

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
826**

Deuxième édition
Second edition
1991-04

**Charge et résistance des lignes aériennes
de transport**

**Loading and strength of overhead
transmission lines**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 826: 1991

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique*;
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
826**

Deuxième édition
Second edition
1991-04

**Charge et résistance des lignes aériennes
de transport**

**Loading and strength of overhead
transmission lines**

© CEI 1991 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XE**

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

CORRIGENDUM 1

Page 12

Correction du texte anglais seulement.

Page 13

Introduction

Second paragraph

Instead of: The proposed methods also enable for ...

Read: The proposed methods also provide for ...

Third paragraph

Instead of: The techniques described permit the designer ...

Read: The techniques described enable the designer ...

Page 16

Paragraphe 1.2.2

Corriger le titre existant par:

Coefficient de variation (COV) ou dispersion

Page 17

Correction to French text only.

Page 20

Paragraphe 1.3, douzième ligne

Remplacer C_{xTc} = Coefficient de traînée des supports par:

$\left. \begin{array}{l} C_{xT1} \\ C_{xT2} \\ C_{xTc} \end{array} \right\} = \text{Coefficients de traînée des supports.}$

Page 21

Subclause 1.3, eleventh line

Replace C_{xTc} = Drag coefficient of supports by:

$\left. \begin{array}{l} C_{xT1} \\ C_{xT2} \\ C_{xTc} \end{array} \right\} = \text{Drag coefficients of supports.}$

Page 32

Figure 1, légende

Au lieu de: Q_T 10 % R

Lire: Q_T (10 %) R

Page 33

Figure 1, legend

Instead of: Q_T 10 % R

Read: Q_T (10 %) R

Page 40

Tableau 2

Au lieu de:

Charge de calcul $Q_T^{1)}$

Résistance de calcul $R^{2)}(\sigma)$

Fiabilité $P_s^{3)}$

Lire:

Charge de calcul $Q_T^{1)}$

Résistance de calcul $(\sigma)R^{2)}$

Fiabilité $P_s^{3)}$

Page 72

Correction du texte anglais seulement.

Page 82

Correction du texte anglais seulement.

Page 98

Tableau 14, première colonne

Au lieu de:

Coefficient de
variation

$$\frac{K_{\sigma g}}{\bar{g}}$$

Page 41

Table 2

Instead of:

Design load $Q_T^{1)}$

Design strength $(\sigma)R^{2)}$

Reliability $P_s^{3)}$

and (5 % à 20 %) under "Strength R"
column "COV"

Read:

Design load $Q_T^{1)}$

Design strength $(\sigma)R^{2)}$

Reliability $P_s^{3)}$

and (5 % to 20 %) under "Strength R" column
"COV"

Page 73

Note b)

Instead of: ... the ratio of $V_m / \bar{V}_m$

Read: ... the ratio of $V_M / \bar{V}_m$

Page 83

Fourth line from top of page

Instead of: The solidity ratio c of one
face ...

Read: The solidity ratio χ of one face ...

Page 99

Table 14, first column

Instead of:

Coefficient of
variation of ice loads

$$\frac{K_{\sigma g}}{\bar{g}}$$

Lire:

Coefficient de
variation

$$\frac{\sigma_g}{g}$$

Read:

Coefficient of
variation of ice loads

$$\frac{\sigma_g}{g}$$

Page 102

Figure 15, titre

Au lieu de: Variation de K_n en fonction ...

Lire: Variation de K_n en fonction ...

Page 103

Figure 15, caption

Instead of: Variation of K_n ...

Read: Variation of K_n ...

Page 112

Tableau 16, troisième colonne

Sous: Vitesse du vent

Lire: V_{IH}
 V_{IL}
 V_{IH}

Page 113

Table 16, third column

Under: Wind velocity

Read: V_{IH}
 V_{IL}
 V_{IH}

Page 132

Figure 21

Remplacer le symbole de hauteur "h" par "H"

Page 133

Figure 21

Replace the letter symbol of elevation "h" by "H"

Page 138

Paragraphe 3.6 3.3, deuxième alinéa de "Commentaires": remplacer le texte existant par ce qui suit:

Recommandé pour les structures d'ancrage ou lignes exposées à des conditions climatiques sévères.

Page 139

Correction to French text only.

Page 140

Note 1, troisième alinéa, avant-dernière ligne

Au lieu de: structures statiquement indéterminées).

Lire: structures hyperstatiques).

Page 141

Note 1, third paragraph, fourth line

Instead of: (especially statically indeterminate structures).

Read: (especially hyperstatic structures).

Page 144

Paragraphe 4.4, troisième ligne

Remplacer fonction de densité par loi

Page 145

Correction to French text only.

Page 146

Tableau 20

Remplacer le haut du tableau par ce qui suit:

Supports			Limite d'endommagement	Limite de défaillance
Type de support	Matériaux ou éléments	Mode de chargement		
Pylônes en treillis (y compris pylônes haubanés)	Tous éléments sauf haubans	Traction	Limite élastique	Contrainte de rupture limite
		Cisaillement	90 % de la limite de cisaillement (élastique)	Effort de cisaillement (rupture)
		Compression (flambage)	Déformation non élastique** de L/500 à L*/100	Effondrement par instabilité
	Haubans d'acier	Traction	Valeur la plus faible de: - limite élastique (70 % à 75 % CRN) - déformation correspondant à une diminution de 5 % de résistance du pylône - nécessité de régler la tension	Charge de rupture nominale (CRN)

Page 147

Table 20

Replace the first part of the table by the following:

Supports			Damage limit	Failure limit
Support type	Material or elements	Loading mode		
Lattice tower (including guyed towers)	All elements except guys	Tension	Yield (elastic) stress	Ultimate tensile (breaking) 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 a 5 % reduction in the tower strength - need to readjust tension	Ultimate tensile stress

Page 150

Tableau 22, troisième colonne

Remplacer: Charge de rupture limite
par: Charge de rupture nominale (CRN)

Page 151

Correction to French text only.

Page 172

Dans la première équation, mettre 10 %
entre parenthèses

Page 173

In the first equation, put 10 % between
brackets

Page 176

Tableau A.1, colonnes 3 et 4

Centrer B1, A2 et B2, C1

Page 177

Table A.1, columns 3 and 4

Centre B1, A2 and B2, C1

Page 178

Tableau A.2, colonnes 3 et 4

Centrer B1, A2 et B2, C1

Page 179

Table A.2, columns 3 and 4

Centre B1, A2 and B2, C1

Page 188

Remplacer l'équation (B.1) existante par
la suivante:

$$f(U) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} U^{r-1} (1-U)^{t-r-1}$$

Page 189

Replace the existing equation (B.1) by
the following:

$$f(U) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} U^{r-1} (1-U)^{t-r-1}$$

Page 194

Equation (C.2)

Remplacer l'équation existante par la
suivante:

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left[- \frac{c_1}{\sigma} \left(x - \bar{x} + \frac{c_2}{c_1} \sigma \right) \right] \right]$$

Page 195

Equation (C.2)

Replace the existing equation by the
following:

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left[- \frac{c_1}{\sigma} \left(x - \bar{x} + \frac{c_2}{c_1} \sigma \right) \right] \right]$$

Page 206

Annexe E, premier alinéa

Au lieu de: ...se trouvent dans les sites ...

Lire: ...se trouvant dans des sites ...

Page 207

Correction to French text only.

Annexe E, troisième alinéa

Au lieu de: du site météorologique.

Lire: de la station météorologique.

Annexe E, tableau E.1, première colonne

Au lieu de: Rugosité du site météorologique

Lire: Rugosité de la station météorologique

Page 220

Paragraphe J.3.1, alinéa b), avant-dernière ligne

Au lieu de: ... l'accumulation de givre peut ...

Lire: ... l'accumulation peut ...

Paragraphe J.3.2, dernière ligne

Au lieu de: ... et la plus forte.

Lire: ...est la plus forte.

Page 221

Correction to French text only.

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	8
PRÉFACE	8
INTRODUCTION	12

SECTION 1: GÉNÉRALITÉS

Articles

1.1	Domaine d'application	16
1.2	Définitions	16
1.3	Symboles et abréviations	20
1.4	Critères de conception	26
1.5	Conception du système	26
1.6	Evaluation de la fiabilité des lignes	32
1.7	Prescriptions de sécurité	42
1.8	Prescriptions relatives à la sécurité du personnel	44

SECTION 2: CRITÈRES DE CONCEPTION

2.1	Généralités	46
2.2	Critères de conception	54
2.3	Calcul des pylônes	62
2.4	Critères de calcul des fondations	64
2.5	Critères de calcul des conducteurs et des câbles de garde	66
2.6	Critères de calcul des isolateurs et des matériels d'équipement	66

SECTION 3: CHARGES

3.1	Généralités	66
3.2	Charges climatiques, vent	68
3.3	Charges climatiques, givre sans vent	94
3.4	Charges climatiques, vent et givre combinés	110
3.5	Charges de construction et d'entretien	128
3.6	Charges pour limitation de défaillance	134

SECTION 4: RÉSISTANCE DES COMPOSANTS ET ÉTATS LIMITES

4.1	Généralités	140
4.2	Composants des systèmes de lignes de transport	142
4.3	Etats limites des composants de ligne	142
4.4	Données sur la résistance des composants de ligne	144

CONTENTS

	Page
FOREWORD	9
PREFACE	9
INTRODUCTION	13

SECTION 1: GENERAL

Clause		
1.1	Scope	17
1.2	Definitions	17
1.3	Symbols and abbreviations	21
1.4	Design basis	27
1.5	System design	27
1.6	Assessment of line reliability	33
1.7	Security requirements	43
1.8	Safety requirements	45

SECTION 2: DESIGN CRITERIA

2.1	General	47
2.2	Design criteria	55
2.3	Design criteria for towers	63
2.4	Design criteria for foundations	65
2.5	Design criteria for conductors and earth wires	67
2.6	Design criteria for insulators and hardware	67

SECTION 3: LOADINGS

3.1	General	67
3.2	Climatic loads, wind	69
3.3	Climatic loads, ice without wind	95
3.4	Climatic loads, combined wind and ice loadings	111
3.5	Loads for construction and maintenance	129
3.6	Loads for failure containment	135

SECTION 4: STRENGTH OF COMPONENTS AND LIMIT STATES

4.1	General	141
4.2	Components of transmission line systems	143
4.3	Limit states of line components	143
4.4	Strength data of line components	145

Articles

Pages

SECTION 5: JUSTIFICATIONS TECHNIQUES

5.1	Domaine d'application	154
5.2	Rapport entre la charge et la résistance	154
5.3	Effet de la dispersion de portée sur la fiabilité	162
5.4	Coordination de résistance des composants de ligne	164
5.5	Nombre de composants exposés à l'intensité de charge maximale	170

ANNEXES

A	Effet de la dispersion de portée sur la relation charge-résistance, calcul du facteur d'utilisation de portée	174
A.1	Généralités	174
A.2	Effet du facteur d'utilisation sur la réduction des charges	178
A.3	Effet du nombre de pylônes sur γ_u	182
A.4	Résultats généralisés pour γ_u	186
B	Fonction de distribution Bêta	188
C	Distribution statistique des vitesses de vent annuelles maximales et des charges de givre	192
D	Résistance caractéristique des composants	200
D.1	Calculs	200
D.2	Composants sans résistance caractéristique définie	202
D.3	Calcul de pylônes en treillis	202
D.4	Calcul des fondations	204
E	Détermination de la vitesse de référence météorologique du vent	206
F	Vitesses de vent de gradient	210
G	Mesure des températures et leur interprétation	212
G.1	Emplacement des mesures de référence	212
G.2	Localisation des thermomètres	212
G.3	Interprétation des mesures	212
G.4	Application à d'autres sites	212
H	Types de formation de givre	214
H.1	Givrage par précipitation	214
H.2	Brouillard givrant	214

SECTION 5: TECHNICAL JUSTIFICATIONS

5.1	Scope	155
5.2	Relation between load and strength	155
5.3	Effect of span dispersion on reliability	163
5.4	Strength coordination of line components	165
5.5	Number of components subjected to maximum load intensity	171

ANNEXES

A	The effect of span dispersion on load-strength relationship: calculation of span use factor	175
A.1	General	175
A.2	Effect of use factor on load reduction	179
A.3	Effect of number of towers on γ_u	183
A.4	Generalized results for γ_u	187
B	The Beta distribution function	189
C	Statistical distribution of maximum yearly wind velocity and ice load	193
D	Characteristic strength of components	201
D.1	Calculations	201
D.2	Components without a defined characteristic strength	203
D.3	Design of lattice towers	203
D.4	Design of foundations	205
E	Determination of the meteorological reference wind velocity	207
F	Gradient wind speeds	211
G	Temperature measurements and their interpretation	213
G.1	Location of the reference measurements	213
G.2	Positioning of thermometers	213
G.3	Interpretation of the measurements	213
G.4	Application to other sites	213
H	Types of icing	215
H.1	Precipitation icing	215
H.2	In-cloud icing	215

ANNEXES

Pages

J	Processus de givrage atmosphérique et influences du terrain	218
J.1	Définitions	218
J.2	Brouillard givrant	218
J.3	Givrage par précipitation	220
K	Directives pour la réalisation d'un programme d'observation du givre	222
K.1	Généralités	222
K.2	Implantation des stations	222
K.3	Durée du programme d'observations	224
K.4	Mesures de givre	224

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60826-1997

ANNEXES

Page

J	Atmospheric icing process and terrain influences	219
J.1	Definitions	219
J.2	In-cloud icing	219
J.3	Precipitation icing	221
K	Guidelines for the implementation of an ice observation programme	223
K.1	General	223
K.2	Station location	223
K.3	Duration of the observation programme	225
K.4	Ice measurements	225

Withdrawing
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60826-1997

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CHARGE ET RÉSISTANCE DES LIGNES AÉRIENNES DE TRANSPORT

AVANT-PROPOS

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

Le présent rapport technique a été établi par le Comité d'Etudes n° 11 de la CEI: Recommandations pour les lignes aériennes.

Il constitue la deuxième édition de la CEI 826 et remplace la première édition qui a été publiée en quatre parties entre 1985 et 1987.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapports de vote
11(BC)28	11(BC)31 et 31A

Les rapports de vote indiqués dans le tableau ci-dessus donnent toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette publication.

Compte tenu des changements dans les pratiques en vigueur introduits par les méthodes fondées sur la fiabilité, il a paru prudent de mettre à profit une période probatoire de deux à quatre ans pendant laquelle les méthodes de conception proposées dans ce rapport seront comparées aux pratiques existantes.

Il est demandé aux utilisateurs de ce rapport d'adresser leurs commentaires et leurs suggestions au Bureau Central de la CEI.

A l'issue de cette période probatoire ce rapport sera revu et modifié en fonction des commentaires reçus afin d'être transformé en norme ou il sera retiré.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

LOADING AND STRENGTH OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This technical report has been prepared by IEC Technical Committee No. 11: Recommendations for overhead transmission lines.

It forms the second edition of IEC 826 and replaces the first edition which was published in four parts between 1985 and 1987.

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

Six Months' Rule	Reports on Voting
11(CO)28	11(CO)31 and 31A

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

Taking into account the changes to existing practices introduced by reliability based methods, it seems appropriate to take advantage of a probatory period of two to four years during which the design methods proposed in this report will be compared with existing practices.

Users of this report are requested to send their comments and suggestions to the Central Office of IEC.

At the end of this probatory period this report will be reviewed and amended according to the comments received and then transformed into a standard or it will be withdrawn.

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans le présent rapport:

Publications n^{os} 383 (1983): Essais des isolateurs en matière céramique ou en verre destinés aux lignes aériennes de tension nominale supérieure à 1 000 V.

652 (1979): Essais mécaniques des pylônes de lignes aériennes.

Toutes les annexes sont informatives.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60826:1991

The following IEC publications are quoted in this report:

Publications Nos. 383 (1983): Tests on insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V.

652 (1979): Loading tests on overhead line towers.

All annexes are informative.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60826:1991
Withdrawn

INTRODUCTION

Les méthodes probabilistes sont recommandées pour la conception des lignes de transport contrairement aux méthodes déterministes car elles admettent ouvertement qu'en pratique il existe toujours un risque de dépassement des charges de conception, et qu'en conséquence une fiabilité totale ne peut pas être atteinte.

Les méthodes proposées prévoient aussi une conception selon les différents niveaux de fiabilité en fonction de l'importance des lignes dans le système ou des diverses prescriptions relatives à la sécurité publique.

Les techniques décrites permettent au concepteur de déterminer les fiabilités de lignes existantes ou de calculer de nouvelles lignes pour atteindre des fiabilités proposées, sous réserve que les données nécessaires à une telle analyse soient disponibles.

Toutefois, on admet qu'en de nombreux emplacements et situations, de nombreuses données puissent ne pas être disponibles dans une mesure assurant un niveau de confiance adéquat pour le calcul de la fiabilité absolue.

Les critères conseillés dans ce cas seront utiles à l'estimation des fiabilités relatives de différents calculs. On notera que la solution consistant à effectuer des calculs en fonction de fiabilités proposées consiste en fait à effectuer des calculs pour des périodes de retour variables des événements climatiques, plus précisément 50, 150 et 500 ans. On considère que ces valeurs représentent des intervalles raisonnables entre niveaux de fiabilité, bien que d'autres périodes de retour puissent être choisies si on le souhaite.

La fiabilité réelle des lignes est sensible à la précision de nombreux paramètres de conception. Certains de ces paramètres typiques qui peuvent affecter la fiabilité sont discutés ci-après.

Même si les formules de base pour le calcul des charges dues au vent à partir des vitesses mesurées sont bien connues, elles font appel à un nombre de coefficients qui ne sont pas précis. Par exemple, les coefficients de traînée des conducteurs et des faisceaux dépendent du toronnage des conducteurs et de la disposition du faisceau. Il n'est pas possible de donner une recommandation absolue couvrant toutes les situations de conducteurs dans un rapport tel que celui-ci et la meilleure solution résulte d'un compromis.

De la même façon, les effets de terrain de nature différente ne sont pas identiques et des imprécisions dans le choix des coefficients appropriés peuvent conduire à des différences aussi importantes que celles induites par le choix des niveaux de fiabilité. L'estimation des vitesses de vent réalisée à partir des stations de mesure assez espacées les unes des autres risque d'être inexacte et peut conduire à des erreurs imprévisibles dans le calcul des charges.

Les données sur les charges de givre et de vent associé sont rares et les recommandations données dans ce rapport sont basées sur le jugement d'ingénieurs et d'experts ayant la connaissance et l'expérience requises. Mais dans de nombreux cas on ne disposera que d'approximations.

INTRODUCTION

Probabilistic methods are recommended for the design of transmission lines as opposed to deterministic methods because they openly acknowledge that in practice there is always some risk that design loads can be exceeded and as a result complete reliability cannot be achieved.

The proposed methods also enable for designing according to different levels of reliability depending on either the importance of lines in the system, or on varying requirements for public safety.

The techniques described permit the designer to assess the reliabilities of existing lines or to design new lines for target reliabilities provided that the data required for such analysis are available.

However, it is recognized that for many locations and situations much of the data may not be available to the extent necessary for confidence in the calculation of absolute reliability.

In such cases the recommended methods will be effective for estimating the relative reliabilities of different designs. It will be noted that the alternative to designing to target reliabilities ends up as one of designing for varying return periods of climatic events, specifically 50, 150 and 500 years. It is considered that these represent reasonable differences between reliability levels, although different return periods may be selected if desired.

The actual reliability of lines is sensitive to the accuracy of many design parameters. Some of the typical parameters which may affect reliability are discussed hereafter.

Although the basic formula for calculating wind loads from measured velocities is well known, it requires the use of a number of coefficients that are not precise. For instance drag coefficients for conductors and bundles depend on conductor stranding and bundle configuration. It is not possible to give an absolute recommendation covering all conductors in all situations in a report such as this, and the best that can be achieved represents some sort of compromise.

Similarly, the effects of varying terrain are not exact and inaccuracies in selecting the appropriate coefficient may lead to differences as large as that separating reliability levels. The estimation of wind speeds between widely-spaced measuring situations is likely to be inexact and can lead to unpredictable errors in load calculations.

Data on ice loads and wind-on-ice are sparse and the recommendations given in this report are based on the judgement of knowledgeable and experienced engineers and scientists. But for many situations they will be only broad approximations.

Les mêmes commentaires peuvent être faits sur la résistance des composants de la ligne, même si généralement ceux-ci, à l'exception des fondations, sont connus de façon plus précise que les charges climatiques. Le facteur d'utilisation de ces composants (rapport de la charge réelle à la charge assignée) peut ne pas être connu, ce qui peut affecter la fiabilité.

Même si le rapport propose une méthode pour estimer le facteur d'utilisation, une erreur reste possible, mais celle-ci devrait aller dans le sens de la sécurité.

L'exposé ci-dessus ne représente pas un panorama complet de toutes les incertitudes mais indique le type d'analyse que le concepteur doit faire pour atteindre les objectifs de fiabilité correspondant au niveau de confiance recherché. A partir de là, et si le concepteur est satisfait du nombre et de la précision des données pour une situation particulière, le rapport peut être utilisé comme tel, c'est-à-dire pour une conception fondée sur la fiabilité des lignes de transport.

Malgré les incertitudes des méthodes probabilistes existant, on peut souligner que les méthodes déterministes présentent les mêmes défauts qui ne sont généralement pas reconnus. L'approche recommandée dans ce rapport donne un moyen cohérent et logique de rapporter des charges prévues aux résistances exigées et doit conduire à des lignes de transport économiques et sûres lorsque les données nécessaires sont disponibles.

Enfin, il est important de comparer les résultats obtenus à l'aide des méthodes proposées avec les résultats existants qui se sont révélés satisfaisants. Cette comparaison devrait permettre de mieux adapter certains des facteurs proposés en fonction de l'expérience acquise localement.

Similar comments may be made with respect to the strength of line components, although in general they are more precisely known than climatic loads with the exception of foundations. The use factors of these components (the percentage of their rated strength that is used to carry loads) may not be known and can affect reliability.

Although the report does propose a method for estimating use factor, there is room for error which in general should be on the side of safety.

The above discussion does not represent a complete catalogue of all grounds for uncertainties but does indicate the type of analysis that the designer shall go through in order to design for target reliabilities with confidence. Having done this and if the designer is satisfied with the completeness and accuracy of the data for the particular situation, the report may be used as originally intended, i.e., providing for a reliability based design of transmission lines.

Notwithstanding the uncertainties of the existing probabilistic methods, it shall be pointed out that deterministic methods have many of the same pitfalls that are generally not acknowledged. The approach recommended in this report provides a consistent and logical way of relating loads and strengths, and will result in economic and safe transmission lines whenever the required data is available.

Finally, it is important to compare the results obtained by the proposed methods with existing ones which have proved to be satisfactory. This comparison should allow further adjustment of some of the proposed factors according to local experience.

CHARGE ET RÉSISTANCE DES LIGNES AÉRIENNES DE TRANSPORT

SECTION 1: GÉNÉRALITÉS

1.1 Domaine d'application

Le présent rapport s'applique aux lignes aériennes ayant une tension nominale supérieure à 45 kV. Il peut aussi s'appliquer aux lignes ayant une tension nominale plus faible.

Le but de ce rapport est de proposer une relation entre les charges imposées sur les lignes de transport et la résistance des composants de lignes de transport afin d'aboutir à des conceptions sûres et économiques.

Ce rapport sert également de cadre à la préparation de normes nationales traitant du calcul des lignes de transport aériennes basé sur des méthodes probabilistes ou semi-probabilistes.

1.2 Définitions

1.2.1 Résistance caractéristique (R_c)

Valeur garantie dans les normes applicables. Cette valeur est également désignée sous le terme de résistance garantie, résistance minimale, charge de rupture minimale ou résistance nominale, et correspond généralement à une limite d'exclusion allant de 2 % à 5 %, 10 % étant en pratique la limite supérieure.

1.2.2 Coefficient de variation (COV) ou de dispersion

Rapport entre l'écart type et la valeur moyenne. Les COV de résistance et de charge sont représentés par v_R et v_Q respectivement.

1.2.3 Composants

Groupe d'éléments ayant un usage particulier dans le système de ligne de transport. Les composants types sont les pylônes, les fondations, les conducteurs, les isolateurs et le matériel d'équipement.

1.2.4 Limite d'endommagement (d'un composant)

Résistance limite d'un composant causant des dommages au système en cas de dépassement.

1.2.5 Etat d'endommagement

Etat selon lequel le système doit être réparé car il n'est plus capable de remplir la fonction qui lui est assignée sous les charges de calcul ou par suite d'une réduction éventuelle des distances (au sol ou à la masse).

LOADING AND STRENGTH OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

SECTION 1: GENERAL

1.1 Scope

This report applies to overhead lines of nominal voltage above 45 kV. It may also be applied to lines with a lower nominal voltage.

The purpose of this report is to propose relationships between loads imposed on transmission lines and the strengths of transmission line components in order to obtain safe and economical designs.

This report also provides a framework for the preparation of national standards dealing with design of overhead transmission lines based on probabilistic or semi-probabilistic methods.

1.2 Definitions

1.2.1 Characteristic strength (R_c)

The value guaranteed in appropriate standards. This value is also called the guaranteed strength, the minimum strength, the minimum failing load or the nominal strength, and usually corresponds to an exclusion limit, from 2 % to 5 %, with 10 % being, in practice, the upper limit.

1.2.2 Coefficient of variation (COV) or dispersion

The ratio of the standard deviation to the mean value. The COV of strength and load are respectively denoted by v_R and v_Q .

1.2.3 Components

Group of elements having a specified task in the transmission line system. Typical components are towers, foundations, conductors, insulator strings and hardware.

1.2.4 Damage limit (of a component)

The strength limit of a component which leads to damage to the system if it is exceeded.

1.2.5 Damage state

The state where the system has to be repaired because it is not capable of fulfilling its task under design loads or because design clearances may be reduced (e.g. conductor to ground).

1.2.6 Eléments

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

1.2.7 Limite d'exclusion (e %) d'une variable

Valeur de la variable prise à partir de sa fonction de distribution et correspondant à une probabilité de e % de ne pas être dépassée.

1.2.8 Limite de rupture (d'un composant)

Résistance limite d'un composant causant la rupture du système en cas de dépassement.

1.2.9 Etat de rupture

Etat d'un système dans lequel un composant majeur est défectueux par suite de rupture, flambement, renversement, etc., entraînant l'impossibilité pour la ligne de transporter l'énergie.

1.2.10 Etat intact

Etat dans lequel un système peut accomplir sa fonction et supporter les charges de calcul.

1.2.11 Durée d'exploitation

Mesure générale de la durée de vie utile. Les durées d'exploitation type des lignes de transport varient de 30 à 80 ans.

1.2.12 Période de retour (d'un événement climatique)

Intervalle moyen de récurrence d'un événement climatique ayant une intensité définie. L'inverse de la période de retour donne la probabilité de dépassement de cet événement dans une année.

1.2.13 Fiabilité (structurale)

Probabilité pour un système de remplir une fonction donnée dans certaines conditions pendant une période donnée. La fiabilité est, par conséquent, une mesure de la capacité du système d'accomplir sa tâche. Le complément de la fiabilité est la probabilité de ruine ou de non-fiabilité.

1.2.14 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. La sécurité est une notion déterministe par rapport à la fiabilité qui est une notion probabiliste.

1.2.15 Sécurité du «personnel»

Capacité d'un système à ne pas provoquer des dommages corporels ou des pertes de vies humaines. Dans ce rapport ce terme se rapporte principalement à la protection du personnel pendant la construction et l'entretien. La sécurité du public et de l'environnement en général est couverte par les réglementations nationales.

1.2.6 Elements

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

1.2.7 Exclusion limit (e %) of a variable

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

1.2.8 Failure limit (of a component)

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

1.2.9 Failure state

The state of a system in which a major component has failed by rupture, buckling, overturning, etc., thus leading to the termination of the ability of the line to transmit power.

1.2.10 Intact state

The state in which a system can accomplish its required function and can sustain design loads.

1.2.11 Operating period

General measure of useful life. Typical operating periods of transmission lines vary from 30 to 80 years.

1.2.12 Return period (of a climatic event)

The mean interval between recurrences of a climatic event of defined magnitude. The inverse of the return period gives the probability of exceeding the event in one year.

1.2.13 Reliability (structural)

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

1.2.14 Security (structural)

The ability of a system to be protected from a major collapse (cascading effect) if a failure is triggered in a given component. Security is a deterministic concept as opposed to reliability which is a probabilistic concept.

1.2.15 Safety

The ability of a system not to cause human injuries or loss of lives. In this report, safety relates mainly to protection of workers during construction and maintenance operations. The safety of public and environment in general is covered by national regulations.

1.2.16 Facteur de résistance (Φ)

Facteur applicable aux contraintes limites d'un composant. Ce facteur tient compte de la coordination de la résistance, du nombre de composants soumis à la charge maximale, de la qualité et des paramètres statistiques des composants.

1.2.17 Système

Ensemble de composants reliés entre eux pour former la ligne de transport.

1.2.18 Tâche

Fonction du système (ligne de transport), c'est-à-dire transport de l'énergie entre ses deux extrémités.

1.2.19 Indisponibilité

Incapacité d'un système à accomplir sa tâche. L'indisponibilité des lignes de transport provient du manque de fiabilité structurelle ainsi que d'une défaillance due à d'autres événements impondérables, tels que glissements de terrain, impacts d'objets, sabotage, matériaux défectueux, etc.

1.2.20 Facteur d'utilisation (γ_u)

Rapport entre les contraintes causées par la charge de calcul et les contraintes limites d'un composant. Pour les pylônes de suspension, il est théoriquement égal au rapport entre les portées réelles et les portées-poids et vent maximales et 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).

1.3 Symboles et abréviations

a = Action unitaire du vent sur les éléments de ligne.

A_c = Force du vent agissant sur un conducteur.

A_i = Force du vent agissant sur un isolateur.

A_t = Force du vent agissant sur un panneau de pylône (A_{tc} sur les éléments cylindriques).

B = Distance horizontale entre les fondations d'un support.

B_i = Facteur de réduction des vitesses de vent maximales annuelles.

C_i = Coefficient de traînée des conducteurs recouverts de glace (C_{iH} dans le cas de probabilités élevées et C_{iL} dans le cas de faibles probabilités).

C_{xc} = Coefficient de traînée des conducteurs.

C_{xi} = Coefficient de traînée des isolateurs.

C_{xTc} = Coefficient de traînée des supports.

COV = Coefficient de variation, également représenté par v_x .

d = Diamètre du conducteur.

d_t = Diamètre des éléments cylindriques du pylône.

D = Diamètre équivalent des conducteurs recouverts de glace (D_H dans le cas de probabilités élevées et D_L dans le cas de faibles probabilités).

1.2.16 Strength factor (Φ)

A coefficient applied to the limit stresses of a component. This factor takes into account the coordination of strength, the number of components subjected to maximum load, quality and statistical parameters of components.

1.2.17 System

A set of components connected together to form the transmission line.

1.2.18 Task

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

1.2.19 Unavailability

The inability of a system to accomplish its task. Unavailability of transmission lines results from structural unreliability as well as from failure due to other casual events such as landslides, impact of objects, sabotage, defects in material, etc.

1.2.20 Use factor (γ_u)

The ratio of stresses due to design load and the stress limit of a component. 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).

1.3 Symbols and abbreviations

a	= Unit action of wind on line elements.
A_c	= Wind forces on conductors.
A_i	= Wind forces on insulators.
A_t	= Wind forces acting on a tower panel (A_{tc} on cylindrical tower members).
B	= Horizontal distance between foundations of a support.
B_i	= Reduction factor of the maximum yearly wind velocities.
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_{xTc}	= Drag coefficient of supports.
COV	= Coefficient of variation, also identified as v_x .
d	= Conductor diameter.
d_t	= Diameter of cylindrical tower elements.
D	= Equivalent diameter of ice covered conductors (D_H for high probability and D_L for low probability).

e	= Probabilité d'exclusion en %.
e_N	= Probabilité d'exclusion de N composants en série en %.
f_x	= Fonction de densité de la variable x .
F_x	= Fonction de distribution cumulative de x (ou fonction de répartition).
F_N	= Fonction de distribution cumulative de Gauss (normale).
G_c	= Facteur de réponse de vent combiné des conducteurs.
G_t	= Facteur de réponse de vent combiné des pylônes.
G_i	= Facteur de réponse de vent combiné des isolateurs.
g	= Charges maximales annuelles dues au givre.
$\overline{g}$	= Valeur moyenne de la charge maximale annuelle due au givre.
$g_{\max}$	= Charge maximale observée due au givre.
g_R	= Charge de calcul de référence due au givre.
g_H	= Charge due au givre dans le cas d'une probabilité élevée d'occurrence.
g_L	= Charge due au givre dans le cas d'une probabilité faible d'occurrence.
h	= Hauteur de panneau d'un pylône en treillis.
K_c	= Nombre d'écarts types entre la résistance moyenne et la résistance caractéristique.
K_R	= Coefficient de rugosité.
K_d	= Facteur relatif à l'influence du diamètre du conducteur.
K_G	= Facteur relatif au gradient de vitesse de vent.
K_h	= Facteur relatif à l'influence de la hauteur des conducteurs au-dessus du sol.
K_n	= Facteur relatif à l'influence du nombre d'années d'observation.
$\left. \begin{matrix} K_{og} \\ K_{\sigma L} \\ K_{\sigma H} \end{matrix} \right\}$	= Facteurs appliqués à la charge moyenne en givre pour le calcul des charges combinées.
$\left. \begin{matrix} K_{iL} \\ K_{iH} \end{matrix} \right\}$	= Facteurs appliqués à la vitesse V_{em} pour le calcul des charges combinées.
K_j	= Facteur relatif à l'influence de la rugosité du terrain de la station météorologique.
L	= Longueur de portée.
L_m	= Portée moyenne.
n	= Nombre d'années d'observation d'un événement climatique.
N	= Nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale.
P_s	= Probabilité de survie.
P_{si}	= Probabilité de survie du composant i .
Q	= Charge ou effet de charge.
Q_T	= Charge ayant une période de retour T .

e	= Exclusion probability in %.
e_N	= Exclusion probability of N components in series in %.
f_x	= Density function of variable x .
F_x	= Cumulative probability function of x .
F_N	= Normal Gaussian cumulative probability function.
G_c	= Combined wind factor of conductors.
G_t	= Combined wind factor of towers.
G_i	= Combined wind factor of insulators.
g	= Yearly maximum ice loads.
$\overline{g}$	= Mean value of yearly maximum ice load.
$g_{\max}$	= Maximum observed ice load.
g_R	= Reference design ice load.
g_H	= Ice load having a high probability.
g_L	= Ice load having a low probability.
h	= Height of panel in a lattice tower.
K_c	= Number of standard deviations between average and characteristic strength.
K_R	= Roughness coefficient.
K_d	= Factor related to the influence of conductor diameter.
K_G	= Factor related to gradient wind speed.
K_h	= Factor related to the influence of height above ground.
K_n	= Factor related to the influence of the number of years with observation.
$K_{\sigma g}$ $K_{\sigma L}$ $K_{\sigma H}$	} = Factors applied to the average ice load for calculation of combined loads.
K_{iL} K_{iH}	} = Factors applied to wind speed V_{em} for calculation of combined load.
K_j	= Factor related to the influence of the roughness of the location of the meteorological station site.
L	= Span length.
L_m	= Average span.
n	= Number of years of observation of a climatic event.
N	= Number of components subjected to maximum loading intensity.
P_s	= Probability of survival.
P_{si}	= Probability of survival of component i .
Q	= Load or load effect.
Q_T	= Load having a return period T .

$\left. \begin{matrix} Q_{Tv} \\ Q_{Tw} \\ Q_{Tt} \end{matrix} \right\}$	= Composants de charge Q_T , verticale, vent et tension.
Q'	= Charge ajustée en fonction de l'influence de la dispersion de la portée.
q_0	= Pression dynamique due à la vitesse du vent de référence V_R .
R	= Résistance.
$\overline{R}$	= Résistance moyenne.
R_c	= Résistance caractéristique.
$(e)R$	= Résistance ayant une probabilité d'exclusion de e .
S_i	= Surface projetée des isolateurs.
S_t	= Surface projetée d'un panneau de pylône.
T	= Période de retour d'un événement au cours des années.
U	= Facteur d'utilisation.
v_x	= Coefficient de variation de la variable x .
V_m	= Vitesse maximale annuelle du vent.
V_M	= Vitesse élevée du vent.
V_{MG}	= Gradient de vitesse de vent.
V_R	= Vitesse du vent de référence pour calcul.
V_o	= Vitesse du vent liée au givrage.
V_{em}	= Vitesse maximale du vent liée au givrage.
V_{IL}	= Vitesse du vent de référence liée au givrage avec une probabilité d'occurrence faible.
V_{IH}	= Vitesse du vent de référence liée au givrage avec une probabilité d'occurrence élevée.
Z	= Hauteur des conducteurs ou du centre de gravité des panneaux de pylônes ou des chaînes d'isolateurs au-dessus du sol.
α	= Facteur de réduction pour charges dissymétriques de givrage.
γ_u	= Facteur de charge dû à la dispersion de la portée.
$\left. \begin{matrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{matrix} \right\}$	= Densité de givre.
Γ	= Fonction Gamma.
Φ	= Facteur de résistance.
Φ_N	= Facteur de résistance dû au nombre de composants soumis à l'intensité de charge 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 .
Φ_R	= Produit de Φ_N , Φ_S , Φ_Q , Φ_C .
σ_x	= Ecart type de x .

$\left. \begin{matrix} Q_{Tv} \\ Q_{Tw} \\ Q_{Tt} \end{matrix} \right\}$	= Components of load Q_T , vertical, wind and tension.
Q'	= Load adjusted for the influence of span dispersion.
q_0	= Dynamic pressure due to reference wind speed V_R .
R	= Strength.
$\overline{R}$	= Average strength.
R_c	= Characteristic strength.
$(e)R$	= Strength with an exclusion probability of e .
S_i	= Projected area of insulators.
S_t	= Projected area of a tower panel.
T	= Return period of an event in years.
U	= Use factor.
v_x	= Coefficient of variation of variable x .
V_m	= Maximum yearly wind velocity.
V_M	= High wind velocity.
V_{MG}	= Gradient wind speed.
V_R	= Reference wind velocity for design.
V_e	= Wind velocity associated with icing.
V_{em}	= Maximum wind velocity associated with icing.
V_{iL}	= Low probability reference wind velocity associated with icing.
V_{iH}	= High probability reference wind velocity associated with icing.
Z	= Height above ground of conductors, centre of gravity of tower panels, or insulator strings.
α	= Reduction factor for unbalanced ice loads.
γ_u	= Load factor due to span dispersion.
$\left. \begin{matrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{matrix} \right\}$	= Ice density.
Γ	= Gamma function.
Φ	= Strength factor.
Φ_N	= Strength factor due to the 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 .
Φ_R	= Product of Φ_N , Φ_S , Φ_Q , Φ_C .
σ_x	= Standard deviation of x .

χ	= Rapport de compacité d'un panneau de pylône.
μ	= Masse volumique de l'air à une température et pression de référence.
Ω	= Angle d'incidence du vent par rapport à l'axe de la ligne.
θ	= Angle d'incidence du vent par rapport au panneau du pylône.
θ'	= Angle d'incidence du vent par rapport aux éléments cylindriques du pylône.
ω	= Poids unitaire des conducteurs ou des câbles de garde.

1.4 Critères de conception

1.4.1 Généralités

Les critères de calcul conseillés dans ce rapport sont basés sur des méthodes probabilistes ou semi-probabilistes. L'introduction donne des recommandations sur la façon de les utiliser. Les concepteurs doivent accorder une attention particulière à l'application de ces méthodes notamment au choix des différents facteurs et doivent être sensibilisés à la nécessité de disposer de données suffisantes.

1.4.2 Sécurité des lignes

On a établi des prescriptions particulières pour limiter les avaries secondaires ainsi que les conséquences d'avaries liées à des événements non prévus dans la procédure de calcul.

1.4.3 Sécurité du personnel

Ce rapport comprend des prescriptions particulières destinées à assurer la sécurité des personnes travaillant sur la ligne de transport pendant la construction et l'entretien.

Ces prescriptions complètent d'autres considérations sur la sécurité prescrites par les normes ou règlements nationaux.

1.5 Conception du système

1.5.1 Description

Ce rapport est fondé sur la notion selon laquelle une ligne de transport est considérée comme un système. C'est pourquoi toutes les valeurs de fiabilité ou de performance dont il est fait état se rapportent à une ligne complète.

Cette approche permet au concepteur de coordonner de manière logique les résistances des composants à l'intérieur du système.

Une approche systémique du calcul admet qu'une ligne de transport comprend une série de composants dans laquelle la défaillance d'un composant majeur conduit généralement à la perte potentielle de transport de puissance. Elle permet également de calculer les composants avec des résistances compatibles, ce qui conduit à un calcul global économique sans discordance indésirable.

χ	= Solidity ratio of a tower panel.
μ	= Density of air per unit volume at the reference temperature and pressure.
Ω	= Angle of incidence of wind with respect to line axis.
θ	= Angle of incidence of wind with the tower panel.
θ'	= Angle of incidence of wind with cylindrical elements of tower.
ω	= Unit weight of conductor or ground wire.

1.4 Design basis

1.4.1 General

The design criteria recommended in this report are based on probabilistic or semi-probabilistic methods. The introduction gives recommendations on how to use them. Designers shall pay attention to the application of these methods, specially to the choice of the different factors and must be aware of the necessity of sufficient available data.

1.4.2 Line security

Special requirements are prescribed in order to limit secondary failures as well as the consequences of failures due to events that cannot be accounted for in the design process.

1.4.3 Safety

Specific requirements are included in this report in order to assure the safety of people working on the transmission line during construction and maintenance.

These requirements complement other safety considerations prescribed by national standards or regulations.

1.5 System design

1.5.1 Description

This report is based on the concept whereby a transmission line is considered as a system. Thus all reliability or performance values discussed in this report relate to a complete line.

This approach enables the designer to coordinate logically the strengths of components within the system.

A system design approach recognizes the fact that a transmission line is composed of a series of components where the failure of any major component usually leads to the loss of power transmitting capability. It also allows components to be designed with compatible strengths thus leading to an overall economical design without undesirable mismatch.

1.5.2 Simplifications issues d'une approche systémique du calcul

La fiabilité d'un système est fonction de la fiabilité de ses composants. Dans le cas de composants en série, la fiabilité ou la probabilité de survie du système (P_{ss}) est égale au produit de la probabilité de survie de chaque composant (P_{si}):

$$P_{ss} = P_{s1} P_{s2} \dots P_{sn} = \prod_{i=1}^n P_{si} \quad (1)$$

Lorsque la fiabilité des composants est supérieure à $(1-10^{-2})$, ce qui est généralement le cas dans les lignes de transport type, et qu'un composant présente un risque de ruine ou un taux de défaillance qui est d'environ un ordre de grandeur plus élevé que celui des autres composants, on peut calculer approximativement la fiabilité du système à l'aide de la fiabilité du composant le moins fiable.

Cette situation se rencontre naturellement dans de nombreuses lignes de transport. Par exemple, dans les zones non exposées au givre, la limite de tension des conducteurs pour la contrainte rencontrée en situation courante, destinée à pallier les problèmes de vibration peut limiter la tension maximale sous le vent à environ 50 % de la résistance nominale à la traction du conducteur. Cela augmente, par conséquent, de manière très importante la probabilité de survie des conducteurs par rapport au pylône. Par conséquent, les conducteurs situés dans des zones non exposées au givre, convenablement installés et protégés contre les vibrations, sont naturellement plus fiables que d'autres composants.

Cependant, dans les zones exposées à un givre lourd, la limite de vibration peut ne pas être critique et les conducteurs peuvent être aussi fiables, ou même moins, que les pylônes. Dans ce cas, si l'on souhaite que les conducteurs soient plus fiables que les pylônes, on doit tendre à une coordination de la résistance entre composants.

1.5.3 Coordination de résistance des composants

Pour décider de la coordination de résistance adéquate, les critères suivants sont préconisés:

- a) Il convient que la défaillance du premier élément produise l'effet (dynamique ou statique) secondaire le moins important sur les autres composants afin de minimiser une défaillance 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 défaillance du premier composant défaillant soit dans le cas idéal¹ voisin de 1,0.
- d) Il convient qu'un composant à faible coût en série avec un composant à coût élevé soit conçu au moins aussi robuste et fiable que le composant principal si les conséquences d'une défaillance sont aussi sévères que celles du composant principal².

1 La coordination de la résistance des composants peut se révéler difficile lorsque le composant le moins fiable a une dispersion de résistance très importante.

2 L'exception à ce critère est le cas représenté par le composant conçu pour agir en tant que limiteur de charges. Dans ce cas, on doit harmoniser sa résistance avec le composant qu'il est supposé protéger.

1.5.2 Simplifications behind a system design approach

The reliability of a system is a function of the reliability of its components. When these components are in series, the reliability or probability of survival of the system (P_{ss}) is equal to the product of the probability of survival of each component (P_{si}):

$$P_{ss} = P_{s1} P_{s2} \dots P_{sn} = \prod_{i=1}^n P_{si} \quad (1)$$

In cases where the reliability of components is greater than $(1-10^{-2})$, which is usually the case with typical transmission lines, and one component has a risk of failure or a rate of unreliability, which is by approximately one order of magnitude higher than 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 the every day stress to obviate vibration problems may limit the maximum tension under wind to some 50 % of the rated tensile strength of the conductor. This in turn increases very substantially the probability of survival of conductors as compared to towers. Consequently conductors in non-icing areas properly installed and protected from vibration damage are naturally more reliable than other components.

However, in heavy icing areas, the vibration limit may not be critical and conductors may be equally or even less reliable than towers. In such cases, if it is desired to have conductors more reliable than towers, a coordination of strength between components has to be a design objective.

1.5.3 Coordination of strength of components

In order to decide on an appropriate strength coordination, the following criteria are recommended:

- 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 cascading failure.
- b) Repair time and costs following a failure should be kept to a minimum.
- c) The first component to fail should ideally¹ have a ratio of the damage limit to the failure limit near 1,0.
- 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 component².

1 It may be difficult to coordinate the strength of components when the least reliable one has a very large strength dispersion.

2 An exception to 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.

Si l'on analyse des composants de ligne tels que pylônes de suspension, pylônes d'ancrage, conducteurs, fondations et matériels d'équipement à l'aide des critères énoncés ci-dessus, on s'aperçoit qu'il est bon que les conducteurs ne représentent pas le composant le plus faible en raison de a, b et c; le matériel d'équipement en raison de d; les pylônes d'ancrage en raison de a et b; et les fondations en raison de b et c.

Ainsi, la coordination de résistance correspondant à ces critères est présentée dans le tableau 1, où il apparaît que le premier composant défaillant lorsque la ligne est exposée à des charges dépassant les valeurs de conception, est le pylône de suspension.

Bien que ces critères résultent d'une déduction logique, la pratique révèle que, à quelques exceptions près¹, le calcul de la plupart des lignes de transport existantes est très voisin de la coordination de résistance proposée.

En outre, il faut noter, comme indiqué en 1.5.2, que la coordination de résistance simplifie également les calculs de fiabilité.

Tableau 1 – Coordination de résistance

	Composants majeurs	Coordination entre composants majeurs *
Première défaillance	Pylône de suspension	<u>Pylône</u> , fondations, matériel d'équipement
90 % de probabilité de ne pas avoir de première défaillance	Pylône d'ancrage	<u>Pylône</u> , fondations, matériel d'équipement
	Pylône d'arrêt	<u>Pylône</u> , fondations, matériel d'équipement
	Conducteurs	<u>Conducteurs</u> , isolateurs, matériel d'équipement
* Le composant souligné pour chaque composant majeur est le plus faible avec un intervalle de confiance de 90 %		

1 La coordination de résistance ci-dessus s'applique à la plupart des lignes. Il arrive cependant que l'on puisse utiliser différents critères et aboutir ainsi à une autre séquence de défaillance.

Par exemple, les pylônes spéciaux pour traversée de rivière peuvent être calculés avec une résistance plus élevée que les conducteurs. Dans les zones d'avalanches où il est très difficile de construire des pylônes, on peut également choisir les conducteurs comme étant le composant le plus faible sous réserve que l'on calcule les pylônes de suspension pour les forces résultant de la défaillance de ces conducteurs. Sinon, la défaillance des conducteurs entraînera automatiquement celle des pylônes voisins.

If line components such as tangent towers, tension towers, conductors, foundations and hardware are analyzed using the above criteria, it is found that : conductors should not be the weakest component because of a, b and c; hardware because of d; tension towers because of a and b; and foundations because of b and c.

An appropriate strength coordination applying these criteria is given in table 1, where tangent towers are the first component to fail when the line is subjected to loads exceeding design values.

While these criteria are the result of logical deduction, it is found in practice that, with a few exceptions¹, the design of the great majority of existing transmission lines conforms closely with the proposed coordination of strength.

