



IEC 61400-6

Edition 1.0 2020-04

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Wind energy generation systems –
Part 6: Tower and foundation design requirements**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne –
Partie 6: Exigences en matière de conception du mât et de la fondation**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-8803-0

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	9
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	12
2 Normative references.....	12
3 Terms and definitions	13
4 Symbols and abbreviated terms	17
4.1 Symbols.....	17
4.2 Abbreviated terms	19
5 Design basis including loading	20
5.1 General.....	20
5.2 Basis of design	20
5.2.1 Basic principles.....	20
5.2.2 Durability	21
5.2.3 Principles of limit state design	21
5.2.4 Structural analysis	21
5.2.5 Assessments by tests.....	22
5.3 Materials.....	22
5.4 Loads	22
5.4.1 Use of IEC 61400-1 or IEC 61400-2 load cases and partial safety factors for loads	22
5.4.2 Superseding of IEC 61400-1 or IEC 61400-2 partial safety factors for materials.....	22
5.4.3 Serviceability load levels	23
5.4.4 Load combinations in ULS.....	24
5.4.5 Structural damping values to be used in load calculations	25
5.4.6 Definitions and methods for use of internal loads	25
5.4.7 Definition of required load data for fatigue analysis.....	25
5.4.8 Definition of required load data for extreme load level.....	25
5.4.9 Vortex induced vibration.....	26
5.4.10 Loads due to geometric tolerances and elastic deflections in tower verticality	26
5.5 Load data and interface reporting requirements	27
5.5.1 Purpose	27
5.5.2 Wind turbine specification	27
5.5.3 Time history data	28
5.5.4 Load origins.....	28
5.5.5 Load components.....	28
5.6 General structural design requirements	28
5.6.1 Secondary structural influence	28
5.6.2 Fatigue analysis.....	28
5.7 Delivery documentation	28
6 Steel towers	29
6.1 General.....	29
6.2 Basis of design	29
6.3 Materials.....	29
6.3.1 General	29

6.3.2	Structural steels	29
6.3.3	Bolts and anchors	32
6.4	Ultimate strength analysis for towers and openings	32
6.4.1	General	32
6.4.2	Partial safety factors	32
6.4.3	Verification of ultimate strength	32
6.4.4	Tower assessment	32
6.4.5	Detail assessments	33
6.5	Stability	33
6.5.1	General	33
6.5.2	Partial safety factor	34
6.5.3	Assessment	34
6.5.4	Door frames/stiffeners	34
6.6	Fatigue limit state	35
6.6.1	General	35
6.6.2	Partial safety factor for materials	35
6.6.3	Assessment	36
6.6.4	Details	36
6.7	Ring flange connections	36
6.7.1	General	36
6.7.2	Design assumptions and requirements, execution of ring flanges	36
6.7.3	Ultimate limit state analysis of flange and bolted connection	38
6.7.4	Fatigue limit state analysis of bolted connection	38
6.8	Bolted connections resisting shear through friction	40
6.8.1	General requirements	40
6.8.2	Test-assisted design	41
6.8.3	Design without test	42
7	Concrete towers and foundations	42
7.1	General	42
7.2	Basis of design	42
7.2.1	Reference standard for concrete design	42
7.2.2	Partial safety factors	43
7.2.3	Basic variables	43
7.3	Materials	45
7.4	Durability	46
7.4.1	Durability requirements	46
7.4.2	Exposure classes	46
7.4.3	Concrete cover	46
7.5	Structural analysis	46
7.5.1	Finite element analysis	46
7.5.2	Foundation slabs	47
7.5.3	Regions with discontinuity in geometry or loads	47
7.5.4	Cast in anchor bolt arrangements	48
7.6	Concrete to concrete joints	48
7.7	Ultimate limit state	48
7.7.1	General	48
7.7.2	Shear and punching shear	48
7.8	Fatigue limit state	49
7.8.1	General	49

