



IEC 61400-13

Edition 1.1 2021-12  
CONSOLIDATED VERSION

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



---

**Wind turbines –  
Part 13: Measurement of mechanical loads**

**Éoliennes –  
Partie 13: Mesurage des charges mécaniques**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-5001-3

**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.**

# REDLINE VERSION

# VERSION REDLINE



---

**Wind turbines –  
Part 13: Measurement of mechanical loads**

**Éoliennes –  
Partie 13: Mesurage des charges mécaniques**

## CONTENTS

FOREWORD.....	8
INTRODUCTION.....	10
INTRODUCTION to Amendment 1 .....	10
1 Scope.....	11
2 Normative references .....	11
3 Terms and definitions .....	11
4 Symbols, units and abbreviations .....	14
5 General .....	16
5.1 Document structure.....	16
5.2 Safety during testing .....	17
6 Test requirements.....	17
6.1 General.....	17
6.2 Test site requirements .....	17
6.3 Measurement load cases .....	17
6.3.1 General .....	17
6.3.2 MLCs during steady-state operation .....	18
6.3.3 MLCs during transient events .....	18
6.3.4 MLCs for dynamic characterization .....	19
6.3.5 Capture matrices .....	20
6.4 Quantities to be measured .....	23
6.4.1 General .....	23
6.4.2 Load quantities .....	23
6.4.3 Meteorological quantities .....	25
6.4.4 Wind turbine operation quantities.....	25
6.5 Turbine configuration changes .....	26
7 Instrumentation.....	27
7.1 Load quantities .....	27
7.1.1 Types of sensors .....	27
7.1.2 Choice of sensor location .....	27
7.1.3 Measurement of blade root bending moments.....	27
7.1.4 Blade bending moment distribution .....	28
7.1.5 Blade torsion frequency/damping.....	28
7.1.6 Measurement of rotor yaw and tilt moment .....	28
7.1.7 Measurement of the rotor torque.....	28
7.1.8 Measurement of tower base bending .....	28
7.1.9 Tower top bending moments.....	28
7.1.10 Tower mid bending moments .....	29
7.1.11 Tower torque .....	29
7.1.12 Tower top acceleration .....	29
7.1.13 Pitch actuation loads (on hub side of pitch bearing).....	29
7.2 Meteorological quantities .....	29
7.2.1 Measurement and installation requirements.....	29
7.2.2 Icing potential.....	29
7.2.3 Atmospheric stability.....	29
7.3 Wind turbine operation quantities.....	30

7.3.1	Electrical power .....	30
7.3.2	Rotor speed or generator speed .....	30
7.3.3	Yaw misalignment.....	30
7.3.4	Rotor azimuth angle.....	30
7.3.5	Pitch position.....	30
7.3.6	Pitch speed .....	30
7.3.7	Brake moment .....	30
7.3.8	Wind turbine status.....	30
7.3.9	Brake status .....	30
7.4	Data acquisition system .....	31
7.4.1	General .....	31
7.4.2	Resolution .....	31
7.4.3	Anti-aliasing.....	31
8	Determination of calibration factors .....	31
8.1	General.....	31
8.2	Calibration of load channels.....	32
8.2.1	General .....	32
8.2.2	Blade bending moments .....	33
8.2.3	Main shaft moments .....	33
8.2.4	Tower bending moments.....	34
8.2.5	Tower torque .....	34
8.3	Calibration of non-load channels.....	35
8.3.1	Pitch angle .....	35
8.3.2	Rotor azimuth angle.....	35
8.3.3	Yaw angle.....	35
8.3.4	Wind direction.....	35
8.3.5	Pitch actuation loads .....	35
8.3.6	Brake moment .....	36
9	Data verification .....	36
9.1	General.....	36
9.2	Verification checks.....	36
9.2.1	General .....	36
9.2.2	Blade moments.....	37
9.2.3	Main shaft.....	38
9.2.4	Tower .....	38
10	Processing of measured data .....	39
10.1	General.....	39
10.2	Fundamental load quantities .....	39
10.3	Load quantities for larger turbines.....	39
10.4	Wind speed trend detection.....	39
10.5	Statistics .....	40
10.6	Rainflow counting .....	40
10.7	Cumulative rainflow spectrum .....	40
10.8	Damage equivalent load.....	40
10.9	Wind speed binning .....	41
10.10	Power spectral density.....	42
11	Uncertainty estimation .....	42
12	Reporting.....	42

Annex A (informative) Example co-ordinate systems.....	46
A.1 General.....	46
A.2 Blade co-ordinate system.....	46
A.3 Hub co-ordinate system .....	46
A.4 Nacelle co-ordinate system.....	47
A.5 Tower co-ordinate system .....	48
A.6 Yaw misalignment.....	49
A.7 Cone angle and tilt angle .....	49
A.8 Rotor azimuth angle.....	50
A.9 Blade pitch angle .....	50
Annex B (informative) Procedure for the evaluation of uncertainties in load measurements on wind turbines.....	51
B.1 List of symbols.....	51
B.2 General procedure .....	52
B.2.1 Standard uncertainty .....	52
B.2.2 Analytical combination of standard uncertainties.....	53
B.2.3 Total uncertainty.....	54
B.3 Uncertainties of binned averaged values.....	55
B.3.1 General .....	55
B.3.2 Uncertainty of calibration and signal .....	55
B.3.3 Uncertainty of the bin scatter .....	55
B.3.4 Uncertainty of the x-axis quantity.....	55
B.3.5 Uncertainty of bin averaged mean values .....	55
B.4 Standard uncertainty of DEL and load spectra .....	56
B.5 Examples of an uncertainty evaluation .....	56
B.5.1 Example for analytical shunt calibration of tower torque.....	56
B.6 Determination and use of calibration matrix .....	65
B.6.1 Determination of the calibration matrix.....	65
B.6.2 Use of the calibration matrix .....	66
B.6.3 Time series.....	67
Annex C (informative) Sample presentation of mechanical load measurements and analysis .....	69
C.1 General.....	69
Annex D (informative) Recommendations for offshore measurements.....	81
Annex E (informative) Load model validation .....	83
E.1 General.....	83
E.2 Methods for loads comparison .....	84
E.2.1 Statistical binning .....	84
E.2.2 Spectral functions.....	85
E.2.3 Fatigue spectra.....	86
E.2.4 Point by point .....	86
Annex F (informative) Methods for identification of wind speed trends .....	88
F.1 List of symbols.....	88
F.2 General.....	88
F.3 Trend identification methods .....	89
F.4 Ongoing procedure .....	93
Annex G (informative) Data acquisition considerations.....	94
G.1 Data acquisition system .....	94

G.1.1	General .....	94
G.1.2	Resolution .....	94
G.1.3	Sampling model and filtering.....	95
G.1.4	Other considerations .....	97
Annex H (informative)	Load calibration .....	98
H.1	General.....	98
H.2	Gravity load calibration of the blade bending.....	98
H.3	Analytical calibration of the tower bending moments .....	99
H.4	External load calibration of the rotor torque.....	100
Annex I (informative)	Temperature drift.....	101
I.1	General.....	101
I.2	Known issues.....	101
I.3	Recommendations .....	102
Annex J (informative)	Mechanical load measurements on vertical axis wind turbines .....	103
J.1	General.....	103
J.2	Terms and definitions.....	103
J.3	Coordinate systems .....	103
J.4	Quantities to be measured .....	104
J.4.1	Fundamental loads .....	104
J.5	Measurements .....	105
J.5.1	Measurement of blade attachment bending moments.....	105
J.5.2	Blade mid-span bending moment .....	105
J.5.3	Blade modal frequency/damping .....	105
J.5.4	Connecting strut bending moment.....	105
J.5.5	Connecting strut axial force .....	106
J.5.6	Connecting strut modal frequency/damping .....	106
J.5.7	Rotor shaft torque.....	106
J.5.8	Tower normal bending .....	106
Bibliography.....		107
Figure 1 – Fundamental wind turbine loads: tower base, rotor and blade loads .....		24
Figure A.1 – Blade co-ordinate system.....		46
Figure A.2 – Hub co-ordinate system .....		47
Figure A.3 – Nacelle co-ordinate system .....		48
Figure A.4 – Tower co-ordinate system.....		48
Figure A.5 – Yaw misalignment.....		49
Figure A.6 – Cone angle and tilt angle .....		49
Figure B.1 – Explanation of used symbols.....		62
Figure C.1 – Hub-height wind speed as a function of time.....		69
Figure C.2 – Hub-height turbulence intensity as a function of hub-height wind speed.....		70
Figure C.3 – Turbulence intensity trending as a function of hub-height wind speed .....		70
Figure C.4 – Global capture matrix with all loads channels operating .....		71
Figure C.5 – IEC example turbine at 9,1 m/s – Wind turbine operational and meteorological quantities .....		72
Figure C.6 – IEC example turbine at 9,1 m/s – Major load components .....		73
Figure C.7 – 10-minute statistics for blade 1 root edge bending .....		74