Furthermore, it should be noted, as indicated in 1.5.2, that the coordination of strength also simplifies reliability calculations.

Table 1 - Typical strength coordination

	Major components	Coordination within major components*
To fail first	Tangent tower	<u>Tower</u> , foundations, hardware
Not to fail first with 90 % confidence	Angle tower	<u>Tower</u> , foundations, hardware
	Dead end tower	<u>Tower</u> , foundations, hardware
	Conductors	<u>Conductors</u> , insulators, hardware
* Within each major component the underlined component is the weakest with 90 % confidence.		

¹ 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 towers could be designed stronger than the conductors. In avalanche areas where construction of towers is very difficult, conductors may also be chosen as the weakest component, provided that tangent towers are designed for the forces resulting from the failure of these conductors. Otherwise the failure of conductors will automatically lead to the failure of adjacent towers.

1.6 Evaluation de la fiabilité des lignes

1.6.1 Principes de base

Théoriquement, on peut déterminer la fiabilité (probabilité de survie) d'une ligne de transport à l'aide de la procédure ci-dessous.

a) Pour chaque type de charge climatique, établir la fonction de densité de probabilité de charge, f_Q . On règle cette fonction de manière à refléter l'intensité de charge maximale pouvant se produire à l'intérieur de l'espace couvert par la ligne. Toutes les tendances directionnelles établies, susceptibles d'affecter l'intensité de charge, sont également pondérées dans la fonction de charge f_Q , sinon la charge est supposée agir dans la direction la plus critique.

b) Déterminer la fonction de densité de résistance f_R de la ligne en tant que système. La fonction peut être complexe sauf lorsque les lignes ont été calculées avec une approche de coordination de résistance (voir 1.5.3). Dans ce cas, on peut déterminer approximativement la fonction f_R par la fonction de densité de résistance du composant le plus faible.

c) Définir la position relative des deux courbes f_Q et f_R .

On peut définir cette position relative par une relation traduisant l'équivalence entre une charge de probabilité de retour de $1/T$ et une résistance ayant une limite d'exclusion de 10 % ou, de manière analytique:

$$Q_T = (10\%) R \quad (2)$$

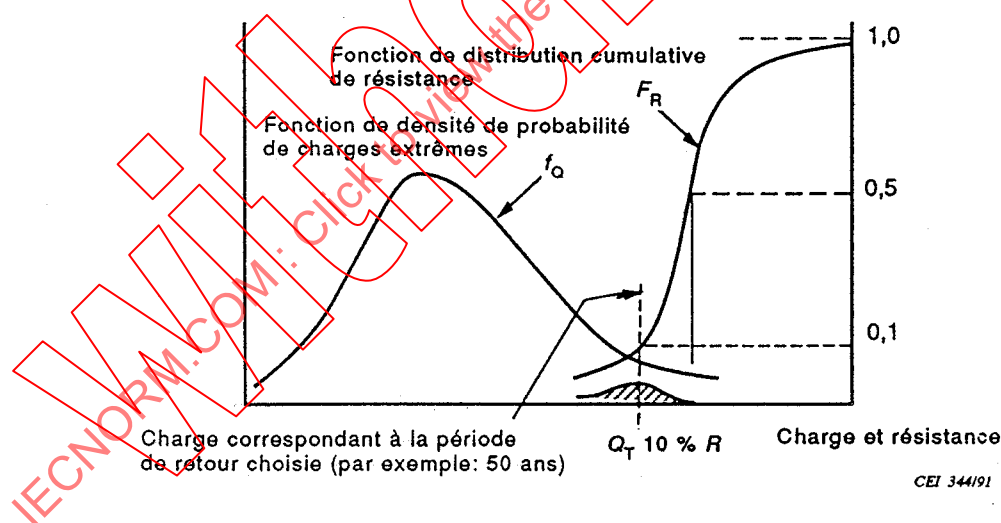


Figure 1: Relation entre charge et résistance

Le choix de la période de retour T de la charge varie avec le degré de fiabilité désiré.

On peut montrer que l'équation (2) conduit à une fiabilité presque constante de l'ordre de $(1 - 1/2T)$, quelle que soit la configuration des courbes de charge et de résistance et leur dispersion (voir 5.2).

1.6 Assessment of line reliability

1.6.1 Basic principles

On a theoretical basis, the reliability (probability of survival) of a transmission line can be assessed using the following procedure.

a) For each type of climatic load, establish the probability density function of load, f_Q . 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 are also weighted in the load function f_Q , otherwise the load is assumed to act in the most critical direction.

b) Establish the strength density function f_R of the line as a system. The function can be complex except when lines are designed with a strength coordination approach (see 1.5.3). In this case, function f_R can be approximated by the strength density function of the weakest component.

c) Define the relative position of the two curves f_Q and f_R .

This relative position can be defined through a relation such as: a load with a probability of occurrence $1/T$ is set equal to the strength with a 10 % exclusion limit, or analytically:

$$Q_T = (10\%) R \quad (2)$$

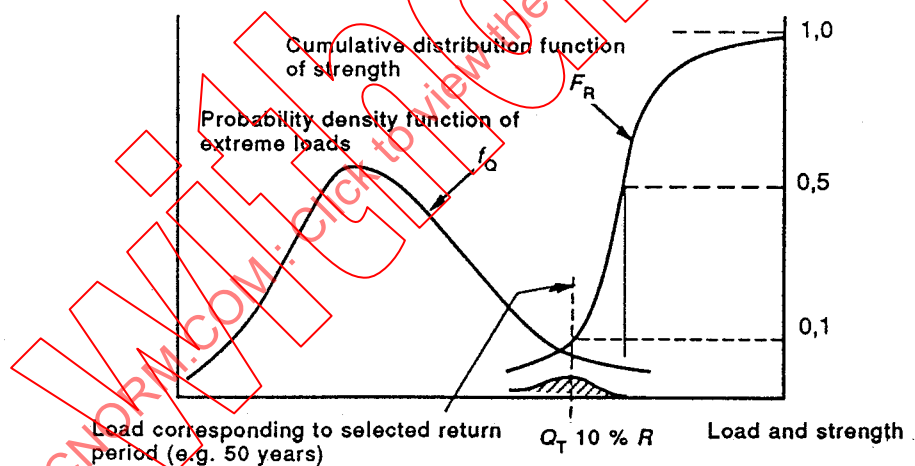


Figure 1 - Relations between load and strength

The choice of the return period T of load depends on the desired degree of reliability.

It can be shown that equation (2) leads to an almost constant reliability of the order of $(1 - 1/2T)$, independent of the shape of the load and strength curves and their dispersions (see 5.2).

Pratiquement, la fiabilité résultant de la relation exprimée dans l'équation (2) peut être prise comme valeur minimale et l'on peut affiner les calculs par l'introduction de facteurs de correction se rapportant aux points suivants:

- a) facteurs d'utilisation des composants: le fait que l'on n'utilise pas tous les composants à leur capacité maximale contribue à accroître la fiabilité;
- b) relation entre la résistance caractéristique et (10 %) R : La résistance caractéristique de la plupart des composants correspond à une limite d'exclusion inférieure à 10 %. Si l'on adopte pour valeur 10 %, la fiabilité en résultant est donc plus grande;
- c) coordination de résistance choisie;
- d) nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale en cas de tempête;
- e) contrôle de qualité pendant la fabrication et la construction.

1.6.2 Charges

On peut séparer les charges sur les lignes de transport en trois groupes: charges dynamiques, charges statiques et charges spéciales.

Les calculs se rapportant à ces charges sont donnés dans la section 3.

1.6.2.1 Charges variables

Les charges variables sont des charges à caractère aléatoire dues au vent et au givre prises séparément ou combinées. On peut les représenter par des fonctions de densité de probabilité adéquates.

Lorsque l'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 extrême généralement selon la distribution de Gumbel, type I décrite en C. On peut définir cette fonction de distribution à l'aide de deux paramètres: valeur moyenne et écart type de la variable applicable.

1.6.2.2 Charges fixes

Les charges fixes sont des charges dues au poids propre des pylônes, des conducteurs et des matériels d'équipement. Bien qu'elles soient de nature permanente, les charges fixes varient d'un pylône à un autre par suite des variations de la hauteur des pylônes et de la portée-poids des conducteurs.

La fiabilité des lignes exposées seulement aux charges fixes doit être pratiquement égale à 100 %. Cette fiabilité est assurée par les prescriptions relatives à la sécurité lorsqu'il est exigé que l'on calcule des pylônes pour deux fois la charge statique verticale due aux conducteurs et aux matériels d'équipement (voir 3.5.4). Ces prescriptions concernent l'augmentation des charges verticales au cours de la construction et de l'entretien survenant pendant les travaux sur des conducteurs tels que le déroulage, l'ancrage et la dépose.

In practice, the reliability resulting from the relationship expressed in equation (2), can be considered as a minimum value and calculations can be further refined through the introduction of correction factors related to the following items:

- a) use factors of components: the fact that all components are not used at their maximum design parameter contributes to an increase of the reliability;
- b) relation between the characteristic strength and (10 %) R: the characteristic strength of most components corresponds to an exclusion limit less than 10 %. If it is assumed to be equal to 10 %, the resulting reliability will be higher;
- c) selected strength coordination;
- d) number of components subjected to maximum loading intensity whenever a storm occurs;
- e) quality control during fabrication and construction.

1.6.2 Loadings

Loadings on transmission lines can be separated into three groups: live loads, dead loads and special loads.

Calculations related to these loads are given in section 3.

1.6.2.1 Live loads

Live loads are random loads due to wind and ice taken separately or combined together. These can be modelled by appropriate probability density 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, usually of type I Gumbel distribution as described in annex C. This distribution function can be defined with two parameters: the mean value and the standard deviation of the applicable variable.

1.6.2.2 Dead loads

Dead loads are loads due to the dead weight of towers, conductors and hardware. Although they are permanent in nature, dead loads vary from one tower to another due to variation of tower 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 towers should be designed for twice the vertical dead load of conductors with hardware (see 3.5.4). These requirements cover the increase in vertical loads during construction and maintenance which occurs during operations on conductors such as: stringing, lifting or lowering.

Le poids des conducteurs supporté par des pylônes est le produit du poids par unité de longueur, lequel est pratiquement constant et de la portée-poids¹ qui peut varier en fonction de la portée et de la dénivellation des pylônes et de la tension des conducteurs. Dans tous les cas, la portée-poids d'un type de pylône donné a une valeur nominale maximale qui est celle prise en compte pour la conception des pylônes. (Il existe également une valeur minimale relative au soulèvement des chaînes d'isolateurs en suspension.)

Etant donné que l'on n'utilise pas l'ensemble des pylônes d'une ligne de transport à leurs portées maximales, le fait de ne pas tenir compte de cette différence de portée contribue à augmenter la fiabilité. Pour l'évaluation, on définit le rapport de la portée réelle à la portée maximale comme facteur d'utilisation de portée U .

Des études récentes ont permis de représenter la variable U et d'inclure son influence dans les calculs de fiabilité grâce à des facteurs de correction appropriés, γ_U , appliqués aux charges sur pylônes.

Dans le cas où les données sur les facteurs d'utilisation ne sont ni disponibles, ni prévisibles, l'influence de U peut être négligée et le γ_U pris égal à 1,0.

Dans d'autres cas où des données sur le facteur d'utilisation de la portée sont disponibles ou prévisibles, on peut utiliser la méthodologie donnée en annexe A pour réduire le coût de certaines lignes.

1.6.2.3 Charges spéciales

Les charges spéciales sont des charges extérieures pouvant survenir pendant la construction et l'entretien de ligne ainsi que des charges longitudinales et verticales prévues à titre de sécurité pour éviter des défaillances en cascade (ou la propagation de défaillances secondaires).

On traite les charges de construction et d'entretien d'une manière déterministe et on les considère comme constantes. On les établit de manière que leur ampleur ne soit jamais susceptible d'être dépassée 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 en 1.6.2.1 et 1.6.2.2, la fiabilité globale de la ligne s'en trouve modifiée.

1.6.3 Résistance

1.6.3.1 Fonctions de distribution de résistance mécanique des composants

La résistance mécanique des composants de ligne suit généralement une distribution normale ou lognormale. La distribution normale (Gaussienne) convient à la plupart des matériaux ductiles alors que la distribution lognormale s'applique davantage aux matériaux fragiles. La fonction de distribution des composants peut être modifiée par un contrôle de qualité rigoureux et tend à devenir une fonction lognormale. On peut considérer que la distribution normale convient à la plupart des composants de ligne, sauf spécification contraire.

¹ On peut représenter schématiquement la portée-poids par la distance horizontale séparant les points les plus bas des chaînettes de portées adjacentes.

The weight of conductors supported by towers is the product of weight per unit length, which is practically constant, and the weight span¹ which may vary according to the tower spacing and elevation and the conductor tension. In all cases, the weight span of a given tower type has a maximum assigned value which is the one considered for the design of towers. (There is also a minimum value for uplift considerations of suspension insulator strings.)

Since all towers of a transmission line are not usually used at their maximum spans, 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 .

Recent studies have enabled variable U to be modelled so that its influence in reliability calculations through appropriate correction factors, γ_u , can be applied to tower loads.

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.

In other cases where data on span use factor are available or can be predicted, the methodology appearing in annex A can be used in order to achieve some line cost reductions.

1.6.2.3 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 (or the propagation of secondary failures).

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 never 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 specified in 1.6.2.1 and 1.6.2.2, overall reliability of the line is altered.

1.6.3 Strength

1.6.3.1 Distribution functions of strength of components

The strength of line components usually follows either 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.

¹ Graphically, the weight span can be represented by the horizontal distance between the lowest points of the catenaries of adjacent spans.

1.6.3.2 Composants en série

Lorsqu'un composant est constitué par une série d'éléments, sa fonction de distribution de la résistance tend à être une fonction de loi des valeurs extrêmes (minimum). Dans le cas d'un nombre croissant d'éléments en série, la moyenne et l'écart type de résistance de la série sont diminuées et la fonction de distribution en résultant tend à être une distribution extrême même si le composant d'origine obéissait à une loi normale.

Les paramètres statistiques de résistance d'une série de N composants peuvent être déduits des méthodes statistiques disponibles.

Une description de ces méthodes et un calcul du facteur de correction Φ_N due au nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale est donnée en section 5.

1.6.3.3 Résistance caractéristique R_c

Pour établir la résistance caractéristique, on considère les deux cas suivants: réalisation, ou non, d'essais spécifiques sur les composants ou éléments de la ligne.

a) Absence d'essais

La plupart des composants sont spécifiés dans les normes nationale en utilisant une résistance nominale, minimale ou garantie. C'est également le cas des pylônes calculés à l'aide d'une méthode de calcul approuvée reposant sur les caractéristiques mécaniques minimales des éléments.

La résistance du composant est généralement établie de façon à ce que les prescriptions minimales soient satisfaites par la plupart des composants. Des études récentes ainsi que l'analyse d'un grand nombre de résultats d'essai indiquent que la probabilité pour des composants de ligne de ne pas satisfaire à la résistance spécifiée (limite d'exclusion) se situe généralement entre 1 % et 10 %.

Par conséquent, lorsque la résistance spécifiée d'un composant, sans faire référence à sa limite d'exclusion e , est prise comme résistance caractéristique, l'hypothèse de $e = 10 \%$ pour ce composant conduit à une fiabilité plus grande.

b) Avec essais

Lorsque l'on réalise des essais pour déterminer la résistance d'un composant, on peut obtenir la résistance caractéristique à partir des résultats des essais après avoir calculé $\bar{R}$ et v_R .

Si l'on considère une distribution de Gauss pour la résistance, la limite d'exclusion de 10 % correspond alors à un décalage de la valeur moyenne de 1,28 fois l'écart type¹:

$$\text{si} \quad R_c = (10 \%) R \quad (3)$$

$$\text{alors} \quad R_c = \bar{R} (1 - 1,28 v_R) \quad (4)$$

1 La valeur de 1,28 suppose un échantillonnage infini. Pour un nombre réduit d'échantillons, d'autres valeurs sont à l'étude.

1.6.3.2 Components 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 average and the standard deviation of the strength of the series are reduced and the resulting distribution function tends to be an extreme distribution even if the original component is normal.

The statistical parameters of the strength of a series of N components can be derived from available statistical methods.

A description of these methods and a derivation of the correction factor Φ_N due to the number of components subjected to maximum load intensity is given in section 5.

1.6.3.3 Characteristic strength R_c

In order to establish the characteristic strength, two cases are considered: whether or not specific tests are performed on the components or elements of the line.

a) Without tests

Most components are specified in national standards using nominal, minimum or guaranteed strength. This is also the case for towers designed with an approved 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 (exclusion limit) is usually between 1 % and 10 %.

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 this component leads to higher reliability.

b) With tests

Whenever tests are performed to determine the strength of a component, the characteristic strength can be obtained from the test results after having calculated $\bar{R}$ and v_R .

Assuming a Gaussian distribution for the strength, then a 10 % probability corresponds to a value of 1,28 standard deviations¹ below the average :

$$\text{if} \quad R_c = (10\%) \bar{R} \quad (3)$$

$$\text{then} \quad R_c = \bar{R} (1 - 1,28 v_R) \quad (4)$$

¹ The value of 1,28 assumes an infinite number of samples. For reduced number of samples, other values are under consideration.

1.6.4 Calcul de fiabilité

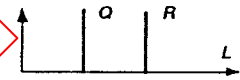
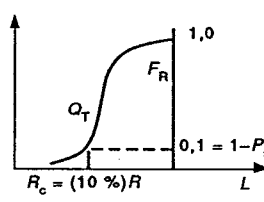
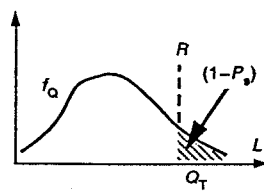
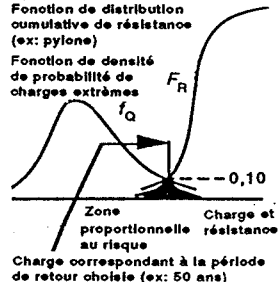
1.6.4.1 Combinaisons charge/résistance

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 différentes hypothèses:

- la charge (Q) et la résistance (R) ont des valeurs constantes;
- la charge (Q) est constante et la résistance (R) variable;
- la charge (Q) est variable et la résistance (R) constante;
- la charge (Q) et la résistance (R) sont des variables (ce qui est le cas le plus général et le plus représentatif des lignes de transport).

Le tableau 2 résume les valeurs de fiabilité pour ces cas.

Tableau 2 – Fiabilité correspondant à différentes combinaisons de charge et résistance

Charge Q			Résistance R			Fiabilité P_s ³⁾	
Moyenne	COV	Charge de calcul Q_T ¹⁾	Moyenne	COV	Résistance de calcul R ²⁾ (e)	Représentation graphique	Résultats ⁴⁾
Q constante	0	Q	R constante	0	R		$P_s = 1,0$
Q constante	0	Q	$\bar{R}$	v_R	$\bar{R} (1 - K_c v_R)$		$P_s = 1 - \int_{-\infty}^{\bar{R}} f_R dL$ $= 1 - F_R$ $= 0,90$ (pour $K_c = 1,28$)
$\bar{Q}$	v_Q (20 % à 50 %)	Q_T	R constante	0	R		$P_s = 1 - \int_{Q_T}^{+\infty} f_Q dL$ $= 1 - \frac{1}{T}$
$\bar{Q}$	v_Q (20 % à 50 %)	Q_T	$\bar{R}$	v_R (5 % à 20 %)	$\bar{R} (1 - K_c v_R)$		$P_s = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} f_Q F_R dL$ $\approx 1 - \frac{1}{2T}$

- Q_T est la charge avec une période de retour T .
- (e) R est la résistance garantie correspondant à une limite d'exclusion de e .
- P_s est la probabilité de $Q < R$.
- Dans ces exemples, la fiabilité est donnée pour $e = 10\%$ (où $K_c = 1,28$).

1.6.4 Calculation of reliability

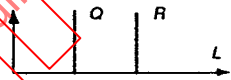
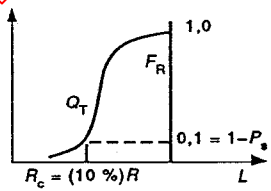
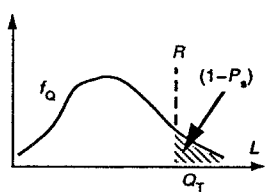
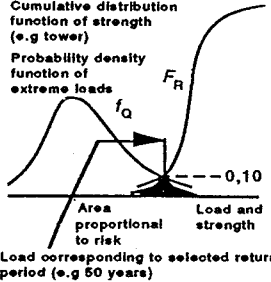
1.6.4.1 Combinations of load and strength

Reliability depends on the parameters of load Q and strength R . In order to illustrate possible combinations, four cases are considered, each one corresponding to different assumptions:

- load (Q) and strength (R) have constant values;
- load (Q) is constant and strength (R) is variable;
- load (Q) is variable and strength (R) is constant;
- load (Q) and strength (R) are variables (obviously the most general case and typical of transmission lines).

The values of reliability for these cases are summarized in table 2.

Table 2 - Reliability corresponding to various assumptions of load and strength

Load Q			Strength R			Reliability P_s ³⁾	
Mean value	COV	Design load Q_T ¹⁾	Mean value	COV	Design strength $(\theta)R$ ²⁾	Graphical representation	Results ⁴⁾
Q constant	0	Q	R constant	0	R		$P_s = 1,0$
Q constant	0	Q	$\bar{R}$	v_R	$\bar{R} (1 - K_c v_R)$		$P_s = 1 - \int_{-\infty}^{R_c} f_R dL$ $= 1 - F_R$ $= 0,90 \text{ (for } K_c = 1,28)$
$\bar{Q}$	v_Q (20 % to 50 %)	Q_T	R constant	0	R		$P_s = 1 - \int_{Q_T}^{+\infty} f_Q dL$ $= 1 - \frac{1}{T}$
$\bar{Q}$	v_Q (20 % to 50 %)	Q_T	$\bar{R}$	v_R (5 % à 20 %)	$\bar{R} (1 - K_c v_R)$		$P_s = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} f_Q F_R dL$ $\approx 1 - \frac{1}{2T}$

1) Q_T is the load with a return period T .
2) $(\theta)R$ is the strength corresponding to an exclusion limit of θ .
3) P_s is the probability $Q < R$.
4) In these examples the reliability is given for $\theta = 10\%$ (where $K_c = 1,28$).

1.6.4.2 Niveaux de fiabilité

Les lignes calculées selon la méthodologie proposée dans ce rapport ont une fiabilité annuelle minimale P_s de $(1 - 1/2 T)$. Dans ce cas, la période de retour des charges de calcul est égale à $T = 1/[2(1 - P_s)]$.

Dans le tableau 3, on donne les valeurs de T et de P_s correspondant aux niveaux de fiabilité les plus courantes.

Tableau 3 – Relation entre niveaux de fiabilité et période de retour des charges de calcul

P_s (fiabilité annuelle)	$1 - 10^{-2}$	$1 - 10^{-2,5}$	$1 - 10^{-3}$
T (période de retour en années)	50	150	500

L'annexe C donne des probabilités de dépassement d'un événement climatique Q_T . Il est toutefois important d'admettre que le dépassement d'une charge de calcul n'implique pas nécessairement une perte de fiabilité, cette dernière étant une combinaison d'un événement de charge extrême se produisant sur un composant incapable de résister à ses effets. Cela explique la différence entre la probabilité de défaillance et celle de dépassement d'un événement de charge.

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 ou à l'aide de méthodes d'optimisation que l'on trouve dans la littérature technique.

La section 2 propose des lignes directrices destinées à faciliter le choix du niveau de fiabilité dans le cas où l'on ne disposerait pas de l'une des techniques ci-dessus.

1.7 Prescriptions de sécurité

1.7.1 Prescriptions de sécurité types (ou mesures)

Les méthodes de calcul proposées ici, permettent de concevoir des lignes de transport ayant une fiabilité acceptable par rapport aux événements climatiques spécifiés.

La performance des lignes peut, toutefois, être affectée par d'autres événements tels que chocs causés par des objets, avalanches, sabotage, etc.

Dans ces cas, on peut tenir compte de mesures préventives ayant une nature déterministe, désignées comme prescriptions de sécurité, pour augmenter la sécurité de la ligne.

Le but des mesures de sécurité est la réduction des défaillances secondaires et l'arrêt des défaillances en cascade pouvant s'étendre bien au-delà d'un canton défaillant. Dans les cas où des surcharges extérieures exceptionnelles dépassant la résistance de la ligne entraînent une défaillance étendue, ces mesures conduisent à limiter la progression de la défaillance aux cantons ayant une marge de résistance suffisante pour s'opposer au pic de charge.

1.6.4.2 Reliability levels

Lines which are designed according to the methodology proposed in this report, have a minimum yearly reliability $P_s = (1 - 1/2T)$. In this case the return period of design loads is equal to $T = 1 / [2 (1 - P_s)]$

Table 3 gives values of T and P_s corresponding to the most common reliability levels.

Table 3 - Relationship between reliability levels and return periods of design loads

P_s (yearly reliability)	$1 - 10^{-2}$	$1 - 10^{-2.5}$	$1 - 10^{-3}$
T (return period in years)	50	150	500

In annex C, probabilities of exceeding a weather event Q_T are given. 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 occurring on a component unable to resist its effect. This explains the discrepancy between the probability of failure and that of exceeding a load event.

Designers can choose their reliability levels either by calibration with existing lines that have had a long history of satisfactory performance or by optimization methods found in technical literature.

In section 2, guidelines are proposed to help choose the reliability level in the case of unavailability of either of the above techniques.

1.7 Security requirements

1.7.1 Typical security requirements (or measures)

The design methods proposed in this report provide transmission lines with an acceptable reliability in regard to specified climatic events.

However, other events such as impact of objects, avalanches, sabotage, etc., could also affect the performance of lines.

In such cases preventive measures of a deterministic nature, herein called security requirements, can be considered in order to increase the security of the line.

The objective of security measures is to reduce secondary failures and to stop cascading failures that can extend well beyond a failed section. In cases where exceptional external loads in excess of the strength of the line cause a widespread failure, these measures help in preventing the progression of the failure to sections that have a sufficient reserve

On peut accroître la sécurité en augmentant la résistance de quelques composants. Par exemple, une mesure courante de sécurité pour les pylônes de suspension comprend la spécification de charges longitudinales dues à la détente des conducteurs d'une seule phase dans des conditions de charge quotidiennes c'est à dire normales. Un autre exemple est l'insertion, à un intervalle donné (généralement 5 km à 10 km) de pylônes résistants désignés comme pylônes anti-cascade. On peut calculer ces pylônes pour supporter des charges dues à la détente de tous les conducteurs dans des conditions de givre ou de vent.

Des limiteurs de charge tels que pinces à serrage contrôlé, consoles rabattantes, boulons de cisaillement, etc., ont également été utilisés comme mesures de sécurité. Toutefois, il convient de veiller à ce que ces dispositifs ne soient pas les premiers à rompre sous des charges liées à la fiabilité causant ainsi une défaillance de ligne.

1.7.2 Relation entre sécurité et fiabilité

Même si les notions de fiabilité et de sécurité sont fondamentalement différentes (probabiliste contre déterministe), il peut arriver qu'une fiabilité accrue augmente également la sécurité. Par exemple, si l'on utilise des pylônes à base carrée pour satisfaire à la conception, une augmentation des charges dues au vent transversal ou au givre et à la combinaison des deux entraîne généralement une augmentation de la résistance longitudinale et, par suite, de la sécurité.

On peut également considérer la coordination de résistance comme une mesure de sécurité. Par exemple, si le composant le plus faible est le pylône d'alignement, cela conduira à l'effet de charge (dynamique ou statique) le plus faible en cas de défaillance. Ainsi, des lignes calculées avec des pylônes d'alignement comme élément le plus faible sont mieux protégées contre les défaillances en cascade que les lignes calculées avec des conducteurs ou des pylônes d'angle représentant le composant le plus faible.

1.7.3 Niveaux de sécurité

On peut calculer les lignes pour différents niveaux de sécurité. Les prescriptions minimales de sécurité sont données en 3.6. Les concepteurs pourront choisir d'augmenter la sécurité grâce à une combinaison de mesures de charges donnée dans la même section.

1.8 Prescriptions relatives à la sécurité du personnel

Dans ce rapport on a prévu des prescriptions de conception spécifiques destinées à assurer la sécurité du personnel pendant la construction, l'entretien et le fonctionnement. On les appelle prescriptions relatives à la sécurité du personnel.

Par conséquent, tous les composants exposés à des charges importantes pendant la construction et l'entretien devront être calculés avec une marge de sécurité suffisante pour couvrir ces opérations. La première démarche consiste à identifier ces surcharges et leur intensité maximale probable, puis à calculer les composants de manière que la fiabilité résultante soit pratiquement égale à 1,0 sous ces intensités de charge.

Les charges de construction et d'entretien spécifiées dans ce rapport seront complétées par les prescriptions relatives à la sécurité du personnel fixées par les normes nationales pour la conception des lignes de transport.

Increased security can be achieved by adding strength to some components. As an example, one common security measure for tangent towers involves the specification of longitudinal loads due to release of the conductor tension of one phase under every day conditions, i.e. normal. Another example is the insertion, at a given interval (typically 5 km to 10 km), of strong towers called anti-cascading towers. These towers can be designed to withstand loads due to the tension release of all conductors under ice or wind conditions.

Load limiting devices such as slip clamps, swinging crossarms, shear bolts, etc. have also been used as security measures in order to decrease the risk of failure propagation. However, care should be taken to ensure that these devices would not fail first under reliability related loads and thus be the cause of line failure.

1.7.2 *Relation between security and reliability*

Even if reliability and security are basically different concepts (probabilistic versus deterministic), it may happen that increasing reliability also increases security. For example, if square based towers are used as a consequence of design requirements, an increase in transverse wind or combined ice and wind loadings generally leads to an increase in longitudinal strength, hence, an increase in security.

The coordination of strength can also be considered as a security measure. For example, if the weakest component is the tangent tower, it will lead to the least load effect (dynamic or static) in case of failure. Thus, lines designed with tangent towers being the weakest component are better protected from cascading failures than lines designed with conductors or angle towers as the weakest component.

1.7.3 *Security levels*

Lines can be designed for different security levels. Minimum security requirements are given in 3.6. Designers will also have the option of increasing the security by selecting any combination of measures or loadings listed in the same section.

1.8 **Safety requirements**

In this report specific design requirements are provided in order to ensure safety during construction, maintenance and service. These are called safety requirements.

Consequently, all components subjected to significant loadings during construction and maintenance should be designed with an adequate safety margin to cover such operations. The first step is thus to identify these overloads and their probable maximum intensity, then to design components in such a way that the resulting reliability is practically 1,0 under these load intensities.

Construction and maintenance loads which are specified in this report will complement the safety requirements of national standards for the design of transmission lines.

SECTION 2: CRITÈRES DE CONCEPTION

2.1 Généralités

2.1.1 Méthodologie

La méthodologie conseillée pour le calcul des lignes de transport est résumée en figure 2.

Cette méthodologie peut être décrite comme suit:

- a) choix du niveau de fiabilité en termes de période de retour des charges de conception;
- b) calcul des variables climatiques correspondant aux périodes de retour choisies;
- c) calcul des charges climatiques sur les composants. Elles sont appelées charges limites;
- d) calcul des charges correspondant aux prescriptions de sécurité (limitation de défaillance);
- e) calcul des charges relatives à la sécurité du personnel pendant la construction et l'entretien;
- f) détermination de la coordination de résistance désirée;
- g) choix des facteurs de correction appropriés éventuels pour le calcul des composants tels que facteur d'utilisation, facteurs de résistance se rapportant au nombre de composants, coordination de résistance, contrôle de qualité et résistance caractéristique;
- h) calcul des composants pour les prescriptions de charge et de résistance citées ci-dessus.

SECTION 2: DESIGN CRITERIA

2.1 General

2.1.1 Methodology

The recommended methodology for designing transmission lines is summarized in figure 2.

This methodology can be described in the following steps:

- a) select the reliability level in terms of return period of design load;
- b) calculate climatic variables corresponding to selected return;
- c) calculate climatic loadings on components. These are called limit loads;
- d) calculate loads corresponding to security requirements (failure containment);
- e) calculate loads related to safety during construction and maintenance;
- f) determine the desired strength coordination;
- g) select appropriate correction factors, if applicable, to the design of components such as use factor, strength factors related to number of components, strength coordination, quality control, and the characteristic strength;
- h) design components for the above loads and strength requirements.

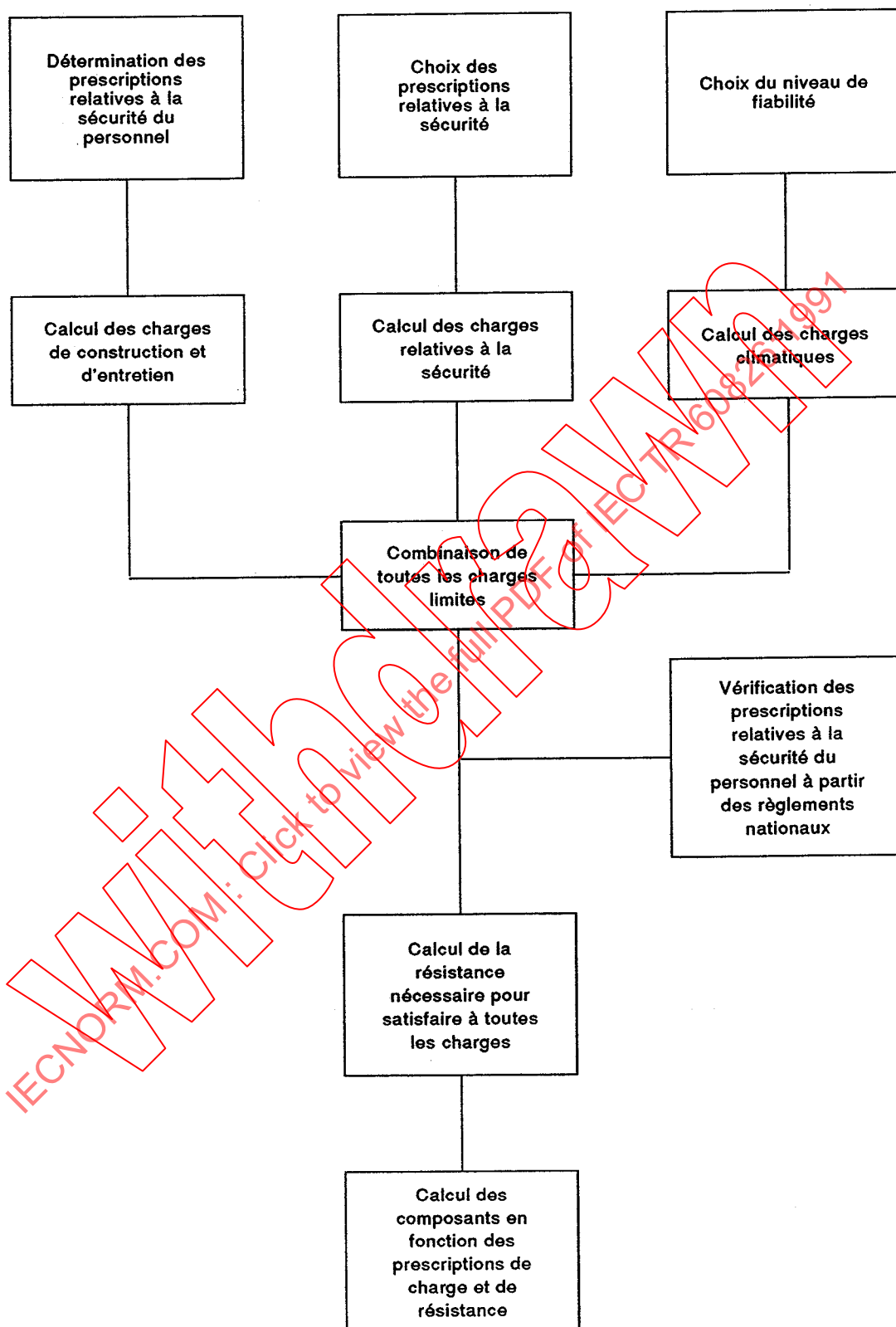


Figure 2 - Méthodologie pour la conception des lignes de transport

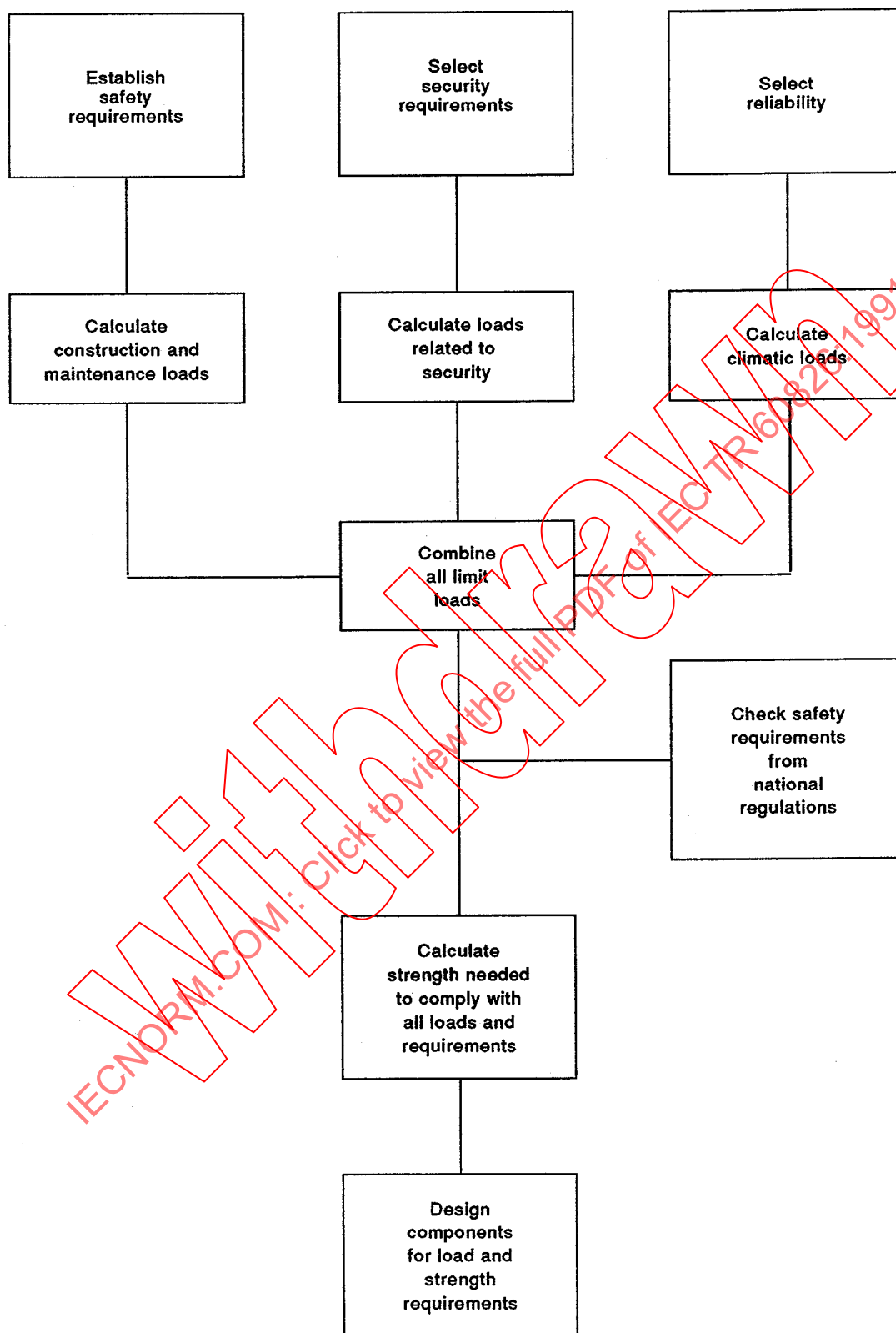


Figure 2 - Methodology for the design of transmission lines

2.1.2 Niveaux de fiabilité

2.1.2.1 Description

On peut calculer les lignes de transport pour différents niveaux (ou classes) de fiabilité en fonction des prescriptions locales.

Ce rapport propose trois niveaux de fiabilité supposés couvrir la gamme 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 de calcul selon tableau 4.

Tableau 4 - Niveaux de fiabilité¹ des lignes de transport

	Niveaux de fiabilité		
	I	II	III
<i>T</i> , période de retour des charges de calcul, en années	50	150	500

2.1.2.2 Critères de base pour le choix des niveaux de fiabilité

On peut choisir les niveaux de fiabilité des lignes de transport en les comparant aux lignes existantes dont la performance a été satisfaisante, ou à l'aide des directives décrites ci-après.

Dans tous les cas, les lignes doivent satisfaire au moins aux prescriptions du niveau de fiabilité un.

Une augmentation de la fiabilité au-delà du niveau un pourrait se justifier pour les lignes les plus importantes du réseau comme indiqué ci-dessous:

Le niveau deux s'applique principalement aux lignes ayant une tension supérieure à 230 kV² et aux lignes ayant une tension inférieure à 230 kV mais constituant la principale, ou peut être la seule, source d'alimentation par rapport à une charge particulière.

Le niveau trois s'applique principalement aux lignes ayant une tension supérieure à 230 kV² qui représente la principale, ou peut être la seule, source d'alimentation par rapport à une charge particulière.

¹ Lorsque des charges ayant une période de retour *T* sont associées à une résistance dont le dépassement atteint une probabilité de 90 % (limite d'exclusion: 10 %), on prévoit que la fiabilité annuelle minimale est de l'ordre de $(1 - 1/2 T)$ et est sensible à la précision des prévisions de charge et de résistance (disponibilité des données).

² Le niveau de tension de 230 kV peut varier dans les différents pays selon l'importance de la ligne sur le réseau.

2.1.2 Reliability levels

2.1.2.1 Description

Transmission lines can be designed for different reliability levels (or classes) depending on local requirements.

Three reliability levels are proposed in this report 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 design loads as shown in table 4.

Table 4 - Reliability levels¹ of transmission lines

	Reliability levels		
	I	II	III
T , return period of design loads, in years	50	150	500

2.1.2.2 Guideline criteria for selection of reliability levels

Reliability levels of transmission lines can be selected by comparison with existing lines that have had a satisfactory performance or with the guidelines subsequently described.

In all cases, lines shall at least meet the requirements of reliability level one.

An increase in reliability above level one could be justified for more important lines of the network as indicated in the following guidelines:

Level two applies mainly to lines above 230 kV² and to lines below 230 kV which constitute the principal or perhaps the only source of supply to a particular load.

Level three applies mainly to lines above 230 kV² which constitute the principal or perhaps the only source of supply to a particular load.

1 Whenever loads having a return period T are associated with a strength being exceeded with 90 % probability (exclusion limit 10 %), it is expected that the minimum yearly reliability will be to the order of $(1 - 1/2 T)$ and will be sensitive to the accuracy of prediction of load and strength (availability of data).

2 The voltage level of 230 kV may vary in different countries according to the importance of the line, on the network.

2.1.3 Prescriptions de sécurité

2.1.3.1 Description

On fournit des prescriptions de sécurité pour les lignes de transport, prescriptions qui correspondent à des charges particulières et/ou à des mesures destinées à éviter des défaillances graduelles (ou en cascade) incontrôlables.

2.1.3.2 Prescriptions minimales de sécurité

Dans le cas où une défaillance de ligne se produit en raison de matériel défectueux, d'événements imprévisibles (tels que chocs dus à des objets, glissement de terrain, etc.) ou de surcharge due à la température, il est indispensable que la défaillance soit limitée au canton où se sont produites des surcharges dépassant les résistances des composants.

Pour éviter des défaillances en cascade, on a prévu des conditions de charges simulées sur pylône (longitudinales et torsionnelles) comme décrit en 3.6 de la section 3. Il convient que ces charges fournissent une protection adéquate contre les ruines en cascade pour la plupart des lignes de transport utilisant des pylônes en treillis.

2.1.3.3 Prescriptions supplémentaires

On pourrait justifier une augmentation de la sécurité pour certaines lignes de transport soit en raison de leur importance dans le réseau ou en raison du fait qu'elles sont exposées à des charges sévères dues au givre.

Dans ce cas, on pourrait prendre des mesures, ou choisir des charges supplémentaires listées en 3.6.3.3 pour augmenter la sécurité en fonction de l'expérience et du type de ligne à calculer.

2.1.4 Prescriptions concernant la sécurité du personnel

Les prescriptions concernant la sécurité du personnel sont destinées à assurer que les opérations de construction et d'entretien n'exposent pas le personnel à des dangers.

Les prescriptions concernant la sécurité du personnel contenues dans ce rapport sont fournies en complément des règlements nationaux et règlements complémentaires.

Ces prescriptions consistent en charges particulières pour lesquelles on doit calculer les composants de ligne (principalement les pylônes). Les détails concernant les charges de construction et d'entretien sont donnés dans la section 3 «Charges».

2.1.3 *Security requirements*

2.1.3.1 Description

Security requirements are provided for transmission lines and correspond to special load and/or measures intended to prevent uncontrollable progressive (or cascading) failures.

2.1.3.2 Minimum security requirements

Should a line fail either due to material defects, casual events (e.g. impact of objects, landslide, etc.) or climatic overload, it is essential that the failure be contained within or very close to the section where overloads exceeding the strengths of components have occurred.

In order to prevent cascading failures, some simulated tower loading conditions (longitudinal and torsional) are provided as described in 3.6 of section 3. These loads should provide for adequate protection against cascading failures for the majority of transmission lines using lattice towers.

2.1.3.3 Additional requirements

A higher security could be justified for some transmission lines either due to their importance in the network or because they are subjected to severe ice loadings.

In such a case additional measures or loadings which are listed in 3.6.3.3, could be used for increasing security according to the experience and to the type of line to be designed.

2.1.4 *Safety requirements*

Safety requirements are meant to ensure that construction and maintenance do not pose safety hazards to workers.

The safety requirements of this report are provided in addition to statutory and/or national regulations.

These requirements consist of special loads for which line components (mostly towers) have to be designed. Details concerning construction and maintenance loads are given in section 3 "Loadings".

2.2 Critères de conception

2.2.1 Généralités

On a utilisé la notion de charge limite dans l'ensemble de ce rapport. Les charges limites désignées comme Q_T , proviennent généralement de données climatiques¹ basées sur une période de retour de T , ou, dans le cas où on ne dispose pas de données climatiques, elles sont choisies sur la base de l'expérience ou par comparaison avec la pratique. Dans ce dernier cas, on ne peut pas connaître la fiabilité d'une ligne calculée conformément à ce rapport; toutefois, on obtient une compatibilité de calcul globale.

On doit vérifier les conditions suivantes dans le processus de calcul

$$\begin{aligned} & \text{Effet de charge} < \text{Résistance} \\ \text{ou,} & \gamma_u Q_T < \Phi R_c \\ \text{ou,} & \text{Facteur de charge} \times \text{charges limites} < \text{Facteur de résistance} \times \text{résistance caractéristique} \end{aligned}$$

On doit considérer trois cas, comme indiqué au tableau 5.

Tableau 5 - Conditions de conception

Condition (ou prescription)	Types de charges	Limites
Fiabilité	Climatique, givre, vent, vent + givre, avec une période de retour T	Limite d'endommagement *
Sécurité de l'ouvrage	Limitation de défaillance (torsionnelle et longitudinale)	Limite de défaillance **
Sécurité du personnel	Charges de construction et d'entretien	Limite d'endommagement *
* Il ne devrait pas exister de déformation permanente sous ces charges (il ne faut pas dépasser la limite d'endommagement des composants). ** Etant donné que ces charges sont destinées à éviter une défaillance en cascade d'une ligne déjà défaillante, il est concevable et économique d'utiliser la résistance la plus élevée possible aussi longtemps que la défaillance demeure contrôlée.		

1 Il convient que la charge Q_T , déduite d'une analyse de données extrêmes dans les stations météorologiques, reflète l'intensité de charge maximale qui peut se produire dans le périmètre couvert par la ligne (correction de périmètre de longueur de ligne). Les tendances directionnelles d'événements climatiques extrêmes peuvent être intégrées dans la distribution de charge, dans la mesure où on les a vérifiées.

2.2 Design criteria

2.2.1 General

Limit load concept is used throughout this report. Limit loads, which are referred to as Q_T , are generally derived from climatic data¹ based on a return period of T years, or, in cases when climatic data are not available, limit loads can be selected, based on experience or by comparison with existing practice. In the latter case, the reliability of a line designed according to this report may not be known; however, overall design consistency is achieved.

In the design process, the following conditions have to be checked:

$$\begin{aligned} & \text{Load effect} < \text{Strength} \\ \text{or,} & \gamma_u Q_T < \Phi R_c \\ \text{or,} & \text{Load factor} \times \text{limit loads} < \text{Strength factor} \times \text{characteristic strength} \end{aligned}$$

As shown in table 5, three cases have to be considered.