7.8.2	Reinforcement and prestressing steel fatigue failure	49
7.8.3	Concrete fatigue failure	49
7.9	Serviceability limit state	50
7.9.1	Load dependent stiffness reduction	50
7.9.2	Stress limitation	50
7.9.3	Crack control	50
7.9.4	Deformations	51
7.10	Execution	51
7.10.1	General	51
7.10.2	Requirements	51
7.10.3	Inspection of materials and products	51
7.10.4	Falsework and formwork	51
7.10.5	Reinforcement and embedded steel	51
7.10.6	Pre-stressing	51
7.10.7	Precast concrete elements	52
7.10.8	Geometrical tolerances	52
8	Foundations – Geotechnical design	52
8.1	General	52
8.2	Basis of design	52
8.2.1	General	52
8.2.2	Geotechnical limit states	53
8.3	Geotechnical data	53
8.3.1	General	53
8.3.2	Specific considerations	55
8.4	Supervision, monitoring and maintenance of construction	56
8.5	Gravity base foundations	56
8.5.1	General	56
8.5.2	Ultimate limit state (ULS)	57
8.5.3	Serviceability limit state (SLS)	60
8.6	Piled foundations	62
8.6.1	General	62
8.6.2	Pile loads	62
8.6.3	Ultimate limit state	63
8.6.4	Serviceability limit state	64
8.7	Rock anchored foundations	65
8.7.1	General	65
8.7.2	Types of rock anchor foundation	65
8.7.3	Geotechnical data	65
8.7.4	Corrosion protection	65
8.7.5	Anchor inspection and maintenance	66
8.7.6	Post tension tolerances and losses	66
8.7.7	Ultimate limit state	66
8.7.8	Serviceability limit state	67
8.7.9	Robustness check	67
8.7.10	Rock anchor design	68
9	Operation, service and maintenance requirements	70
9.1	Operation, maintenance and monitoring	70
9.2	Periodic structural inspections	70
9.3	Embedded steel structural section inspections	71

9.4	Bolt tension maintenance	71
9.5	Structural health monitoring.....	71
Annex A (informative) List of suitable design codes and guidelines for the calculation basis		72
A.1	General.....	72
A.2	Reference documents	72
Annex B (informative) List of material for structural steel		73
B.1	General.....	73
B.2	Structural steel.....	73
Annex C (informative) Bolts.....		74
C.1	General.....	74
C.2	Reference documents	75
Annex D (informative) <i>Z</i> -values for structural steel		76
D.1	General.....	76
D.2	Definition of <i>Z</i> -value according to Eurocode	76
D.3	Reference documents	76
Annex E (informative) Simplified buckling verification for openings in tubular steel towers		77
Annex F (informative) Fatigue verification.....		80
F.1	General.....	80
F.2	Specific details.....	80
Annex G (informative) Methods for ring flange verification		81
G.1	Method for ultimate strength analysis according to Petersen/Seidel	81
G.1.1	Basics	81
G.1.2	Calculation method	81
G.1.3	Extension by Tobinaga and Ishihara	84
G.2	Method for fatigue strength analysis according to Schmidt/Neuper	85
G.2.1	Basics	85
G.2.2	Formulas for the tri-linear approximation.....	86
G.3	Reference documents	87
Annex H (informative) Crack control – Guidance on 7.9.3		88
H.1	General.....	88
H.2	Crack control based on Eurocode 2	88
H.3	Crack control based on Japanese standards	88
H.4	Crack control based on ACI 318	89
H.5	Reference documents	89
Annex I (informative) Finite element analysis for concrete.....		90
I.1	General.....	90
I.2	Order and type of elements	90
I.3	Constitutive modelling	91
I.4	Solution methods	91
I.5	Implicit approach.....	91
I.6	Steps in conducting of a finite element analysis	92
I.7	Checking results	92
I.8	Reference documents	93
Annex J (informative) Tower-foundation anchorage		94
J.1	General.....	94
J.2	Embedded anchorages.....	94

J.3	Bolted anchorages	95
J.4	Grout	95
J.5	Anchor bolts.....	95
J.6	Embedded ring.....	95
J.7	Anchorage load transfer	96
Annex K	(informative) Strut-and-tie section.....	97
K.1	General.....	97
K.2	Example of a rock anchor foundation	98
K.3	Reference documents	101
Annex L	(informative) Guidance on selection of soil modulus and foundation rotational stiffness.....	103
L.1	General.....	103
L.2	Soil model.....	103
L.3	Dynamic rotational stiffness.....	105
L.4	Static rotational stiffness	106
L.5	Reference documents	107
Annex M	(informative) Guidance for rock anchored foundation design.....	108
M.1	General.....	108
M.2	Corrosion protection.....	108
M.2.1	Standard anchors.....	108
M.2.2	Corrosion protection of bar anchors.....	109
M.3	Product approval.....	110
M.4	Rock anchor design.....	110
M.5	Grout design	110
M.6	Testing and execution	110
M.7	Suitability/performance test	111
M.8	Acceptance/proof test.....	111
M.9	Supplementary extended creep tests	111
M.10	Reference documents	111
Annex N	(informative) Internal loads – Explanation of internal loads	112
Annex O	(informative) Seismic load estimation for wind turbine tower and foundation.....	114
O.1	General.....	114
O.2	Vertical ground motion	114
O.3	Structure model.....	114
O.4	Soil amplification.....	115
O.5	Time domain simulation.....	116
O.6	Reference documents	116
Annex P	(informative) Structural damping ratio for the tower of wind turbine	117
P.1	General.....	117
P.2	First mode structural damping ratio.....	117
P.3	Second mode structural damping ratio	118
P.4	Higher mode damping	118
P.5	Reference documents	119
Annex Q	(informative) Guidance on partial safety factors for geotechnical limit states	120
Q.1	General.....	120
Q.2	Equilibrium.....	120
Q.3	Bearing capacity	120
Q.4	Sliding resistance.....	121

