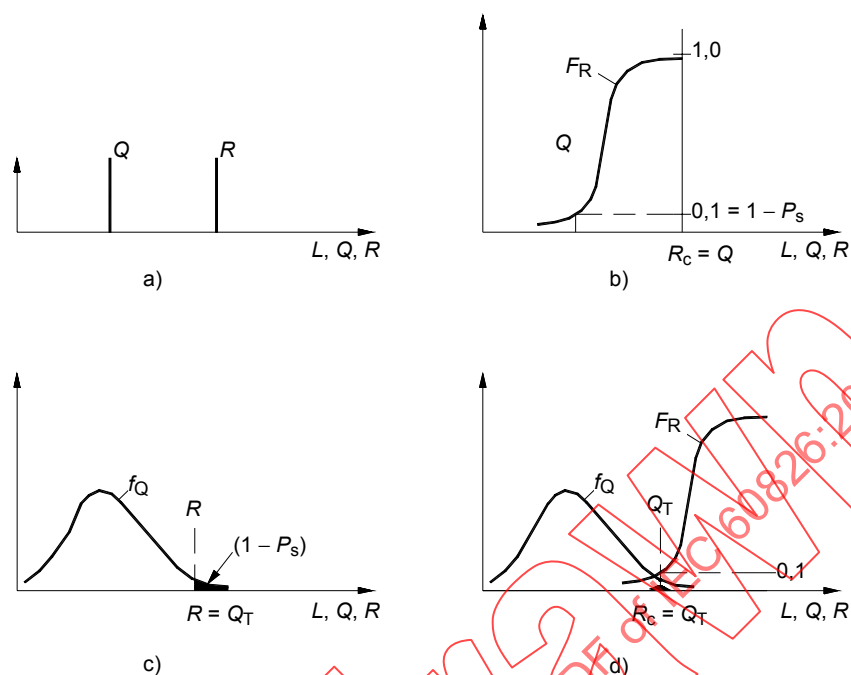
A.1.2.3 Relations entre charge et résistance

Les méthodes probabilistes ont réalisé un progrès majeur lorsque a pu être établie une relation entre la charge et la résistance aboutissant à une probabilité de défaillance presque constante. Cette relation consiste à associer une charge dont la période de retour est T à la résistance dont la limite d'exclusion est de 10 % (ou qui se rencontre avec une probabilité de 90 %). Elle peut être exprimée de la manière suivante:

$$Q_T = (10\%) R \quad \text{ou} \quad Q_T = R_e = 10\% \quad (\text{A.12})$$

On a constaté que l'Equation (A.12) donnait une fiabilité régulière P_s variant généralement de $(1 - 1/T)$ à $(1 - 1/2T)$ et pour laquelle $P_s \sim (1 - 1/2T)$ lorsque v_Q et v_R prennent leurs valeurs les plus fréquentes. Ces résultats demeurent valides pour diverses distributions de courbes de charges Q telles que celles de type I extrême (Gumbel), normales logarithmiques et Frechet, ainsi que pour une distribution normale et log-normale de la résistance R .

Les Figures A.3, A.4 et A.5 illustrent des calculs de probabilité de défaillance couvrant les combinaisons de Q et R les plus fréquemment rencontrées. La plage de variation de v_Q entre 0,20 et 0,50 simule respectivement une variation de la vitesse de vent de 0,10, ainsi qu'une variation de la charge de givre de 0,50, alors que la plage de variation de v_R entre 0,05 et 0,20 couvre la variation du composant de ligne le plus faible – c'est-à-dire généralement les supports –, où $0,05 \leq v_R \leq 0,10$. La Figure A.3 s'applique lorsque $T = 50$ ans, la Figure A.4 lorsque $T = 150$ ans, et la Figure A.5 lorsque $T = 500$ ans.



IEC 2181/03

- a) case 1, load Q and strength R are constant, $R > Q$
 b) case 2, load Q is constant and strength R is variable $\bar{R}(1 - u_e v_R) = Q$
 c) case 3, load Q is variable and strength R is constant $R = Q_T$
 d) case 4, load Q and strength R are variables $\bar{R}(1 - u_e v_R) = Q_T$

f_Q probability density function of yearly maximum loads

F_R cumulative distribution function of strength (usually support)

Q_T load corresponding to return period T

Figure A.2 – Relations between loads and strengths

A.1.2.3 Load-strength relations

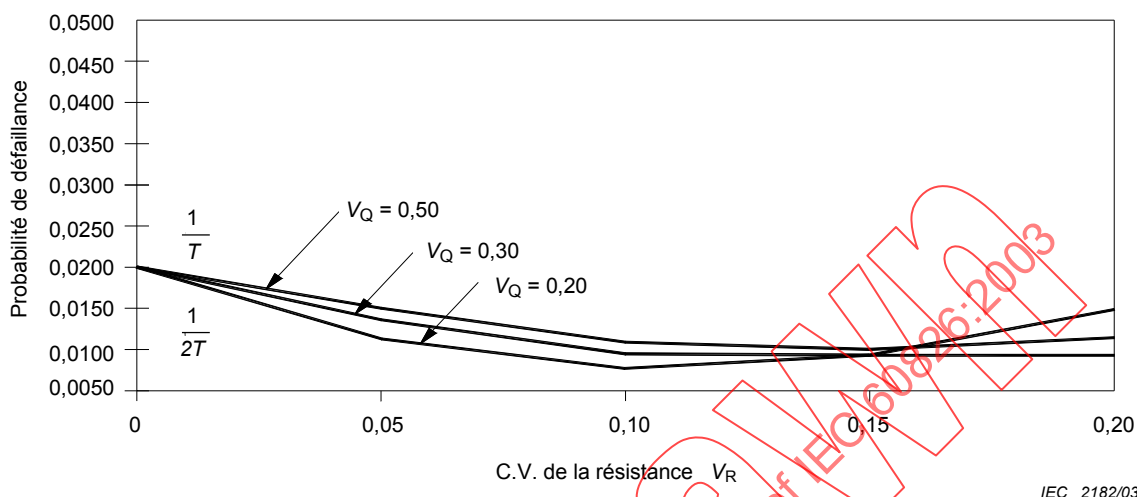
A major breakthrough in probability methods occurred when a relation between load and strength that leads to an almost constant probability of failure was established. This relation consists of associating a load having a return period T with the strength having an exclusion limit of 10 % (or met with 90 % probability). It can be expressed as follows:

$$Q_T = (10 \%) R \text{ or } Q_T = R_{e=10\%} \quad (\text{A.12})$$

Equation (A.12) was found to give a consistent reliability P_s typically in the range of $(1 - 1/T)$ to $(1 - 1/2T)$, with $P_s \sim (1 - 1/2T)$ with the most frequent values for v_Q and v_R . These results remain valid for various distributions of load curves Q such as extreme type I (Gumbel), log-normal and Frechet as well as for normal and log-normal distribution of strength R .

Calculations of failure probabilities covering the most common combinations of Q and R are shown in Figures A.3, A.4 and A.5. The range of v_Q from 0,20 to 0,50 simulates respectively a wind speed variation of 0,10 as well as an ice load variation of 0,50, while the range of v_R of 0,05 to 0,20 covers the variation of the weakest component of the line, usually the supports, where $0,05 \leq v_R \leq 0,10$. Figure A.3 applies for $T = 50$ years, Figure A.4 for $T = 150$ years, and Figure A.5 for $T = 500$ years.

Calculer la probabilité de défaillance pour des dispersions de la résistance et de la charge s'écartant des hypothèses ci-dessus peut conduire à des résultats différents.



Si $v_R = 0,0$

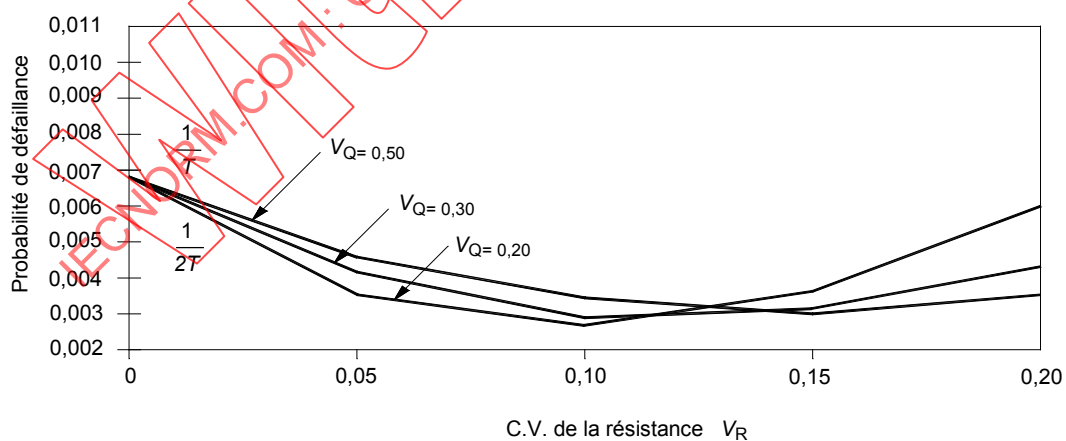
$$P_f = 0,02 = 1/50 = 1/T$$

Si $0,05 < v_R < 0,15$

$$P_f \approx 0,01 = 1/100 = 1/(2T)$$

NOTE La distribution de Q est extrême de type I et celle de R est normale.

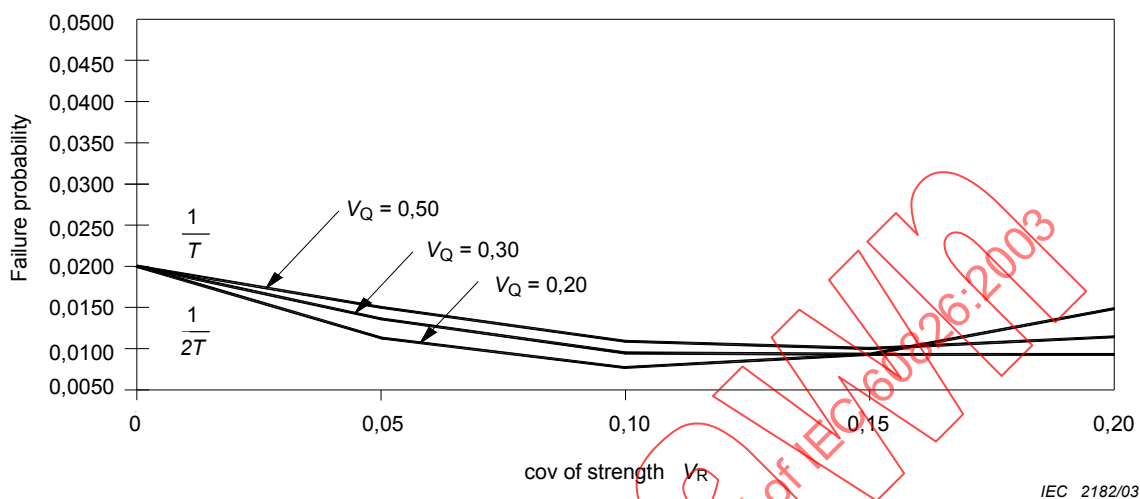
Figure A.3 – Probabilité de défaillance $P_f = (1 - P_s)$ pour différentes distributions de Q et R , avec $T = 50$ ans



NOTE La distribution de Q est extrême de type I et celle de R est normale.

Figure A.4 – Probabilité de défaillance $P_f = (1 - P_s)$ pour différentes distributions de Q et R , avec $T = 150$ ans

The probability of failure calculated when strength and load have dispersions different from the above assumptions may lead to different results.



If $v_R = 0,0$

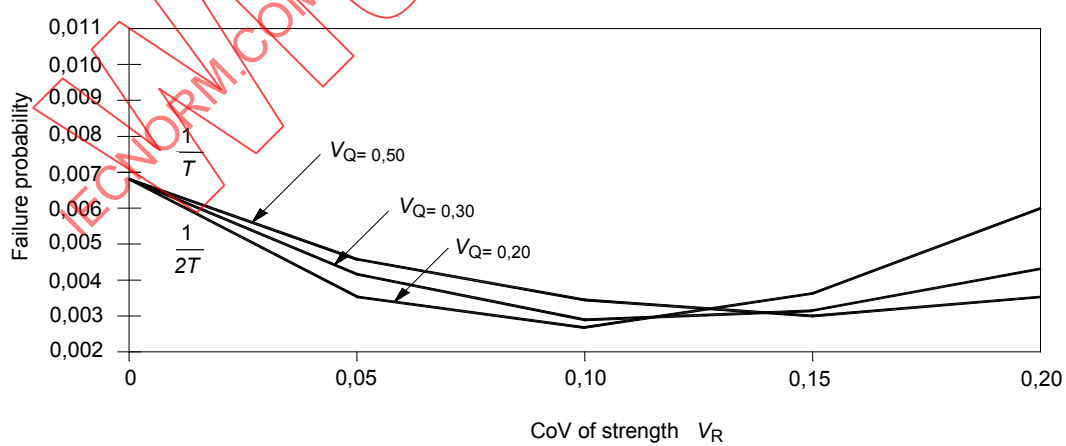
$$P_f = 0,02 = 1/50 = 1/T$$

If $0,05 < v_R < 0,15$

$$P_f \approx 0,01 = 1/100 = 1/(2T)$$

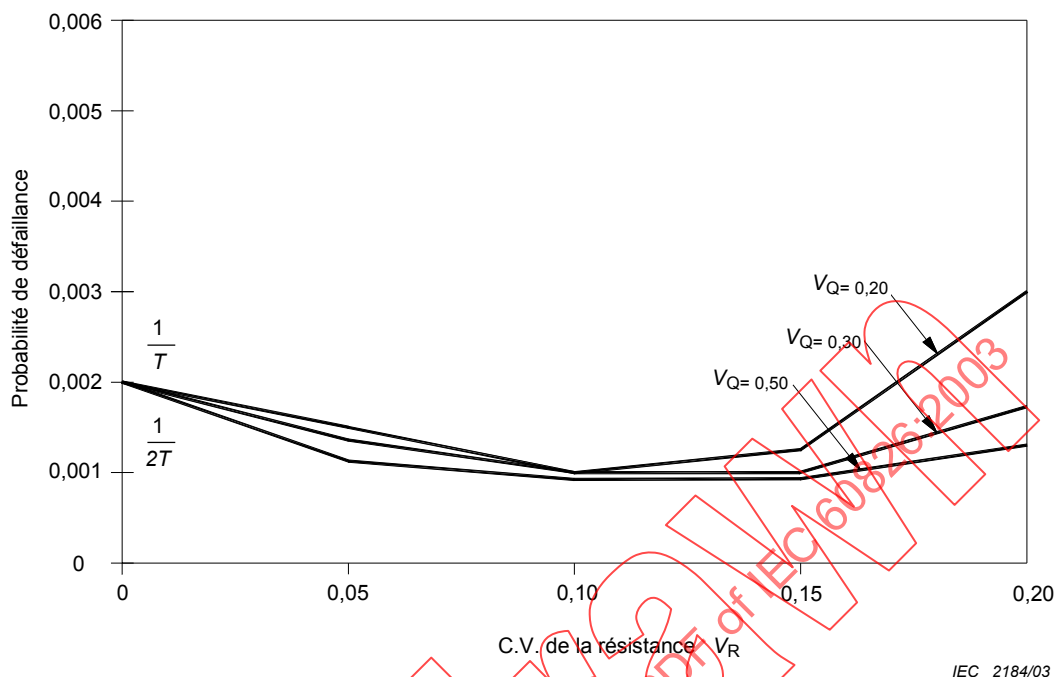
NOTE Distribution of Q is extreme type I and of R is normal.

Figure A.3 – Failure probability $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 50$ years



NOTE Distribution of Q is extreme type I and of R is normal.

Figure A.4 – Failure probability $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 150$ years



NOTE La distribution de Q est extrême de type I et celle de R est normale.

Figure A.5 – Probabilité de défaillance $P_f = (1 - P_s)$ pour différentes distributions de Q et R , avec $T = 500$ ans

Un examen plus approfondi de l'équation (A.12) révèle d'autres avantages de cette représentation.

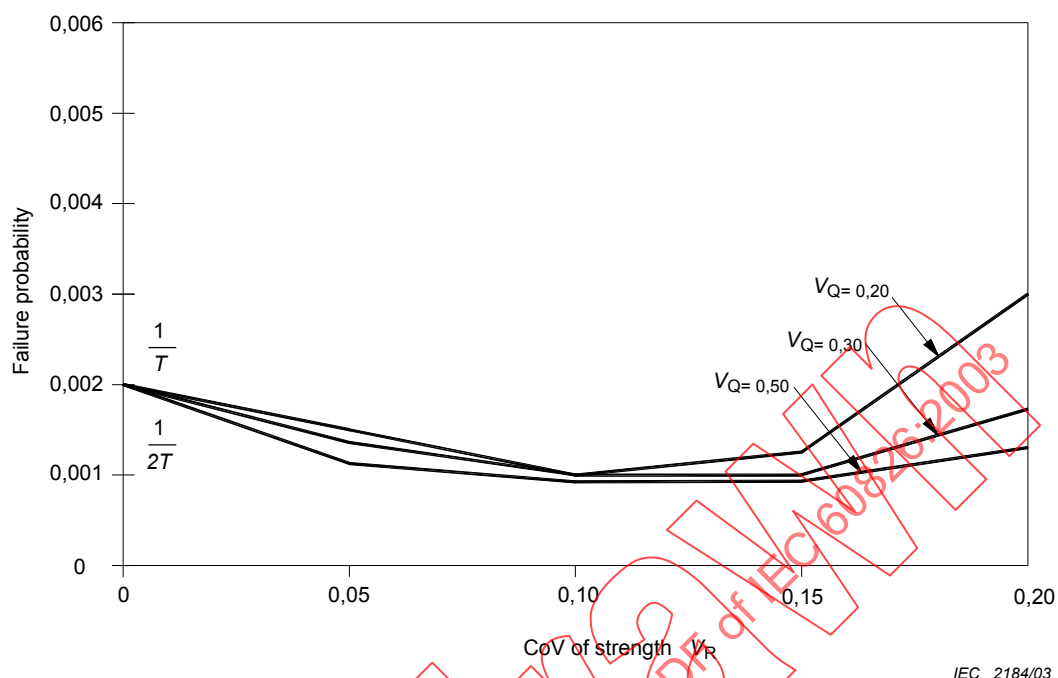
Tout d'abord, les charges sont spécifiées au moyen d'un ensemble de périodes de retour, ce qui constitue une approche très courante dans la conception des bâtiments et des charges liées aux intempéries.

Ensuite, la résistance correspondant à la charge Q_T est celle présentant une probabilité d'occurrence de 90 %. D'après l'analyse des données de résistance, on constate que la résistance caractéristique est toujours située en deçà de la limite d'exclusion de 10 %. Dans les cas où l'on dispose de peu de données sur la résistance, la fiabilité calculée au moyen de l'équation (A.12) peut donc être considérée comme une limite inférieure de la valeur réelle et conduit à des conceptions à caractère prudent.

Enfin, tenir compte de limites d'exclusion inférieures à 10 % (par exemple 2 %) conduirait à surestimer la fiabilité P_s dans les cas où l'exigence de résistance caractéristique ne peut être satisfaite à 98 %.

A.1.2.4 Niveaux de fiabilité et probabilités de défaillance associées

Trois niveaux de fiabilité sont généralement proposés dans le cadre de la conception des lignes. Ils sont caractérisés par des périodes de retour de 50, 150 et 500 ans des charges climatiques limites. Comme le montrent les exemples indiqués en A.1.2.3, la probabilité théorique annuelle de défaillance P_f est comprise entre $1/T$ et $1/2T$, en fonction de la variation de la résistance, sachant que T correspond à la période de retour de l'événement climatique considéré. La probabilité de survie annuelle, ou fiabilité annuelle est alors :



NOTE Distribution of Q is extreme type I and of R is normal.

Figure A.5 – Failure probability $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 500$ years

When further examining Equation (A.12), more advantages can be seen of this format.

Firstly, loads are specified using a set of return periods, an approach very common in building design and in weather related loads.

Secondly, the strength corresponding to load Q_T is the one having a 90 % probability of being met. From the analysis of strength data, it is found that the characteristic strength always falls below the 10 % exclusion limit. In cases where strength data are scarce, the reliability calculated using Equation (A.12) can be viewed as a lower boundary of the real value and leads to designs on the conservative side.

Thirdly, if exclusion limits smaller than 10 % are considered (e.g. 2 %), this leads to over-estimating the reliability P_s in cases where the characteristic strength cannot meet the 98 % requirement.

A.1.2.4 Reliability levels and associated failure probabilities

Three reliability levels are generally proposed for line design. They are characterized by the return period of 50, 150 and 500 years for the climatic limit loads. As can be seen from the examples given in A.1.2.3 the theoretical yearly failure probability P_f is between $1/T$ and $1/2T$ depending on the strength variation, where T is the return period of the climatic event under discussion. The yearly probability of survival or the yearly reliability is then

$$P_{s1} = 1 - P_{f1} \quad (\text{A.13})$$

A partir de cette considération de base, il est possible de déterminer la probabilité de survie P_{sN} pour un cycle de vie d'une ligne comprenant N ans par la relation suivante:

$$P_{sN} = P_{s1}^N = [1 - P_{f1}]^N \quad (\text{A.14})$$

et la probabilité de défaillance P_{fN} pour cette période peut être déterminée à partir de la relation $P_{fN} = 1 - P_{sN}$.

Le Tableau A.2 indique des valeurs de probabilité de survie et de défaillance correspondant à un cycle de vie d'une ligne de 50 ans.

La probabilité annuelle théorique de défaillance est comprise entre 0,002 et 0,001 pour une période de retour de 500 ans, mais serait comprise entre 0,05 et 0,10 pour un cycle de vie de 50 ans.

Ces exemples montrent que la probabilité théorique de défaillance pendant la durée de vie d'une ligne n'est pas négligeable, même lorsque la période de retour des charges limites est de 500 ans, voire plus.

Il importe toutefois de reconnaître que le dépassement d'une charge de conception ne conduit pas forcément à une perte de fiabilité. Celle-ci découle en effet de la rencontre d'un événement de charge extrême avec un composant incapable de résister aux effets de ce phénomène. Cela explique la différence entre la probabilité de défaillance et celle de dépassement d'un événement de charge.

Tableau A.2 – Relation entre niveaux de fiabilité et périodes de retour des charges limites

Période de retour des charges limites, T		50	150	500
Fiabilité minimale annuelle	P_{s1}	0,98 à 0,99	0,993 à 0,997	0,998 à 0,999
Probabilité annuelle de défaillance	P_{f1}	0,02 à 0,01	0,0067 à 0,0033	0,002 à 0,001
Fiabilité sur un cycle de vie de 50 ans	P_{s50}	0,36 à 0,61	0,71 à 0,86	0,90 à 0,95
Probabilité théorique de défaillance sur un cycle de vie de 50 ans	P_{f50}	0,64 à 0,39	0,29 à 0,14	0,10 à 0,05

A.1.2.5 Sélection des niveaux de fiabilité

On peut concevoir les lignes de transport selon différents niveaux (ou classes) de fiabilité en fonction des prescriptions locales et des tâches assignées à la ligne au sein du réseau.

Les concepteurs peuvent choisir les niveaux de fiabilité soit par étalonnage sur des lignes existantes qui ont fonctionné de manière satisfaisante sur une longue période, soit au moyen de méthodes d'optimisation décrites dans la littérature technique.

Dans tous les cas, il convient que les lignes satisfassent au moins aux exigences liées à un niveau de fiabilité caractérisé par une période de retour des charges de 50 ans (niveau 1).

Une fiabilité supérieure peut se justifier pour les lignes jouant un rôle plus important sur le réseau, conformément aux prescriptions suivantes:

$$P_{s1} = 1 - P_{f1} \quad (\text{A.13})$$

From this basic consideration the failure probability and the probability of survival P_{sN} for a life cycle of a line of N years can be determined by

$$P_{sN} = P_{s1}^N = [1 - P_{f1}]^N \quad (\text{A.14})$$

and the failure probability P_{fN} for this period can be determined from $P_{fN} = 1 - P_{sN}$.

Table A.2 gives values of probabilities of survival and failure corresponding to a 50 year life cycle for a line.

For a return period of loads of 500 years the theoretical yearly failure probability is between 0,002 and 0,001, however that failure probability related to a life cycle of 50 years would be 0,05 to 0,10.

The examples show that there is a theoretical probability of failure during the life cycle period of a line which is not negligible even for return periods of limit loads of 500 years and more.

It is however important to recognize that exceeding a design load does not necessarily lead to a loss of reliability because the latter is a combination of an extreme load event and its occurrence on a component which is unable to resist its effect. This explains the discrepancy between the probability of failure and that of exceeding a load event.

Table A.2 – Relationship between reliability levels and return periods of limit loads

Return period of limit loads, T		50	150	500
Yearly minimum reliability	P_{s1}	0,98 to 0,99	0,993 to 0,997	0,998 to 0,999
Yearly failure probability	P_{f1}	0,02 to 0,01	0,0067 to 0,0033	0,002 to 0,001
Reliability during 50 years life cycle	P_{s50}	0,36 to 0,61	0,71 to 0,86	0,90 to 0,95
Theoretical probability of failure during 50 years life cycle	P_{f50}	0,64 to 0,39	0,29 to 0,14	0,10 to 0,05

A.1.2.5 Selection of reliability levels

Transmission lines can be designed for different reliability levels (or classes) depending on local requirements and the line duties within a supply network.

Designers can choose their reliability levels either by calibration with existing lines that have had a long history of satisfactory performance or by optimisation methods found in technical literature.

In all cases, lines should at least meet the requirements of a reliability level characterized by a return period of loads of 50 years (level 1).

An increase in reliability above this level could be justified for more important lines of the network as indicated by the following guidelines:

Il est conseillé d'adopter un niveau de fiabilité caractérisé par des périodes de retour de 150 ans pour les lignes de plus de 230 kV. Il en va de même pour les lignes d'une tension électrique inférieure à 230 kV, mais qui constituent la principale, voire la seule source d'alimentation d'une charge électrique particulière (niveau 2).