Figure C.8 – Power spectral density of blade 1 root edge bending .....	75
Figure C.9 – Cumulative rainflow spectrum for blade 1 root edge bending during test period .....	77
Figure C.10 – IEC example turbine normal shutdown at 9,5 m/s – Wind turbine operational and meteorological quantities .....	79
Figure C.11 – IEC example turbine normal shutdown at 9,5 m/s – Major load components .....	80
Figure D.1 – Example of wave spectrum and monopile response .....	81
Figure D.2 – Example of wave spectrum .....	82
Figure E.1 – Measured data .....	84
Figure E.2 – Simulated data .....	84
Figure E.3 – Comparison of wind speed binned averaged 10 min. statistics .....	84
Figure E.4 – Comparison of 1 Hz equivalent loads .....	85
Figure E.5 – Comparison of 1 Hz equivalent loads (wind speed binned) .....	85
Figure E.6 – Comparison of PSD functions .....	85
Figure E.7 – Comparison of fatigue spectra .....	86
Figure E.8 – Point by point comparison of wind speed time histories .....	87
Figure E.9 – Point by point comparison of load time histories .....	87
Figure F.1 – Comparison of measured wind speed ( $v_{meas}$ ), smoothing-filtered wind speed ( $v_{filt}$ ) and resulting trend-free wind speed ( $v_{HP}$ ) .....	89
Figure F.2 – Differences of turbulence intensities calculated with un-filtered and filtered wind speed versus mean measured wind speed .....	91
Figure F.3 – Ratio of turbulence intensities calculated with un-filtered and filtered wind speed versus mean measured wind speed .....	92
Figure G.1 – Anti-aliasing check .....	95
Figure I.1 – Observed scatter in the original 10-min average values of the blade edge moment together with the same signal after temperature compensation in dark blue .....	101
Figure I.2 – Linear regression through the offsets derived from the different calibration runs .....	102
Figure J.1 – Darrieus style VAWT .....	104
Figure J.2 – Helical Darrieus style VAWT .....	104
Table 1 – MLCs during steady-state operation related to the DLCs defined in IEC 61400-1 .....	18
Table 2 – Measurement of transient load cases related to the DLCs defined in IEC 61400-1 .....	19
Table 3 – MLCs for dynamic characterization .....	19
Table 4 – Capture matrix for normal power production for stall controlled wind turbines .....	21
Table 5 – Capture matrix for normal power production for non stall controlled wind turbines .....	22
Table 6 – Capture matrix for parked condition .....	22
Table 7 – Capture matrix for normal transient events .....	23
Table 8 – Capture matrix for other than normal transient events .....	23
Table 9 – Wind turbine fundamental load quantities .....	24
Table 10 – Additional load quantities for turbines with a rated power output greater than 1 500 kW and rotor diameter greater than 75 m .....	25

Table 11 – Meteorological quantities .....	25
Table 12 – Wind turbine operation quantities .....	26
Table 13 – Summary of suitable calibration methods .....	32
Table B.1 – Uncertainty components.....	57
Table B.2 – Values and uncertainties for the calculation .....	61
Table C.1 – Binned data for blade 1 root edge bending.....	76
Table C.2 – Transient capture matrix for normal start-up and shutdown .....	78
Table C.3 – Brief statistical description for normal shutdown for IEC example turbine at 9,5 m/s .....	78
Table G.1 – Wind turbine significant frequencies .....	96
Table G.2 – Sampling ratio .....	96
Table J.1 – Minimum recommendations for VAWT fundamental load quantities.....	105



## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

---

### WIND TURBINES –

#### Part 13: Measurement of mechanical loads

#### 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.

**This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.**

**IEC 61400-13 edition 1.1 contains the first edition (2015-12) [documents 88/511/CDV and 88/554/RVC] and its amendment 1 (2021-12) [documents 88/795/CDV and 88/821/RVC].**

**In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.**

This International Standard IEC 61400-13 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind turbines.

This standard replaces IEC TS 61400-13 published in 2001. This first edition constitutes a technical revision and transition from technical specification to International Standard.

This first edition includes the following changes with respect to the technical specification:

- a) scope of the document focused to load measurements for the purpose of model validation;
- b) number of measurement load cases to match the new scope reduced;
- c) capture matrix requirements to match the new scope reduced;
- d) requirements to address the state of the art technology updated.

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 the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under [webstore.iec.ch](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

In the process of structural design of a wind turbine, thorough understanding about, and accurate quantification of, the loading is of utmost importance.

In the design stage, loads can be predicted with aeroelastic models and codes. However, such models have their shortcomings and uncertainties, and they always need to be validated by measurement.

Mechanical load measurements can be used both as the basis for design and as the basis for certification. Design aspects for wind turbines are covered by IEC 61400-1 whilst certification procedures are described in IEC 61400-22. This standard is aimed at the test institute, the turbine manufacturer and the certifying body and clearly defines the minimum requirements for a mechanical loads test resulting in consistent, high quality reproducible test results.

### INTRODUCTION to Amendment 1

This amendment to IEC 61400-13:2015 addresses the errors found in Annex B which impact a significant portion of that annex.

## WIND TURBINES –

### Part 13: Measurement of mechanical loads

#### 1 Scope

This part of the IEC 61400 describes the measurement of fundamental structural loads on wind turbines for the purpose of the load simulation model validation. The standard prescribes the requirements and recommendations for site selection, signal selection, data acquisition, calibration, data verification, measurement load cases, capture matrix, post-processing, uncertainty determination and reporting. Informative annexes are also provided to improve understanding of testing methods.

The methods described in this document can also be used for mechanical loads measurements for other purposes such as obtaining a measured statistical representation of loads, direct measurements of the design loads, safety and function testing, or measurement of component loads. If these methods are used for an alternative objective or used for an unconventional wind turbine design, the required signals, measurement load cases, capture matrix, and post processing methods should be evaluated and if needed adjusted to fit the objective.

These methods are intended for onshore electricity-generating, horizontal-axis wind turbines (HAWTs) with rotor swept areas of larger than 200 m<sup>2</sup>. However, the methods described may be applicable to other wind turbines (for example, small wind turbines, ducted wind turbines, vertical axis wind turbines).

#### 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 61400-12-1, *Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	114
INTRODUCTION .....	116
INTRODUCTION à l'Amendement 1 .....	116
1 Domaine d'application .....	117
2 Références normatives .....	117
3 Termes et définitions .....	117
4 Symboles, unités et abréviations .....	121
5 Généralités .....	122
5.1 Structure du document .....	122
5.2 Sécurité pendant les essais .....	123
6 Exigences d'essai .....	123
6.1 Généralités .....	123
6.2 Exigences concernant le site d'essai .....	123
6.3 Cas de charges de mesure .....	124
6.3.1 Généralités .....	124
6.3.2 Cas de charges de mesure en fonctionnement stable .....	124
6.3.3 Cas de charges de mesure lors d'événements transitoires .....	125
6.3.4 Cas de charges de mesure pour la caractérisation dynamique .....	126
6.3.5 Matrices de capture .....	126
6.4 Grandeurs à mesurer .....	130
6.4.1 Généralités .....	130
6.4.2 Grandeurs de charges .....	131
6.4.3 Grandeurs météorologiques .....	133
6.4.4 Grandeurs de fonctionnement d'une éolienne .....	134
6.5 Modifications de configuration de l'éolienne .....	134
7 Instruments .....	135
7.1 Grandeurs de charges .....	135
7.1.1 Types de capteurs .....	135
7.1.2 Choix de l'emplacement des capteurs .....	135
7.1.3 Mesurage des moments de flexion du pied de pale .....	135
7.1.4 Répartition du moment de flexion des pales .....	136
7.1.5 Fréquence en torsion/amortissement des pales .....	136
7.1.6 Mesurage du moment d'orientation et d'inclinaison du rotor .....	136
7.1.7 Mesurage du couple du rotor .....	136
7.1.8 Mesurage de la flexion de la base du mât .....	136
7.1.9 Moments de flexion du sommet du mât .....	137
7.1.10 Moments de flexion du milieu du mât .....	137
7.1.11 Couple du mât .....	137
7.1.12 Accélération du sommet du mât .....	137
7.1.13 Charges d'activation du pas (côté moyeu du palier de pas) .....	137
7.2 Grandeurs météorologiques .....	138
7.2.1 Exigences de mesure et de mise en œuvre .....	138
7.2.2 Possibilité de givrage .....	138
7.2.3 Stabilité atmosphérique .....	138
7.3 Grandeurs de fonctionnement d'une éolienne .....	138