Q.5 Overall stability	121
Q.6 Reference documents	122
Bibliography	123
Figure 1 – Flange notations as an example of an L-flange	31
Figure 2 – Door opening geometry	35
Figure 3 – Flange gaps k in the area of the tower wall	37
Figure 4 – Bolt force as a function of wall force	39
Figure 5 – S-N curve for detail category 36.....	40
Figure 6 – Thermal effects around tower cross-section	44
Figure 7 – Illustration of rock anchor length	70
Figure E.1 – Circumferentially edge-stiffened opening	78
Figure E.2 – Definition of W_S and t_S according to JSCE	79
Figure G.1 – Simplification of system to segment model	81
Figure G.2 – Locations of plastic hinges for different failure modes	82
Figure G.3 – Geometric parameters	83
Figure G.4 – Modification factor λ for different α [1].....	85
Figure G.5 – Tri-linear approximation of the non-linear relation between bolt force and tension force of the bolted connection	86
Figure K.1 – Example for the design of a deep beam using the strut-and-tie method.....	97
Figure K.2 – Simple shapes of strut-and-tie models	97
Figure K.3 – Three examples for carrying load in a deep beam	98
Figure K.4 – Strut-and-tie models for a rock-anchor foundation.....	100
Figure K.5 – Top tie reinforcement in a rock-anchor foundation.....	101
Figure L.1 – Example stress-strain relationship for soil	103
Figure L.2 – Loading and unloading behaviour of soil	104
Figure L.3 – Variation of shear modulus with soil strain.....	105
Figure L.4 – Reduction in rotational stiffness due to load eccentricity	106
Figure L.5 – Illustrative example of reduction in foundation rotational stiffness due to increasing load eccentricity	107
Figure M.1 – Section through rock and anchor.....	108
Figure M.2 – Typical anchor configuration with corrosion protection	109
Figure N.1 – Representation of internal loads	113
Figure O.1 – Structure model for response spectrum method	115
Figure P.1 – First mode damping ratio for the steel tower of wind turbine	118
Table 1 – Flange tolerances	37
Table 2 – Summary of geotechnical limit states	53
Table B.1 – National and regional steel standards and types	73
Table C.1 – Comparison of bolt material in ISO 898-1, JIS B1186 and ASTM A490M-12.....	74
Table E.1 – Coefficients for Formula (E.3).....	78
Table H.1 – Limit value of crack width based on Japanese standards [1].....	89
Table P.1 – Damping coefficients	117

Table Q.1 – Minimum partial safety factors for the equilibrium limit state (European and North American practice).....	120
Table Q.2 – Minimum partial safety factors on for the equilibrium limit state (JSCE)	120
Table Q.3 – Minimum partial material and resistance factors for the bearing resistance limit state, ULS	121
Table Q.4 – Minimum partial material and resistance factors for the sliding resistance limit state, ULS	121
Table Q.5 – Minimum partial material and resistance factors for the overall stability limit state, ULS	122

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –**Part 6: Tower and foundation design requirements**

FOREWORD

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

International Standard IEC 61400-6 has been prepared by IEC technical committee TC 88: Wind energy generation systems.

