

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Wind turbines –
Part 4: Design requirements for wind turbine gearboxes**

**Éoliennes –
Partie 4: Exigences de conception des boîtes de vitesses des éoliennes**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-7835-2

**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.....	7
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	10
2 Normative references	10
3 Terms, definitions and conventions.....	12
3.1 Terms and definitions	12
3.2 Conventions	15
4 Symbols, abbreviations and units	17
4.1 Symbols and units	17
4.2 Abbreviations	21
5 Design for reliability.....	23
5.1 Design lifetime and reliability.....	23
5.2 Design process	24
5.3 Documentation	26
5.4 Quality plan.....	26
6 Drivetrain operating conditions and loads	27
6.1 Drivetrain description	27
6.1.1 General	27
6.1.2 Interface definition.....	27
6.1.3 Specified requirements across interfaces.....	28
6.2 Deriving drivetrain loads.....	28
6.2.1 Wind turbine load simulation model	28
6.2.2 Wind turbine load calculations	29
6.2.3 Reliability of load assumptions	29
6.3 Results from wind turbine load calculations	29
6.3.1 General	29
6.3.2 Time series.....	30
6.3.3 Fatigue load	30
6.3.4 Extreme loads	31
6.4 Operating conditions	31
6.4.1 General	31
6.4.2 Environmental conditions.....	31
6.4.3 Operating strategies	32
6.5 Drivetrain analysis.....	32
7 Gearbox design, rating, and manufacturing requirements	32
7.1 Gearbox cooling	32
7.2 Gears	33
7.2.1 Gear reliability considerations.....	33
7.2.2 Gear rating	33
7.2.3 Load factors	34
7.2.4 Gear materials.....	36
7.2.5 Subsurface initiated fatigue	37
7.2.6 Gear accuracy	37
7.2.7 Gear manufacturing	37
7.3 Bearings.....	38
7.3.1 General	38

7.3.2	Bearing reliability considerations	38
7.3.3	Bearing steel quality requirements	39
7.3.4	General design considerations	39
7.3.5	Bearing interface requirements	42
7.3.6	Bearing design issues	43
7.3.7	Bearing lubrication	46
7.3.8	Rating calculations	47
7.4	Shafts, keys, housing joints, splines and fasteners	50
7.4.1	Shafts	50
7.4.2	Shaft-hub connections	51
7.4.3	Flexible splines	51
7.4.4	Shaft seals	52
7.4.5	Fasteners	52
7.4.6	Circlips (snap rings)	53
7.5	Structural elements	53
7.5.1	Introduction	53
7.5.2	Reliability considerations	53
7.5.3	Deflection analysis	54
7.5.4	Strength verification	54
7.5.5	Static strength assessment	55
7.5.6	Fatigue strength assessment	58
7.5.7	Material tests	63
7.5.8	Documentation	63
7.6	Lubrication	64
7.6.1	General considerations	64
7.6.2	Type of lubricant	65
7.6.3	Lubricant characteristics	65
7.6.4	Method of lubrication	67
7.6.5	Oil quantity	68
7.6.6	Operating temperatures	68
7.6.7	Temperature control	69
7.6.8	Lubricant condition monitoring	70
7.6.9	Lubricant cleanliness	70
7.6.10	Lubricant filter	71
7.6.11	Ports	71
7.6.12	Oil level indicator	72
7.6.13	Magnetic plugs	72
7.6.14	Breather	73
7.6.15	Flow sensor	73
7.6.16	Serviceability	73
8	Design verification	73
8.1	General	73
8.2	Test planning	73
8.2.1	Identifying test criteria	73
8.2.2	New designs or substantive changes	74
8.2.3	Overall test plan	74
8.2.4	Specific test plans	74
8.3	Workshop prototype testing	75
8.3.1	General	75

8.3.2	Component testing	75
8.3.3	Workshop testing of a prototype gearbox	75
8.3.4	Lubrication system testing	76
8.4	Field test	76
8.4.1	General	76
8.4.2	Validation of loads	76
8.4.3	Type test of gearbox in wind turbine	77
8.5	Production testing	78
8.5.1	Acceptance testing	78
8.5.2	Sound emission testing.....	78
8.5.3	Vibration testing	78
8.5.4	Lubrication system considerations	78
8.5.5	System temperatures.....	78
8.6	Robustness test	78
8.7	Field lubricant temperature and cleanliness	78
8.8	Bearing specific validation	79
8.8.1	Design reviews	79
8.8.2	Prototype verification/validation	79
8.9	Test documentation	80
9	Operation, service and maintenance requirements	80
9.1	Service and maintenance requirements	80
9.2	Inspection requirements	80
9.3	Commissioning and run-in	80
9.4	Transport, handling and storage	81
9.5	Repair	81
9.6	Installation and exchange	81
9.7	Condition monitoring	81
9.8	Lubrication	81
9.8.1	Oil type requirements	81
9.8.2	Lubrication system.....	81
9.8.3	Oil test and analysis	82
9.9	Operations and maintenance documentation	82
Annex A (informative)	Examples of drivetrain interfaces and loads specifications	83
Annex B (informative)	Gearbox design and manufacturing considerations.....	94
Annex C (informative)	Bearing design considerations	97
Annex D (informative)	Considerations for gearbox structural elements.....	124
Annex E (informative)	Recommendations for lubricant performance in wind turbine gearboxes.....	127
Annex F (informative)	Design verification documentation	142
Annex G (informative)	Bearing calculation documentation.....	145
Bibliography	153
Figure 1	– Shaft designation in 3-stage parallel shaft gearboxes.....	15
Figure 2	– Shaft designation in 3-stage gearboxes with one planet stage.....	16
Figure 3	– Shaft designation in 3-stage gearboxes with two planet stages	17
Figure 4	– Design process flow chart	25
Figure 5	– Examples of bearing selection criteria	40