Table 5 - Design conditions

Condition (or requirement)	Type of loads	Limit state
Reliability	Climatic, ice, wind, ice + wind, with a return period T	Damage limit *
Security	Failure containment (torsional and longitudinal)	Failure limit **
Safety	Construction and maintenance loads	Damage limit *
* There should not be any permanent deformation under these loads (damage limit of components should not be exceeded). ** Since the purpose of these loads is to prevent cascading failure in a line that has already failed, it is conceivable and economical to use the highest possible strength as long as failure does not propagate without control.		

1 Load Q_T , when derived from extreme data analysis at weather stations should reflect the maximum loading intensity, which might occur within the space covered by the line (adjustment for space or length of the line). Directional tendencies of extreme climatic events, whenever proven, could be incorporated into the load distribution function.

2.2.2 Equation de calcul

$$\gamma_u Q_T = \Phi_R R_c \quad (5)$$

$$\Phi_R = \Phi_S \Phi_N \Phi_Q \Phi_C \quad (6)$$

où:

- γ_u = facteur variant avec la dispersion de portée appliqué aux charges verticales et transversales des pylônes. Il est recommandé de prendre ce facteur égal à 1,0 sauf là où les données nécessaires à la détermination de ce facteur sont prévisibles ou disponibles. Dans ce cas, voir l'annexe A pour le calcul de γ_u
- Q_T = charge correspondant à une période de retour T , ou choisie par étalonnage ou d'après l'expérience dans le cas où des données ne sont pas disponibles. Ces charges sont des valeurs limites utilisées pour le calcul.
- Φ_R = facteur de résistance globale, égal au produit de Φ_S , Φ_N , Φ_Q et Φ_C
- Φ_S = facteur relatif à la coordination de résistance entre composants à partir du tableau 9.
- Φ_N = facteur relatif au nombre N de composants exposés à la charge critique. N est le nombre total de composants déduit des informations données aux tableaux 6 et 7 et Φ_N est donné au tableau 8.
- Φ_Q = facteur relatif à la classe de qualité du composant pendant la fabrication et la construction
- Φ_C = facteur relatif à la relation entre la limite d'exclusion réelle de R_c et la valeur supposée de $e = 10$ %. Cette hypothèse conduit à des conceptions plus sûres. Pour des raisons pratiques, ce facteur est pris égal à 1,0; sinon il peut être calculé à l'aide de l'annexe D.
- R_c = résistance caractéristique ou nominale. Elle correspond à la limite d'endommagement pour toutes les charges relatives aux conditions de fiabilité et de sécurité du personnel et à la limite de défaillance pour toutes les charges relatives à la sécurité

2.2.3 Facteur γ_u

Par suite de la normalisation et du nombre réduit de types de pylône, de nombreux pylônes ne sont pas utilisés à leurs valeurs de conception maximales. Cela contribue à augmenter la fiabilité globale, en particulier lorsqu'il s'agit de charges où l'intensité maximale n'est pas très étendue.

Des facteurs d'utilisation U , (rapport entre portée réelle et maximale) se sont révélés avoir des formes prévisibles sur des lignes de transport bien optimisées (voir annexe A), ce qui permet la modélisation de cette variable sous forme d'une équation de fiabilité générale.

On a mis au point certaines techniques destinées à inclure l'effet bénéfique du facteur d'utilisation dans la relation générale charge/résistance grâce à l'application d'un facteur de réduction γ_u sur les charges limites. Toutefois, pour certaines lignes de transport où il est difficile de prévoir la variation de portée lors de l'étude des pylônes, on peut admettre de négliger l'effet des facteurs d'utilisation et de prendre γ_u égal à 1,0. Le calcul est alors dans des limites de sécurité, la coordination de résistance désirée entre les composants pourrait en être modifiée.

Lorsque le concepteur dispose d'un modèle de prévision fiable concernant la variation des facteurs d'utilisation de la ligne, il peut utiliser la technique donnée en annexe A pour inclure cet effet dans le calcul de la ligne. Si toutefois une ligne traverse différents terrains ayant le même type de pylônes, le concepteur utilisera la valeur la plus haute de γ_u obtenue à partir de chaque tronçon.

2.2.2 Design equation

$$\gamma_u Q_T = \Phi_R R_c \quad (5)$$

$$\Phi_R = \Phi_S \Phi_N \Phi_Q \Phi_C \quad (6)$$

where:

γ_u = factor dependent on span dispersion and applied to vertical and transverse loads of towers. This factor should be considered equal to 1,0 except where use factor data are predictable or available. In such a case refer to annex A for calculation of γ_u

Q_T = load corresponding to a return period T , or selected by calibration or experience if data are not available. These loads are limit loads used for design purposes

Φ_R = global strength factor equal to the product of Φ_S , Φ_N , Φ_Q and Φ_C

Φ_S = factor related to coordination of strength between components from table 9

Φ_N = factor related to the number N of components subjected to the critical load. N is the total number of components derived from the information given in tables 6 and 7 and Φ_N is given in table 8.

Φ_Q = factor related to the quality level of the component during fabrication and construction

Φ_C = factor related to the relationship between the actual exclusion limit of R_c and the assumed value of $e = 10\%$ (this assumption leads to safer designs). For practicality this factor is considered equal to 1,0 or it could be calculated using annex D

R_c = the characteristic or nominal strength; it corresponds to the damage limit for all loads related to reliability and safety conditions and to failure limit for all loads related to security

2.2.3 Factor γ_u

Due to standardization and reduced number of tower types, many towers in a transmission line are not used at their maximum design parameters. This fact contributes to an increase in the overall reliability, especially when dealing with loading events where the maximum intensity is not widespread.

Use factors, U , (ratio of actual to maximum spans) were found to have predictable patterns in well optimized transmission lines (see annex A), which allows modelling of this variable into the general reliability equation.

Some techniques have been developed in order to include the beneficial effect of use factor in the general load-strength relation through the application of a reduction factor γ_u on limit loads. However for some transmission lines where it is difficult to predict span variation while in the design phase of towers, it may be acceptable to neglect the effect of use factors and consider γ_u equal to 1,0. The design will then be on the safe side, but the desired strength coordination between components could be altered.

When the designer has a reliable prediction model of the variation of the use factors of the line, he can use the technique given in annex A in order to incorporate this effect into line design. If however a line crosses different terrains with the same type of towers, the designer has to use the largest value of γ_u obtained from each section.

2.2.4 Nombre de composants soumis à l'intensité de charge maximale relatif au facteur Φ_N

Du côté charge de l'équation de fiabilité, la fonction de densité de charge comprend déjà la notion d'espace couvert par la ligne de transport. Toutefois, lorsqu'un événement climatique extrême se produit dans ce périmètre, son intensité maximale ne s'étend pas nécessairement au périmètre tout entier.

Par exemple, des événements tels que basse température, pluie et tempête peuvent affecter avec une forte intensité un grand nombre de composants dans ce périmètre alors que d'autres types d'événements climatiques tels que pluies verglaçantes ou tornades ont une intensité maximale qui n'affecte qu'un nombre très limité de composants.

La détermination du nombre de composants exposés à l'intensité de charge maximale est importante dans le calcul car le risque de «découvrir» un pylône faible augmente avec ce nombre de composants.

Des études et mesures courantes donnent peu d'information sur le périmètre couvert par l'intensité maximale des tempêtes. L'un des moyens possibles pour obtenir ces données est de procéder par déduction de défaillances qui se sont produites par suite de ces événements (nous distinguerons entre des défaillances causées directement par l'événement climatique et des défaillances secondaires déclenchées par la défaillance initiale) ainsi que par des observations faites en particulier pendant et immédiatement après des tempêtes.

Lors d'une tempête de pluie verglaçante étendue, la formation maximale de manchons de givre couvre rarement plus de quelques kilomètres et peut s'étendre jusqu'à 20 pylônes.

D'autre part, l'analyse de certaines défaillances qui se sont produites dans le passé par suite de vents extrêmes indiquent que ces intensités de vent s'appliquent rarement à plus de quelques pylônes.

L'expérience suggère que le nombre de pylônes exposés à l'intensité de charge maximale peut varier conformément au tableau 6, en supposant une portée type de 400 m. Par conséquent, toutes les valeurs situées dans la gamme donnée au tableau 6 pourraient être utilisées pour le calcul comme l'indique l'expérience acquise. On utilisera d'autres valeurs sur la base des données existantes, des conditions locales particulières ou de l'expérience.

Tableau 6 - Espace couvert par l'intensité de charge maximale (en nombre de pylônes)

Charge	Terrain plat à vallonné	Montagnes
Vent en rafale maximale	1 à 5	1 ou 2
Glace maximale	10 à 50	1 à 10
Glace + vent maximaux	1 à 5	1 à 5

2.2.4 Number of components subjected to maximum load intensity related to factor Φ_N

On the load side of the reliability equation, the load density function already includes the notion of space covered by the transmission line. However, when an extreme climatic event occurs within this space, its maximum intensity does not necessarily extend to the whole space.

For example, events such as low temperature, rain and hurricanes may affect with full intensity a large number of components in this space, while other types of climatic events, such as freezing rain or tornadoes, have a maximum intensity which affects a very limited number of components.

The determination of the number of components subjected to the maximum load intensity is important in the design because the risk of "finding" a weak tower increases with this number of components.

Current studies and measurements give little information on the space covered by the maximum intensity of storms. One of the possible ways of obtaining these data is by inference from failures that occurred due to these events (we should distinguish between failures caused directly by the climatic event and secondary failures triggered by the initial failure) as well as by observations made specially during and immediately after storms.

Under a widespread freezing rain storm, the maximum ice accretion rarely covers more than a few kilometres with a possible coverage of up to 20 towers.

On the other hand, the analysis of some past failures that occurred due to extreme winds indicate that these wind intensities rarely apply to more than a few towers.

Available experience suggests that the number of towers subjected to maximum load intensity may vary according to table 6, assuming a typical span of 400 m. Consequently, any value in the range given in table 6 could be used for design purposes, as dictated by past experience. Other values should be used if substantiated by data, by special local conditions or by experience.

Table 6 - Range of spatial coverage of maximum load intensity
(given in number of towers)

Loading	Flat to rolling terrain	Mountains
Maximum gust wind	1 to 5	1 or 2
Maximum ice	10 to 50	1 to 10
Maximum ice + wind	1 to 5	1 to 5

Pour le calcul et en l'absence d'expérience particulière, le nombre de pylônes exposés à l'intensité maximale d'événements climatiques est donné dans le tableau 7.

Tableau 7 - Nombre de pylônes exposés à l'intensité de charge maximale

Charge	Terrain plat à vallonné	Montagnes
Vent en rafale maximale	1	1
Glace maximale	20	2
Glace + vent maximaux	1	1

Le nombre des composants autres que des pylônes peut être déduit directement du nombre de pylônes ainsi sélectionnés.

2.2.5 Facteur de résistance Φ_N relatif au nombre de composants

A l'aide du nombre de composants déterminé en 2.2.4, on peut déterminer le coefficient Φ_N à l'aide du tableau 8 (voir section 5 pour la méthode de calcul détaillée).

Tableau 8 - Facteur de résistance Φ_N relatif au nombre N de composants en série exposés à la charge critique

N	Dispersion de résistance v_R						
	5 %	7,5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	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	0,64
10	0,94	0,92	0,89	0,81	0,72	0,62	0,51
20	0,93	0,90	0,85	0,77	0,66	0,53	0,38
40	0,92	0,87	0,83	0,72	0,59	0,44	0,26
80	0,91	0,86	0,79	0,68	0,53	0,36	0,16
160	0,90	0,84	0,78	0,64	0,48	0,29	0,07

In the absence of specific experience, the number of towers subjected to the maximum intensity of climatic events can be derived from table 7.

Table 7 - Number of towers subjected to maximum load intensity

Loading	Flat to rolling terrain	Mountains
Maximum gust wind	1	1
Maximum ice	20	2
Maximum ice + wind	1	1

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

2.2.5 Strength factor Φ_N related to number of components

For the number of components determined according to 2.2.4, the strength coefficient Φ_N can be determined from table 8 (see section 5 for detailed calculation method).

Table 8 - Strength factor Φ_N related to the number N of components subjected to the critical load intensity

N	Strength dispersion v_R						
	5 %	7.5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	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	0,64
10	0,94	0,92	0,89	0,81	0,72	0,62	0,51
20	0,93	0,90	0,85	0,77	0,66	0,53	0,38
40	0,92	0,87	0,83	0,72	0,59	0,44	0,26
80	0,91	0,86	0,79	0,68	0,53	0,36	0,16
160	0,90	0,84	0,78	0,64	0,48	0,29	0,07

2.2.6 Facteur de résistance Φ_S relatif à la coordination de résistance

Comme on l'a vu plus haut, on peut souhaiter calculer, dans un système de lignes de transport, des composants avec une fiabilité supérieure pour minimiser les conséquences d'une défaillance éventuelle due à des surcharges climatiques (temps de réparation, défaillance secondaire, etc.).

Sur la base des critères de 1.5 de la section 1, on suggère que les fondations d'un pylône soient plus fiables que le pylône lui-même et que les conducteurs et les pylônes d'ancrage soient plus fiables que le pylône d'alignement.

Pour réaliser cette coordination de résistance, on applique un facteur de résistance Φ_S à la résistance des composants que l'on souhaite plus fiable. Ce facteur varie avec la dispersion des composants, et les valeurs données au tableau 9 sont basées sur une probabilité de non-défaillance du second composant R_2 avant le premier composant R_1 égale à 90 %. Pour des valeurs plus détaillées, voir le tableau 28 et 5.4.2.

Tableau 9 - Valeurs de Φ_S

V_{R2}	V_{R1}	5 %	10 %
	5 % à 10 %	0,92	0,82
	10 %	0,94	0,86

2.2.7 Facteur de résistance Φ_Q relatif à la qualité

Lorsque la résistance d'un composant est déduite d'essais réalisés dans des conditions idéales sur des échantillons spécialement fabriqués pour les essais, il est recommandé de réduire la résistance caractéristique d'un facteur Φ_Q relatif à la qualité, étant donné qu'en pratique le composant sera produit en série et utilisé dans des conditions différentes des conditions d'essais. La plage proposée pour Φ_Q va de 0,9 à 1,0; la valeur du $\Phi_Q = 1,0$ est utilisée uniquement lorsque les essais types ou essais de routine sont effectués dans des conditions semblables aux méthodes de construction réelles, sinon Φ_Q sera égal à 0,90 - 0,95 en fonction de l'appréciation et de l'expérience du concepteur.

2.3 Calcul des pylônes

2.3.1 Charges sur pylônes

Les charges Q_T appliquées aux pylônes aux points de fixation des conducteurs et des câbles de garde ont trois composantes:

- composante verticale Q_{TV} ;
- composante de vent Q_{TW} ;
- composante de tension Q_{TT} .

2.2.6 Strength factor Φ_S related to coordination of strength

As discussed earlier, it may be desirable in a transmission line system to design some components to be more reliable than others in order to minimize the consequences of a possible failure due to climatic overloads (i.e. repair time, secondary failure, etc.).

On the basis of the criteria in 1.5 of section 1, it is suggested that foundations of a tower be more reliable than the tower itself, and that conductors and angle towers be more reliable than the tangent tower.

In order to achieve such strength coordination, a strength factor Φ_S is applied to the strength of components required to be more reliable. This factor depends on the dispersion of both components and the values given in table 9 are based on a confidence of 90 % that the second component R_2 will not fail before the first R_1 . For more detailed values, see table 28 and 5.4.2.

Table 9 - Values of Φ_S

V_{R2}	V_{R1}	5 %	10 %
	5 % to 10 %	0,92	0,82
	10 %	0,94	0,86

2.2.7 Strength factor Φ_Q related to quality

Whenever the strength of a component is derived from tests performed under ideal conditions on samples specially manufactured for the tests, it is advisable to reduce the characteristic strength by a factor Φ_Q related to quality, since in practice the component will be mass produced and will be used under conditions different from those of the tests. The suggested range of Φ_Q is 0,9 to 1,0; the value of $\Phi_Q = 1,0$ is used only whenever type or routine tests are done under conditions similar to actual construction methods, otherwise Φ_Q shall be equal to 0,90 to 0,95 depending on the judgement and experience of the designer.

2.3 Design criteria for towers

2.3.1 Loads on towers

Loads Q_T applied to towers at attachment points of conductors and ground wires have three components:

- vertical component Q_{TV} ;
- wind component Q_{TW} ;
- tension component Q_{Tt} .

Les charges sur pylônes deviennent par conséquent:

$$\text{Charges sur pylône} = \text{effet de } \begin{vmatrix} Q_{Tv} \\ Q_{Tw} \\ Q_{Tt} \end{vmatrix} + \text{charges propres sur le pylône.}$$

2.3.2 Résistance des pylônes

Les pylônes doivent être calculés pour une résistance caractéristique R_c égale à:

$$R_c = \frac{\text{charges sur pylône}}{\Phi_S \Phi_N \Phi_Q} \quad (7)$$

2.3.3 Essais sur pylônes

Les pylônes soumis aux essais de type doivent supporter des charges équivalant à R_c . Les essais doivent être conformes à la CEI 652.

2.4 Critères de calcul des fondations

2.4.1 Charges sur fondations

Les réactions maximales sur les fondations sont obtenues à partir du calcul des pylônes soumis aux charges définies en 2.3.1 à l'aide de méthodes conventionnelles et de combinaisons appropriées portée-vent et portée-poids, pied de pylônes, et tronçons supplémentaires.

Les réactions obtenues sont considérées comme étant les charges de calcul des fondations.

2.4.2 Résistance des fondations

Les fondations doivent avoir une résistance caractéristique R_c calculée selon l'équation suivante:

$$R_c = \frac{\text{charges de calcul sur fondations}}{\Phi_S \Phi_N \Phi_Q} \quad (8)$$

Thus, tower loads in general become:

$$\text{Tower loads} = \text{effect of } \begin{vmatrix} Q_{Tv} \\ Q_{Tw} \\ Q_{Tt} \end{vmatrix} + \text{loads on tower body.}$$

2.3.2 Strength of towers

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

$$R_c = \frac{\text{tower loads}}{\Phi_S \Phi_N \Phi_Q} \quad (7)$$

2.3.3 Tower tests

Towers subjected to type tests shall withstand loads equivalent to R_c . Tests shall meet IEC 652.

2.4 Design criteria for foundations

2.4.1 Foundation loads

The maximum reactions on foundations are obtained from the design of towers subjected to the loads defined in 2.3.1 using conventional methods and appropriate wind-weight span combinations, tower legs, and body extensions.

The reactions thus obtained are considered to be the design loads on foundations.

2.4.2 Strength of foundations

Foundations shall have a characteristic strength R_c calculated from the following equation:

$$R_c = \frac{\text{design loads foundations}}{\Phi_S \Phi_N \Phi_Q} \quad (8)$$

2.5 Critères de calcul des conducteurs et des câbles de garde

Les conducteurs et les câbles de garde sont calculés pour la charge résultante la plus critique (charge verticale avec ou sans charge transversale) par unité de longueur appliquée à la portée équivalente correspondante¹.

Φ_S est pris égal à 1,0 étant donné que la tension maximale généralement inférieure à la limite d'endommagement (voir tableau 19) rend les câbles plus fiables que les pylônes.

$$\Phi_Q = 1,0$$

2.6 Critères de calcul des isolateurs et des matériels d'équipement

Le calcul des isolateurs et des matériels d'équipement est basé sur les mêmes principes que les pylônes et les fondations avec les différences suivantes:

$\Phi_S = 0,90$ pour tous les matériels d'équipement (la dispersion de la résistance des matériels d'équipement ne dépasse pas généralement 7 %).

Φ_N pour les matériels d'équipement de suspension peut être obtenu à partir du tableau 8, N étant multiplié par le nombre d'éléments de matériels d'équipement de suspension par pylône. Pour les isolateurs, il peut être obtenu à partir du même tableau, N étant le nombre d'isolateurs par pylône.

$$\Phi_Q = 1,0$$

SECTION 3: CHARGES

3.1 Généralités

3.1.1 *Domaine d'application*

L'objet de cette section est de définir les charges appliquées aux composants des lignes de transport.

3.1.2 *Classification des charges*

Les lignes de transport aériennes sont soumises à différentes charges pendant leur durée de vie que l'on peut classer en trois catégories distinctes:

- a) charges climatiques se rapportant aux prescriptions de fiabilité;
- b) charges de limitation de défaillance se rapportant aux prescriptions de sécurité;
- c) charges de construction et d'entretien se rapportant aux prescriptions de sécurité du personnel.

¹ Etant donné que la variation de la portée est déjà comprise dans les calculs de portée équivalente γ_u est toujours égale à 1,0 pour toutes les charges se rapportant à la tension des conducteurs.

2.5 Design criteria for conductors and earth wires

Conductors and earth wires are designed for the most critical resultant load (vertical with or without transverse) per unit length applied to the corresponding ruling span¹.

Φ_S is taken equal to 1,0 because the maximum tension being usually lower than the damage limit (see table 19) leads to the fact that wires are more reliable than towers.

$$\Phi_Q = 1,0$$

2.6 Design criteria for insulators and hardware

Design of insulators and hardware follows the same principles outlined for towers and foundations except for the following differences:

$\Phi_S = 0,90$ for all hardware (dispersion of strength of hardware does not usually exceed 7 %).

Φ_N for suspension hardware can be obtained from table 8, with N being multiplied by the number of suspension hardware per tower, and for insulators, it can be obtained from the same table with N being multiplied by the number of insulators per tower.

$$\Phi_Q = 1,0$$

SECTION 3: LOADINGS

3.1 General

3.1.1 Scope

The object of this section is to define loadings applied to transmission line components.

3.1.2 Classification of loads

Overhead transmission lines are subjected to various loads during their lifetime which are classified into three distinct categories:

- a) climatic loads which are related to the reliability requirements;
- b) failure containment loads which are related to the security requirements;
- c) construction and maintenance loads which are related to safety requirements.

¹ Since span variation is already included in the ruling span calculations, the γ_u is always equal to 1,0 for all loads related to the conductors' tension.

Cette section détaille les prescriptions pour chaque catégorie de charges comme suit:

- 3.2: charges dues au vent
- 3.3: givre sans vent
- 3.4: givre avec vent
- 3.5: charges de construction et d'entretien
- 3.6: charges pour limitation de défaillance

3.2 Charges climatiques, vent

3.2.1 Objet

L'article 3.2 définit les procédures applicables à l'obtention et à l'interprétation des données météorologiques nécessaires à l'étude des lignes aériennes. Elles contiennent également une méthode utilisable pour évaluer la réponse des composants de la ligne (conducteurs, isolateurs, supports) aux effets du vent et des températures associées.

3.2.2 Conditions générales

Bien que la méthode présentée dans ce paragraphe soit, dans son principe, applicable à toute ligne aérienne, il est toutefois apparu préférable de limiter son application aux domaines suivants:

- Longueur des portées comprise entre 200 m et 800 m, le calcul des divers coefficients (de rafale en particulier) n'ayant pas été vérifié pour des longueurs de portées hors de cette fourchette. On pourra, toutefois, pour des portées supérieures à 800 m, prendre les facteurs de vent combiné correspondant à une longueur de portée de 800 m, ce qui va dans le sens de la sécurité.
- Hauteur des supports inférieure à 60 m. Des supports plus hauts pourraient être calculés selon les mêmes principes mais les valeurs des efforts dus au vent ainsi déterminées demanderaient à être vérifiées.
- 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.
- On peut procéder à un ajustement pour les lignes situées dans des zones montagneuses en raison des variations de rugosité en fonction de la végétation (grands arbres), des pentes recouvertes de neige ou d'une topographie accidentée. Les zones doivent être définies par les codes nationaux en vigueur.

3.2.3 Définitions

3.2.3.1 Rugosité du terrain

L'action du vent dépend de la rugosité du terrain. Plus cette rugosité est forte, plus le vent est freiné et turbulent. La rugosité du sol intervient dans la détermination, d'une part, de la vitesse du vent pour le calcul et, d'autre part, du facteur de rafale.

Quatre types de terrain, à rugosité croissante, sont considérés dans le tableau 10.

Requirements for each loading category are detailed in this section as follows:

- 3.2: wind loads
- 3.3: ice without wind
- 3.4: ice with wind
- 3.5: loads for construction and maintenance
- 3.6: loads for failure containment

3.2 Climatic loads, wind

3.2.1 *Object*

Clause 3.2 defines the procedures which can be applied for obtaining and interpreting meteorological data required for the design of overhead lines. It also contains a method which can be used to evaluate the response of the line components (conductors, insulators, supports) to the effect of wind and associated temperatures.

3.2.2 *General conditions*

Although this subclause applies in principle to any overhead line, it is better limited to the following conditions:

- Span lengths between 200 m and 800 m, as calculations of the various coefficients (in particular for gusty winds) have not been checked for span lengths beyond this range. However, for span lengths greater than 800 m, a gust coefficient corresponding to 800 m span could be chosen with safety.
- Height of supports less than 60 m. Higher supports could be designed following the same principles, but the calculated wind actions would need to be checked.
- Altitude of crossed areas not exceeding 1 300 m above the average level of the topographic environment, except where specific study results are available.
- An adjustment may be made for lines in mountain areas because the roughness can vary according to the vegetation (large trees), snow-covered slopes and rough topography. Such areas shall be defined by national codes of practices.

3.2.3 *Definitions*

3.2.3.1 *Ground roughness*

Wind action depends on the ground roughness. The greater this roughness, the more turbulent and slower is the wind. The ground roughness has an influence both on the determination of the wind velocity for the design and on the determination of the gust factor.

Four categories of ground, of increasing roughness, are considered as indicated in table 10.

Tableau 10 - Définitions de la rugosité du terrain¹

Rugosité	Caractéristiques du terrain traversé par une ligne
A	Grande étendue 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 terres cultivées avec peu d'arbres ou de bâtiments
C	Terrains comportant de nombreux petits obstacles de faible hauteur (haies, arbres et bâtiments)
D	Régions suburbaines ou terrains avec de nombreux grands arbres

3.2.3.2 Vitesse météorologique du vent V

On appelle vitesse météorologique du vent V , la vitesse définie de la façon suivante: moyenne de la vitesse du vent pendant une période de 10 min à un niveau de 10 m au-dessus du sol, en terrain relativement dégagé (rugosité B).

Une procédure est décrite dans l'annexe E pour calculer V lorsque la vitesse météorologique n'est pas mesurée dans les conditions ci-dessus.

3.2.3.3 Vitesse maximale du vent sur une année V_m

Cette vitesse V_m est le maximum de V sur une année.

3.2.4 Hypothèses de charges

Les hypothèses de charges comprennent essentiellement:

- l'hypothèse de grand vent;
- l'hypothèse de vent réduit associé à une température minimale.

L'hypothèse de température minimale n'est jamais critique pour les supports d'alignement, mais demande à être contrôlée pour les supports d'angle ou d'arrêt, en particulier lorsque les portées sont courtes.

¹ Les lignes installées en zones très urbanisées seront considérées en zone de rugosité D. La notion quantitative de la rugosité y est, en effet, très difficile d'approche.

Pour une ligne qui suit la crête d'une colline, on prendra une rugosité de terrain inférieure d'une catégorie à celle choisie pour la région. Pour une ligne qui suit une vallée, la rugosité C sera choisie, dans tous les cas, quelles que soient les caractéristiques du terrain.

Table 10 - Definition of ground roughness¹

Roughness	Characteristics of the ground crossed by a line
A	Large stretch of water up-wind, flat coastal area, flat deserts
B	Open country with very few obstacles, for instance, moorlands or cultivated fields with a few trees or buildings
C	Terrain with numerous small obstacles of low height (hedges, trees and buildings)
D	Suburban areas or terrains with many tall trees

3.2.3.2 Meteorological wind velocity V

V is the meteorological wind velocity, defined as follows: average velocity of the wind during a 10 min period at a level of 10 m above the ground, in relatively open country (roughness B).

A procedure is described in annex E to compute V whenever the meteorological velocity is not measured in the above-mentioned conditions.

3.2.3.3 Maximum yearly wind velocity V_m

This velocity V_m is the maximum of V measured over a year.

3.2.4 Loading assumptions

Loading assumptions mainly include:

- high wind assumption;
- reduced wind associated with minimum temperature.

Minimum temperature assumption is never crucial for tangent supports, but must be checked for angle or dead-end supports, particularly for short spans.

¹ Lines crossing highly urbanized areas should be considered in a D ground roughness. The value of the roughness coefficient is very difficult to assess for these areas.

For a line which follows the ridge of a hill, a ground roughness which is one category below the one chosen for the area should be chosen. For a line running along a valley, the C roughness category should be chosen for all cases, whatever the ground characteristics may be.

3.2.4.1 Hypothèse de grand vent

3.2.4.1.1 Détermination de la vitesse de grand vent V_M

Le choix de la vitesse de grand vent V_M dépend du niveau de fiabilité que l'on adoptera pour le calcul de la ligne (voir 2.1.2).

La vitesse de grand vent V_M est déterminée à partir de la vitesse moyenne $\bar{V}_m$ des vitesses maximales annuelles V_m et de l'écart type de la distribution statistique de ces vitesses maximales annuelles σ_{V_m} conformément au tableau 11.

Tableau 11 - Valeurs de vitesse de grand vent¹

Niveau de fiabilité	$V_M / \bar{V}_m$		
	$\sigma_{V_m} = 0,12 \bar{V}_m$	$\sigma_{V_m} = 0,16 \bar{V}_m$	$\sigma_{V_m} = 0,20 \bar{V}_m$
1	1,30	1,41	1,52
2	1,41	1,55	1,70
3	1,51	1,70	1,87

3.2.4.1.2 Vitesse de référence du vent V_R pour le calcul

La vitesse de référence du vent V_R pour le calcul est la vitesse du vent à l'emplacement de la ligne. V_R se déduit de la vitesse de grand vent V_M par la relation:

$$V_R = K_R V_M$$

3.2.4.1.3 Coefficient de rugosité du terrain K_R

K_R est un coefficient qui tient compte de la rugosité du terrain à l'emplacement de la ligne et dans ses environs. K_R peut être choisi conformément à la valeur donnée au tableau 12 ci-après, en fonction de la rugosité du terrain traversé par la ligne.

1 a) la valeur de $\sigma_{V_m} = 0,12 \bar{V}_m$ a été trouvée dans plusieurs pays d'Europe.

b) Les valeurs du tableau correspondent à des cas où le nombre d'années d'observation est très grand. Dans les autres cas, se reporter à l'annexe C pour le calcul de $V_M / \bar{V}_m$.

c) En général, les vitesses de vent doivent être relevées dans des stations météorologiques situées à proximité du tracé de la ligne. Quand les stations météorologiques sont éloignées des sites envisagés pour la construction de la ligne, la vitesse de gradient du vent peut être utilisée en tenant compte des configurations de terrain concernées (voir annexe F).

d) Dans le cas de zones soumises à des vents très violents mais peu fréquents (typhons par exemple), une étude spéciale est nécessaire pour déterminer la loi de distribution des valeurs maximales, qui ne peuvent se déduire des seules valeurs maximales annuelles des vitesses.

3.2.4.1 High wind

3.2.4.1.1 Determination of the high wind velocity V_M

The choice of the high wind velocity V_M depends upon the reliability level for which the line will be designed (see 2.1.2).

The high wind velocity V_M is determined from the average velocity $\bar{V}_m$ of the maximum yearly velocities V_m and the standard deviation σ_{V_m} of the statistical distribution of these velocities, according to table 11.

Table 11 - Values of high wind velocity¹

Reliability level	$V_M / \bar{V}_m$		
	$\sigma_{V_m} = 0,12 \bar{V}_m$	$\sigma_{V_m} = 0,16 \bar{V}_m$	$\sigma_{V_m} = 0,20 \bar{V}_m$
1	1,30	1,41	1,52
2	1,41	1,55	1,70
3	1,51	1,70	1,87

3.2.4.1.2 Reference wind velocity V_R for the design

The reference wind velocity V_R for the design is the wind velocity on the site of the line. V_R is obtained from the high wind velocity V_M by the relationship:

$$V_R = K_R V_M$$

3.2.4.1.3 Ground roughness coefficient K_R

K_R is a coefficient which takes into account the roughness of the ground at the location of the line and in the surrounding area. K_R can be chosen in accordance with the value given in table 12, according to the roughness of the ground crossed by the line.

1 a) In Europe, a value of $\sigma_{V_m} = 0,12 \bar{V}_m$ was found in several countries.

b) The values in the table are given for cases where the number of years of observations is very large. In other cases, refer to annex C for deriving the ratio of $V_m / \bar{V}_m$.

c) Generally, wind velocities shall be measured at meteorological stations located not far from the route of the line. When meteorological stations are far from the expected locations for the erection of the line, the gradient wind speed can be used, allowing for intervening land forms (see annex F).

d) For areas subject to very high velocity but infrequent winds (such as typhoons), 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.

Pour des sites de rugosité intermédiaire, la valeur de K_R peut être interpolée. En évaluant la valeur de la rugosité du sol, il faut tenir compte de changements prévisibles dans les environs du tracé de la ligne.

Tableau 12 - Valeurs de K_R pour différentes rugosité de terrain¹

Rugosité	A	B	C	D
K_R	1,08	1,00	0,85	0,67

3.2.4.1.4 Température coïncidente

Les vitesses de vent définies ci-dessus pour le calcul, se produisent à une température de l'air égale à la moyenne des températures quotidiennes minimales, propres au site. La moyenne de la température minimale quotidienne peut être obtenue par analyse des enregistrements pendant un certain nombre d'années dans une station météorologique la plus proche possible de l'emplacement de la ligne. Comme alternative, on pourra prendre pour température coïncidente de l'air la température minimale définie ci-après (voir 3.2.4.2) majorée de 15 °C.

3.2.4.2 Hypothèse de vent réduit (avec température minimale)

3.2.4.2.1 Température minimale

Il est recommandé de prendre la température minimale égale à la température minimale annuelle de l'air, ayant une probabilité d'apparition de 2 % ou une période de retour de 50 ans.

Une méthode pour la détermination de cette valeur est donnée dans l'annexe G. Quand la ligne se trouve à un emplacement où la température minimale de l'air peut être influencée par la topographie locale, on devra en tenir compte.

3.2.4.2.2 Vitesse de vent réduite

On choisira une vitesse de vent réduite, égale à la vitesse de référence du vent V_R de l'hypothèse de grand vent (voir 3.2.4.1.2) multipliée par un coefficient tenant compte des conditions météorologiques locales.

En l'absence d'une bonne connaissance des conditions locales, la valeur de 0,6 pour ce coefficient peut être choisie.

¹ Les valeurs de K_R correspondent à une vitesse du vent (voir 3.2.3.2) calculée sur 10 min.

For sites of intermediate roughness, K_R can be interpolated. In estimating the value of the ground roughness, it is necessary to consider the foreseeable changes in the surroundings of the route of the line.

Table 12 - Values of K_R for different ground roughness¹

Ground roughness	A	B	C	D
K_R	1,08	1,00	0,85	0,67

3.2.4.1.4 Coincident temperature

The wind velocities defined above for computation shall be considered as occurring at an air temperature equal to the average of the minimum daily temperatures, peculiar to this site. The average minimum daily 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 would be possible to take as a coincident air temperature the minimum temperature defined hereinafter (see 3.2.4.2) increased by 15 °C.

3.2.4.2 Reduced wind (with minimum temperature)

3.2.4.2.1 Minimum temperature

The minimum temperature should be considered as being equal to the minimum yearly 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 annex G. 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.

3.2.4.2.2 Reduced wind velocity

The reduced wind velocity will be equal to the reference wind velocity V_R chosen for the high wind assumption (see 3.2.4.1.2) 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.

¹ The values of K_R correspond to an average 10 min wind velocity V (see 3.2.3.2).

3.2.5 Action unitaire du vent sur un élément quelconque de la ligne

La valeur caractéristique a de l'action unitaire due à un vent soufflant horizontalement, perpendiculairement à un élément quelconque de la ligne (conducteurs, isolateurs, tout ou partie du support) est donnée par l'expression:

$$a = q_0 C_x G \quad (9)$$

où:

q_0 = pression dynamique de référence.

La pression dynamique de référence q_0 est donnée en fonction de la vitesse de référence du vent V_R à l'emplacement de la ligne (voir 3.2.4.1.2):

$$q_0 = \frac{1}{2} \mu V_R^2 \quad (10)$$

où:

μ = masse volumique de l'air (égale à 1,225 kg/m³ à la température de 15 °C et sous la pression atmosphérique normale de 1 013 mbar)

C_x = coefficient de traînée (ou de pression) dépendant de la forme de l'élément considéré

G = facteur de vent combiné tenant compte de la turbulence du vent. Il est fonction de la réponse dynamique de l'élément considéré. Il dépend de la hauteur de cet élément au-dessus du sol et, dans le cas des conducteurs, de la longueur de la portée

q_0 est exprimé en newtons par mètre carré et V_R en mètres par seconde.

3.2.6 Charges dues au vent appliquées aux composants de la ligne

3.2.6.1 Vent sur les conducteurs

Les effets du vent sur les conducteurs consistent en efforts dus à la pression du vent ainsi qu'en efforts dus à l'augmentation de la tension mécanique.

3.2.6.1.1 Efforts de pression dus au vent

La charge (A_c) due à l'effet du vent sur une portée de longueur L , appliquée à chaque point d'accrochage de cette portée et perpendiculairement à celle-ci, est donnée par

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c d \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (11)$$

où:

q_0 = pression dynamique de référence (voir 3.2.5)

C_{xc} = coefficient de traînée¹ du conducteur pris égal à 1,00 pour les conducteurs toronnés et les vitesses de vent généralement considérées.

1 Les essais en soufflerie sont généralement réalisés dans des conditions d'écoulement laminaire. La valeur C_{xc} indiquée correspond à un tel écoulement. Or, par définition, le vent doit être considéré comme un écoulement turbulent. Les valeurs des coefficients de traînée obtenues en soufflerie à débit turbulent simulé seraient utiles.

3.2.5 Unit-action of the wind on any element of the line

The characteristic value a of the unit-action, due to the wind blowing horizontally, perpendicularly to any element of the line (conductors, insulators, all or part of the support) is given by the following expression:

$$a = q_0 C_x G \quad (9)$$

where:

q_0 = dynamic reference pressure.

The dynamic reference pressure q_0 is given in terms of the reference wind velocity V_R at the location of the line (see 3.2.4.1.2):

$$q_0 = \frac{1}{2} \mu V_R^2 \quad (10)$$

where:

μ = 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)

C_x = drag (or pressure) coefficient depending on the shape of the element being considered

G = 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

q_0 is expressed in newtons per square metre and V_R in metres per second.

3.2.6 Wind loads on line components

3.2.6.1 Wind on conductors

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

3.2.6.1.1 Wind pressure loads

The 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 the following expression:

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c d \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (11)$$

where:

q_0 = dynamic reference pressure (see 3.2.5)

C_{xc} = drag coefficient¹ of the conductor taken equal to 1,00 for the generally considered stranded conductors and wind velocities

1 Wind-tunnel tests are usually carried out under conditions of laminar flow. The indicated value of C_{xc} corresponds to such a flow. However, by definition, the wind must be considered as a turbulent flow. Values of drag coefficient recorded in a wind-tunnel having a simulated turbulent flow would be useful.

G_c = facteur de vent combiné qui tient compte de la turbulence du vent et de la réponse dynamique du conducteur.

Ce facteur (figures 3 à 6) est fonction de:

- la demi-somme des longueurs L_m des deux portées adjacentes au support considéré, projetées selon la direction du vent (figure 7);
- la rugosité du terrain;
- la hauteur moyenne Z_c du conducteur au-dessus du sol;

d = diamètre du conducteur;

L = longueur de la portée considérée;

Ω = angle que fait la direction du vent avec la direction de la ligne. Cet angle est celui qui produit la charge la plus critique sur le composant¹.

L'effet total du vent sur les conducteurs en faisceaux sera pris 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.

3.2.6.1.2 Effets dus au vent sur la tension des conducteurs

La tension mécanique² des conducteurs sera la plus critique, soit à la température coïncidente et à la vitesse du vent V_R dans le cas de l'hypothèse de grand vent (voir 3.2.4.1.2) soit à la température minimale et à la vitesse de vent coïncidente dans le cas de l'hypothèse de basse température (voir 3.2.4.2).

1 La vitesse du vent peut être plus faible mais avec un angle d'incidence différent susceptible de produire des efforts plus importants sur les conducteurs. On veillera, par conséquent, à choisir la combinaison de vitesse de vent et angle d'incidence la plus critique.

2 La composante transversale et longitudinale due à l'angle de la ligne sera calculée pour une tension mécanique correspondant à celle d'une portée de longueur égale à celle de la portée équivalente du canton, sur laquelle souffle un vent d'effort unitaire égal à 60 % de la valeur de l'effort unitaire défini au paragraphe 3.2.5 dans le cas de l'hypothèse de grand vent et égal à la valeur définie en 3.2.5 multipliée par le carré du coefficient défini en 3.2.4.2.2 dans le cas de l'hypothèse de basse température.

La réduction de l'effort du vent dans le cas de l'hypothèse de grand vent tient compte du fait que la longueur du canton comprend en général plusieurs portées adjacentes au support considéré. Cette réduction pourra ne pas être prise en compte si le canton de ligne ne comporte qu'un petit nombre de portées.

Les charges longitudinales qui peuvent être créées par des portées adjacentes de longueurs différentes peuvent être négligées dans la plupart des cas, la tenue des supports aux efforts longitudinaux étant vérifiée par des charges spéciales (voir 3.5 et 3.6).

G_c = combined wind factor which takes into account the turbulence of the wind and the dynamic response of the conductor.

This factor (figures 3 to 6) is a function of:

- half the sum of the lengths L_m of the two adjacent spans on the considered support, projected according to the direction of wind (figure 7);
- the roughness of the ground;
- the average height Z_c of the conductor above the ground;
- d = diameter of the conductor;
- L = length of the considered span;
- Ω = angle of incidence of the direction of the wind in terms of the direction of the line. This angle is the one which produces the most critical load on the component¹.

The total effect of the wind upon bundle conductors will 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.

3.2.6.1.2 Wind effect on conductor tension

The mechanical tension² of the conductor shall be the most critical of either the one at the corresponding coincident temperature with a wind of velocity V_R for the high wind assumption (see 3.2.4.1.2) or at the minimum temperature with a wind of coincident velocity for the low temperature assumption (see 3.2.4.2).

1 There may be a lower wind speed but with a different angle of incidence which may produce higher forces on conductors. Therefore, care should be taken in order to choose the most critical combination of wind speed and angle of incidence.

2 The longitudinal and transverse component due to the angle of the line will be computed for a mechanical tension corresponding to the tension of a span length equal to the equivalent span length of the section, on which blows a wind having a unit-action on the conductors equal to 60 % of the unit-action given in 3.2.5 for the high wind assumption, and equal to the value given in 3.2.5 multiplied by the square of the coefficient defined in 3.2.4.2.2 for the low temperature assumption.

The reduction of the wind action for the high wind assumption takes into account the fact that the length of the section of the line generally includes several spans adjacent to the considered towers. This reduction could not be taken into account if the section of the line consists of a small number of spans.

Longitudinal loads which might be caused by adjacent spans of unequal lengths can be neglected in most cases, as the strength of the supports for longitudinal loads is checked by special loadings (see 3.5 and 3.6).

3.2.6.2 Efforts dus au vent sur les isolateurs

Les efforts dus au vent sur les ensembles d'isolateurs résultent de la charge A_i transférée par les conducteurs et de la pression du vent agissant directement sur les isolateurs. Cette dernière charge est considérée comme s'appliquant de manière conventionnelle au point d'accrochage sur le pylône dans la direction du vent et on obtient son intensité par la formule:

$$A_i = q_0 C_{xi} G_i S_i \quad (12)$$

où:

q_0 = pression dynamique de référence

C_{xi} = coefficient de traînée des isolateurs, pris égal à 1,2

G_i = facteur de vent combiné propre à la rugosité du terrain, fonction de la hauteur Z du centre de gravité de la chaîne d'isolateurs au-dessus du sol environnant (figure 8).

S_i = aire de la chaîne d'isolateurs projetée horizontalement sur un plan vertical parallèle à l'axe de la chaîne

3.2.6.3 Efforts dus au vent sur les supports

Les efforts dus au vent sur les supports consistent en efforts transmis par les conducteurs et les isolateurs ainsi qu'en efforts agissant sur le support lui-même.

La méthode de calcul des efforts dus au vent sur les supports eux-mêmes n'est donnée que pour les types de supports les plus répandus, c'est-à-dire les supports en treillis ou comportant des éléments cylindriques, mais cette méthode peut s'appliquer à tout autre type de support.

3.2.6.3.1 Pylônes à section rectangulaire réalisés en treillis

Pour déterminer l'effort du vent sur le pylône lui-même, ce dernier est décomposé en différents tronçons de hauteur h .

Cette hauteur de tronçon h devra normalement être prise entre les intersections de membrures et des treillis.

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

$$A_t = q_0 (1 + 0,2 \sin^2 2\theta) (S_{T1} C_{XT1} \cos^2 \theta + S_{T2} C_{XT2} \sin^2 \theta) G_t \quad (13)$$

où:

q_0 = pression dynamique de référence

θ = angle d'incidence du vent dans le plan horizontal par rapport à la face 1 du tronçon de pylône (figure 9)

S_{T1} = surface totale projetée normalement à la face 1 des barres de la face 1 du tronçon de hauteur h (figure 9)

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

S_{T2} = surface totale projetée normalement à la face 2 des barres de la face 2 du même tronçon

3.2.6.2 Wind loads on insulators

Wind loads acting on insulator sets come from the load A_c transferred by the conductors and from the wind pressure acting directly on the insulators. The latter load is acting applied conventionally at the attachment point to the tower in the direction of the wind and its intensity is given by:

$$A_i = q_0 C_{xi} G_i S_i \quad (12)$$

where:

q_0 = dynamic reference pressure

C_{xi} = drag coefficient of the insulators, taken as 1,2

G_i = combined wind factor, peculiar to the roughness of the ground, and variable with the height Z of the centre of gravity of the insulator string (figure 8) above the surrounding land

S_i = area of the insulator string projected horizontally on a vertical plane parallel to the axis of the string.

3.2.6.3 Wind loads on supports

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

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

3.2.6.3.1 Lattice towers of rectangular cross-section

In order to determine the effect of the wind on the tower itself, the latter is divided into different panels, each having a height h .

This panel height h should normally be taken between the intersections of the legs and bracings.

For a lattice tower of rectangular cross-section, the wind loading A_t , in the direction of the latter, on a panel height h , applied at the centre of gravity of this panel, made up of various bars, is equal to:

$$A_t = q_0 (1 + 0,2 \sin^2 2\theta) (S_{T1} C_{xT1} \cos^2 \theta + S_{T2} C_{xT2} \sin^2 \theta) G_t \quad (13)$$

where:

q_0 = dynamic reference pressure

θ = angle of incidence of the wind with face 1 of the tower panel in a horizontal plane (figure 9)

S_{T1} = total surface area projected normally on face 1 of the members of face 1 of the panel of height h (figure 9)

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

S_{T2} = total surface area projected normally on face 2 of the bars of face 2 of the same panel

C_{xT1} , C_{xT2} = coefficients de traînée propres aux faces 1 et 2 pour un vent perpendiculaire à chaque face. C_{xT1} , C_{xT2} sont donnés sur la figure 10, pour des tronçons de pylône où tout ou partie des barres présentent des surfaces planes, et sur la figure 11, quand toutes les barres sont de section circulaire.

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 figure circonscrite de la face du tronçon considéré (figure 9)

G_t = facteur de vent combiné (figure 8), fonction de la hauteur Z du centre de gravité du tronçon au-dessus du sol.

3.2.6.3.2 Pylônes constitués de tronçons comportant des éléments cylindriques de grand diamètre ($d_t > 20$ cm)

Pour les pylônes constitués principalement d'éléments cylindriques de grand diamètre ($d_t > 20$ cm), l'effort dû au vent dans la direction de celui-ci, sur chaque élément de longueur l , appliqué au centre de gravité de l'élément, est égal à:

$$A_{tc} = q_0 C_{xTc} G_t d_t l \sin^3 \theta' \quad (14)$$

où:

q_0 = pression dynamique de référence

θ' = angle formé par la direction du vent et l'axe du cylindre

d_t = diamètre des éléments cylindriques du pylône

l = longueur de l'élément

G_t = facteur de vent combiné (figure 8), fonction de la hauteur Z du centre de gravité de l'élément au-dessus du sol

C_{xTc} = coefficient de traînée, pour un vent perpendiculaire à l'axe du cylindre. La valeur de C_{xTc} dépend du nombre de Reynolds R_e , de la turbulence du vent et de la rugosité du cylindre. Pour simplifier, on considérera uniquement le cas le plus défavorable d'un cylindre rugueux. La valeur de C_{xTc} est donnée sur la figure 12, en fonction de R_e qui est égal à:

$$R_e = \frac{d_t \sqrt{\frac{2q_0 G_t}{\mu}}}{\nu} \quad (15)$$

où:

μ = masse volumique de l'air

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

C_{xT1}, C_{xT2} = drag coefficients peculiar to faces 1 and 2 for a wind perpendicular to each face. C_{xT1}, C_{xT2} are given in figure 10 for panels of the tower when all or some of the members exposed have plane surfaces, and in figure 11 where all bars have a circular section.