7.3.1	Puissance électrique .....	138
7.3.2	Vitesse du rotor ou du générateur.....	138
7.3.3	Désalignement d'orientation .....	138
7.3.4	Angle azimutal du rotor.....	138
7.3.5	Position de pas.....	138
7.3.6	Vitesse de pas.....	139
7.3.7	Moment du frein.....	139
7.3.8	État des éoliennes .....	139
7.3.9	État du frein.....	139
7.4	Système d'acquisition de données .....	139
7.4.1	Généralités .....	139
7.4.2	Résolution .....	139
7.4.3	Lissage.....	139
8	Détermination des facteurs d'étalonnage .....	140
8.1	Généralités .....	140
8.2	Étalonnage des voies de charges.....	140
8.2.1	Généralités .....	140
8.2.2	Moments de flexion des pales.....	141
8.2.3	Moments de l'arbre principal.....	141
8.2.4	Moments de flexion du mât.....	142
8.2.5	Couple du mât .....	143
8.3	Étalonnage des voies autres que des voies de charges .....	143
8.3.1	Angle de pas .....	143
8.3.2	Angle azimutal du rotor.....	143
8.3.3	Angle d'orientation.....	144
8.3.4	Direction du vent .....	144
8.3.5	Charges d'activation du pas.....	144
8.3.6	Moment du frein.....	144
9	Vérification des données .....	145
9.1	Généralités .....	145
9.2	Contrôles de vérification .....	145
9.2.1	Généralités .....	145
9.2.2	Moments des pales.....	146
9.2.3	Arbre principal.....	147
9.2.4	Mât.....	147
10	Traitement des données mesurées .....	148
10.1	Généralités .....	148
10.2	Grandeurs de charges fondamentales.....	148
10.3	Grandeurs de charges pour des éoliennes de plus grande dimension .....	148
10.4	Détection des tendances de la vitesse du vent.....	149
10.5	Statistiques .....	149
10.6	Comptage des demi-cycles .....	149
10.7	Spectre cumulé de comptage des demi-cycles .....	150
10.8	Charge équivalente des dommages .....	150
10.9	Échantillonnage de la vitesse du vent .....	150
10.10	Densité spectrale de puissance.....	151
11	Estimation de l'incertitude.....	152
12	Rapport .....	152

Annexe A (informative) Exemple de systèmes de coordonnées .....	156
A.1 Généralités .....	156
A.2 Système de coordonnées de la pale .....	156
A.3 Système de coordonnées du moyeu .....	156
A.4 Système de coordonnées de la nacelle .....	157
A.5 Système de coordonnées du mât .....	158
A.6 Désalignement d'orientation .....	159
A.7 Angle conique et angle d'inclinaison .....	159
A.8 Angle azimutal du rotor .....	160
A.9 Angle de pas des pales .....	160
Annexe B (informative) Procédure d'évaluation des incertitudes relatives aux mesurages des charges effectués sur les éoliennes .....	161
B.1 Liste des symboles .....	161
B.2 Procédure générale .....	162
B.2.1 Incertitude-type .....	162
B.2.2 Combinaison analytique des incertitudes-types .....	163
B.2.3 Incertitude totale .....	164
B.3 Incertitudes des valeurs moyennées par échantillonnage .....	165
B.3.1 Généralités .....	165
B.3.2 Incertitude d'étalonnage et de signal .....	165
B.3.3 Incertitude de la dispersion d'échantillonnage .....	165
B.3.4 Incertitude de la grandeur de l'axe x .....	165
B.3.5 Incertitude des valeurs moyennes moyennées par échantillonnage .....	166
B.4 Incertitude-type de la charge équivalente des dommages et des spectres de charges .....	166
B.5 Exemples d'évaluation de l'incertitude .....	166
B.5.1 Exemple d'étalonnage par dérivation analytique du couple de mât .....	166
B.6 Détermination et utilisation de la matrice d'étalonnage .....	175
B.6.1 Détermination de la matrice d'étalonnage .....	175
B.6.2 Utilisation de la matrice d'étalonnage .....	176
B.6.3 Séries temporelles .....	177
Annexe C (informative) Présentation des échantillons des mesurages et de l'analyse des charges mécaniques .....	179
C.1 Généralités .....	179
Annexe D (informative) Recommandations pour les mesurages en pleine mer .....	191
Annexe E (informative) Validation des modèles de charge .....	193
E.1 Généralités .....	193
E.2 Méthodes de comparaison des charges .....	194
E.2.1 Échantillonnage statistique .....	194
E.2.2 Fonctions spectrales .....	196
E.2.3 Spectres de fatigue .....	197
E.2.4 Méthode point par point .....	198
Annexe F (informative) Méthodes d'identification des tendances de vitesse du vent .....	200
F.1 Liste des symboles .....	200
F.2 Généralités .....	200
F.3 Méthodes d'identification des tendances .....	201
F.4 Procédure continue .....	205
Annexe G (informative) Considérations relatives à l'acquisition de données .....	206

G.1	Système d'acquisition de données .....	206
G.1.1	Généralités .....	206
G.1.2	Résolution .....	206
G.1.3	Modèle d'échantillonnage et filtrage .....	207
G.1.4	Autres considérations .....	209
Annexe H (informative) Étalonnage des charges .....		211
H.1	Généralités .....	211
H.2	Étalonnage des charges gravitationnelles de flexion des pales .....	211
H.3	Étalonnage analytique des moments de flexion du mât .....	212
H.4	Étalonnage des charges externes du couple du rotor .....	213
Annexe I (informative) Dérive de température .....		215
I.1	Généralités .....	215
I.2	Problèmes identifiés .....	215
I.3	Recommandations .....	216
Annexe J (informative) Mesurages des charges mécaniques sur les éoliennes à axe vertical.....		218
J.1	Généralités .....	218
J.2	Termes et définitions .....	218
J.3	Systèmes de coordonnées .....	219
J.4	Grandeurs à mesurer .....	220
J.4.1	Charges fondamentales .....	220
J.5	Mesurages .....	220
J.5.1	Mesurage des moments de flexion des fixations de pales .....	220
J.5.2	Moment de flexion de mi-envergure des pales .....	220
J.5.3	Fréquence modale/amortissement des pales .....	221
J.5.4	Moment de flexion des entretoises de liaison.....	221
J.5.5	Force axiale des entretoises de liaison .....	221
J.5.6	Fréquence modale/amortissement des entretoises de liaison.....	221
J.5.7	Couple de l'arbre du rotor .....	221
J.5.8	Flexion normale du mât .....	221
Bibliographie.....		222

Figure 1 – Charges fondamentales d'une éolienne: charges de la base du mât, du rotor et des pales.....	132
Figure A.1 – Système de coordonnées de la pale .....	156
Figure A.2 – Système de coordonnées du moyeu.....	157
Figure A.3 – Système de coordonnées de la nacelle .....	158
Figure A.4 – Système de coordonnées du mât .....	158
Figure A.5 – Désalignement d'orientation.....	159
Figure A.6 – Angle conique et angle d'inclinaison .....	159
Figure B.1 – Explication des symboles utilisés .....	172
Figure C.1 – Vitesse du vent à hauteur du moyeu en fonction de la durée .....	179
Figure C.2 – Intensité de turbulence à hauteur du moyeu en fonction de la vitesse du vent à hauteur du moyeu .....	180
Figure C.3 – Tendence de l'intensité de turbulence en fonction de la vitesse du vent à hauteur du moyeu .....	180