Figure 6 – Blind bearing assembly	46
Figure 7 – Definition of section factor $n_{pl,\sigma}$ of a notched component	57
Figure 8 – Idealized elastic plastic stress-strain curve	58
Figure 9 – Synthetic S/N curve (adapted from Haibach, 2006)	61
Figure A.1 – Modular drivetrain	83
Figure A.2 – Modular drivetrain with 3-point suspension	84
Figure A.3 – Integrated drivetrain	84
Figure A.4 – Reference system for modular drivetrain	86
Figure A.5 – Rear view of drivetrain	87
Figure A.6 – Reference system for modular drivetrain with 3-point suspension	88
Figure A.7 – Reference system for integrated drivetrain	89
Figure A.8 – Example of rainflow counting per DLC	91
Figure A.9 – Example of load revolution distribution (LRD)	92
Figure C.1 – Load bin reduction by lumping neighbouring load bins	98
Figure C.2 – Consumed life index (CLI)	100
Figure C.3 – Time share distribution	100
Figure C.4 – Effects of clearance and preload on pressure distribution in radial roller bearings (from Brandlein et al, 1999)	103
Figure C.5 – Nomenclature for bearing curvature	104
Figure C.6 – Stress distribution over the elliptical contact area	106
Figure C.7 – Examples of locating and non-locating bearing arrangements	115
Figure C.8 – Examples of locating bearing arrangements	115
Figure C.9 – Examples of accommodation of axial displacements	116
Figure C.10 – Examples of cross-locating bearing arrangements	116
Figure C.11 – Examples of bearing arrangements with paired mounting	117
Figure D.1 – Locations of failure for local (A) and global (B) failure	125
Figure D.2 – Local and global failure for two different notch radii	125
Figure D.3 – Haigh-diagram for evaluation of mean stress influence (Haibach, 2006)	126
Figure E.1 – Viscosity requirements versus pitch line velocity	128
Figure E.2 – Test apparatus for filterability evaluation	136
Figure E.3 – Example for circuit design of combined filtration and cooling system	140
Table 1 – Symbols used in the document	18
Table 2 – Abbreviations	21
Table 3 – Mesh load factor K_γ for planetary stages	35
Table 4 – Required gear accuracy	37
Table 5 – Temperature gradients for calculation of operating clearance	44
Table 6 – Bearing lubricant temperature for calculation of viscosity ratio, κ	47
Table 7 – Guide values for maximum contact stress at Miner's sum dynamic equivalent bearing load	49
Table 8 – Minimum safety factors for the different methods	50
Table 9 – Partial safety factors for materials	55
Table 10 – Partial safety factors γ_m for synthetic S/N-curves of cast iron materials	62
Table 11 – Recommended cleanliness levels	71

Table A.1 – Drivetrain elements and local coordinate systems	85
Table A.2 – Drivetrain element interface dimensions	86
Table A.3 – Interface requirements for modular drivetrain	87
Table A.4 – Interface requirements for modular drivetrain with 3-point suspension	88
Table A.5 – Interface requirements for integrated drivetrain	89
Table A.6 – Engineering data and required design load descriptions.....	90
Table A.7 – Rainflow matrix example	90
Table A.8 – Example of load duration distribution (LDD)	92
Table A.9 – Extreme load matrix example	93
Table B.1 – Recommended gear tooth surface roughness.....	95
Table C.1 – Guide values for basic rating life L_{h10} for preliminary bearing selection.....	97
Table C.2 – Static load factors for radial bearings	102
Table C.3 – Bearing types for combined loads with axial loads in double directions	111
Table C.4 – Bearing types for combined loads with axial loads in single direction	112
Table C.5 – Bearing types for pure radial load	113
Table C.6 – Bearing types for axial load.....	114
Table C.7 – Bearing selection: Legend.....	118
Table C.8 – Bearing selection: Low speed shaft (LSS) / planet carrier	119
Table C.9 – Bearing selection: Low speed intermediate shaft (LSIS).....	120
Table C.10 – Bearing selection: High speed intermediate shaft (HSIS)	121
Table C.11 – Bearing selection: High speed shaft (HSS).....	122
Table C.12 – Bearing selection: Planet bearing.....	123
Table D.1 – Typical material properties	124
Table E.1 – Viscosity grade at operating temperature for oils with $VI = 90$	129
Table E.2 – Viscosity grade at operating temperature for oils with $VI = 120$	130
Table E.3 – Viscosity grade at operating temperature for oils with $VI = 160$	131
Table E.4 – Viscosity grade at operating temperature for oils with $VI = 240$	132
Table E.5 – Standardized test methods for evaluating WT lubricants (fresh oil).....	134
Table E.6 – Non-standardized test methods for lubricant performance (fresh oil)	135
Table E.7– Guidelines for lubricant parameter limits	138
Table F.1 – Design validation and verification documentation	142