The solidity ratio c of one face is the ratio between the total surface of the bars (S_{T1} or S_{T2}), defined just above, and the circumscribed figure of the face of the considered panel (figure 9)

G_t = combined wind factor (figure 8), a function of the height Z of the centre of gravity of the section above the ground.

3.2.6.3.2 Towers made of sections containing cylindrical elements having a large diameter ($d_t > 20$ cm)

For towers mainly made of cylindrical elements having a large diameter ($d_t > 20$ cm) the effect of the wind in the direction of the latter, on each element of lengths l applied at the centre of gravity of the element, is equal to:

$$A_{tc} = q_0 C_{xTc} G_t d_t l \sin^3 \theta' \quad (14)$$

where:

q_0 = dynamic reference pressure

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

d_t = diameter of the cylinder

l = length of the element

G_t = combined wind factor (figure 8), a function of the height Z of the centre of gravity of the element above the ground

C_{xTc} = drag coefficient for a wind perpendicular to the axis of the cylinder. The value of C_{xTc} depends on the Reynolds' number R_e , the turbulence of the wind and the roughness of the cylinder. In order to simplify, we shall merely consider the most unfavourable case of a rough cylinder. The value of C_{xTc} is given in figure 12 in terms of R_e which is equal to:

$$R_e = \frac{d_t \sqrt{\frac{2q_0 G_t}{\mu}}}{\nu} \quad (15)$$

where:

μ = air mass per unit volume

ν = kinematic air viscosity ($\nu = 1,45 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ at 15°C)

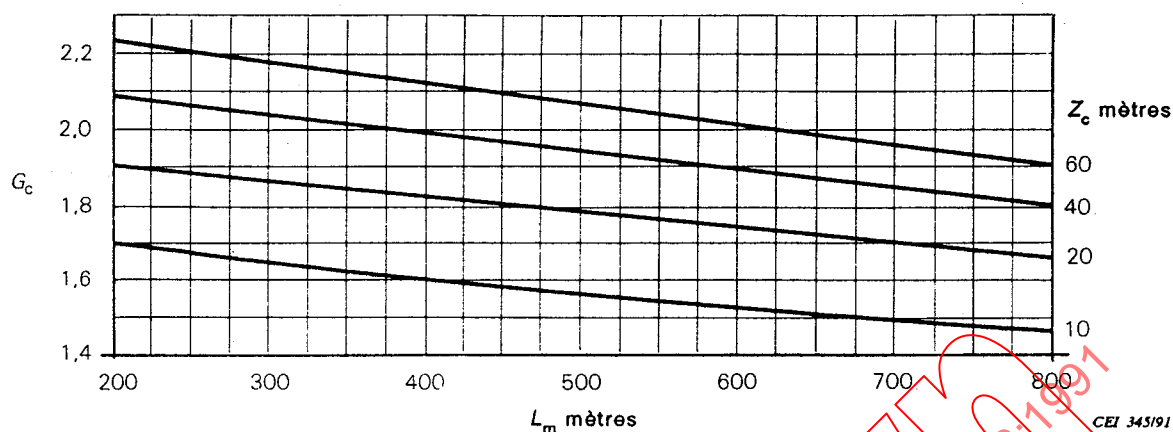


Figure 3 - Rugosité du terrain A

Facteur de vent combiné¹ du conducteur G_c en fonction de la hauteur moyenne du conducteur (Z_c) et de la portée moyenne (L_m).

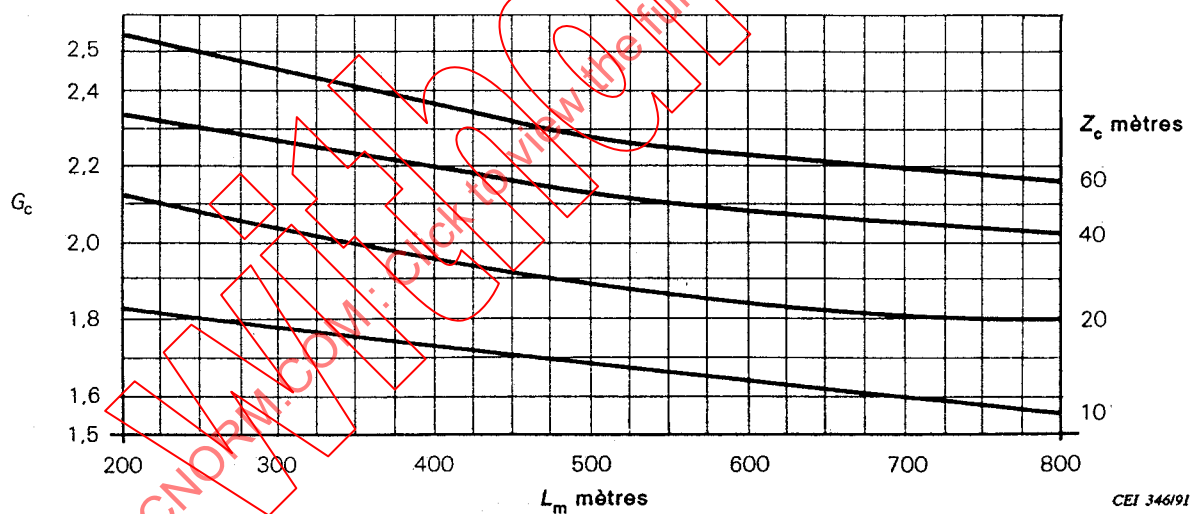


Figure 4 - Rugosité du terrain B

Facteur de vent combiné¹ du conducteur G_c en fonction de la hauteur moyenne du conducteur (Z_c) et de la portée moyenne (L_m).

¹ Ce facteur inclut l'effet combiné de la variation de la vitesse de vent avec la hauteur, la réponse dynamique et l'effet de la portée.

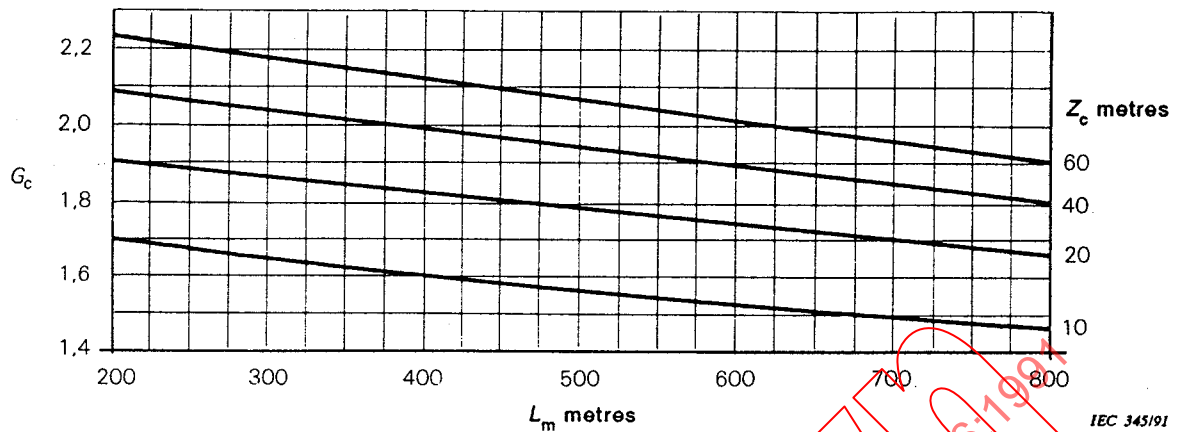


Figure 3 - Ground roughness A

Conductor combined main factors¹ G_c related to average height of conductor (Z_c) and mean span (L_m).

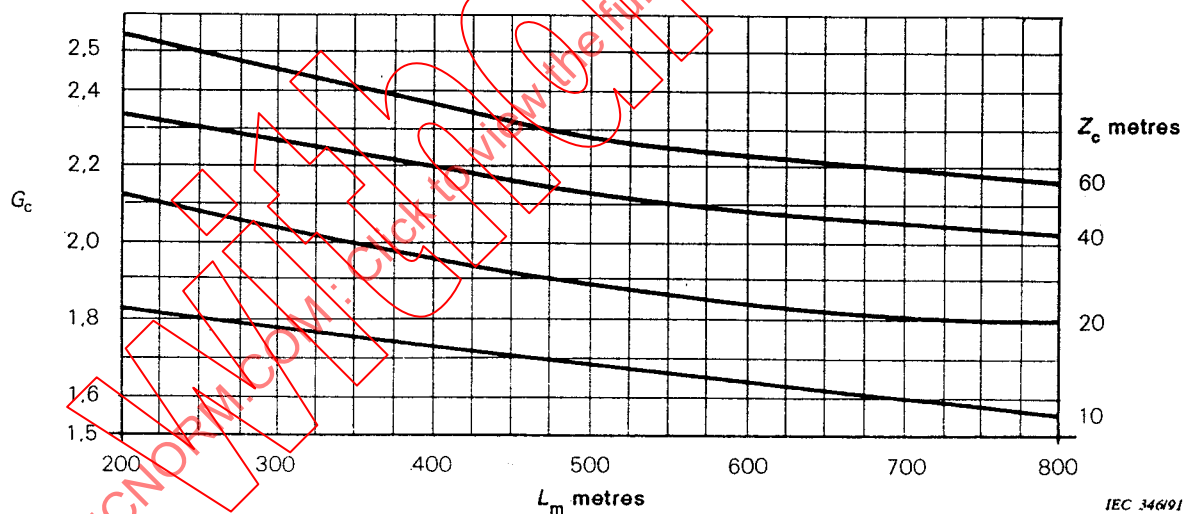


Figure 4 - Ground roughness B

Conductor combined wind factors¹ G_c related to average height of conductor (Z_c) and mean span (L_m).

¹ This factor includes the combined effect of wind speed variation with height, gust response factor and span effect on the wind front.

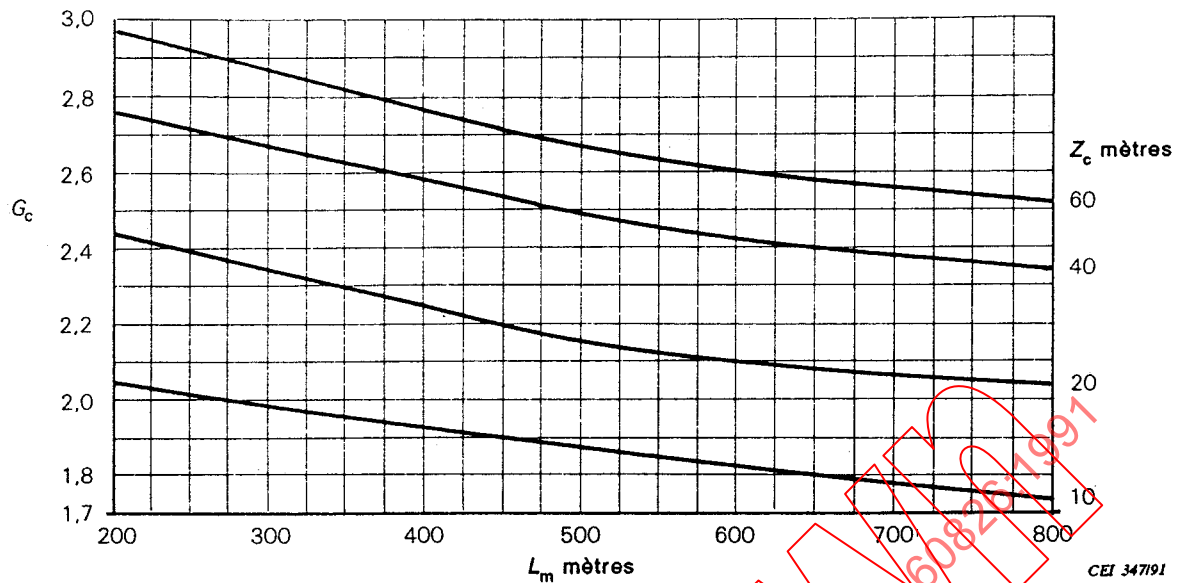


Figure 5 - Rugosité du terrain C

Facteur de vent combiné¹ du conducteur G_c en fonction de la hauteur moyenne du conducteur (Z_c) et de la portée moyenne (L_m).

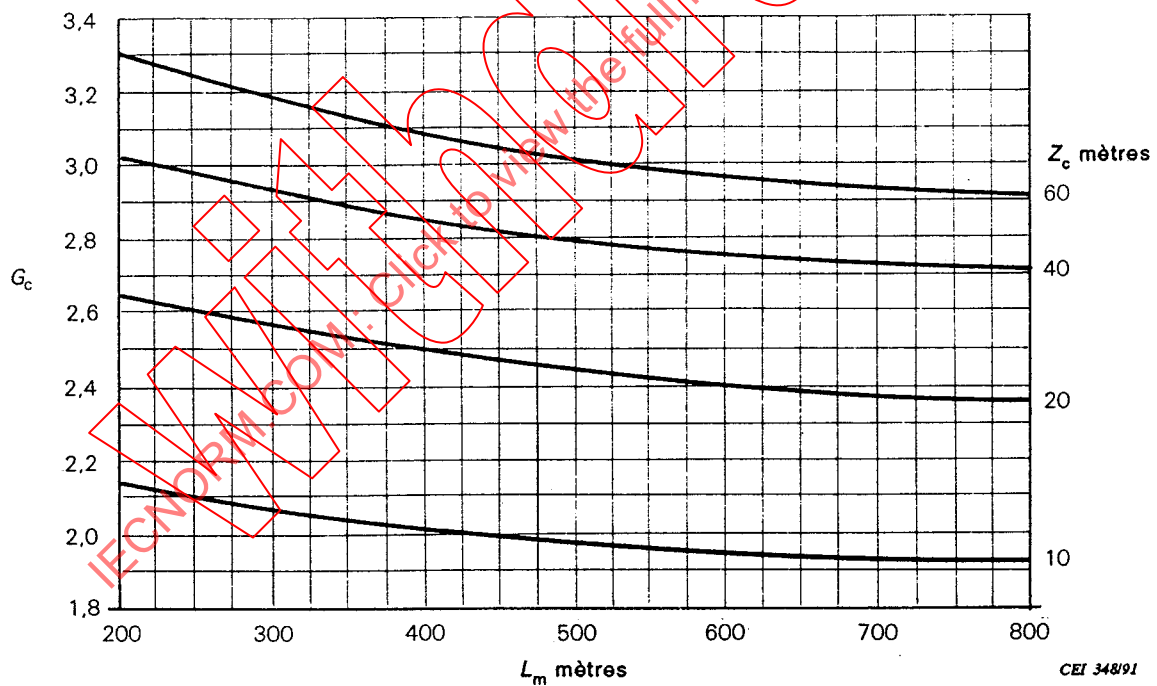


Figure 6 - Rugosité du terrain D

Facteur de vent combiné¹ du conducteur G_c en fonction de la hauteur moyenne du conducteur (Z_c) et de la portée moyenne (L_m).

¹ Ce facteur inclut l'effet combiné de la variation de la vitesse de vent avec la hauteur, la réponse dynamique et l'effet de la portée.

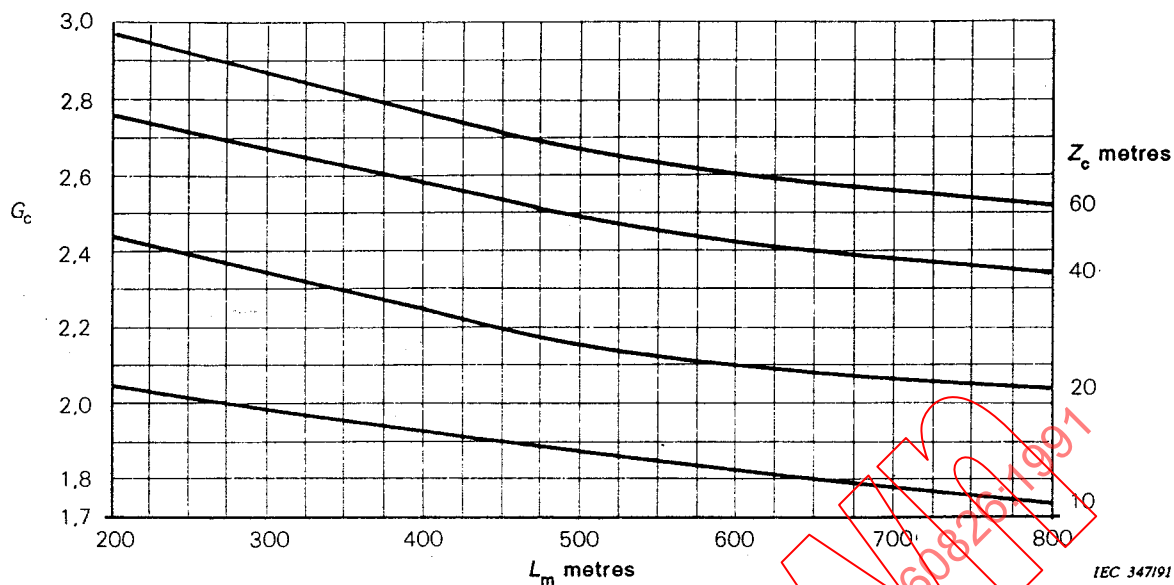


Figure 5 - Ground roughness C

Conductor combined wind factors¹ G_c related to average height of conductor (Z_c) and mean span (L_m).

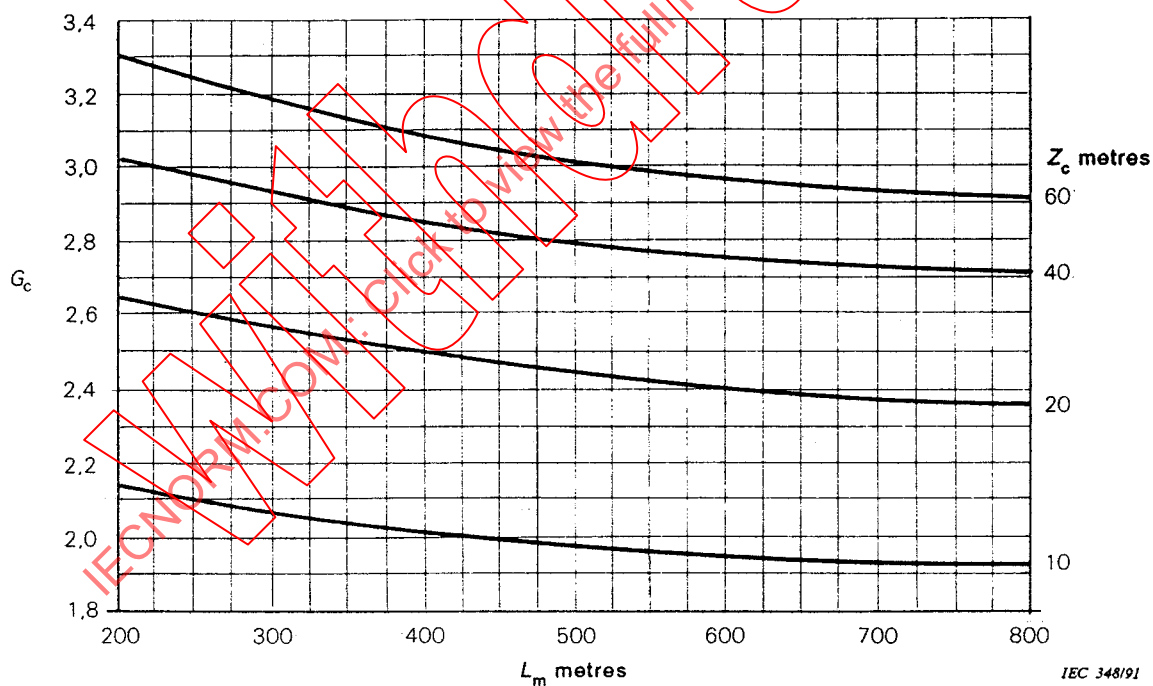


Figure 6 - Ground roughness D

Conductor combined wind factors¹ G_c related to average height of conductor (Z_c) and mean span (L_m).

¹ This factor includes the combined effect of wind speed variation with height, gust response factor and span effect on the wind front.

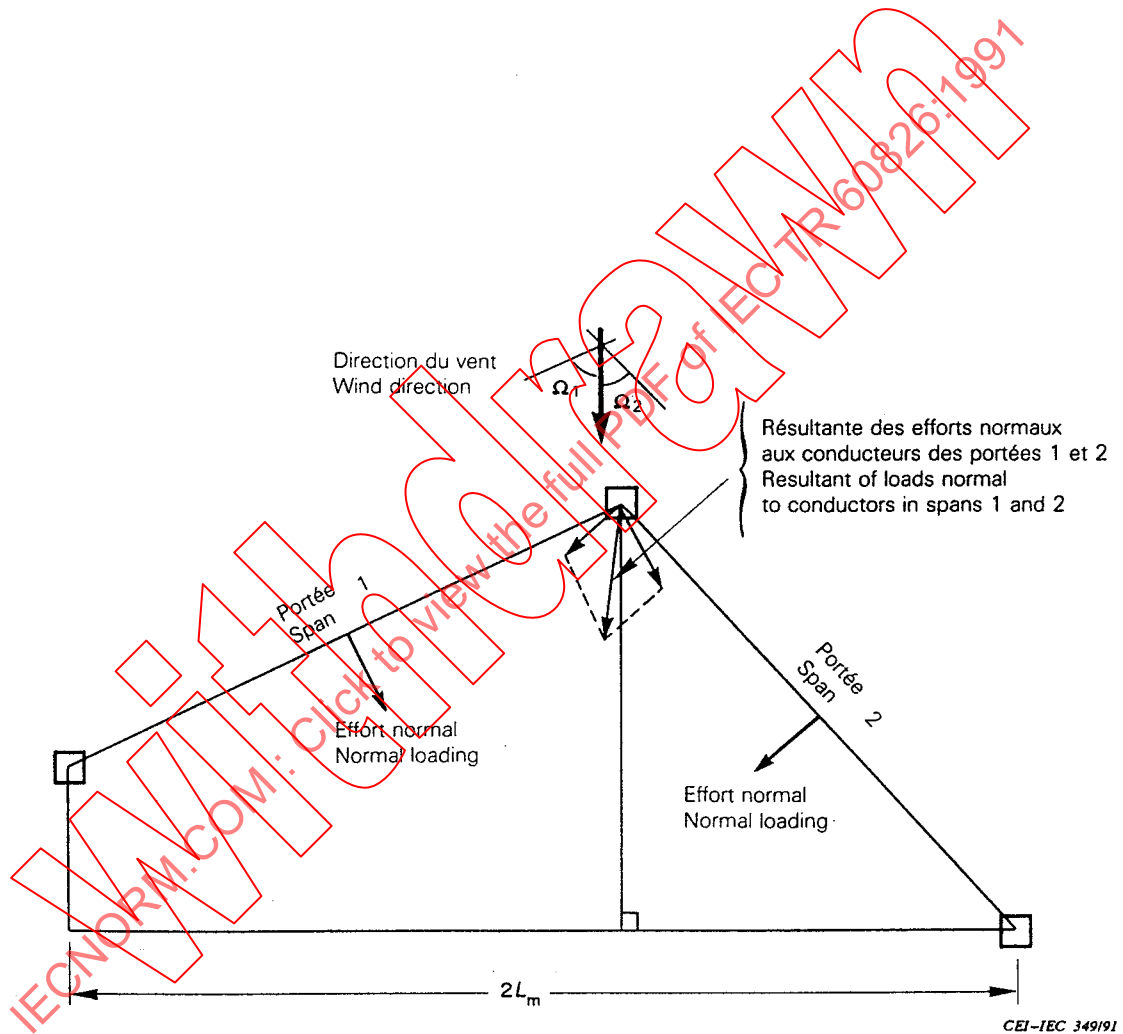


Figure 7 - Choix de la longueur apparente $2L_m$ des deux portées adjacentes au support considéré.

Determination of the apparent length $2L_m$ of the two adjacent spans on the considered support

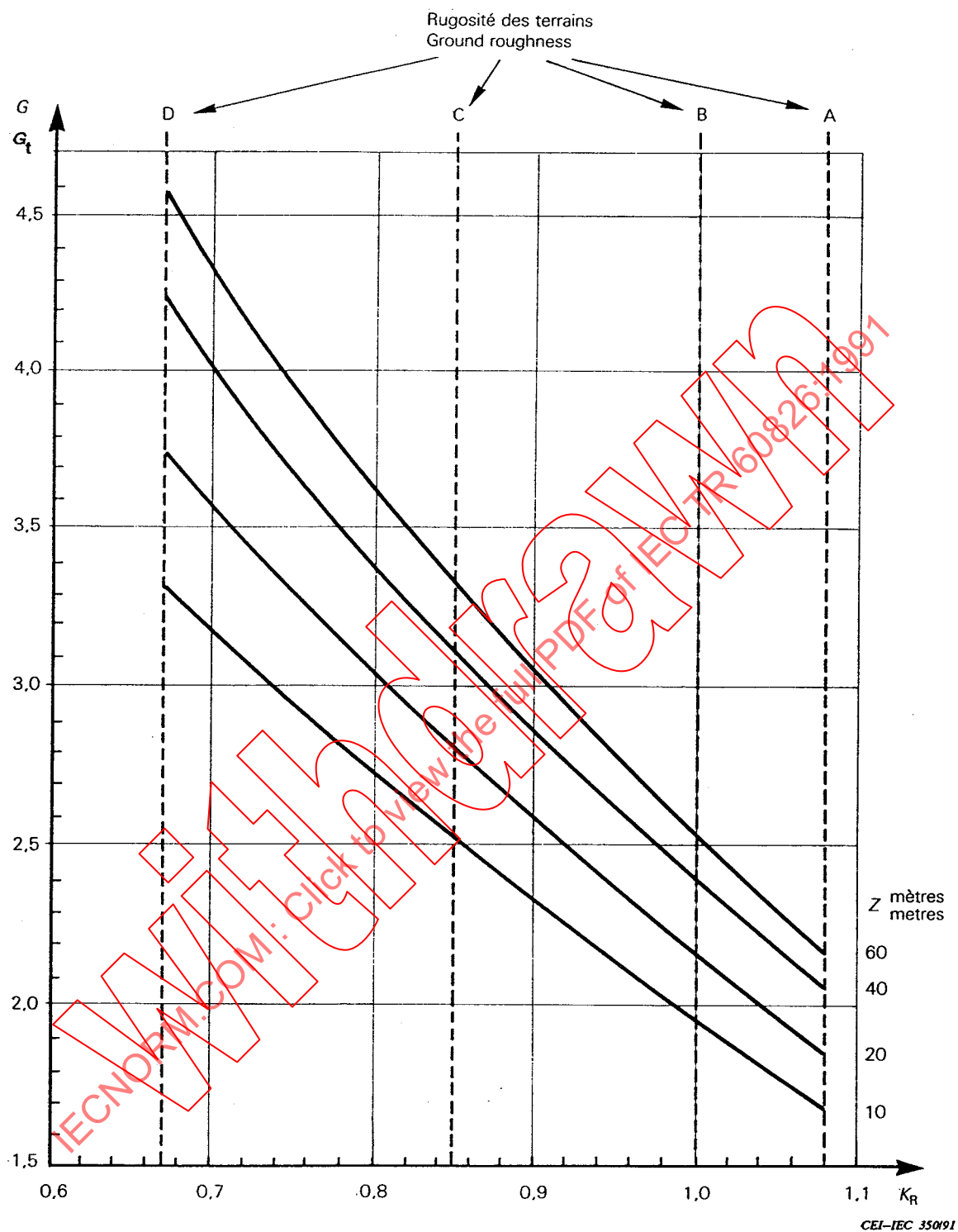


Figure 8 - Facteur de rafale des isolateurs et des pylônes: G_i , G_t

Gust factor of insulators and towers: G_i , G_t

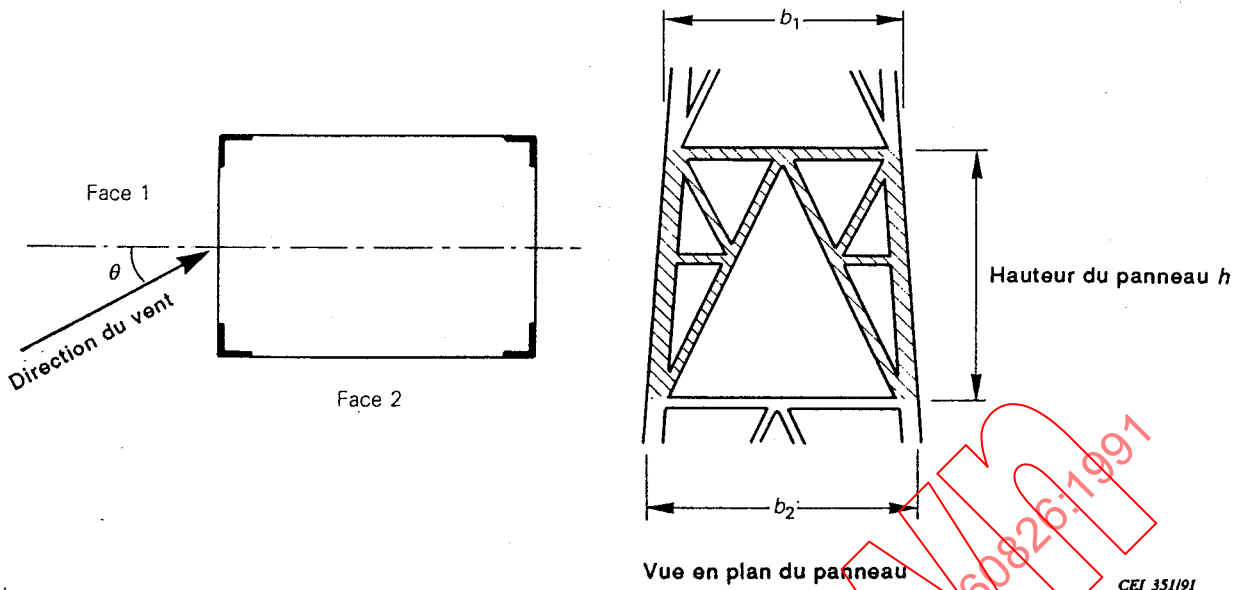


Figure 9 - Définition du rapport de compacité

S_T = aire totale des barres d'un panneau projeté dans son plan

χ = rapport de compacité

$$\chi = S_T \times \frac{2}{h(b_1 + b_2)}$$

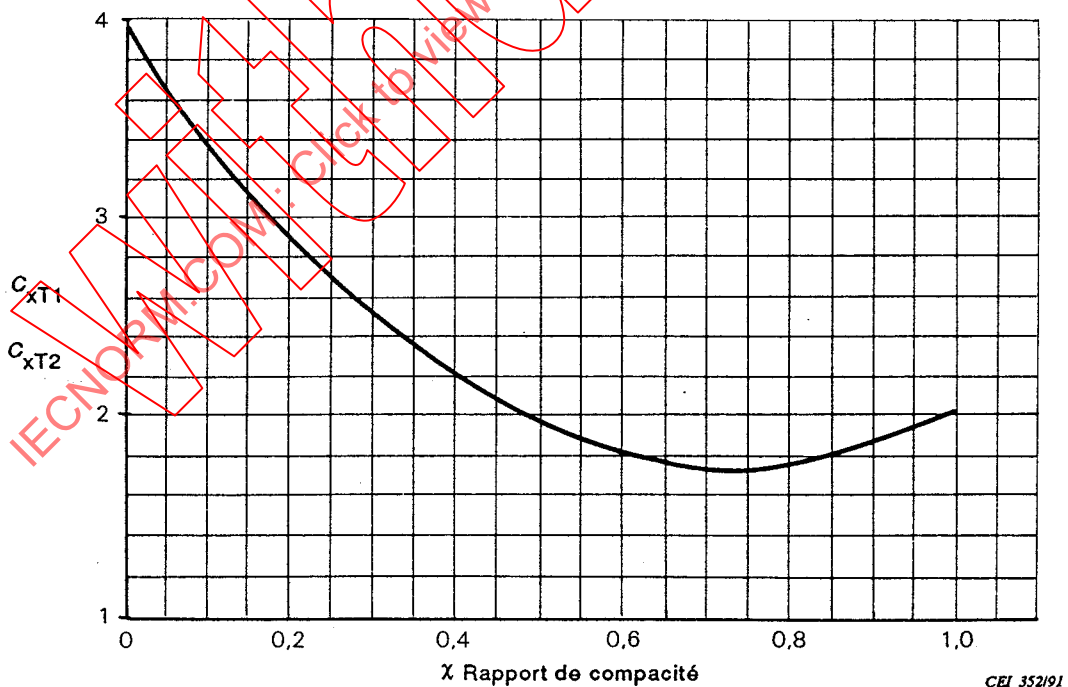
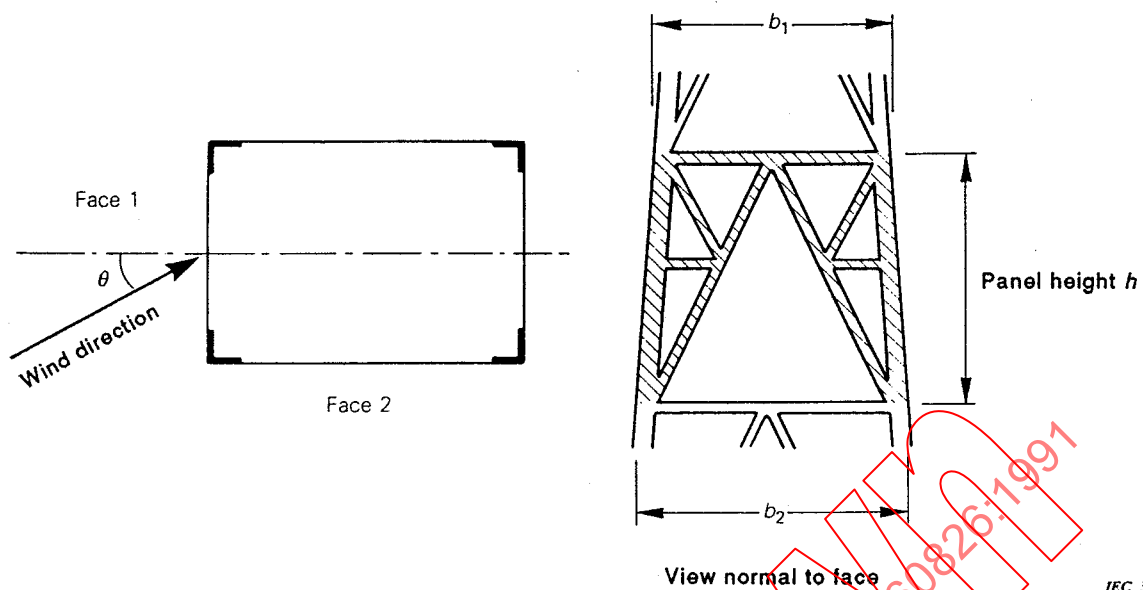


Figure 10 - Coefficients de traînée normale pour les pylônes à section rectangulaire composés de membrures à faces planes C_{xT}



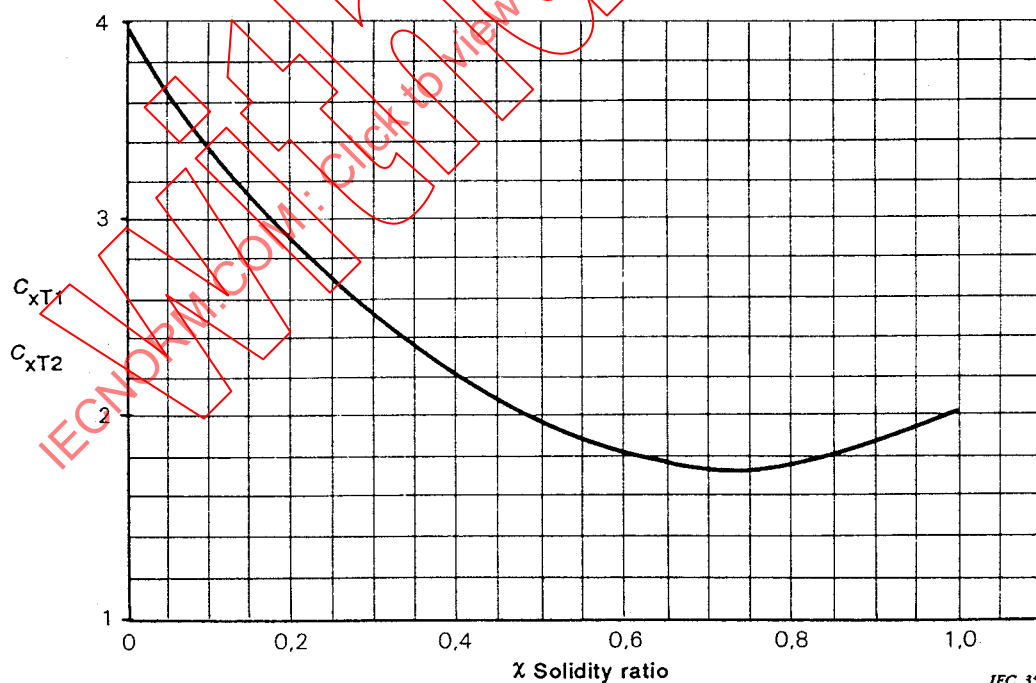
IEC 351191

Figure 9 - Definition of the solidity ratio

S_T = total area of structural components of a panel, projected normal to face

χ = solidity ratio

$$\chi = S_T \times \frac{2}{h(b_1 + b_2)}$$



IEC 352191

Figure 10 - Overall normal drag coefficients for rectangular towers composed of flat-sided members C_{xT}

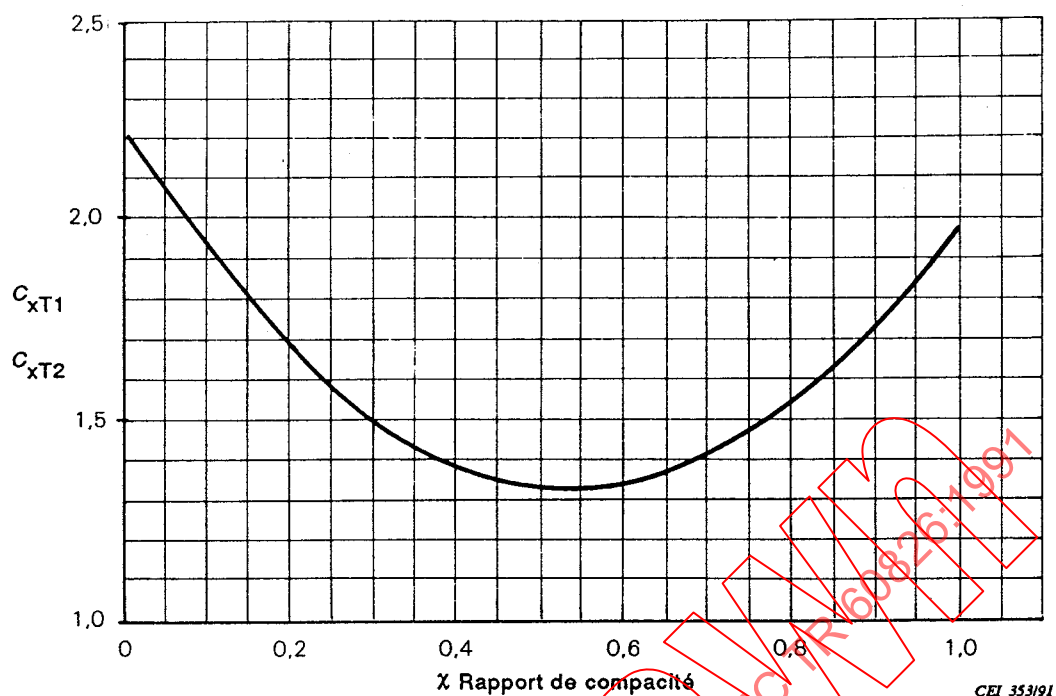


Figure 11 - Coefficients de traînée normale pour les pylônes à section rectangulaire composés de membrures à sections circulaires C_{xT}

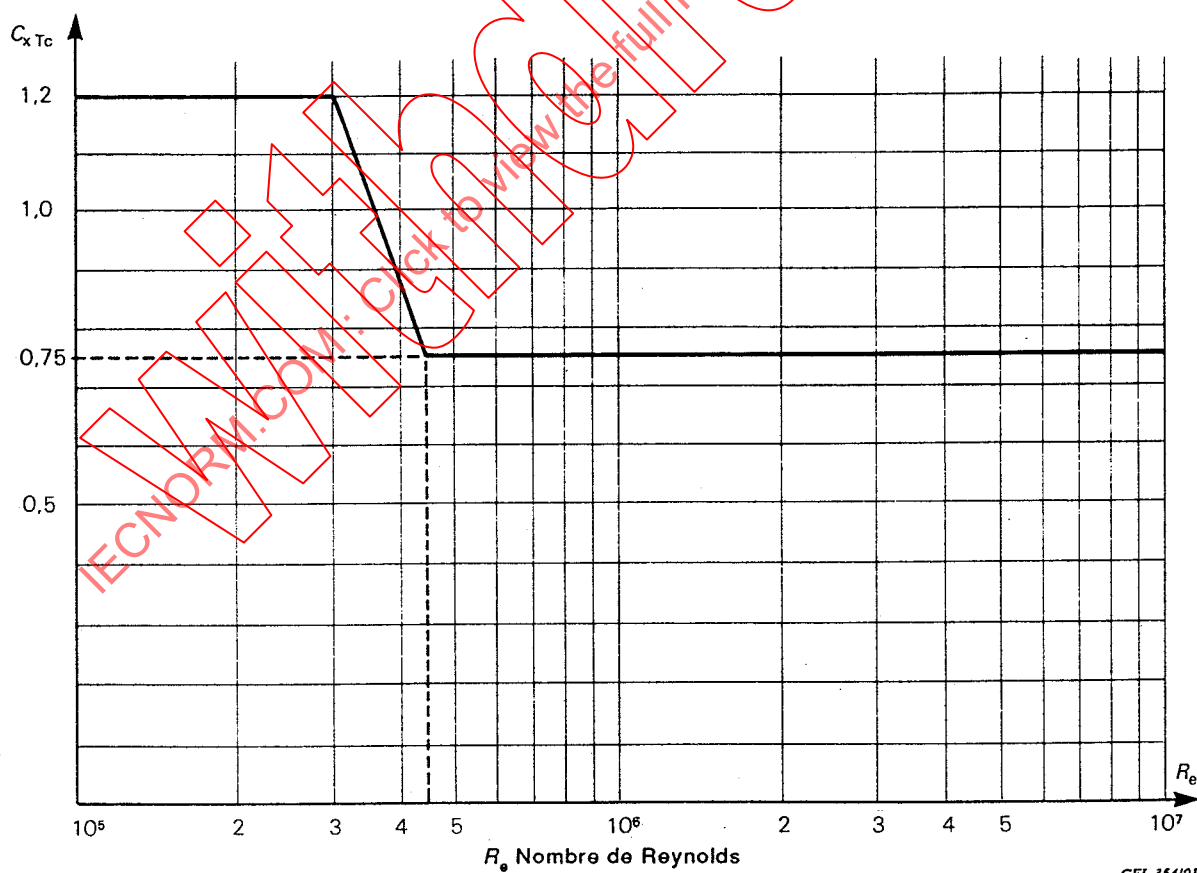


Figure 12 - Valeur de C_{xTc} coefficient de traînée des éléments cylindriques de grand diamètre, en fonction du nombre de Reynolds R_e

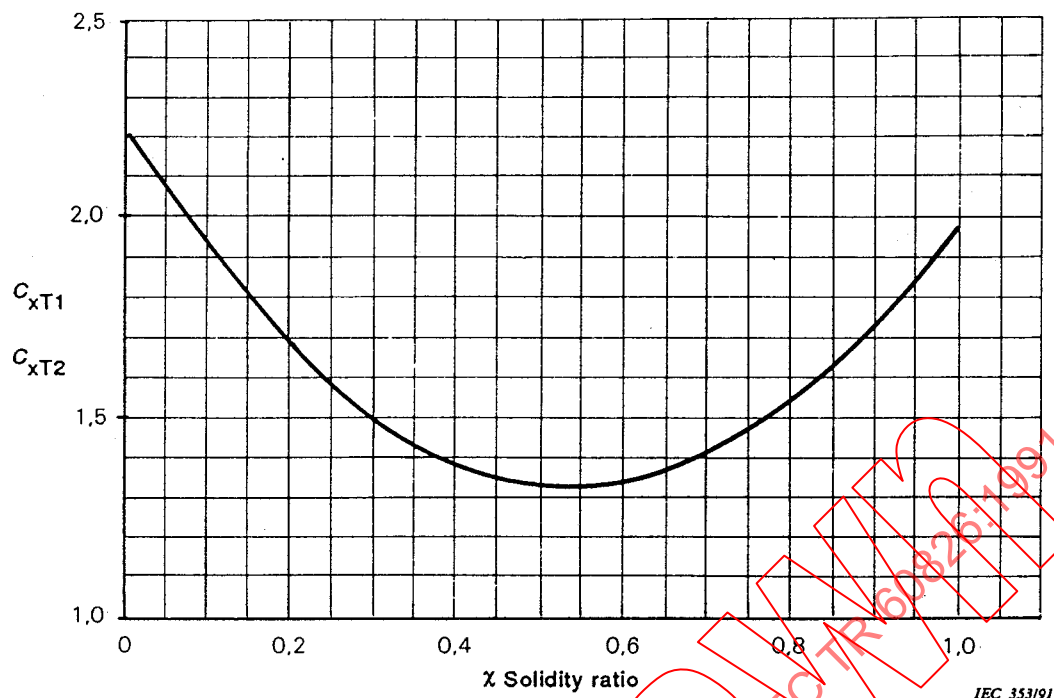


Figure 11 - Overall normal drag coefficients for rectangular towers composed of circular section members C_{xT}

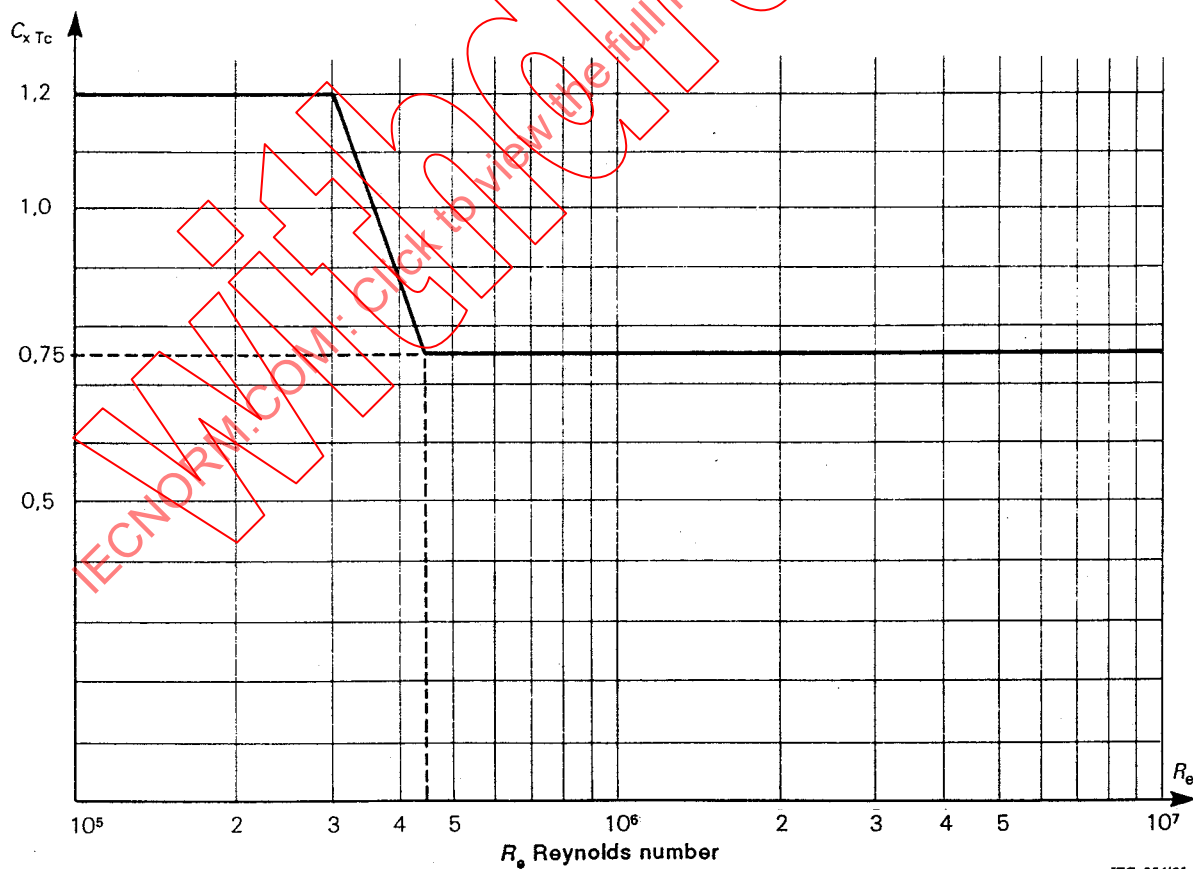


Figure 12 - Value of C_{xTc} drag coefficient of cylindrical elements having a large diameter, as a function of Reynolds number R_e

3.3 Charges climatiques, givre sans vent

3.3.1 Détermination des paramètres météorologiques

3.3.1.1 Classification des surcharges de givre

Le givre peut être classé en deux catégories principales:

- givrage par précipitation;
- brouillard givrant.