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

FDIS	Report on voting
88/751/FDIS	88/754/RVD

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

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

Future standards in this series will carry the new general title as cited above. Titles of existing standards in this series will be updated at the time of the next edition.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific document. At this date, the document will be

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

The contents of the corrigendum of November 2020 have been included in this copy.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

This document has been developed for the design of onshore wind turbine towers and foundations that will build on and complement the IEC 61400-1 relating to design criteria and provide a complete set of technical requirements for the structural and geotechnical design. The requirements are also applicable to wind turbines covered by IEC 61400-2. It is envisaged that the proposed work will be followed by the development of another part, directed towards the design of offshore support structures, thus also complementing IEC 61400-3-1.

Civil engineering practices associated with the scope of the standard have regional variations. It is not the intention of this document to conflict with those practices but to supplement them particularly in ensuring that all important features of typical wind turbine towers and foundations are fully and correctly considered. To this end, the relevant parts in existing standards for design of steel and concrete structures and for geotechnical design have been identified for participating countries and regions.

The principles included in this document apply to the sections of the tower of an offshore fixed structure above the splash zone if the loading has been calculated according to IEC 61400-3-1.

This document will include the evaluation and calibration of partial safety factors for material strengths to be used together with the safety elements in IEC 61400-1 and IEC 61400-2 for loads and for verification of static equilibrium.

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

Part 6: Tower and foundation design requirements

1 Scope

This part of IEC 61400 specifies requirements and general principles to be used in assessing the structural integrity of onshore wind turbine support structures (including foundations). The scope includes the geotechnical assessment of the soil for generic or site specific purposes. The strength of any flange and connection system connected to the rotor nacelle assembly (including connection to the yaw bearing) are designed and documented according to this document or according to IEC 61400-1. The scope includes all life cycle issues that may affect the structural integrity such as assembly and maintenance.

The assessment assumes that load data has been derived as defined in IEC 61400-1 or IEC 61400-2 and using the implicit reliability level and partial safety factors for loads.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 61400-1:2019, *Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements*

IEC 61400-2, *Wind turbines – Part 2: Small wind turbines*

IEC 61400-3-1:2019, *Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines*

ISO 2394:2015, *General principles on reliability for structures*

ISO 22965-1, *Concrete – Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier*

ISO 22965-2, *Concrete – Part 2: Specification of constituent materials, production of concrete and compliance of concrete*

ISO 22966, *Execution of concrete structures*

ISO 6934 (all parts), *Steel for the prestressing of concrete*

ISO 6935 (all parts), *Steel for the reinforcement of concrete*

ISO 9016:2012, *Destructive tests on welds in metallic materials – Impact tests – Test specimen location, notch orientation and examination*

ISO 12944 (all parts), *Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*

EN 1993-1-9:2005, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue*

EN 1993-3-2:2006, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 3-2: Towers, masts and chimneys – Chimneys*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	131
INTRODUCTION	133
1 Domaine d'application	134
2 Références normatives	134
3 Termes et définitions	135
4 Symboles et termes abrégés	140
4.1 Symboles	140
4.2 Termes abrégés	142
5 Bases de la conception incluant la charge	143
5.1 Généralités	143
5.2 Base de la conception	143
5.2.1 Principes de base	143
5.2.2 Durabilité	144
5.2.3 Principes de calcul à l'état limite	144
5.2.4 Analyse structurelle	144
5.2.5 Évaluation par des essais	145
5.3 Matériaux	145
5.4 Charges	145
5.4.1 Utilisation des cas de charge et des facteurs de sécurité partielle pour les charges de l'IEC 61400-1 ou de l'IEC 61400-2	145
5.4.2 Remplacement des facteurs de sécurité partielle pour les matériaux de l'IEC 61400-1 ou de l'IEC 61400-2	146
5.4.3 Niveaux de charge d'aptitude au service	146
5.4.4 Combinaison de charges dans l'état limite ultime	147
5.4.5 Valeurs d'amortissement structurel à utiliser dans les calculs de charge	148
5.4.6 Définitions et méthodes d'utilisation des charges internes	148
5.4.7 Définition des données de charge exigées pour l'analyse de fatigue	148
5.4.8 Définition des données de charge exigées pour le niveau de charge extrême	149
5.4.9 Vibrations induites par les tourbillons	149
5.4.10 Charges dues aux tolérances géométriques et aux déviations élastiques dans la verticalité du mât	149
5.5 Données de charge et exigences de consignation d'interface	150
5.5.1 Objet	150
5.5.2 Spécification d'éolienne	150
5.5.3 Données d'accélérogramme	151
5.5.4 Origines de la charge	151
5.5.5 Composantes de charge	152
5.6 Exigences générales relatives à la conception structurelle	152
5.6.1 Influence secondaire structurelle	152
5.6.2 Analyse de fatigue	152
5.7 Documentation de livraison	152
6 Mâts en acier	152
6.1 Généralités	152
6.2 Base de la conception	152
6.3 Matériaux	153