Enfin, il est conseillé d'adopter un niveau de fiabilité caractérisé par des périodes de retour de 500 ans pour les lignes – généralement d'une tension supérieure à 230 kV – qui constituent la principale, voire la seule source d'alimentation d'une charge électrique particulière et dont la défaillance aurait de graves conséquences sur la fourniture de l'électricité.

Les règles d'application de la fiabilité des lignes aériennes, y compris les niveaux de tension correspondants, peuvent varier selon les pays, en fonction de la structure du réseau et des conséquences éventuelles d'une défaillance de lignes. Il convient également de tenir compte des conséquences sur d'autres infrastructures: voies ferrées ou autoroutes, par exemple.

La rédaction de normes ou de spécifications nationales et régionales, ainsi que les décisions sur le niveau de fiabilité, doivent normalement tenir compte de l'expérience acquise à partir des lignes existantes.

A.1.3 Coordination de résistance des composants de lignes

A.1.3.1 Principes de base de la coordination de résistance

Les composants des lignes de transport présentent des variations de résistance et une réaction à la charge différentes. Soumis à des charges données, les composants en série peuvent connaître une défaillance dès lors que la charge dépasse la résistance d'un composant quelconque.

Pour la détermination d'une coordination de résistance adéquate, les critères suivants font l'objet d'un consensus dans l'industrie des lignes aériennes:

- a) Il convient de sélectionner le premier composant susceptible de se rompre de manière que sa défaillance produise l'effet (dynamique ou statique) secondaire le moins important sur les autres composants, afin de minimiser la probabilité d'une propagation de cette défaillance (effet en cascade).
- b) Il convient de réduire au minimum le temps et le coût de réparation consécutif à une défaillance.
- c) Il convient que le rapport entre la limite d'endommagement et la limite de rupture du premier composant défaillant soit, dans le cas idéal, voisin de 1,0. Il importe de mentionner que la coordination de résistance des composants peut se révéler difficile lorsque la résistance du composant le moins fiable varie de manière très importante.
- d) Il convient qu'un composant peu coûteux implanté en série avec un composant à coût élevé soit conçu de manière à être au moins aussi solide et fiable que le composant principal si les conséquences de sa défaillance sont aussi sévères que celles du composant principal. On rencontre une exception à ce critère lorsqu'un composant est conçu spécifiquement pour servir de limiteur de charge. La résistance de ce composant doit alors être harmonisée avec celle du composant qu'il est censé protéger.

Si l'on analyse des composants de ligne tels que des supports de suspension, des supports d'ancrage, des conducteurs, des fondations et des chaînes d'isolateurs à partir des critères énoncés ci-dessus, on peut conclure que:

- il convient que les conducteurs ne soient pas le composant le plus faible en raison des critères a), b) et c);
- il en va de même pour les accessoires en raison du critère d);
- il en va de même pour le support d'ancrage du fait de a) et b);
- et des fondations du fait de b) et c).

It is suggested to use a reliability level characterized by return periods of 150 years for lines above 230 kV. The same is suggested for lines below 230 kV which constitute the principal or perhaps the only source of supply to a particular electric load (level 2).

Finally, it is suggested to use a reliability level characterised by return periods of 500 years for lines, mainly above 230 kV which constitute the principal or perhaps the only source of supply to a particular electric load. Their failure would have serious consequences to the power supply.

The applications of the reliability for overhead lines, including corresponding voltage levels, may be set differently in individual countries depending on the structure of the grid and the consequences of line failures. The impacts on other infrastructure installations such as railroads and motorways should be considered as well.

When establishing national and regional standards or specifications, decisions on the reliability level should be made taking into consideration also the experience with existing lines.

A.1.3 Strength coordination of line components

A.1.3.1 General basis for strength coordination

Transmission line components have different strength variations and responses to loading. When subjected to given loads, failure of components in series could occur whenever load exceeds strength in any component.

In order to decide on an appropriate strength coordination, the following criteria constitute a consensus within the overhead line industry:

- a) The first component to fail should be chosen so as to introduce the least secondary load effect (dynamic or static) on other components in order to minimize the probability of a propagation of failure (cascading effect).
- b) Repair time and costs following a failure should be kept to a minimum.
- c) The first component to fail should ideally have a ratio of the damage limit to the failure limit near 1,0. It should be mentioned that it might be difficult to co-ordinate the strength of components when the least reliable one has a very large strength variation.
- d) A low cost component in series with a high cost component should be designed to be at least as strong and reliable as the major component if the consequences of failure are as severe as failure of that major component. An exception of this criterion is when a component is purposely designed to act as a load limiting device. In such a case its strength has to be well tuned with the component it is supposed to protect.

If line components such as suspension supports, tension supports, conductors, foundations and insulator strings are analysed using the above criteria, it can be concluded that:

- conductors should not be the weakest component because of a), b) and c);
- fittings because of d);
- tension support because of a) and b);
- and foundations because of b) and c).

Conséquence logique de ces considérations, le rôle de composant à la plus faible résistance doit normalement revenir aux supports de suspension. Lorsqu'une ligne conçue selon ce principe est soumise à des charges climatiques dépassant les valeurs de conception, il convient que les premiers composants défaillants soient les supports de suspension.

Le Tableau A.3 représente une coordination de résistance typique réalisée selon les critères décrits plus haut.

Tableau A.3 – Coordination de résistance typique

	Composants majeurs	Coordination entre les composants majeurs*
Résistance la plus faible	Pylône de suspension	<u>Pylône</u> , fondations, accessoires
Probabilité supérieure à 90 % de ne pas présenter la résistance la plus faible	Pylône d'ancrage, ou Pylône d'arrêt, ou Conducteurs	<u>Pylône</u> , fondations, accessoires <u>Pylône</u> , fondations, accessoires <u>Conducteurs</u> , isolateurs, accessoires
* Au sein de chaque groupe de composants majeurs, le composant souligné est le plus faible avec un seuil de confiance de 90 %.		

Ces critères résultent d'une déduction logique. La pratique révèle que, à quelques exceptions près, la conception de la plupart des lignes de transport existantes est très voisine de la coordination de résistance proposée.

En outre, il convient de noter, comme l'indique A.1.3, que la coordination de résistance simplifie également les calculs de fiabilité.

La coordination de résistance présentée ci-dessus peut s'appliquer à la plupart des lignes. Cependant, le recours à des critères différents peut être utilisé et déboucher sur une séquence de ruine différente.

Par exemple, les supports implantés au niveau des franchissements de cours d'eau peuvent être conçus en fonction d'une résistance supérieure à celle des conducteurs. Dans les zones sujettes à avalanches, où l'édification des supports est particulièrement difficile, on peut aussi faire en sorte que les composants les plus faibles soient les conducteurs, sous réserve que les supports de suspension soient conçus en fonction des forces résultant de la défaillance de ces conducteurs. Dans le cas contraire, en effet, cette défaillance entraînerait très probablement celle des supports adjacents.

A.1.3.2 Méthodes de calcul des facteurs de coordination de résistance Φ_S

Deux méthodes sont envisageables pour déterminer des facteurs de résistance Φ_S permettant d'obtenir la coordination de résistance souhaitée:

– Recours à des limites d'exclusion différentes

Utilisation de charges limites correspondant à une limite d'exclusion de 10 % (comme la présente approche le suggère) pour le composant le plus faible. La conception des autres éléments fera alors intervenir une limite d'exclusion moindre (1 % à 2 %, par exemple) pour les mêmes charges limites.

– Conception en fonction d'un seuil de confiance cible dans le cadre de la coordination de résistance

Etablissement de facteurs de coordination de résistance tels que la coordination de résistance souhaitée entre deux composants (voir Tableau A.3) soit très probablement atteinte (niveau de confiance de l'ordre de 80 % à 90 %).

The logical consequence of the considerations above is that the suspension supports should constitute the component with the lowest strength. When a line designed according to this rule is subjected to climatic loads exceeding design values the suspension supports would fail first.

Table A.3 represents a typical strength coordination which takes care of the criteria described above.

Table A.3 – Typical strength coordination

	Major components	Coordination within major components*
Lowest strength	Suspension tower	<u>Tower</u> , foundations, fittings
Not having lowest strength with 90 % confidence	Tension tower, or	<u>Tower</u> , foundations, fittings
	Dead end tower, or	<u>Tower</u> , foundations, fittings
	Conductors	<u>Conductors</u> , insulators, fittings
* Within each major component the underlined component is the weakest with 90 % confidence.		

While these criteria are the result of logical deduction, it is found in practice that, with a few exceptions, the design of the great majority of existing transmission lines conforms closely to the proposed coordination of strength.

Furthermore, it should be noted that the coordination of strength, as mentioned in A.1.3, also simplifies reliability calculations.

The above strength coordination can be applied to most lines. However there will be some situations where different criteria could be used and thus lead to another sequence of failure.

For example, special river crossing supports could be designed stronger than the conductors. In avalanche areas, where construction of supports is very difficult, the conductor may also be chosen as the weakest component, provided that suspension supports are designed for the forces resulting from the failure of the conductors. Otherwise the failure of conductors would very probably lead to the failure of adjacent supports.

A.1.3.2 Methods for calculating strength coordination factors ϕ_s

In order to develop strength coordination factors ϕ_s leading to the target strength coordination two methods can be considered:

- Use of different exclusion limits

For the weakest component, use limit loads in conjunction with 10 % exclusion limit (as suggested in this approach). The next weakest components will be designed with a lower exclusion limit (say 1 % to 2 %), corresponding to the same limit loads.

- Design for a target confidence level in the strength coordination

Strength coordination factors have to be established in such a way that the target strength coordination between two components, as mentioned in Table A.3, will be reached with a high level of confidence (nearly 80 % to 90 %).

En raison du caractère aléatoire de la résistance, il est toutefois théoriquement impossible de garantir avec un degré de confiance de 100 % que la coordination de résistance fonctionnera dans tous les cas.

A.1.3.3 Recours à des limites d'exclusion différentes

Selon cette méthode, le seuil de confiance déterminé pour la séquence de ruine envisagée varie en fonction des dispersions de la résistance des composants. Supposons par exemple:

Période de retour: $T = 50$ ans ;
 Valeur moyenne de la charge: $\bar{Q} = 1,0$;
 Coefficient de variation de la charge: $v_Q = 0,20$;
 Coefficient de variation de la résistance: $v_{R1} = v_{R2} = 0,10$.

(R_1 et R_2 représentent respectivement la distribution de la résistance des premier et deuxième composants défaillants.)

Ces deux composants sont conçus en fonction d'une charge $Q_{50} = 1,52 \bar{Q}$ (déterminée à partir de la distribution de Gumbel, voir Tableau B.1).

Il est recommandé que la résistance correspondante du composant R_1 soit, normalement, égale à (10 %) R_1 . Le composant R_2 sera ensuite dimensionné en fonction d'une charge identique, mais avec une résistance plus élevée ou une limite d'exclusion moindre: 2 %, par exemple. Si la conception du composant R_2 n'avait pas fait intervenir de coordination de résistance, sa résistance aurait été de (10 %) R_2 . Ces relations sont illustrées à la Figure A.6.

Le rapport $\phi_S = \frac{(10\%)R_1}{(10\%)R_2}$ est le facteur relatif à la coordination de résistance.

Dans l'exemple ci-dessus, $\phi_S = \frac{(2\%)R_2}{(10\%)R_2} = \frac{(1 - 2,05v_{R2})}{(1 - 1,28v_{R2})} = 0,90$

Ce résultat signifie que si l'on utilise la limite d'exclusion de 10 % pour la conception du composant le plus faible, la résistance du second composant défaillant sera normalement majorée d'un facteur $1/0,91 = 1,10$. Les résultats dépendent essentiellement de l'écart type lié à la résistance du second composant défaillant. Si $v_R = 0,25$, comme c'est le cas pour les fondations, on obtiendrait $\phi_S = 0,72$.

On peut aisément montrer que ce facteur demeure plus ou moins constant pour différentes valeurs N de composants en série. Dans ce cas, ϕ_S prend la forme suivante:

$$\phi_S = \frac{(2\%) \min_N R_2}{(10\%) \min_N R_2} \quad (\text{A.15})$$

A partir des données ci-dessus, on constate que ϕ_S varie de 0,91 pour $N = 1$ à 0,94 pour $N = 100$ (voir Tableau B.5).

However, due to the random nature of strength, it is theoretically impossible to guarantee with 100 % confidence that the planned coordination of strength will be met in all cases.

A.1.3.3 Use of different exclusion limits

In this method, the confidence level in obtaining the envisaged sequence of failure is variable and depends on strength variations of components. For example assume:

Return period: $T = 50$ years;

Mean value of load: $\bar{Q} = 1,0$;

Coefficient of variation of load: $v_Q = 0,20$;

Coefficient of variation of strength: $v_{R1} = v_{R2} = 0,10$.

(R_1 and R_2 represent the strength distribution of respectively the weakest and the next weakest component.)

Both components are designed for a load $Q_{50} = 1,52 \bar{Q}$ (from Gumbel distribution see Table B.1).

The corresponding strength of component R_1 should be (10 %) R_1 . For component R_2 , it will be designed for the same load but with a higher strength or a lower exclusion limit, say of 2 %. If the design of component R_2 was not made to achieve a planned strength coordination, its strength would have been (10 %) R_2 . Figure A.6 illustrates the relations.

The ratio $\phi_S = \frac{(10\%)R_1}{(10\%)R_2}$ is the factor related to the coordination of strength.

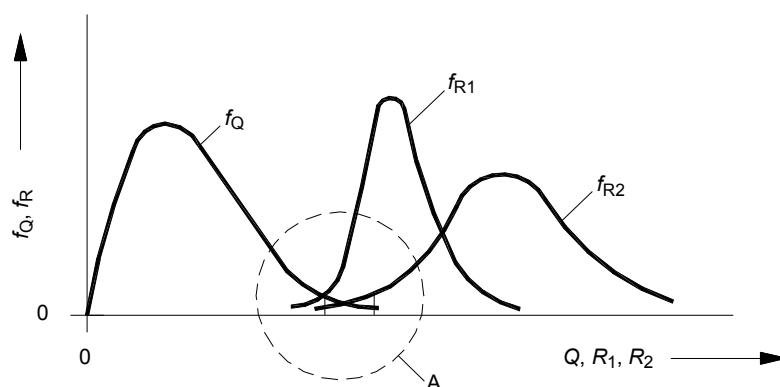
In the above example, $\phi_S = \frac{(2\%)R_2}{(10\%)R_2} = \frac{(1 - 2,05v_{R2})}{(1 - 1,28v_{R2})} = 0,90$

This result means that if the 10 % exclusion limit is used for the design of the weakest component, the strength of the next weakest component should be higher by a factor $1/0,91 = 1,10$. The results depend essentially on the standard deviation of the next weakest component. Where $v_R = 0,25$, as is the case for foundations, $\phi_S = 0,72$ would result.

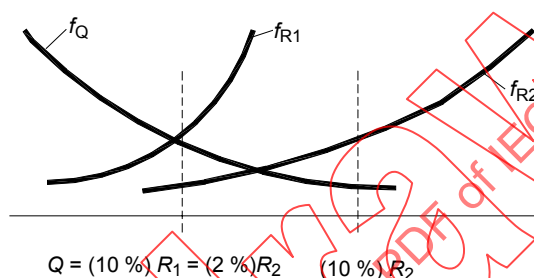
It can be easily shown that this factor remains fairly constant for different members N of components in series. In this case, ϕ_S changes to:

$$\phi_S = \frac{(2\%) \min_N R_2}{(10\%) \min_N R_2} \quad (\text{A.15})$$

Using the above data we find that ϕ_S varies from 0,91 for $N = 1$ to 0,94 for $N = 100$ (see Table B.5).



Détail A



IEC 2185/03

Figure A.6 – Coordination de résistance par le recours à des limites d'exclusion différentes

A.1.3.4 Conception en fonction d'un seuil de confiance cible dans la coordination de résistance

Etant donné que la résistance des composants de lignes aériennes est aléatoire, il est impossible de garantir à 100 % que la défaillance va obéir à une séquence de ruine prédéterminée. Il faut donc admettre une probabilité inférieure à 100 % que la résistance d'un composant donné soit supérieure à celle d'un autre.

Le facteur de coordination de résistance ϕ_s dépend de la probabilité recherchée dans l'obtention de la séquence de ruine prise pour hypothèse. On peut alors employer la méthode suivante pour calculer les facteurs ϕ_s .

Il faut tout d'abord déterminer la probabilité cible que la résistance du composant 2 soit supérieure à celle du composant 1. On peut par exemple supposer que la probabilité que $R_2 > R_1 = 0,90$, ou

$$P(R_2 - R_1) > 0 = 0,90 = P_{(sr)}, \quad (\text{A.16})$$

où

R_1, R_2 est la résistance des composants;

$P_{(sr)}$ est la probabilité d'obtenir la séquence de ruine ou la coordination de résistance visée.

Le facteur ϕ_s peut être calculé par voie statistique pour différentes combinaisons de v_{R1} et v_{R2} , (v_{R1}, v_{R2} étant les coefficients de variation de la résistance).

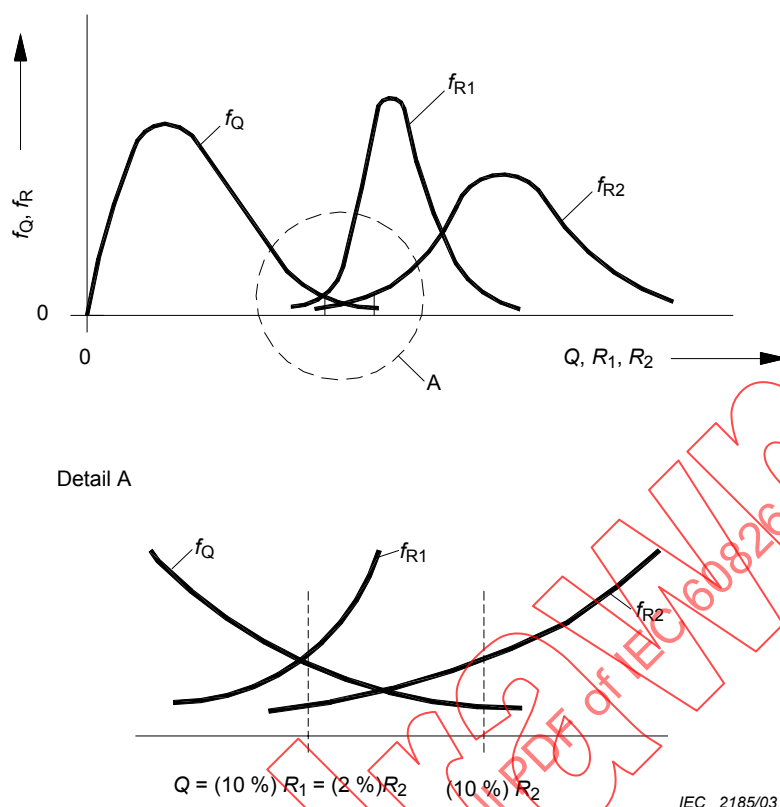


Figure A.6 – Coordination of strength by using different exclusion limits

A.1.3.4 Design for a target confidence level in the strength coordination

Because components of overhead lines have random strengths, it is impossible to guarantee with 100 % confidence that components will fail in a preferred sequence. A probability level lower than 100 % that the strength of one component will exceed the strength of another one has to be accepted.

The strength coordination factor ϕ_S depends on the target probability of achieving the assumed sequence of failure. The following method can be used to derive ϕ_S factors.

The target probability that the strength of component 2 exceeds the strength of component 1 has to be established, e.g. probability for $R_2 > R_1 = 0,90$ or

$$P(R_2 - R_1) > 0 = 0,90 = P(\text{sof}), \quad (\text{A.16})$$

where

R_1, R_2 is the strength of the components;

$P(\text{sof})$ is the probability of sequence of failure or coordination of strength.

Using statistical methods the factor ϕ_S can be derived for various combinations of v_{R1} and v_{R2} , (v_{R1}, v_{R2} coefficient of variation of strength).

Le facteur Φ_S est lié à la limite d'exclusion de 10 % de la résistance des composants comparés

$$\Phi_S = (10 \%)R_1 / (10 \%)R_2$$

On suppose que la fonction de densité de la résistance suit une distribution normale.

Le seuil de confiance lié à l'obtention d'une coordination de résistance cible peut alors être exprimé par l'indice de fiabilité β_{sr} , qui correspond au nombre d'écarts types pour lequel la distribution de Gauss aboutit à la confiance souhaitée:

$$F(\beta_{sr}) = P_\phi \quad (A.17)$$

On peut alors déterminer l'indice de fiabilité relatif à la séquence de ruine (β_{sr}) recherchée au moyen des tables de distribution de Gauss:

Pour $P_\phi = 0,90$; $\beta_{sr} = 1,28$

$P_\phi = 0,98$; $\beta_{sr} = 2,05$, etc.

Selon l'équation (A.10):

$$\beta_{sr} = \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_2}{\sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2}} \quad (A.18)$$

s'applique, avec

$\sigma_{R1} = v_{R1} \times \bar{R}_1$ écart type

$\sigma_{R2} = v_{R2} \times \bar{R}_2$ écart type

$\bar{R}_1, \bar{R}_2$ = résistances moyennes des composants.

Avec l'introduction du coefficient central de sécurité:

$$\alpha = \bar{R}_2 / \bar{R}_1 \quad (A.19)$$

L'équation (A.18) prend alors la forme:

$$\beta_{sr} = \frac{1 - \alpha}{\sqrt{\alpha^2 \times v_{R1}^2 + v_{R2}^2}} \quad (A.20)$$

A partir de la relation exprimée dans l'équation (A.20), le coefficient central de sécurité α peut être obtenu par la résolution de l'équation quadratique suivante:

$$\alpha^2 [1 - (\beta_{sr} v_{R2})^2] - 2\alpha + 1 - (\beta_{sr} v_{R1})^2 = 0 \quad (A.21)$$

Le Tableau A.4 donne les résultats pour $\beta_{sr} = 1,28$, ainsi que pour divers coefficients de variation v_{R1} et v_{R2} .

En outre, puisque

$$(10 \%) R_1 = (\bar{R}_1) \times (1 - 1,28 v_{R1})$$

$$(10 \%) R_2 = (\bar{R}_2) \times (1 - 1,28 v_{R2})$$

The factor Φ_S is related to the 10 % exclusion limit of the strength of the components compared

$$\Phi_S = (10 \%)R_1 / (10 \%)R_2$$

It is assumed that the density function of the strength follows a normal distribution.

Then the confidence for achieving a target coordination of strength can be expressed by the reliability index β_{sof} which is the number of standard deviations for which the Gaussian distribution yields the established confidence:

$$F(\beta_{\text{sof}}) = P_\Phi \quad (\text{A.17})$$

From tables for the Gaussian distribution the reliability index for the confidence in the preferred sequence of failure (β_{sof}) can be obtained:

For $P_\Phi = 0,90$; $\beta_{\text{sof}} = 1,28$

$P_\Phi = 0,98$; $\beta_{\text{sof}} = 2,05$, etc.

According to Equation (A.10):

$$\beta_{\text{sof}} = \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_2}{\sqrt{\sigma_{\bar{R}_1}^2 + \sigma_{\bar{R}_2}^2}} \quad (\text{A.18})$$

applies, where

$\sigma_{R1} = v_{R1} \times \bar{R}_1$ standard deviation

$\sigma_{R2} = v_{R2} \times \bar{R}_2$ standard deviation

$\bar{R}_1, \bar{R}_2$ = mean component strengths

With the introduction of the central safety factor:

$$\alpha = \bar{R}_2 / \bar{R}_1 \quad (\text{A.19})$$

Equation (A.18) yields to:

$$\beta_{\text{sof}} = \frac{1 - \alpha}{\sqrt{\alpha^2 \times v_{R1}^2 + v_{R2}^2}} \quad (\text{A.20})$$

From Equation (A.20) the central safety factor α can be obtained by solving the quadratic equation:

$$\alpha^2 [1 - (\beta_{\text{sof}} v_{R2})^2] - 2\alpha + 1 - (\beta_{\text{sof}} v_{R1})^2 = 0 \quad (\text{A.21})$$

Table A.4 contains the results for $\beta_{\text{sof}} = 1,28$ and various coefficients of variation v_{R1} and v_{R2} .

Furthermore, since

$$(10 \%) R_1 = (\bar{R}_1) \times (1 - 1,28 v_{R1})$$

$$(10 \%) R_2 = (\bar{R}_2) \times (1 - 1,28 v_{R2})$$

$$\phi_S = \frac{10 \% R_1}{10 \% R_2} = \frac{\bar{R}_1(1-1,28v_{R1})}{\bar{R}_2(1-1,28v_{R2})} = \frac{1 \times (1-1,28v_{R1})}{\alpha \times (1-1,28v_{R2})} \quad (\text{A.22})$$

Le facteur de coordination de résistance ϕ_S peut être déterminé à partir de l'équation (A.22), après le calcul de α au moyen de l'équation (A.21).

Le Tableau A.4 présente des valeurs de α et ϕ_S permettant de garantir avec une probabilité de 90 % que la défaillance du composant R_2 n'interviendra qu'après celle du composant R_1 ($P_\phi = 0,90$).

Tableau A.4 – Valeurs du coefficient central de sécurité α et du facteur de coordination de résistance ϕ_S nécessaires pour assurer avec une probabilité de 90 % que la défaillance du composant R_2 n'interviendra qu'après celle du composant R_1

$v_{R1} \backslash v_{R2}$	0,05		0,075		0,10		0,20	
	α	ϕ_S	α	ϕ_S	α	ϕ_S	α	ϕ_S
0,05	1,10	0,91	1,12	0,86	1,15	0,81	1,26	0,63
0,10	1,16	0,92	1,18	0,88	1,20	0,83	1,30	0,65
0,20	1,36	0,93	1,36	0,89	1,37	0,85	1,45	0,69
0,30	1,63	0,93	1,64	0,90	1,64	0,86	1,70	0,71
0,40	2,07	0,93	2,07	0,90	2,07	0,86	2,11	0,72

Dans le cadre de la coordination de résistance, le choix d'un premier composant défaillant dont la résistance présente une forte variation serait difficile et ne serait pas économique. Ainsi, comme le montre le Tableau A.4, lorsque $v_{R1} = 0,20$, la résistance caractéristique des seconds composants défaillants devrait être multipliée par environ 0,7 pour garantir que ces composants pourront supporter les charges limites.