Dans les annexes H et J, on donne une classification des différents types de givre et la description des conditions météorologiques lors desquelles ils peuvent se produire.

Pour ces deux principaux types de givrage, la méthode statistique proposée dans ce rapport devra être appliquée de façon indépendante.

Dans les régions où les deux types de givre peuvent apparaître¹, les valeurs respectives peuvent être traitées séparément avec des distributions statistiques différentes pour fournir les bases des charges à prendre en compte pour le calcul. Si la différence entre ces charges pour les deux types de givre est significative, la plus faible de ces deux valeurs pourra être négligée.

3.3.1.2 Données concernant la formation du givre

3.3.1.2.1 Observations de référence

Les valeurs des surcharges de givre, exprimées par unité de longueur du conducteur, seront déduites d'un conducteur de référence de 30 mm de diamètre, situé à une hauteur de 10 m au-dessus du sol en un lieu représentatif de la ligne.

Néanmoins, la quantité de données recueillies sur la formation du givre varie énormément. Selon le type d'information et le nombre d'années consacrées à l'observation², l'approche statistique est limitée aux trois cas suivants:

- des observations sur les surcharges annuelles maximales du givre, pendant au moins 10 ans, sont disponibles (voir 3.3.1.2.2);
- seule la valeur maximale de surcharge du givre ayant eu lieu au cours d'une période couvrant quelques années est disponible (pas de valeur statistique) (voir 3.3.1.2.3);
- évaluation de la valeur maximale annuelle de la surcharge de givre par l'intermédiaire de l'analyse de données météorologiques (modèle de prédiction météorologique) (voir 3.3.1.2.4).

1 Dans les régions montagneuses, les cas les plus sévères peuvent souvent se produire sous forme d'une combinaison des deux types de givrage.

2 L'utilisation des informations sur les charges de givre relevées pendant quelques années seulement peut conduire à des erreurs si les périodes de givrage ne sont pas représentatives.

Si possible, une évaluation météorologique devra être effectuée pendant une période d'au moins 20 ans à 30 ans. Une telle évaluation devra se rapporter au site considéré. Cela est important pour éviter d'aboutir à des conclusions fausses basées sur des périodes trop courtes et des périodes non représentatives.

3.3 Climatic loads, ice without wind

3.3.1 Determination of meteorological parameters

3.3.1.1 Classification of ice loads

Ice loads can be classified into two main types:

- precipitation icing;
- in-cloud icing.

In annexes H and J a classification of different types of ice and a description of the meteorological conditions during which they may occur are given.

For these two main types of icing the statistical method given in this report shall be applied independently.

In regions where both types may occur¹, the different data for the two different 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.

3.3.1.2 Collected data on ice formation

3.3.1.2.1 Reference observations

The ice load value, expressed per unit length of the conductor, should be deduced from a reference conductor of 30 mm diameter, situated at a height of 10 m above the ground on a site representative of the line.

However, the amount of collected data on ice formation will vary to a large extent. Dependent upon the type of information and the number of years of observation², the statistical approach is limited to the following three cases:

- records of yearly maximum ice loads during a period of at least 10 years are available (see 3.3.1.2.2);
- only the maximum value of ice load during a certain number of years is available (no statistical data) (see 3.3.1.2.3);
- evaluation of yearly maximum ice load by means of meteorological data analysis (meteorological predicting model) (see 3.3.1.2.4).

¹ In mountain regions the most severe cases often occur as a combination of both types of icing.

² Using the information about ice loads for only a few years may be misleading if the icing seasons are not representative.

Whenever possible, a meteorological evaluation should be made for a period of at least 20 or 30 years. Such an evaluation should be related to the actual terrain and region. This is recommended in order to avoid wrong conclusions based on a too short period and non-representative seasons.

3.3.1.2.2 Valeurs de surcharge annuelle maximale de givre disponibles sur une période d'au moins 10 ans

On adopte la valeur moyenne $\bar{g}$ calculée à partir des observations maximales annuelles; pour l'écart type σ_g , on peut prendre la valeur estimée conformément au tableau 13.

Tableau 13 - Paramètres statistiques des charges de givre

Nombre d'années avec observations (n)	Valeur moyenne $\bar{g}$	Ecart type σ_g
$10 \leq n \leq 20$	$\bar{g}$	$0,5 \bar{g} \leq \sigma_g \leq 0,7 \bar{g}$
$20 \leq n$	$\bar{g}$	$\sigma_g < 0,7 \bar{g}$

$\bar{g}$ = moyenne calculée des valeurs maximales annuelles g de surcharge de givre pendant la période considérée.

σ_g = écart type calculé ou estimé.

3.3.1.2.3 On dispose uniquement de la valeur maximale de surcharge de givre ayant eu lieu au cours d'une période de quelques années (aucune donnée statistique disponible)

La valeur moyenne $\bar{g}$ est prise égale à $0,45 g_{\max}$ et l'écart type σ_g à $0,5 \bar{g}$, où $g_{\max}$ est la valeur maximale de surcharge de givre observée au cours de n années.

3.3.1.2.4 Evaluation de la surcharge annuelle maximale de givre par l'analyse des données météorologiques

Un modèle d'analyse météorologique peut être utilisé pour calculer les valeurs maximales annuelles de surcharge de givre pendant un certain nombre d'années.

Des valeurs suffisantes pour l'approche statistique, proposées dans ce rapport, peuvent être obtenues grâce à une analyse des données météorologiques et climatologiques sur une période de 20 ans ou plus, combinée avec au moins cinq années d'observation du givrage sur le site de la ligne de transport.

Les informations sur le site de la ligne, nécessaires pour valider et ajuster la méthode des prédéterminations, peuvent provenir de l'expérience passée sur des lignes de transport ou de distribution existantes, d'observations in situ des régions soumises à des tempêtes de neige et de l'examen de l'effet du givre sur la végétation.

Une telle méthode de prédétermination peut être simple ou devenir complexe selon le terrain, le climat local, le nombre ou le type de sites différents.

3.3.1.2.2 Records of yearly maximum ice load 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 estimated according to table 13.

Table 13 - Statistical parameters of ice loads

Number of years with observation (n)	Mean value $\bar{g}$	Standard deviation σ_g
$10 \leq n \leq 20$	$\bar{g}$	$0,5 \bar{g} \leq \sigma_g \leq 0,7 \bar{g}$
$20 \leq n$	$\bar{g}$	$\sigma_g < 0,7 \bar{g}$

$\bar{g}$ = calculated mean of the yearly maximum values g of ice load during the period concerned

σ_g = calculated or estimated standard deviation

3.3.1.2.3 Only the maximum value 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 the standard deviation σ_g as $0,5 \bar{g}$ where $g_{\max}$ is the maximum ice load observed during n years.

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

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 report 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.

Les résultats de cette analyse sont utilisés pour définir la valeur moyenne $\bar{g}$ et l'écart type σ_g selon la méthode donnée en 3.3.1.2.2.

3.3.1.3 Surcharge de référence pour le calcul

La surcharge de référence pour le calcul, g_R , est une fonction du niveau de fiabilité de la ligne et des paramètres suivants:

$\bar{g}$ = valeur moyenne de la surcharge maximale annuelle de givre (voir 3.3.1.2.2, 3.3.1.2.3, 3.3.1.2.4)

σ_g = écart type de la surcharge maximale annuelle de givre (voir 3.3.1.2.2, 3.3.1.2.3, 3.3.1.2.4)

n = nombre d'années d'observations

d = diamètre du conducteur

h_c = hauteur moyenne du conducteur au-dessus du sol

La surcharge de référence pour le calcul g_R est exprimée par:

$$g_R = K_{og} K_n K_d K_h \bar{g} \quad (16)$$

Les valeurs des facteurs K_{og} , K_n , K_d et K_h sont indiquées dans le tableau 14 et respectivement sur les figures 13, 14 et 15. Les éléments pour déterminer K_{og} et K_n sont donnés dans l'annexe C.

Pour simplifier, il est suggéré de prendre la même valeur de g_R pour les conducteurs de phase et les câbles de garde d'une même portée.

Tableau 14 - Valeurs du facteur de charge de givre K_{og}

Coefficient de variation $\frac{K_{og}}{\bar{g}}$	K_{og}		
	Niveau de fiabilité 1	Niveau de fiabilité 2	Niveau de fiabilité 3
0,2	1,52	1,70	1,87
0,3	1,78	2,04	2,32
0,4	2,04	2,38	2,76
0,5	2,30	2,73	3,20
0,6	2,56	3,07	3,64
0,7	2,81	3,42	4,08

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 in 3.3.1.2.2.

3.3.1.3 Reference design load

The reference design load g_R is a function of the reliability level of the line and the following parameters:

$\bar{g}$ = mean value of the yearly maximum ice loads as given in 3.3.1.2.2, 3.3.1.2.3 or 3.3.1.2.4

σ_g = standard deviation of the yearly maximum ice loads as given in 3.3.1.2.2, 3.3.1.2.3 or 3.3.1.2.4

n = number of years of observation

d = conductor diameter

h_c = average height of conductor above ground

The reference design load g_R is given by the following expression:

$$g_R = K_{\sigma g} K_n K_d K_h \bar{g} \quad (16)$$

The values of the factors $K_{\sigma g}$, K_n , K_d , K_h are given in table 14, and in figures 13, 14 and 15 respectively. The basis for determining $K_{\sigma g}$ and K_n is given in annex C.

As a simplification, it is suggested that the value g_R be the same for phase conductors and earth wires in the same span.

Table 14 - Values of ice load coefficient $K_{\sigma g}$

Coefficient of variation of ice loads $\frac{K_{\sigma g}}{\bar{g}}$	$K_{\sigma g}$		
	Reliability level 1	Reliability level 2	Reliability level 3
0,2	1,52	1,70	1,87
0,3	1,78	2,04	2,32
0,4	2,04	2,38	2,76
0,5	2,30	2,73	3,20
0,6	2,56	3,07	3,64
0,7	2,81	3,42	4,08

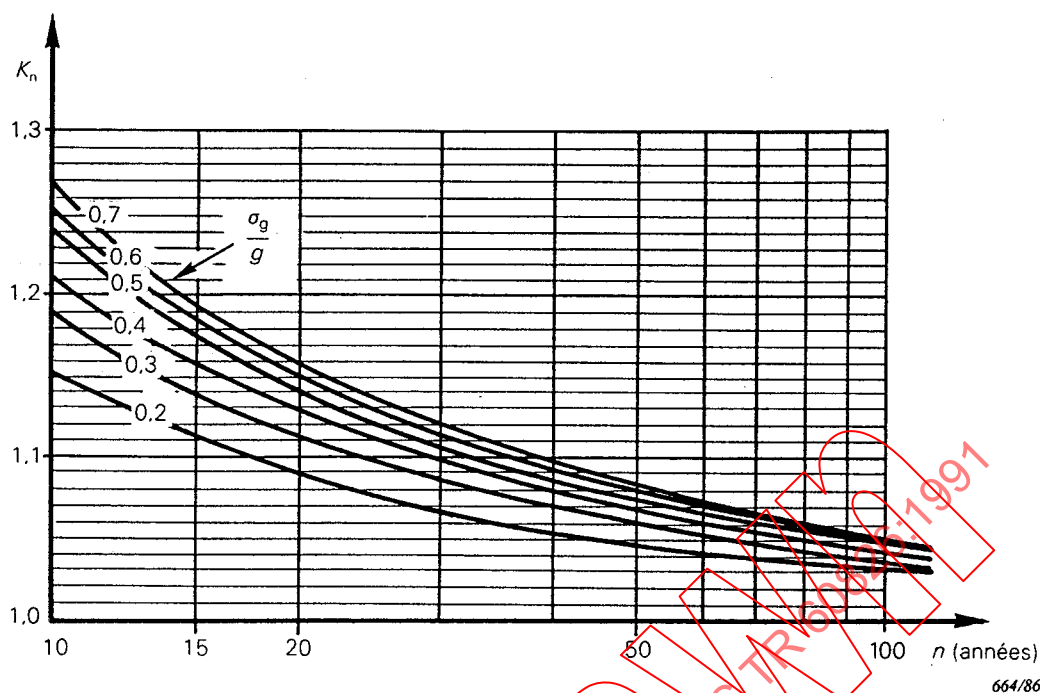


Figure 13 - Facteur relatif à l'influence du nombre d'années d'observation du givre

K_n est calculé pour le niveau de fiabilité 2 et ne varie pas de plus de 2 % pour les autres niveaux.

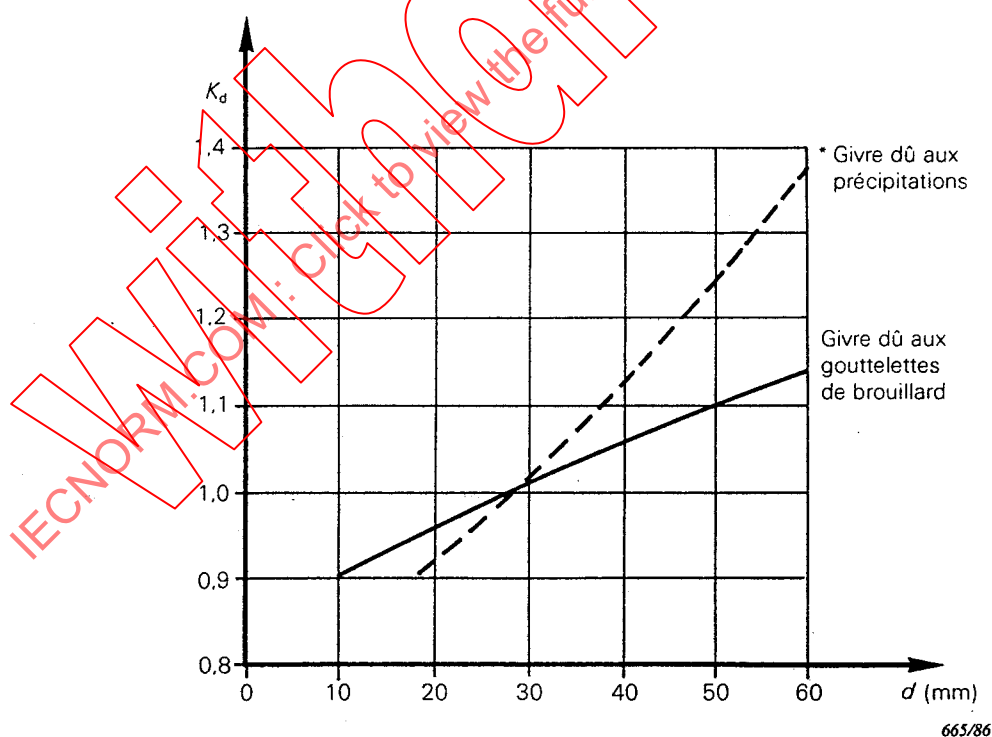


Figure 14 - Facteur relatif à l'influence du diamètre du conducteur

Pour les deux types de givrage, on utilisera la figure 14 tant que $K_d \bar{g}$ est inférieur à 100 N/m. Au-delà, on prendra $K_d = 1$ pour les conducteurs de diamètre supérieur à 30 mm.

* La courbe est établie pour la pluie verglaçante, la valeur en cas de neige collante peut être plus faible.

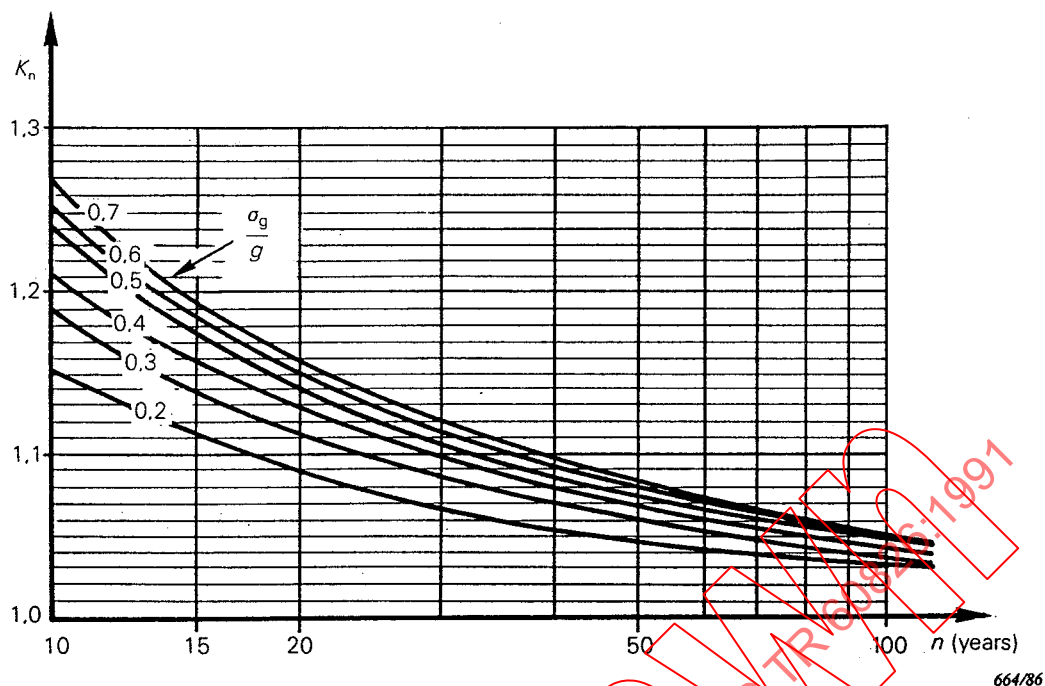


Figure 13 - Factor related to the influence of the number of years of observation of ice

K_n is derived for reliability level 2 and is within 2 % for other levels.

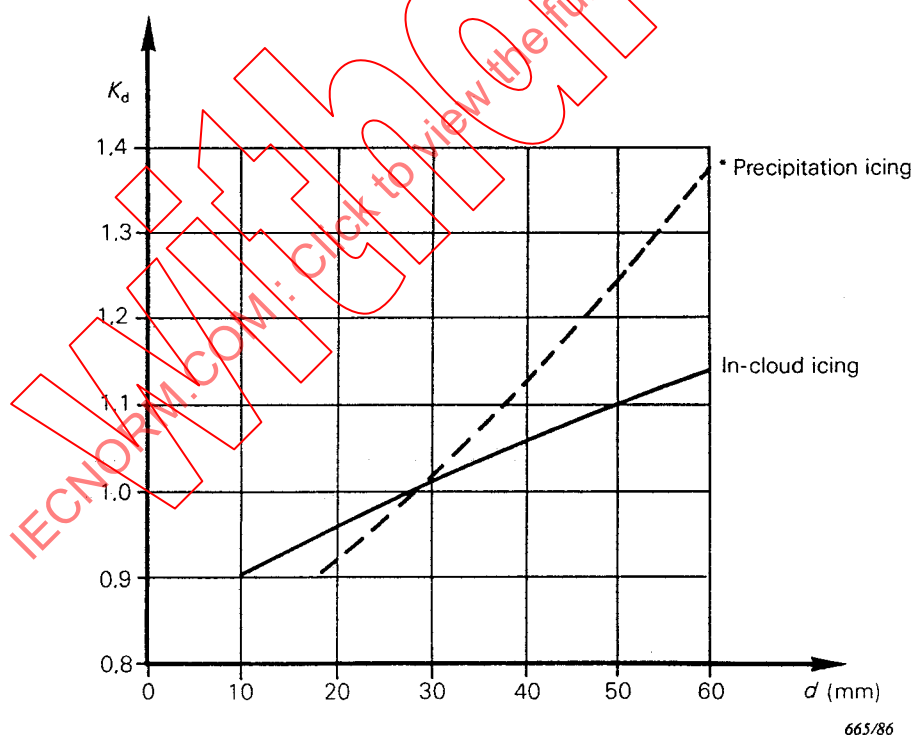


Figure 14 - Factor related to the influence of conductor diameter

For both types of icing, use figure 14 for values of $K_d \bar{g}$ up to 100 N/m. Above that, use $K_d = 1$ for conductor diameters greater than 30 mm.

* The curve is based on freezing rain. The value for wet snow may be lower.

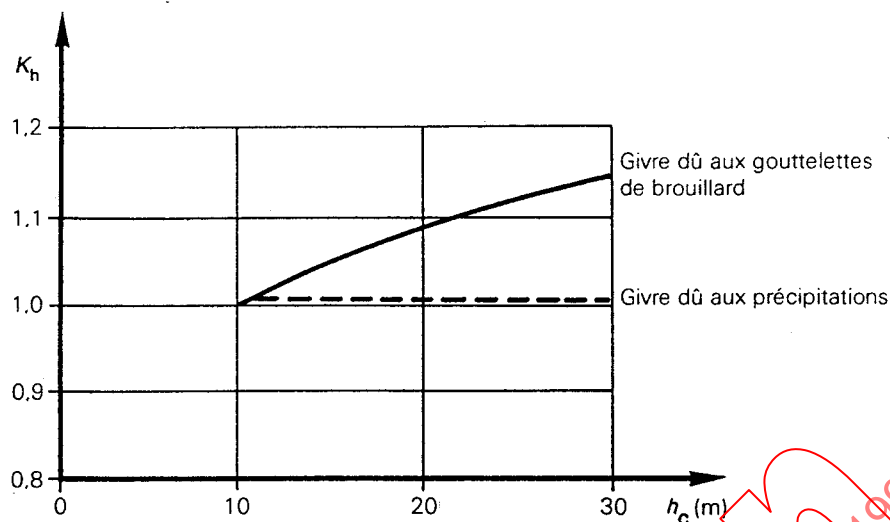


Figure 15 - Variation de K_h en fonction de la hauteur des conducteurs au-dessus du sol¹

Pour le givre dû aux gouttelettes de brouillard, prendre $K_h = 1,15$ pour $h_c > 30$ m.

3.3.1.4 Influence du terrain sur le givrage

Une liste de paramètres qui affectent la surcharge de référence est donnée en 3.3.1.3. Un autre facteur très important est l'influence du terrain. Néanmoins, ce facteur est extrêmement difficile à quantifier. A cause de la grande variété des configurations de terrain, il est difficile de transposer les résultats d'une étude expérimentale d'un site à un autre. De plus, l'influence du terrain dépend largement du mécanisme de formation du givre. Des remarques qualitatives concernant l'influence de la topographie locale pour les deux plus importants mécanismes de formation de givre sont données dans l'annexe J.

3.3.1.5 Température de référence

La température, dans les conditions de givrage, est prise égale à -5 °C pour les deux principaux types de givrage² (voir annexe H).

3.3.2 Charges sur les supports

Les charges que le support aura à tenir sont égales aux efforts transmis par les conducteurs au support, calculés selon les trois différentes conditions de surcharges de givre suivantes, considérées comme les plus significatives et couvrant la plupart de celles qui se produisent en réalité:

- I – Formation de givre uniforme
- II – Formation de givre non uniforme: effort longitudinal et transversal de flexion
- III – Formation de givre non uniforme: effort de torsion

Les formations de givre non uniforme II et III sont supposées avoir une fréquence d'apparition dix fois plus faible que celles du givre uniforme.

¹ Cette courbe représente les connaissances disponibles au moment de la préparation de ce rapport et sera soumise à une évaluation ultérieure.

² Des températures plus basses peuvent être choisies quand les conditions climatiques peuvent varier rapidement, par exemple chute importante de température pendant ou immédiatement après une tempête de neige.

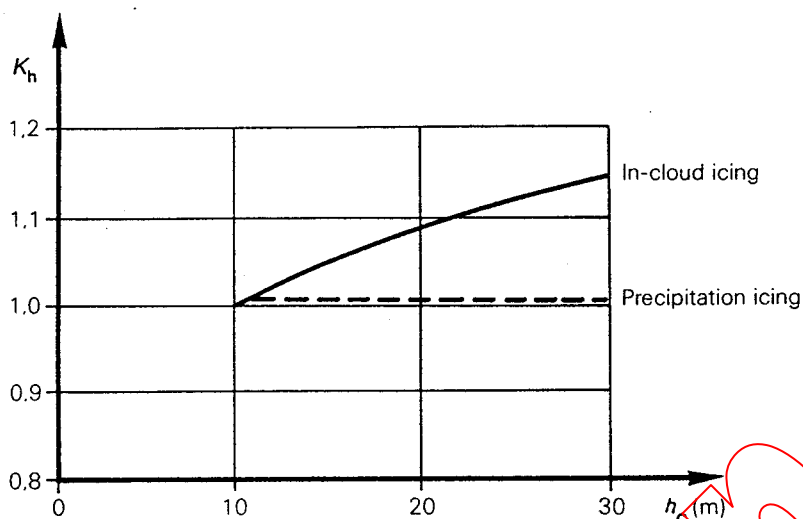


Figure 15 - Variation of K_h with the height of conductors above the ground¹

For in-cloud icing use $K_h = 1,15$ for $h_c > 30$ m.

3.3.1.4 Terrain influence upon icing

In 3.3.1.3, a set of parameters which influence the reference design load is given. Another very important factor is the effect of the terrain. However, this factor is extremely difficult to quantify. Because of the great variety of terrain formations, it is difficult to transfer knowledge acquired from an experimental study from one site to another. Furthermore the terrain influence is strongly dependent on the mechanism of icing. Comments on the influence of local topography on the two most important mechanisms for icing are given, on a qualitative basis, in annex J.

3.3.1.5 Design temperature

The temperature to be assumed in ice conditions shall be -5 °C for both main types of icing² (see annex H).

3.3.2 Loads on support

Loads to be withstood by the support are equal to the loads transmitted to the support by the conductors, calculated according to the three different ice loading conditions listed below, assumed as the most significant and covering most of those which can occur:

- I – Uniform ice formation.
- II – Non-uniform ice formation: longitudinal and transverse bending condition.
- III – Non-uniform ice formation: torsion condition.

The non-uniform ice formations II and III are assumed to occur 10 times less frequently than uniform ice formation.

¹ This curve represents the best available knowledge at the time of preparation of this report and will be subject to further evaluation.

² Lower temperatures can be assumed where climatic conditions can vary rapidly, such as severe drop in temperature during or immediately following a snowstorm.

3.3.2.1 Description des cas de charge

Dans la description des différents cas de charge, les valeurs des surcharges de givre sont données en fonction de la surcharge de référence g_R (voir 3.3.1.3). Il est important de réaliser le fait 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, comme il est indiqué dans l'annexe J.

Les cas de charges sont schématisés ci-dessous. Le cas de givre non uniforme apparaît normalement à la suite de certains effets de protection dus au terrain donnant lieu à une précipitation non uniforme ou bien au cours d'un processus de fonte et de décharge.

Ces cas de charges ne correspondent évidemment pas à des changements, par palier, de surcharges de givre comme indiqué dans ce rapport. Néanmoins, le but est de proposer des cas de charge conventionnels permettant de calculer les tensions mécaniques des conducteurs caractérisant les circonstances connues des charges de givre.

Pour le calcul des efforts appliqués au support par les câbles, la réduction de la tension due au balancement des chaînes isolantes, la flèche ou la rotation du support et/ou des fondations ainsi que l'interaction avec les autres phases ou câbles de garde doivent être prises en considération. Ces différents facteurs influencent en effet la charge statique résiduelle.

Un cas de charge en givre non uniforme est défini comme la surcharge qui correspond à la probabilité de formation de givre sur un maximum de trois portées d'un côté du support. Sur toutes les autres portées du canton, la surcharge de givre doit être réduite à un certain pourcentage de cette valeur de surcharge (entre 30 % et 60 %). On recommande d'adopter 40 % de cette valeur. Cette combinaison s'avère être plus représentative que les configurations théoriques correspondant à un côté du support sans surcharge de givre. Cependant, il ne faut pas oublier que cette dernière situation peut apparaître quand la ligne présente un angle relativement important ou lorsqu'il se produit un effet de masque entre portées adjacentes.

3.3.2.1.1 Conditions de charge I: formation de givre uniforme

La condition de charge est définie par l'existence d'une surcharge de givre uniforme sur tous les conducteurs de phase et les câbles de garde égale à la surcharge de référence déterminée pour chaque portée:

$$g_I = g_R$$

3.3.2.1.2 Conditions de charge II: formation de givre non uniforme sur les conducteurs de phase et câbles de garde, effort longitudinal et transversal de flexion.

Les cas de charge sont donnés sur les figures 16a, 16b et 16c.

3.3.2.1 Loading case description

In the description of the different loading conditions, the value of the ice loads are given as functions of the reference design load g_R (see 3.3.1.3). It is important to be aware of the fact that g_R may alter from one span to another in a section of a line, due to local terrain effects, as explained in annex J.

The conditions are shown schematically below. The non-uniform situation normally occurs due to certain sheltering effects in the terrain, giving non-uniform precipitation or during the melting/detachment process.

This does not produce the discrete changes in ice loads suggested in this report. The aim is, however, to propose conventional loading conditions for the purpose of calculating conductor tensions which are typical for known occurrences of ice loading.

When computing loads on a support from conductors, allowance shall be made for the reduction in tension due to the swing of the insulator assembly, deflection or rotation of the support and/or foundations and the interaction with other phases or earth wires that will influence the residual static load.

A non-uniform ice formation is defined as an ice load corresponding to the probability of the formation on up to three spans on one side of the support, whilst on the other spans in the section the ice has to be reduced to a certain percentage of that value, (possibly between 30 % and 60 %). A recommended value is 40 %. This combination is found to be more realistic than a theoretical assumption that conductors on one side of the support are without ice, although it must be appreciated that this situation may occur where there is a significant change in the line direction or in the local shielding effect of adjacent spans.

3.3.2.1.1 Loading conditions I: uniform ice formation

This condition is that which results from having an ice loading on all conductors and earth wires equal to the reference design load determined for each span:

$$g_I = g_R$$

3.3.2.1.2 Loading condition II: non-uniform ice formation on phase conductors and earth wires, longitudinal and transverse bending conditions

The loading conditions are given in figures 16a, 16b and 16c.

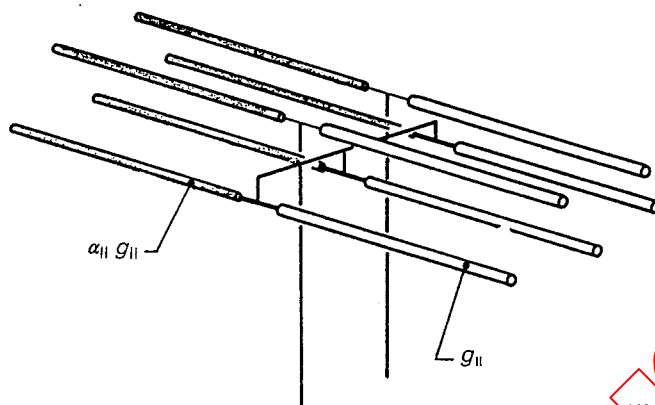


Figure 16a

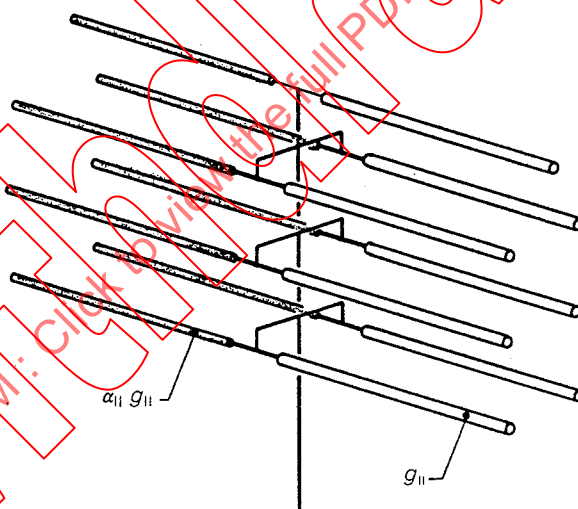


Figure 16b¹

1 Pour les lignes à plusieurs circuits, le nombre de phases soumises au givrage non uniforme devra être défini par chaque Comité national. L'hypothèse de charge ne devra cependant pas être moins sévère que celle qui existe pour des lignes à deux circuits.

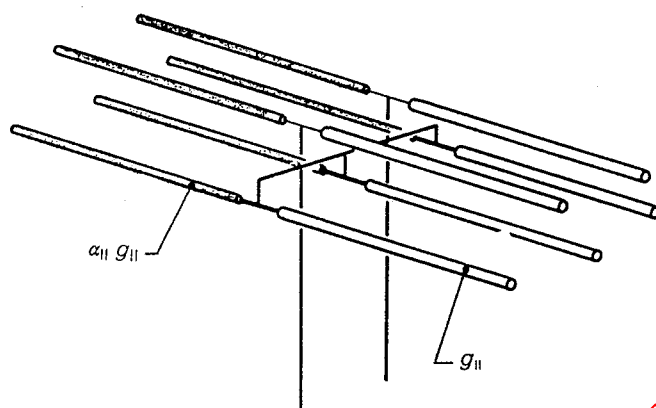
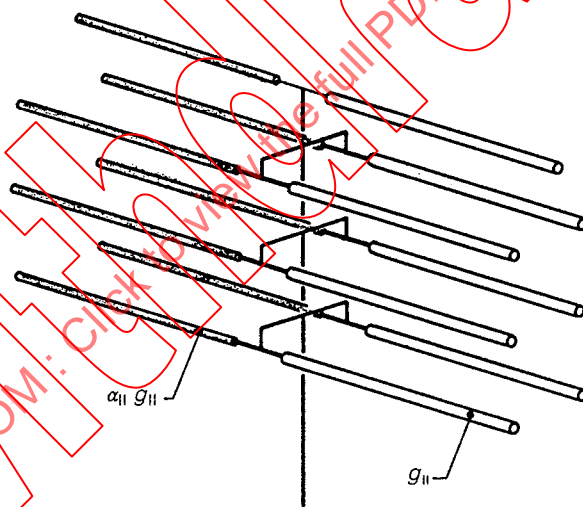


Figure 16a

Figure 16b¹

1 For multicircuit lines, the number of phases subjected to non-uniform ice should be defined by each National Committee. The loading condition should, however, not be less than that given for double circuit lines.

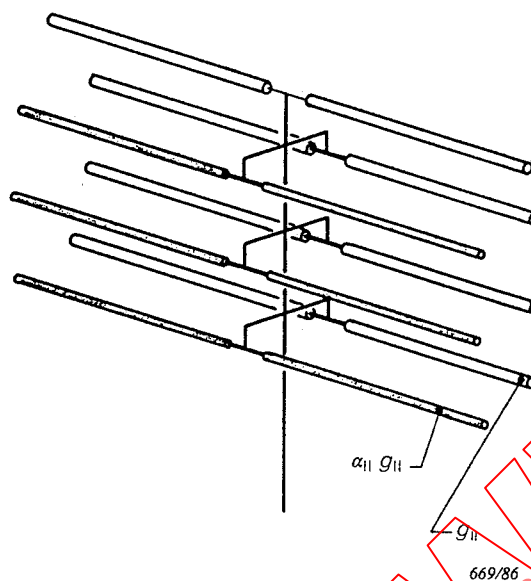


Figure 16c

La valeur de la charge de givre est: $g_{II} = 0,7 g_R$.

α_{II} est un facteur de réduction (valeur recommandée $\alpha_{II} = 0,4$).

3.3.2.1.3 Conditions de charges III: formation de givre non uniforme sur les conducteurs de phases et les câbles de garde, efforts de torsion

Les conditions de charge sont données sur les figures 17a et 17b:

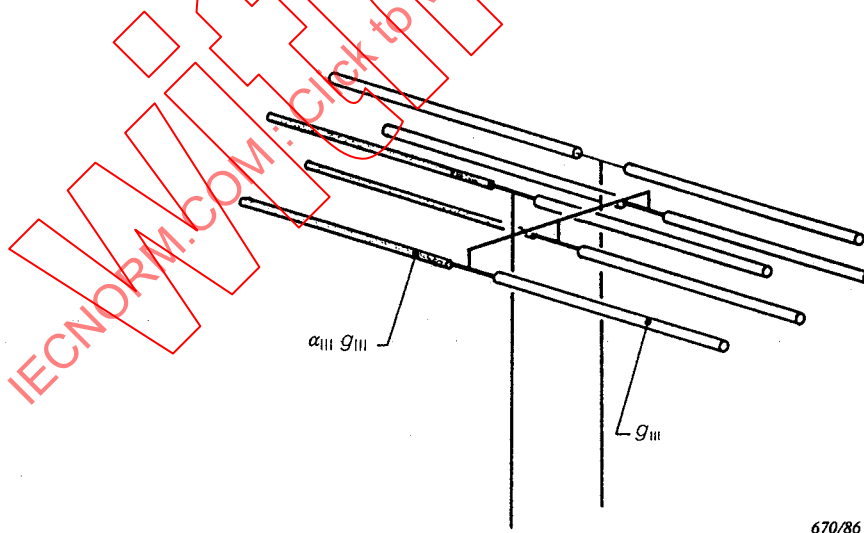


Figure 17a¹

1 Pour les lignes à plusieurs circuits, le nombre de phases soumises au givrage non uniforme devra être défini par chaque Comité national. L'hypothèse de charge ne devra cependant pas être moins sévère que celle qui existe pour des lignes à deux circuits.

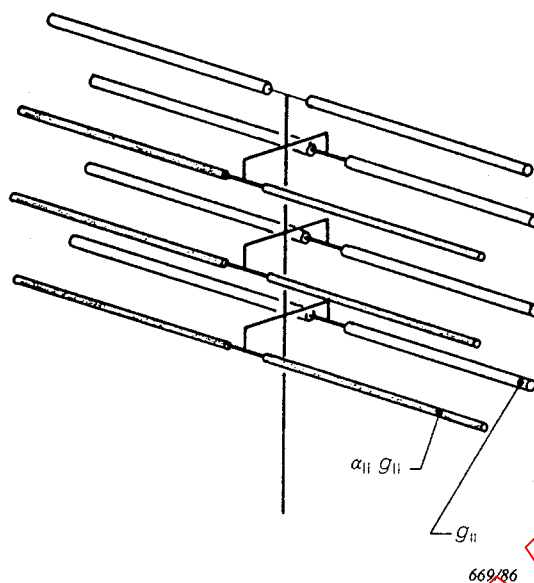


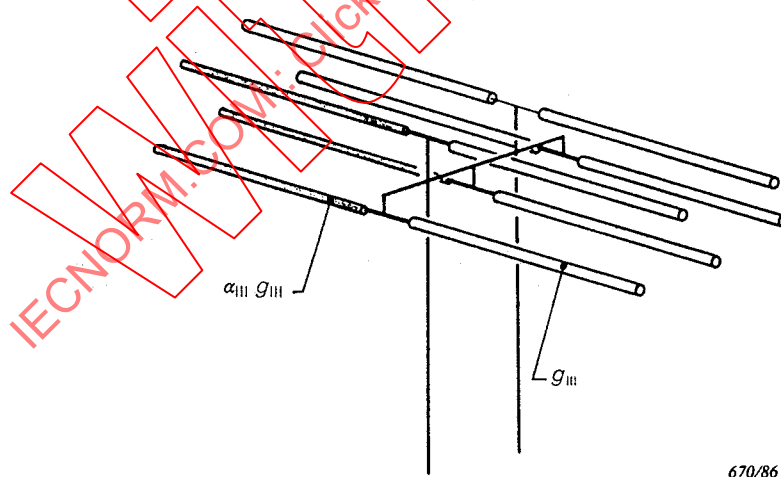
Figure 16c

The value of the ice load is: $g_{II} = 0,7 g_R$

α_{II} is a reduction factor (suggested value of $\alpha_{II} = 0,4$).

3.3.2.1.3 Loading condition III: non-uniform ice formation on phase conductors and earth wires, torsion condition

The loading conditions are given in figures 17a and 17b.

Figure 17a¹

¹ For multicircuit lines, the number of phases subjected to non-uniform ice should be defined by each National Committee. The loading condition should, however, not be less than that given for double circuit lines.

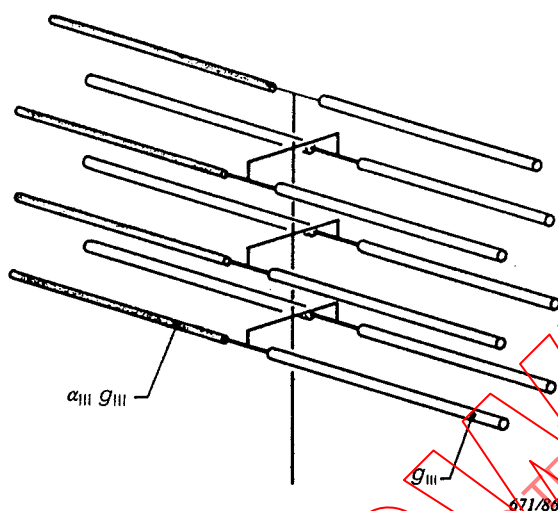


Figure 17b

La valeur de charge de givre est: $g_{III} = 0,7 g_R$.

α_{III} est un facteur de réduction (valeur recommandée $\alpha_{III} = 0,4$).

3.4 Charges climatiques, vent et givre combinés

Les charges combinées de vent et de givre dont il est question dans cet article sont limitées au vent sur les conducteurs recouverts de givre. Le vent sur les supports et les isolateurs givrés pourrait, si nécessaire, être traité de façon similaire, en portant une attention particulière aux coefficients de traînée.

3.4.1 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. Des mesures directes de ces charges seraient idéales pour en avoir la meilleure approximation mais cela demanderait en pratique de nombreuses années de dur travail sur des stations d'essai spéciales ou sur des lignes existantes. L'extrapolation des résultats à des lignes aériennes futures pourrait encore conduire à des incertitudes.

Comme 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 ait les mêmes périodes de retour que celles qui sont adoptées pour chaque niveau de fiabilité.

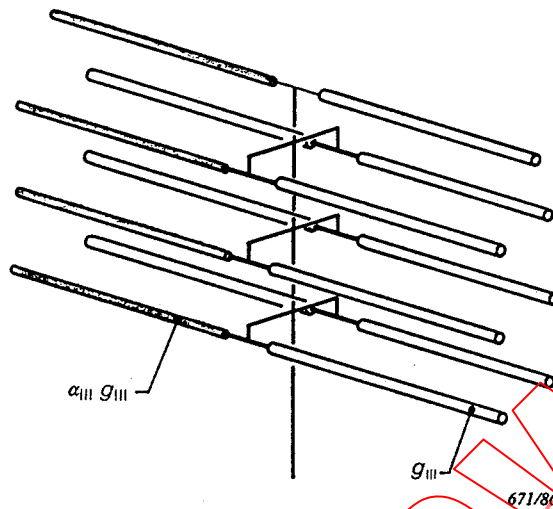


Figure 17b

The value of the ice load is: $g_{III} = 0,7 g_R$

α_{III} is a reduction factor (suggested value of $\alpha_{III} = 0,4$).

3.4 Climatic loads, combined wind and ice loadings

The combined wind and ice loadings treated in this clause are restricted to wind on ice-covered conductors. Wind on ice-covered supports and insulators can, if necessary, be treated in a similar way with special attention to drag coefficients.

3.4.1 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, in practice, this would require many years of hard work on special test sites or on existing lines. Extrapolating results to future overhead lines could still lead to uncertainties.

Since it is possible to obtain independent observations of wind velocity, ice weight and ice shape, it is proposed to combine these variables in such a way that the resulting load will have the same return periods as those adopted for each reliability level.

La combinaison des probabilités de ces variables corrélées exige cependant la connaissance de diverses 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: à une valeur d'une variable ayant une faible probabilité d'apparition sont combinées les valeurs des deux autres variables ayant une forte probabilité d'apparition, comme le montre le tableau 15 ci-dessous. Dans cette méthode, on accepte un certain degré d'indépendance entre les différentes variables.

Tableau 15 - Période de retour d'événements combinés

	Niveau de fiabilité	Période de retour T (ans)	Probabilité que la charge soit dépassée *
Faible niveau de probabilité de la valeur maximale d'une variable	1	50	65 %
	2	150	30 %
	3	500	10 %
Niveau élevé de probabilité de la valeur maximale d'une variable	1	3	100 %
	2		
	3		

* La probabilité que la charge soit dépassée au moins une fois durant la vie de l'ouvrage a été calculée sur une période de 50 ans, durée de vie moyenne estimée d'une ligne aérienne.

La densité du givre varie avec le type de givrage, et il est recommandé de combiner les faibles densités de givre avec les coefficients de traînée les plus élevés et vice versa (voir tableaux 16 et 19).

Pour chaque niveau de fiabilité choisie, trois cas de charge sont définis, comme le montre le tableau 16.

Tableau 16 - Conditions de charges combinées de vent et de givre

Conditions de charge	Poids du givre	Vitesse du vent	Coefficient de traînée effectif	Densité
Condition 1	g_L	V_{IH}	C_{IH}	δ_1
Condition 2	g_H	V_{IH}	C_{IH}	δ_1
Condition 3 *	g_H	V_{IL}	C_{IL}	δ_2
* En pratique, on a constaté que la condition 3 n'est pas critique pour les critères de conception.				

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 is combined with high probability values of the other two variables, as is shown in table 15. In this method, a certain degree of independence between the different variables is accepted.

Table 15 - Return period of combined events

	Reliability level	Return period T (years)	Probability of exceeding the load
Low probability level of maximum value of one variable	1	50	65 %
	2	150	30 %
	3	500	10 %
High probability level of the maximum value of one variable	1	3	100 %
	2		
	3		

* The probability that the load may be exceeded at least once during the lifetime of the line has been calculated over a period of 50 years, assumed to be the average life time of an overhead transmission line.

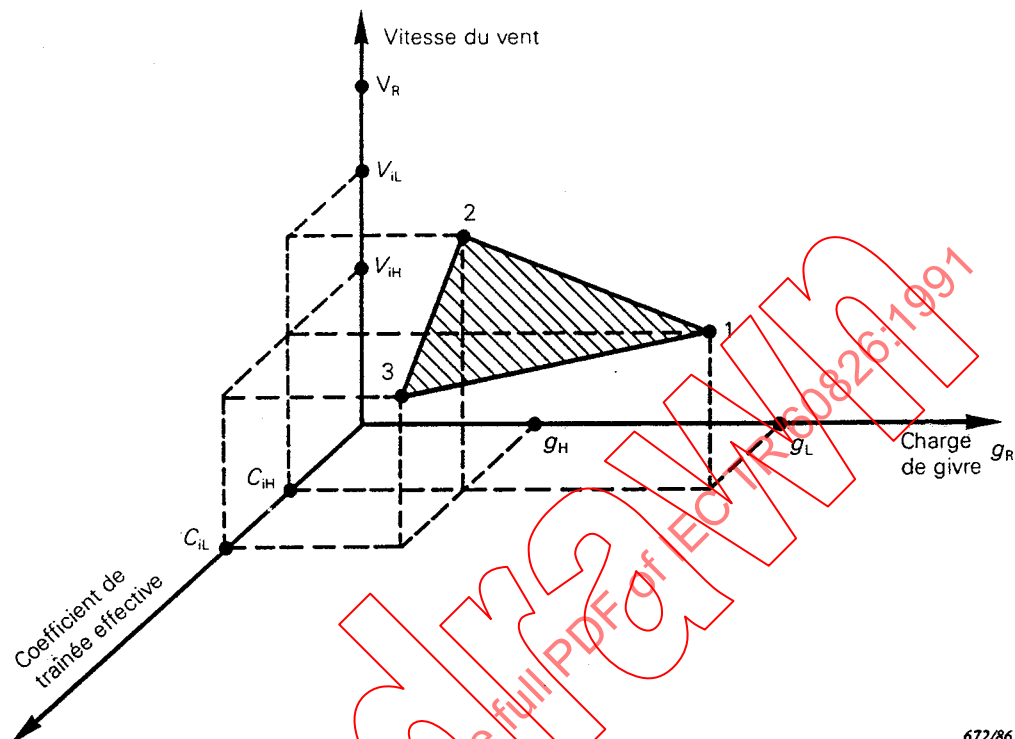
The density of ice types varies with the type of icing and it is recommended that low density ice is combined with the higher drag coefficient and vice-versa (see tables 16 and 19).

For any selected reliability level, three loading conditions are defined as shown in table 16.