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND TURBINES –

Part 4: Design requirements for wind turbine gearboxes

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 61400-4 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind turbines, in co-operation with ISO technical committee 60: Gears.

It is published as a double logo standard.

This bilingual version (2020-02) corresponds to the monolingual English version, published in 2012-12.

This first edition cancels and replaces ISO 81400-4 published in 2005. It constitutes a technical revision of ISO 81400-4 with extended content and changes in all pertinent sections.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) extension of the scope to wind turbines above 2 MW rated power;

- b) considerations for converging differing approaches to reliability in gear, bearing and wind turbine standards;
- c) a new clause on wind turbine loads specific to drivetrains;
- d) new clause on testing and validation of new gearbox designs;
- e) updated bearing selection tables for different locations in a wind turbine gearbox;
- f) expanded design considerations on the use of bearings based on avoiding standard failures;
- g) a new clause on considerations and requirements in the design and analysis of gearbox structural elements;
- h) updated considerations and requirements on lubricants and lubrication systems.

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

FDIS	Report on voting
88/438/FDIS	88/441/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table. In ISO, the standard has been approved by 11 P-members out of 12 having cast a vote.

The French version of this standard has not been voted upon.

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

A list of all parts in the IEC 61400 series, published under the general title *Wind turbines*, can be found on the IEC website.

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

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

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

IEC 61400-4 outlines minimum requirements for specification, design and verification of gearboxes in wind turbines. It is not intended for use as a complete design specification or instruction manual, and it is not intended to assure performance of assembled drive systems. It is intended for use by experienced gear designers capable of selecting reasonable values for the factors, based on knowledge of similar designs and the effects of such items as lubrication, deflection, manufacturing tolerances, metallurgy, residual stress and system dynamics. It is not intended for use by the engineering public at large.

Any of the requirements of this standard may be altered if it can be suitably demonstrated that the safety and reliability of the system is not compromised. Compliance with this standard does not relieve any person, organization, or corporation from the responsibility of observing other applicable regulations.

WIND TURBINES –

Part 4: Design requirements for wind turbine gearboxes

1 Scope

This part of the IEC 61400 series is applicable to enclosed speed increasing gearboxes for horizontal axis wind turbine drivetrains with a power rating in excess of 500 kW. This standard applies to wind turbines installed onshore or offshore.

This International Standard provides guidance on the analysis of the wind turbine loads in relation to the design of the gear and gearbox elements.

The gearing elements covered by this standard include such gears as spur, helical or double helical and their combinations in parallel and epicyclic arrangements in the main power path. This standard does not apply to power take off gears (PTO).

The standard is based on gearbox designs using rolling element bearings. Use of plain bearings is permissible under this standard, but the use and rating of them is not covered.

Also included is guidance on the engineering of shafts, shaft hub interfaces, bearings and the gear case structure in the development of a fully integrated design that meets the rigours of the operating conditions.

Lubrication of the transmission is covered along with prototype and production testing. Finally, guidance is provided on the operation and maintenance of the gearbox.

2 Normative references

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

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary*
Available at <<http://www.electropedia.org>>

IEC 61400-1:2005, *Wind turbines – Part 1: Design requirements*

IEC 61400-3, *Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines*

IEC/TS 61400-13:2001, *Wind turbine generator systems – Part 13: Measurement of mechanical loads*

IEC 61400-22:2010, *Wind turbines – Part 22: Conformity testing and certification*

ISO 76, *Rolling bearings – Static load ratings*

ISO 281:2007, *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life*

ISO 683 (all parts), *Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels*

ISO 1328-1, *Cylindrical gears – ISO system of accuracy – Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth*

ISO 4287, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – terms, definitions and surface texture parameters*

ISO 4288, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – rules and procedures for the assessment of surface texture*

ISO 4406, *Hydraulic fluid power – Fluids– Method for coding the level of contamination by solid particles*

ISO 5725-2, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic methods for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method*

ISO 6336 (all parts), *Calculation of load capacity of spur and helical gears*

ISO 6336-1:2006, *Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors*

ISO 6336-2:2006, *Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 2: Calculation of surface durability (pitting)*

ISO 6336-3:2006, *Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 3: Calculation of tooth bending strength*