A partir du Tableau A.4, on peut conclure que si les supports de suspension sont conçus comme les premiers composants défaillants (avec v_R généralement compris entre 0,05 et 0,10), la résistance caractéristique des fondations (v_R étant généralement compris entre 0,10 et 0,30) doit être multipliée par un facteur allant de 0,83 à 0,93. Dans ce cas, on peut être sûr à 90 % que la défaillance des fondations ne précédera pas celle du pylône supporté.

A.1.3.5 Nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale

Lorsqu'un événement de charge Q_T affecte un grand nombre de composants avec une intensité maximale, la défaillance de ces derniers sera déclenchée par le maillon (composant) le plus faible. Il importe d'en tenir compte au moment de déterminer la distribution de la résistance ou la limite d'exclusion effective. En supposant l'absence de corrélation au niveau de la résistance des composants, la distribution de résistance d'une série de N composants devient $\min_N R$, N étant le nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale.

On peut déduire la fonction densité de $\min_N R$ au moyen de méthodes analytiques ou de techniques de simulation, comme la méthode de Monte-Carlo. Cependant, étant donné que la limite d'exclusion de 10 % sert de référence dans la présente norme (sur la base de l'équation A.12), on peut obtenir la limite d'exclusion e_N de N composants à partir de la relation suivante:

$$e_N = 1 - [1 - e_1]^N \quad (\text{A.23})$$

Cette relation peut permettre de calculer la probabilité d'exclusion d'un système formé de N composants ou éléments à partir des limites d'exclusion spécifiques aux composants.

$$\Phi_s = \frac{10\%R_1}{10\%R_2} = \frac{\bar{R}_1(1 - 1,28v_{R1})}{\bar{R}_2(1 - 1,28v_{R2})} = \frac{1 \times (1 - 1,28v_{R1})}{\alpha \times (1 - 1,28v_{R2})} \quad (\text{A.22})$$

The strength coordination factor Φ_s can be determined from Equation (A.22) after α has been calculated from Equation (A.21).

In Table A.4 values of α and Φ_s are given that ensure that component R_2 will fail after component R_1 with 90 % probability ($P_\Phi = 0,90$).

Table A.4 – Values of central safety factor α and strength coordination factor Φ_s required to insure that component R_2 will fail after component R_1 with a 90 % probability

$v_{R1} \backslash v_{R2}$	0,05		0,075		0,10		0,20	
	α	Φ_s	α	Φ_s	α	Φ_s	α	Φ_s
0,05	1,10	0,91	1,12	0,86	1,15	0,81	1,26	0,63
0,10	1,16	0,92	1,18	0,88	1,20	0,83	1,30	0,65
0,20	1,36	0,93	1,36	0,89	1,37	0,85	1,45	0,69
0,30	1,63	0,93	1,64	0,90	1,64	0,86	1,70	0,71
0,40	2,07	0,93	2,07	0,90	2,07	0,86	2,11	0,72

Strength coordination would be difficult and not cost efficient to choose a component with a large strength variation as the first component to fail. For example, as seen from Table A.4, when $v_{R1} = 0,20$, the characteristic strength of the next strongest components would have to be selected such that it would meet the limit loads when multiplied by about 0,7.

From Table A.4, it can be concluded that if suspension supports (usually $v_R = 0,05$ to $0,10$) are designed as the weakest components, the characteristic strength of foundations (v_R is usually from $0,10$ to $0,30$) has to be multiplied by a factor of 0,83 to 0,93. In this case, there is 90 % confidence that foundations will not fail before the supported tower.

A.1.3.5 Number of components subjected to maximum load intensity

When the maximum intensity of a load event Q_T affects a large number of components, failure will be triggered by the weakest link (or component). This effect has to be considered when establishing the strength distribution or the effective exclusion limit. Assuming that the strength of components is not correlated, the strength distribution of a series of N components becomes $\min_N R$, where N is the number of components subjected to the maximum load intensity.

The density function of $\min_N R$ can be derived by analytical methods or simulation techniques, e.g. Monte-Carlo. However, since the 10 % exclusion limit is used as a reference in this standard (based on Equation (A.12)) the exclusion limit e_N of N components can be obtained through the following relation:

$$e_N = 1 - [1 - e_1]^N \quad (\text{A.23})$$

The exclusion probability of a system consisting of N components or elements can be calculated from the exclusion limit of the individual elements using this relation.

Pour les besoins de la conception envisagés dans la présente norme, il faut supposer que la limite d'exclusion e_N est de 10 %. En conséquence, la limite d'exclusion de chaque élément considéré individuellement doit être choisie de manière à satisfaire l'exigence selon laquelle $e_N = 0,10$:

$$e_1 = 1 - (1 - e_N)^{1/N} \quad (\text{A.24})$$

Selon l'équation (A.4), il s'ensuit que:

$$R(e) = \bar{R} (1 - u_e \times v_R)$$

La valeur de u_e peut être obtenue à partir de la distribution normale standardisée (voir C.2.1)

$$F_R(u_e) = e \quad (\text{A.25})$$

Elle correspond au nombre d'écart types pour lesquels l'équation (A.25) est satisfaite. Lors de la détermination de la résistance d'un composant, le nombre de composants soumis à la même charge est pris en compte par le facteur de résistance ϕ_N

$$\phi_N = \frac{1 - u_{e1} \times v_R}{1 - u_{eN} \times v_R} \quad (\text{A.26})$$

Calculons par exemple ϕ_N pour $N = 10$ et $v_R = 20\%$. Ici, e_N est égal à 0,10.

L'équation (A.24) montre que $e_1 = 1 - (1 - 0,1)^{0,1} = 0,0105$. Les tables de la distribution normale standardisée permettent alors de déterminer que

$$u_{eN} = 1,28 \text{ à partir de } F_R(u_{eN}) = 0,10$$

et

$$u_{e1} = 2,31 \text{ à partir de } F_R(u_{e1}) = 0,0105$$

Une fois ces données obtenues, on peut déterminer le facteur de résistance ϕ_N au moyen de la relation de l'équation (A.26):

$$\phi_N = \frac{1 - 2,31 \times 0,2}{1 - 1,28 \times 0,2} = 0,72$$

Ce résultat est très significatif. Lorsque l'intensité maximale d'une charge s'exerce sur 10 composants dont la résistance est représentée par une fonction de densité normale assortie d'un coefficient de variation de 20 %, la fiabilité est inférieure à celle correspondant à une charge agissant sur un seul composant. Pour obtenir la même fiabilité dans les deux cas, la résistance nominale en présence de 10 composants doit être choisie de manière à permettre de supporter l'effort de conception correspondant en étant multipliée par le facteur de résistance $\phi_N = 0,72$. Si $v_R = 0,075$ et 0,05, ce facteur serait alors respectivement de 0,92 et de 0,94.

Le même principe s'applique aux chaînes d'isolateurs. Le dimensionnement mécanique d'une chaîne d'isolateurs dépend du nombre d'isolateurs et de la dispersion de résistance, v_R , de chaque isolateur. En supposant $v_R = 0,05$, la résistance d'une chaîne de 80 isolateurs dimensionnés chacun pour R_c doit être multipliée par 0,9, alors que celle d'une chaîne de 10 isolateurs similaires doit être multipliée par 0,94. Si $v_R = 0,15$, le facteur de résistance ϕ_N devient respectivement 0,68 et 0,81, ce qui souligne l'importance de N en cas de forte variation de la résistance.

For design purposes according to this standard it has to be assumed that the exclusion limit e_N is 10 %. Therefore, the exclusion limit for each individual element must be chosen such that the requirement of $e_N = 0,10$ will met:

$$e_1 = 1 - (1 - e_N)^{1/N} \quad (\text{A.24})$$

According to Equation (A.4), it follows that:

$$R(e) = \bar{R} (1 - u_e \times v_R)$$

The value u_e can be obtained from the standardized normal distribution (see C.2.1)

$$F_R(u_e) = e \quad (\text{A.25})$$

and corresponds to the number of standard deviations for which Equation (A.25) is satisfied. In determining the strength of a component, the number of components subjected to the same load is considered by the strength factor Φ_N

$$\Phi_N = \frac{1 - u_{e1} \times v_R}{1 - u_{eN} \times v_R} \quad (\text{A.26})$$

For example, let us calculate Φ_N for $N = 10$ and $v_R = 20\%$. Here, e_N is 0,10.

From Equation (A.24) $e_1 = 1 - (1 - 0,1)^{0,1} = 0,0105$ results. From tables of standardized normal distribution it can be obtained

$$u_{eN} = 1,28 \text{ from } F_R(u_{eN}) = 0,10$$

and

$$u_{e1} = 2,31 \text{ from } F_R(u_{e1}) = 0,0105$$

With these data the strength factor Φ_N can be determined from Equation (A.26):

$$\Phi_N = \frac{1 - 2,31 \times 0,2}{1 - 1,28 \times 0,2} = 0,72$$

The significance of this result is important. When the maximum intensity of a load acts on 10 components the strength of which is represented by a normal density function with a coefficient of variation of 20 %, the reliability is lower than if this load would act just on one component. In order to obtain the same reliability in both cases, the nominal strength in the case of 10 components has to be chosen such that if multiplied by the strength factor $\Phi_N = 0,72$ it will be able to withstand the corresponding design action. When $v_R = 0,075$ and $0,05$, this factor would be 0,92 and 0,94, respectively.

The same consideration applies to insulator strings. The mechanical rating of an insulator string depends on the number of insulators in the string and on strength dispersion, v_R , of insulator units. Assuming $v_R = 0,05$, a string of 80 insulators each rated for R_C , has to be multiplied by 0,9, while a string of 10 of the same insulators has to be multiplied by 0,94. If $v_R = 0,15$, then the strength factor Φ_N becomes 0,68 and 0,81 respectively, thus underlining the importance of N when strength variation is high.

Pour un grand nombre de composants de ligne, la distribution log-normale donne une description plus précise de la variation de la résistance que la distribution normale, en particulier dans la queue inférieure de la distribution. On détermine donc également le facteur de résistance Φ_N pour ce type de distribution. Dans cette hypothèse, Φ_N se calcule alors de la manière suivante:

$$\Phi_N = \frac{R_{e1}}{R_{eN}} \quad (\text{A.27})$$

où R_{e1} correspond à la résistance relative de chaque composant considéré individuellement parmi N composants en série et R_{eN} à la résistance cible de tous les composants en série. Selon l'exemple ci-dessus, la limite d'exclusion est de 0,0105 pour R_{e1} et de 0,1 pour R_{eN} . En présence de la distribution log-normale, on peut utiliser la distribution de Gauss.

$$F_R(u) = e$$

ou, selon l'équation (C.12):

$$u = [\ln(R - p_1) - p_3] / p_2 \quad (\text{A.28})$$

Le terme p_1 est égal à zéro.

Les expressions p_2 et p_3 sont données par les équations (C.17) et (C.18).

$$p_2^2 = \ln(v_R^2 + 1) \quad (\text{A.28})$$

et

$$p_3 = \ln \bar{R} - \frac{1}{2} \ln(v_R^2 + 1) \quad (\text{A.29})$$

Pour l'exemple ci-dessus, qui correspond à une résistance moyenne, $\bar{R}$ est égal à 1,0 et v_R à 0,20.

D'où:

$$p_2^2 = \ln(0,2^2 + 1) = 0,0392; \quad p_2 = 0,198;$$

$$p_3 = -\frac{1}{2} \ln(0,2^2 + 1) = -0,0196$$

si $F_R(u_{eN}) = 0,10$, la distribution de Gauss donne $u_{eN} = -1,28$ et la distribution log-normale $u_{e1} = -2,31$ pour $F_R(u_{e1}) = 0,0105$. On déduit de l'équation (A.28) que:

$$\ln R_{eN} = u_{eN} p_2 + p_3$$

et

$$\ln R_{1N} = u_{1N} p_2 + p_3$$

En conséquence:

$$\ln R_{eN} = -1,28 \times 0,198 - 0,0196 = -0,273; \quad R_{eN} = 0,761;$$

et

$$\ln R_1 = -2,31 \times 0,198 - 0,0196 = -0,477; \quad R_{1N} = 0,621.$$

For many line components the log-normal distribution describes the variation of strength more precisely than the normal distribution, especially at the lower tail of the distribution. Therefore the strength factor ϕ_N is determined for this type of distribution as well. Under this assumption ϕ_N is

$$\phi_N = \frac{R_{e1}}{R_{eN}} \quad (\text{A.27})$$

where R_{e1} is the relative strength of each individual component of N components in series and R_{eN} is the target strength of all components in series. According to the example above R_{e1} is associated with an exclusion limit of 0,0105 and R_{eN} with that of 0,1. For the log-normal distribution the Gaussian distribution can be used

$$F_R(u) = e$$

where, according to Equation (C.12):

$$u = [\ln(R - p_1) - p_3] / p_2 \quad (\text{A.28})$$

The term p_1 is zero.

The expressions p_2 and p_3 are given by Equations (C.17) and (C.18).

$$p_2^2 = \ln(v_R^2 + 1) \quad (\text{A.28})$$

and

$$p_3 = \ln \bar{R} - \frac{1}{2} \ln(v_R^2 + 1) \quad (\text{A.29})$$

For the above example which is carried out relatively to a mean strength, $\bar{R}$ is 1,0 and $v_R = 0,20$.

Hence

$$p_2^2 = \ln(0,2^2 + 1) = 0,0392; \quad p_2 = 0,198;$$

$$p_3 = -\frac{1}{2} \ln(0,2^2 + 1) = -0,0196$$

with $F_R(u_{eN}) = 0,10$, $u_{eN} = -1,28$ results from the Gaussian distribution, and $u_{e1} = -2,31$ for $F_R(u_{e1}) = 0,0105$ as in the case of the normal distribution. From Equation (A.28) it is received

$$\ln R_{eN} = u_{eN} p_2 + p_3$$

and

$$\ln R_{1N} = u_{R1} p_2 + p_3$$

Therefore

$$\ln R_{eN} = -1,28 \times 0,198 - 0,0196 = -0,273; \quad R_{eN} = 0,761;$$

and

$$\ln R_1 = -2,31 \times 0,198 - 0,0196 = -0,477; \quad R_{1N} = 0,621.$$

Il s'ensuit de l'équation (A.27) que $\Phi_N = 0,621/0,761 = 0,82$ au lieu des 0,72 obtenus à partir de la distribution de Gauss.

Le Tableau A.5 illustre des facteurs de résistances Φ_N dépendant du nombre de composants N en série ou en parallèle, soumis simultanément à la charge critique découlant de l'hypothèse de distributions normale et log-normale de leur résistance. Les valeurs relatives à la distribution log-normale sont indiquées entre parenthèses. Celles obtenues à partir d'autres distributions peuvent également être utilisées si elles sont plus représentatives du composant à concevoir.

Tableau A.5 – Facteur de résistance Φ_N relatif à N composants en série soumis à la charge critique

N	Coefficient de variation de la résistance v_R						
	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,98	0,98 (0,97)	0,97 (0,97)	0,94 (0,95)	0,91 (0,93)	0,87 (0,92)	0,84 (0,90)
5	0,96	0,94 (0,94)	0,92 (0,93)	0,85 (0,89)	0,80 (0,86)	0,72 (0,83)	0,64 (0,80)
10	0,94 (0,95)	0,92 (0,93)	0,89 (0,90)	0,81 (0,86)	0,72 (0,82)	0,62 (0,77)	0,51 (0,73)
20	0,93 (0,94)	0,90 (0,91)	0,85 (0,88)	0,77 (0,83)	0,66 (0,77)	0,53 (0,73)	0,38 (0,68)
40	0,92 (0,93)	0,87 (0,89)	0,83 (0,86)	0,72 (0,80)	0,59 (0,74)	0,44 (0,69)	0,26 (0,64)
60	0,91 (0,92)	0,86 (0,88)	0,81 (0,85)	0,70 (0,78)	0,56 (0,72)	0,40 (0,67)	0,20 (0,62)
80	0,91 (0,92)	0,86 (0,88)	0,80 (0,84)	0,68 (0,77)	0,53 (0,71)	0,36 (0,65)	0,16 (0,60)
160	0,90 (0,91)	0,85 (0,87)	0,79 (0,83)	0,67 (0,76)	0,52 (0,69)	0,34 (0,62)	0,13 (0,57)

NOTE Les chiffres entre parenthèses concernent la distribution log-normale.

Lorsque v_R et N prennent une valeur élevée, la valeur de Φ_N est très sensible au choix de la fonction de distribution. Dans ces cas, la fonction de distribution normale ne sera pas appropriée du fait de sa queue inférieure, qui peut aller jusqu'à des valeurs négatives de R . Le choix de la fonction de distribution nécessite donc attention et bon sens de la part de l'ingénieur. Dans la mesure où ces considérations concernent la queue inférieure de la courbe, la distribution log-normale semble plus appropriée que la distribution normale. La plage de valeurs pour lesquelles la différence de Φ_N est supérieure à 10 % est repérée à part et en caractères italiques dans le Tableau A.5.

A.2 Résistance des composants de ligne

A.2.1 Calcul de la résistance caractéristique

La résistance caractéristique est définie comme la résistance garantie pour une probabilité donnée.

Si $\bar{R}$ est la résistance moyenne d'un composant et v_R son coefficient de variation, la résistance caractéristique R_c est donnée par l'équation:

$$R_c = \bar{R} (1 - u_e v_R) \quad (\text{A.30})$$

La valeur de v_R dépend de la nature du matériau et du mode de fabrication (contrôle de qualité). La variable u_e dépend de la fonction de distribution de la résistance du composant et de la probabilité de dépasser la résistance garantie, représentée par la limite d'exclusion e .

From Equation (A.27) it follows $\Phi_N = 0,621 / 0,761 = 0,82$ instead of 0,72 which was obtained from the Gaussian distribution.

Table A.5 depicts strength factors Φ_N depending on the number of components N in series or in parallel subjected simultaneously to the critical load obtained under the assumption of a normal and a log-normal distribution of their strength. The values for the latter are given in parenthesis. Values derived from other distributions can be used if more representative of the component being designed.

Table A.5 – Strength factor Φ_N related to N components in series subjected to the critical load

N	Strength coefficient of variation v_R						
	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,98	0,98 (0,97)	0,97 (0,97)	0,94 (0,95)	0,91 (0,93)	0,87 (0,92)	0,84 (0,90)
5	0,96	0,94 (0,94)	0,92 (0,93)	0,85 (0,89)	0,80 (0,86)	0,72 (0,83)	0,64 (0,80)
10	0,94 (0,95)	0,92 (0,93)	0,89 (0,90)	0,81 (0,86)	0,72 (0,82)	0,62 (0,77)	0,51 (0,73)
20	0,93 (0,94)	0,90 (0,91)	0,85 (0,88)	0,77 (0,83)	0,66 (0,77)	0,53 (0,73)	0,38 (0,68)
40	0,92 (0,93)	0,87 (0,89)	0,83 (0,86)	0,72 (0,80)	0,59 (0,74)	0,44 (0,69)	0,26 (0,64)
60	0,91 (0,92)	0,86 (0,88)	0,81 (0,85)	0,70 (0,78)	0,56 (0,72)	0,40 (0,67)	0,20 (0,62)
80	0,91 (0,92)	0,86 (0,88)	0,80 (0,84)	0,68 (0,77)	0,53 (0,71)	0,36 (0,65)	0,16 (0,60)
160	0,90 (0,91)	0,85 (0,87)	0,79 (0,83)	0,67 (0,76)	0,52 (0,69)	0,34 (0,62)	0,13 (0,57)

NOTE Values in parenthesis refer to log-normal distribution.

For high values of v_R and N the value Φ_N is very sensitive to the choice of the distribution function. In these cases, the normal distribution function will not be adequate because of its lower tail that can extend to negative values of R . Therefore, care and engineering judgement is necessary in the selection of an appropriate distribution functions. Since these considerations refer to the lower tail of the distribution, the log-normal distribution seems more adequate than the normal distribution. The range of values where the difference in Φ_N is more than 10 % is separated in Table A.5 and shown in italic characters.

A.2 Strength of line components

A.2.1 Calculation of characteristic strength

The characteristic strength is defined as the strength guaranteed with a given probability.

If $\bar{R}$ is the mean strength of a component and v_R its coefficient of variation, then the

characteristic strength R_c is given by equation:

$$R_c = \bar{R} (1 - u_e v_R) \quad (\text{A.30})$$

The value of v_R depends on the type of material and the fabrication practice (quality control). The variable factor u_e depends on the distribution function of the strength of the component and on the probability of exceeding the guaranteed strength, represented by the exclusion limit e .

Dans la plupart des pays, la résistance caractéristique des composants des lignes correspond à une limite d'exclusion (probabilité de ne pas être atteinte) inférieure à 10 % et généralement de l'ordre de 2 % à 5 %. Prendre pour hypothèse une résistance caractéristique assortie d'une limite d'exclusion plus élevée se traduirait par un sous-dimensionnement d'un nombre significatif de composants, tandis qu'une limite d'exclusion très basse pourrait se révéler coûteux, en particulier pour les composants dont le v_R est élevé. Par conséquent, des valeurs de 2 % à 5 % correspondent à un compromis économique raisonnable. Si l'on suppose une distribution normale pour la résistance R , u_e sera ainsi compris entre 1,60 et 2,10.

Ainsi, pour garantir une limite d'élasticité minimale de 300 MPa pour une nuance d'acier donnée, un fabricant sachant que le coefficient de variation est de 0,05, produira généralement un acier dont la résistance moyenne est de $300 / (1 - 2,10 \times 0,05) = 340$ MPa. La probabilité de ne pas satisfaire à la résistance minimale (ou résistance caractéristique) est alors très faible: de l'ordre de 2 %. Il en va de même pour les isolateurs pour lesquels les compilations de données sur la résistance caractéristique montrent que celle-ci correspond à une limite d'exclusion très basse (environ 0,1 %).

La limite d'exclusion de 10 % utilisée dans l'équation représentant la fiabilité (A.6) peut donc être rapportée à la valeur caractéristique au moyen de l'expression suivante.

$$(10\%)R = (1 - 1,28v_R)\bar{R} = \frac{(1 - 1,28v_R)R_c}{1 - u_e v_R} \quad (\text{A.31})$$

ou
$$(10\%)R = \Phi_c R_c \quad (\text{A.32})$$

Si elle est inconnue, la valeur de u_e peut être estimée en s'aidant du Tableau A.6, qui se fonde sur la fréquence des rejets calculés à partir de la distribution normale.

Tableau A.6 – Valeurs de u_e associées aux limites d'exclusion

	Fréquence de rejet estimée		
	Rejet fréquent	Rejet peu fréquent	Rejet rare
Limite d'exclusion e	Environ 10 %	2 % à 5 %	< 2 %
u_e	1,28	1,6	2,1

Φ_c est un facteur de correction applicable à la résistance caractéristique R_c s'il existe suffisamment de preuves ou de données garantissant que la limite d'exclusion de R_c n'est pas égale à 10 %.

$$\Phi_c = (1 - 1,28 v_R) / (1 - u_e v_R) \quad (\text{A.33})$$

Dans les cas typiques, Φ_c peut être considéré comme égal à 1,0, ce qui devrait normalement conduire à une conception satisfaisante en termes de fiabilité.

A.3 Mesurage des températures et interprétation des mesures

A.3.1 Généralités

Dans la présente norme, des données sur la température sont nécessaires pour la température minimale de conception et le givrage atmosphérique.

Les variations de température à l'intérieur du conducteur découlent soit de la convection due à la combinaison d'air plus chaud ou plus froid et de vent, soit de variations dans l'équilibre du rayonnement dues, par exemple, à l'ensoleillement ou à la couverture nuageuse. Ces variations se produisent principalement par temps calme. La chaleur rayonnée par les constructions ou la végétation environnantes, par exemple, peut également influencer sur les

The characteristic strength of line components in most countries corresponds to an exclusion limit (probability of not being achieved) lower than 10 % and usually in the order of 2 % to 5 %. Assuming a characteristic strength with a higher exclusion limit would produce a significant number of under-strength components and a very low exclusion limit may not be cost-effective, specially for components with high v_R . Thus, values from 2 % to 5 % correspond to a practical economic balance. If a normal distribution is assumed for strength R , u_e would thus vary between 1,60 and 2,10.

For example, in order to guarantee a minimum yield point of 300 MPa for a given grade of steel, a manufacturer, knowing that the coefficient of variation is 0,05, will generally produce a steel which has an mean strength of $300 / (1 - 2,10 \times 0,05) = 340$ MPa. The probability of not meeting the minimum strength (or the characteristic strength) is quite low and is in the order of 2 %. The same approach applies to insulators where it was found from compiled strength data that the characteristic strength corresponds to a very low exclusion limit (approximately 0,1 %).

Consequently, the exclusion limit of 10 % used in the reliability Equation (A.6) can be related to the characteristic value by means of:

$$(10\%)R = (1 - 1,28v_R)\bar{R} = \frac{(1 - 1,28v_R)R_c}{1 - u_e v_R} \quad (\text{A.31})$$

or
$$(10\%)R = \phi_c R_c \quad (\text{A.32})$$

If the value of u_e is not known, it can be estimated according to Table A.6 which is based on the frequency of rejects calculated from the normal distribution.

Table A.6 – Values of u_e associated to exclusion limits

	Estimated frequency of rejects		
	Frequent	Some	Rare
Exclusion limit e	About 10 %	2 % to 5 %	< 2 %
u_e	1,28	1,6	2,1

ϕ_c is a correction factor that can be applied to the characteristic strength R_c if there is enough evidence or data to warrant that the exclusion limit of R_c is different from 10 %.

$$\phi_c = (1 - 1,28 v_R) / (1 - u_e v_R) \quad (\text{A.33})$$

In typical cases ϕ_c can be considered equal to 1,0 which should normally lead to a satisfying design reliability.

A.3 Temperature measurements and their interpretation

A.3.1 General

The need for temperature data is, in this standard, related to design minimum temperature and atmospheric icing.