6.3.1	Généralités	153
6.3.2	Aciers de construction	153
6.3.3	Boulons et ancrages	156
6.4	Analyse de la résistance ultime pour les mâts et les ouvertures	156
6.4.1	Généralités	156
6.4.2	Facteurs de sécurité partielle.....	156
6.4.3	Vérification de la résistance ultime	156
6.4.4	Évaluation du mât.....	156
6.4.5	Évaluations détaillées	157
6.5	Stabilité	158
6.5.1	Généralités	158
6.5.2	Facteur de sécurité partielle	158
6.5.3	Évaluation	158
6.5.4	Cadres de porte/raidisseurs	158
6.6	État limite en fatigue	159
6.6.1	Généralités	159
6.6.2	Facteur de sécurité partielle pour les matériaux.....	160
6.6.3	Évaluation	160
6.6.4	Détails	160
6.7	Brides de raccordement en anneau.....	161
6.7.1	Généralités	161
6.7.2	Hypothèses et exigences de conception, exécution des brides en anneau	161
6.7.3	Analyse de l'état limite ultime de la bride de raccordement et du raccordement par serrage mécanique.....	163
6.7.4	Analyse de l'état limite en fatigue du raccordement par serrage mécanique.....	163
6.8	Raccordements par serrage mécanique résistant au frottement par cisaillement.....	164
6.8.1	Exigences générales	164
6.8.2	Conception assistée par des essais	165
6.8.3	Conception sans essai.....	167
7	Mâts et fondations en béton.....	167
7.1	Généralités	167
7.2	Base de la conception.....	167
7.2.1	Norme de référence pour la conception en béton	167
7.2.2	Facteurs de sécurité partielle.....	167
7.2.3	Variables de base	168
7.3	Matériaux.....	170
7.4	Durabilité	170
7.4.1	Exigences de durabilité.....	170
7.4.2	Classes d'exposition	171
7.4.3	Recouvrement du béton.....	171
7.5	Analyse structurelle	171
7.5.1	Analyse par éléments finis	171
7.5.2	Radiers généraux	172
7.5.3	Zones présentant une discontinuité dans la configuration et les charges	172
7.5.4	Dispositions de boulon d'ancrage coulé	173
7.6	Jointés béton/béton	173
7.7	État limite ultime	173

7.7.1	Généralités	173
7.7.2	Cisaillement et cisaillement périphérique	173
7.8	État limite en fatigue	174
7.8.1	Généralités	174
7.8.2	Armature et défaillance due à la fatigue de l'acier de précontrainte	174
7.8.3	Défaillance due à la fatigue du béton	175
7.9	État limite de service	175
7.9.1	Réduction de la raideur dépendante de la charge	175
7.9.2	Limitation de contrainte	175
7.9.3	Contrôle de fissure	175
7.9.4	Déformations	176
7.10	Exécution	176
7.10.1	Généralités	176
7.10.2	Exigences	176
7.10.3	Examen des matériaux et des produits	176
7.10.4	Échafaudage et coffrage	176
7.10.5	Armature et acier encastré	177
7.10.6	Précontrainte	177
7.10.7	Éléments en béton préfabriqué	177
7.10.8	Tolérances géométriques	177
8	Fondations – Conception géotechnique	177
8.1	Généralités	177
8.2	Base de la conception	178
8.2.1	Généralités	178
8.2.2	États limites géotechniques	178
8.3	Données géotechniques	179
8.3.1	Généralités	179
8.3.2	Considérations particulières	180
8.4	Supervision, surveillance et maintenance de la construction	182
8.5	Fondations gravitaires	182
8.5.1	Généralités	182
8.5.2	État limite ultime (ULS – Ultimate limit state)	182
8.5.3	État limite de service (SLS – Serviceability limit state)	186
8.6	Fondations sur pieux	188
8.6.1	Généralités	188
8.6.2	Charges sur le pieu	188
8.6.3	État limite ultime	189
8.6.4	État limite de service	190
8.7	Fondations enrochées	191
8.7.1	Généralités	191
8.7.2	Types de fondations enrochées	191
8.7.3	Données géotechniques	191
8.7.4	Protection contre la corrosion	192
8.7.5	Examen et maintenance de l'ancrage	192
8.7.6	Tolérances et pertes de post-tension	192
8.7.7	État limite ultime	192
8.7.8	État limite de service	193
8.7.9	Contrôle de robustesse	194
8.7.10	Conception de l'ancre pour la roche	194