Table 16 - Combined wind and ice loading conditions

Loading conditions	Ice weight	Wind velocity	Effective drag coefficient	Density
Condition 1	g_L	V_{IH}	C_{IH}	δ_1
Condition 2	g_H	V_{IH}	C_{IH}	δ_1
Condition 3 *	g_H	V_{IL}	C_{IL}	δ_2
* In practice, it was found that condition 3 is not critical for design purposes.				

Ces conditions de charge sont illustrées sur la figure 18, où V_R est la vitesse du vent de référence et g_R la charge de givre de référence.



672/86

Figure 18 - Cas de charges combinées vent-givre donnés à titre indicatif

3.4.2 Détermination des paramètres de conception

3.4.2.1 Détermination de la charge de givre

Les valeurs maximales du poids du givre utilisées dans ce rapport sont déterminées de la même façon que celle qui est décrite au paragraphe 3.3.1.3.

Les valeurs de g_L et g_H peuvent se calculer à partir de données statistiques en utilisant les expressions suivantes:

$$g_L = \bar{g} \cdot K_{\sigma L} \cdot K_n \cdot K_d \cdot K_h \quad (17)$$

$$g_H = \bar{g} \cdot K_{\sigma H} \cdot K_n \cdot K_d \cdot K_h \quad (18)$$

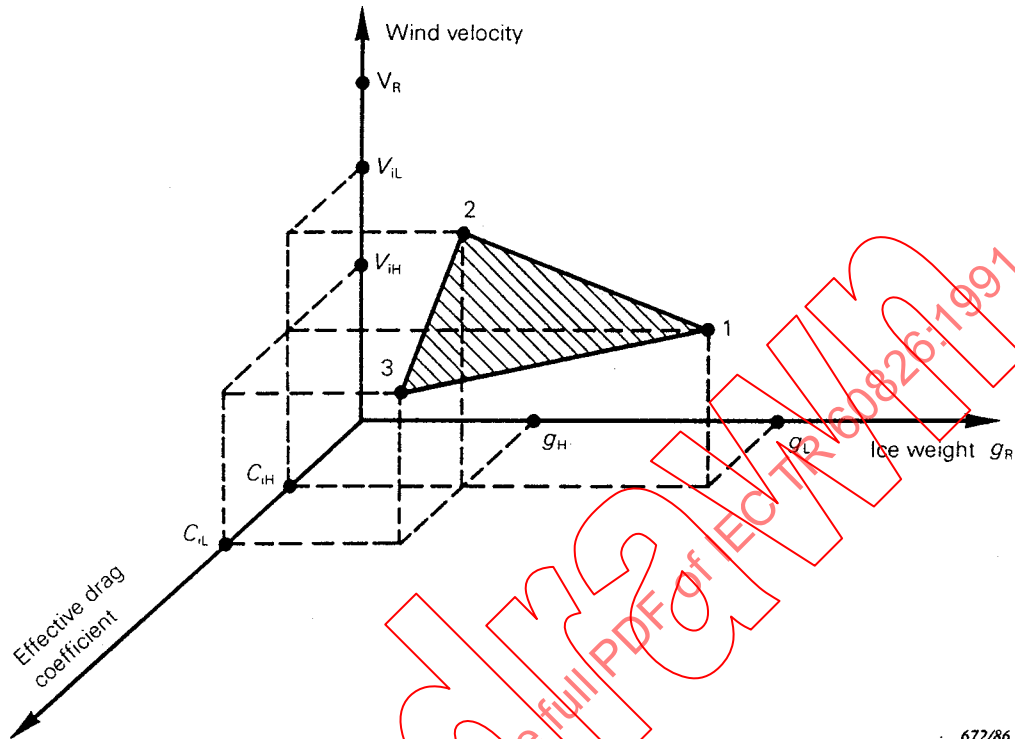
où:

K_n est donné à la figure 19

$K_{\sigma L}$ et $K_{\sigma H}$ sont donnés dans le tableau 17

K_d et K_h sont donnés aux figures 14 et 15

These loading conditions are illustrated in figure 18 where V_R is the reference wind velocity and g_R is the reference design ice load.



672/86

Figure 18 - Cases of combined ice-wind loadings given as an indication

3.4.2 Determining of design parameters

3.4.2.1 Determination of ice load

The maximum values of ice weight used in this report are determined in the same way as described in 3.3.1.3.

The values of g_L and g_H can be computed from the statistical data using the following expression:

$$g_L = \bar{g} K_{\sigma L} K_n K_d K_h \quad (17)$$

$$g_H = \bar{g} K_{\sigma H} K_n K_d K_h \quad (18)$$

where:

K_n is given in figure 19

$K_{\sigma H}$ and $K_{\sigma L}$ are given in table 17

K_d and K_h are given in figures 14 and 15

Tableau 17 - Valeurs de $K_{\sigma L}$, and $K_{\sigma H}$

Coefficient de variation	$K_{\sigma H}$	$K_{\sigma L} = K_{\sigma g}$		
$\frac{\sigma_g}{g}$	Niveau de fiabilité 1, 2 et 3 $T = 3$ ans	Niveau de fiabilité 1 $T = 50$ ans	Niveau de fiabilité 2 $T = 150$ ans	Niveau de fiabilité 3 $T = 500$ ans
0,2	1,05	1,52	1,70	1,87
0,3	1,08	1,78	2,04	2,32
0,4	1,10	2,04	2,38	2,76
0,5	1,13	2,30	2,73	3,20
0,6	1,15	2,56	3,07	3,64
0,7	1,18	2,81	3,42	4,08

Il est important de déterminer les valeurs maximales des surcharges de givre dans les deux principaux types de givrage: givrage par précipitation et brouillard givrant, quand c'est possible. Ces deux types de givrage demandent, en outre, une détermination particulière des autres paramètres, c'est-à-dire de la vitesse du vent associée au phénomène de givrage et du coefficient de traînée.

3.4.2.2 Détermination de la vitesse du vent associée aux conditions de givrage

3.4.2.2.1 Pluie verglaçante

3.4.2.2.1.1 La vitesse météorologique V_e du vent associée au givrage est la vitesse moyenne du vent pendant une période de 10 min, mesurée à 10 m au-dessus du sol dans un site relativement dégagé (rugosité B), lors de la formation de manchons de givre et aussi longtemps que le givre persiste sur les conducteurs.

3.4.2.2.1.2 Vitesse maximale annuelle V_{em} du vent

La vitesse maximale annuelle V_{em} du vent est le maximum de V_e , tel que défini au paragraphe précédent.

3.4.2.2.1.3 Détermination des vitesses du vent de référence à faible et forte probabilités, V_{iL} et V_{iH}

Les vitesses de référence du vent à faible et à forte probabilités associées au givre, respectivement V_{iL} et V_{iH} , peuvent se déduire de la moyenne $\bar{V}_{em}$ des vitesses maximales annuelles V_{em} associées au givre, de l'écart type $\sigma_{V_{em}}$ de la distribution statistique des vitesses et du nombre n d'années d'observation.

$$V_{iL} = \bar{V}_{em} K_{iL} K_n \quad (19)$$

Table 17 - Values of $K_{\sigma L}$ and $K_{\sigma H}$

Coefficient of variation	$K_{\sigma H}$	$K_{\sigma L} = K_{\sigma g}$		
$\frac{\sigma_g}{\bar{g}}$	Reliability levels 1, 2 and 3 $T = 3$ years	Reliability level 1 $T = 50$ years	Reliability level 2 $T = 150$ years	Reliability level 3 $T = 500$ years
0,2	1,05	1,52	1,70	1,87
0,3	1,08	1,78	2,04	2,32
0,4	1,10	2,04	2,38	2,76
0,5	1,13	2,30	2,73	3,20
0,6	1,15	2,56	3,07	3,64
0,7	1,18	2,81	3,42	4,08

It is important to determine maximum ice weight values for the two main types of icing: precipitation icing and in-cloud icing, when applicable. These two types of icing will also require separate determination of the other parameters, i.e. wind speed associated with icing and drag coefficient.

3.4.2.2 Determination of wind velocity associated with icing conditions

3.4.2.2.1 Freezing rain

3.4.2.2.1.1 The meteorological wind velocity V_θ associated with icing is the average velocity of the wind during a 10 min period at 10 m above the ground in relatively open countryside (roughness B) during ice accretion and as long as ice stays on conductors.

3.4.2.2.1.2 Maximum yearly wind velocity V_{em}

The maximum yearly wind velocity V_{em} is the maximum of V_θ , as defined in the previous subclause.

3.4.2.2.1.3 Determination of the low and high probability reference wind velocities V_{iL} and V_{iH}

The low and high probability reference wind velocities associated with ice, V_{iL} and V_{iH} respectively, can be determined from the average $\bar{V}_{em}$ of the maximum yearly velocities V_{em} associated with ice and the standard deviation $\sigma_{V_{em}}$ of the statistical distribution of the velocities and from the number of years of observation n .

$$V_{iL} = \bar{V}_{em} K_{iL} K_n \quad (19)$$

$$V_{iH} = \bar{V}_{em} K_{iH} K_n \quad (20)$$

K_{iL} et K_{iH} sont donnés dans le tableau 18.

K_n est donné à la figure 19.

3.4.2.2.1.4 Variante pour la détermination de V_{em}

Lorsqu'on ne peut établir de corrélation entre les conditions de givrage (c'est-à-dire: givre sur les conducteurs) et les enregistrements météorologiques des vitesses du vent, la distribution du vent maximal associé au givrage peut être déterminée par l'une des deux méthodes suivantes:

- on utilise 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);
- on utilise la vitesse maximale annuelle du vent V_M calculée en 3.2.4, affectée d'un coefficient réducteur B_i basé sur l'expérience et sur l'analyse des conditions météorologiques locales. (En Europe, une valeur de B_i comprise entre 0,65 et 0,85 semble acceptable, sur la base de calculs météorologiques. Cependant, des valeurs extérieures à cet intervalle peuvent être typiques dans certains pays.)

Tableau 18 - Valeurs des facteurs K_{iH} et K_{iL}

Coefficient de variation	K_{iH}	K_{iL}		
	Niveau de fiabilité 1, 2 et 3 $T = 3$ ans	Niveau de fiabilité 1 $T = 50$ ans	Niveau de fiabilité 2 $T = 150$ ans	Niveau de fiabilité 3 $T = 500$ ans
$\frac{\sigma_{Vem}}{\bar{V}_{em}}$				
0,12	1,03	1,30	1,41	1,52
0,16	1,04	1,41	1,55	1,70
0,20	1,05	1,52	1,70	1,87

$$V_{iH} = \overline{V}_{em} K_{iH} K_n \quad (20)$$

K_{iL} and K_{iH} are given in table 18.

K_n is given in figure 19.

3.4.2.2.1.4 Alternative determination of V_{em}

When icing situations (i.e. ice on conductors) cannot be correlated with meteorological records of wind velocities, the maximum wind distributions associated with freezing precipitation may be determined in one of the following ways:

- by using the maximum yearly wind velocity recorded during freezing precipitation and the following period whilst the air temperature remains below 0 °C (suggested maximum period 72 h);
- by using the maximum yearly wind velocity V_M , calculated as in 3.2.4 with a reduction factor B_i based on experience and analysis of local meteorological conditions. (In Europe, values of B_i between 0,65 and 0,85 appear acceptable, based on meteorological analysis. However, values outside this range may be typical in some countries.)

Table 18 - Values of factors K_{iH} and K_{iL}

Coefficient of variation	K_{iH}	K_{iL}		
	Reliability levels 1, 2 and 3 $T = 3$ years	Reliability level 1 $T = 50$ years	Reliability level 2 $T = 150$ years	Reliability level 3 $T = 500$ years
$\frac{\sigma_{Vem}}{\overline{V}_{em}}$				
0,12	1,03	1,30	1,41	1,52
0,16	1,04	1,41	1,55	1,70
0,20	1,05	1,52	1,70	1,87

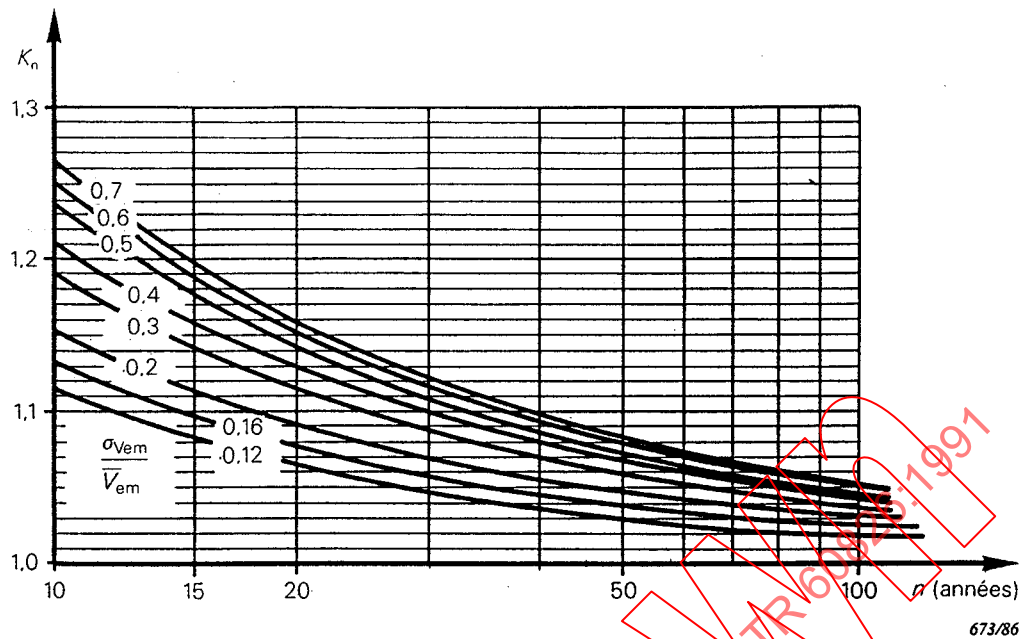


Figure 19 - Facteur relatif à l'influence du nombre d'années d'observation du vent associé au givre.

3.4.2.2.2 Neige collante

Le paragraphe 3.4.2.2.1 traite d'un seul type de givrage par précipitation, à savoir le givrage par pluie verglaçante. On peut déterminer d'une façon similaire la distribution du vent maximal associé à l'autre type de givrage par précipitation, la neige collante. L'adhérence d'une couche de neige collante sur le conducteur est fonction de la variation de la température (pendant et) après formation du manchon de sorte qu'une augmentation de température cause une plus faible adhérence; ainsi une baisse de température peut provoquer une adhérence presque aussi forte qu'une pluie verglaçante. Sur la base des conditions météorologiques locales et de l'expérience on trouvera une gamme de facteurs de réduction B_i identique à celle existant dans une situation de pluie verglaçante.

3.4.2.2.3 Neige sèche

Avec la neige sèche, l'effet d'expulsion de la neige par le vent est similaire à celui décrit en 3.4.2.2.2. Cependant, l'adhérence entre le conducteur et la neige sèche est plus faible que celle qui est admise pour la neige collante.

3.4.2.2.4 Brouillard givrant

Pour déterminer la distribution de vitesse maximale du vent associé aux brouillards givrants, il faut analyser le degré de corrélation qui existe entre le poids du givre et la vitesse du vent. Il est, en effet, bien connu que, dans le cas des brouillards givrants, l'accumulation de givre dépend dans une large mesure de la vitesse du vent. Dans certains sites, au sommet d'une colline par exemple, la quantité maximale de givre déposé sur les conducteurs coïncide avec la vitesse maximale du vent associé aux brouillards givrants.

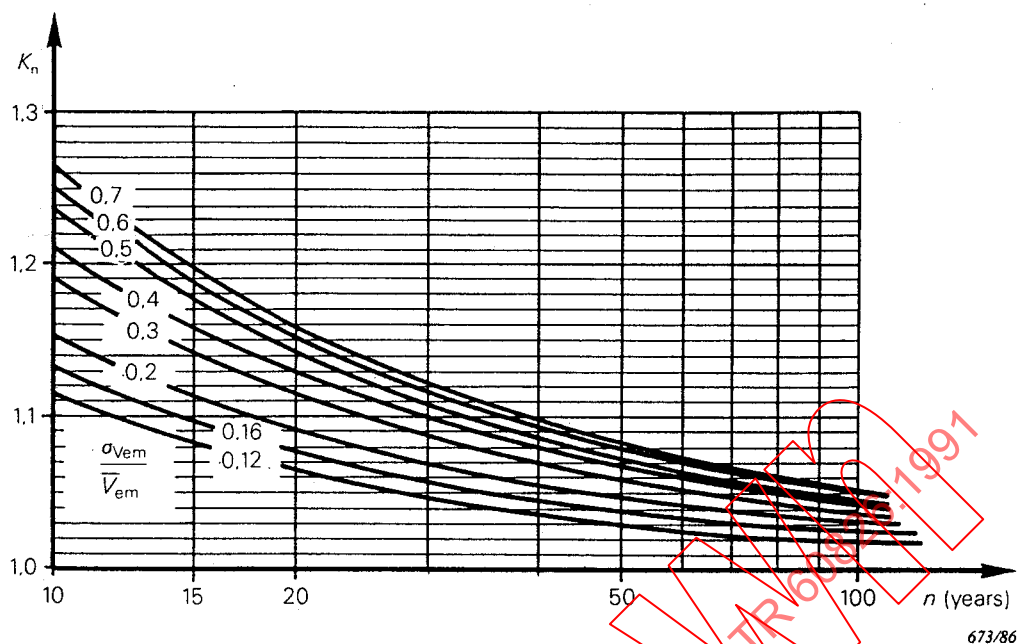


Figure 19 - Factor related to the influence of the number of years with observation of wind combined with ice

3.4.2.2.2 Wet snow

Subclause 3.4.2.2.1 deals with one type of precipitation icing which is freezing rain precipitation. Maximum wind distributions associated with wet snow, the other type of precipitation icing, can be established in a similar manner. The adhesion of the wet snow layer to the conductor depends upon the change in temperature (during and) after the accretion occurs, thus increasing temperature causes lower adhesion, while decreasing temperature may give adhesion nearly as strong as freezing rain. Due to local meteorological conditions and experiences, a range of reduction factors B_i can be found in a similar way as for the freezing rain situation.

3.4.2.2.3 Dry snow

For dry snow, the effect of wind removing the snow is similar to that described in 3.4.2.2.2. The adhesion between conductor and dry snow is, however, smaller than that inferred for wet snow.

3.4.2.2.4 In-cloud icing

For determining maximum wind velocity distributions associated with in-cloud icing, it is necessary to analyze the degree of correlation that exists between the ice weight and the wind velocity. It is, indeed, well known that in the case of in-cloud icing, the accretion is to a large extent controlled by wind velocity. In some areas, on top of a hill, for example, the maximum amount of rime accretion on conductors coincides with the maximum wind velocity associated with in-cloud icing.

Dans de nombreux autres sites, le dépôt de givre par brouillard est associé avec des vitesses de vent relativement faibles mais peut durer très longtemps, parfois pendant de nombreux jours; le poids du givre dépend alors de la durée de la période de givrage.

Si la température ambiante se maintient en dessous de 0 °C pendant plusieurs semaines, le givre déposé sur les conducteurs peut ne pas fondre entre deux périodes de givrage par brouillard. Les conducteurs givrés seront alors soumis à des vents dont la vitesse n'est pas forcément corrélée avec le givrage par brouillard.

Pour des lignes aériennes en projet, susceptibles d'être soumises au brouillard givrant, il est important de rassembler, sur des sites types, les informations météorologiques principales, telles que accumulation et forme du dépôt de givre, vitesse du vent, température de l'air. Certaines informations peuvent également être obtenues à partir des mesures météorologiques en altitude (ballons) ou d'observations dans des stations synoptiques. Il est important également d'étudier avec soin le tracé de la ligne en projet afin de localiser les tronçons très exposés aux nuages porteurs de gouttelettes d'eau en surfusion. On choisira, autant que possible, des variantes de tracé abritées des brouillards les plus givrants, les effets du givrage sur la végétation constituant un bon guide pour le choix du tracé de la ligne (voir annexe J).

3.4.2.3 Détermination des coefficients de traînée des conducteurs givrés

La mesure sur le terrain constitue la meilleure approche pour déterminer les coefficients de traînée et de portance des conducteurs givrés. A l'heure actuelle, on ne dispose que de très peu de mesures de ce type car il n'existe pas de détecteurs simples. Il en résulte que les distributions statistiques des coefficients de traînée et de portance ne sont pas encore connues.

Tant que l'on ne dispose pas de données statistiques sur les valeurs effectives des coefficients de traînée et des densités, il est suggéré, en l'absence des valeurs expérimentales, d'utiliser les valeurs données ci-dessous dans le tableau 19.

Tableau 19 - Coefficients de traînée des conducteurs recouverts de givre

	Neige collante	Givre léger	Givre compact	Glace
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

Ces coefficients de traînée effectifs sont des coefficients multiplicateurs qui permettent de se ramener à une forme cylindrique équivalente en volume de givre (voir figure 20).

In many other areas, in-cloud ice accretion is related to relatively low wind speed but can last for long periods, sometimes for many days; ice weight is then controlled by the duration of the icing situations.

If the air temperature remains below freezing for several weeks, rime on conductors may not melt between two in-cloud icing situations. Ice-covered conductors will then be exposed to wind speeds not necessarily associated with in-cloud icing situations.

For future overhead lines susceptible to in-cloud icing, it is important to gather, on typical sites, basic meteorological information such as: ice accumulation, wind velocity, air temperature and ice shape. Some information can also be extracted from upper air meteorological measurements (by balloon), along with observation from synoptical stations. It is also important to study carefully proposed line routes in order to identify line sections well-exposed to incoming clouds loaded with supercooled water droplets. Alternative line routes sheltered against severe in-cloud icing should be selected when possible. The effect of icing on vegetation is a good guideline for line routine (see annex J).

3.4.2.3 Determination of the drag coefficients of ice-covered conductors

Field measurement is the best approach to the determination of the drag or lift coefficients of ice-covered conductors. Due to a lack of simple sensing devices, very few such measurements exist at the moment. As a result, statistical distributions of drag or lift coefficients are not yet known.

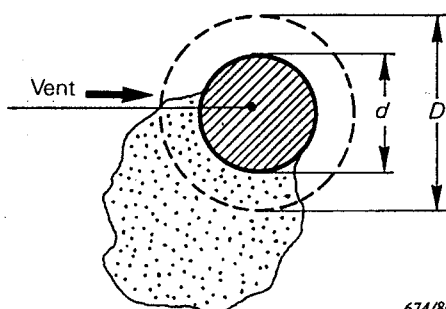
As long as statistical data on the effective drag coefficients and densities are not available, it is suggested, in the absence of other experimental values, that the values given in table 19 should be used.

Table 19 - Drag coefficients 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

The effective drag coefficients give a multiplying factor on an equivalent cylindrical shape for the given ice volume (see figure 20).

Du fait du manque actuel de données, on ne donne qu'une seule valeur de C_{iL} pour les trois niveaux de fiabilité.



- D = diamètre de la forme cylindrique équivalente du manchon de givre (m)
 d = diamètre du conducteur (m)

Figure 20 - Définition du manchon de givre

3.4.2.4 Hypothèse de température

La température à prendre en compte dans les conditions de vent et givre combinés sera de -5°C dans tous les cas de givrage. Cette température représente une valeur moyenne de l'intervalle de température dans lequel le givre peut se déposer.

3.4.3 Pression unitaire du vent sur les conducteurs givrés

En rapport avec 3.2.5, la valeur caractéristique a de l'action unitaire sur les conducteurs, due à un vent soufflant horizontalement et perpendiculairement à la ligne, est donnée par l'expression:

$$a = q_0 C_i G_c \quad (21)$$

$$q_0 = 1/2 \mu V_{iL}^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (22)$$

ou,

$$q_0 = 1/2 \mu V_{iH}^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (23)$$

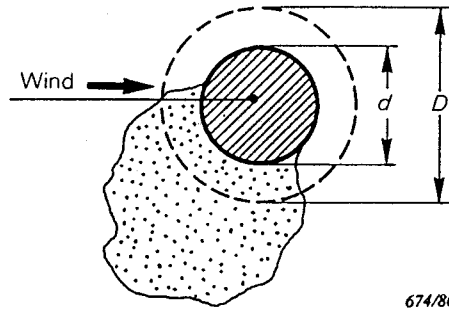
suivant les conditions de charge.

G_c = facteur de vent combiné tel que défini en 3.2.6.1.1.

Dans le cas de charge utilisant V_{iH} , les valeurs de G_c sont dans le sens de la sécurité.

$C_i = C_{iL}$ ou C_{iH} , en conformité avec le type de givrage considéré.

Only one value of C_{iL} is given for the three reliability levels due to the present lack of data.



- D = diameter of the equivalent cylindrical ice shape (m)
 d = conductor diameter (m)

Figure 20 - Definition of cylindrical ice shape

3.4.2.4 Design temperature

The temperature to be assumed in combined wind and ice conditions shall be -5°C for all types of icing. This temperature represents a mean value of the temperature range in which icing can occur.

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

With reference to 3.2.5 the characteristic value a of the unit action on conductors due to wind blowing horizontally and perpendicular to the line is given by the following expression:

$$a = q_0 C_i G_c \quad (21)$$

$$q_0 = 1/2 \mu V_{iL}^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (22)$$

or,

$$q_0 = 1/2 \mu V_{iH}^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (23)$$

dependent on the loading condition.

G_c = global wind factor as defined in 3.2.6.1.1.

For loading cases using V_{iH} , the values of G_c are on the conservative side.

$C_i = C_{iL}$ or C_{iH} appropriate to the type of ice being considered.

3.4.4 Charges appliquées aux supports

L'effort du vent sur un conducteur, dans une portée de longueur L , entraîne un effort A_c appliqué au point de suspension de chacun des supports de cette portée et perpendiculairement à celle-ci est obtenu par la formule suivante:

$$A_c = q_0 C_i G_c D \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (24)$$

pour les trois conditions de charge proposées dans le tableau 16, l'effort du vent sur les conducteurs givrés sera:

Condition 1:

$$A_{c1} = \frac{1}{2} \mu V_{iH}^2 C_{iH} G_c D_L \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (N) \quad (25)$$

$$D_L = \sqrt{d^2 + \frac{4g_L}{9,81 \pi \delta_1}} \quad (m) \quad (26)$$

Condition 2:

$$A_{c2} = \frac{1}{2} \mu V_{iL}^2 C_{iH} G_c D_{H1} \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (N) \quad (27)$$

$$D_{H1} = \sqrt{d^2 + \frac{4g_H}{9,81 \pi \delta_1}} \quad (m) \quad (28)$$

Condition 3:

$$A_{c3} = \frac{1}{2} \mu V_{iH}^2 C_{iL} G_c D_{H2} \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (N) \quad (29)$$

$$D_{H2} = \sqrt{d^2 + \frac{4g_H}{9,81 \pi \delta_2}} \quad (m) \quad (26)$$

D_L , D_{H1} et D_{H2} = diamètres des formes cylindriques équivalentes pour les types de givrage considérés

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

δ_1 = densité la plus forte pour le type de givre considéré (kg/m^3)

δ_2 = densité la plus faible pour le type de givre considéré (kg/m^3)

Ω = angle d'incidence du vent par rapport à l'axe de la ligne

3.4.4 Loads on supports

The effect of wind upon a conductor (A_c), with a span of length L , applied at the suspension point on each support of this span and perpendicular to the span, is given by the following expression:

$$A_c = q_0 C_i G_c D \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (24)$$

for the three loading conditions recommended in table 16, the wind force on ice-covered conductors will be:

Condition 1:

$$A_{c1} = \frac{1}{2} \mu V_{iH}^2 C_{iH} G_c D_L \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (N) \quad (25)$$

$$D_L = \sqrt{d^2 + \frac{4g_L}{9,81 \pi \delta_1}} \quad (m) \quad (26)$$

Condition 2:

$$A_{c2} = \frac{1}{2} \mu V_{iL}^2 C_{iH} G_c D_{H1} \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (N) \quad (27)$$

$$D_{H1} = \sqrt{d^2 + \frac{4g_H}{9,81 \pi \delta_1}} \quad (m) \quad (28)$$

Condition 3:

$$A_{c3} = \frac{1}{2} \mu V_{iH}^2 C_{iL} G_c D_{H2} \frac{L}{2} \sin^2 \Omega \quad (N) \quad (29)$$

$$D_{H2} = \sqrt{d^2 + \frac{4g_H}{9,81 \pi \delta_2}} \quad (m) \quad (26)$$

D_L , D_{H1} , and D_{H2} = diameters of the equivalent cylindrical shapes for the types of ice being considered

g_L and g_H = ice load (N/m)

δ_1 = highest density for type of ice being considered (kg/m^3)

δ_2 = lowest density for type of ice being considered (kg/m^3)

Ω = angle of incidence of the wind in terms of the direction of the line

Dans les trois conditions ci-dessus, l'effort du vent sur les conducteurs sera combiné avec l'effort vertical dû au poids du conducteur et du givre, dans chacune des conditions.

Dans le cas où les contraintes dans les barres du pylône sont critiques, lorsque les charges verticales exercées par les conducteurs sur le support sont les plus faibles, il faut alors tenir compte de l'effet 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.

Les charges combinées de vent et de givre considérées dans ce rapport sont limitées au vent sur conducteurs givrés; si nécessaire, le vent sur supports et sur isolateurs givrés pourrait être traité de façon similaire, en portant une attention particulière aux coefficients de traînée.

3.5 Charges de construction et d'entretien

3.5.1 Généralités

Les règlements nationaux et/ou les règles de construction donnent généralement les mesures de sécurité minimales relatives à la sécurité publique.

Ce paragraphe couvre les charges appliquées aux supports des lignes aériennes pendant la construction et l'entretien de ces lignes.

Il est nécessaire d'être particulièrement attentif pendant les travaux de construction et d'entretien car ce sont des occasions où toute défaillance d'un élément de ligne est le plus susceptible de provoquer blessures ou mort d'homme.

Etant donné que le risque d'accident mortel ne peut pas être relié à la fiabilité de la ligne, il n'est pas question de niveau de fiabilité. Les règles de construction et de maintenance devront être établies de manière à éliminer les efforts inutiles et temporaires qui, sinon, nécessiteraient un renforcement coûteux des supports.

Les supports conçus pour tenir des surcharges de givre et pour limiter les ruptures seront, dans de nombreux cas, suffisamment résistants pour supporter les surcharges apparaissant lors des opérations normales de construction ou de maintenance.

Par contre, les supports calculés pour des régions sans givre peuvent être soumis aux charges les plus contraignantes pendant la construction ou l'entretien.

Les vents qui peuvent être tolérés pendant ces opérations auront un effet négligeable sur les structures et de telles charges de vent pourront être négligées car elles compliqueraient les calculs et les essais.

La résistance des supports sera vérifiée par des essais (voir CEI 652) ou par le calcul, pour les cas de charges indiqués ci-après, correspondant à la construction et à l'entretien.

The wind force on conductors for the three conditions above would be coincident with the vertical load exerted by the weight of conductor and ice for each condition.

Where support member stresses are critical, for lower conductor vertical loads at the supports, the effect 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.

Combined wind and ice loadings considered in this report are restricted to wind on ice-covered conductors; wind on ice-covered supports and insulators can, if necessary, be treated similarly with special attention to drag coefficients.

3.5 Loads for construction and maintenance

3.5.1 *General*

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

This subclause covers the loads applied to the support of overhead lines during construction and maintenance of overhead lines.

Special care is required during construction and maintenance operations as these are the occasions when failure of a line component is most likely to cause injury or loss of life.

There is no question of reliability level because the risk of loss of life cannot be related to the reliability of the line. Construction and maintenance practices should be regulated to eliminate unnecessary and temporary loads which would otherwise demand expensive reinforcing of the supports.

Supports designed for icing conditions and failure containment will, in many cases, be strong enough to withstand normal construction and maintenance overloads.

Supports for ice-free areas may be subjected to some of their most severe loads during construction and maintenance.

The winds that can be tolerated during construction and maintenance operations will have negligible effect on the structures and such minor wind loads should be omitted as unnecessary complications in analysis and testing.

The strength of the supports corresponding to the following construction and maintenance loads should be verified either by testing (see IEC 652) or by calculation.

3.5.2 *Levage des supports*

Les méthodes de levage imposent fréquemment des efforts dynamiques et dissymétriques. La résistance mécanique de tous les points de levage et de tous les éléments du support devra 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 si les opérations de levage sont parfaitement contrôlées.

3.5.3 *Déroutage et réglage*

3.5.3.1 Tension des câbles

Les opérations normales de déroulage et de réglage des conducteurs et des câbles de garde peuvent produire des tensions dans les câbles et par conséquent des charges dans les supports pouvant dépasser celles qui étaient prévues pour le réglage.

L'opération de déroulage crée des à-coups de tension momentanés, par exemple lorsque les manchons ou les palonniers de traction des conducteurs s'accrochent dans les poulies de déroulage ou bien lorsque la dérouleuse ou la freineuse ne fonctionne pas d'une façon uniforme.

Lorsque le câble est sur les poulies, la tension sera plus élevée au sommet d'un long tronçon incliné en cours de déroulage. De plus, la technique normale de réglage d'un tronçon de plusieurs kilomètres entraîne une succession de paliers de surcharge et de détente.

Afin de garantir une résistance convenable, il est recommandé d'utiliser, dans le calcul des charges appliquées aux structures, des tensions de câbles égales au moins à deux fois les tensions de réglage pour les câbles en cours de déroulage et 1,5 fois pour les câbles en place.

Les tensions seront calculées à la température minimale pour laquelle le déroulage et le réglage sont permis.

Dans ce qui suit, on donne des exemples de charges simulant les efforts se produisant pendant le déroulage et le réglage.

3.5.3.2 Efforts verticaux

Toute augmentation de la tension des conducteurs fera croître au niveau d'un support la composante verticale de la charge (créée par l'angle du conducteur dans un plan vertical). Cela peut concerner particulièrement les pylônes situés au sommet d'un canton de déroulage long et incliné.

Cet angle dans le plan vertical sera également d'autant plus élevé que l'emplacement du matériel de traction ou des ancrages provisoires du conducteur sera plus près de la structure.

La charge supplémentaire appliquée aux supports peut être calculée à partir des angles verticaux et des tensions de câbles données en 3.5.3.1 dans toutes les combinaisons, avec charge et sans charge sur les différents points d'accrochage, représentant la séquence de déroulage des câbles.

3.5.2 Erection of supports

Erection procedures frequently impose dynamic and unbalanced loads. The strength of all lifting points and of all components should be verified for at least twice the static loads produced by the proposed erection method.

A factor of 1,5 may be used if the operations are carefully controlled.

3.5.3 Construction stringing and sagging

3.5.3.1 Conductor tensions

The normal operations of stringing and sagging the conductors and earth wires can produce wire tensions and consequently loads in the structure that may exceed those of the intended sagging tensions.

The stringing operation is subject to momentary surges of tension as joints or running boards can catch in the stringing sheaves, or the tensioning pullers or brakes can behave erratically.

While the wire is in the sheaves, the tension will be higher at the top of a long inclined stringing section. In addition, the usual technique of sagging a section of several kilometers requires a sequence of steps of overstressing and relaxing.

In order to ensure adequate strength, it is recommended that in the calculation of loads on the structures, wire tensions of at least twice the sagging tensions be used for wires being moved and 1,5 times for all wires in place.

The tensions will be calculated at the minimum temperature allowed for stringing and sagging operations.

The following are examples of loads simulating the loads produced during stringing and sagging

3.5.3.2 Vertical loads

Any increase in conductor tension will increase the vertical component of the load produced by the angle in a vertical plane of the conductor at a structure. This may be of particular concern at those towers located at the top of a long inclined stringing section.

The setting of tensioning equipment or temporary conductor anchors close to a structure will increase the vertical angle.

The extra load applied to the structures may be calculated from the vertical angles, with the wire tensions given in 3.5.3.1 in any combination of load and no load at the several support points that represent the wire stringing sequence.

3.5.3.3 Efforts horizontaux

Les supports d'angle devront prouver qu'ils sont capables de supporter les efforts horizontaux produits par les tensions des câbles données en 3.5.3.1.

Bien que l'on puisse rencontrer des vents faibles pendant la construction et l'entretien, leur effet peut être négligé dans les calculs.

3.5.3.4 Efforts longitudinaux sur les supports d'ancrage provisoire

Les structures utilisées comme supports d'arrêt sec pendant le déroulage et le réglage devront prouver qu'elles sont capables de résister aux efforts longitudinaux résultant des tensions de réglage données en 3.5.3.1, dans les combinaisons: avec effort - sans effort, sur les différents points d'accrochage représentant les séquences de déroulage des câbles. De tels supports peuvent être renforcés par des haubans provisoires pour obtenir la résistance longitudinale nécessaire.

Les haubans augmenteront alors les efforts verticaux aux points d'accrochage. S'ils sont utilisés sur un support rigide, il pourra être nécessaire de leur donner une tension mécanique préalable. Il faudra donc contrôler la tension dans les haubans et prendre en compte les surcharges verticales ainsi appliquées aux points d'accrochage.

3.5.3.5 Efforts longitudinaux sur les supports de suspension

Tant que le conducteur est sur poulies de déroulage, un effort longitudinal est appliqué aux supports. Cet effort a une valeur égale au poids unitaire du câble ω , ou du faisceau, multiplié par la différence de hauteur H entre les points bas des portées adjacentes.

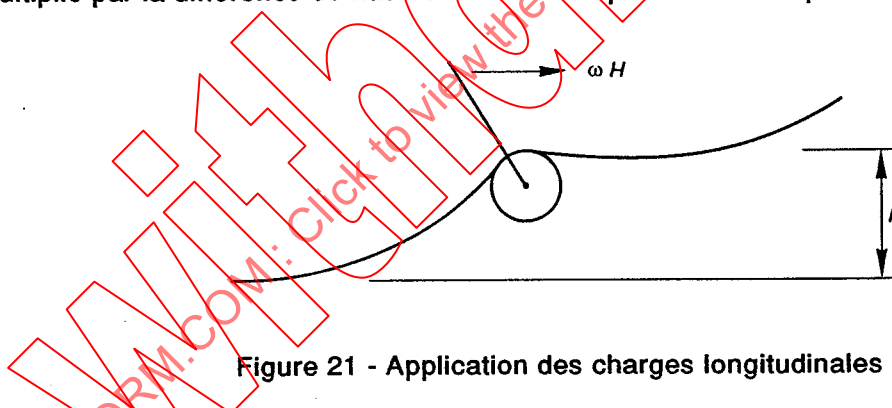


Figure 21 - Application des charges longitudinales

Cet effort sera négligeable et très inférieur aux efforts considérés pour limiter les ruptures, donnés en 3.6.3, sauf pour des portées exceptionnelles.

Dans ce cas on vérifiera que le support peut supporter au moins deux fois cet effort.

Le frottement dans les poulies impose des efforts longitudinaux mais ceux-ci seront négligeables comparés aux efforts nécessaires à la limitation des ruptures.

Au cours d'opérations telles que ancrage des conducteurs au sol, des efforts seront appliqués sur tous les points des conducteurs et devront être pris en compte.

3.5.3.3 Transverse loads

Angle structures should be capable of resisting the transverse loads produced by the wire tensions given in 3.5.3.1.

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

3.5.3.4 Longitudinal loads on temporary dead-end supports

Supports used as dead-ends during stringing and sagging should be capable of resisting longitudinal loads resulting from the sagging tensions given in 3.5.3.1 in any combination of load and no load at the several support points that represent the wire stringing sequences. Such structures may be reinforced by temporary guys to obtain the required longitudinal strength.

These guys will increase the vertical loads at the attachment points and should be prestressed 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.

3.5.3.5 Longitudinal loads on suspension supports

While the conductor is in the stringing sheaves, a longitudinal load is applied to the towers. This load is equal in value to the unit weight of the phase conductor, ω , multiplied by the difference in elevation H of the low points of adjacent spans.

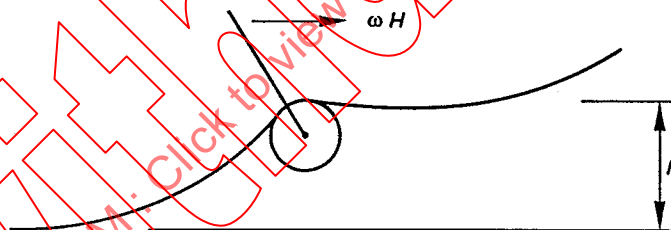


Figure 21 - Application of longitudinal loads

This load will be negligible and much less than the containment loads derived in 3.6.3 except for unusual spans.

In this case it should be verified that the structure can resist at least twice this load.

Sheave friction will impose longitudinal loads but these should be negligible when compared with containment loads.

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

3.5.4 Efforts lors de l'entretien

La dépose d'un conducteur au droit d'un support augmentant l'effort vertical sur les supports adjacents, tous les points d'accrochage des câbles devront démontrer qu'ils sont capables de supporter un effort vertical au moins égal à deux fois celui du câble nu correspondant à la tension de réglage.

Des points provisoires d'accrochage ou de traction voisins des points d'accrochage normaux des conducteurs ou des câbles de garde sont quelquefois utiles pour les travaux d'entretien ou les travaux sous tension. Ces points devront également montrer une capacité à supporter deux fois les efforts appliqués par le câble nu à la tension de réglage.

Le responsable de l'opération d'entretien doit spécifier les modalités de manutention, qui ne devront pas surcharger le support.

Un schéma tel que représenté sur la figure 22a peut être approprié. Le montage adopté sur la figure 22b doublera immédiatement l'effort vertical et est interdit à moins que le support ne démontre qu'il peut supporter au moins quatre fois l'effort vertical créé par le câble nu à la tension de réglage.

Toutes les parties du support qui peuvent supporter un monteur devront prouver, par le calcul, qu'elles sont capables de tenir un effort de 1 500 N appliqué verticalement en leur point milieu, combiné conventionnellement avec les efforts appliqués par les câbles nus en hypothèse de basse température.

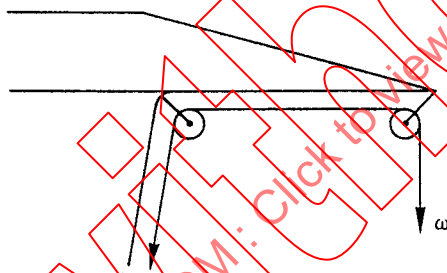


Figure 22a

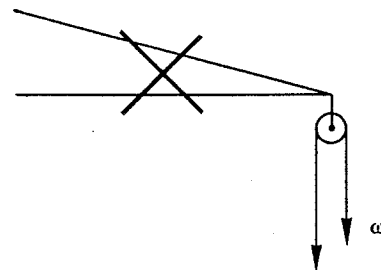


Figure 22b

3.6 Charges pour limitation de défaillance

3.6.1 Généralités

Le but des mesures de sécurité est de minimiser les défaillances en cascades qui pourraient s'étendre bien au-delà du canton défaillant.

Des défaillances peuvent provenir de matériaux ou de main-d'œuvre défectueux ou de surcharges climatiques. Elles peuvent aussi résulter d'événements occasionnels tels que erreur de navigation d'un avion, avalanches, sabotage, etc. qui sont déterministes et ne peuvent faire l'objet d'une analyse de probabilité.

Des cascades peuvent être déclenchées par la défaillance de petits éléments tels que isolateurs, matériels d'équipement, manchons, etc., ainsi que par la défaillance d'éléments majeurs tels que pylônes, fondations et système de conducteur.

3.5.4 Maintenance loads

As the lowering of a conductor at one support increases the vertical load at adjacent supports, all wire support points should be able to resist at least twice the bare wire vertical loads at sagging tensions.

Temporary lift or tension points close to the normal attachment points of phase or earth wires are sometimes useful for maintenance or live line operations. These load points should also be able to resist at least twice the bare wire at sagging tensions.

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

A diagram, such as shown in figure 22a, may be appropriate. The one shown in figure 22b will immediately double the vertical load and is prohibited unless the structure has a verified resistance capacity of at least four times the bare wire vertical load at sagging tension.

All structural members that may be required to support a lineman should, by calculation, be able to support a 1 500 N load, applied vertically at their midpoint, conventionally combined with the stresses derived from the low temperature bare wire assumption.

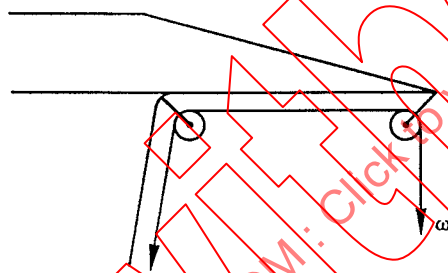


Figure 22a

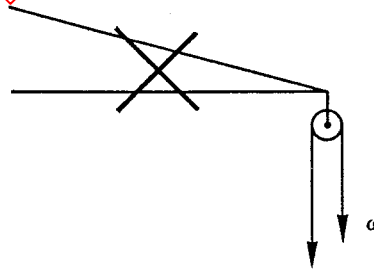


Figure 22b

3.6 Loads for failure containment

3.6.1 General

The objective of security measures is to minimize cascade failures which might otherwise extend well beyond the failed section.

Failures can result from defective material or workmanship or from climatic overloads. They can also result from casual events such as misdirected aircraft, avalanches, sabotage, etc. events which are deterministic and not capable of probabilistic analysis.

Cascades may be triggered by the failure of small items such as insulators, hardware, joints, etc., as well as failure of major elements such as towers, foundations and the conductor system.

On doit limiter ces défaillances pour éviter une extension des dommages. Les mesures de sécurité détaillées ci-dessous prévoient des prescriptions de sécurité minimales et ne donnent qu'une liste des choix possibles chaque fois qu'une augmentation de la sécurité se justifie.

Les charges prescrites en 3.6.3 assurent aux structures conventionnelles en treillis les moyens de minimiser le risque de défaillances en cascade. D'autres types de structures et d'autres matériaux peuvent nécessiter des précautions différentes ou complémentaires.

Il arrive souvent que l'on ne puisse éviter une déformation des structures voisines de la zone d'endommagement par suite de la nature dynamique du problème.

3.6.2 Prescriptions relatives à la sécurité

Ce rapport spécifie des conditions de surcharge spéciales pour protéger les lignes contre les défaillances en cascades.

A moins que l'on utilise des limiteurs de charge spéciaux, les surcharges précisées en 3.6.3 devront être considérées comme les prescriptions minimales applicables à la plupart des lignes de transport.

Dans les cas où une augmentation de la sécurité se justifie ou est nécessaire (par exemple sur des lignes très importantes, traversées de rivières ou lignes exposées à des charges extrêmes dues au givrage), on peut utiliser des mesures ou des surcharges supplémentaires en fonction de la coutume locale et de l'expérience passée. Une liste de ces mesures est donnée en 3.6.3.3.

3.6.3 Charges relatives à la sécurité

3.6.3.1 Effort de torsion

On appliquera à chaque point d'accrochage, pris un par un,¹ de câble de garde ou de phase, la charge statique résiduelle (CSR) résultant de la rupture de toute une phase ou d'un câble de garde dans la portée adjacente. Cette charge (CSR) sera considérée aux températures de réglage sans charge due au vent ou au givrage.

La CSR pour des supports de suspension sera calculée pour des portées moyennes, à la tension de réglage, en tenant compte de la détente due au 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 qui peuvent avoir une influence sur la valeur de cette charge.

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

Les charges correspondant aux tensions de réglage des câbles nus seront appliquées à tous les autres points d'accrochage.

¹ Certaines configurations à plusieurs circuits avec de faibles distances entre phases peuvent conduire à envisager la rupture simultanée de deux (ou plus) phases ou câbles de garde.

Such failures must be contained in order to prevent widespread damage. The security measures detailed below provide for minimum security requirements and a list of options which could be used whenever higher security is justified.

The loads prescribed in 3.6.3 provide conventional lattice structures with the means of minimizing the risk of cascade failures. Other types of structures and other materials may require different or additional precautions.

Some deformation of structures adjacent to the area of damage is frequently unavoidable due to the dynamic nature of the problem.

3.6.2 *Security requirements*

Special loading conditions are specified in this report in order to protect lines from cascading failures.

Unless special load limiting devices are used, the loadings specified in 3.6.3 should 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 extreme ice loads), additional measures or loadings can be used according to local practice and past experience. A list of these measures appears in 3.6.3.3.

3.6.3 *Security related loads*

3.6.3.1 *Torsional load*

At any one¹ earth wire or phase attachment point the relevant residual static load (RSL), if any, resulting from the release of the tension of a whole phase or of an earth wire in an adjacent span should be applied. This load (RSL) should be considered at sagging temperatures without any wind or ice loads.

The RSL for suspension structures should 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 assemblies, deflection or rotation of the structure, foundations, articulated crossarms or articulated supports, and the interaction with other phases 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 requirement may be adjusted accordingly.