Temperature variations in the conductor are due to either convection of colder/warmer air combined with wind, or changes in the radiation balance due to sunshine, cloud cover, etc. mostly in still weather. Radiation from surrounding buildings, vegetation, etc. may influence thermometers as well. For these reasons it is important that thermometers are properly shielded and ventilated, and that the location is appropriate for the purpose of measurements.

thermomètres. Pour ces raisons, il importe que les thermomètres soient correctement isolés et ventilés, et implantés en un lieu approprié aux mesurages. Les écrans contre le rayonnement utilisés pour les mesurages météorologiques sont pour la plupart en bois. Les écrans de plus petite taille, en métal ou en plastique, présentent une masse thermique moindre et les fluctuations de température s'y communiquent plus rapidement. Pour les mesurages effectués électroniquement à l'intérieur de ces écrans, il est recommandé de recourir à des périodes d'intégration de 1 min à 3 min.

La hauteur de mesure standard est de 2 m au-dessus du sol.

L'exactitude requise peut varier selon la finalité des mesurages. Pour les études du givrage, en particulier en ce qui concerne la neige collante, il faut prévoir une précision suffisante.

En règle générale, il est conseillé de consulter les services météorologiques pour optimiser le choix du ou des sites et des capteurs, ainsi que l'acquisition des données et l'interprétation de toute mesure climatique. Il convient que les enregistrements de température, comme tout autre mesurage météorologique, soient reliés à des mesures météorologiques standard fournies par ce que l'on appellera, dans la présente norme, des stations de référence. Cette disposition permet en particulier de réduire la durée des mesurages nécessaires. En outre, il peut, ainsi, être relativement aisé d'adapter les statistiques existantes au site considéré.

A.3.2 Emplacement des mesurages de référence

Des observations météorologiques officielles sont régulièrement réalisées sur des terrains dégagés et plats, comportant peu d'arbres et seulement des bâtiments dispersés dans un rayon de quelques kilomètres. Il s'agit très souvent d'aéroports. Les données provenant de ces stations sont donc principalement représentatives des zones étendues, et il est relativement facile de les corrélérer avec d'autres sites.

A.3.3 Localisation des thermomètres

Il est impossible d'énoncer des règles générales gouvernant la localisation des thermomètres. Néanmoins, il convient d'évaluer les sites de mesure en s'attachant aux paramètres suivants:

- végétation;
- forêts;
- bâtiments;
- exposition au vent;
- flux d'air froid ou cuvettes (en hiver);
- chauffage des terrains (en pente) par le soleil (en été);
- rayonnement émanant des bâtiments, forêts, roches, etc. environnants;
- hauteur par rapport au sol (hauteur standard 2 m).

Il convient de jauger l'importance de ces effets à la lumière de l'exactitude recherchée pour l'étude.

Lorsque les mesurages de température sont effectués en zone sujette au givre, il importe de surveiller le givrage de l'écran lui-même. En effet, l'accumulation de givre à cet endroit aura généralement pour effet d'accroître la masse thermique, et donc la constante de temps du système de captage lorsque les températures sont inférieures au point de givre. Lorsque la température de l'air de l'environnement repasse au-dessus de ce point de givre, le givre commence à fondre, mais la température à l'intérieur de l'écran demeure de 0 °C, jusqu'à la disparition complète du givre. Le seul moyen de garantir la qualité des données de température en présence de givre consiste donc à surveiller et à nettoyer l'écran avec soin.

Radiation shields are, for standard meteorological measurements, mostly made of wood. Smaller screens made of metal or plastic have less thermal mass and take more rapid fluctuations in temperature. Averaging periods of 1 min to 3 min are recommended for electronically controlled measurements in such screens.

The standard measuring height is 2 m above ground.

The required accuracy of data may vary with the purpose of the measurements. For icing studies, especially wet snow, sufficient accuracy must be considered.

As a general rule, it is suggested to consult meteorological institutions in order to optimize the location(s), selection of sensors, data acquisition and interpretation of any weather measurements. Temperature recordings, like any other meteorological measurements should be linked to standard meteorological measurements from, which are called here, reference stations. This will reduce the especially the length of necessary measurements, but also existing statistics may relatively easily be transferred to the site in question.

A.3.2 Location of reference measurements

Official meteorological observations are regularly taken from open, flat terrain with few trees and scattered buildings within a radius of some kilometres, typically airports. Data from such stations are therefore mostly representative for wide areas, and are relatively easy to correlate with other sites.

A.3.3 Localization of thermometers

General rules for the localization of thermometers are not possible to specify, however the measurement sites should be evaluated regarding:

- vegetation;
- forests;
- buildings;
- ventilation;
- cold air flows or basins (in winter);
- heating of (sloping) ground by sunshine (in summer);
- radiation from surrounding buildings, forests, rock, etc.;
- height above ground (standard height 2 m).

The importance of these effects should be related to the required accuracy for the study.

When the temperature measurements are performed in an icing environment, it is important to monitor the icing on the screen itself. Accumulated ice on the screen will generally increase the thermal mass and hence the time constant of the sensing system in sub-freezing temperatures. When the temperature of the surrounding air rises above the freezing point, the ice starts to melt and the temperature within the screen remains at 0 °C until the ice has melted away. The only way to ensure good temperature data under icing conditions is careful monitoring and cleaning of the screen.

Pour les hauteurs spéciales, c'est-à-dire supérieures à environ 25 m, il est recommandé de mesurer la température à aux moins deux niveaux.

A.3.4 Interprétation des mesures

Une fois que les sites de mesurage ont été soigneusement choisis et que les capteurs sont correctement installés et entretenus, la corrélation des données est généralement assez simple. Dans la plupart des cas, il convient que le traitement statistique des données – analyse des valeurs extrêmes, par exemple – s'effectue à partir des données provenant de la station de référence. Ces données peuvent ensuite être transposées au site envisagé au moyen de facteurs de correction déterminés à partir des mesurages effectués parallèlement.

L'analyse des données peut souvent se limiter aux conditions météorologiques à prendre en considération, par exemple les situations présentant des probabilités de givrage.

S'il s'agit seulement de déterminer la température minimale pour le réglage des conducteurs ($T_{\min av}$), on peut se contenter de trouver la corrélation entre le site de mesurage et la station de référence en période de froid.

Si les températures minimales suivent une loi de distribution des valeurs extrêmes, il est possible d'appliquer une distribution de Gumbel de type I, telle que développée à l'Article C.4. Il convient de relever les températures minimales journalières. La température minimale journalière moyenne en sera déduite ainsi que la plus basse température annuelle $T_{\min}$ relevée sur un certain nombre d'années. Ces valeurs serviront à calculer la température minimale annuelle moyenne ($T_{\min av}$), ainsi que les coefficients C et β de la relation suivante:

$$\frac{T_R}{T_{\min av}} = 1 + C - \beta \cdot \ln [-\ln (1 - P_T)] \quad (\text{A.34})$$

où T_R est la valeur de la plus basse température minimale annuelle ayant une probabilité P_T d'être dépassée une fois par an.

A.3.5 Durée des mesurages

Les mesurages des températures à des fins de conception et de planification doivent normalement s'inscrire dans une période suffisamment longue pour permettre d'établir une corrélation aussi précise que nécessaire avec la ou les stations de référence. Une période d'un à deux ans (saisons) est la plupart du temps suffisante.

A.3.6 Application à d'autres sites

Lorsque des données provenant d'un site doivent être appliquées à d'autres, il convient de noter, comme l'indique A.3.2, que la température de l'air varie normalement moins dans l'axe horizontal que dans l'axe vertical. En conséquence, la température mesurée sur un site peut être applicable à une zone relativement étendue dès lors que le terrain et l'altitude sont comparables.

A.4 Détermination de la vitesse de référence météorologique du vent

A.4.1 Rugosité du terrain

L'action du vent est influencée par la rugosité du terrain. Plus cette rugosité est forte, plus le vent est freiné et turbulent. La rugosité du terrain intervient dans la détermination, d'une part, de la vitesse du vent pour la conception et, d'autre part, du facteur de rafale.

For special stands higher than about 25 m it is recommended to measure the temperature at least at two levels.

A.3.4 Interpretation of the measurements

When the sites for temperature measurements are carefully selected and the sensors properly installed and maintained, the correlation of data is, in most cases, straightforward. In most cases, the statistical treatment of data, such as extreme value analyses, should be carried out on the data from the reference station. Values from the reference station may then be transferred to the local site by means of correction factors found from the parallel measurements.

The data analysis may often be restricted to the weather conditions in question, for instance to situations with probability of icing.

If the purpose is only to establish the minimum temperature for conductor tension ($T_{\min av}$), it is sufficient to find the correlation between the measuring site and the reference station during cold spells.

If the minimal temperatures follow an extreme value distribution law, Gumbel type I of all formulations developed in Clause C.4 can be applied. The daily minimum temperatures should be recorded. The mean daily minimum temperatures will be deduced, as well as the lowest annual minimum temperature $T_{\min}$ recorded over a certain number of years. These values will be used to compute the mean annual minimum temperature ($T_{\min av}$) as well as the coefficients C and β of the following relation:

$$\frac{T_R}{T_{\min av}} = 1 + C - \beta \cdot \ln [-\ln (1 - P_T)] \quad (\text{A.34})$$

where T_R is the value of the lowest annual minimum temperature having a probability P_T of being exceeded once a year.

A.3.5 Duration of measurement

Temperature measurements for design and planning purposes should last for a period long enough to establish correlation with the reference station(s) with the required accuracy, 1 to 2 years (seasons) are in most cases sufficient.

A.3.6 Application to other sites

When data from one site is to be applied on other sites it is worth noting, as mentioned in A.3.2, that the air temperature may vary less horizontally than vertically. Therefore, the temperature measured at one site may be applicable to a rather wide area with similar terrain in the same level.

A.4 Determination of the meteorological reference wind speed

A.4.1 Roughness of terrain

Wind action is influenced by the terrain roughness. The greater this roughness, the more turbulent and slower is the wind. The terrain roughness has an influence both on the determination of the wind speed for the design and on the determination of the gust factor.

Quatre catégories de terrain sont envisagées, par ordre croissant de rugosité, comme l'indique le Tableau A.7.

Tableau A.7 – Définition des catégories de terrain

Catégorie de terrain	Caractéristiques du terrain traversé par une ligne
A	Vastes étendues d'eau dans la direction d'où vient le vent, régions côtières plates, déserts plats
B	Terrains dégagés avec très peu d'obstacles, par exemple landes ou champs cultivés avec peu d'arbres ou de bâtiments
C	Terrains comportant de nombreux petits obstacles de faible hauteur (haies, arbres et bâtiments)
D	Voisinages des villes ou terrains comportant de nombreux arbres de grande taille

Les lignes traversant des zones très urbanisées relèvent normalement de la zone de rugosité D. La valeur de la rugosité y est en effet très difficile à évaluer. Cependant, sachant que ces lignes doivent normalement présenter une fiabilité supérieure, il est proposé de considérer ces terrains, pour la conception, comme relevant de la catégorie B ou C.

Pour une ligne qui suit la crête d'une colline, il convient, par prudence, de choisir une rugosité de terrain inférieure d'une catégorie à celle retenue pour la zone dans son ensemble. Pour une ligne en creux de vallée, il convient de sélectionner la rugosité C dans tous les cas, quelles que soient les caractéristiques du terrain.

A.4.2 Evaluation des mesures météorologiques

On évalue l'action du vent en se fondant sur la vitesse de référence du vent V_R , définie comme la vitesse moyenne du vent sur une période de 10 min, à une hauteur de 10 m au-dessus du sol (voir Tableau A.7).

Les stations météorologiques (à l'exception de celles situées en bord de mer ou en zone urbaine) se trouvent habituellement dans les zones de rugosité B. La vitesse de référence du vent sur les terrains de cette catégorie est notée V_{RB} .

On peut néanmoins enregistrer la vitesse météorologique du vent sur un site de rugosité x , à 10 m au-dessus du sol, sous forme de moyenne sur un temps t en s. Soit $V_{x,t}$ cette vitesse. (Si le mesurage s'effectue à une autre hauteur, il convient de commencer par corriger les données en conséquence.)

Les courbes de la Figure A.7 permettent de déterminer le rapport $V_{x,t} / V_{x,10 \text{ min}}$ en fonction de la période d'intégration retenue pour chaque catégorie de rugosité à l'emplacement du site météorologique. Ces valeurs peuvent être utilisées en l'absence de données ou d'études locales tel qu'indiqué dans la note de 6.2.3.

Connaissant $V_{x,10 \text{ min}}$, on détermine V par la relation suivante:

$$V = V_{x,10 \text{ min}} / K_R \quad (\text{A.35})$$

Les valeurs relatives à K_R sont fournies au Tableau A.8.

Four categories of terrain, of increasing roughness, are considered as indicated in Table A.7.

Table A.7 – Definition of terrain category

Terrain category	Characteristic of the terrain crossed by a line
A	Large stretch of water up-wind, flat coastal area, flat dessert
B	Open country with very few obstacles, for instance moorlands or cultivated field with a few trees or buildings
C	Terrain with numerous small obstacles of low height (hedges, trees and buildings)
D	Suburban areas or terrain with many tall trees

Lines crossing highly urbanized areas should be considered in a D terrain roughness. The value of the terrain roughness is very difficult to assess for these areas. However, due to the derived higher reliability of lines in these areas, design according to terrain category B or C are proposed.

For a line that follows the ridge of a hill, a terrain roughness which is smoother by one category than the one chosen for the area should be selected in order to be conservative. For a line running along a valley, the C roughness should be chosen for all cases, whatever the terrain characteristics may be.

A.4.2 Assessment of meteorological measurements

Wind action is evaluated on the basis of the reference wind speed V_R defined as mean value of the wind during a 10 min period at a level of 10 m above ground (see Table A.7).

Usually, meteorological stations (except those along the coast or in urban areas) are placed in areas of B terrain category. The reference wind speed in terrain category B is V_{RB} .

Nevertheless, the meteorological wind speed may be recorded in a terrain category x site at 10 m above the ground as a mean value over a period of time t in s. Let $V_{x,t}$ be this speed. (If it is not measured at 10 m height above ground, the data should be adjusted first to this level.)

The curves of Figure A.7 enable to determine the ratio $V_{x,t} / V_{x,10 \text{ min}}$ as a function of the averaging period for each category of roughness at the location of the meteorological site. These values may be used in the absence of local data or studies as indicated in the note in 6.2.3.

For a known $V_{x,10 \text{ min}}$, V is given by the following relation:

$$V = V_{x,10 \text{ min}} / K_R \quad (\text{A.35})$$

Values for K_R are given in Table A.8.

Tableau A.8 – Facteurs décrivant l'action du vent en fonction de la catégorie de terrain

Facteur	Catégorie de terrain			
	A	B	C	D
Z_0 (longueur de rugosité) (m)	0,01	0,05	0,30	1,00
α	0,10 à 0,12	0,16	0,22	0,28
K_R	1,08	1,00	0,85	0,67

Il n'a pas été tenu compte de la variation de V en fonction de la hauteur, les anémomètres étant la plupart du temps placés à une hauteur voisine de 10 m au-dessus du sol environnant. Si cette hauteur z (m) est différente de 10 m, la variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur z peut être déduite de la loi exponentielle énoncée par l'équation (A.36), la valeur de α étant donnée par le Tableau A.8.

$$V_z = V_R \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (\text{A.36})$$

Ou, plus généralement:

$$V_{z1} = V_{z2} \left(\frac{z1}{z2} \right)^\alpha \quad (\text{A.37})$$

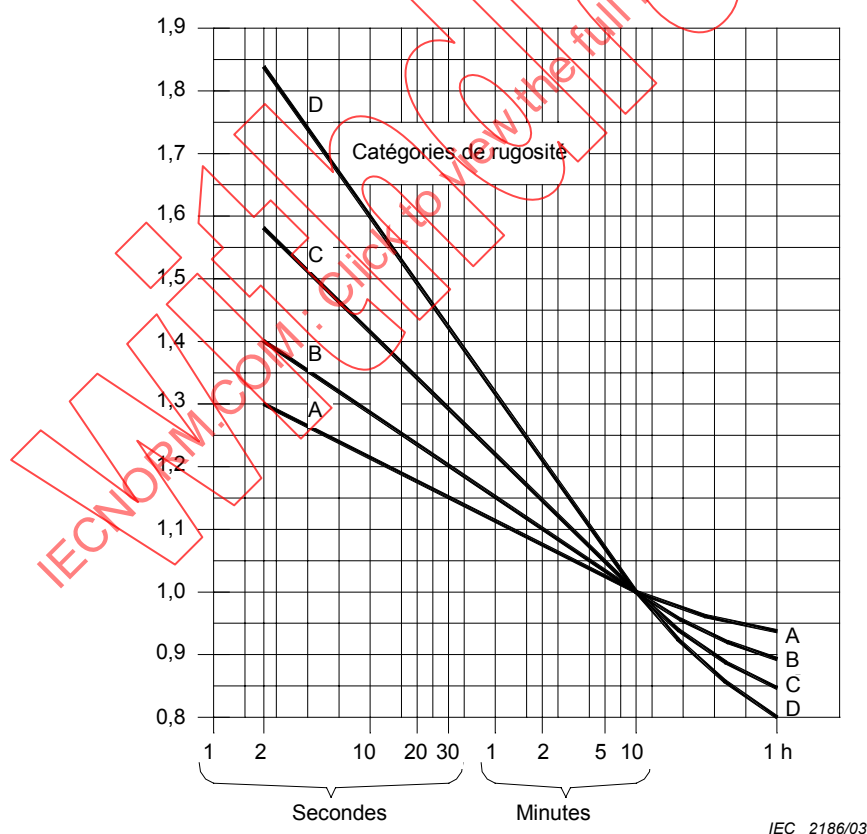


Figure A.7 – Relation entre les vitesses météorologiques du vent à 10 m de hauteur, en fonction de la catégorie de terrain et de la période d'intégration

Table A.8 – Factors describing wind action depending on terrain category

Factor	Terrain category			
	A	B	C	D
Z_0 (roughness length) (m)	0,01	0,05	0,30	1,00
α	0,10 to 0,12	0,16	0,22	0,28
K_R	1,08	1,00	0,85	0,67

The variation of V in terms of height was not taken into account, as anemometers are, most of the time, placed at a height of about 10 m above surrounding ground. If this height z (m) differs from 10 m, the variation of wind speed with height z can be derived from the so-called “power law”, shown in (A.36) may be used. α is found in Table A.8.

$$V_z = V_R \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (\text{A.36})$$

Or more generally:

$$V_{z1} = V_{z2} \left(\frac{z1}{z2} \right)^\alpha \quad (\text{A.37})$$

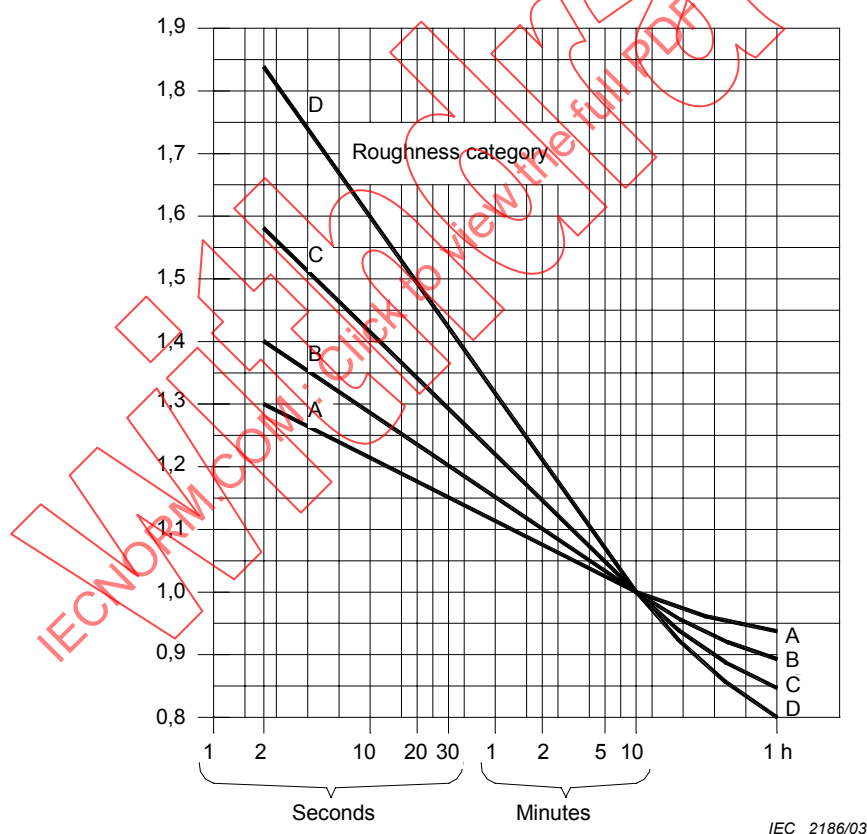


Figure A.7 – Relationship between meteorological wind velocities at a height of 10 m depending on terrain category and on averaging period

A.4.3 Détermination à partir des vitesses de vent de gradient

Lorsque les stations météorologiques sont éloignées des sites envisagés pour la construction de la ligne, la vitesse de vent de gradient, définie comme la vitesse à un niveau situé au sommet de la couche limite terrestre, c'est-à-dire entre 800 mm et 1 000 m au-dessus du sol, peut être utilisée comme base de détermination des vitesses de vent pour la conception.

L'action du vent de gradient est caractérisée par la valeur moyenne des vitesses maximales annuelles de vent de gradient $\bar{V}_G$ et par l'écart type σ_{V_G} de cette valeur. En partant de la vitesse du vent $\bar{V}_G$, on peut déterminer la valeur approchée de la moyenne des valeurs maximales annuelles $\bar{V}_m$ (à 10 m au-dessus du sol) à l'aide de l'équation suivante:

$$\bar{V}_m (B) = 0,5 \bar{V}_G \quad (\text{A.38})$$

Les données relatives à $\bar{V}_G$ peuvent généralement être obtenues auprès des services météorologiques nationaux.

A.4.4 Mesures du vent

Il convient de traiter les mesures du vent selon les lignes directrices de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), en particulier afin de comparer les données collectées aux mesures normalisées à plus long terme. Il convient à cet égard de tenir compte des paramètres suivants:

- emplacement dégagé et représentatif de la situation considérée (nature du terrain);
- hauteur au-dessus du sol (valeur standard: 10 m);
- période d'intégration (valeur standard: 10 min pour la vitesse moyenne du vent, et 3 s à 5 s pour les rafales);
- direction du vent.

Il est recommandé d'examiner les questions concernant, notamment, l'instrumentation, le choix des sites de mesurage, les protocoles d'enregistrement ou les analyses des données avec des experts expérimentés en aérodynamique.

Pour les besoins de la présente norme, on suppose que les vitesses maximales annuelles du vent sont enregistrées sur une période de n ans et peuvent être traitées de la manière décrite en B.2.1.

A.4.5 Action du vent

A.4.5.1 Généralités

La procédure décrite en A.4.2 permet de calculer V dès lors que la vitesse météorologique n'est pas mesurée dans les conditions types.

La vitesse maximale moyenne du vent V_m est le maximum de V , mesuré sur une année.

Les hypothèses de charge doivent normalement considérer les cas suivants:

- grand vent;
- vent réduit associé à une température minimale.

L'hypothèse de température minimale est rarement critique pour les supports de suspension, mais demande à être contrôlée pour les supports d'ancrage ou d'arrêt, en particulier lorsque les portées sont courtes.

A.4.3 Determination from gradient wind velocities

Where meteorological stations are remote from the locations considered for the erection of the line, the gradient wind speed, defined as the speed at the level on the top of the earth's boundary layer, which is 800 mm to 1 000 m above ground, may be used as a basis for assessment of design wind velocities.

The gradient wind action is characterized by the mean value of yearly maximum gradient wind velocities $\bar{V}_G$ and its standard deviation σ_{VG} . From the wind speed $\bar{V}_G$ the mean of the yearly maxima $\bar{V}_m$ (10 m above ground) can be approximated by the following equation:

$$\bar{V}_m (B) = 0,5 \bar{V}_G \quad (\text{A.38})$$

Data for $\bar{V}_G$ can usually be obtained from national weather services.

A.4.4 Wind measurements

Wind measurements should be handled according to guidelines given by the World Meteorological Organization (WMO), especially in order to compare collected data with longer time series of standardized measurements. The following parameters should be considered:

- open and representative location for the purpose (type of terrain);
- height above ground (standard 10 m);
- averaging time (standard 10 min for mean wind speed, 3 s to 5 s for gusts);
- wind direction.

It is recommended that questions regarding instrumentation, selection of measuring sites, logging protocols, data analyses etc. are discussed with experienced experts in wind engineering.

For the purpose of this standard, it is assumed that the yearly maximum wind velocities are recorded over a period of n years and can be processed as described in B.2.1.

A.4.5 Wind action

A.4.5.1 General

A procedure is described in A.4.2 to compute V whenever the meteorological speed is not measured in the standard conditions.

The yearly maximum wind speed V_m is the maximum of V measured over a year.

The loading assumptions should consider

- high wind assumption,
- reduced wind associated with minimum temperature.

Minimum temperature assumption is not usually critical for suspension supports, but should be checked for tension or dead-end supports, particularly for short spans.

A.4.5.2 Vitesse de référence du vent pour la conception

a) Vitesse de référence du vent

La détermination de la vitesse de référence du vent V_R dépend du niveau de fiabilité retenu pour la conception de la ligne.

La vitesse de référence du vent V_R est déterminée à partir de la vitesse moyenne, au moyen des équations (B.7) ou (B.8) de l'Annexe B, de la moyenne $\bar{V}_m$ des vitesses maximales annuelles V_m et de l'écart type σ_{V_m} de la distribution statistique de ces vitesses, ainsi que de la période de retour T et des paramètres C_1 et C_2 , qui dépendent eux-mêmes du nombre d'années d'observations.

Tableau A.9 – Valeurs de la vitesse de référence du vent V_R

Période de retour T (a)	$V_R / \bar{V}_m$		
	$v_v = 0,12$	$v_v = 0,16$	$v_v = 0,20$
50	1,31	1,41	1,52
150	1,41	1,55	1,69
500	1,53	1,70	1,88

Dans le Tableau A.9, le rapport $V_R / \bar{V}_m$ s'applique à des coefficients de variation typiques. Une valeur de $v_v = 0,12$ a été constatée dans plusieurs pays d'Europe. Les valeurs de ce tableau correspondent à des cas pour lesquels on dispose d'un très grand nombre d'années d'observation. Dans les autres cas, il convient de se reporter à l'Article B.2 pour déterminer le rapport $V_R / \bar{V}_m$ en tenant compte du nombre d'années d'observation.