9	Exigences de fonctionnement, de service et de maintenance.....	196
9.1	Fonctionnement, maintenance et surveillance.....	196
9.2	Examens structuraux périodiques.....	197
9.3	Examens de la section structurelle en acier encastré.....	197
9.4	Maintenance de la tension des boulons.....	197
9.5	Surveillance de l'intégrité de la structure.....	197
Annexe A (informative) Liste des codes de conception pertinents et lignes directrices pour la base de calcul.....		198
A.1	Généralités.....	198
A.2	Documents de référence.....	198
Annexe B (informative) Liste des matériaux pour l'acier de construction.....		199
B.1	Généralités.....	199
B.2	Acier de construction.....	199
Annexe C (informative) Boulons.....		200
C.1	Généralités.....	200
C.2	Documents de référence.....	201
Annexe D (informative) Valeurs Z pour l'acier structurel.....		202
D.1	Généralités.....	202
D.2	Définition de la valeur Z selon l'Eurocode.....	202
D.3	Documents de référence.....	202
Annexe E (informative) Vérification simplifiée du flambement pour les ouvertures des mâts en acier tubulaires.....		203
Annexe F (informative) Vérification de la fatigue.....		206
F.1	Généralités.....	206
F.2	Détails spécifiques.....	206
Annexe G (informative) Méthodes de vérification des brides en anneau.....		207
G.1	Méthode d'analyse de la résistance ultime selon Petersen/Seidel.....	207
G.1.1	Principes de base.....	207
G.1.2	Méthode de calcul.....	207
G.1.3	Extension par Tobinaga et Ishihara.....	210
G.2	Méthode d'analyse de la résistance à la fatigue selon Schmidt/Neuper.....	212
G.2.1	Principes de base.....	212
G.2.2	Formules de l'approximation trilinéaire.....	212
G.3	Documents de référence.....	213
Annexe H (informative) Contrôle de fissure – Recommandations relatives à 7.9.3.....		214
H.1	Généralités.....	214
H.2	Contrôle de fissure reposant sur l'Eurocode 2.....	214
H.3	Contrôle de fissure reposant sur les normes japonaises.....	214
H.4	Contrôle de fissure reposant sur l'ACI 318.....	215
H.5	Documents de référence.....	215
Annexe I (informative) Analyse par éléments finis du béton.....		216
I.1	Généralités.....	216
I.2	Ordre et type d'éléments.....	216
I.3	Modélisation constitutive.....	217
I.4	Solutions.....	217
I.5	Approche implicite.....	218
I.6	Étapes de réalisation d'une analyse par éléments finis.....	218
I.7	Vérification des résultats.....	218

I.8	Documents de référence	219
Annexe J (informative)	Ancrage mât-fondation	220
J.1	Généralités	220
J.2	Ancrages intégrés	220
J.3	Ancrages boulonnés	221
J.4	Coulis	221
J.5	Boulons d'ancrage	221
J.6	Anneau intégré	222
J.7	Transfert de charge de l'ancrage.....	222
Annexe K (informative)	Section de bielles et tirants	223
K.1	Généralités	223
K.2	Exemple de fondations enrochées	224
K.3	Documents de référence	227
Annexe L (informative)	Recommandations relatives au choix du module du sol et de la raideur en rotation de la fondation	229
L.1	Généralités	229
L.2	Modèle de sol	229
L.3	Raideur dynamique en rotation	231
L.4	Raideur statique en rotation	232
L.5	Documents de référence	234
Annexe M (informative)	Recommandations pour la conception de fondations enrochées.....	235
M.1	Généralités	235
M.2	Protection contre la corrosion	235
M.2.1	Ancre normalisées	235
M.2.2	Protection contre la corrosion des ancre en barre	237
M.3	Approbation du produit.....	237
M.4	Conception de l'ancre pour la roche	237
M.5	Conception du coulis.....	237
M.6	Essais et exécution.....	237
M.7	Essai de pertinence/performance	238
M.8	Essai d'acceptation/périodique.....	238
M.9	Essais de fluage étendus supplémentaires.....	238
M.10	Documents de référence	239
Annexe N (informative)	Charges internes – Explication des charges internes	240
Annexe O (informative)	Estimation de la charge sismique pour le mât et la fondation de l'éolienne	242
O.1	Généralités	242
O.2	Mouvement vertical souterrain	242
O.3	Modèle de structure	242
O.4	Amplification du sol.....	243
O.5	Simulation du domaine temporel	244
O.6	Documents de référence	244
Annexe P (informative)	Rapport d'amortissement structurel du mât de l'éolienne	245
P.1	Généralités	245
P.2	Rapport d'amortissement structurel en mode premier.....	245
P.3	Rapport d'amortissement structurel en mode second	246
P.4	Amortissement en mode supérieur	246
P.5	Documents de référence	247