ISO 6336-5:2003, *Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 5: Strength and quality of materials*

ISO 6336-6:2006, *Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 6: Calculation of service life under variable load*

ISO/TR 10064-3, *Cylindrical gears – Code of inspection practice – Part 3: Recommendations relative to gear blanks, shaft centre distance and parallelism of axes*

ISO 12925-1, *Lubricants, industrial oils and related products (class L). Family C (Gears) – Part 1: Specifications for lubricants for enclosed gear systems*

ISO/TR 13593, *Enclosed gear drives for industrial applications*

ISO/TR 13989-1, *Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears – Part 1: Flash temperature method*

ISO/TR 13989-2, *Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears – Part 2: Integral temperature method*

ISO 14104, *Gears – Surface temper etch inspection after grinding*

ISO 14635-1:2000, *Gears – FZG test procedures – Part 1: FZG test method A/8,3/90 for relative scuffing load-carrying capacity of oils*

ISO 15243:2004, *Rolling bearings – Damage and failures – Terms, characteristics and causes*

ISO/TS 16281:2008, *Rolling bearings – Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings*

AGMA 9005, *Industrial Gear Lubrication*

ANSI/AGMA 925-A02, *Effect of lubrication on gear surface distress*

ANSI/AGMA 6001-E10, *Design and selection of components for enclosed gear drives*

ANSI/AGMA 6123, *Design manual for enclosed epicyclic gear drives*

ASTM E1049-85, *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis*

DIN 471, *Circlips (retaining rings) for shafts: Normal type and heavy type*

DIN 472, *Circlips (retaining rings) for bores: Normal type and heavy type*

DIN 743:2000, *Shafts and axles, calculations of load capacity, Parts 1, 2, 3*

DIN 3990-4, *Calculation of load capacity of cylindrical gears: calculation of scuffing load capacity*

DIN 6885-2, *Parallel Key Geometries*

DIN 6892, *Mitnehmerverbindungen ohne Anzug – Passfedern – Berechnung und Gestaltung*
(available in German only)

DIN 7190, *Interference fits – Calculation and design rules*

DIN 51517-3, *Lubricants: Lubricating oils – Part 3: Lubricating oils CLP; Minimum requirements*

EN 12680-3:2003, *Ultrasonic examination. Spheroidal graphite cast iron castings*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	164
INTRODUCTION.....	166
1 Domaine d'application	167
2 Références normatives	167
3 Termes, définitions et conventions.....	169
3.1 Termes et définitions	169
3.2 Conventions	172
4 Symboles, abréviations et unités	175
4.1 Symboles et unités	175
4.2 Abréviations	179
5 Conception pour la fiabilité	181
5.1 Durée de vie théorique et fiabilité	181
5.2 Processus de conception.....	182
5.3 Documentation	185
5.4 Plan qualité	185
6 Conditions de fonctionnement et charges du train d'entraînement	185
6.1 Description du train d'entraînement	185
6.1.1 Généralités.....	185
6.1.2 Définition des interfaces	185
6.1.3 Exigences spécifiées pour l'ensemble des interfaces.....	186
6.2 Calcul des charges du train d'entraînement.....	186
6.2.1 Modèle de simulation de charges de l'éolienne	186
6.2.2 Calculs des charges de l'éolienne.....	187
6.2.3 Fiabilité des hypothèses de charge.....	188
6.3 Résultats des calculs de charge de l'éolienne.....	188
6.3.1 Généralités.....	188
6.3.2 Séries chronologiques	188
6.3.3 Charge de fatigue	189
6.3.4 Charges extrêmes	190
6.4 Conditions de fonctionnement	190
6.4.1 Généralités.....	190
6.4.2 Conditions environnementales	190
6.4.3 Stratégies opérationnelles	191
6.5 Analyse du train d'entraînement	191
7 Conception, évaluation et exigences de fabrication de la boîte de vitesses.....	191
7.1 Refroidissement de la boîte de vitesses	191
7.2 Engrenages.....	192
7.2.1 Observations sur la fiabilité des engrenages.....	192
7.2.2 Évaluation des engrenages	192
7.2.3 Facteurs de charge.....	194
7.2.4 Matériaux d'engrenage	196
7.2.5 Fatigue initiée en sous-couche	196
7.2.6 Exactitude des engrenages	196
7.2.7 Fabrication de l'engrenage	197
7.3 Roulements	198
7.3.1 Généralités.....	198