Dans les zones soumises à des vents très violents, mais peu fréquents (typhons, rafales descendantes ou tornades, par exemple), une étude spéciale est nécessaire pour déterminer la loi de distribution des valeurs maximales, qui ne peut se déduire des seules valeurs maximales annuelles des vitesses.

Si la ligne de transport à concevoir ne se situe pas dans un terrain de catégorie B, la vitesse de référence du vent V_R doit être multipliée par le facteur de terrain V_R . Ce facteur est intégré au calcul de la pression dynamique du vent (A.4.5.3). La nouvelle vitesse du vent prend alors la forme suivante:

La vitesse de référence du vent nécessaire au calcul des forces de vent dans un terrain n'appartenant pas à la catégorie B:

$$V_{RX} = K_R V_{RB} \quad (\text{A.39})$$

où K_R est un coefficient tenant compte de la rugosité du terrain à l'emplacement de la ligne et dans ses environs (voir Tableau A.8).

Pour des sites de rugosité intermédiaire, la valeur de K_R peut être interpolée. En estimant la valeur de la rugosité du sol, il importe de tenir compte des changements prévisibles au voisinage du tracé de la ligne. Lorsqu'on détermine les efforts de vent en se fondant sur une seule série de mesures, il importe de vérifier la cohérence des résultats par recoupement avec l'expérience disponible sur des lignes et des terrains comparables.

A.4.5.2 Reference wind speed for design

a) Reference wind speed

The determination of the reference wind speed V_R depends upon the reliability level for which the line will be designed.

The reference wind speed V_R is determined from the mean speed using Equations (B.7) or (B.8) of Annex B from the mean speed $\bar{V}_m$ of the yearly maximum velocities V_m and the standard deviation σ_{V_m} of the statistical distribution of these velocities as well as from the return period T and the parameters C_1 and C_2 , which depend on the numbers of years with observations.

Table A.9 – Values of reference wind speed V_R

Return period T (a)	$V_R / \bar{V}_m$		
	$v_v = 0,12$	$v_v = 0,16$	$v_v = 0,20$
50	1,31	1,41	1,52
150	1,41	1,55	1,69
500	1,53	1,70	1,88

In Table A.9 the ratio $V_R / \bar{V}_m$ is given for typical coefficients of variations. In Europe, a value of $v_v = 0,12$ was found in several countries. The values in this table are given for cases where the number of years of observations is very large. In other cases, refer to Clause B.2 for deriving the ratio of $V_R / \bar{V}_m$ considering the number of years with observations.

For areas subject to very high wind speed but infrequent winds (such as typhoons, downbursts, or tornadoes), a special study is required for the determination of the distribution law of maximum values, which cannot be deducted solely from the yearly maximum velocities.

If the transmission line is to be designed in a terrain type different from B category, the reference wind speed V_R shall be multiplied by terrain factor V_R . This factor is integrated in the calculation of dynamic wind pressure of A.4.5.3 where the new wind speed becomes:

Reference wind speed for computing wind forces in a terrain type other than B category

$$V_{RX} = K_R V_{RB} \quad (\text{A.39})$$

where K_R is a factor which takes into account the roughness of the ground at the location of the line and in the surrounding area (see Table A.8).

For sites of intermediate roughness, K_R can be interpolated. In estimating the value of the terrain roughness, it is necessary to consider the foreseeable changes in the surrounding of the route of the line. When deriving wind actions just from a single series of measurements, the consistency of the results has to be cross-checked against experience with comparable lines and terrain.

On doit considérer que les vitesses de vent définies ci-dessus pour le calcul s'observent à une température de l'air égale à la moyenne des températures quotidiennes minimales propres au site. Cette moyenne peut être obtenue par analyse des enregistrements réalisés sur un certain nombre d'années dans une station météorologique aussi proche que possible de la ligne. On pourra aussi prendre pour température coïncidente de l'air la température minimale définie plus loin, majorée de 15 °C.

b) Hypothèse de vent réduit

Il convient d'envisager l'hypothèse de vent réduit en conjonction avec une température minimale. Il est recommandé de considérer que la température minimale est égale à la valeur minimale annuelle assortie d'une probabilité d'apparition de 2 % ou d'une période de retour de 50 ans. Le paragraphe A.3.4 présente une méthode pour déterminer cette valeur. Si la ligne se trouve à un emplacement où la température minimale de l'air peut être influencée par la topographie locale, il est nécessaire d'en tenir compte.

On choisira une vitesse de vent réduite égale à la vitesse de référence du vent V_R retenue pour l'hypothèse de grand vent, multipliée par un coefficient représentant les conditions météorologiques locales. Faute de connaissance suffisante des conditions locales, il est recommandé d'adopter la valeur de 0,6 pour ce coefficient.

A.4.5.3 Action unitaire du vent sur un élément quelconque de la ligne et pression dynamique de référence

La valeur caractéristique a de l'effort unitaire en N/m^2 dû à un vent soufflant à l'horizontale, perpendiculairement à un élément quelconque de la ligne (conducteurs, isolateurs, supports, ou parties de ces composants) est donnée par l'expression:

$$a = q_0 C_x G \quad (A.40)$$

où

q_0 est la pression dynamique de référence du vent;

C_x est le coefficient de traînée dépendant de la forme de l'élément considéré;

G est le facteur combiné de vent tenant compte de la turbulence du vent. Il est fonction de la réponse dynamique de l'élément considéré (réaction aux rafales). Il dépend également de la hauteur de cet élément par rapport au sol et, dans le cas des conducteurs, de la longueur de portée, telle qu'indiquée en 6.2.6.

La pression dynamique de référence q_0 est donnée en fonction de la vitesse de référence du vent V_{RX} à 10 m au-dessus du sol à l'emplacement de la ligne (voir l'équation A.39).

$$q_0 = \frac{1}{2} \mu \times \tau \times V_{RB}^2 K_R^2 = \frac{1}{2} \mu \times \tau \times V_{RX}^2 \quad (A.41)$$

où

μ est la masse volumique de l'air (égale à 1,225 kg/m^3 à une température de 15 °C et sous une pression atmosphérique normale de 1 013 mbar);

τ est le facteur de correction dépendant de la température de l'air et de l'altitude (voir Tableau 5);

q_0 est exprimé en N/m^2 et V_{RX} en m/s .

The wind velocities defined above for computation shall be considered as occurring at an air temperature equal to the mean of the daily minimum temperatures, peculiar to this site. The mean daily minimum temperature may be obtained by means of analysis of the recordings over a certain number of years in a meteorological station as close as possible to the location of the line. As an alternative, it is admissible to take as a coincident air temperature the minimum temperature defined hereinafter increased by 15 °C.

b) Reduced wind

A reduced wind speed should be combined with minimum temperature. The minimum temperature should be considered as being equal to the yearly minimum value, having a probability of occurrence of 2 % or a return period of 50 years. A method for the determination of this value is given in A.3.4. When the line is located in an area where the minimum air temperature can be influenced by the local topography, it is necessary to take this influence into account.

The reduced wind speed will be equal to the reference wind speed V_R chosen for the high wind assumption multiplied by a coefficient chosen according to local meteorological conditions. Where there is no reliable knowledge of local conditions, a value of 0,6 for this coefficient is suggested.

A.4.5.3 Unit-action of the wind on any element of the line and dynamic reference pressure

The characteristic value a of the unit-action in N/m^2 , due to the wind acting horizontally, perpendicularly to any element of the line (conductors, insulators, supports or parts of them) is given by the following expression:

$$a = q_0 C_x G \quad (A.40)$$

where

q_0 is the reference dynamic wind pressure;

C_x is the drag coefficient depending on the shape of the element being considered;

G is the combined wind factor which takes into account the turbulence of the wind. It varies in terms of the dynamic response of the element being considered (gust response). It also depends on the height of this element above the ground and, for conductors, on the length of the span, as given in 6.2.6.

The dynamic reference pressure q_0 is given in terms of the reference wind speed V_{RX} at 10 m above ground at the location of the line (see Equation (A.39)).

$$q_0 = \frac{1}{2} \mu \times \tau \times V_{RB}^2 K_R^2 = \frac{1}{2} \mu \times \tau \times V_{RX}^2 \quad (A.41)$$

where

μ is the air mass per unit volume (equal to 1,225 kg/m³ at a temperature of 15 °C and under a normal atmospheric pressure of 1 013 mbar);

τ is the correction factor depending on air temperature and altitude (see Table 5);

q_0 is expressed in N/m² and V_{RX} in m/s.

Le paragraphe 6.2.6 fournit des informations détaillées quant aux charges de vent sur les différents composants de ligne. Le présent paragraphe décrit les charges de vent sur les conducteurs dans le cas général d'un pylône d'angle, avec une direction du vent donnée.

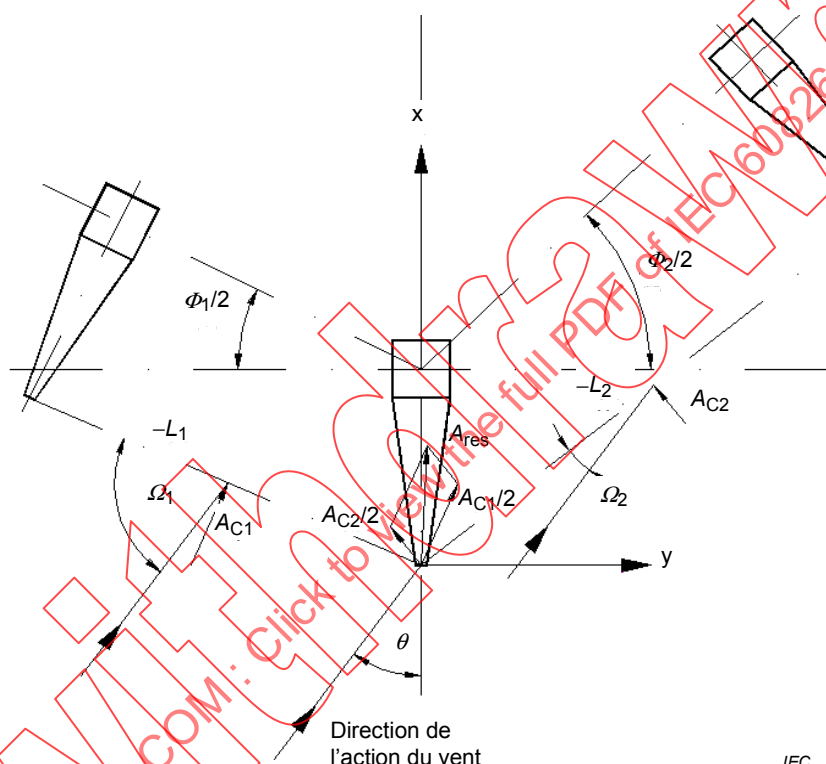
$$A_c = q_0 C_{xc} G_c G_L d \frac{L_i}{2} \sin^2 \Omega \quad (\text{A.42})$$


Figure A.8 – Action du vent sur les conducteurs et charge de vent résultante sur le support

Si la direction du vent est déterminée par l'angle θ pris entre la direction du vent proprement dite et l'axe des consoles du support et si Φ_1 et Φ_2 déterminent les angles en ligne, il s'ensuit:

$$\Omega_1 = 90^\circ - (\theta - \Phi_1/2) \text{ et } \Omega_2 = 90^\circ - (\theta + \Phi_2/2) \quad (\text{A.43})$$

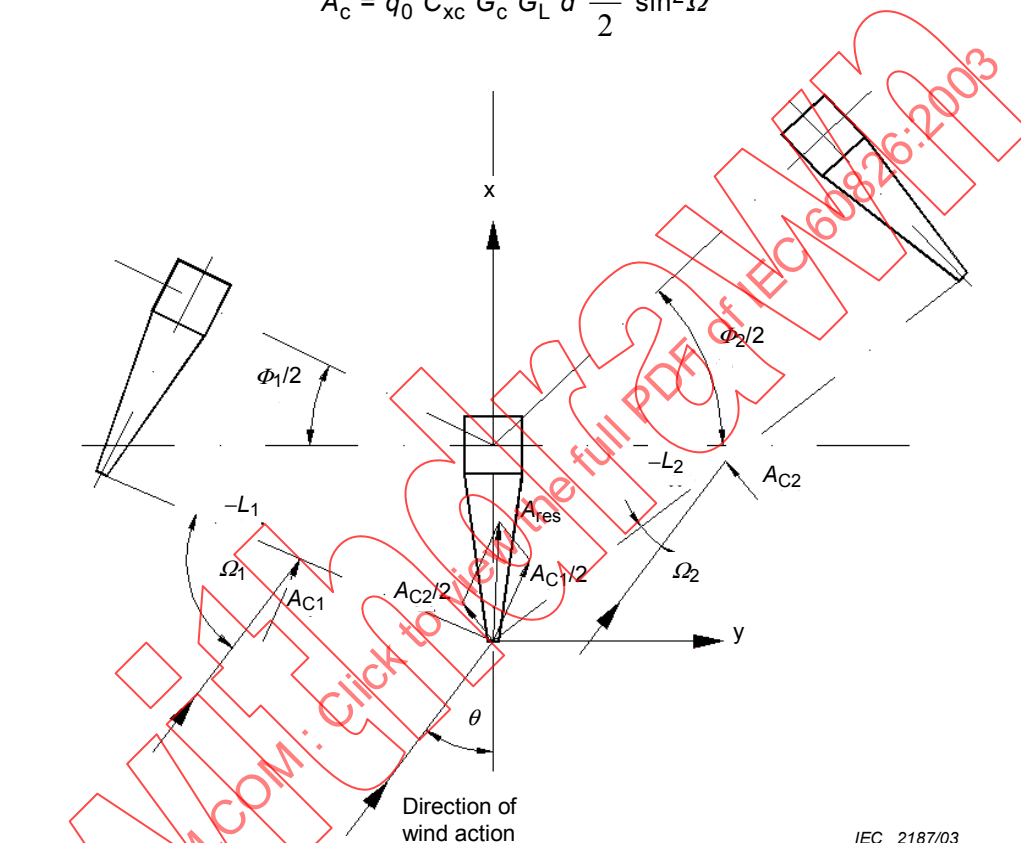
$$A_{\text{cx}} = (A_{\text{c1}} / 2) \times \cos (\Phi_1 / 2) + (A_{\text{c2}} / 2) \times \cos (\Phi_2 / 2) \quad (\text{A.44})$$

A.4.6 Wind load on conductors (general case)

In 6.2.6 detailed information is given on wind loads on individual line components. This subclause describes wind loads on conductors in a general case of an angle tower and a given wind direction.

The wind load A_c due to the effect of the wind upon a span length L , applied at each attachment point of this span and perpendicularly to the span, is given by Equation (8) (see also Figure A.8):

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c G_L d \frac{L_i}{2} \sin^2 \Omega \quad (\text{A.42})$$



IEC 2187/03

Figure A.8 – Wind action on conductors and resultant wind load on support

From Equation (A.42) the wind action on a support can be determined from Figure A.8.

If the wind direction is determined by the angle θ between wind direction and support crossarm axis and ϕ_1 and ϕ_2 are the compliments to the line angles it follows

$$\Omega_1 = 90^\circ - (\theta - \phi_1/2) \text{ and } \Omega_2 = 90^\circ - (\theta + \phi_2/2) \quad (\text{A.43})$$

For the support according to Figure A.8, the wind load in direction of the crossarm is:

$$A_{cx} = (A_{c1} / 2) \times \cos (\phi_1 / 2) + (A_{c2} / 2) \times \cos (\phi_2 / 2) \quad (\text{A.44})$$

Perpendiculairement à cette direction, elle correspond à :

$$A_{cy} = (A_{c1} / 2) \times \sin (\phi_1 / 2) - (A_{c2} / 2) \times \sin (\phi_2 / 2) \quad (\text{A.45})$$

En combinant les formules (A.42), (A.43), (A.45) et (A.45), on obtient la charge de vent suivante en direction de la console

$$A_{cx} = q_0 C_{xc} G_c \times d \left[G_{L1} \frac{L_1}{2} \sin^2 (90^\circ - (\theta - \phi_1 / 2)) \cos \left(\frac{\phi_1}{2} \right) + G_{L2} \frac{L_2}{2} \sin^2 (90^\circ - (\theta + \phi_2 / 2)) \cos \left(\frac{\phi_2}{2} \right) \right] \quad (\text{A.46})$$

et perpendiculairement :

$$A_{cy} = q_0 C_{xc} G_c \times d \left[G_{L1} \frac{L_1}{2} \sin^2 (90^\circ - (\theta - \phi_1 / 2)) \sin \left(\frac{\phi_1}{2} \right) + G_{L2} \frac{L_2}{2} \sin^2 (90^\circ - (\theta + \phi_2 / 2)) \sin \left(\frac{\phi_2}{2} \right) \right] \quad (\text{A.47})$$

Pour les supports de suspension ne présentant pas d'angle en ligne, la relation $\phi_1 = \phi_2 = 0$ s'applique. A partir de l'équation (A.46), il s'ensuit que :

$$A_{cx} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \sin^2 (90 - \theta) \quad (\text{A.48})$$

et, si le vent souffle perpendiculairement à l'axe de la ligne,

$$A_{cx} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (\text{A.49})$$

Compte tenu de l'équation (A.47), on arrive dans ces cas au résultat $A_{cy} = 0$.

Si le vent souffle en direction de l'axe des consoles d'un support d'angle édifié dans la bissectrice de l'angle en ligne ϕ , $\theta = 0$ s'applique. Sachant que $\phi_1 = \phi_2 = \phi$, il s'ensuit de la formule (A.46) que :

$$A_{cx} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^3 \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{A.50})$$

et de la formule (A.47), que :

$$A_{cy} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 - L_2}{2} \times \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \times \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{A.51})$$

Si et seulement si $L_1 = L_2$, alors $A_{cy} = 0$.

Dans les équations (A.48 à A.51), il convient de déterminer G_L pour $L = (L_1 + L_2) / 2$.

A.4.7 Equations des courbes

NOTE 1 Durant la diffusion du premier projet de ce document par le comité, une demande a été formulée pour obtenir les équations des courbes présentées dans cette norme, afin de pouvoir les intégrer aux outils de conception informatisés des lignes aériennes. Les équations rapportées ci dessous décrivent les courbes données dans différentes figures. Elles sont basées sur les propositions d'un comité national.

NOTE 2 Beaucoup des courbes présentées dans cette norme furent développées initialement dans les documents précédents du CEI/CE11, en combinant des études théoriques et des résultats expérimentaux finement corrélés aux retours d'expérience.

and perpendicularly to this direction

$$A_{cy} = (A_{c1} / 2) \times \sin (\phi_1 / 2) - (A_{c2} / 2) \times \sin (\phi_2 / 2) \quad (\text{A.45})$$

Combining (A.42), (A.43), (A.44) and (A.45) yields the wind load in direction of the crossarm

$$A_{cx} = q_0 C_{xc} G_c \times d \left[G_{L1} \frac{L_1}{2} \sin^2(90^\circ - (\theta - \phi_1 / 2)) \cos\left(\frac{\phi_1}{2}\right) + G_{L2} \frac{L_2}{2} \sin^2(90^\circ - (\theta + \phi_2 / 2)) \cos\left(\frac{\phi_2}{2}\right) \right] \quad (\text{A.46})$$

and perpendicularly

$$A_{cy} = q_0 C_{xc} G_c \times d \left[G_{L1} \frac{L_1}{2} \sin^2(90^\circ - (\theta - \phi_1 / 2)) \sin\left(\frac{\phi_1}{2}\right) + G_{L2} \frac{L_2}{2} \sin^2(90^\circ - (\theta + \phi_2 / 2)) \sin\left(\frac{\phi_2}{2}\right) \right] \quad (\text{A.47})$$

For suspension supports without a line angle $\phi_1 = \phi_2 = 0$ applies and from (A.46) it follows

$$A_{cx} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \sin^2(90^\circ - \theta) \quad (\text{A.48})$$

and in case of wind perpendicular to line direction

$$A_{cx} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (\text{A.49})$$

From (A.47) $A_{cy} = 0$ results in these cases:

In case of wind action in direction of the crossarm axis of an angle support, erected in the bisector of the line angle ϕ , $\theta = 0$ applies and with $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ it follows from (A.46)

$$A_{cx} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \cos^3\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (\text{A.50})$$

and from (A.47)

$$A_{cy} = q_0 \times C_{xc} \times G_c \times G_L \times d \times \frac{L_1 - L_2}{2} \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (\text{A.51})$$

Only if $L_1 = L_2$, then $A_{cy} = 0$.

In Equations (A.48 to A.51) G_L should be determined for $L = (L_1 + L_2) / 2$.

A.4.7 Equations of curves

NOTE 1 During circulation of the first committee draft (CD), a request was made to provide equations of curves appearing in this standard that could be used during overhead line design by computers. The equations provided hereafter describe the curves in various figures of the standard. These equations are based on proposals made by one national committee.

NOTE 2 Many of the curves in this standard were originally developed in previous IEC/TC11 documents based on a combination of theoretical studies and experimental results that were fine tuned according to experience.

A.4.7.1 Equations pour G_c – Figure 3

$$G_c = 0,2914 \times \ln(x) + 1,0468 \text{ (terrain type A)}$$

$$G_c = 0,3733 \times \ln(x) + 0,9762 \text{ (terrain type B)}$$

$$G_c = 0,4936 \times \ln(h) + 0,9124 \text{ (terrain type C)}$$

$$G_c = 0,6153 \times \ln(h) + 0,8144 \text{ (terrain type D)}$$

A.4.7.2 Equation pour G_L – Figure 4

$$G_L = 4 \times 10^{-10} \times L^3 - 5 \times 10^{-7} \times L^2 - 10^{-4} \times L + 1,0403$$

A.4.7.3 Equations pour G_t – Figure 5

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0232 \times h + 1,4661 \text{ (terrain type A)}$$

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0274 \times h + 1,6820 \text{ (terrain type B)}$$

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0298 \times h + 2,2744 \text{ (terrain type C)}$$

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0384 \times h + 2,9284 \text{ (terrain type D)}$$

A.4.7.4 Equation pour C_{xt} – Figure 7 (barres à bords plats)

$$C_{xt1,2} = 4,1727 \times \chi^2 - 6,1681 \times \chi + 4,0088$$

A.4.7.5 Equation pour C_{xt} – Figure 8, (barres arrondies)

$$C_{xt1,2} = 0,2293 \times \chi^3 + 2,7091 \times \chi^2 - 3,1323 \times \chi + 2,2002$$

A.4.7.6 Equations pour C_{xTc} – Figure 9

$$C_{xTc} = 1,2 \text{ when } Re < 3 \times 10^5$$

$$C_{xTc} = 0,75 \text{ when } Re > 4,5 \times 10^5$$

$$C_{xTc} = -1,1098 \times \ln(Re) + 15,197, \text{ quand } 3 \times 10^5 < Re < 4,5 \times 10^5$$

A.4.8 Effet du vent sur la tension mécanique des conducteurs

L'action du vent provoque une augmentation de la tension mécanique des conducteurs qui peut être déterminée par les méthodes classiques de calcul de la flèche ou de la tension mécanique. Comme l'indique A.4.5.2, il convient de considérer deux combinaisons de vent et de température.

En présence d'une longue série de portées séparées par des isolateurs de suspension, la notion de portée équivalente peut être utilisée pour calculer la tension mécanique. Il importe de noter que cette notion implique une pression du vent uniforme sur toutes les portées situées entre deux chaînes d'ancrage. Cette hypothèse est contraignante lorsque le nombre de portées en suspension est important. Dans ce cas, il est admissible de réduire la pression du vent calculée au moyen des équations (A.41) et (A.42). On peut alors appliquer à la pression du vent un facteur de réduction de 0,6 à 1,0. Cependant, cette opération nécessite une certaine prudence, dans la mesure où certains supports peuvent être implantés dans des cantons de pose comportant un nombre limité de portées entre leurs dispositifs d'arrêt.

A.4.7.1 Equations for G_c – Figure 3

$$G_c = 0,2914 \times \ln(x) + 1,0468 \text{ (terrain type A)}$$

$$G_c = 0,3733 \times \ln(x) + 0,9762 \text{ (terrain type B)}$$

$$G_c = 0,4936 \times \ln(h) + 0,9124 \text{ (terrain type C)}$$

$$G_c = 0,6153 \times \ln(h) + 0,8144 \text{ (terrain type D)}$$

A.4.7.2 Equation for G_L – Figure 4

$$G_L = 4 \times 10^{-10} \times L^3 - 5 \times 10^{-7} \times L^2 - 10^{-4} \times L + 1,0403$$

A.4.7.3 Equations for G_t – Figure 5

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0232 \times h + 1,4661 \text{ (terrain type A)}$$

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0274 \times h + 1,6820 \text{ (terrain type B)}$$

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0298 \times h + 2,2744 \text{ (terrain type C)}$$

$$G_t = -0,0002 \times h^2 + 0,0384 \times h + 2,9284 \text{ (terrain type D)}$$

A.4.7.4 Equation for C_{xt} – Figure 7 (flat sided members)

$$C_{xt1,2} = 4,1727 \times \chi^2 - 6,1681 \times \chi + 4,0088$$

A.4.7.5 Equation for C_{xt} – Figure 8, (round sided members)

$$C_{xt1,2} = 0,2293 \times \chi^3 + 2,7091 \times \chi^2 - 3,1323 \times \chi + 2,2002$$

A.4.7.6 Equations for C_{xTc} – Figure 9

$$C_{xTc} = 1,2 \text{ when } Re < 3 \times 10^5$$

$$C_{xTc} = 0,75 \text{ when } Re > 4,5 \times 10^5$$

$$C_{xTc} = -1,1098 \times \ln(Re) + 15,197, \text{ when } 3 \times 10^5 < Re < 4,5 \times 10^5$$

A.4.8 Wind effect on conductor tension

Wind acting on conductors will cause an increase in their mechanical tension that can be computed with standard sag-tension methods. Two cases of wind and temperature combinations should be checked as stated in A.4.5.2.