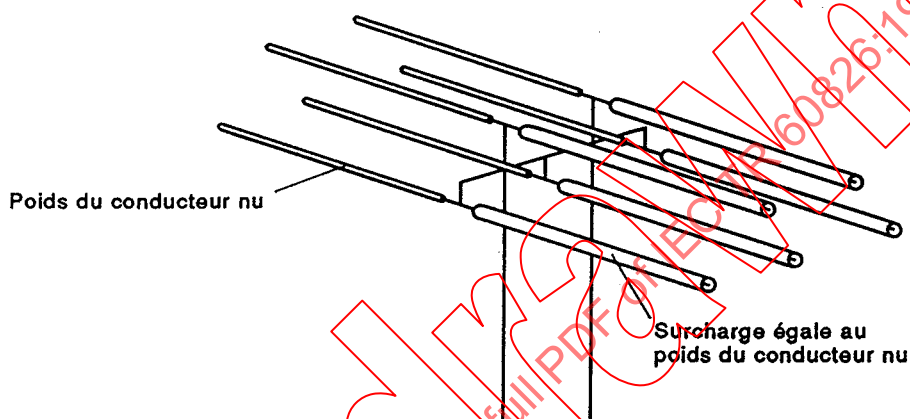
Coincident bare wire loads at sagging tensions shall be applied at all other attachment points.

¹ Some multicircuit arrangements with small interphase spacing may demand consideration of simultaneous release of two (or more) phases or ground wires.

Il faut noter que la détente apparemment très importante produite par des combinaisons de paramètres telles que chaînes d'isolateurs très longues et portées courtes, peut être contrebalancée par des efforts dynamiques supérieurs à la moyenne.

3.6.3.2 Efforts longitudinaux

Des efforts longitudinaux seront appliqués simultanément à tous les points d'accrochage. Ils seront égaux aux efforts dissymétriques résultant de la tension mécanique des câbles nus dans toutes les portées situées d'un côté du support et de l'autre côté par la tension des câbles ayant une surcharge fictive g égale à leur propre poids ω dans toutes les portées. On prendra en compte les portées moyennes des câbles nus à la tension de réglage et on considérera tous les effets de détente appropriés, comme ceux qui ont été mentionnés plus haut en 3.5.3.1.



CEI 356/91

Figure 23

3.6.3.3 Mesures de sécurité supplémentaires

Il peut arriver qu'une sécurité plus élevée soit nécessaire pour des lignes de transport spéciales. Dans ce cas, le concepteur pourra augmenter la sécurité en adoptant quelques unes des prescriptions ci-dessous:

Description:

Augmentation du nombre de points d'accrochage engendrant de la torsion où la CSR est appliquée.

Calcul de la CSR pour des tensions supérieures à la charge quotidienne en utilisant la charge due au vent ou à la glace conjointement avec ce cas de surcharge.

Insertion de pylônes anti-cascades à quelques pylônes d'intervalle (généralement 10). On calculera ces pylônes pour tous les conducteurs coupés à leurs charges limites.

Commentaires:

Recommandé pour les lignes à deux ou plusieurs circuits.

Recommandé pour les structures ou lignes d'ancrages exposées à des conditions climatiques sévères.

A prendre en compte pour des lignes importantes dans des zones exposées à un givrage sévère.

It should be noted that the apparently extreme relaxation produced by such combinations of parameters such as very long insulator assemblies and short spans may be counteracted by higher than average dynamic loads.

3.6.3.2 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 wires in all spans in one direction from the structure and with a fictitious overload g equal to the weight ω of the wires in all spans in the other direction. Average spans will be considered with the bare wires at sagging tension and any appropriate relaxation effects, as mentioned in 3.5.3.1, should be considered.

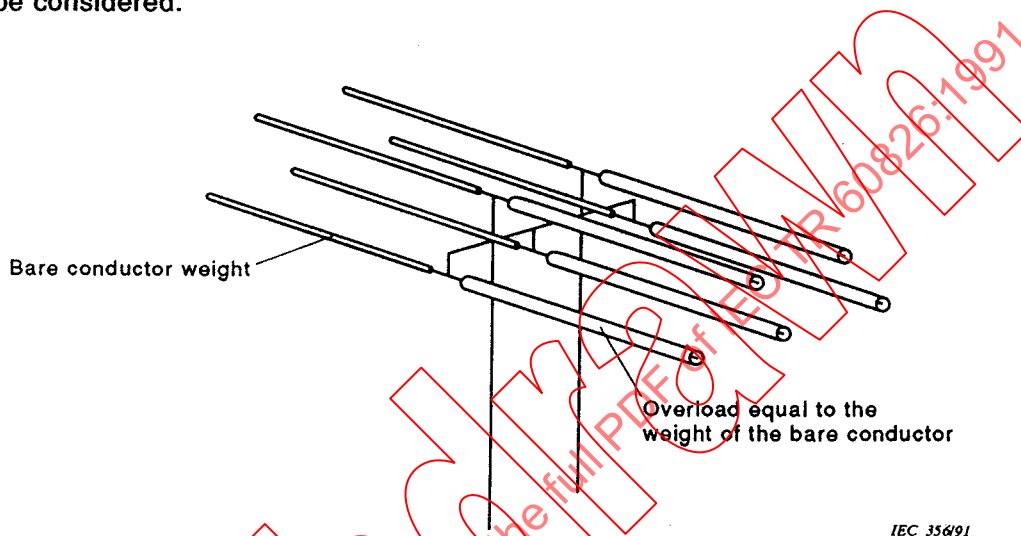


Figure 23

3.6.3.3 Additional security measures

Sometimes, a higher security level could be required for special transmission lines. In this case the designer can increase the security by adopting some of the requirements listed below:

Description:

Increase the number of torsional load points where the residual static load (RSL) is applied.

Calculate the RSL for tensions higher than the every day load by using some wind or ice load in conjunction with this loading case.

Insertion of anticascading towers every few towers (typically 10). These towers will be designed for all broken conductors with limit loads.

Comments:

Advisable for double or multicircuit lines.

Advisable for angle structures or lines subjected to severe climatic conditions.

To be considered for important lines in heavy icing areas.

SECTION 4: RÉSISTANCE DES COMPOSANTS ET ÉTATS LIMITES

4.1 Généralités

L'objet de cette section est de définir les états limites des composants et leur paramètres statistiques communs.

Le comportement structurel des composants exposés à la charge est souvent difficile à décrire de manière simple.

Pour les composants à comportement fragile, la défaillance ou perte de résistance est subite et correspond généralement à une rupture ou séparation complète. Pour d'autres composants, la perte de résistance est progressive. Par exemple, la défaillance d'une fondation grille soumise à l'arrachement n'est pas soudaine, mais commence plutôt par l'apparition de fissures dans le sol environnant dont l'ampleur augmente jusqu'à rupture totale.

On a défini deux résistances limites pour décrire le mécanisme de la perte de résistance des composants: limites d'endommagement et de défaillance. La limite d'endommagement d'un composant correspond à sa limite élastique alors que la limite de défaillance correspond à l'effondrement (ou rupture) complet du composant.

Dans le cas de dépassement de la limite d'endommagement d'un composant, le système de ligne de transport est endommagé, tandis que, dans le cas de dépassement de la limite de défaillance d'un composant, le système est défaillant.

La figure 24 donne l'interprétation graphique de ce qui précède.

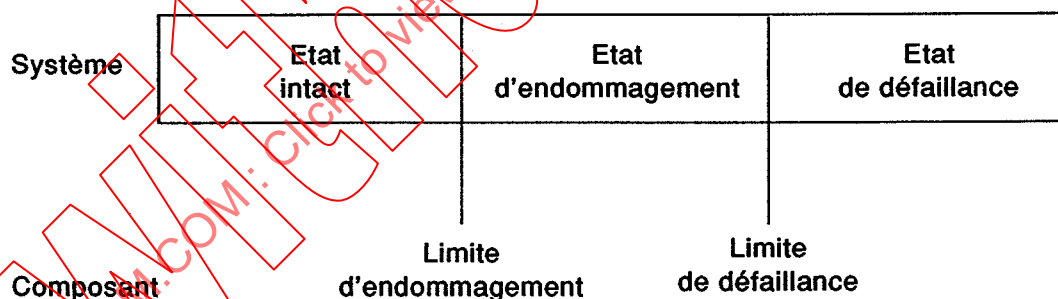


Figure 24 - Schéma des états limites¹

¹ En général, la limite d'endommagement des composants correspond à leur limite élastique. Dans le cas de composants sans limite élastique (ou élongation) définie, tels que ancrage et fondations, on choisit une valeur arbitraire sur la courbe des efforts et des déformations ou sur la courbe des déplacements et des efforts.

Les états limites d'endommagement et de défaillance se rapportent à la fonction de la ligne de transport c'est-à-dire à son aptitude à transporter l'énergie. Dans l'état d'endommagement, la fonction de la ligne peut être altérée alors que, dans l'état de défaillance, il y a généralement une perte complète de la possibilité de transport d'énergie.

Dans certains cas, la déformation (même élastique) d'un seul composant réduit la résistance d'un autre composant auquel il est relié. Dans ce cas, la limite d'endommagement du second composant est déterminée en fonction de la réduction de résistance admissible du premier composant. Par exemple, le mouvement des fondations d'un pylône réduit la résistance du pylône supporté (particulièrement sur des structures statiquement indéterminées). Par conséquent, on détermine les limites d'endommagement et de défaillance des fondations conjointement à celles des pylônes.

SECTION 4: STRENGTH OF COMPONENTS AND LIMIT STATES

4.1 General

The object of this section is to define limit states of lines components and their common statistical parameters.

The structural behavior of components subjected to load is often difficult to describe in a simple manner.

In brittle components, the failure or loss of strength is sudden and usually corresponds to rupture or complete separation. In other components, loss of strength is a progressive mechanism. For example, a grillage foundation subjected to uplift does not fail suddenly, but rather starts to develop cracks in the surrounding soil which increase in magnitude until complete pullout occurs.

In order to describe the mechanism of loss of strength of components, two strength limits are defined: damage and failure limits. The damage limit of a component corresponds to its elastic limit while the failure limit corresponds to the complete collapse or rupture of the component.

If the damage limit of a component is exceeded, the transmission line system is in a damaged state, while, if the failure limit of a component is exceeded, the system is in a failure state.

The graphical interpretation of the above is shown in figure 24.

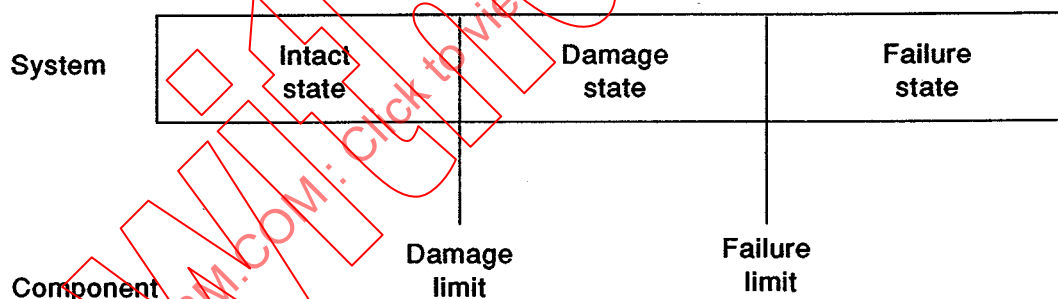


Figure 24 - Diagram of transmission line system¹

¹ In general, the damage limit of components corresponds to their elastic limit. In the case of components without a definite elastic (or yield) limit, such as anchors and foundations, an arbitrary value is chosen on the stress-strain curve or the load displacement-curve.

Damage and failure limit states are related to the function of the transmission line: i.e. power transmission capability. In the damage state, the line function could be impaired while in the failure state, there is usually a complete loss of power transmission capability.

In some cases, the deformation (even elastic) of one component reduces the strength of another component to which it is connected. In such a case, the damage limit of the second component is established according to an acceptable strength reduction of the first component. For example, movement of tower foundations reduces the strength of the supported tower (especially statically indeterminate structures). Therefore the damage and failure limits of foundations are established in conjunction with those of towers.

4.2 Composants des systèmes de lignes de transport

Un système de transport est divisé en quatre composants majeurs comme le montre la figure 25. Chaque composant est, à son tour, divisé en éléments.

Système	Composants	Eléments
---------	------------	----------

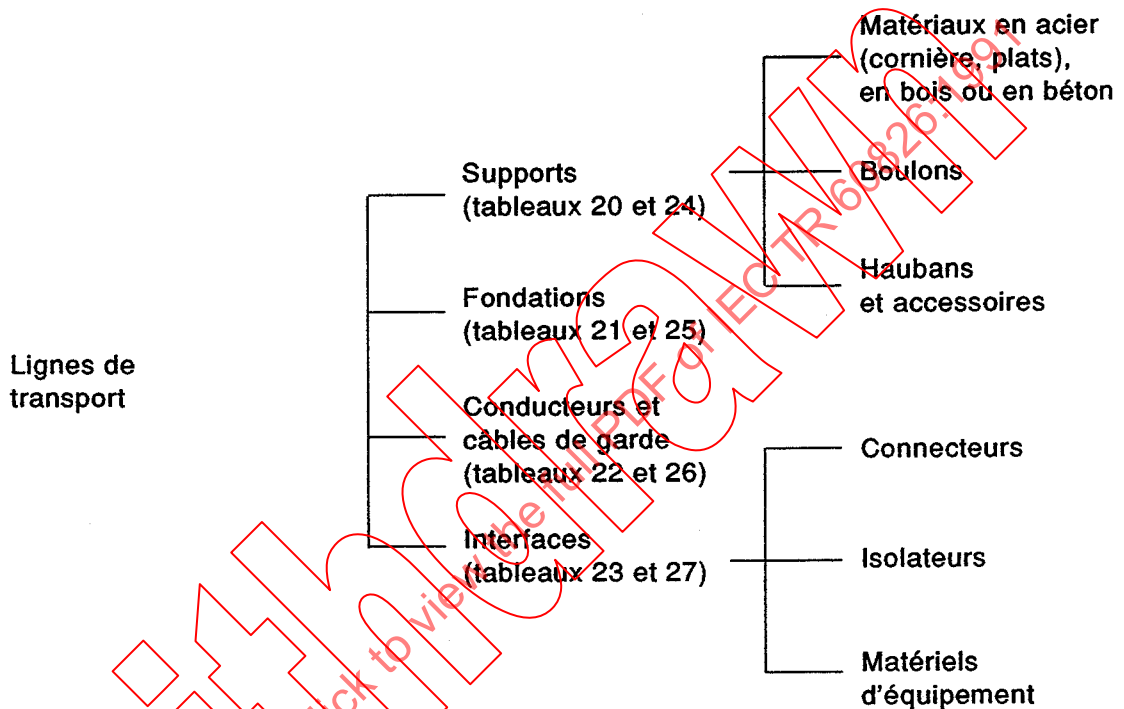


Figure 25 - Schéma d'un système de ligne de transport

4.3 Etats limites des composants de ligne

Sur la base des concepts discutés dans ce rapport les tableaux 20 à 23 donnent les limites d'endommagement et de défaillance des composants de ligne.

Ces états limites constituent des exemples et une base pour les normes nationales que l'on pourra améliorer en incorporant des données et l'expérience locales. En l'absence de données ou d'expérience appropriée, les valeurs données dans les tableaux ci-après constituent des limites de calcul admissibles.

Ces tableaux devront être revus lorsque l'on disposera de nombreuses données sur, par exemple, les isolateurs composites, les supports en béton ou en aluminium.

4.2 Components of transmission line systems

A transmission system is divided into four major components as shown in figure 25. Subsequently, each component is divided into elements.

System	Components	Elements
--------	------------	----------

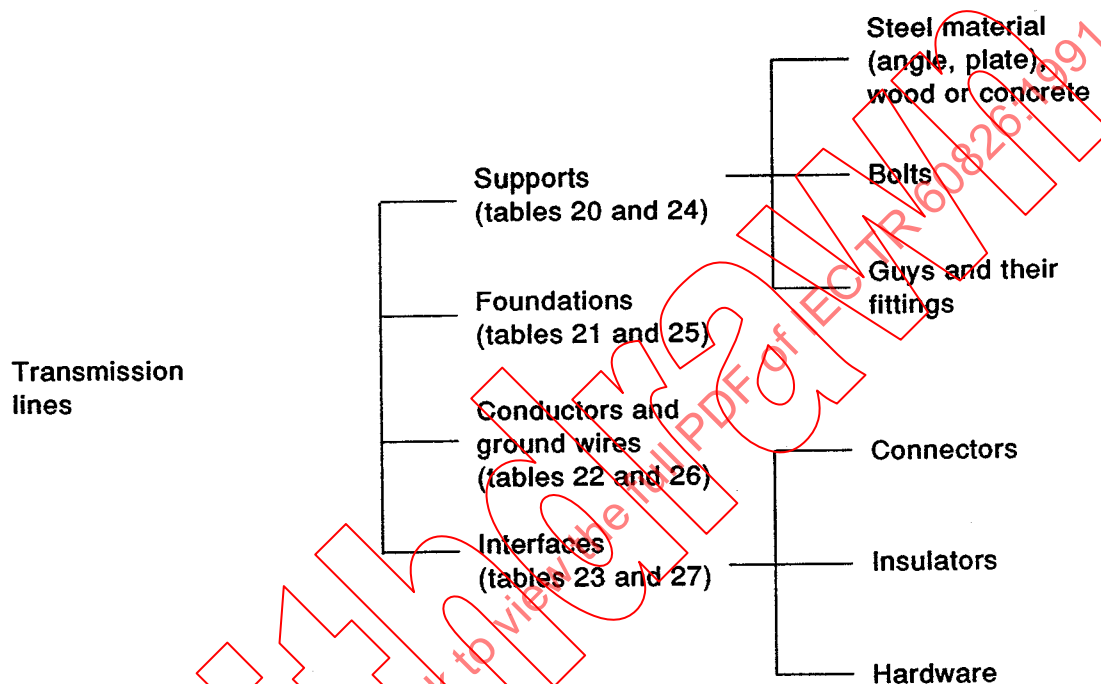


Figure 25 - Diagram of a transmission line diagram

4.3 Limit states of line components

Based on the concepts discussed in this report, damage and failure limits of line components are given in tables 20 to 23.

These limit states constitute examples and bases for national standards which can be further improved through incorporating local data and experience. In the absence of relevant data or experience the values given in the following tables constitute acceptable design limits.

These tables will need to be revised when a large amount of data dealing, for instance, with composite insulators, concrete or aluminium towers, becomes available.

4.4 Données sur la résistance des composants de ligne

Les composants de ligne ont été soumis à des essais intensifs dans le monde entier. On a déduit de ces essais les paramètres statistiques types. Pour des raisons pratiques, on peut supposer que la fonction de densité normale est applicable aux composants de ligne.

Les tableaux 24 à 27 donnent les états limites de composants de ligne par rapport à la résistance moyenne $\bar{R}$ et à la dispersion v_R moyennes.

On obtiendra théoriquement les paramètres de résistance nécessaires aux calculs à partir d'essais¹ réalisés sur des composants. Toutefois, des essais de routine peuvent être coûteux ou même impossibles pour certains composants. Dans ce cas, on pourra utiliser les données figurant aux tableaux 24 à 27 dans la mesure où les concepteurs estiment pouvoir appliquer ces données à leur cas particulier.

¹ Pour des composants présentant une grande dispersion de résistance tels que les fondations, on devra encourager la réalisation d'essais.

4.4 Strength data of line components

Line components have been tested extensively throughout the world. From these tests, typical statistical parameters have been derived. For practical considerations, the normal density function can be assumed adequate for line components.

Tables 24 to 27 give limit states of line components in relation to the average strength $\bar{R}$ and dispersion v_R .

Ideally, the strength parameters needed for design purposes should be obtained from tests¹ performed on components. However, routine testing can be expensive or even impracticable for some components. In such cases, the data given in tables 24 to 27 could be used as long as designers have confidence that such data apply to their particular situation.

¹ For components having a large dispersion in strength, such as foundations, there should be an incentive measure to perform tests on these components.

Tableau 20 - Limite d'endommagement et de défaillance des supports

Supports			Limite d'endommagement	Limite de défaillance
Type de support	Matériaux ou éléments	Mode de chargement		
Pylônes en treillis (y compris pylônes haubanés)	Tous éléments sauf haubans	Tension Cisaillement Compression (flambage)	Limite élastique 90 % de la limite de cisaillement (élastique) Déformation non élastique** de L/500 à L*/100	Contrainte de rupture limite Effort de cisaillement (rupture) Effondrement par instabilité
	Haubans d'acier	Traction	Valeur la plus faible de: - limite élastique (70 % à 75 % CRN) - déformation correspondant à une diminution de 5 % de résistance du pylône - nécessité de régler la tension	Charge de rupture nominale (CRN)
Poteaux	Acier	Moments	Déformation non élastique de 1 %* au sommet ou déformation élastique pouvant modifier les distances	Flambage local par compression ou contrainte de rupture limite en traction
		Compression (flambage)	Déformation non élastique de L/500 à L/100	Effondrement par instabilité
	Bois	Moments	Déformation non élastique de 3 %* au sommet	Contrainte de rupture limite
		Compression (flambage)	Déformation non élastique de L/500 à L/100	Effondrement par instabilité
	Béton	Charges permanentes et charges non permanentes	Fissuration*** après relâchement de la charge ou Déformation non élastique de 0,5 %	Effondrement du poteau
* Se réfère à la longueur du composant. ** La déformation des éléments en compression est la flèche maximale depuis la ligne joignant les points extrêmes. Pour les éléments soumis à des moments, elle représente le déplacement de l'extrémité libre par rapport à la verticale. *** La largeur de la fissure est sujette à accord entre fournisseur et acheteur.				

Table 20 - Damage and failure limits of supports

Supports			Damage limit	Failure limit
Support type	Material or elements	Loading mode		
Lattice tower (including guyed towers)	All elements except guys	Tension Shear Compression (buckling)	Yield (elastic) stress 90 % (elastic) shear stress Non-elastic deformation** from $L/500$ to $L^*/100$	Ultimate tensile (breaking) stress Shear (breaking) stress Collapse by instability
	Steel guys	Tension	Lowest value of: – yield stress (70 % to 75 % UTS) – deformation corresponding to a 5 % reduction in the tower strength – need to readjust tension	Ultimate tensile stress
Poles	Steel	Moments	1 %* non-elastic deformation at the top, or elastic deformation that can impair 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 loads and non-permanent loads	Crack*** opening after release of load or 0,5 % non-elastic deformation	Collapse of the pole
* Length of the element. ** The deformation of compression elements is the maximum sag from the line jointing end points. For elements subjected to moments, it is the displacement of the free end from the vertical. *** The width of crack opening is subject to agreement between manufacturer and purchaser.				

Tableau 21 - Limites d'endommagement et de défaillance des fondations

Fondations			Limite d'endommagement 1)	Limite de défaillance
Type de fondation	Type de Pylône	Mouvement isostatique 3)		
Arrachement	Haubannés	Oui	Nécessité de régler la tension des haubans	Souèvement excessif (de l'ordre de 5 cm à 10 cm)
		Non	Réduction de 5 % de résistance des supports	
	Auto-portant	Oui	Rotation de 1° du pylône	
		Non	Déplacement vertical différentiel allant de B/300 à B/500 2) avec un maximum de 2 cm 4)	
Compression	Tous types	Oui	Déplacement correspondant à une diminution de 5 % de la résistance du support	Tassement excessif (de l'ordre de 5 cm à 10 cm)
		Non	Déplacement vertical différentiel allant de B/300 à B/500 avec un maximum de 2 cm	
Moment (rotation)	Poteaux	Oui	Rotation de 1°	Rotation excessive (de l'ordre de 5°)
		Non	Rotation correspondant à une augmentation de 10 % du moment due à l'excentricité	

1) Tenant compte de l'interaction entre pylône et fondations.

2) B étant la distance horizontale entre fondations.

3) Un mouvement isostatique est celui qui n'induit pas d'efforts internes sur la structure. Par exemple, le déplacement d'une fondation d'une structure à trois pieds est un mouvement déterminé alors que le déplacement d'une fondation d'une structure à quatre pieds est un mouvement indéterminé.

4) Certaines fondations rigides (par exemple: pieu) peuvent nécessiter des limites plus basses.

Table 21 - Damage and failure limits of foundations

Foundations			Damage limit ¹⁾	Failure limit
Foundation type	Tower type	Statically determinate movement ³⁾		
Uplift	Guyed	Yes	Need to readjust tension in guys	Excessive settlement (to the order of 5 cm to 10 cm)
		No	5 % reduction in support strength	
	Self-supporting	Yes	1 ° rotation of the tower	
		No	Differential vertical displacement equal to B/300 to B/500 ²⁾ with a maximum of 2 cm ⁴⁾	
Compression	All types	Yes	Displacement corresponding to a 5 % reduction in the support strength	Excessive settlement (to the order of 5 cm to 10 cm)
		No	Differential vertical displacement equal to B/300 to B/500 with a maximum of 2 cm	
Moment (rotation)	Poles	Yes	1° rotation	Excessive rotation (to the order of 5°)
		No	Rotation corresponding to a 10 % increase in the total moment due to eccentricity	

1 Takes into account the interaction between the tower and its foundation.

2 B is the horizontal distance between foundations.

3 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 structure is a determined movement, while the displacement of one foundation of a four-legged tower is an indetermined movement.

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

Tableau 22 - Limite d'endommagement et de défaillance des conducteurs et câbles de garde

Conducteurs et câbles de garde	Limite d'endommagement	Limite de défaillance
Tous types (composé, homogène ou acier)	Valeur la plus faible de: - Limite de vibration* ou efforts dynamiques ou - Diminution des distances dans l'air critiques définie par les réglementations concernées - 75 % de la résistance caractéristique ou de la CRN** (valeur normale entre 70 % et 80 %)	Charge de rupture limite
* Des vibrations non contrôlées peuvent entraîner une défaillance ** CRN = Charge de Rupture Nominale		

Tableau 23 - Limite d'endommagement et de défaillance de composants d'interface

Type de composants d'interface	Limite d'endommagement *	Limite de défaillance
Connecteurs de câble • accessoires d'ancrage et de jonction • accessoires de suspension	Déformation permanente inadmissible ** (y compris glissement)	Rupture
Isolateurs (porcelaine et verre)	70 % de la résistance nominale ou ailette cassée (verre uniquement)	Rupture de tige, capot, ciment ou ailette
Autres matériels d'équipement	Déformation permanente inadmissible **	Rupture de matériels d'équipement ou cisaillement des boulons
* Normalement, les matériels d'équipement sont conçus de manière à réduire ou à éliminer l'usure. Le calcul doit tenir compte d'une usure prévue par suite d'un contact ponctuel. Dans ce cas, la limite d'endommagement devient le dépassement de l'usure prévue. ** La déformation permanente inadmissible des matériels d'équipement peut être définie comme l'état dans lequel ceux-ci ne peuvent pas être démontés facilement.		

Table 22 - Damage and failure limits of conductors and ground wires

Conductors and ground wires	Damage limit	Failure limit
All types (composite, homogeneous or steel)	Lowest of: – vibration limit* or dynamic stresses or – The infringement of critical clearances defined by appropriate regulations – 75 % of the characteristic strength or RTS** (normal range is 70 % and 80 %)	Ultimate tensile stress
* If vibration is not controlled, it may also lead to failure ** RTS = Rated Tensile Strength		

Table 23 - Damage and failure limits of interface components

Type of interface components	Damage limit *	Failure limit
Cable connectors • 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
Hardware	Unacceptable permanent deformation**	Rupture of hardware or shear of bolts
* Normally, hardware is 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. ** Unacceptable permanent deformation of hardware can be defined as the state where the hardware cannot easily be taken apart.		

Tableau 24 - Paramètres de résistance des supports

			Limite d'endommagement	Limite de défaillance	
				R_c^{**}	V_r
Pylônes en treillis		Contrôle de très bonne qualité*	Identique à la limite de défaillance	$0,94 \bar{R}$	5 %
		Contrôle de bonne qualité		$0,90 \bar{R}$	7,5 %
		Contrôle de qualité moyenne		$0,87 \bar{R}$	10 %
Poteaux	Bois		A déduire du tableau 20	$0,74 \bar{R}$	20 %
	Béton	Contrôle de très bonne qualité Contrôle de bonne qualité		$0,87 \bar{R}$ $0,74 \bar{R}$	10 % 20 %
	Acier			$0,94 \bar{R}$	5 %
* Se rapporte au contrôle de qualité lors de la fabrication et du montage. ** Dans ce tableau, R_c est supposé correspondre à la limite d'exclusion à 10 % c'est-à-dire $R_c = \bar{R} (1 - 1,28 v_R)$.					

Tableau 25 - Paramètres de résistance des fondations
(en arrachement)*

Type de fondations	COV typique v_R	Limite d'endommagement	Limite de défaillance**	
			$\bar{R}$	R_c
Poids massifs, parpaings en béton	5	La limite d'endommagement est particulière à chaque état limite selon le tableau 21	$1,07 R_c$	$0,94 \bar{R}$
Ancrages rocheux injectés	10		$1,15 R_c$	$0,87 \bar{R}$
Fondations avec redan	15		$1,24 R_c$	$0,81 \bar{R}$
Remblai compacté	20		$1,34 R_c$	$0,74 \bar{R}$
Fondations sur pieu	25		$1,47 R_c$	$0,68 \bar{R}$
Remblai non compacté	30		$1,62 R_c$	$0,62 \bar{R}$

* On n'a pas cité de valeur de résistance particulière pour couvrir les fondations travaillant en compression. Toutefois, pour des raisons de simplicité, on peut considérer les dispersions comme identiques à celles travaillant à l'arrachement.

** R_c est supposé correspondre à la limite d'exclusion de 10 % de R .

Table 24 - Strength parameters of supports

			Damage limit	Failure limit	
				R_c^{**}	V_f
Lattice towers		Very good quality control* Good quality control Average quality control	Identical to failure limit	$0,94 \bar{R}$ $0,90 \bar{R}$ $0,87 \bar{R}$	5 % 7,5 % 10 %
Poles	Wood		To be derived from table 20	$0,74 \bar{R}$	20 %
	Concrete	Very good quality control Good quality control		$0,87 \bar{R}$ $0,74 \bar{R}$	10 % 20 %
	Steel			$0,94 \bar{R}$	5 %

* Refers to the quality control in fabrication and erection.

** In this table, R_c is assumed conservatively to correspond to 10 % exclusion limit, i.e. $R_c = \bar{R} (1 - 1,28 v_R)$.

Table 25 - Strength parameters of foundations (in uplift)*

Foundation type	Typical COV v_R	Damage limit	Failure limit **	
			$\bar{R}$	R_c
Dead weight, concrete block	5	Damage limit is particular to each limit state as per table 21	$1,07 R_c$	$0,94 \bar{R}$
Grouted rock anchors	10		$1,15 R_c$	$0,87 \bar{R}$
Foundations with under cut	15		$1,24 R_c$	$0,81 \bar{R}$
Well-compacted backfill	20		$1,34 R_c$	$0,74 \bar{R}$
Pile foundation	25		$1,47 R_c$	$0,68 \bar{R}$
Uncompacted backfill	30		$1,62 R_c$	$0,62 \bar{R}$
* No special strength values were produced to cover compression foundations, however, for simplicity, dispersion can be considered identical to uplift. ** In this table, R_c is conservatively assumed to correspond to 10 % exclusion limit of R.				

Tableau 26 - Paramètres de résistance de composants d'interface

Type d'interface	Limite d'endommagement	Limite de défaillance	
		R_c	v_R
Isolateurs (verre et porcelaine)	$0,60 \overline{R}$	$(1 - 3 v_R) \overline{R} *$	3 % à 6 %
– capot et tige type		$0,85 \overline{R}$	5 %
Matériels d'équipement	$0,60 \overline{R}$	$(1 - 3 v_R) \overline{R}$	4 % à 8 %
– type		$0,85 \overline{R}$	5 %
* On peut trouver la valeur de 3σ dans la CEI 383 pour les isolateurs verre et porcelaine.			

Tableau 27 - Paramètres de résistance des conducteurs et câbles de garde

Type d'interface	Limite d'endommagement	Limite de défaillance	
		R_c	v_R
Conducteurs et câbles de garde toronnés	$(0,70 \text{ à } 0,80) R_c$ type $0,75 R_c$	$0,95 \bar{R} *$	3 %
* Presque toutes les normes pour conducteurs ont une valeur garantie de 95 % de la charge de rupture nominale.			

SECTION 5: JUSTIFICATIONS TECHNIQUES

5.1 Domaine d'application

Cette section donne les éléments techniques de base relatifs aux sections 1 à 4.

5.2 Rapport entre la charge et la résistance

5.2.1 Estimation de la fiabilité

La charge Q et la résistance R des lignes de transport sont des variables aléatoires ayant des fonctions de distribution spécifiques. Des études techniques préalables ont permis de constater que des variables de givre et de vent peuvent être représentées par une loi extrême du type I (Gumbel) alors que les résistances de composants de lignes de transport suivent généralement des lois normales ou lognormales.

Table 26 - Strength parameters of interface components

Type of interface	Damage limit	Failure limit	
		R_c	v_R
Insulators (glass and porcelain) – typical cap and pin	$0,60 \bar{R}$	$(1 - 3 v_R) \bar{R} *$	3 % to 6 %
		$0,85 \bar{R}$	5 %
Hardware – typical	$0,60 \bar{R}$	$(1 - 3 v_R) \bar{R}$	4 % to 8 %
		$0,85 \bar{R}$	5 %
* The value of 3σ can be found in IEC 383 concerning insulators (glass and porcelain).			

Table 27 - Strength parameters of conductors and ground wires

Type of interface	Damage limit	Failure limit	
		R_c	v_R
Stranded conductors and ground wires	$(0,70 \text{ to } 0,80) R_c$ type $0,75 R_c$	$0,95 \bar{R} *$	3 %
* Almost all conductor standards have a guaranteed value of 95 % of rated tensile strength.			

SECTION 5: TECHNICAL JUSTIFICATIONS

5.1 Scope

This section gives some technical background related to sections 1 to 4.

5.2 Relation between load and strength

5.2.1 Estimate of reliability

Load Q and strength R of transmission lines are random variables having specific distribution functions. Through previous technical studies, it has been recognized that ice and wind variables may be represented by an extreme type I function (Gumbel) while strengths of transmission line components generally follow normal or lognormal functions.

Lorsque l'on connaît les paramètres statistiques de charges et de résistance on peut calculer, ou estimer, la fiabilité ou probabilité de survie annuelle, P_s , à l'aide de modèles analytiques de méthodes d'approximation. Dans les relations suivantes, F_R et F_Q sont définies comme étant les fonctions de distribution cumulées de R et de Q alors que f_R et f_Q représentent la fonction de densité de probabilité des mêmes variables.

$$P_s = P(R - Q > 0) = \int_0^{\infty} f_Q(x) F_R(x) dx \quad (31)$$

On peut facilement traiter l'équation donnant la valeur exacte de P_s à l'aide de petits ordinateurs si l'on connaît les courbes de R et de Q . Lorsque l'on connaît seulement la valeur moyenne et l'écart type des variables R et Q , on peut procéder à l'estimation de P_s (généralement appelée analyse de premier ordre) à l'aide de l'une des méthodes ci-dessous, F_N représentant la fonction de distribution cumulée normale:

$$P_s = F_N(+\beta) \quad (32)$$

où

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (33)$$

ou

$$\beta = \frac{\ln(\bar{R}/\bar{Q})}{\sqrt{v_R^2 + v_Q^2}} \quad (34)$$

Outre ces méthodes, une autre technique s'est révélée donner des résultats très proches des résultats théoriques: elle consiste à régler la queue supérieure de la courbe de charge Q et la queue inférieure de R (si celle-ci n'est pas normale) par rapport aux distributions normales et d'utiliser ensuite l'équation (33) avec les nouvelles distributions ainsi obtenues.

Lorsque Q est une fonction de Gumbel et R une fonction normale, on obtient les conclusions suivantes se rapportant aux méthodes d'approximation utilisées pour calculer la probabilité de survie P_s .

Le format $(R - Q)$ de l'équation (33) donne de bons résultats quelle que soit la valeur de v_Q et lorsque $v_R > 0,15$.

Le format logarithmique (R/Q) de l'équation (34) est admissible lorsque $v_Q \approx 0,2$ et $v_R \leq 0,15$.

Le format d'ajustement de la queue de courbe est admissible quelle que soit la valeur type de v_R et de v_Q .

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_R and F_Q are defined as the cumulative distribution functions (CDF) of R and Q while f_R and f_Q are the probability density functions (PDF) of the same variables.

$$P_s = P(R - Q > 0) = \int_0^{\infty} f_Q(x) F_R(x) dx \quad (31)$$

The exact value of P_s can be easily handled by small computers if R and Q curves are known. When only the average and standard deviation of R and Q variables are known, an estimate of P_s (this is usually called first order analysis) can be obtained through either of the following methods with F_N being the normal cumulative distribution function:

$$P_s = F_N(+\beta) \quad (32)$$

where

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (33)$$

or

$$\beta = \frac{\ln(\bar{R}/\bar{Q})}{\sqrt{v_R^2 + v_Q^2}} \quad (34)$$

In addition to the above methods, another technique has been found to give results very close to the theoretical ones: it consists of adjusting the upper tail of the load curve Q and the lower tail of R (if it is not normal) to normal distributions and then use equation (33) with the new resulting distributions.

When Q is a Gumbel function and R a normal function the following conclusions are obtained relating to approximate methods used to calculate probability of survival P_s .

Format $(R - Q)$ of equation (33) gives good results for all values of v_Q and when $v_R > 0,15$.

Format $\log(R/Q)$ of equation (34) is acceptable when $v_Q \approx 0,2$ and $v_R \leq 0,15$.

Tail adjustment format is acceptable for all typical values of v_R and v_Q .

5.2.2 Importance de la relation charge-résistance

Les méthodes probabilistes ont progressé lors de la découverte d'une relation entre la charge et la résistance aboutissant à une probabilité de défaillance presque constante. Cette relation est la suivante:

$$Q_T = (10 \%) R \quad (2)$$

ou

Charge avec une période de retour T = Résistance présentant une probabilité de 90 %.

On a constaté que l'équation (2) donnait une fiabilité compatible P_s presque équivalente à $(1 - 1/2T)$, P_s variant théoriquement de $(1 - 1/T)$ à $(1 - 1/2T)$. Ces résultats sont valables pour diverses distributions de courbes de charges Q telles que celles de type I extrême (Gumbel), lognormales et Frechet ainsi que pour une distribution normale et lognormale de résistance R .

Les figures 26, 27 et 28 donnent des résultats partiels couvrant les combinaisons de Q et R les plus fréquemment rencontrées. La gamme de v_Q entre 20 % et 50 % simule respectivement une dispersion de vitesse de vent de 10 % par rapport à une dispersion de charge due au givre de 50 % alors que la gamme de v_R de 5 % à 20 % couvre la dispersion du composant de ligne le plus faible (généralement les pylônes où $5 \% \leq v_R \leq 10 \%$).

Exemple:

Soit, à partir de la figure 26:

si $v_R = 0 \%$ ----- $\rightarrow P_f = 0,02 = 1/50 \approx 1/T$

si $10 \% < R < 20 \%$ ----- $\rightarrow P_f = 0,01 = 1/100 \approx 1/2T$

R est normal et Q est de type I extrême

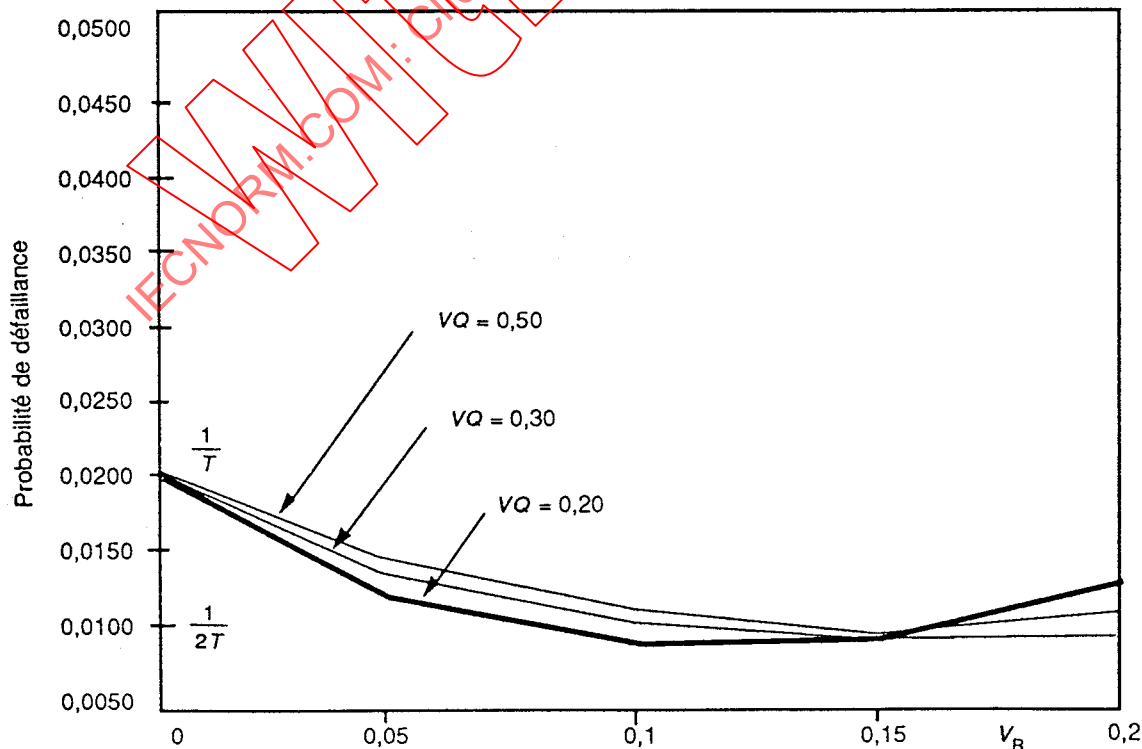


Figure 26 - Valeurs de $P_f = (1 - P_s)$ pour différentes distributions de Q et de R , pour $T = 50$ ans.

5.2.2 Important load-strength relation

A major breakthrough in probability methods occurred when a relation between load and strength that leads to an almost constant probability of failure was discovered. This relation is:

$$Q_T = (10\%) R \quad (2)$$

or

Load with a return period T = Strength met with 90 % probability.

Equation (2) was found to give consistent reliability almost equal to $(1 - 1/2T)$, the range of P_s is typically $(1 - 1/T)$ to $(1 - 1/2T)$. 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 .

Partial results covering the most common combinations of Q and R are shown in figures 26, 27 and 28. The range of v_Q from 20 % to 50 % simulates respectively a wind speed dispersion of 10 % to an ice load dispersion of 50 %, while the range of v_R of 5 % to 20 % covers the dispersion of the weakest component of the line (usually towers, where $5\% \leq v_R \leq 10\%$).

Example:

From figure 26:

if $v_R = 0\%$ ----- $P_f = 0,02 = 1/50 \approx 1/T$
 if $10\% < v_R < 20\%$ ----- $P_f = 0,01 = 1/100 \approx 1/2T$

R is normal and Q is extreme type I

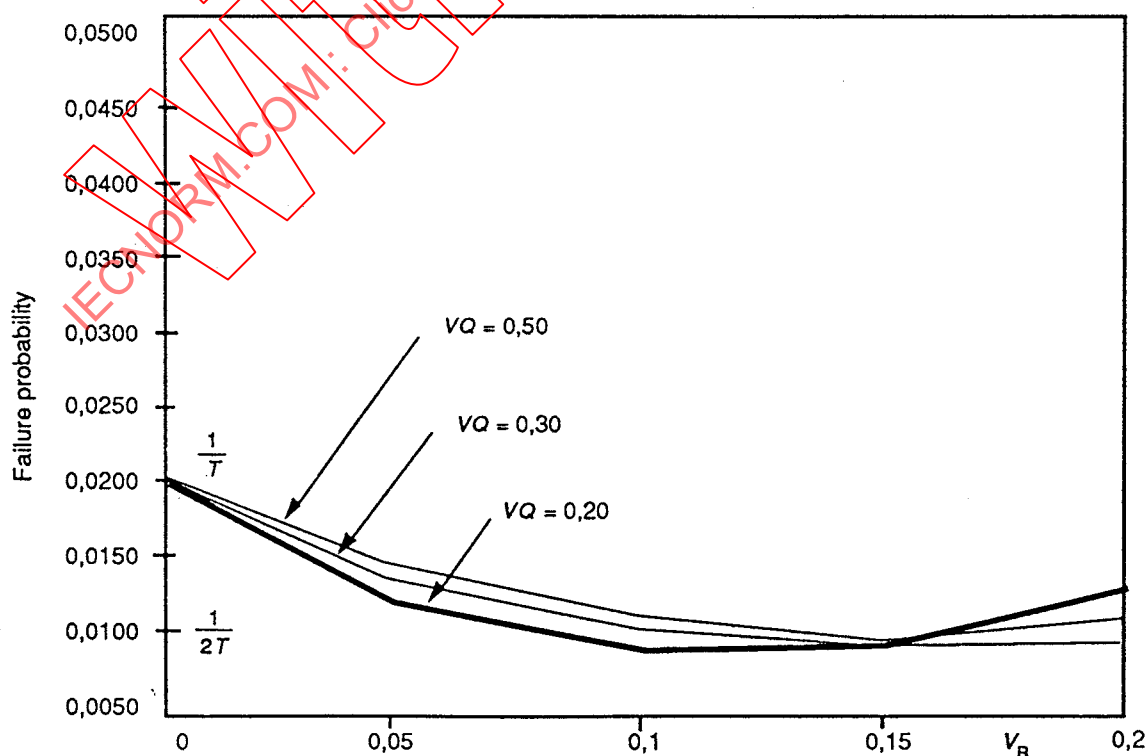
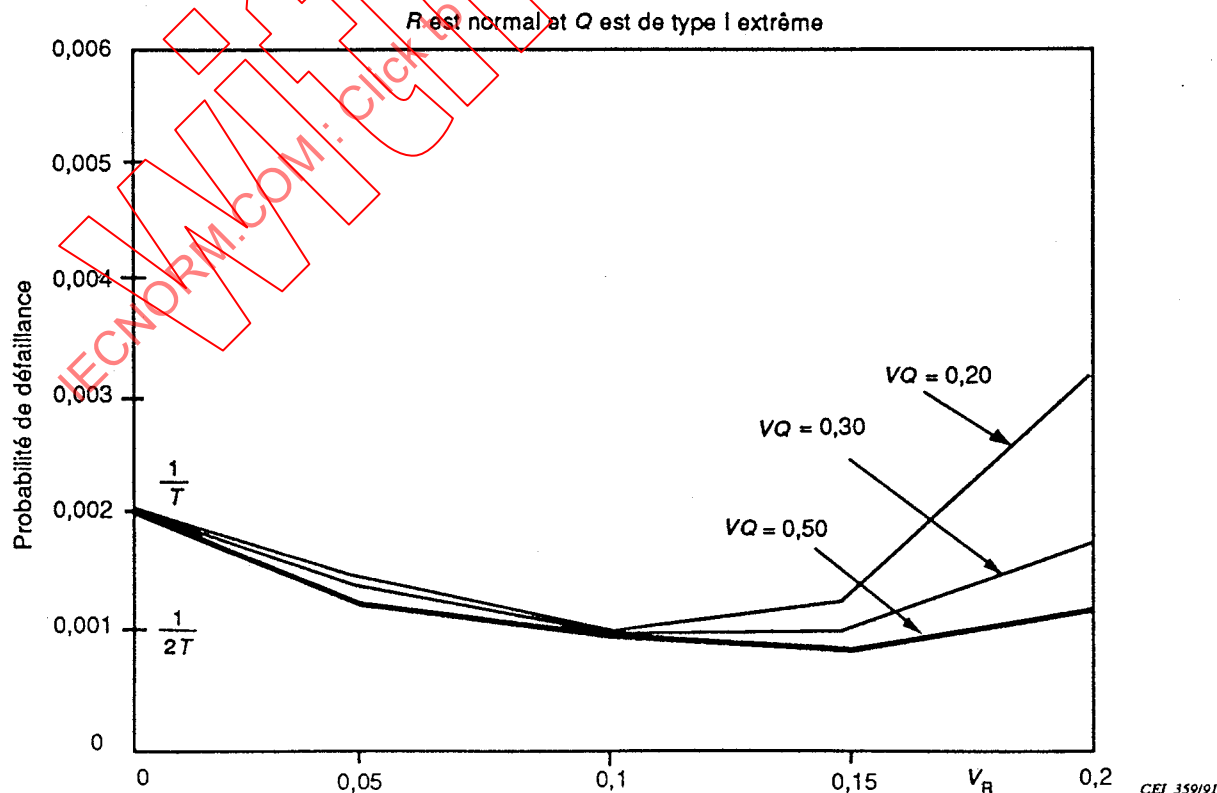
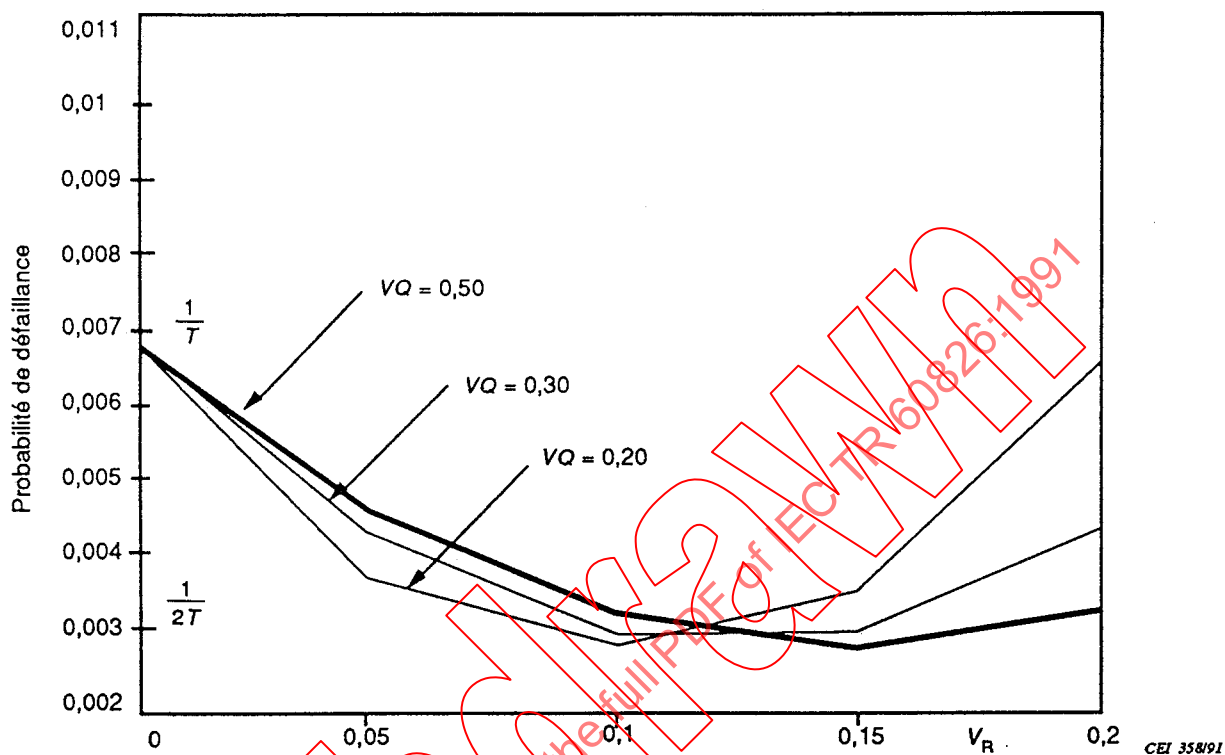


Figure 26 - Values of $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 50$ years

Un examen plus approfondi de l'équation (2) révèle d'autres avantages par rapport à ce format. Tout d'abord, les charges sont spécifiées à l'aide d'un ensemble de périodes de retour, d'une approche très courante pour le calcul des bâtiments et les charges dues aux intempéries.