Annexe Q (informative) Recommandations relatives aux facteurs de sécurité partielle des états limites géotechniques	248
Q.1 Généralités	248
Q.2 Équilibre	248
Q.3 Capacité portante	249
Q.4 Résistance au glissement	249
Q.5 Stabilité globale	250
Q.6 Documents de référence	250
Bibliographie.....	251
Figure 1 – Notations de bride comme exemple de bride en L	155
Figure 2 – Configuration de l'ouverture de porte	159
Figure 3 – Espaces de bride k dans la zone de la paroi du mât.....	161
Figure 4 – Force du boulon en fonction de la force de la paroi	164
Figure 5 – Courbe S-N pour la catégorie de détails 36	164
Figure 6 – Effets thermiques autour de la section transversale du mât.....	168
Figure 7– Présentation de la longueur d'ancre pour la roche.....	196
Figure E.1 – Ouvertures dont les bords raidissent sur la circonférence	204
Figure E.2 – Définition de W_S et de t_S selon le JSCE	205
Figure G.1 – Simplification du système en modèle de segment.....	207
Figure G.2 – Emplacements des charnières plastiques pour différents modes de défaillance	208
Figure G.3 – Paramètres géométriques.....	209
Figure G.4 – Facteur de modification λ pour différents α [1]	211
Figure G.5 – Approximation trilineaire de la relation non linéaire entre la force du boulon et la force de traction du raccordement par serrage mécanique	212
Figure K.1 – Exemple de conception d'une poutre profonde à l'aide de la méthode des bielles et tirants	223
Figure K.2 – Formes simples de modèles bielles-tirants.....	223
Figure K.3 – Trois exemples pour supporter la charge dans une poutre profonde	224
Figure K.4 – Modèles bielles-tirants pour une fondation enrochée.....	226
Figure K.5 – Armature de support supérieure dans une fondation enrochée.....	227
Figure L.1 – Exemple de relation contrainte-déformation du sol	229
Figure L.2 – Comportement du sol sous charge et décharge	230
Figure L.3 – Variation du module de cisaillement avec déformation du sol	231
Figure L.4 – Réduction de la raideur en rotation du fait de l'excentricité de charge	232
Figure L.5 – Exemple d'illustration de la réduction de la raideur en rotation de la fondation du fait de l'excentricité de charge en augmentation	233
Figure M.1– Section d'une roche et d'une ancre.....	235
Figure M.2 – Configuration d'ancre type avec protection contre la corrosion	236
Figure N.1 – Représentation des charges internes.....	241
Figure O.1 – Modèle de structure de la méthode du spectre de réponse	243
Figure P.1 – Rapport d'amortissement en mode premier du mât en acier de l'éolienne	246
Tableau 1 – Tolérances de bride.....	162

Tableau 2 – Récapitulatif des états limites géotechniques	178
Tableau B.1 – Normes nationales et régionales et type d'aciers	199
Tableau C.1 – Comparaison du matériau de boulon de l'ISO 898-1, JIS B1186 et ASTM A490M-12.....	200
Tableau E.1 – Coefficients pour la Formule (E.3).....	204
Tableau H.1 – Valeur limite de largeur de fissure selon les normes japonaises [1].....	215
Tableau P.1 – Coefficients d'amortissement	245
Tableau Q.1 – Facteurs de sécurité partielle minimale pour l'état limite d'équilibre (pratique européenne et nord-américaine)	248
Tableau Q.2 – Facteurs de sécurité partielle minimale pour l'état limite d'équilibre (JSCE).....	248
Tableau Q.3 – Facteurs partiels minimaux de la résistance et du matériau pour l'état limite de résistance portante, ULS (état limite ultime)	249
Tableau Q.4 – Facteurs partiels minimaux de la résistance et du matériau pour l'état limite de résistance au glissement, ULS (état limite ultime).....	249
Tableau Q.5 – Facteurs partiels minimaux de la résistance et du matériau pour l'état limite de stabilité globale, ULS (état limite ultime).....	250

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 6: Exigences en matière de conception du mât et de la fondation

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61400-6 a été établie par le comité d'études 88 de l'IEC: Systèmes de génération d'énergie éolienne.