Figure C.4 – Matrice de capture générale avec toutes les voies de charges en fonctionnement .....	181
Figure C.5 – Exemple d'éolienne IEC à une vitesse de 9,1 m/s – Grandeurs de fonctionnement et météorologiques de l'éolienne .....	182
Figure C.6 – Exemple d'éolienne IEC à une vitesse de 9,1 m/s – Composantes de charges principales .....	183
Figure C.7 – Statistiques sur 10 min pour la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 .....	184
Figure C.8 – Densité spectrale de puissance de la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 .....	186
Figure C.9 – Spectre cumulé de comptage des demi-cycles pour la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 pendant la période d'essai .....	187
Figure C.10 – Exemple d'éolienne IEC avec arrêt normal à une vitesse de 9,5 m/s – Grandeurs de fonctionnement et météorologiques de l'éolienne .....	189
Figure C.11 – Exemple d'éolienne IEC avec arrêt normal à une vitesse de 9,5 m/s – Composantes de charges principales .....	190
Figure D.1 – Exemple de spectre de la vague et de réponse du monopieu .....	191
Figure D.2 – Exemple de spectre de la vague .....	192
Figure E.1 – Données mesurées .....	194
Figure E.2 – Données simulées .....	194
Figure E.3 – Comparaison des statistiques sur 10 min moyennées et échantillonnées de la vitesse du vent .....	195
Figure E.4 – Comparaison des charges équivalentes à 1 Hz .....	196
Figure E.5 – Comparaison des charges équivalentes à 1 Hz (par échantillonnage de la vitesse du vent) .....	196
Figure E.6 – Comparaison des fonctions DSP .....	197
Figure E.7 – Comparaison des spectres de fatigue .....	198
Figure E.8 – Comparaison point par point des historiques de la vitesse du vent .....	199
Figure E.9 – Comparaison point par point des historiques de charges .....	199
Figure F.1 – Comparaison de la vitesse du vent mesurée ( $v_{mes}$ ), de la vitesse du vent filtrée par lissage ( $v_{filt}$ ) et de la vitesse du vent sans tendance résultante ( $v_{HP}$ ) .....	201
Figure F.2 – Différences des intensités de turbulence calculées avec la vitesse du vent non filtrée et filtrée par rapport à la vitesse du vent mesurée moyenne .....	203
Figure F.3 – Rapport des intensités de turbulence calculées avec la vitesse du vent non filtrée et filtrée par rapport à la vitesse du vent mesurée moyenne .....	204
Figure G.1 – Contrôle de lissage .....	207
Figure I.1 – Observation de la dispersion des valeurs moyennes d'origine sur 10 min du moment de traînée des pales associé au même signal après une compensation de température (en bleu foncé) .....	215
Figure I.2 – Régression linéaire par les décalages déduits des différentes sessions d'étalonnage .....	217
Figure J.1 – EAV de type Darrieus .....	219
Figure J.2 – EAV de type Darrieus hélicoïdale .....	219
Tableau 1 – Cas de charges de mesure en fonctionnement stable par rapport aux cas de charges pour la conception définis dans l'IEC 61400-1 .....	125
Tableau 2 – Mesurage des cas de charge transitoires par rapport aux cas de charges pour la conception définis dans l'IEC 61400-1 .....	125

Tableau 3 – Cas de charges de mesure pour la caractérisation dynamique.....	126
Tableau 4 – Matrice de capture pour une production électrique normale pour les éoliennes à pas fixe .....	128
Tableau 5 – Matrice de capture pour une production électrique normale pour les éoliennes autres que les éoliennes à pas fixe .....	129
Tableau 6 – Matrice de capture pour une éolienne immobilisée .....	130
Tableau 7 – Matrice de capture pour des événements transitoires normaux.....	130
Tableau 8 – Matrice de capture pour des événements autres que des événements transitoires normaux .....	130
Tableau 9 – Grandeurs de charges fondamentales d'une éolienne.....	131
Tableau 10 – Grandeurs de charges supplémentaires pour les éoliennes avec une puissance de sortie assignée supérieure à 1 500 kW et un diamètre de rotor supérieur à 75 m .....	133
Tableau 11 – Grandeurs météorologiques.....	133
Tableau 12 – Grandeurs de fonctionnement d'une éolienne .....	134
Tableau 13 – Résumé des méthodes d'étalonnage appropriées .....	141
Tableau B.1 – Composantes de l'incertitude .....	167
Tableau B.2 – Valeurs et incertitudes de calcul.....	171
Tableau C.1 – Données échantillonnées pour la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 .....	186
Tableau C.2 – Matrice de capture transitoire pour un démarrage et un arrêt dans des conditions normales .....	188
Tableau C.3 – Description statistique succincte pour un arrêt normal, dans le cas de l'exemple d'éolienne IEC à une vitesse de 9,5 m/s.....	188
Tableau G.1 – Fréquences significatives de l'éolienne .....	208
Tableau G.2 – Rapport d'échantillonnage .....	208
Tableau J.1 – Recommandations minimales pour les grandeurs de charges fondamentales d'une EAV .....	220

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

---

### ÉOLIENNES –

### Partie 13: Mesurage des charges mécaniques

#### 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.

**Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de son amendement a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.**

**L'IEC 61400-13 édition 1.1 contient la première édition (2015-12) [documents 88/511/CDV et 88/554/RVC] et son amendement 1 (2021-12) [documents 88/795/CDV et 88/821/RVC].**

**Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts sont en vert, les suppressions sont en rouge, barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.**

La Norme internationale IEC 61400-13 a été établie par le comité d'études 88: Éoliennes, de l'IEC.

Cette norme remplace l'IEC TS 61400-13 parue en 2001. Cette première édition constitue une révision technique, ainsi que la transposition d'une spécification technique en Norme internationale.

Cette première édition inclut les changements suivants par rapport à la spécification technique:

- a) le domaine d'application de ce document se concentre sur les mesurages de charge à des fins de validation de modèle;
- b) un nombre de cas de mesurages de charge est réduit pour être en accord avec le nouveau domaine d'application;
- c) des exigences sont réduites pour la matrice de capture pour être en accord avec le nouveau domaine d'application;
- d) des exigences sont mises à jour pour la prise en compte de la technologie de l'état de l'art.

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 *Eoliennes*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) dans les données relatives à la publication recherchée. A 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

Dans le processus de conception structurelle d'une éolienne, une connaissance approfondie, ainsi qu'une quantification exacte, des charges sont de première importance.

Dans la phase de conception, les charges peuvent être prévues au moyen de modèles et de codes aéroélastiques. Toutefois, ces modèles ont leurs insuffisances et incertitudes, et il est toujours nécessaire de les valider par un mesurage.

Les mesurages des charges mécaniques peuvent être utilisés à la fois comme base de conception et comme base de certification. Les aspects de conception propres aux éoliennes sont traités par l'IEC 61400-1, tandis que les procédures de certification sont décrites dans l'IEC 61400-22. La présente norme est destinée au laboratoire d'essai, au fabricant d'éoliennes et à l'organisme de certification, et définit clairement les exigences minimales concernant un essai de charges mécaniques qui produit des résultats de grande qualité, cohérents et reproductibles.

### INTRODUCTION à l'Amendement 1

Le présent amendement à l'IEC 61400-13:2015 traite des erreurs rencontrées dans l'Annexe B, qui affectent une partie significative de cette annexe.

## ÉOLIENNES –

### Partie 13: Mesurage des charges mécaniques

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61400 décrit le mesurage des charges structurelles fondamentales sur les éoliennes à des fins de validation des modèles de simulation de charges. La norme spécifie les exigences et recommandations concernant le choix du site, la sélection des signaux, l'acquisition des données, l'étalonnage, la vérification des données, les cas de charges de mesure, la matrice de capture, le post-traitement, la détermination de l'incertitude et les rapports d'essai. Des annexes informatives sont également fournies pour améliorer la compréhension des méthodes d'essai.

Les méthodes décrites dans le présent document peuvent également être utilisées pour les mesurages des charges mécaniques à d'autres fins telles que l'obtention d'une représentation statistique mesurée des charges, des mesurages directs des charges pour la conception, les essais relatifs à la sécurité et au fonctionnement ou le mesurage des charges des composants. Lorsque ces méthodes sont utilisées pour un autre objectif ou pour un modèle d'éolienne non classique, il convient d'évaluer les signaux, cas de charges de mesure, matrice de capture et méthodes de post-traitement exigés, et de les ajuster, si nécessaire, pour répondre à cet objectif.

Ces méthodes sont destinées aux éoliennes à axe horizontal (EAH) productrices d'électricité sur terre, avec des surfaces balayées par le rotor supérieures à 200 m<sup>2</sup>. Toutefois, les méthodes décrites peuvent être applicables à d'autres éoliennes (par exemple, petites éoliennes, éoliennes carénées, éoliennes à axe vertical).