7.3.2	Observations sur la fiabilité des roulements.....	198
7.3.3	Exigences relatives à la qualité d'acier des roulements	199
7.3.4	Considérations de conception générale	199
7.3.5	Exigences relatives à l'interface de roulement	202
7.3.6	Points relatifs à la conception des roulements	203
7.3.7	Lubrification des roulements	206
7.3.8	Calculs d'évaluation.....	208
7.4	Arbres, clavettes, joints de carter, cannelures et fixations	211
7.4.1	Arbres	211
7.4.2	Raccordements arbre-moyeu	211
7.4.3	Cannelures souples	212
7.4.4	Joints d'étanchéité des arbres	212
7.4.5	Fixations.....	213
7.4.6	Circlips (freins d'axe).....	214
7.5	Éléments structurels.....	214
7.5.1	Introduction	214
7.5.2	Considérations de fiabilité	214
7.5.3	Analyse des déformations.....	215
7.5.4	Vérification de la résistance.....	215
7.5.5	Évaluation de la résistance statique.....	216
7.5.6	Évaluation de la résistance à la fatigue.....	219
7.5.7	Essais de matériaux	224
7.5.8	Documentation	225
7.6	Lubrification	226
7.6.1	Considérations générales	226
7.6.2	Type du lubrifiant.....	227
7.6.3	Caractéristiques des lubrifiants.....	227
7.6.4	Méthode de lubrification	229
7.6.5	Quantité d'huile	230
7.6.6	Températures de fonctionnement	230
7.6.7	Régulation de la température.....	231
7.6.8	Surveillance de l'état du lubrifiant	232
7.6.9	Propreté du lubrifiant	232
7.6.10	Filtre à lubrifiant	234
7.6.11	Orifices.....	234
7.6.12	Indicateur de niveau d'huile	235
7.6.13	Bouchons magnétiques	235
7.6.14	Prise d'air, évent	235
7.6.15	Capteur de flux	235
7.6.16	Aptitude à l'entretien.....	236
8	Vérification de la conception.....	236
8.1	Généralités.....	236
8.2	Planification des essais	236
8.2.1	Identification des critères d'essai.....	236
8.2.2	Nouvelles conceptions ou changements importants	236
8.2.3	Plan d'essai global	237
8.2.4	Plan d'essai spécifique	237
8.3	Essais de prototype en atelier	238
8.3.1	Généralités.....	238

8.3.2	Essais des composants	238
8.3.3	Essais en atelier sur un prototype de boîte de vitesses.....	238
8.3.4	Essais du système de lubrification	239
8.4	Essai sur site.....	239
8.4.1	Généralités.....	239
8.4.2	Validation des charges	239
8.4.3	Essai de type de la boîte de vitesses dans l'éolienne.....	241
8.5	Essais de production	241
8.5.1	Essais de réception	241
8.5.2	Essais d'émission sonore	241
8.5.3	Essais de vibrations	241
8.5.4	Considérations relatives au système de lubrification.....	241
8.5.5	Températures du système	241
8.6	Essai de robustesse	242
8.7	Température et propreté du lubrifiant sur le terrain.....	242
8.8	Validation spécifique aux roulements.....	242
8.8.1	Revue de conception	242
8.8.2	Vérification/validation du prototype	243
8.9	Documentation des essais.....	243
9	Exigences d'exploitation, d'entretien et de maintenance	244
9.1	Exigences d'entretien et de maintenance.....	244
9.2	Exigences d'inspection	244
9.3	Mise en service et rodage	244
9.4	Transport, manutention et stockage.....	244
9.5	Réparation	245
9.6	Installation et remplacement.....	245
9.7	Surveillance des états	245
9.8	Lubrification	245
9.8.1	Exigences des types d'huile.....	245
9.8.2	Système de lubrification	245
9.8.3	Essai et analyse d'huile	246
9.9	Documentation d'exploitation et de maintenance	246
Annexe A (informative) Exemples de spécifications d'interfaces de train d'entraînement et de charges.....		247
Annexe B (informative) Considérations sur la conception et la fabrication des boîtes de vitesses		259
Annexe C (informative) Considérations de conception des roulements.....		262
Annexe D (informative) Considérations sur les éléments de structure des boîtes de vitesses		290
Annexe E (informative) Recommandations pour les performances des lubrifiants dans les boîtes de vitesses d'éolienne.....		294
Annexe F (informative) Documentation de vérification de la conception		312
Annexe G (informative) Documentation relative aux calculs des roulements		316
Bibliographie.....		324
Figure 1 – Désignation des arbres dans les boîtes de vitesses à axe parallèles à trois étages		173
Figure 2 – Désignation des arbres dans les boîtes de vitesses à trois étages avec un étage planétaire.....		174