R est normal et Q est de type I extrême



When further examining equation (2), more advantages can be seen to this format. First, loads are specified using a set of return periods, an approach very common in building design and in weather related loads.

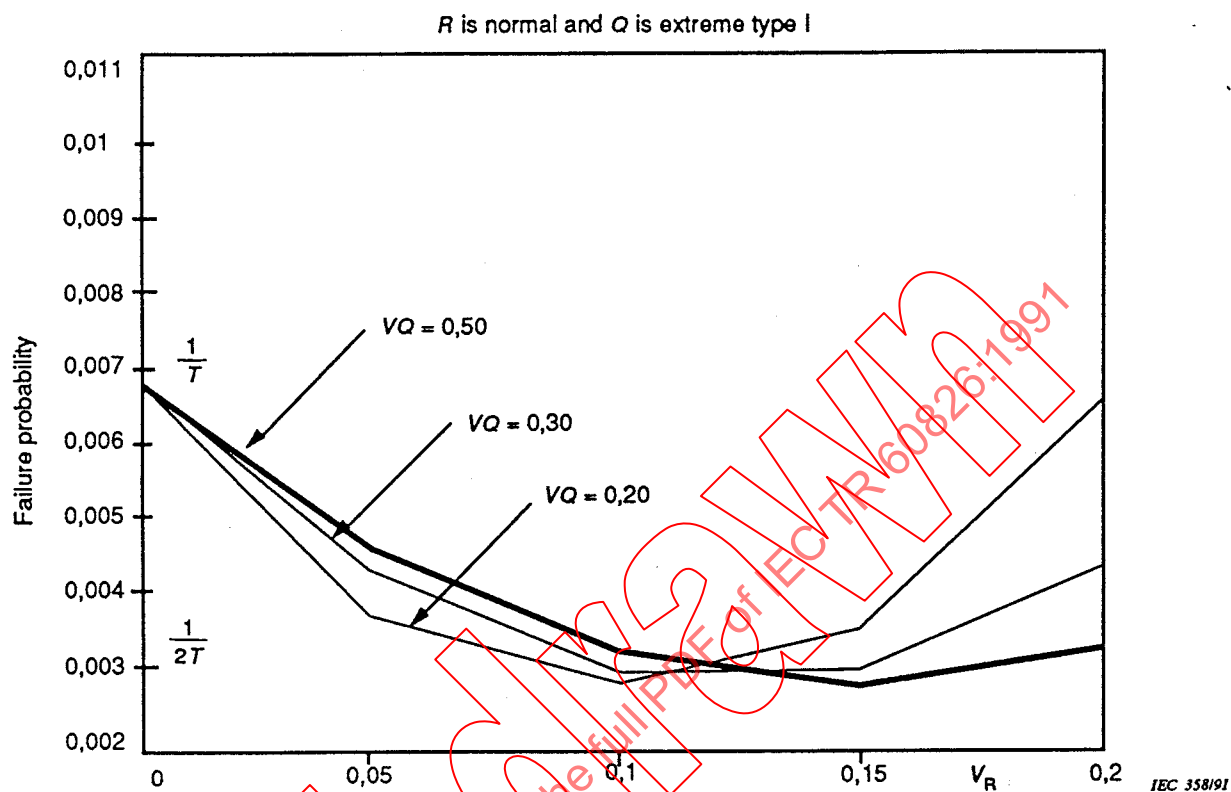


Figure 27 - Values of $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 150$ years

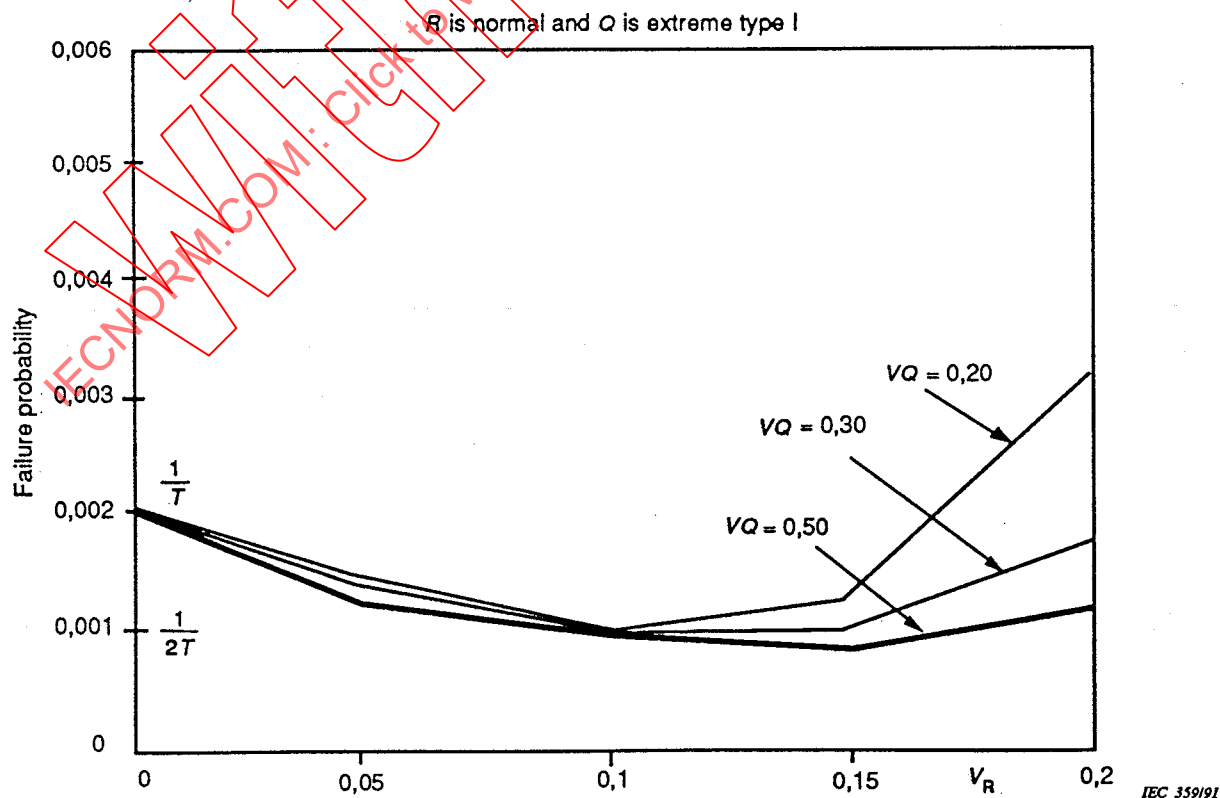


Figure 28 - Values of $P_f = (1 - P_s)$ for various distributions of Q and R , for $T = 500$ years

Ensuite, la résistance correspondant à la charge Q_T est celle présentant une probabilité d'occurrence de 90 %. Sur la base de l'analyse des données de résistance, on s'aperçoit que la résistance caractéristique est toujours située en dessous de la limite d'exclusion de 10 %. Dans les cas où l'on dispose de peu de données sur la résistance, la fiabilité calculée à l'aide de l'équation (2) peut être considérée comme une limite inférieure à la valeur réelle et conduit à des calculs à caractère conservateur.

Si l'on a tenu compte de limites d'exclusion inférieures à 10 % (par exemple 2 %), elles conduiront à surestimer P_f dans les cas où la résistance caractéristique ne peut être satisfaite à 98 %.

5.3 Effet de la dispersion de portée sur la fiabilité

5.3.1 Généralités

Pour la plupart des lignes de transport, les pylônes ne sont pas calculés spécialement pour chaque emplacement et l'on utilise généralement un ou deux types de pylônes de suspension pour s'adapter aux variations des valeurs de portée-poids et portée-vent dont la plupart sont inférieures à la portée de calcul maximale.

Le fait que l'on n'utilise pas de nombreux pylônes sur l'ensemble d'une ligne de transport à leur portée de calcul maximale a un effet positif sur la fiabilité qui doit être quantifié.

Pour déterminer l'effet de la variation de portée sur la fiabilité, il faut tout d'abord trouver un modèle adéquat par rapport à cette variable et utiliser ensuite des techniques statistiques décrites précédemment pour calculer son influence sur la probabilité de survie P_s .

On obtient un meilleur modèle de variation de portée en utilisant une unité U adimensionnelle, appelée facteur d'utilisation qui équivaut au rapport de la portée réelle à la portée maximale.

Les variations du facteur d'utilisation sont très influencées par les trois paramètres suivants: nombre de types de pylônes de suspension, types de terrain (il est beaucoup plus facile d'obtenir des valeurs élevées de U en terrain plat qu'en terrain montagneux) et contraintes imposées aux emplacements des pylônes.

Sur la base de l'analyse des données disponibles ainsi que de l'expérience, il est apparu que les variations de U sont prévisibles dans une certaine mesure si l'on connaît les paramètres ci-dessus. Par conséquent, l'annexe A propose un ensemble de paramètres statistiques de U pour des lignes de transport types.

5.3.2 Effet du facteur d'utilisation sur la fiabilité

On peut exprimer la condition de base à l'aide de la relation suivante:

Charge extérieure appliquée aux pylônes < résistance du pylône

ou

$$Q < R$$

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 (2) can be viewed as a lower bound of the real value and leads to designs on the conservative side.

If exclusion limits smaller than 10 % had been considered (e.g. 2 %), they would have led to over-estimating P_f in cases where the characteristic strength cannot meet a 98 % requirement.

5.3 Effect of span dispersion on reliability

5.3.1 General

In most transmission lines, towers are not custom designed for each location and one or two tangent tower types are generally used to fit a large array of weight and wind spans, most of which are shorter than the maximum design spans.

The fact that many towers throughout a transmission line are not used at their maximum design spans has a positive effect on reliability which needs to be quantified.

In order to assess the effect of span variation on reliability, the first step is to find a suitable model for this variable and then to use statistical techniques previously described in order to calculate its influence on probability of survival P_s .

Span variation is best modelled by using a non-dimensional unit U , called use factor, which equals the ratio of the actual span to the maximum span.

The variation of use factor is mostly influenced by the following three parameters: number of tangent tower types, terrain types (it is much easier to reach high values of U in flat terrain than in mountains) and constraints on tower locations.

Based on the analysis of available data, as well as on experience, it appeared that the variations of U are to some extent predictable with the knowledge of the above mentioned parameters. Consequently, a set of statistical parameters of U are proposed in annex A for typical transmission lines.

5.3.2 Effect of use factor on reliability

The basic condition can be expressed by the following relation:

External load applied to towers < tower strength

or

$$Q < R$$

lorsqu' un pylône est utilisé en dessous de sa capacité ($U < 1$), les portées réelles étant inférieures aux portées maximales, on réduit les charges appliquées aux points d'accrochage à l'aide du facteur U et la nouvelle condition de fiabilité devient:

$$Q U < R$$

ou, $Q < R/U$ (dans ce cas, le pylône se comporte comme s'il pouvait supporter des efforts climatiques extérieurs plus importants avec des portées réduites).

Pour calculer l'effet du facteur d'utilisation sur la réduction de charge ou l'augmentation de résistance, on peut utiliser la méthode donnée dans l'annexe A.

Si l'on néglige l'effet du facteur d'utilisation dans le calcul soit en raison de l'imprécision des données sur la variation de portée ou de l'incertitude quant à l'utilisation finale des pylônes, il vaut alors mieux considérer $\gamma_u = 1,0$ sous réserve que l'on admette:

- a) que la fiabilité finale soit supérieure aux prévisions, et
- b) que la coordination de résistance puisse alors être modifiée.

5.4 Coordination de résistance des composants de ligne

5.4.1 Généralités

Les composants des lignes de transport ont des dispersions de résistance et une réponse à la charge différentes. Lorsqu'ils sont soumis à des charges données, les composants en série connaîtront une défaillance chaque fois que la charge dépasse la résistance d'un composant quelconque.

Pour limiter les conséquences d'une défaillance dans les lignes de transport, on a constaté que l'un des aspects les plus souhaitables de la coordination de résistance est celui où les pylônes de suspension représentent le composant le plus faible. Etant donné que la charge et la résistance sont des variables aléatoires, la seule façon d'obtenir que les pylônes de suspension soient les plus faibles est de fixer à ces pylônes une fiabilité inférieure (ou de calculer d'autres composants avec une fiabilité plus élevée).

Pour mettre au point des facteurs de résistance Φ_s permettant d'atteindre la coordination de résistance¹ désirée, on peut envisager deux méthodes:

- a) Utilisation de charges de calcul conjointement à une limite d'exclusion de 10 % (comme suggérée dans cette approche) pour le premier élément défaillant. On calculera les autres éléments avec une limite d'exclusion plus basse (disons 1 % à 2 %) correspondant aux mêmes charges de calcul.
- b) Etablissement de facteurs de résistance tels que la coordination de résistance désirée entre deux composants sera très certainement atteinte avec un intervalle de confiance élevé (de l'ordre de 80 % à 90 %).

¹ En raison du caractère aléatoire de la résistance, il est théoriquement impossible de garantir avec un degré de confiance de 100 % que la séquence de ruine sera respectée dans tous les cas.

when a tower is underused ($U < 1$) actual spans being less than the maximum spans, loads applied to attachment points are reduced by a factor U and the new reliability condition is:

$$QU < R$$

or, $Q < R/U$ (in this case, the tower behaves as though it could sustain more external climatic actions with its reduced spans).

In order to compute the effect of the use factor on either load reduction or strength increase, the methodology given in annex A can be used.

If the effect of use factor is neglected in the design either because of imprecise data on span variation or because of uncertainty as to the final utilization of towers, then it is safe to consider $\gamma_U = 1,0$ provided:

- a) it is recognized that the resulting reliability is greater than expected, and
- b) the resulting strength coordination can now be altered.

5.4 Strength coordination of line components

5.4.1 General

Transmission line components have different strength dispersions and responses to loading. When subjected to given loads, failure of components in series will occur whenever load exceeds strength in any component.

In order to limit consequences of a failure in transmission lines, it has been found that one of the most desirable aspects of strength coordination is the one where tangent towers are the weakest components. Since load and strength are both random variables, the only way to ensure that the tangent towers are the weakest is to assign to these towers a lower reliability (or to design other components with a higher reliability).

In order to develop strength factors Φ_s leading to the target strength coordination¹ two methods can be considered:

- a) For the first component to fail, use design loads in conjunction with 10 % exclusion limit (as suggested in this approach). The next components to fail will be designed with a lower exclusion limit (say 1 % to 2 %), corresponding to the same design loads.
- b) Establish strength factors in such a way that the target strength coordination between two components will be reached with a high level of confidence (nearly 80 % to 90 %).

¹ Due to the random nature of strength, it is theoretically impossible to guarantee with 100 % confidence level that the sequence of failure will be met in all cases.

5.4.2 Méthodes de calcul des facteurs de résistances Φ_S

Comme indiqué ci-dessus, on dispose de deux méthodes pour atteindre une coordination de résistance donnée:

Méthode a

Dans la méthode a, l'intervalle de confiance issu de la séquence de ruine appropriée varie en fonction des dispersions de résistances des composants. Prenons par exemple:

$$T = 50 \text{ ans}, \quad \bar{Q} = 1,0; \quad v_Q = 0,20; \quad v_{R1} = v_{R2} = 0,10$$

(R_1 et R_2 étant respectivement les premier et deuxième composants défaillants).

Les deux composants sont calculés pour une charge $Q_{50} = 1,52 \bar{Q}$ (à partir de la distribution de Gumbel).

La résistance correspondante du composant R_1 sera égale à (10 %) R_1 . Le composant R_2 , sera calculé pour une charge identique avec une résistance plus élevée (ou une limite d'exclusion de 2 %). A noter que si l'on ne calcule pas le composant R_2 avec une coordination de résistance, sa résistance sera de (10 %) R_2 .

Le rapport $\Phi_S = \frac{(2 \%) R_2}{(10 \%) R_2}$ est le facteur relatif à la coordination de résistance

$$\text{Dans l'exemple ci-dessus, } \Phi_S = \frac{(2 \%) R_2}{(10 \%) R_2} = \frac{(1 - 2,054 v_{R2})}{(1 - 1,28 v_{R2})} = 0,91$$

Ce résultat signifie que si l'on utilise la limite d'exclusion de 10 % pour le calcul des deux composants, on devra diminuer la résistance du second composant défaillant d'un facteur de $\Phi_S = 0,91$.

On peut voir que ce facteur demeure pratiquement constant à différentes valeurs de N composants en série. Dans ce cas, Φ_S se transforme en:

$$\Phi_S = \frac{(2 \%) \min_N R_2}{(10 \%) \min_N R_2}$$

Les données ci-dessus montrent que Φ_S varie de 0,91 pour $N = 1$ à 0,94 pour $N = 100$.

5.4.2 Methods for calculating strength factors Φ_S

As stated above, two methods are available for the purpose of reaching a given strength coordination:

Method a

In this method, the confidence level in obtaining the right sequence of failure is variable and depends on strength dispersions of components. For example assume,

$$T = 50 \text{ years}, \quad \bar{Q} = 1,0; \quad v_Q = 0,20; \quad v_{R1} = v_{R2} = 0,10$$

(R_1 and R_2 are respectively first and second components to fail.)

Both components are designed for a load $Q_{50} = 1,52 \bar{Q}$ (from Gumbel distribution).

The corresponding strength of component R_1 shall be (10 %) R_1 . Concerning component R_2 , it will be designed for the same load but with a higher strength (or an exclusion limit of 2 %). Note that if the design of component R_2 was not made with a strength coordination, its strength would have been (10 %) R_2 .

The ratio $\Phi_S = \frac{(2\%) R_2}{(10\%) R_2}$ is the factor related to the coordination of strength.

$$\text{In the above example, } \Phi_S = \frac{(2\%) R_2}{(10\%) R_2} = \frac{(1 - 2,054 v_{R2})}{(1 - 1,28 v_{R2})} = 0,91$$

This result means that if the 10 % exclusion limit is used for the design of the two components, the strength of the second component to fail has to be reduced by a factor of $\Phi_S = 0,91$.

It can be easily shown that this factor remains fairly constant for different values of N components in series. In this case, Φ_S changes to:

$$\Phi_S = \frac{(2\%) \min_N R_2}{(10\%) \min_N R_2}$$

Using the above data we find that Φ_S varies from 0,91 for $N = 1$ to 0,94 for $N = 100$.

Méthode b

Dans la méthode b, on suppose la probabilité de défaillance du composant R_2 postérieure au composant R_1 , les facteurs de résistance sont donc déduits de différentes combinaisons de v_{R1} et v_{R2} .

La question qui se pose dans ce cas est la suivante: quel serait le facteur de résistance Φ_s appliqué au second composant défaillant pour que la probabilité d'obtenir la bonne coordination de résistance soit, par exemple, de 90 %. La relation mathématique entre R_1 et R_2 est la suivante:

$$\text{Probabilité de } (R_2 > R_1) = 0,90;$$

ou

$$P[(R_2 - R_1) > 0] = 0,90$$

Si l'on utilise des méthodes statistiques, on peut déterminer la relation R_2/R_1 (souvent appelé le facteur de sécurité central, mais on préfère le rapport des résistances moyennes (RRM)) pour différentes combinaisons de v_{R1} et v_{R2} .

Les valeurs Φ_s données au tableau 28 peuvent alors être calculées comme rapport:

$$\frac{(10\%) R_1}{(10\%) R_2}$$

Tableau 28 - Valeurs du rapport entre les résistances moyennes (RRM) et de Φ_s nécessaires pour assurer une défaillance du composant R_2 postérieure à celle du composant R_1 avec une probabilité de 90 %

$v_{R1} \backslash v_{R2}$	5 %		10 %		20 % *	
	RRM	Φ_s	RRM	Φ_s	RRM	Φ_s
5 %	1,10	0,91	1,15	0,81	1,26	0,63
10 %	1,16	0,92	1,20	0,83	1,30	0,66
20 %	1,36	0,93	1,37	0,86	1,46	0,69
30 %	1,63	0,93	1,63	0,87	1,70	0,71

* Il est difficile et pas très économique de choisir comme premier composant défaillant un composant avec une grande dispersion de résistance; comme le montre ce tableau, quand $v_{R1} = 20\%$ la résistance des composants qui ne doivent pas céder en premier, doit être multipliée par environ 0,7.

A partir de ce tableau, on peut conclure que si l'on calcule des pylônes de suspension (v_R généralement égal de 5 % à 10 %) comme premiers éléments défaillant, la résistance caractéristique des fondations (v_R allant généralement de 10 % à 30 %) doit être diminuée d'un facteur allant de 0,83 à 0,93. Dans ce cas, on peut être sûr à 90 % que la défaillance des fondations ne sera pas antérieure à celle du pylône supporté.

Method b

In this method, the probability that component R_2 will fail after component R_1 is first assumed, then the strength factors are derived for various combinations of v_{R1} and v_{R2} .

The question raised in this case is the following: what should be the strength factor Φ_s applied to the second component to fail so that the probability of achieving the right strength coordination is, say 90 %. Mathematically, the relation between R_1 and R_2 is:

$$\text{Probability of } (R_2 > R_1) = 0,90;$$

or

$$P[(R_2 - R_1) > 0] = 0,90$$

Using statistical methods, the relation between R_2/R_1 (often called central safety factor, but preference is given to ratio of average strength, RAS) can be established for various combinations of v_{R1} and v_{R2} .

Then Φ_s values which appear in table 28 can be calculated as the ratio

$$\frac{(10\%) R_1}{(10\%) R_2}$$

Table 28 - Values of ratio of average strengths (RAS) and Φ_s required to insure that component R_2 will fail after component R_1 with a 90 % probability

$v_{R1} \backslash v_{R2}$	5 %		10 %		20 % *	
	RAS	Φ_s	RAS	Φ_s	RAS	Φ_s
5 %	1,10	0,91	1,15	0,81	1,26	0,63
10 %	1,16	0,92	1,20	0,83	1,30	0,66
20 %	1,36	0,93	1,37	0,86	1,46	0,69
30 %	1,63	0,93	1,63	0,87	1,70	0,71

* It is difficult and not very cost efficient to choose a component with a large strength dispersion as the first component to fail; as seen from this table, when $v_{R1} = 20\%$, the strength of the components which are not to fail first should be reduced by about 0,7.

From this table, we can conclude that if tangent towers (usually $v_R = 5\%$ to 10%) are designed as first components to fail, the characteristic strength of foundations (v_R is usually from 10% to 30%) has to be reduced 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.

Commentaire:

Bien que les deux méthodes a et b donnent une coordination de résistance admissible, on préférera la méthode b car la probabilité d'obtenir la coordination de résistance désirée demeure constante et est déjà connue alors que dans la méthode a, la probabilité de réaliser la coordination de résistance désirée varie avec les paramètres statistiques de R_1 et R_2 .

5.5 Nombre de composants exposés à l'intensité de charge maximale

Lorsque l'intensité maximale d'un événement de charge Q_T affecte un grand nombre de composants, leur défaillance sera déclenchée par le maillon le plus faible (ou composant). En supposant que la résistance des composants ne soit pas corrélée, la distribution de résistance d'une série de N composants devient $\min_N R$, N étant le nombre de composants exposés à l'intensité de charge maximale.

On peut déduire la fonction densité de $\min_N R$ à l'aide de méthodes analytiques ou de techniques de simulation (Monte-Carlo). Toutefois, étant donné que la limite d'exclusion de 10 % offre un intérêt primordial dans ce rapport (sur la base de l'équation 2 en 5.2.2) on peut l'obtenir à l'aide de la relation suivante:

$$\text{Probabilité d'exclusion de } N \text{ composants} = 1 - (1 - \text{probabilité d'exclusion d'un composant})^N$$

ou

$$e_N = 1 - [1 - e]^N \quad (35)$$

Tableau 29 - Coefficient de résistance Φ_N relatif à N composants en série soumis à la charge critique

N	Dispersion de résistance						
	5 %	7,5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	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	0,64
10	0,94	0,92	0,89	0,81	0,72	0,62	0,51
20	0,93	0,90	0,85	0,77	0,66	0,53	0,38
40	0,92	0,87	0,83	0,72	0,59	0,44	0,26
80	0,91	0,86	0,79	0,68	0,53	0,36	0,16
160	0,90	0,84	0,78	0,64	0,48	0,29	0,07

On utilise l'équation 35 pour déduire les coefficients de résistance Φ_N du tableau 29 pour différentes dispersions et un nombre de composants N . Dans cette équation, Φ_N est pris égale au rapport

$$\Phi_N = \frac{(10 \%) \min_N R}{(10 \%) R} \quad (36)$$

et on suppose que R s'adapte à une fonction de densité normale.

Discussion:

Although both methods a and b provide an acceptable strength coordination, preference is given to method b because the probability of achieving the required strength coordination remains constant and is already known, while in method a the probability of achieving the target strength coordination changes with the statistical parameters of R_1 and R_2 .

5.5 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). 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 (Monte-Carlo). However, since the 10 % exclusion limit is of prime interest in this report (based on equation 2 in 5.2.2) it can be obtained through the following relation:

$$\text{Exclusion probability of } N \text{ components} = 1 - (1 - \text{Exclusion probability of one component})^N$$

or

$$e_N = 1 - [1 - e]^N \quad (35)$$

Table 29 - Strength coefficient Φ_N related to N components in series subjected to the critical load

N	Strength dispersion						
	5 %	7,5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	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	0,64
10	0,94	0,92	0,89	0,81	0,72	0,62	0,51
20	0,93	0,90	0,85	0,77	0,66	0,53	0,38
40	0,92	0,87	0,83	0,72	0,59	0,44	0,26
80	0,91	0,86	0,79	0,68	0,53	0,36	0,16
160	0,90	0,84	0,78	0,64	0,48	0,29	0,07

Equation 35 is used to derive strength coefficients Φ_N of table 29 for different dispersions and number of components N . In this equation Φ_N is set equal to the ratio:

$$\Phi_N = \frac{(10 \%) \min_N R}{(10 \%) R} \quad (36)$$

and R is assumed to fit a normal density function.

Par exemple, calculons Φ_N pour $N = 10$ et $v_R = 20\%$. A partir des tableaux des fonctions de densité normale, on peut voir qu'une probabilité de 10 % correspond à 1,28 écart type, soit:

$$10\% R = \bar{R}(1 - 1,28 \times 0,20) = 0,744\bar{R}$$

A partir de l'équation 35 on peut trouver la limite d'exclusion e lorsque $N = 10$ et $e_N = 0,10$:

$$0,10 = 1 - (1 - e)^{10}$$

ainsi

$$e = 0,0105$$

A partir des tables de loi normale, on trouve que la probabilité de 0,0105 correspond à 2,31 d'écarts types, donc:

$$(10\%) \min_N R = \bar{R}(1 - 2,31 \times 0,20) = 0,538\bar{R}$$

Par conséquent:

$$\Phi_N = \frac{0,538 \bar{R}}{0,744 \bar{R}} = 0,72$$

Ce résultat est très significatif. Lorsque l'intensité maximale d'une charge concerne 10 composants appartenant chacun à une fonction de densité normale avec un coefficient de variation de 20 %, la fiabilité est inférieure à celle d'une charge concernant un seul composant. Pour obtenir la même fiabilité dans les deux cas, dans le cas de 10 composants on doit diminuer la résistance nominale de 0,72 (ou de 0,92 si $v_R = 0,075$).

Le même principe s'applique aux chaînes d'isolateurs. Le dimensionnement mécanique d'une chaîne d'isolateurs dépend du nombre d'isolateurs dans la chaîne et de la dispersion de résistance, v_R , de chaque isolateur. En supposant $v_R = 5\%$, une chaîne de 80 isolateurs dimensionnés chacun pour R_c doit être diminuée de 0,9 alors qu'une chaîne de 10 des mêmes isolateurs doit être diminuée de 0,94. Si $v_R = 15\%$, les coefficients de diminution Φ_N deviennent respectivement 0,68 et 0,81, ce qui traduit l'importance de N dans le cas d'une dispersion de résistance élevée.

For example, let us calculate Φ_N for $N = 10$ and $v_R = 20\%$. From tables of normal density functions, it can be seen that 10 % probability corresponds to 1,28 standard deviation, thus:

$$10\% R = \bar{R} (1 - 1,28 \times 0,20) = 0,744 \bar{R}$$

From equation 35 we can find the exclusion limit e when $N = 10$ and $e_N = 0,10$:

$$0,10 = 1 - (1 - e)^{10}$$

thus

$$e = 0,0105$$

From normal tables, we find that 0,0105 probability corresponds to 2,31 standard deviations, thus:

$$(10\%) \min_N R = \bar{R} (1 - 2,31 \times 0,20) = 0,538 \bar{R}$$

Consequently:

$$\Phi_N = \frac{0,538 \bar{R}}{0,744 \bar{R}} = 0,72$$

The significance of this result is important. When the maximum intensity of a load "sees" 10 components each belonging to a normal density function with a coefficient of variation of 20 %, the reliability is lower than if this load were to see one component. In order to obtain the same reliability in both cases, the nominal strength in the case of 10 components has to be reduced by 0,72 (or by 0,92 if $v_R = 0,075$).

The same principle 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 $v_R = 5\%$, a string of 80 insulators each rated R_c , has to be reduced by 0,9 while a string of 10 of the same insulators has to be reduced by 0,94. If $v_R = 15\%$, then the reduction factors Φ_N become respectively 0,68 and 0,81 thus underlining the importance of N when strength dispersion is high.

Annexe A (informative)

Effet de la dispersion de portée sur la relation charge-résistance: calcul du facteur d'utilisation de portée

A.1 Généralités

En supposant que F est la force résultant d'actions climatiques appliquées à la portée de calcul maximum $L_{\max}$, la force appliquée à un pylône ayant une portée L_i est égale à $F \times L_i/L_{\max}$ (selon les systèmes linéaires*). Le rapport $L_i/L_{\max}$ est une variable aléatoire appelée facteur d'utilisation U . Le facteur d'utilisation a une limite supérieure de 1,0 et une limite inférieure théoriquement égale à 0,4. A partir de l'analyse des lignes calculées selon la notion de charge limite, on s'est aperçu que le facteur d'utilisation peut être calculé d'une manière approximative grâce à une fonction de distribution Bêta: on trouve une description détaillée de la fonction Bêta dans l'annexe B.

Le facteur d'utilisation dépend principalement de trois variables: le nombre de types de pylônes de suspension disponibles pour la répartition, le type de terrain et les contraintes imposées à l'emplacement des pylônes. Par exemple, si tous les pylônes d'une ligne sont calculés spécialement pour la portée exacte à chaque emplacement, le facteur d'utilisation sera égal à 1,0 alors que si l'on utilise un seul type de pylône de suspension sur une ligne située en terrain montagneux, le facteur d'utilisation moyen sera bien inférieur à un (théoriquement de 0,60 à 0,75).

On a constaté que la variation du facteur d'utilisation suivait une loi prévisible et que l'on pouvait déterminer des paramètres statistiques $\bar{U}$, σ_U avec suffisamment de précision si l'on connaissait le nombre de type de pylônes d'alignement, le terrain et les contraintes d'emplacement.

Les tableaux A.1 et A.2, donnent des valeurs moyennes types $\bar{U}$ et l'écart type σ_U . A noter que l'on peut déduire $\bar{U}$ des critères de calcul de pylônes de suspension si l'on connaît la portée moyenne de la ligne de transport en raison de la relation suivante:

Portée moyenne = Portée-vent moyenne = Portée-poids moyenne

* Dans le cas de charges dues au vent et d'une grande différence entre L_i et $L_{\max}$ il existe une petite absence de linéarité introduite par la variation du facteur de vent combiné sur les portées. Cela a peu d'influence sur la fiabilité car celle-ci est contrôlée par des portées proches des valeurs maximales qui ont un comportement linéaire.

Annex A

(informative)

The effect of span dispersion on load-strength relationship: calculation of span use factor

A.1 General

Assuming F is the force resulting from climatic actions applied to the maximum span, $L_{\max}$, then the force on a tower with a span L_i is equal to $F \times L_i/L_{\max}$ (in linear systems*). The ratio of $L_i/L_{\max}$ is a random variable called use factor U . The use factor has an upper bound of 1,0 and a lower bound typically equal to 0,4. From the analysis of lines designed according to limit load concept, it has been found that the use factor can be approximated by a Beta distribution function. A detailed description of the Beta function is found in annex B.

The use factor depends mainly on three variables: the number of types of tangent towers available for spotting, the type of terrain, and on the constraints on tower locations. For example, if every tower in a line is custom designed for the exact span at each location, the use factor will be equal to 1,0; while if only one tangent tower type is used in a line located in mountainous terrain, the average use factor will be significantly less than one (typically 0,60 to 0,75).

Use factor variation was found to have predictable patterns and statistical parameters $\bar{U}$, σ_u could be known with sufficient accuracy if the number of tangent tower types, terrain and spotting constraints are known.

In tables A.1 and A.2, typical average values $\bar{U}$ and standard deviation σ_u are given. Note that $\bar{U}$ can be derived from the design criteria of tangent towers if the average span of the transmission line is known, because of the following relation:

Average span = Average wind span = Average weight span

* In the case of wind loads and a large difference between L_i and $L_{\max}$ there is small non-linearity introduced by the variation of gust factor with spans. This has little influence on the reliability because the latter is controlled by spans near maximum values which have a linear behavior.

Ainsi, on peut calculer le facteur d'utilisation de vent moyen $\overline{U}_{\text{vent}}$, à partir de:

$$\overline{U}_{\text{vent}} = \frac{\text{portée / vent moyenne}}{\text{portée / vent de calcul maximale}} = \frac{\text{portée moyenne}}{\text{portée / vent de calcul maximale}}$$

De même,

$$\overline{U}_{\text{poids}} = \frac{\text{portée / poids moyenne}}{\text{portée / poids de calcul maximale}} = \frac{\text{portée moyenne}}{\text{portée / poids de calcul maximale}}$$

Dans les deux tableaux A.1 et A.2 on a supposé que la limite inférieure du facteur d'utilisation était égale à 0,4 et la limite supérieure, à 1,0. En outre, on a utilisé les codes suivants:

- codes pour type de terrain: A terrain plat, B vallonné, C montagnes;
- codes pour contraintes sur emplacement des pylônes: 1 pas de contrainte particulière, 2 contraintes existant sur les emplacement des pylônes.

Des contraintes impliquent que la liberté de positionner les pylônes aux emplacements les plus économiques est réduite par suite de considérations particulières telles que celles liées à l'environnement, aux croisements de routes ou aux surplombs de propriétés privées, etc.

En l'absence de données spécifiques, on peut considérer les paramètres statistiques de U identifiés dans les tableaux A.1 et A.2 comme représentatifs pour décrire la variation de portée des lignes de transport courantes.

Tableau A.1 - Paramètres statistiques de variation de portée-vent

Contraintes et terrain	Valeurs de $\overline{U}$, σ_u							
	A1		B1,	A2	B2,	C1	C2	
Nombre de type de pylônes de suspension								
1	0,95	0,05	0,85	0,10	0,75	0,15	0,55	0,20
2	≈1,0		0,95	0,05	0,85	0,10	0,65	0,15
3	≈1,0		≈1,0		0,95	0,05	0,75	0,10

Thus, the average wind use factor $\overline{U}_{\text{wind}}$, can be calculated from:

$$\overline{U}_{\text{wind}} = \frac{\text{average wind span}}{\text{maximum design wind span}} = \frac{\text{average span}}{\text{maximum wind span}}$$

Similarly,

$$\overline{U}_{\text{weight}} = \frac{\text{average weight span}}{\text{maximum design weight span}} = \frac{\text{average span}}{\text{maximum design weight span}}$$

In both tables A.1 and A.2 the lower bound of the use factor is assumed 0,4 and the upper bound is 1,0. Furthermore, the following codes are used:

- codes for terrain type: A flat, B rolling, hilly, C mountainous;
- codes for constraints on tower locations: 1 no special constraints, 2 constraints on tower locations.

Note that constraints imply that the freedom to spot the towers on their most economical locations is reduced because of special considerations such as environmental or location of roads, property lines, etc.

In the absence of specific data, the statistical parameters of U identified in tables A.1 and A.2 can be considered typical for describing span variation of common transmission lines.

Table A.1 - Statistical parameters of wind span variation

		Values of $\overline{U}, \sigma_u$							
Constraints and terrain		A1		B1,	A2	B2,	C1	C2	
Number of tangent tower types									
1		0,95	0,05	0,85	0,10	0,75	0,15	0,55	0,20
2		≈1,0		0,95	0,05	0,85	0,10	0,65	0,15
3		≈1,0			≈1,0	0,95	0,05	0,75	0,10

Tableau A.2 - Paramètres statistiques de variation de portée-poids

Contraintes et terrain	Valeurs de $\bar{U}$, σ_u							
	A1		B1, A2		B2, C1		C2	
Nombre de type de pylônes de suspension								
1	0,85	0,05	0,75	0,10	0,65	0,15	0,50	0,20
2	0,95	0,03	0,85	0,05	0,75	0,10	0,60	0,15
3	$\approx 1,0$		$\approx 1,0$		0,85	0,05	0,70	0,10

A.2 Effet du facteur d'utilisation sur la réduction des charges

Comme on l'a vu plus haut, le fait que l'on n'utilise pas l'ensemble des pylônes à la portée maximale contribue à accroître la fiabilité.

Lorsque le concepteur désire atteindre la fiabilité désirée, il peut, sous réserve qu'il dispose de données suffisantes sur la variation de portée, réduire les charges de calcul sur les pylônes d'un facteur $\gamma_u < 1$ et obtenir des lignes plus économiques.

On peut calculer les facteurs de réduction γ_u à partir des méthodes statistiques détaillées ci-dessous.

a) Procédure

- Prendre une fonction donnée de vitesse de vent V (en supposant une fonction de Gumbel), où: $v_w = 0,12; 0,16; 0,20$. (COV de vitesse de vent).
- Considérer différents cas de courbes de facteur d'utilisation (en supposant une fonction Béta), où: $\bar{U} = 0,95$, $\sigma_u = 0,05$ et $\bar{U} = 0,85$, $\sigma_u = 0,10$, etc.
- Calculer les paramètres statistiques des charges appliquées $Q' = W^2 U$. On peut les obtenir à l'aide d'une simulation de Monte-Carlo ou par intégration numérique. On peut utiliser des méthodes approximatives pour des petites valeurs de σ_u .
- Calculer Q_{50} à partir de $Q = W^2$ (à l'aide des tables de Gumbel), ce qui représente la charge sans l'effet du facteur d'utilisation.
- Calculer Q'_{50} à partir de la nouvelle courbe $Q' = W^2 U$, cela étant la charge comprenant l'effet du facteur d'utilisation.
- On calcule le coefficient du facteur d'utilisation γ_u à partir du rapport Q'_{50} / Q_{50} .

Table A.2 - Statistical parameters of weight span variation

Constraints and terrain	Values of $\bar{U}, \sigma_u$							
	A1		B1,	A2	B2,	C1		C2
Number of tangent tower types								
1	0,85	0,05	0,75	0,10	0,65	0,15	0,50	0,20
2	0,95	0,03	0,85	0,05	0,75	0,10	0,60	0,15
3	$\approx 1,0$		$\approx 1,0$		0,85	0,05	0,70	0,10

A.2 Effect of use factor on load reduction

As discussed earlier, the fact that all towers are not used with their maximum spans contributes to an increase in reliability.

When the designer aims to design for a target reliability he can, provided that sufficient data on span variation is available, reduce the design loads on towers by a factor $\gamma_u < 1$ and achieve more economical lines.

The reduction factors γ_u can be calculated from the statistical methods detailed hereafter.

a) Procedure

- Start with a given function of wind speed V (assume Gumbel function), where: $v_w = 0,12; 0,16; 0,20$ (COV of wind speed.)
- Consider different cases of use factor curves (assume Beta function), where: $\bar{U} = 0,95, \sigma_u = 0,05$ and $\bar{U} = 0,85, \sigma_u = 0,10$, etc.
- Calculate statistical parameters of applied load $Q' = W^2 U$. This can be done by Monte-Carlo simulation or by numerical integration. For small values of σ_u , approximate methods can be used.
- Calculate Q_{50} from $Q = W^2$ (using Gumbel tables), this is the load without the effect of use factor.
- Calculate Q'_{50} from new curve $Q' = W^2 U$, this is the load including the influence of use factor.
- The use factor coefficient γ_u is calculated from the ratio Q'_{50}/Q_{50} .

b) Exemple numérique

Entrée $\overline{W} = 1,0, v_w = 0,12$ (Gumbel)

$\overline{U} = 0,85, \sigma_u = 0,10$ (Bêta)

Calculs $W_{50} = 1,31 \overline{W}$ (à partir des tables de Gumbel), voir annexe C

$$Q_{50} = K \times W_{50}^2 = 1,72K \text{ (où } K \text{ est une constante).}$$

Calculer la fonction de densité de probabilité de $Q' = W^2 U$. A partir de la nouvelle courbe Q' , on obtient $Q'_{50} = K \times 1,48$ (valeur obtenue par intégration numérique).

Ainsi
$$\gamma_u = \frac{1,48 K}{1,72 K} = 0,86$$

On répète cet exercice pour $T = 150, 500$ ans ainsi que pour $v_w = 0,16$ et $0,20$. On a constaté que toutes les valeurs résultant de γ_u se situent dans la gamme de $0,86$ à $0,89$.

c) Méthode approximative: on utilise la méthode des moments centrés

$$\overline{Q'} = \overline{W}^2 \times \overline{U} = 1,0^2 \times 0,85 = 0,85$$

$$v_{Q'}^2 = (2v_w)^2 + v_U^2 = 0,0576 + 0,0138 \Rightarrow v_{Q'} = 0,267$$

Q'_{50} ($T = 50$ ans) = Q' avec une probabilité de 2 %. Cela est équivalent à la valeur moyenne d'une courbe normale majorée de 2,054 écarts types.

$$Q'_{50} = 0,85 (1 + 2,054 \times 0,267) = 1,32$$

Q_{50} ($T = 50$ ans), sans l'effet de U :

$$Q = W^2$$

$$Q = 1,0 ; v_Q = 2 \times 0,12 = 0,24$$

$$Q_{50} = 1,0 (1 + 2,054 \times 0,24) = 1,49$$

$$\gamma_u = \frac{1,32 K}{1,49 K} = 0,88$$

Des calculs approximatifs ne donnent pas une bonne estimation de charge Q_T mais des résultats acceptables pour γ_u .

b) Numerical example

Input: $\overline{W} = 1,0, v_w = 0,12$ (Gumbel)

$\overline{U} = 0,85, \sigma_u = 0,10$ (Beta)

Calculations $W_{50} = 1,31 \overline{W}$ (from Gumbel tables), see annex C

$Q_{50} = K \times W_{50}^2 = 1,72 K$ (where K is a constant).

Calculate the probability density function of $Q' = W^2 U$. From the new Q' , we obtain $Q'_{50} = K \times 1,48$ (value obtained by numerical integration).

Thus
$$\gamma_u = \frac{1,48 K}{1,72 K} = 0,86$$

This exercise is repeated for $T = 150, 500$ years as well as for $v_w = 0,16$ and $0,20$. All resulting values of γ_u are found to be in the range of $0,86$ to $0,89$.

c) Approximate method: using the method of central moments

$$\overline{Q'} = \overline{W}^2 \times \overline{U} = 1,0^2 \times 0,85 = 0,85$$

$$v_{Q'}^2 = (2v_w)^2 + v_U^2 = 0,0576 + 0,0138 \Rightarrow v_{Q'} = 0,267$$

Q'_{50} ($T = 50$ years) = Q' with a 2 % probability. It is equal to 2,054 standard deviations from mean value of normal curves.

$$Q'_{50} = 0,85 (1 + 2,054 \times 0,267) = 1,32$$

Q_{50} ($T = 50$ years), without the effect of U :

$$Q = W^2$$

$$Q = 1,0; v_Q = 2 \times 0,12 = 0,24$$

$$Q_{50} = 1,0 (1 + 2,054 \times 0,24) = 1,49$$

$$\gamma_u = \frac{1,32 K}{1,49 K} = 0,88$$

It is noted that approximate calculations do not give a good estimate of load Q_T but give acceptable results for γ_u .

A.3 Effet du nombre de pylônes sur γ_u

Lorsque l'intensité maximale d'un événement de charge climatique couvre un grand nombre de N pylônes, cela modifie l'effet de la dispersion du facteur d'utilisation.

Si la dispersion de résistance est très basse ou négligeable, le pylône supportant la charge la plus critique parmi les pylônes N sera celui ayant la plus grande portée (ou le plus grand facteur d'utilisation). Pour trouver γ_u (avec N pylônes), nous devons tenir compte d'une nouvelle courbe $\min_N U$ dans le calcul précédent.

Lorsque N est très important et que l'on considère la dispersion de résistance comme négligeable, γ_u est très proche de 1,0.

L'explication physique de l'augmentation de γ_u jusqu'à 1,0 est simple: si l'intensité maximale d'un événement de charge couvre un grand espace, cela affectera vraisemblablement le pylône ayant la portée la plus longue.

Comme on l'a vu, on peut arriver à la conclusion ci-dessus uniquement si l'on néglige la dispersion de résistance des pylônes par rapport à celle des portées. Toutefois, dans des lignes bien optimisées, la dispersion du facteur d'utilisation pourrait être faible et il est important de déterminer l'effet combiné du facteur d'utilisation et de la dispersion de résistance.

On a utilisé pour cela deux méthodes et on a abouti à des résultats identiques: la première méthode utilisant la relation générale $Q U < R$ et la seconde $Q < R/U$. La seconde méthode est détaillée ci-après.

La résistance utilisée dans l'équation est (10 %) R . Sous l'influence du facteur d'utilisation, cette valeur devient (10 %) R/U . Avec N pylônes exposés à une intensité de charge maximale, la résistance de calcul devient (10%) $\min_N (R/U)$.

Ainsi, on peut quantifier l'influence du facteur d'utilisation à l'aide de l'équation:

$$\gamma_u = \frac{(10 \%) \min_N R}{(10 \%) \min_N R/U}$$

Il a été question du numérateur de cet équation en 5.5. On peut obtenir le dénominateur à l'aide des mêmes méthodes, soit par simulation ou par intégration numérique. Le tableau A.3 donne quelques résultats obtenus à l'aide de la simulation de Monte-Carlo.