#### 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 sur <<http://www.electropedia.org/>>)

IEC 61400-1:2005, *Wind turbines – Part 1: Design requirements* (disponible en anglais seulement)

IEC 61400-12-1, *Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines* (disponible en anglais seulement)

ISO/IEC Guide 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*

# FINAL VERSION

# VERSION FINALE



---

**Wind turbines –  
Part 13: Measurement of mechanical loads**

**Éoliennes –  
Partie 13: Mesurage des charges mécaniques**



## CONTENTS

FOREWORD.....	8
INTRODUCTION.....	10
INTRODUCTION to Amendment 1 .....	10
1 Scope.....	11
2 Normative references .....	11
3 Terms and definitions .....	11
4 Symbols, units and abbreviations .....	14
5 General .....	16
5.1 Document structure.....	16
5.2 Safety during testing .....	17
6 Test requirements.....	17
6.1 General.....	17
6.2 Test site requirements .....	17
6.3 Measurement load cases .....	17
6.3.1 General .....	17
6.3.2 MLCs during steady-state operation .....	18
6.3.3 MLCs during transient events .....	18
6.3.4 MLCs for dynamic characterization .....	19
6.3.5 Capture matrices .....	20
6.4 Quantities to be measured .....	23
6.4.1 General .....	23
6.4.2 Load quantities .....	23
6.4.3 Meteorological quantities .....	25
6.4.4 Wind turbine operation quantities.....	25
6.5 Turbine configuration changes .....	26
7 Instrumentation.....	27
7.1 Load quantities .....	27
7.1.1 Types of sensors .....	27
7.1.2 Choice of sensor location .....	27
7.1.3 Measurement of blade root bending moments.....	27
7.1.4 Blade bending moment distribution .....	28
7.1.5 Blade torsion frequency/damping.....	28
7.1.6 Measurement of rotor yaw and tilt moment .....	28
7.1.7 Measurement of the rotor torque.....	28
7.1.8 Measurement of tower base bending .....	28
7.1.9 Tower top bending moments.....	28
7.1.10 Tower mid bending moments .....	29
7.1.11 Tower torque .....	29
7.1.12 Tower top acceleration .....	29
7.1.13 Pitch actuation loads (on hub side of pitch bearing).....	29
7.2 Meteorological quantities .....	29
7.2.1 Measurement and installation requirements.....	29
7.2.2 Icing potential.....	29
7.2.3 Atmospheric stability.....	29
7.3 Wind turbine operation quantities.....	30



7.3.1	Electrical power .....	30
7.3.2	Rotor speed or generator speed .....	30
7.3.3	Yaw misalignment.....	30
7.3.4	Rotor azimuth angle.....	30
7.3.5	Pitch position.....	30
7.3.6	Pitch speed .....	30
7.3.7	Brake moment .....	30
7.3.8	Wind turbine status.....	30
7.3.9	Brake status .....	30
7.4	Data acquisition system .....	31
7.4.1	General .....	31
7.4.2	Resolution .....	31
7.4.3	Anti-aliasing.....	31
8	Determination of calibration factors .....	31
8.1	General.....	31
8.2	Calibration of load channels.....	32
8.2.1	General .....	32
8.2.2	Blade bending moments .....	33
8.2.3	Main shaft moments .....	33
8.2.4	Tower bending moments.....	34
8.2.5	Tower torque .....	34
8.3	Calibration of non-load channels.....	35
8.3.1	Pitch angle .....	35
8.3.2	Rotor azimuth angle.....	35
8.3.3	Yaw angle.....	35
8.3.4	Wind direction.....	35
8.3.5	Pitch actuation loads .....	35
8.3.6	Brake moment .....	36
9	Data verification .....	36
9.1	General.....	36
9.2	Verification checks.....	36
9.2.1	General .....	36
9.2.2	Blade moments.....	37
9.2.3	Main shaft.....	38
9.2.4	Tower .....	38
10	Processing of measured data .....	39
10.1	General.....	39
10.2	Fundamental load quantities .....	39
10.3	Load quantities for larger turbines.....	39
10.4	Wind speed trend detection.....	39
10.5	Statistics .....	40
10.6	Rainflow counting .....	40
10.7	Cumulative rainflow spectrum .....	40
10.8	Damage equivalent load.....	40
10.9	Wind speed binning .....	41
10.10	Power spectral density.....	42
11	Uncertainty estimation .....	42
12	Reporting.....	42

Annex A (informative) Example co-ordinate systems.....	46
A.1 General.....	46
A.2 Blade co-ordinate system.....	46
A.3 Hub co-ordinate system .....	46
A.4 Nacelle co-ordinate system.....	47
A.5 Tower co-ordinate system .....	48
A.6 Yaw misalignment.....	49
A.7 Cone angle and tilt angle .....	49
A.8 Rotor azimuth angle.....	50
A.9 Blade pitch angle .....	50
Annex B (informative) Procedure for the evaluation of uncertainties in load measurements on wind turbines.....	51
B.1 List of symbols.....	51
B.2 General procedure .....	52
B.2.1 Standard uncertainty .....	52
B.2.2 Analytical combination of standard uncertainties.....	53
B.2.3 Total uncertainty.....	54
B.3 Uncertainties of binned averaged values.....	55
B.3.1 General .....	55
B.3.2 Uncertainty of calibration and signal .....	55
B.3.3 Uncertainty of the bin scatter .....	55
B.3.4 Uncertainty of the x-axis quantity.....	55
B.3.5 Uncertainty of bin averaged mean values .....	55
B.4 Standard uncertainty of DEL and load spectra .....	56
B.5 Examples of an uncertainty evaluation .....	56
B.5.1 Example for analytical shunt calibration of tower torque.....	56
B.6 Determination and use of calibration matrix .....	64
B.6.1 Determination of the calibration matrix.....	64
B.6.2 Use of the calibration matrix .....	65
B.6.3 Time series.....	66
Annex C (informative) Sample presentation of mechanical load measurements and analysis .....	68
C.1 General.....	68
Annex D (informative) Recommendations for offshore measurements.....	80
Annex E (informative) Load model validation .....	82
E.1 General.....	82
E.2 Methods for loads comparison .....	83
E.2.1 Statistical binning .....	83
E.2.2 Spectral functions.....	84
E.2.3 Fatigue spectra.....	85
E.2.4 Point by point .....	85
Annex F (informative) Methods for identification of wind speed trends .....	87
F.1 List of symbols.....	87
F.2 General.....	87
F.3 Trend identification methods .....	88
F.4 Ongoing procedure .....	92
Annex G (informative) Data acquisition considerations.....	93
G.1 Data acquisition system .....	93

G.1.1	General .....	93
G.1.2	Resolution .....	93
G.1.3	Sampling model and filtering.....	94
G.1.4	Other considerations .....	96
Annex H (informative)	Load calibration .....	97
H.1	General.....	97
H.2	Gravity load calibration of the blade bending.....	97
H.3	Analytical calibration of the tower bending moments .....	98
H.4	External load calibration of the rotor torque.....	99
Annex I (informative)	Temperature drift.....	100
I.1	General.....	100
I.2	Known issues.....	100
I.3	Recommendations .....	101
Annex J (informative)	Mechanical load measurements on vertical axis wind turbines .....	102
J.1	General.....	102
J.2	Terms and definitions.....	102
J.3	Coordinate systems .....	102
J.4	Quantities to be measured .....	103
J.4.1	Fundamental loads .....	103
J.5	Measurements .....	104
J.5.1	Measurement of blade attachment bending moments.....	104
J.5.2	Blade mid-span bending moment .....	104
J.5.3	Blade modal frequency/damping .....	104
J.5.4	Connecting strut bending moment.....	104
J.5.5	Connecting strut axial force .....	105
J.5.6	Connecting strut modal frequency/damping .....	105
J.5.7	Rotor shaft torque.....	105
J.5.8	Tower normal bending .....	105
Bibliography.....		106
Figure 1 – Fundamental wind turbine loads: tower base, rotor and blade loads .....		24
Figure A.1 – Blade co-ordinate system.....		46
Figure A.2 – Hub co-ordinate system .....		47
Figure A.3 – Nacelle co-ordinate system .....		48
Figure A.4 – Tower co-ordinate system.....		48
Figure A.5 – Yaw misalignment.....		49
Figure A.6 – Cone angle and tilt angle .....		49
Figure B.1 – Explanation of used symbols.....		62
Figure C.1 – Hub-height wind speed as a function of time.....		68
Figure C.2 – Hub-height turbulence intensity as a function of hub-height wind speed.....		69
Figure C.3 – Turbulence intensity trending as a function of hub-height wind speed .....		69
Figure C.4 – Global capture matrix with all loads channels operating .....		70
Figure C.5 – IEC example turbine at 9,1 m/s – Wind turbine operational and meteorological quantities .....		71
Figure C.6 – IEC example turbine at 9,1 m/s – Major load components .....		72
Figure C.7 – 10-minute statistics for blade 1 root edge bending .....		73