Figure 3 – Désignation des arbres dans les boîtes de vitesses à trois étages avec deux étages planétaires	175
Figure 4 – Diagramme du processus de conception	183
Figure 5 – Exemples de critères de sélection de roulements	199
Figure 6 – Assemblage des roulements en aveugle	206
Figure 7 – Définition du facteur de massiveté $n_{pI,\sigma}$ d'un composant entaillé	218
Figure 8 – Courbe contrainte-déformation élastoplastique idéalisée	219
Figure 9 – Courbe S/N de synthèse (adaptée à partir de Haibach, 2006)	222
Figure A.1 – Train d'entraînement modulaire.....	247
Figure A.2 – Train d'entraînement avec une suspension à 3 points	248
Figure A.3 – Train d'entraînement intégré	248
Figure A.4 – Système de référence pour train d'entraînement modulaire.....	250
Figure A.5 – Vue arrière du train d'entraînement.....	251
Figure A.6 – Système de référence pour un train d'entraînement modulaire avec une suspension à 3 points	252
Figure A.7 – Système de référence pour train d'entraînement intégré	253
Figure A.8 – Exemple de comptage rainflow par DLC.....	256
Figure A.9 – Exemple de distribution de rotation de charge (LRD)	257
Figure C.1 – Réduction des intervalles de charge par agglomération des intervalles de charge adjacents	263
Figure C.2 – Indice de durée de vie consommée (CLI).....	266
Figure C.3 – Répartition du partage de temps.....	266
Figure C.4 – Effets du jeu et de la précharge sur la distribution de la pression dans les roulements radiaux à rouleaux (issus de Bradlein et al., 1999).....	268
Figure C.5 – Nomenclature de la courbure des roulements	269
Figure C.6 – Distribution de la pression sur la surface de contact elliptique	271
Figure C.7 – Exemples de configurations de roulements de positionnement et de roulements libres	281
Figure C.8 – Exemples de configurations de roulements de positionnement.....	281
Figure C.9 – Exemples de prise en charge des déplacements axiaux.....	282
Figure C.10 – Exemples de configurations de roulements en opposition	282
Figure C.11 – Exemples de configuration de roulements montés en paires	283
Figure D.1 – Emplacements de la défaillance locale (A) et de la défaillance globale (B)	291
Figure D.2 – Défaillances locale et globale pour deux rayons d'entaille différents	292
Figure D.3 – Schéma de Haigh pour l'évaluation de l'influence de la contrainte moyenne (Haibach, 2006).....	292
Figure E.1 – Exigences de viscosité par rapport à la vitesse primitive.....	295
Figure E.2 – Appareillage d'essai pour l'évaluation de la filtrabilité	305
Figure E.3 – Exemple de la conception du circuit des systèmes de filtration et de refroidissement combinés	309
Tableau 1 – Symboles utilisés dans le présent document.....	176
Tableau 2 – Abréviations	180
Tableau 3 – Facteur de charge d'engrènement K_γ pour les paliers planétaires.....	194
Tableau 4 – Exactitude exigée pour les engrenages	197

Tableau 5 – Gradients de température pour le calcul du jeu en fonctionnement	204
Tableau 6 – Température du lubrifiant de roulement pour le calcul du rapport de viscosité, κ	207
Tableau 7 – Valeurs indicatives pour la pression maximale de contact à une charge équivalente dynamique au niveau du roulement suivant la somme de Miner	210
Tableau 8 – Facteurs de sécurité minimaux pour les différentes méthodes	211
Tableau 9 – Facteurs de sécurité partiels des matériaux.....	217
Tableau 10 – Facteurs de sécurité partiels γ_m pour les courbes S/N de synthèse relatives aux matériaux en fonte	223
Tableau 11 – Niveaux de propreté recommandés.....	233
Tableau A.1 – Éléments de train d'entraînement et systèmes de coordonnées locaux.....	249
Tableau A.2 – Dimensions des interfaces des éléments de train d'entraînement.....	250
Tableau A.3 – Exigences des interfaces de train d'entraînement modulaire	251
Tableau A.4 – Exigences des interfaces d'un train d'entraînement modulaire avec une suspension à 3 points	252
Tableau A.5 – Exigences des interfaces de train d'entraînement intégré.....	253
Tableau A.6 – Données d'ingénierie et descriptions des charges nominales exigées	254
Tableau A.7 – Exemple de matrice rainflow	255
Tableau A.8 – Exemple de distribution de durée de charge (LDD).....	257
Tableau A.9 – Exemple de matrice de charges extrêmes	258
Tableau B.1 – Rugosités de surface recommandées pour les dents de roue	260
Tableau C.1 – Valeurs indicatives pour la durée de vie nominale de base L_{h10} pour la sélection préliminaire des roulements	262
Tableau C.2 – Facteurs de charge statiques pour les roulements radiaux	267
Tableau C.3 – Types de roulements pour des charges combinées avec des charges axiales dans deux sens.....	276
Tableau C.4 – Types de roulements pour des charges combinées avec des charges axiales dans un sens	277
Tableau C.5 – Types de roulements pour une charge radiale pure.....	279
Tableau C.6 – Types de roulements pour une charge axiale	280
Tableau C.7 – Sélection des roulements: Légende.....	284
Tableau C.8 – Sélection des roulements: Arbre à petite vitesse (APV) / porte-satellite.....	285
Tableau C.9 – Sélection des roulements: Arbre intermédiaire à petite vitesse (AIPV).....	286
Tableau C.10 – Sélection des roulements: Arbre intermédiaire à grande vitesse (AIGV)	287
Tableau C.11 – Sélection des roulements: Arbre à grande vitesse (AGV)	288
Tableau C.12 – Sélection des roulements: Roulement planétaire	289
Tableau D.1 – Propriétés des matériaux typiques	291
Tableau E.1 – Indice de viscosité à la température de fonctionnement pour les huiles avec $VI = 90$	297
Tableau E.2 – Indice de viscosité à la température de fonctionnement pour les huiles avec $VI = 120$	298
Tableau E.3 – Indice de viscosité à la température de fonctionnement pour les huiles avec $VI = 160$	299
Tableau E.4 – Indice de viscosité à la température de fonctionnement pour les huiles avec $VI = 240$	300
Tableau E.5 – Méthodes d'essai normalisées pour l'évaluation des lubrifiants WT (huile neuve)	302