Where a long series of spans is separated by suspension insulators, the ruling span concept may be used for tension calculations. It is important to note that the ruling span concept implies that the same wind pressure applies to all spans between dead-end insulators. This is a conservative assumption if the number of suspension spans is large. In this case, it is acceptable to reduce the wind pressure calculated with Equations (A.41) and (A.42). A reduction factor of 0,6 to 1,0 applied to the wind pressure may be used. However, caution should be exerted when using this reduction factor because some supports may be used in sections with few spans between dead-ends.

A.4.9 Nombre de supports soumis à l'action du vent, effet de la longueur de la ligne

Les rafales au cours desquelles le vent atteint sa vitesse maximale sont limitées dans l'espace. Une rafale particulière ne touchera de ce fait qu'un seul support et ses portées adjacentes. Néanmoins, pour tenir compte de l'occurrence de plusieurs rafales d'intensité analogue, on recommande de supposer que les rafales touchent cinq supports en terrain plat ou vallonné, et deux en zone montagneuse.

Les lignes longues risqueront davantage d'être touchées par un vent d'intensité extrême que les lignes courtes. L'effet de ce phénomène dépend d'un grand nombre d'aspects: variété du terrain et du climat, conception des supports en fonction du terrain ou charges prévisibles, notamment. La conception de la ligne doit normalement se fixer pour objectif de parvenir à une fiabilité d'ensemble de la ligne correspondant à la durée de vie utile des ouvrages. Les lignes relativement courtes – jusqu'à 100 km – doivent donc normalement être conçues en fonction d'un niveau de fiabilité tel que suggéré en A.1.2.4 et A.1.2.5. Sur les lignes plus longues, pour éviter d'accroître la probabilité de défaillance, il convient d'allonger les périodes de retour des hypothèses retenues pour la conception de manière à atteindre, là aussi, la fiabilité globale recherchée. Cet ajustement des périodes de retour n'est pas nécessaire si la carte des données de vent a déjà été ajustée en fonction de l'espace couvert par la zone traversée.

A.5 Givrage atmosphérique

A.5.1 Généralités

Le terme général de givrage atmosphérique recouvre un certain nombre de processus par lesquels de l'eau présente sous différents états dans l'atmosphère gèle et vient adhérer à des objets exposés à l'air libre. Ce processus revêt essentiellement deux formes, nommées à partir du principal mécanisme mis en jeu:

- givrage par précipitation, et
- brouillard givrant.

Il existe un troisième processus, dans lequel la vapeur d'eau est directement sublimée en givre, et forme ainsi ce que l'on appelle de la gelée blanche. Cependant, celle-ci n'entraîne pas de charge significative, et n'est donc pas traitée plus avant dans cette norme.

Le givrage par précipitation peut prendre plusieurs formes, dont les principales sont les suivantes:

- pluie verglaçante,
- accumulation de neige collante, et
- accumulation de neige sèche.

A.5.2 Givrage par précipitation

A.5.2.1 Pluie verglaçante

Lorsque des gouttes de pluie ou de la bruine traversent une couche d'air froid (en deçà de la température de gel), ces gouttelettes sont surrefroidies. A ce moment, elles sont donc encore en phase liquide, et ne gèlent pas avant d'avoir touché le sol ou tout objet situé sur leur trajectoire. Il en résulte une accumulation de givre clair et compact appelé verglas, qui comporte souvent des glaçons. Cette accumulation est très dure et résistante, et donc très difficile à faire disparaître. Sa densité est comprise entre 800-900 kg/m³, en fonction de la teneur en bulles d'air.

A.4.9 Number supports subjected in wind action, effect of length of line

Gusts with maximum wind speed are limited in width. An individual gust will, therefore hit only one support and the adjacent spans. Nevertheless to take care of the several gusts with approximately the same magnitude it is proposed to assume that five supports are hit in flat or rolling terrain and two in mountains.

For long lines, the probability to be hit by extreme wind actions is higher than for short lines. The effect depends on many aspects, such as variation of terrain and climate, design of supports adjusted to the terrain and the loads to be expected there. The design of the line should aim at the same reliability of the total line related to the service life of the line.

Lines with relatively short length up to 100 km should be designed for a reliability level as proposed in subclauses A.1.2.4 and A.1.2.5. For longer lines, in order not to increase the probability of failure, the return periods of chosen design assumptions should be extended so as to achieve the overall reliability. The adjustment of return periods is not required if map of wind data has already been adjusted to take into account the space covered by service area.

A.5 Atmospheric icing

A.5.1 General

Atmospheric icing is a general term for a number of processes where water in various forms in the atmosphere freezes and adheres to objects exposed to the air. Generally, there are two types of icing which are named according to the main processes

- precipitation icing, and
- in-cloud icing.

A third process, where water vapour is transformed directly into the ice phase and forms so-called “hoar frost”, does not lead to significant loadings and is not considered further.

Precipitation icing occurs in several forms, among which the most important are

- freezing rain,
- wet snow accretion, and
- dry snow accretion.

A.5.2 Precipitation icing

A.5.2.1 Freezing rain

When raindrops or drizzle fall through a layer of cold air (sub-freezing temperatures), the water droplets become supercooled. Therefore, they are still in a liquid water phase and do not freeze before they hit the ground or any object in their path. The resulting accretion is a clear, solid ice called glaze, often with icicles. This accretion is very hard and strong, and therefore difficult to remove. The density is 800-900 kg/m³, depending on the content of air bubbles.

La pluie verglaçante se rencontre principalement dans les vastes plaines ou les bassins où s'accumulent des couches relativement épaisses d'air à basse température lors des accès de froid. Lorsqu'un système d'air à basse pression pourvu d'un front chaud et pluvieux pénètre dans cette zone, l'air froid (plus lourd) reste à proximité du sol, ce qui favorise la formation de verglas (inversion de température). Cette situation peut perdurer jusqu'à ce que les vents d'altitude parviennent à mélanger la couche d'air froid en contact avec le sol et l'air chaud situé plus haut.

On peut rencontrer une situation analogue dans les zones où se chevauchent des systèmes d'air froid et chaud. L'air plus chaud, souvent chargé de nuages pluvieux, est soulevé par-dessus le système d'air plus froid, et forme un front où les précipitations sont plus fortes.

En général, les pluies verglaçantes ne s'accompagnent que de vents modérés. Le volume de givre qui s'accumule à cette occasion dépend donc de l'intensité et de la durée des précipitations.

A.5.2.2 Neige collante

Normalement, la température augmente à mesure que les flocons de neige traversent l'atmosphère. Si la température de l'air à proximité du sol est supérieure au point de gel, ces flocons commencent à fondre avec le franchissement de l'isotherme à 0 °C. Ils contiendront alors un mélange de givre et d'eau (à 0 °C), jusqu'à ce qu'ils finissent par fondre totalement, pour former des gouttes de pluie, si la couche chaude est suffisamment épaisse. Mais tant que cette fonte n'est que partielle, ils adhéreront aux objets situés dans le flux d'air.

La densité peut varier fortement (de 100 kg/m³ à 800 kg/m³), mais est le plus souvent comprise entre 400 kg/m³ et 600 kg/m³. La densité et l'intensité de la neige collante accumulée dépendent de l'intensité des précipitations, de la vitesse du vent et de la température. Si la température baisse en deçà de 0 °C après la formation du manchon, la neige gèle et forme une couche dure et dense, qui adhère fortement.

La neige collante peut aussi geler sur des objets environnés d'air plus froid, à proximité du sol, comme dans le cas de la pluie verglaçante.

NOTE La densité des accrétions de neige collante (une des formes de givrage par précipitation) augmente habituellement avec la vitesse de vent, conduisant ainsi à une surface exposée au vent plus faible. Dans ce cas-ci, il est possible que les efforts sur les câbles en présence de vitesse de vent croissante (effet de la hauteur de la Figure 11), soient moins sévères que les efforts avec une vitesse de référence de 10 m de hauteur.

A.5.3 Brouillard givrant

Le brouillard givrant est un processus par lequel des gouttelettes d'eau sursaturées présentes dans un nuage ou une nappe de brouillard gèlent immédiatement lorsqu'elles entrent en contact avec des objets situés dans le flux d'air, par exemple des lignes aériennes implantées dans des zones montagneuses situées au-dessus de la base nuageuse.

L'accumulation de givre est dite sèche lorsque le transfert potentiel de chaleur à partir de l'objet sur lequel ce givre se forme est supérieur au dégagement de chaleur latente de fusion. Le givre ainsi formé est qualifié de léger ou dur, selon sa densité. Celle-ci est typiquement de 300 kg/m³ pour le givre léger et de 700 kg/m³ pour le givre dur.

Le givre accumulé est dit collant lorsque le transfert de chaleur est moins intensif que celui du dégagement de chaleur latente. Cette accumulation s'effectue alors au point de fusion, ce qui se traduit par la présence d'une fine couche d'eau à la surface du phénomène. Le givre ainsi formé est appelé verglas, et sa densité est proche de 900 kg/m³.

Freezing rain occurs mostly on wide plains or basins where relatively deep layers of cold air accumulate during spells of cold weather. When a low pressure system with a warm front with rain penetrates the area, the cold (and heavier) air may remain near the ground and thus favour the formation of glaze (temperature inversion). Such a situation may persist until the upper winds have managed to mix the cold surface layer of air with the warmer air aloft.

A similar situation may occur in the overlapping zones of cold air and warm air systems. The warmer air, often with precipitation, is lifted over the colder air and forms a frontal zone where precipitation is enhanced.

Usually there are only moderate winds during freezing rain events. Hence the amount of accreted ice depends on the precipitation rate and duration.

A.5.2.2 Wet snow

Normally, the temperature increases as snow flakes fall through the atmosphere. If the air temperature near the ground is above freezing, the snow flakes start to melt when passing the 0 °C isotherm and the flakes contain a mixture of ice and water (at 0 °C) until they eventually melt totally into raindrops if the warm layer is deep enough. As long as they are only partly melted they will adhere to objects in the airflow.

The density may vary widely (100-800 kg/m³), but mostly from about 400-600 kg/m³. The density and intensity of accreted wet snow depends on the precipitation rate, wind speed and temperature. If the temperature drops below 0 °C after the accretion, the layer will freeze into a hard and dense layer with strong adhesion to the object.

Wet snow may also freeze on objects in colder air near the ground as in the case of freezing rain.

NOTE The density of wet snow accretion (type of precipitation icing) usually increases with wind speed, thus resulting in a smaller area exposed to wind pressure. In such case, it is possible that the resulting forces on the cables subjected to increased wind speed (height variation of Figure 11) may be less critical than at lower wind speed at 10 m reference height.

A.5.3 In-cloud icing

In-cloud icing is a process whereby supercooled water droplets in a cloud or fog, freeze immediately upon impact on objects in the air flow, e.g. overhead lines in mountains above the cloud base.

The ice growth is said to be dry when the transfer of potential transfer of heat away from the object is greater than the release of the latent heat of fusion. The resulting accreted ice is called soft or hard rime according to its density which is typically 300 kg/m³ for soft rime and 700 kg/m³ for hard rime.

The ice growth is said to be wet when the heat transfer rate is less than the rate of latent heat release. Then the growth takes place at the melting point, resulting in a water film on the surface. The accreted ice is called glaze with a density of approximately 900 kg/m³.

Le taux de givrage varie principalement en fonction des paramètres suivants:

- teneur de l'air en eau liquide;
- dimension des gouttelettes de volume moyen du spectre;
- vitesse du vent;
- température;
- dimensions de l'objet givré.

Lorsque la température passe en deçà de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la teneur de l'air en eau diminue, ce qui limite le givrage. On a toutefois enregistré un givrage de 8 kg/m en Suisse, par une température inférieure à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et en présence de vent fort.

Dans les mêmes conditions, le taux de formation de givre sera plus important pour un petit objet que pour un objet plus grand. Ainsi, les charges de givre sont comparativement supérieures sur les conducteurs que sur les supports massifs.

Il convient de noter que les phénomènes de brouillard givrant les plus considérables rencontrés dans des lieux spécifiques, sur les montagnes proches des côtes, par exemple, sont généralement dus à la combinaison d'une neige humide et d'un givre dur.

A.5.4 Propriétés physiques du givre

Les propriétés physiques du givre atmosphérique peuvent varier dans des proportions assez vastes. Le Tableau A.10 en indique les valeurs typiques.

Tableau A.10 – Propriétés physiques du givre

Type de givre	Densité kg/m^3	Adhérence	Aspect		Cohésion
			Couleur	Forme	
Glace compacte	700 – 900	Forte	Transparente	Cylindrique, glaçons	Forte
Neige collante	400 – 700	Moyenne	Blanche	Cylindrique	Moyenne à forte
Givre dur	700 – 900	Forte	Opaque à transparente	Excentrique, avec pointes dans le vent	Très forte
Givre léger	200 – 600	Moyenne	Blanche	Excentrique, avec pointes dans le vent	Faible à moyenne

A.5.5 Paramètres météorologiques influençant la formation du givre

Le Tableau A.11 donne des valeurs typiques pour les paramètres qui influencent la formation du givre.

The icing rate varies mainly as a result of the following:

- liquid water content of the air;
- median volume droplet size of the spectrum;
- wind speed;
- temperature;
- dimensions of the iced object.

At temperatures below $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ the water content of the air becomes smaller and less icing occurs. However, 8 kg/m was recorded in Switzerland with a temperature below $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and strong winds.

Under the same conditions the ice accretion rate will be greater for a small object than for a large one. Thus, heavy ice loadings are relatively more important for conductors than solid supports.

It should be noted that the heaviest in-cloud icing for specific locations, e.g. coastal mountains is usually due to a combination of wet-snow and hard rime.

A.5.4 Physical properties of ice

The physical properties of atmospheric ice may vary within rather wide limits. Typical properties are listed in Table A.10.

Table A.10 – Physical properties of ice

Type of ice	Density kg/m ³	Adhesion	Appearance		Cohesion
			Colour	Shape	
Glaze ice	700 – 900	Strong	Transparent	Cylindrical icicles	Strong
Wet snow	400 – 700	Medium	White	Cylindrical	Medium to strong
Hard rime	700 – 900	Strong	Opaque to transparent	Eccentric pennants into wind	Very strong
Soft rime	200 – 600	Medium	White	Eccentric pennants into wind	Low to medium

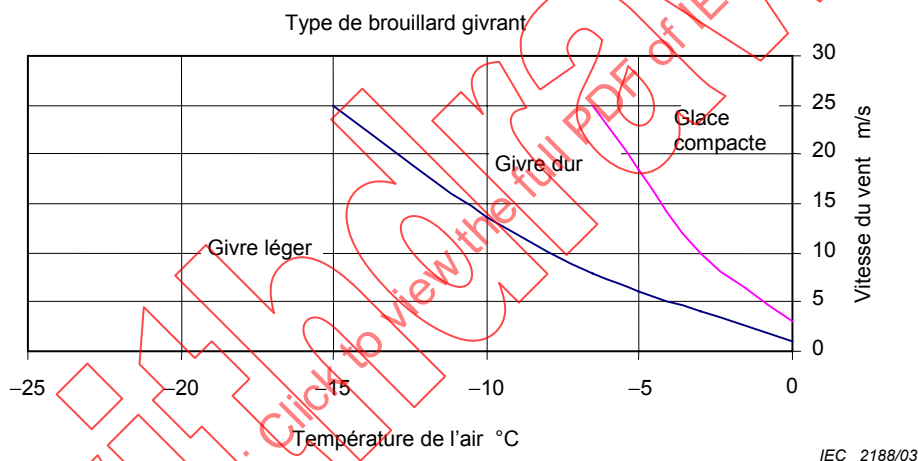
A.5.5 Meteorological parameters controlling ice accretion

Table A.11 gives typical values of parameters that control the ice accretion.

Tableau A.11 – Paramètres météorologiques influençant la formation du givre

Type de givre	Température de l'air t °C	Vitesse moyenne du vent V m/s	Taille des gouttelettes	Teneur en eau liquide	Durée typique des tempêtes
Glace compacte	$-10 < t < 0$	Toute vitesse	Grande	Moyenne	Heures
Neige collante	$0 < t < 3$	Toute vitesse	Flocons	Très forte	Heures
Givre dur	$-10 < t < 1$	$10 < V$	Moyenne	Moyenne à forte	Jours
Givre léger	$-20 < t < 1$	$V < 10$	Petite	Faible	Jours

La transition entre givre léger, givre dur et verglas dus au brouillard givrant dépend principalement de la température de l'air et de la vitesse du vent. C'est ce que montre la Figure A.9. Cependant, les courbes de cette figure se déplacent vers la droite à mesure que la teneur en eau liquide augmente et que la taille de l'objet considéré diminue.

**Figure A.9 – Types de givre formé par le brouillard givrant, en fonction de la vitesse du vent et de la température**

A.5.6 Influence du terrain

A.5.6.1 Brouillard givrant

La topographie régionale et locale (à petite et moyenne échelle) modifie les mouvements verticaux de l'atmosphère et, donc, la structure des nuages et le givrage. Au contact des montagnes côtières exposées au vent en bordure des continents, l'air humide monte. Il s'en trouve refroidi, la vapeur d'eau qu'il contient se condense et les gouttelettes grossissent, ce qui débouche sur des précipitations. Les brouillards givrants les plus sévères se rencontrent au-dessus des seuils de condensation et de gel sur les hauteurs exposées, aux endroits où les vallées montagneuses forcent l'air humide à franchir les cols, ce qui a pour effet de soulever l'air et de renforcer le vent.

Sur le flanc des montagnes situé sous le vent, la masse d'air se réchauffe en descendant, avec évaporation des gouttelettes et peut conduire à la dissolution totale des nuages. Un abri localisé formé de collines d'une hauteur ne dépassant pas 50 m face au vent peut significativement réduire la charge de givre. C'est la raison pour laquelle les tracés en haute montagne peuvent tout à fait convenir pour les lignes aériennes dès lors qu'ils sont protégés contre les courants éoliens givrants.

Table A.11 – Meteorological parameters controlling ice accretion

Type of ice	Air temperature t °C	Mean wind speed V m/s	Droplet size	Liquid water content	Typical storm duration
Glaze ice	$-10 < t < 0$	Any	Large	Medium	Hours
Wet snow	$0 < t < 3$	Any	Flakes	Very high	Hours
Hard rime	$-10 < t < 1$	$10 < V$	Medium	Medium to high	Days
Soft rime	$-20 < t < 1$	$V < 10$	Small	Low	Days

The transition between soft rime, hard rime and glaze for in-cloud icing is mainly a function of air temperature and wind speed as shown in Figure A.9. However, the curves in Figure A.9 shift to the right with increasing liquid water content and with decreasing object size.

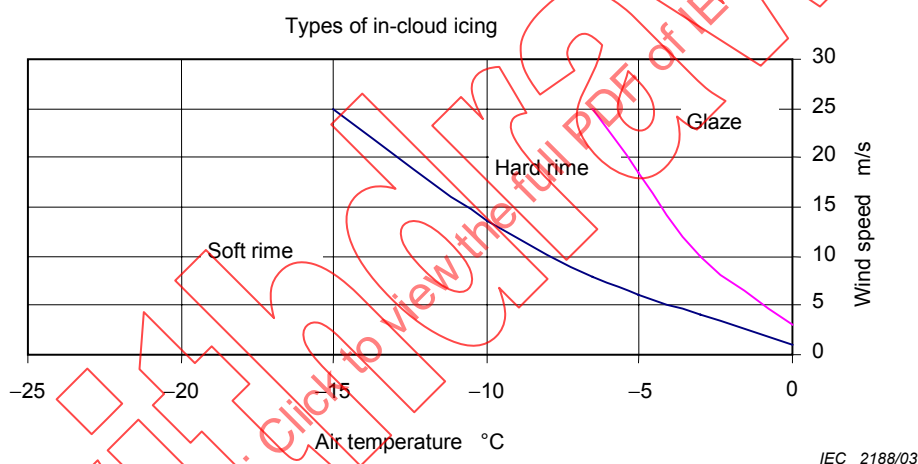


Figure A.9 – Type of accreted in-cloud icing as a function of wind speed and temperature

A.5.6 Terrain influences

A.5.6.1 In-cloud icing

The regional and local topography (large and medium scale) modifies the vertical motions of the atmosphere and hence the cloud structure and icing. Coastal mountains along the windward side of the continents act to force moist air upwards, leading to a cooling of the air with condensation of water vapour and droplet growth, eventually with precipitation. The most severe in-cloud icing occurs above the condensation level and the freezing level on freely exposed heights, where mountain valleys force moist air through passes and thus both lift the air and strengthen the wind.

On the leeward side of the mountains the descent of an air mass results in internal heating of the air and evaporation of droplets, eventually with a total dissolution of clouds. A local shelter of hills not more than 50 m higher on the windward side may give a significant reduction in ice loadings. For this reason, routes in high mountains may very well be suited for overhead lines, provided they are sheltered against icing wind directions.

A.5.6.2 Givrage par précipitation

A priori, le givrage par précipitation peut se produire à n'importe quelle altitude. Cependant, sa probabilité d'occurrence est généralement supérieure en fond de vallée qu'à mi-hauteur, parce que l'air froid y est davantage présent. Dans les plaines étendues, on peut rencontrer de la pluie verglaçante comme de la neige collante.

C'est souvent là où les vents transversaux sont les plus forts que se forment les quantités les plus importantes de neige collante. Une ligne aérienne située le long d'une vallée est donc normalement moins surchargée par le givre qu'une ligne traversant la même vallée.

Cependant, la présence de collines ou de montagnes de faible hauteur dans l'axe transversal par rapport au vent peut renforcer le vent sur le versant sous le vent, en particulier en l'absence d'obstacles à un tel flux de ce côté. En présence de neige collante, ces coteaux peuvent présenter des probabilités significatives de défaillance lorsque les charges de givre et la vitesse du vent sont élevées.

A.5.7 Lignes directrices pour la réalisation d'un programme d'observation du givre

Dans l'état actuel des choses, il semble n'exister pratiquement aucun moyen indirect d'obtenir des données appropriées à des fins de conception, malgré des efforts significatifs pour élaborer des modèles fondés sur les données météorologiques et pour collecter l'expérience générale acquise dans les zones présentant un intérêt. Comme pour toute structure tributaire de valeurs extrêmes en matière de vitesse du vent, d'épaisseur de la neige ou de température, le concepteur de lignes de transport a besoin de données et de mesures relatives aux paramètres de conception les plus critiques. Il est donc fortement recommandé de lancer un programme de collecte de données de terrain. Celles-ci peuvent provenir des lignes aériennes existantes comme de dispositifs conçus spécialement à cet effet.

Ces données de terrain sur le givre peuvent être obtenues par les moyens suivants:

- 1) Mesurages directs de l'épaisseur des manchons ou du poids d'échantillons prélevés sur des structures et des conducteurs de lignes aériennes. Il est également possible d'utiliser des échantillons de givre tombés au sol, à condition de tenir compte de la forme initiale du givre accumulé sur les conducteurs et du fait que ces morceaux trouvés au sol peuvent ne représenter qu'une fraction du dépôt de givre présent sur le conducteur.
- 2) Mesurages effectués sur des dispositifs simulant la formation du givre sur les conducteurs. Les dispositifs actuellement utilisés dans certains pays sont de simples assemblages de tubes, de tiges ou de câbles, placés entre 2 m et 5 m au-dessus du sol pour faciliter les mesurages.
- 3) Estimation du givrage à partir de la tension mécanique des conducteurs ou de la composante verticale du poids au point d'accrochage au support.
- 4) Estimation du givrage d'après la flèche des conducteurs.

Les renseignements sur les charges de givre sont importants non seulement pour déterminer les critères de charge de conception et les risques de défaillance y afférents, mais peuvent aussi être utiles lors des différentes étapes de planification du réseau de transport et pour le choix du tracé des lignes.

Les pays disposant de données sur les charges de givre étant très rares, et sachant qu'il faut au moins dix années d'observation sur site pour obtenir une telle base de données, il est vivement recommandé que toute entreprise d'électricité ayant un grand projet d'édification de ligne entreprenne sans délai un programme d'observation du givrage. Il sera très souvent possible d'obtenir la collaboration des services météorologiques nationaux pour la manipulation des instruments implantés dans des stations météorologiques standard.

Il convient par ailleurs d'exploiter toutes les sources d'informations disponibles et utiles. Ces informations seront ensuite combinées de manière systématique afin de réduire autant que possible la durée et les coûts des mesurages sur site.

A.5.6.2 Precipitation icing

In general, precipitation icing may occur at any altitude. However, the probability of precipitation icing is generally greater in the valley basin than half way up the valley sides because of higher occurrence of cold air. Both freezing rain and wet snow may occur on large plains.

The greatest amounts of wet snow may be formed where the transverse wind component is strongest. Hence, an overhead line along a valley has fewer accretions than a line crossing the valley.

However, smooth hills or mountains transverse to the wind may cause the wind to strengthen on the leeward side, especially if there are no obstacles to such a flow on this side. Combined with wet snow, such hillsides may have significant failure probabilities for high ice loads combined with high wind velocities.

A.5.7 Guidelines for the implementation of an ice observation program

At the current time of writing, there seems to be practically no indirect way of getting proper data for design, although significant efforts have been made to develop models based on meteorological data and the collection of general experience from the areas of interest. As for any other type of structure depending on extreme values of wind speed, snow depth or temperature, the transmission line designer needs data and measurements of the most critical design parameters. Therefore, a program for collecting field data is strongly recommended, both from existing overhead lines and from especially designed devices.