Figure C.8 – Power spectral density of blade 1 root edge bending .....	74
Figure C.9 – Cumulative rainflow spectrum for blade 1 root edge bending during test period .....	76
Figure C.10 – IEC example turbine normal shutdown at 9,5 m/s – Wind turbine operational and meteorological quantities .....	78
Figure C.11 – IEC example turbine normal shutdown at 9,5 m/s – Major load components .....	79
Figure D.1 – Example of wave spectrum and monopile response .....	80
Figure D.2 – Example of wave spectrum .....	81
Figure E.1 – Measured data .....	83
Figure E.2 – Simulated data .....	83
Figure E.3 – Comparison of wind speed binned averaged 10 min. statistics .....	83
Figure E.4 – Comparison of 1 Hz equivalent loads .....	84
Figure E.5 – Comparison of 1 Hz equivalent loads (wind speed binned) .....	84
Figure E.6 – Comparison of PSD functions .....	84
Figure E.7 – Comparison of fatigue spectra .....	85
Figure E.8 – Point by point comparison of wind speed time histories .....	86
Figure E.9 – Point by point comparison of load time histories .....	86
Figure F.1 – Comparison of measured wind speed ( $v_{meas}$ ), smoothing-filtered wind speed ( $v_{filt}$ ) and resulting trend-free wind speed ( $v_{HP}$ ) .....	88
Figure F.2 – Differences of turbulence intensities calculated with un-filtered and filtered wind speed versus mean measured wind speed .....	90
Figure F.3 – Ratio of turbulence intensities calculated with un-filtered and filtered wind speed versus mean measured wind speed .....	91
Figure G.1 – Anti-aliasing check .....	94
Figure I.1 – Observed scatter in the original 10-min average values of the blade edge moment together with the same signal after temperature compensation in dark blue .....	100
Figure I.2 – Linear regression through the offsets derived from the different calibration runs .....	101
Figure J.1 – Darrieus style VAWT .....	103
Figure J.2 – Helical Darrieus style VAWT .....	103
Table 1 – MLCs during steady-state operation related to the DLCs defined in IEC 61400-1 .....	18
Table 2 – Measurement of transient load cases related to the DLCs defined in IEC 61400-1 .....	19
Table 3 – MLCs for dynamic characterization .....	19
Table 4 – Capture matrix for normal power production for stall controlled wind turbines .....	21
Table 5 – Capture matrix for normal power production for non stall controlled wind turbines .....	22
Table 6 – Capture matrix for parked condition .....	22
Table 7 – Capture matrix for normal transient events .....	23
Table 8 – Capture matrix for other than normal transient events .....	23
Table 9 – Wind turbine fundamental load quantities .....	24
Table 10 – Additional load quantities for turbines with a rated power output greater than 1 500 kW and rotor diameter greater than 75 m .....	25

Table 11 – Meteorological quantities .....	25
Table 12 – Wind turbine operation quantities .....	26
Table 13 – Summary of suitable calibration methods .....	32
Table B.1 – Uncertainty components.....	57
Table B.2 – Values and uncertainties for the calculation .....	61
Table C.1 – Binned data for blade 1 root edge bending.....	75
Table C.2 – Transient capture matrix for normal start-up and shutdown .....	77
Table C.3 – Brief statistical description for normal shutdown for IEC example turbine at 9,5 m/s .....	77
Table G.1 – Wind turbine significant frequencies .....	95
Table G.2 – Sampling ratio .....	95
Table J.1 – Minimum recommendations for VAWT fundamental load quantities.....	104

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

---

### WIND TURBINES –

#### Part 13: Measurement of mechanical loads

#### 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.

**This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.**

**IEC 61400-13 edition 1.1 contains the first edition (2015-12) [documents 88/511/CDV and 88/554/RVC] and its amendment 1 (2021-12) [documents 88/795/CDV and 88/821/RVC].**

**This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.**

This International Standard IEC 61400-13 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind turbines.

This standard replaces IEC TS 61400-13 published in 2001. This first edition constitutes a technical revision and transition from technical specification to International Standard.

This first edition includes the following changes with respect to the technical specification:

- a) scope of the document focused to load measurements for the purpose of model validation;
- b) number of measurement load cases to match the new scope reduced;
- c) capture matrix requirements to match the new scope reduced;
- d) requirements to address the state of the art technology updated.

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 the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under [webstore.iec.ch](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

In the process of structural design of a wind turbine, thorough understanding about, and accurate quantification of, the loading is of utmost importance.

In the design stage, loads can be predicted with aeroelastic models and codes. However, such models have their shortcomings and uncertainties, and they always need to be validated by measurement.

Mechanical load measurements can be used both as the basis for design and as the basis for certification. Design aspects for wind turbines are covered by IEC 61400-1 whilst certification procedures are described in IEC 61400-22. This standard is aimed at the test institute, the turbine manufacturer and the certifying body and clearly defines the minimum requirements for a mechanical loads test resulting in consistent, high quality reproducible test results.

### INTRODUCTION to Amendment 1

This amendment to IEC 61400-13:2015 addresses the errors found in Annex B which impact a significant portion of that annex.



## WIND TURBINES –

### Part 13: Measurement of mechanical loads

#### 1 Scope

This part of the IEC 61400 describes the measurement of fundamental structural loads on wind turbines for the purpose of the load simulation model validation. The standard prescribes the requirements and recommendations for site selection, signal selection, data acquisition, calibration, data verification, measurement load cases, capture matrix, post-processing, uncertainty determination and reporting. Informative annexes are also provided to improve understanding of testing methods.

The methods described in this document can also be used for mechanical loads measurements for other purposes such as obtaining a measured statistical representation of loads, direct measurements of the design loads, safety and function testing, or measurement of component loads. If these methods are used for an alternative objective or used for an unconventional wind turbine design, the required signals, measurement load cases, capture matrix, and post processing methods should be evaluated and if needed adjusted to fit the objective.

These methods are intended for onshore electricity-generating, horizontal-axis wind turbines (HAWTs) with rotor swept areas of larger than 200 m<sup>2</sup>. However, the methods described may be applicable to other wind turbines (for example, small wind turbines, ducted wind turbines, vertical axis wind turbines).

#### 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 61400-12-1, *Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	114
INTRODUCTION .....	116
INTRODUCTION à l'Amendement 1 .....	116
1 Domaine d'application .....	117
2 Références normatives .....	117
3 Termes et définitions .....	117
4 Symboles, unités et abréviations .....	121
5 Généralités .....	122
5.1 Structure du document .....	122
5.2 Sécurité pendant les essais .....	123
6 Exigences d'essai .....	123
6.1 Généralités .....	123
6.2 Exigences concernant le site d'essai .....	123
6.3 Cas de charges de mesure .....	124
6.3.1 Généralités .....	124
6.3.2 Cas de charges de mesure en fonctionnement stable .....	124
6.3.3 Cas de charges de mesure lors d'événements transitoires .....	125
6.3.4 Cas de charges de mesure pour la caractérisation dynamique .....	126
6.3.5 Matrices de capture .....	126
6.4 Grandeurs à mesurer .....	130
6.4.1 Généralités .....	130
6.4.2 Grandeurs de charges .....	131
6.4.3 Grandeurs météorologiques .....	133
6.4.4 Grandeurs de fonctionnement d'une éolienne .....	134
6.5 Modifications de configuration de l'éolienne .....	134
7 Instruments .....	135
7.1 Grandeurs de charges .....	135
7.1.1 Types de capteurs .....	135
7.1.2 Choix de l'emplacement des capteurs .....	135
7.1.3 Mesurage des moments de flexion du pied de pale .....	135
7.1.4 Répartition du moment de flexion des pales .....	136
7.1.5 Fréquence en torsion/amortissement des pales .....	136
7.1.6 Mesurage du moment d'orientation et d'inclinaison du rotor .....	136
7.1.7 Mesurage du couple du rotor .....	136
7.1.8 Mesurage de la flexion de la base du mât .....	136
7.1.9 Moments de flexion du sommet du mât .....	137
7.1.10 Moments de flexion du milieu du mât .....	137
7.1.11 Couple du mât .....	137
7.1.12 Accélération du sommet du mât .....	137
7.1.13 Charges d'activation du pas (côté moyeu du palier de pas) .....	137
7.2 Grandeurs météorologiques .....	138
7.2.1 Exigences de mesure et de mise en œuvre .....	138
7.2.2 Possibilité de givrage .....	138
7.2.3 Stabilité atmosphérique .....	138
7.3 Grandeurs de fonctionnement d'une éolienne .....	138