La présente version bilingue (2020-09) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2020-04.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Les futures normes de cette série porteront dorénavant le nouveau titre général cité ci-dessus. Le titre des normes existant déjà dans cette série sera mis à jour lors de la prochaine édition.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

Le contenu du corrigendum de novembre 2020 a été pris en considération dans cet exemplaire.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Le présent document a été développé pour la conception des mâts et fondations d'éoliennes terrestres en vue de compléter l'IEC 61400-1 relative aux critères de conception. Il fournit également un ensemble exhaustif d'exigences techniques relatives à la conception structurelle et géotechnique. Les exigences s'appliquent également aux éoliennes couvertes par l'IEC 61400-2. Il est envisagé de compléter le travail proposé par l'élaboration d'une autre partie, orientée vers la conception des structures de support en pleine mer, venant donc également en complément de l'IEC 61400-3-1.

Les pratiques en vigueur dans le domaine du génie civil liées au domaine d'application de la norme sont différentes en fonction des régions. Ce document n'a pas pour objet de remettre en question ces pratiques, mais de les compléter, en assurant notamment que toutes les caractéristiques importantes des mâts et fondations d'éoliennes classiques soient correctement prises en considération. À cet effet, les parties correspondantes des normes existantes en matière de conception des structures en acier et en béton, et de conception géotechnique, ont été identifiées pour les pays et régions concernés.

Les principes présentés dans ce document s'appliquent aux sections de mât d'une structure fixe en pleine mer au-dessus de la zone d'action des vagues si la charge a été calculée selon l'IEC 61400-3-1.

Le présent document contient l'évaluation et l'étalonnage des facteurs de sécurité partielle pour la résistance des matériaux à utiliser avec les éléments de sécurité de l'IEC 61400-1 et de l'IEC 61400-2 pour les charges et la vérification de l'équilibre statique.

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 6: Exigences en matière de conception du mât et de la fondation

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61400 spécifie les exigences et les principes généraux à utiliser pour évaluer l'intégrité structurelle des structures de support d'éolienne terrestre (y compris les fondations). Le domaine d'application inclut l'évaluation géotechnique du sol en fonction des besoins génériques ou spécifiques au site. La résistance d'une bride et le système de connexion relié à l'ensemble rotor – nacelle (y compris la connexion au palier du dispositif d'orientation) sont conçus et documentés selon le présent document ou selon l'IEC 61400-1. Le domaine d'application inclut toutes les questions liées au cycle de vie qui peuvent avoir un impact sur l'intégrité structurelle (le montage et l'entretien, par exemple).

L'évaluation prend pour hypothèse que les données de charge ont été déduites comme cela est indiqué dans l'IEC 61400-1 ou l'IEC 61400-2 et à l'aide du niveau de fiabilité implicite et des facteurs de sécurité partielle pour les charges.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 61400-1:2019, *Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements* (disponible en anglais seulement)

IEC 61400-2, *Éoliennes – Partie 2: Petits aérogénérateurs*

IEC 61400-3-1:2019, *Systèmes de génération d'énergie éolienne – Partie 3-1: Exigences de conception des éoliennes en mer fixes*

ISO 2394:2015, *General principles on reliability for structures* (disponible en anglais seulement)

ISO 22965-1, *Concrete – Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier* (disponible en anglais seulement)

ISO 22965-2, *Concrete – Part 2: Specification of constituent materials, production of concrete and compliance of concrete* (disponible en anglais seulement)

ISO 22966, *Execution of concrete structures* (disponible en anglais seulement)

ISO 6934 (toutes les parties), *Acier pour armatures de précontrainte*

ISO 6935 (toutes les parties), *Aciers pour l'armature du béton*

ISO 9016:2012, *Essais destructifs des soudures sur matériaux métalliques – Essai de flexion par choc – Position de l'éprouvette, orientation de l'entaille et examen*

ISO 12944 (toutes les parties), *Peintures et vernis – Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture*

EN 1993-1-9:2005, *Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Partie 1-9: Fatigue*

EN 1993-3-2:2006, *Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Partie 3-2: Tours, mâts et cheminées – Cheminées*