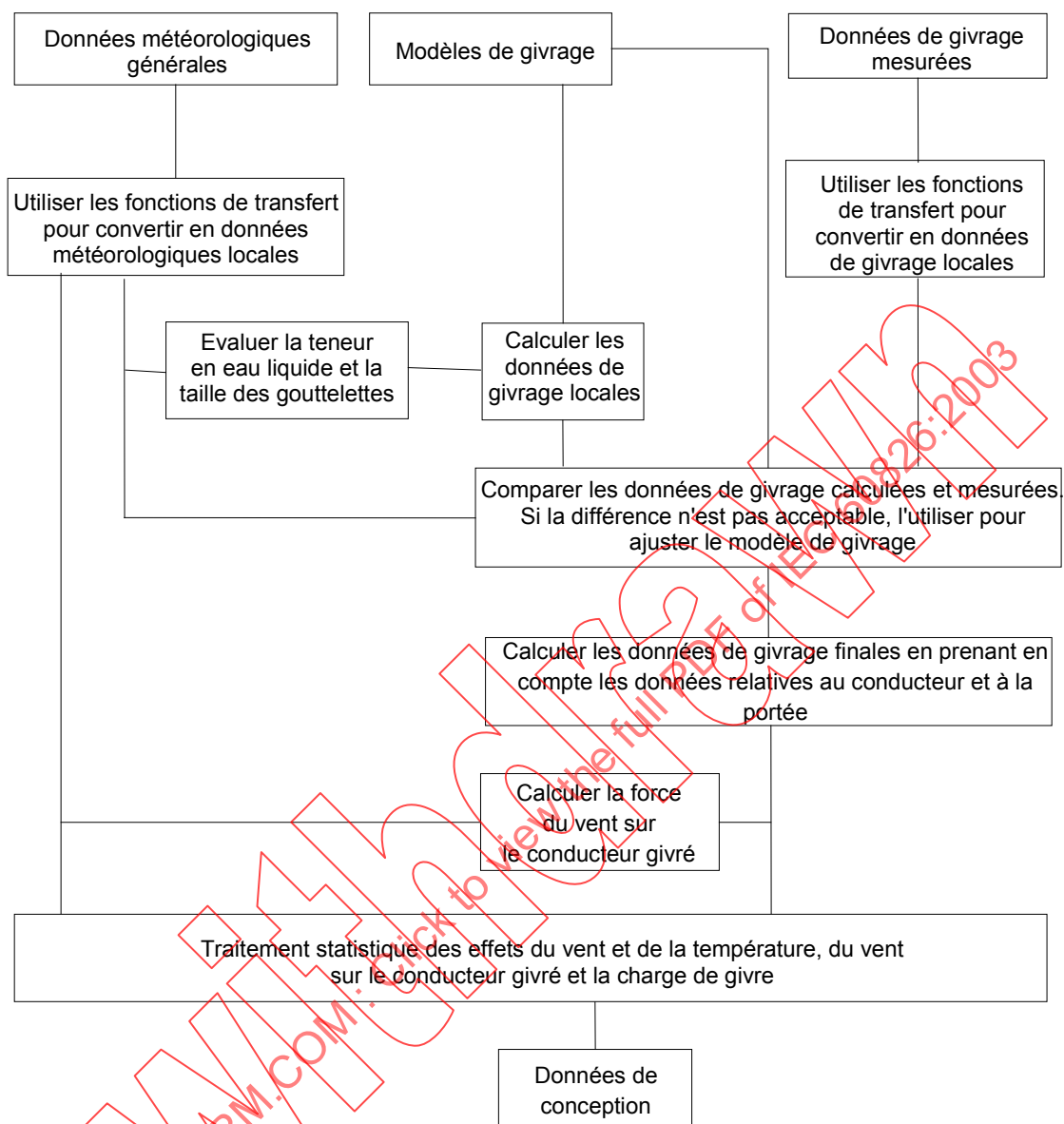
Field ice data can be obtained by the following means:

- 1) Direct measurements of icing thickness or weight of samples taken from structures and line conductors. Ice samples fallen on the ground can be used, if consideration is given to the shape of initial ice accretion on conductors and to the fact that fallen pieces may represent only a fraction of the ice coating on the conductor.
- 2) Measurement on devices that simulate ice accretion on conductors. Devices currently used in some countries consist of simple tubes, rods or cable assemblies, 2–5 m above ground level in order to facilitate measurement.
- 3) Estimation of icing using conductor tension or the vertical component of weight at the attachment point at the support.
- 4) Estimation of icing using the conductor sag.

Ice loading data are important not only to establish design load criteria and their associated failure probabilities, but can also be useful in the planning stages of the transmission network and route selection of transmission lines.

Since very few countries have data on ice loadings at their disposal, and considering that it takes at least 10 years of field observation to acquire such a data base, it is strongly recommended that any utility planning a major line project, should undertake an ice observation programme without delay. Very often it will be possible to obtain the collaboration of the national weather services for the operation of instruments placed in standard meteorological stations.

However, any source of available and useful information should be collected and combined systematically in order to reduce, as much as possible, the time and cost of field measurements.

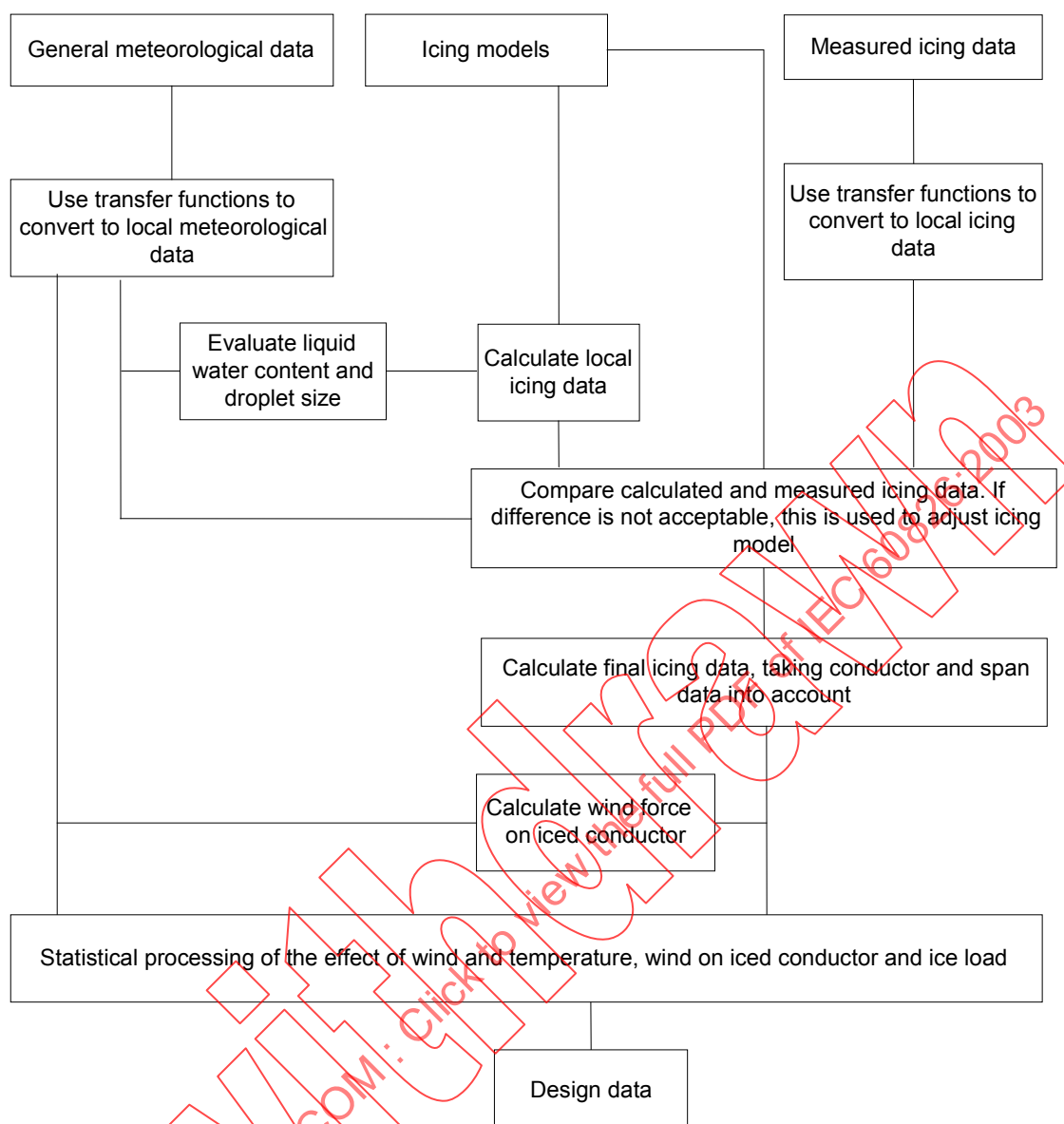


IEC 2189/03

Figure A.10 – Synthèse de la stratégie d'utilisation de données météorologiques, des modèles de givrage et des mesures sur site des charges de givre

La CEI 61774 est une norme complète, qui couvre tous les besoins liés aux données météorologiques nécessaires à la conception des lignes aériennes lorsque le mesurage du givrage joue un rôle significatif. La Figure A.10 provient de cette norme. Elle illustre la stratégie recommandée pour optimiser les informations qu'il est possible d'extraire des données météorologiques générales, des modèles de givrage et des mesures séparées des surcharges de givre. Cette norme contient également des lignes directrices sur le choix des sites et des appareils de mesurage, ainsi que sur d'autres instruments.

Enfin, il est recommandé que la mise en œuvre de tout programme important d'observation, ainsi que l'analyse des données météorologiques, s'effectuent sous l'autorité d'un météorologue professionnel.



IEC 2189/03

Figure A.10 – Strategy flow chart for utilizing meteorological data, icing models and field measurements of ice loads

IEC 61774 is a comprehensive standard covering all needs for meteorological data needed for overhead line design, and where measurements of icing is a significant part. Figure A.10 is taken from that standard. It demonstrates the strategy recommended in order to optimize the information that can be extracted from general meteorological data, icing models and separate measurements of ice loadings. Further guidelines on the selection of measuring sites, measuring devices as well as other instrumentation are also included in this standard.

Finally, it is recommended that the implementation of any major observation programme, as well as the analysis of the meteorological data, is conducted under the supervision of a professional meteorologist.

A.5.8 Données relatives au givre

A.5.8.1 Evaluation des informations sur les charges de givre

Les données disponibles sur la formation du givre manquent grandement d'uniformité. Selon les informations disponibles et le nombre d'années d'observation, il est recommandé de choisir l'une ou l'autre des méthodes d'évaluation suivantes.

Si des observations sur les charges annuelles maximales de givre sont disponibles sur au moins 10 ans, on s'en sert pour calculer la valeur moyenne $\bar{g}$. L'écart type σ_g est, pour sa part, calculé ou estimé selon le Tableau A.12.

Tableau A.12 – Paramètres statistiques des charges de givre

Nombre d'années d'observation n	Valeur moyenne $\bar{g}$	Ecart type σ_g
$10 \leq n \leq 20$	$\bar{g}$	$0,5 \bar{g} \leq \sigma_g \leq 0,7 \bar{g}$
≥ 20	$\bar{g}$	$\sigma_g < 0,7 \bar{g}$

Dans le tableau A.12, $\bar{g}$ est la moyenne calculée des valeurs maximales annuelles g des charges de givre sur la période considérée et σ_g est l'écart type calculé ou estimé.

Si l'on dispose uniquement de la valeur maximale $g_{\max}$ de la charge de givre sur un certain nombre d'années (aucune donnée statistique disponible), il convient de considérer que la valeur moyenne $\bar{g}$ est égale à $0,45 g_{\max}$ et que l'écart type σ_g correspond à $0,5 \bar{g}$.

Un modèle d'analyse météorologique peut être utilisé pour calculer les charges de givre maximales annuelles sur un certain nombre d'années.

Des données suffisantes pour l'approche statistique proposée dans cette norme peuvent être obtenues par analyse des données météorologiques et climatologiques types sur une période de 20 ans ou plus, combinée avec au moins cinq années d'observation du givrage sur le tracé de la ligne de transport.

Les informations sur ces sites, nécessaires pour valider et ajuster ce modèle prédictif, peuvent provenir de l'expérience sur des lignes de transport ou de distribution existantes, d'observations de terrain dans des zones soumises à des tempêtes de neige ou de l'examen de l'effet du givre sur la végétation.

Une telle méthode prédictive peut être assez simple ou devenir complexe selon le terrain, le climat local, le nombre ou le type de sites différents.

Les résultats de cette analyse sont utilisés pour définir la valeur moyenne $\bar{g}$ et l'écart type σ_g selon la méthode indiquée plus haut.

A.5.8.2 Influence de la hauteur et du diamètre du conducteur

Les facteurs K_d et K_h relatifs respectivement au diamètre du conducteur et à la hauteur z au-dessus du sol, sont indiqués en 6.4.4.1. On peut également déterminer leur valeur approchée au moyen des formules suivantes.

Pour le brouillard givrant:

$$K_d \sim 0,15 d/30 + 0,85 \quad (\text{A.52})$$

A.5.8 Ice data

A.5.8.1 Evaluation of information on ice loads

The available data on ice formation varies to a large extent. Depending on the available information and the number of years of observation, the following approaches for evaluation are recommended.

If records of yearly maximum ice loads during a period of at least 10 years are available, the mean value $\bar{g}$ is derived from the records of the yearly maximum ice load; the standard deviation σ_g is calculated or estimated according to Table A.12.

Table A.12 – Statistical parameters of ice loads

Number of years with observation n	Mean value $\bar{g}$	Standard deviation σ_g
$10 \leq n \leq 20$	$\bar{g}$	$0,5 \bar{g} \leq \sigma_g \leq 0,7 \bar{g}$
≥ 20	$\bar{g}$	$\sigma_g < 0,7 \bar{g}$

In Table A.12, $\bar{g}$ is the calculated mean of the yearly maximum values g of ice load during the period concerned and σ_g is the calculated or estimated standard deviation.

If only the maximum value $g_{\max}$ of ice load during a certain number of years is available (no statistical data), the mean value $\bar{g}$ should be taken as $0,45 g_{\max}$ and standard deviation σ_g as $0,5 \bar{g}$.

A meteorological analysis model can be used to calculate values for yearly maximum ice loads during a certain number of years.

Sufficient data for using the statistical approach in this standard may be obtained by means of an analysis of available standard weather or climatological data over a period of 20 years or more, combined with at least five years of ice observation on the transmission line sites.

Information about the line sites which is necessary to validate and adjust the predicting model may be taken from past experience with existing transmission or distribution lines, from field observations in snowstorm sites or from the effect of icing on vegetation.

Such a predicting model can be rather simple or become sophisticated depending on terrain, local weather, number or types of collecting sites.

The results of this model analysis are used to find the mean value $\bar{g}$ and the standard deviation σ_g following the method given above.

A.5.8.2 Influence of height and conductor diameter

The factor K_d , conductor diameter, is given in 6.4.4.1 as well as the factor K_h , height z above ground. They can be approximated by the following formulae.

For in-cloud icing

$$K_d \sim 0,15 d/30 + 0,85 \quad (\text{A.52})$$

NOTE La variation en hauteur du givrage dû aux nuages givrants est très dépendante des conditions topographiques et climatiques locales. Par conséquent, une étude climatologique particulière est suggérée afin d'évaluer cette variation pour une ligne exposée aux nuages givrants.

et pour le givrage par précipitation

$$K_d \sim 0,35 d/30 + 0,65 \quad (\text{A.53})$$

$$K_h = 0,075 \times z / 10 + 0,925 \quad (\text{A.54})$$

La valeur de K_h rapportée ci dessus pour le givrage par précipitation a été obtenue à partir d'un model de givrage simple, d'un vent d'environ 25 km/h à 10 m de hauteur et d'une vitesse de précipitation des gouttelettes d'environ 5 m/s.

A.5.8.3 Effet du givrage sur les structures

La formation de givre sur les structures accroît les charges verticales pesant sur ces dernières, et peut influencer sur la conception des fondations et de certaines barres de support.

Le poids du givre peut être calculé en se fondant sur la géométrie des barres constituant le support et sur l'épaisseur de givre à prendre en compte. On peut également déterminer des valeurs approchées à partir de ce qui suit, où:

Epaisseur du givre (mm)	15	25	30	35	40	45	50
Rapport du poids du givre à celui de la structure	0,57	1,00	1,23	1,48	1,73	2,00	2,28

A.6 Charges de vent et de givre combinées

A.6.1 Probabilités combinées

L'action du vent sur les conducteurs givrés met en jeu au moins trois variables: vent associé aux conditions givrantes, poids et forme du manchon de givre. De ces effets combinés peuvent résulter à la fois des charges transversales et des charges verticales. Dans l'idéal, il faudrait disposer de mesures directes de ces charges, mais par suite de la difficulté et du coût de telles opérations, ces mesures sont rares et peu disponibles.

Sachant qu'il est possible d'obtenir des observations indépendantes sur la vitesse du vent, le poids et la forme des manchons de givre, on propose de combiner ces variables de sorte que la charge résultante présente au moins approximativement les mêmes périodes de retour T que celles adoptées pour chaque niveau de fiabilité.

Combiner les probabilités de ces variables corrélées exigerait toutefois de connaître les différentes interactions de ces variables sur les charges. En supposant que les charges maximales sont très probablement liées aux valeurs maximales de chacune des variables (vitesse du vent, poids et forme du manchon de givre), on propose une méthode simplifiée. Celle-ci consiste à associer une valeur à faible probabilité d'apparition pour une variable (indice L) et des valeurs à forte probabilité d'apparition (indice H) pour les deux autres, comme le montre le Tableau A.13. Cette méthode admet un certain degré d'indépendance entre les différentes variables.

NOTE The variation of in-cloud icing with height is very dependent on local topographical and climate conditions. Thus a specific climatological study is suggested to assess this variation for a line exposed to in-cloud icing.

and for precipitation icing

$$K_d \sim 0,35 d/30 + 0,65 \quad (\text{A.53})$$

$$K_h = 0,075 \times z / 10 + 0,925 \quad (\text{A.54})$$

The above value of K_h for precipitation icing has been obtained using a simple icing model with a wind speed of about 25 km/h at 10 m and droplets fall speed of about 5 m/s.

A.5.8.3 The effect of icing on structures

Ice accretion on structures increases their vertical loads on the structure and may control the design of foundations and some support members.

The weight of ice can be calculated using the geometry of the support members and the relevant thickness of ice accretion. Alternatively, an approximation can be derived from the following table, where:

Ice thickness (mm)	15	25	30	35	40	45	50
Ratio of weight of ice to structure weight	0,57	1,00	1,23	1,48	1,73	2,00	2,28

A.6 Combined wind and ice loadings

A.6.1 Combined probabilities

The action of wind on ice-covered conductors involves at least three variables: wind associated with icing situations, ice weight and ice shape. These combined effects can result in both transversal and vertical loads. Direct measurements of these loads should, ideally, be the best approach but due to the difficulties and cost involved, such measurements are scarce and are not usually available.

Since it is possible to obtain independent observations of wind speed, ice weight and ice shape, it is proposed to combine these variables in such a way that the resulting load will have at least approximately the same return periods T as those adopted for each reliability level.

Combining the probabilities of correlated variables would, however, require the knowledge of the various interacting effects of these variables on the loadings. Assuming that maximum loads are most likely to be related to maximum values of individual variables (wind speed, ice weight and ice shape) a simplified method is proposed. A low probability value of a variable (index L) is combined with high probability (index H) values of the other two variables, as shown in Table A.13. In this method, a certain degree of independence between the different variables is accepted.

Tableau A.13 – Charges de vent et de givre combinées

Cas de charge	Poids du givre	Vitesse du vent	Coefficient de traînée effectif	Densité
Cas 1	g_L	V_{IH}	C_{IH}	δ_1
Cas 2	g_H	V_{IL}	C_{IH}	δ_1
Cas 3	g_H	V_{IH}	C_{IL}	δ_2

On considère que la probabilité élevée correspond à la moyenne des valeurs extrêmes annuelles et que la faible probabilité est celle qui correspond à une période de retour T .

A.6.2 Coefficients de traînée des conducteurs givrés

Les mesurages sur site constituent la meilleure approche pour déterminer les coefficients de traînée et de portance des conducteurs givrés. A l'heure actuelle, on ne dispose toutefois que de très peu de mesures de ce type. On ignore donc encore les distributions statistiques des coefficients de traînée et de portance.

Tant que l'on ne dispose ni de données statistiques sur les valeurs effectives des coefficients de traînée et des densités ni de valeurs expérimentales, il est recommandé d'utiliser les valeurs indiquées au Tableau A.14.

Tableau A.14 – Coefficients de traînée et densité des conducteurs givrés

	Neige collante	Givre léger	Givre dur	Glace compacte
Coefficient de traînée effectif C_{IH}	1,0	1,2	1,1	1,0
Densité δ_1 (kg/m ³)	600	600	900	900
Coefficient de traînée effectif C_{IL}	1,4	1,7	1,5	1,4
Densité δ_2 (kg/m ³)	400	400	700	900

Table A.13 – Combined wind and ice loading conditions

Loading conditions	Ice weight	Wind speed	Effective drag coefficient	Density
Condition 1	g_L	V_{IH}	C_{IH}	δ_1
Condition 2	g_H	V_{IL}	C_{IH}	δ_1
Condition 3	g_H	V_{IH}	C_{IL}	δ_2

The high probability is considered to be the average of extreme yearly values, while the low probability of the variable is the one corresponding to a return period T .

A.6.2 Drag coefficients of ice-covered conductors

Field measurement is the best approach for the determination of the drag or lift coefficients of ice-covered conductors. However, at the current time of writing, very few such measurements exist. As a result, statistical distributions of drag or lift coefficients are not yet known.

As long as statistical data on the effective drag coefficients and densities are not available, it is suggested, in the absence of other experimental values, that the values given in Table A.14 should be used.

Table A.14 – Drag coefficients and density of ice-covered conductors

	Wet snow	Soft rime	Hard rime	Glaze ice
Effective drag coefficient C_{IH}	1,0	1,2	1,1	1,0
Density δ_1 (kg/m ³)	600	600	900	900
Effective drag coefficient C_{IL}	1,4	1,7	1,5	1,4
Density δ_2 (kg/m ³)	400	400	700	900

Annexe B (informative)

Application des fonctions de distribution statistique au calcul de la charge et de la résistance des lignes aériennes

B.1 Généralités

L'ampleur et l'occurrence des charges climatiques, ainsi que la résistance des composants et les facteurs d'utilisation peuvent généralement être décrits par des fonctions de distribution statistique.

La présente annexe décrit les caractéristiques statistiques des phénomènes à représenter et formule quelques propositions sur le choix des distributions susceptibles de mieux convenir à la situation considérée, parmi celles présentées à l'Annexe C.

Quel que soit le phénomène considéré, il est préférable de procéder à des tests d'ajustement des données disponibles pour décider de la distribution adéquate.

Il est recommandé que ces tests commencent, normalement, par un filtrage des données, en vue d'exclure les valeurs qui sont aberrantes pour différentes raisons: erreurs d'enregistrement, mesurages non appropriés, difficultés d'interprétation, etc.

Cette étape permet d'établir une base de données fiable, à partir de laquelle il sera possible de procéder aux ajustements nécessaires des courbes pour obtenir une bonne représentation statistique du phénomène. Différents logiciels sont à même de réaliser ces ajustements. Par ailleurs, le seuil de l'adéquation peut aussi être calculé au moyen des tests classiques d'acceptation de l'ajustement: χ^2 (khi-deux), Kolmogorov-Smirnov, etc.

Même si elles peuvent différer de celles proposées ci-après, il convient de préférer les conclusions ainsi obtenues dès lors qu'elles cadrent mieux avec les séries de données réelles.

B.2 Charges climatiques

B.2.1 Vitesses du vent et charges de vent

La distribution des vitesses maximales annuelles du vent est généralement décrite par une distribution de Gumbel, dont un exemple est donné par la Figure B.1:

Annex B

(informative)

Application of statistical distribution functions to load and strength of overhead lines

B.1 General

The magnitude of climatic loads, their occurrence and the strength of components as well as use factors can be generally described by statistical distribution functions.

This annex describes the statistical characteristics of the phenomena to be represented and gives some proposals on the choice of distributions, which might fit more closely among those presented in Annex C.

To decide on an adequate distribution it is preferable to carry out tests on the fitting of the available data whatever the phenomenon.

These tests should begin with screening of data and exclusion of outlying values for various reasons: recording mistakes, inadequate measurements, interpretation difficulties, etc.

This step establishes a reliable database on which relevant curve fittings could be performed to find an adequate statistical representation of the phenomenon. Various software can perform such fittings and in addition, the significance level of adequacy can be calculated according to classical tests for acceptance of fit: χ^2 (Chi squared), Kolmogorov-Smirnov, etc.

The conclusions might differ from that proposed hereafter, but they should be preferred if they offer a better fit to the actual data series.

B.2 Climatic loads

B.2.1 Wind velocities and wind loads

The distribution of yearly maximum wind velocities is usually described by a Gumbel distribution; an example being given in Figure B.1:

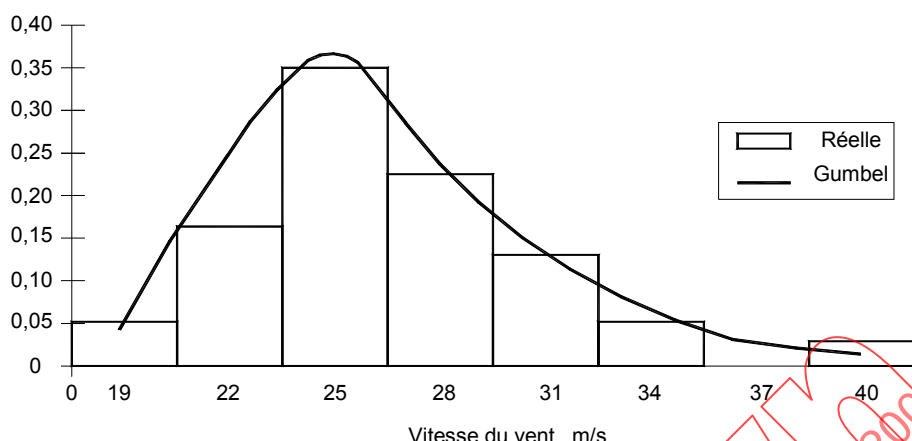


Figure B.1 – Ajustement de la distribution de Gumbel avec un histogramme des données de vent

La simplicité mathématique de la distribution de Gumbel (définie par seulement deux variables) facilite l'ajustement de la courbe selon l'Article C.3. Cependant, certaines approches ou règles de construction préfèrent utiliser une loi de Gumbel pour analyser la pression du vent (plutôt que sa vitesse). C'est l'hypothèse de base de l'EUROCODE.

Il convient en outre de noter que de nombreux pays proposent des cartes des vents de leur territoire. Celles-ci indiquent généralement la vitesse du vent intégrée sur 10 min, assortie d'une période de retour de 50 ans. Par ailleurs, les Etats-Unis ont récemment adopté la vitesse du vent sur 3 s comme variable statistique.