7.3.1	Puissance électrique .....	138
7.3.2	Vitesse du rotor ou du générateur.....	138
7.3.3	Désalignement d'orientation .....	138
7.3.4	Angle azimutal du rotor.....	138
7.3.5	Position de pas.....	138
7.3.6	Vitesse de pas.....	139
7.3.7	Moment du frein.....	139
7.3.8	État des éoliennes .....	139
7.3.9	État du frein.....	139
7.4	Système d'acquisition de données .....	139
7.4.1	Généralités .....	139
7.4.2	Résolution .....	139
7.4.3	Lissage.....	139
8	Détermination des facteurs d'étalonnage .....	140
8.1	Généralités .....	140
8.2	Étalonnage des voies de charges.....	140
8.2.1	Généralités .....	140
8.2.2	Moments de flexion des pales.....	141
8.2.3	Moments de l'arbre principal.....	141
8.2.4	Moments de flexion du mât.....	142
8.2.5	Couple du mât .....	143
8.3	Étalonnage des voies autres que des voies de charges .....	143
8.3.1	Angle de pas .....	143
8.3.2	Angle azimutal du rotor.....	143
8.3.3	Angle d'orientation.....	144
8.3.4	Direction du vent .....	144
8.3.5	Charges d'activation du pas.....	144
8.3.6	Moment du frein.....	144
9	Vérification des données .....	145
9.1	Généralités .....	145
9.2	Contrôles de vérification .....	145
9.2.1	Généralités .....	145
9.2.2	Moments des pales.....	146
9.2.3	Arbre principal.....	147
9.2.4	Mât.....	147
10	Traitement des données mesurées .....	148
10.1	Généralités .....	148
10.2	Grandeurs de charges fondamentales.....	148
10.3	Grandeurs de charges pour des éoliennes de plus grande dimension .....	148
10.4	Détection des tendances de la vitesse du vent.....	149
10.5	Statistiques .....	149
10.6	Comptage des demi-cycles .....	149
10.7	Spectre cumulé de comptage des demi-cycles .....	150
10.8	Charge équivalente des dommages .....	150
10.9	Échantillonnage de la vitesse du vent .....	150
10.10	Densité spectrale de puissance.....	151
11	Estimation de l'incertitude.....	152
12	Rapport .....	152

Annexe A (informative) Exemple de systèmes de coordonnées .....	156
A.1 Généralités .....	156
A.2 Système de coordonnées de la pale .....	156
A.3 Système de coordonnées du moyeu .....	156
A.4 Système de coordonnées de la nacelle .....	157
A.5 Système de coordonnées du mât .....	158
A.6 Désalignement d'orientation .....	159
A.7 Angle conique et angle d'inclinaison .....	159
A.8 Angle azimutal du rotor .....	160
A.9 Angle de pas des pales .....	160
Annexe B (informative) Procédure d'évaluation des incertitudes relatives aux mesurages des charges effectués sur les éoliennes .....	161
B.1 Liste des symboles .....	161
B.2 Procédure générale .....	162
B.2.1 Incertitude-type .....	162
B.2.2 Combinaison analytique des incertitudes-types .....	163
B.2.3 Incertitude totale .....	164
B.3 Incertitudes des valeurs moyennées par échantillonnage .....	165
B.3.1 Généralités .....	165
B.3.2 Incertitude d'étalonnage et de signal .....	165
B.3.3 Incertitude de la dispersion d'échantillonnage .....	165
B.3.4 Incertitude de la grandeur de l'axe x .....	165
B.3.5 Incertitude des valeurs moyennes moyennées par échantillonnage .....	166
B.4 Incertitude-type de la charge équivalente des dommages et des spectres de charges .....	166
B.5 Exemples d'évaluation de l'incertitude .....	166
B.5.1 Exemple d'étalonnage par dérivation analytique du couple de mât .....	166
B.6 Détermination et utilisation de la matrice d'étalonnage .....	174
B.6.1 Détermination de la matrice d'étalonnage .....	174
B.6.2 Utilisation de la matrice d'étalonnage .....	175
B.6.3 Séries temporelles .....	176
Annexe C (informative) Présentation des échantillons des mesurages et de l'analyse des charges mécaniques .....	178
C.1 Généralités .....	178
Annexe D (informative) Recommandations pour les mesurages en pleine mer .....	190
Annexe E (informative) Validation des modèles de charge .....	192
E.1 Généralités .....	192
E.2 Méthodes de comparaison des charges .....	193
E.2.1 Échantillonnage statistique .....	193
E.2.2 Fonctions spectrales .....	195
E.2.3 Spectres de fatigue .....	196
E.2.4 Méthode point par point .....	197
Annexe F (informative) Méthodes d'identification des tendances de vitesse du vent .....	199
F.1 Liste des symboles .....	199
F.2 Généralités .....	199
F.3 Méthodes d'identification des tendances .....	200
F.4 Procédure continue .....	204
Annexe G (informative) Considérations relatives à l'acquisition de données .....	205

G.1	Système d'acquisition de données .....	205
G.1.1	Généralités .....	205
G.1.2	Résolution .....	205
G.1.3	Modèle d'échantillonnage et filtrage .....	206
G.1.4	Autres considérations .....	208
Annexe H (informative)	Étalonnage des charges .....	210
H.1	Généralités .....	210
H.2	Étalonnage des charges gravitationnelles de flexion des pales .....	210
H.3	Étalonnage analytique des moments de flexion du mât .....	211
H.4	Étalonnage des charges externes du couple du rotor .....	212
Annexe I (informative)	Dérive de température .....	214
I.1	Généralités .....	214
I.2	Problèmes identifiés .....	214
I.3	Recommandations .....	215
Annexe J (informative)	Mesurages des charges mécaniques sur les éoliennes à axe vertical .....	217
J.1	Généralités .....	217
J.2	Termes et définitions .....	217
J.3	Systèmes de coordonnées .....	218
J.4	Grandeurs à mesurer .....	219
J.4.1	Charges fondamentales .....	219
J.5	Mesurages .....	219
J.5.1	Mesurage des moments de flexion des fixations de pales .....	219
J.5.2	Moment de flexion de mi-envergure des pales .....	219
J.5.3	Fréquence modale/amortissement des pales .....	220
J.5.4	Moment de flexion des entretoises de liaison .....	220
J.5.5	Force axiale des entretoises de liaison .....	220
J.5.6	Fréquence modale/amortissement des entretoises de liaison .....	220
J.5.7	Couple de l'arbre du rotor .....	220
J.5.8	Flexion normale du mât .....	220
Bibliographie	.....	221
Figure 1	– Charges fondamentales d'une éolienne: charges de la base du mât, du rotor et des pales .....	132
Figure A.1	– Système de coordonnées de la pale .....	156
Figure A.2	– Système de coordonnées du moyeu .....	157
Figure A.3	– Système de coordonnées de la nacelle .....	158
Figure A.4	– Système de coordonnées du mât .....	158
Figure A.5	– Désalignement d'orientation .....	159
Figure A.6	– Angle conique et angle d'inclinaison .....	159
Figure B.1	– Explication des symboles utilisés .....	172
Figure C.1	– Vitesse du vent à hauteur du moyeu en fonction de la durée .....	178
Figure C.2	– Intensité de turbulence à hauteur du moyeu en fonction de la vitesse du vent à hauteur du moyeu .....	179
Figure C.3	– Tendence de l'intensité de turbulence en fonction de la vitesse du vent à hauteur du moyeu .....	179