Tableau E.6 – Méthodes d'essai non normalisées pour les performances des lubrifiants (huile neuve).....	303
Tableau E.7 – Lignes directrices concernant les limites des paramètres de lubrifiant	307
Tableau F.1 – Documentation de validation et de vérification de la conception	312

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉOLIENNES –

Partie 4: Exigences de conception des boîtes de vitesses des éoliennes

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. A 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 61400-4 a été établie par le comité d'études 88 de l'IEC: Éoliennes, en coopération avec le comité technique 60 de l'ISO: Engrenages.

Elle est publiée en tant que norme double logo.

La présente version bilingue (2020-02) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2012-12.

Cette première édition annule et remplace l'ISO 81400-4, publiée en 2005. Elle constitue une révision technique de l'ISO 81400-4 avec un contenu étendu et des modifications dans toutes les sections pertinentes.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) l'extension du domaine d'application aux éoliennes ayant une puissance assignée supérieure à 2 MW;
- b) des considérations de convergence de différentes approches en matière de fiabilité dans les normes relatives aux engrenages, roulements et éoliennes;
- c) un nouvel article concernant les charges des éoliennes, spécifiques aux trains d'entraînement;
- d) un nouvel article concernant l'essai et la validation de nouvelles constructions de boîtes de vitesses;
- e) des tableaux de sélection des roulements mis à jour pour différents emplacements dans une boîte de vitesses d'éolienne;
- f) des considérations sur l'utilisation des roulements en s'appuyant sur la prévention des défaillances normales;
- g) un nouvel article concernant les considérations et les exigences en matière de conception et d'analyse des éléments structurels d'une boîte de vitesses;
- h) des considérations et exigences mises à jour concernant les lubrifiants et les systèmes de lubrification.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 88/438/FDIS et 88/441/RVD.

Le rapport de vote 88/441/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote. À l'ISO, la norme a été approuvée par 11 membres P sur un total de 12 votes exprimés.

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61400, publiées sous le titre général *Éoliennes*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication 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 à la publication recherchée. À cette date, la publication sera

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

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

L'IEC 61400-4 présente les exigences minimales pour la spécification, la conception et la vérification des boîtes de vitesses dans les éoliennes. Elle n'est pas destinée à servir de spécification de conception complète ni de manuel d'instructions, et n'a pas pour objectif de garantir les performances des systèmes d'entraînement assemblés. Elle s'adresse aux concepteurs d'engrenages expérimentés capables de sélectionner des valeurs raisonnables pour les paramètres, à partir de leur connaissance de conceptions similaires et des effets d'éléments tels que la lubrification, la déformation, les tolérances de fabrication, la métallurgie, la contrainte résiduelle et la dynamique du système. Elle n'est pas destinée à une utilisation par le public d'ingénierie dans son ensemble.

Toute exigence de la présente norme peut être modifiée s'il peut être démontré de façon appropriée que cela ne compromet pas la sécurité et la fiabilité du système. La conformité à cette norme ne dégage pas les personnes, organisations ou entreprises de leur responsabilité à suivre les autres réglementations applicables.

ÉOLIENNES –

Partie 4: Exigences de conception des boîtes de vitesses des éoliennes

1 Domaine d'application

La présente partie de la série IEC 61400 s'applique aux boîtes de vitesses sous carter pour trains d'entraînement d'éolienne à axe horizontal dont la puissance nominale dépasse 500 kW. Elle s'applique aux éoliennes installés sur terre et en mer.

La présente Norme internationale donne des recommandations sur l'analyse des charges d'éolienne en tenant compte de la conception des éléments d'engrenage et de boîte de vitesses.

Les éléments d'engrènement couverts par cette norme comprennent les engrenages à dentures droite, hélicoïdale simple ou double et leurs combinaisons dans des configurations parallèles et épicycloïdales dans le trajet de puissance principal. Cette norme ne s'applique pas aux engrenages de prise de force (PTO).

Elle repose sur les conceptions de boîte de vitesses utilisant des roulements à éléments roulants. Des roulements simples peuvent être utilisés dans le cadre de cette norme, mais leur utilisation et leur étalonnage ne sont pas traités.

Cette norme inclut également des recommandations relatives à l'ingénierie des arbres, des interfaces de moyeu d'arbre, des roulements et de la structure du carter des engrenages durant le développement d'une conception entièrement intégrée satisfaisant à des conditions de fonctionnement rigoureuses.