Il convient d'utiliser directement ces cartes, lorsqu'il en existe.

Une analyse de données météorologiques montre que la distribution des valeurs maximales annuelles concernant la vitesse du vent ou les charges et l'épaisseur du manchon de givre peuvent être représentées de manière suffisamment exacte par une loi de distribution de valeurs extrêmes (loi de Gumbel de Type I).

La formule de base pour la fonction de répartition de Gumbel de Type I est la suivante:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-a \times (x - u)]\} \quad (\text{B.1})$$

où

$$a = C_1 / \sigma \quad \text{et} \quad u = \bar{x} - C_2 / a \quad (\text{B.2})$$

Cette formule exprime la probabilité $F(x)$ qu'une valeur prise au hasard soit inférieure à une valeur x dans une distribution dans laquelle la valeur moyenne est $\bar{x}$ et l'écart type σ .

Les paramètres C_1 et C_2 dépendent du nombre d'années (n) comportant des observations. Ils sont chiffrés au Tableau B.1. Pour leur calcul, voir l'Article C.4, et Tableau C.1.

La forme générale de l'équation (B.1) devient alors:

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{C_1}{\sigma} \left(x - \bar{x} + \frac{C_2 \times \sigma}{C_1}\right)\right]\right\} \quad (\text{B.3})$$

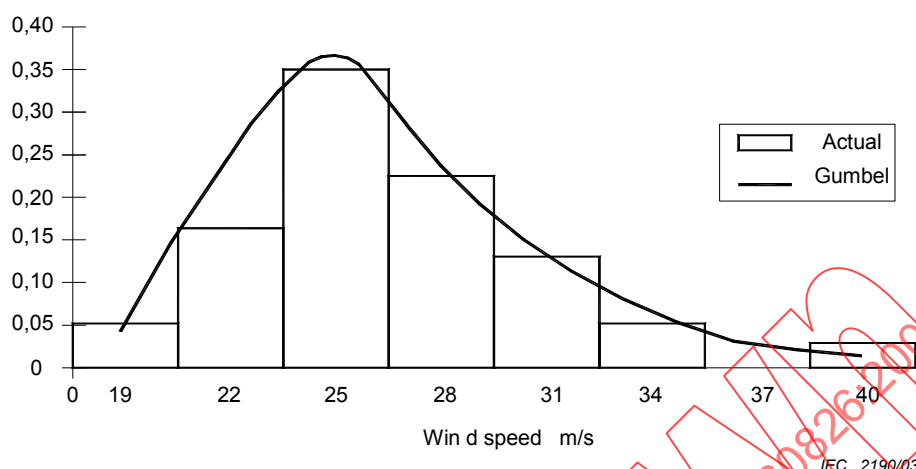


Figure B.1 – Fitting of Gumbel distribution with wind data histogram

The mathematical simplicity of the Gumbel distribution (defined by only two variables) allows an easy curve fitting by referring to Clause C.3. However, some approaches and building codes prefer to analyse the wind pressure (instead of speed) according to a Gumbel law. This is the basic assumption of EUROCODE.

In addition, it should be noted that many countries offer wind maps covering their territories, giving usually the 10 min wind speed with 50 years return period. In the USA, the 3 s wind speed has recently been adopted as the statistical variable of wind speed.

Where available, these maps should be used directly.

An analysis of meteorological data has shown that the distribution of annual maximum wind velocities or ice loads and ice thicknesses can be represented, with good approximation, by an extreme value distribution law (Gumbel Type I).

The basic formula for the Gumbel Type I cumulative distribution function has the form:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-a \times (x - u)]\} \quad (\text{B.1})$$

where

$$a = C_1 / \sigma \quad \text{and} \quad u = \bar{x} - C_2 / a \quad (\text{B.2})$$

This formula expresses the probability $F(x)$ that a random value will be less than a value x in a distribution with a mean value $\bar{x}$ and a standard deviation σ .

The parameters C_1 and C_2 depend on the number of years (n) with observations and are given in Table B.1. For calculation of C_1 and C_2 see Clause C.4 and Table C.1.

The general form of Equation (B.1) thus becomes:

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{C_1}{\sigma}\left(x - \bar{x} + \frac{C_2 \times \sigma}{C_1}\right)\right]\right\} \quad (\text{B.3})$$

et, dans le cas où $n \approx \infty$

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \pi \left(x - \bar{x} + 0,45\sigma \right) / \left(\sigma \times \sqrt{6} \right) \right] \right\} \quad (\text{B.4})$$

La probabilité $P(x)$ que la valeur observée soit supérieure à x sur une année est donc la suivante:

$$P(x) = 1 - \exp \left\{ - \exp \left[- \pi \left(x - \bar{x} + 0,45\sigma \right) / \left(\sigma \times \sqrt{6} \right) \right] \right\} \quad (\text{B.5})$$

A titre de simplification, la période de retour T de la valeur x est donnée par la formule:

$$T = \frac{1}{P(x)} \quad (\text{B.6})$$

En adaptant les formules (B.3) et (B.6), on obtient:

$$x = \bar{x} - \frac{C_2\sigma}{C_1} - \frac{\sigma}{C_1} \left[\ln(-\ln(1 - 1/T)) \right] \quad (\text{B.7})$$

La formule (B.7) donne la valeur x avec une période de retour T , qui dépend de $\bar{x}$, C_1 et C_2 .

Si $n \approx \infty$, alors:

$$x_\infty = \bar{x} - 0,45\sigma - \frac{\sigma\sqrt{6}}{\pi} \left[\ln(-\ln(1 - 1/T)) \right] \quad (\text{B.8})$$

A partir des équations (B.7) et (B.8), on obtient le rapport $x (n < \infty) / x (n = \infty)$, défini comme K_n .

$$K_n = x_n / x_\infty = \left\{ \bar{x} - \frac{C_2(n) \cdot \sigma}{C_1(n)} - \frac{\sigma}{C_1(n)} \left[\ln(-\ln(1 - 1/T)) \right] \right\} / \left\{ \bar{x} - 0,45\sigma - \frac{\sigma \times \sqrt{6}}{\pi} \left[\ln(-\ln(1 - 1/T)) \right] \right\} \quad (\text{B.9})$$

Le paramètre $K_{\sigma x}$ est obtenu à partir de l'équation (B.8), qui s'applique à un nombre infini d'observations.

$$K_{\sigma x} = x_\infty / \bar{x} = 1 - 0,45 \frac{\sigma}{\bar{x}} - \frac{\sigma}{\bar{x}} \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[\ln(-\ln(1 - 1/T)) \right]$$

ou

(B.10)

$$K_{\sigma x} = 1 - v_x \left\{ 0,45 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[\ln(-\ln(1 - 1/T)) \right] \right\}$$

and in the case where $n \approx \infty$

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\pi\left(x - \bar{x} + 0,45\sigma\right)/\left(\sigma \times \sqrt{6}\right)\right]\right\} \quad (\text{B.4})$$

Hence, the probability $P(x)$ that the observed value will be higher than x during one year is:

$$P(x) = 1 - \exp\left\{-\exp\left[-\pi\left(x - \bar{x} + 0,45\sigma\right)/\left(\sigma \cdot \sqrt{6}\right)\right]\right\} \quad (\text{B.5})$$

As a simplification the return period T of the value x is given by:

$$T = \frac{1}{P(x)} \quad (\text{B.6})$$

By rearranging the Formulae (B.3) and (B.6) the following is obtained:

$$x = \bar{x} - \frac{C_2\sigma}{C_1} - \frac{\sigma}{C_1} [\ln(-\ln(1-1/T))] \quad (\text{B.7})$$

Formula (B.7) gives the value x with a return period T as a function of $\bar{x}$, C_1 and C_2 .

If $n \approx \infty$, then:

$$x_\infty = \bar{x} - 0,45\sigma - \frac{\sigma\sqrt{6}}{\pi} [\ln(-\ln(1-1/T))] \quad (\text{B.8})$$

From Equations (B.7) and (B.8) the ratio $x (n < \infty) / x (n = \infty)$ follows, which is defined as K_n .

$$K_n = x_n/x_\infty = \left\{ \bar{x} - \frac{C_2(n) \cdot \sigma}{C_1(n)} - \frac{\sigma}{C_1(n)} [\ln(-\ln(1-1/T))] \right\} / \left\{ \bar{x} - 0,45\sigma - \frac{\sigma\sqrt{6}}{\pi} [\ln(-\ln(1-1/T))] \right\} \quad (\text{B.9})$$

From Equation (B.8) the parameter $K_{\sigma x}$ is obtained, which applies to an infinite number of observations

$$K_{\sigma x} = x_\infty / \bar{x} = 1 - 0,45 \frac{\sigma}{\bar{x}} - \frac{\sigma}{\bar{x}} \frac{\sqrt{6}}{\pi} [\ln(-\ln(1-1/T))] \quad (\text{B.10})$$

or

$$K_{\sigma x} = 1 - v_x \left\{ 0,45 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} [\ln(-\ln(1-1/T))] \right\}$$

Enfin, il s'ensuit des équations (B.7), (B.9) et (B.10) que:

$$x/\bar{x} = K_n \times K_{ox} = 1 - \frac{V_x}{C_1} [C_2 + \ln(-\ln(1 - 1/T))] \quad (B.11)$$

Les valeurs de $x/\bar{x}$ obtenues à partir de l'équation (B.11) sont indiquées au Tableau B.1 pour différentes périodes de retour T et divers nombres d'années d'observation n .

Il n'est pas possible de combiner directement les vitesses du vent à la résistance des supports, puisque les charges dépendent du carré des vitesses du vent.

$$L_w = kV^2 \quad (B.12)$$

Le facteur k dépend de différents paramètres: diamètre du conducteur, coefficient de traînée ou facteurs de rafale, notamment. Pour la conception des lignes, il peut être nécessaire de connaître les caractéristiques statistiques des charges de vent. Une distribution appropriée peut être obtenue en supposant:

$$\bar{L} \sim k\bar{V}^2 \text{ et } \sigma_L / \bar{L} \sim 2\sigma_V / \bar{V} \quad (B.13)$$

On peut démontrer le bien-fondé de ces relations en se référant à des exemples.

Ainsi, si $x = V$; $\bar{x} = \bar{V}$ et $\sigma = \sigma_V$, la formule (B.3) devient:

$$F_{(V)} = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{C_1}{\sigma_V} \left(V - \bar{V} + \frac{C_2}{C_1} \sigma_V \right) \right] \right\} \quad (B.14)$$

L'équation (B.13) prend quant à elle la forme:

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{L}/k} \text{ et } \sigma_V = 2\sigma_L \cdot \bar{V} / \bar{L}$$

En conséquence, l'équation (B.14) devient:

$$F_{(L)} = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{C_1}{\sigma_L} \left(2\sqrt{\bar{L}} - 2\bar{L} + \frac{C_2}{C_1} \sigma_L \right) \right] \right\} \quad (B.14a)$$

On peut alors apparier charges et résistance en utilisant le double de l'écart type des vitesses du vent.

Finally, Equations (B.7), (B.9) and (B.10) yield

$$x/\bar{x} = K_n \times K_{\sigma x} = 1 - \frac{v_x}{C_1} [C_2 + \ln(-\ln(1-1/T))] \quad (\text{B.11})$$

The values $x/\bar{x}$ as obtained from Equation (B.11) are given in Table B.1 for various return periods T and number of years of observation n .

Wind velocities cannot be directly combined with strength of supports because the loadings depend on the square of wind velocities.

$$L_w = kV^2 \quad (\text{B.12})$$

The factor k depends on various parameters such as the conductor diameter, drag coefficient, gust factors, etc. For line design it may be necessary to know the statistical characteristics of wind loads. An appropriate distribution can be obtained by assuming

$$\bar{L} \sim k\bar{V}^2 \text{ and } \sigma_L/\bar{L} \sim 2\sigma_v/\bar{V} \quad (\text{B.13})$$

These relations can be proved by carrying out examples.

With $x = V$; $\bar{x} = \bar{V}$ and $\sigma = \sigma_v$ from (B.3) results

$$F(v) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{C_1}{\sigma_v} \left(V - \bar{V} + \frac{C_2}{C_1} \sigma_v \right) \right] \right\} \quad (\text{B.14})$$

From Equation (B.13)

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{L}/k} \text{ and } \sigma_v = 2\sigma_L \cdot \bar{V}/\bar{L}$$

follow. Therefore, Equation (B.14) yields

$$F(L) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{C_1}{\sigma_L} \left(2\sqrt{L\bar{L}} - 2\bar{L} + \frac{C_2}{C_1} \sigma_L \right) \right] \right\} \quad (\text{B.14a})$$

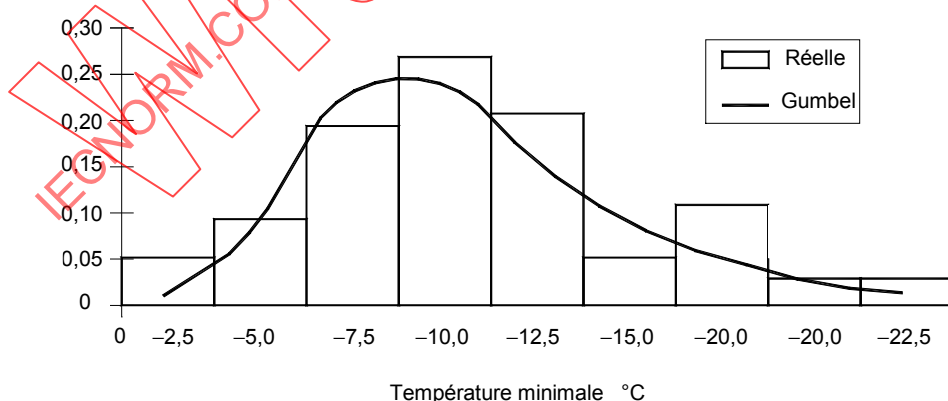
Matching loads and strength can be obtained by using twice the standard deviation of wind velocities.

Tableau B.1 – Rapports de $x / \bar{x}$ pour une fonction de distribution de Gumbel, T correspondant à la période de retour en années de l'événement de charge, n au nombre d'années comportant des observations et v_x au coefficient de variation

c.v.	T	Niveau de fiabilité 1						Niveau de fiabilité 2						Niveau de fiabilité 3					
		50 ans						150 ans						500 ans					
v_x	n	10	15	20	25	50	∞	10	15	20	25	50	∞	10	15	20	25	50	∞
0,05		1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,24	1,22	1,21	1,21	1,19	1,17	1,30	1,28	1,27	1,26	1,24	1,22
0,075		1,27	1,25	1,24	1,23	1,22	1,19	1,36	1,33	1,32	1,31	1,29	1,26	1,45	1,42	1,40	1,39	1,37	1,33
0,10		1,36	1,33	1,32	1,31	1,29	1,26	1,48	1,44	1,42	1,41	1,38	1,36	1,60	1,56	1,54	1,52	1,49	1,44
0,12		1,43	1,40	1,38	1,37	1,35	1,31	1,57	1,53	1,51	1,49	1,46	1,41	1,72	1,67	1,64	1,62	1,59	1,53
0,15		1,54	1,50	1,48	1,46	1,43	1,39	1,71	1,66	1,63	1,62	1,58	1,52	1,90	1,84	1,80	1,78	1,73	1,66
0,16		1,57	1,53	1,51	1,49	1,46	1,41	1,76	1,70	1,68	1,66	1,61	1,55	1,96	1,89	1,86	1,83	1,78	1,70
0,20		1,72	1,66	1,64	1,62	1,58	1,52	1,95	1,88	1,84	1,82	1,77	1,69	2,20	2,12	2,07	2,04	1,98	1,88
0,25		1,90	1,83	1,79	1,77	1,72	1,65	2,19	2,10	2,05	2,03	1,96	1,86	2,51	2,40	2,34	2,30	2,22	2,10
0,30		2,08	2,00	1,95	1,93	1,87	1,78	2,43	2,32	2,27	2,23	2,15	2,04	2,81	2,68	2,61	2,56	2,46	2,32
0,35		2,26	2,16	2,11	2,06	2,01	1,91	2,66	2,54	2,48	2,44	2,34	2,21	3,11	2,96	2,87	2,82	2,71	2,54
0,40		2,43	2,33	2,27	2,24	2,16	2,04	2,90	2,76	2,69	2,64	2,54	2,36	3,41	3,23	3,14	3,08	2,95	2,76
0,45		2,61	2,49	2,43	2,39	2,30	2,17	3,14	2,98	2,90	2,85	2,73	2,55	3,71	3,51	3,41	3,34	3,20	2,98
0,50		2,79	2,66	2,59	2,54	2,44	2,30	3,38	3,20	3,11	3,05	2,92	2,73	4,01	3,79	3,68	3,60	3,44	3,20
0,55		2,97	2,83	2,75	2,70	2,59	2,43	3,61	3,42	3,32	3,26	3,11	2,90	4,31	4,07	3,94	3,86	3,68	3,42
0,60		3,15	2,99	2,91	2,85	2,73	2,56	3,85	3,64	3,53	3,46	3,30	3,07	4,61	4,35	4,21	4,12	3,93	3,64
0,65		3,33	3,16	3,07	3,01	2,88	2,68	4,09	3,86	3,74	3,67	3,50	3,25	4,91	4,63	4,48	4,38	4,17	3,86

B.2.2 Températures

Les températures minimales annuelles peuvent, elles aussi, être ajustées au moyen d'une distribution de Gumbel. La Figure B.2 ci-dessous en donne un exemple:



IEC 2191/03

Figure B.2 – Ajustement de la distribution de Gumbel et d'un histogramme des températures minimales annuelles

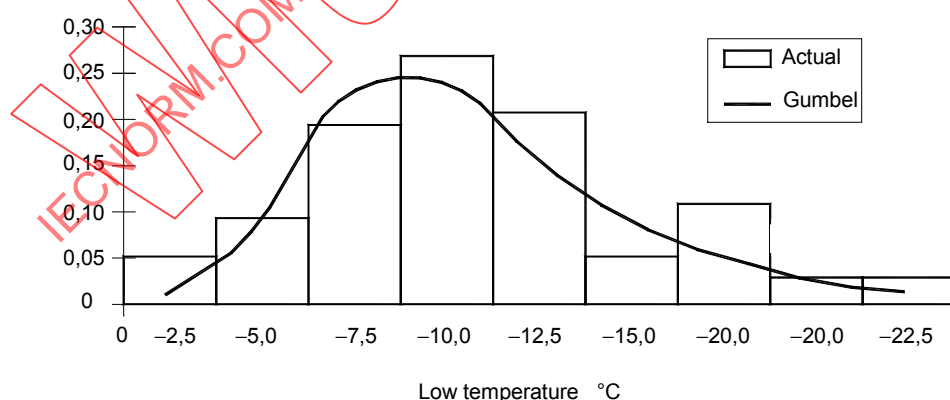
Ici aussi, il convient d'utiliser les cartes des températures lorsqu'il en existe.

Table B.1 – Ratios of $x / \bar{x}$ for a Gumbel distribution function, T return period in years of loading event, n number of years with observations, v_x coefficient of variation

COV v_x	T n	Reliability level 1 50 years						Reliability level 2 150 years						Reliability level 3 500 years					
		10	15	20	25	50	∞	10	15	20	25	50	∞	10	15	20	25	50	∞
		10	15	20	25	50	∞	10	15	20	25	50	∞	10	15	20	25	50	∞
0,05		1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,24	1,22	1,21	1,21	1,19	1,17	1,30	1,28	1,27	1,26	1,24	1,22
0,075		1,27	1,25	1,24	1,23	1,22	1,19	1,36	1,33	1,32	1,31	1,29	1,26	1,45	1,42	1,40	1,39	1,37	1,33
0,10		1,36	1,33	1,32	1,31	1,29	1,26	1,48	1,44	1,42	1,41	1,38	1,36	1,60	1,56	1,54	1,52	1,49	1,44
0,12		1,43	1,40	1,38	1,37	1,35	1,31	1,57	1,53	1,51	1,49	1,46	1,41	1,72	1,67	1,64	1,62	1,59	1,53
0,15		1,54	1,50	1,48	1,46	1,43	1,39	1,71	1,66	1,63	1,62	1,58	1,52	1,90	1,84	1,80	1,78	1,73	1,66
0,16		1,57	1,53	1,51	1,49	1,46	1,41	1,76	1,70	1,68	1,66	1,61	1,55	1,96	1,89	1,86	1,83	1,78	1,70
0,20		1,72	1,66	1,64	1,62	1,58	1,52	1,95	1,88	1,84	1,82	1,77	1,69	2,20	2,12	2,07	2,04	1,98	1,88
0,25		1,90	1,83	1,79	1,77	1,72	1,65	2,19	2,10	2,05	2,03	1,96	1,86	2,51	2,40	2,34	2,30	2,22	2,10
0,30		2,08	2,00	1,95	1,93	1,87	1,78	2,43	2,32	2,27	2,23	2,15	2,04	2,81	2,68	2,61	2,56	2,46	2,32
0,35		2,26	2,16	2,11	2,06	2,01	1,91	2,66	2,54	2,48	2,44	2,34	2,21	3,11	2,96	2,87	2,82	2,71	2,54
0,40		2,43	2,33	2,27	2,24	2,16	2,04	2,90	2,76	2,69	2,64	2,54	2,36	3,41	3,23	3,14	3,08	2,95	2,76
0,45		2,61	2,49	2,43	2,39	2,30	2,17	3,14	2,98	2,90	2,85	2,73	2,55	3,71	3,51	3,41	3,34	3,20	2,98
0,50		2,79	2,66	2,59	2,54	2,44	2,30	3,38	3,20	3,11	3,05	2,92	2,73	4,01	3,79	3,68	3,60	3,44	3,20
0,55		2,97	2,83	2,75	2,70	2,59	2,43	3,61	3,42	3,32	3,26	3,11	2,90	4,31	4,07	3,94	3,86	3,68	3,42
0,60		3,15	2,99	2,91	2,85	2,73	2,56	3,85	3,64	3,53	3,46	3,30	3,07	4,61	4,35	4,21	4,12	3,93	3,64
0,65		3,33	3,16	3,07	3,01	2,88	2,68	4,09	3,86	3,74	3,67	3,50	3,25	4,91	4,63	4,48	4,38	4,17	3,86

B.2.2 Temperatures

The yearly minimum temperatures can also be fitted by a Gumbel distribution; an example is given in Figure B.2 below:



IEC 2191/03

Figure B.2 – Fitting of Gumbel distribution with yearly minimum temperature histogram

Again, when temperature maps are available, they should be used.

B.2.3 Charges de givre

Les charges de givre maximales annuelles ne présentent pas un profil uniforme.

Dans certaines régions, un grand nombre d'années peuvent s'écouler sans aucun givrage, et un petit nombre se signaler par de fortes charges de givre. Or, les lois de Gumbel ne se prêtent pas aisément à la description d'un tel phénomène. Un exemple en est donné ci-après (Figure B.3):

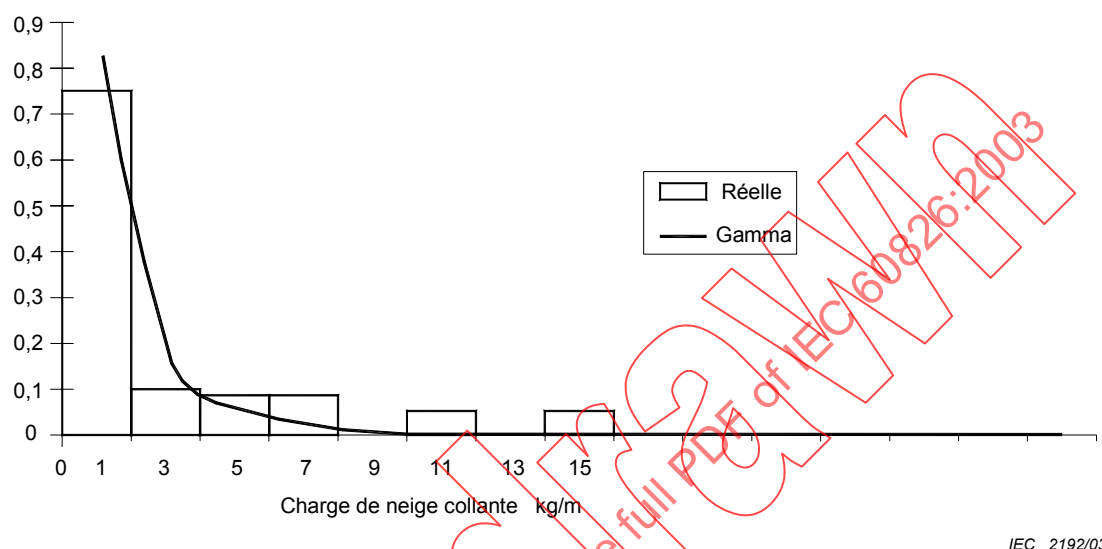


Figure B.3 – Ajustement de la distribution gamma et d'un histogramme de charge de givre

La distribution de Gumbel est couramment utilisée pour les charges de givre. Certaines études suggèrent néanmoins que, souvent, la distribution gamma convient elle aussi à la représentation d'un tel phénomène, en particulier lorsque le givre ne se manifeste pas chaque année.

Pour faciliter l'ajustement de la courbe, l'une de ces études a montré que le paramètre p_1 peut être pris légèrement en deçà de 0, afin d'obtenir une valeur finie pour la densité $f(0)$. Exemple: $p_1 \approx -0,03$.

Sur le plan physique, cette configuration particulière pourrait s'expliquer par l'effet de seuil dû à la température sur ces phénomènes de givrage.

Concernant le brouillard givrant, la température doit nécessairement être inférieure à 0 °C. Cela signifie que, dans une région au climat relativement doux, toutes les conditions favorables à la formation de givre peuvent souvent être présentes à l'exception d'une seule: la température appropriée à ce phénomène, ce qui pourrait expliquer la rareté de ce dernier.

Concernant la neige collante, il existe deux seuils de température, qui sont généralement fixés à -1 °C et +2 °C. Cela accentue encore la rareté du phénomène par rapport au brouillard givrant, ce que confirment les observations.

Néanmoins, lorsqu'ils se produisent, ces phénomènes sont suffisamment graves pour qu'il y ait lieu de ne pas les négliger.