Figure C.4 – Matrice de capture générale avec toutes les voies de charges en fonctionnement .....	180
Figure C.5 – Exemple d'éolienne IEC à une vitesse de 9,1 m/s – Grandeurs de fonctionnement et météorologiques de l'éolienne .....	181
Figure C.6 – Exemple d'éolienne IEC à une vitesse de 9,1 m/s – Composantes de charges principales .....	182
Figure C.7 – Statistiques sur 10 min pour la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 .....	183
Figure C.8 – Densité spectrale de puissance de la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 .....	185
Figure C.9 – Spectre cumulé de comptage des demi-cycles pour la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 pendant la période d'essai .....	186
Figure C.10 – Exemple d'éolienne IEC avec arrêt normal à une vitesse de 9,5 m/s – Grandeurs de fonctionnement et météorologiques de l'éolienne .....	188
Figure C.11 – Exemple d'éolienne IEC avec arrêt normal à une vitesse de 9,5 m/s – Composantes de charges principales .....	189
Figure D.1 – Exemple de spectre de la vague et de réponse du monopieu .....	190
Figure D.2 – Exemple de spectre de la vague .....	191
Figure E.1 – Données mesurées .....	193
Figure E.2 – Données simulées .....	193
Figure E.3 – Comparaison des statistiques sur 10 min moyennées et échantillonnées de la vitesse du vent .....	194
Figure E.4 – Comparaison des charges équivalentes à 1 Hz .....	195
Figure E.5 – Comparaison des charges équivalentes à 1 Hz (par échantillonnage de la vitesse du vent) .....	195
Figure E.6 – Comparaison des fonctions DSP .....	196
Figure E.7 – Comparaison des spectres de fatigue .....	197
Figure E.8 – Comparaison point par point des historiques de la vitesse du vent .....	198
Figure E.9 – Comparaison point par point des historiques de charges .....	198
Figure F.1 – Comparaison de la vitesse du vent mesurée ( $v_{mes}$ ), de la vitesse du vent filtrée par lissage ( $v_{filt}$ ) et de la vitesse du vent sans tendance résultante ( $v_{HP}$ ) .....	200
Figure F.2 – Différences des intensités de turbulence calculées avec la vitesse du vent non filtrée et filtrée par rapport à la vitesse du vent mesurée moyenne .....	202
Figure F.3 – Rapport des intensités de turbulence calculées avec la vitesse du vent non filtrée et filtrée par rapport à la vitesse du vent mesurée moyenne .....	203
Figure G.1 – Contrôle de lissage .....	206
Figure I.1 – Observation de la dispersion des valeurs moyennes d'origine sur 10 min du moment de traînée des pales associé au même signal après une compensation de température (en bleu foncé) .....	214
Figure I.2 – Régression linéaire par les décalages déduits des différentes sessions d'étalonnage .....	216
Figure J.1 – EAV de type Darrieus .....	218
Figure J.2 – EAV de type Darrieus hélicoïdale .....	218
Tableau 1 – Cas de charges de mesure en fonctionnement stable par rapport aux cas de charges pour la conception définis dans l'IEC 61400-1 .....	125
Tableau 2 – Mesurage des cas de charge transitoires par rapport aux cas de charges pour la conception définis dans l'IEC 61400-1 .....	125

Tableau 3 – Cas de charges de mesure pour la caractérisation dynamique.....	126
Tableau 4 – Matrice de capture pour une production électrique normale pour les éoliennes à pas fixe .....	128
Tableau 5 – Matrice de capture pour une production électrique normale pour les éoliennes autres que les éoliennes à pas fixe .....	129
Tableau 6 – Matrice de capture pour une éolienne immobilisée .....	130
Tableau 7 – Matrice de capture pour des événements transitoires normaux.....	130
Tableau 8 – Matrice de capture pour des événements autres que des événements transitoires normaux .....	130
Tableau 9 – Grandeurs de charges fondamentales d'une éolienne.....	131
Tableau 10 – Grandeurs de charges supplémentaires pour les éoliennes avec une puissance de sortie assignée supérieure à 1 500 kW et un diamètre de rotor supérieur à 75 m .....	133
Tableau 11 – Grandeurs météorologiques.....	133
Tableau 12 – Grandeurs de fonctionnement d'une éolienne .....	134
Tableau 13 – Résumé des méthodes d'étalonnage appropriées .....	141
Tableau B.1 – Composantes de l'incertitude .....	167
Tableau B.2 – Valeurs et incertitudes de calcul.....	171
Tableau C.1 – Données échantillonnées pour la flexion dans le sens de la traînée du pied de pale 1 .....	185
Tableau C.2 – Matrice de capture transitoire pour un démarrage et un arrêt dans des conditions normales .....	187
Tableau C.3 – Description statistique succincte pour un arrêt normal, dans le cas de l'exemple d'éolienne IEC à une vitesse de 9,5 m/s.....	187
Tableau G.1 – Fréquences significatives de l'éolienne .....	207
Tableau G.2 – Rapport d'échantillonnage .....	207
Tableau J.1 – Recommandations minimales pour les grandeurs de charges fondamentales d'une EAV .....	219

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

---

### ÉOLIENNES –

### Partie 13: Mesurage des charges mécaniques

#### 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.

**Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de son amendement a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.**

**L'IEC 61400-13 édition 1.1 contient la première édition (2015-12) [documents 88/511/CDV et 88/554/RVC] et son amendement 1 (2021-12) [documents 88/795/CDV et 88/821/RVC].**

**Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.**



La Norme internationale IEC 61400-13 a été établie par le comité d'études 88: Éoliennes, de l'IEC.

Cette norme remplace l'IEC TS 61400-13 parue en 2001. Cette première édition constitue une révision technique, ainsi que la transposition d'une spécification technique en Norme internationale.

Cette première édition inclut les changements suivants par rapport à la spécification technique:

- a) le domaine d'application de ce document se concentre sur les mesurages de charge à des fins de validation de modèle;
- b) un nombre de cas de mesurages de charge est réduit pour être en accord avec le nouveau domaine d'application;
- c) des exigences sont réduites pour la matrice de capture pour être en accord avec le nouveau domaine d'application;
- d) des exigences sont mises à jour pour la prise en compte de la technologie de l'état de l'art.

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 *Eoliennes*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) dans les données relatives à la publication recherchée. A 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

Dans le processus de conception structurelle d'une éolienne, une connaissance approfondie, ainsi qu'une quantification exacte, des charges sont de première importance.

Dans la phase de conception, les charges peuvent être prévues au moyen de modèles et de codes aéroélastiques. Toutefois, ces modèles ont leurs insuffisances et incertitudes, et il est toujours nécessaire de les valider par un mesurage.

Les mesurages des charges mécaniques peuvent être utilisés à la fois comme base de conception et comme base de certification. Les aspects de conception propres aux éoliennes sont traités par l'IEC 61400-1, tandis que les procédures de certification sont décrites dans l'IEC 61400-22. La présente norme est destinée au laboratoire d'essai, au fabricant d'éoliennes et à l'organisme de certification, et définit clairement les exigences minimales concernant un essai de charges mécaniques qui produit des résultats de grande qualité, cohérents et reproductibles.

### INTRODUCTION à l'Amendement 1

Le présent amendement à l'IEC 61400-13:2015 traite des erreurs rencontrées dans l'Annexe B, qui affectent une partie significative de cette annexe.

## ÉOLIENNES –

### Partie 13: Mesurage des charges mécaniques

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61400 décrit le mesurage des charges structurelles fondamentales sur les éoliennes à des fins de validation des modèles de simulation de charges. La norme spécifie les exigences et recommandations concernant le choix du site, la sélection des signaux, l'acquisition des données, l'étalonnage, la vérification des données, les cas de charges de mesure, la matrice de capture, le post-traitement, la détermination de l'incertitude et les rapports d'essai. Des annexes informatives sont également fournies pour améliorer la compréhension des méthodes d'essai.

Les méthodes décrites dans le présent document peuvent également être utilisées pour les mesurages des charges mécaniques à d'autres fins telles que l'obtention d'une représentation statistique mesurée des charges, des mesurages directs des charges pour la conception, les essais relatifs à la sécurité et au fonctionnement ou le mesurage des charges des composants. Lorsque ces méthodes sont utilisées pour un autre objectif ou pour un modèle d'éolienne non classique, il convient d'évaluer les signaux, cas de charges de mesure, matrice de capture et méthodes de post-traitement exigés, et de les ajuster, si nécessaire, pour répondre à cet objectif.

Ces méthodes sont destinées aux éoliennes à axe horizontal (EAH) productrices d'électricité sur terre, avec des surfaces balayées par le rotor supérieures à 200 m<sup>2</sup>. Toutefois, les méthodes décrites peuvent être applicables à d'autres éoliennes (par exemple, petites éoliennes, éoliennes carénées, éoliennes à axe vertical).

#### 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 sur <<http://www.electropedia.org/>>)

IEC 61400-1:2005, *Wind turbines – Part 1: Design requirements* (disponible en anglais seulement)

IEC 61400-12-1, *Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines* (disponible en anglais seulement)

ISO/IEC Guide 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*