La lubrification de la transmission est abordée ainsi que le prototype et les essais de production. Enfin, des recommandations sur l'exploitation et la maintenance de la boîte de vitesses sont données.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Électrotechnique International*, disponible à l'adresse <<http://www.electropedia.org>>

IEC 61400-1:2005, *Aérogénérateurs – Partie 1: Exigences de conception*

IEC 61400-3, *Éoliennes – Partie 3: Exigences de conception des éoliennes en pleine mer*

IEC/TS 61400-13:2001, *Aérogénérateurs – Partie 13: Mesure des charges mécaniques*

IEC 61400-22:2010, *Éolienne – Partie 22: Essais de conformité et certification*

ISO 76, *Roulements – Charges statiques de base*

ISO 281:2007, *Roulements – Charges dynamiques de base et durée nominale*

ISO 683 (toutes les parties), *Aciers pour traitement thermique, aciers alliés et aciers pour décolletage*

ISO 1328-1, *Engrenages cylindriques – Système ISO de précision – Partie 1: Définitions et valeurs admissibles des écarts pour les flancs homologues de la denture*

ISO 4287, *Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface: Méthode du profil – Termes, définitions et paramètres d'état de surface*

ISO 4288, *Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface: Méthode du profil – Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface*

ISO 4406, *Transmissions hydrauliques – Fluides – Méthode de codification du niveau de pollution particulaire solide*

ISO 5725-2, *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 2: Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée*

ISO 6336 (toutes les parties), *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale*

ISO 6336-1:2006, *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale – Partie 1: Principes de base, introduction et facteurs généraux d'influence*

ISO 6336-2:2006, *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale – Partie 2: Calcul de la résistance à la pression de contact (piqûre)*

ISO 6336-3:2006, *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale – Partie 3: Calcul de la résistance à la flexion en pied de dent*

ISO 6336-5:2003, *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale – Partie 5: Résistance et qualité des matériaux*

ISO 6336-6:2006, *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale – Partie 6: Calcul de la durée de vie en service sous charge variable*

ISO/TR 10064-3, *Engrenages cylindriques – Code pratique de réception – Partie 3: Recommandations relatives au corps de roues, à l'entraxe et au parallélisme des axes*

ISO 12925-1, *Lubrifiants, huiles industrielles et produits connexes (classe L) – Famille C (engrenages) – Partie 1: Spécifications des lubrifiants pour systèmes d'engrenages sous carter*

ISO/TR 13593, *Transmissions de puissance par engrenages sous carter pour usage industriel*

ISO/TR 13989-1, *Calcul de la capacité de charge au grippage des engrenages cylindriques, coniques et hypoïdes – Partie 1: Méthode de la température-éclair*

ISO/TR 13989-2, *Calcul de la capacité de charge au grippage des engrenages cylindriques, coniques et hypoïdes – Partie 2: Méthode de la température intégrale*

ISO 14104, *Engrenages – Contrôle par attaque chimique des zones surchauffées lors de la rectification*

ISO 14635-1:2000, *Engrenages – Méthodes d'essai FZG – Partie 1: Méthode FZG A/8,3/90 pour évaluer la capacité de charge au grippage des huiles*

ISO 15243:2004, *Roulements – Détérioration et défaillance – Termes, caractéristiques et causes*

ISO/TS 16281:2008, *Roulements – Méthodes de calcul de la durée nominale de référence corrigée pour les roulements chargés universellement*

AGMA 9005, *Industrial Gear Lubrication* (disponible en anglais seulement)

ANSI/AGMA 925-A02, *Effect of lubrication on gear surface distress* (disponible en anglais seulement)

ANSI/AGMA 6001-E10, *Design and selection of components for enclosed gear drives* (disponible en anglais seulement)

ANSI/AGMA 6123, *Design manual for enclosed epicyclic gear drives* (disponible en anglais seulement)

ASTM E1049-85, *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis* (disponible en anglais seulement)

DIN 471, *Anneaux d'arrêt pour arbres: Type standard et type robuste*

DIN 472, *Anneaux d'arrêt pour alésage: Type standard et type robuste*

DIN 743:2000, *Calcul de la capacité des arbres et axes, Parties 1, 2, 3*

DIN 3990-4, *Calcul de la charge limite des roues cylindriques – calcul de la charge limite de grippage*

DIN 6885-2, *Clavetages – clavettes parallèles*

DIN 6892, *Liaisons par entraîner sans blocage – Clavettes – Calcul et dimensionnement*

DIN 7190, *Assemblages frettés – Bases de calculs et règles de construction*

DIN 51517-3, *Lubrifiants – Huiles lubrifiantes – Partie 3: Huiles lubrifiantes CLP, Exigences minimales*

EN 12680-3:2003, *Contrôle par ultrasons – Pièces moulées en fonte à graphite sphéroïdal*