

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Wind energy generation systems –

Part 50-1: Wind measurement – Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments

Systèmes de génération d'énergie éolienne

Partie 50-1: Mesurages du vent – Application d'instruments météorologiques montés sur mât, nacelle et nez de rotor



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2022 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Wind energy generation systems –
Part 50-1: Wind measurement – Application of meteorological mast, nacelle and
spinner mounted instruments**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne
Partie 50-1: Mesurages du vent – Application d'instruments météorologiques
montés sur mât, nacelle et nez de rotor**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-5937-5

**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.....	6
INTRODUCTION.....	8
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Terms and definitions	10
4 Symbols, units and abbreviated terms	11
5 General	16
6 Classification of cup and sonic anemometry	16
6.1 General.....	16
6.2 Classification classes.....	17
6.3 Influence parameter ranges	17
6.4 Classification of cup and sonic anemometers	17
6.5 Reporting format	19
7 Assessment of cup and sonic anemometry	19
7.1 General.....	19
7.2 Measurements of anemometer characteristics	19
7.2.1 Measurements in a wind tunnel for tilt angular response characteristics of cup anemometers	19
7.2.2 Wind tunnel measurements of directional characteristics of cup anemometers.....	21
7.2.3 Wind tunnel measurements of cup anemometer rotor torque characteristics	21
7.2.4 Wind tunnel measurements of step responses of cup anemometers	22
7.2.5 Measurement of temperature induced effects on anemometer performance	23
7.2.6 Wind tunnel measurements of directional characteristics of sonic anemometers.....	24
7.3 A cup anemometer classification method based on wind tunnel and laboratory tests and cup anemometer modelling	25
7.3.1 Method.....	25
7.3.2 Example of a cup anemometer model	25
7.4 A sonic anemometer classification method based on wind tunnel tests and sonic anemometer modelling.....	32
7.5 Free field comparison measurements.....	32
8 Wind tunnel calibration procedure for anemometers	32
8.1 General requirements	32
8.2 Requirements for the wind tunnel.....	33
8.3 Instrumentation and calibration setup requirements	35
8.4 Calibration procedure.....	35
8.4.1 General procedure for cup and sonic anemometers	35
8.4.2 Procedure for the calibration of sonic anemometers.....	36
8.4.3 Determination of the wind speed at the anemometer position	36
8.5 Data analysis	37
8.6 Uncertainty analysis.....	37
8.7 Reporting format	38
8.8 Example uncertainty calculation.....	39

9	In-situ comparison of anemometers	42
9.1	General.....	42
9.2	Prerequisite	42
9.3	Analysis method	42
9.4	Evaluation criteria	43
10	Mounting of instruments on the meteorological mast.....	45
10.1	General.....	45
10.2	Single top-mounted anemometer.....	46
10.3	Side-by-side top-mounted anemometers	47
10.4	Side-mounted instruments	49
10.4.1	General	49
10.4.2	Tubular meteorological masts	49
10.4.3	Lattice meteorological masts	51
10.4.4	Flow distortion correction of side-mounted anemometers.....	56
10.5	Lightning protection	56
10.6	Mounting of other meteorological instruments	56
10.7	Data acquisition system	57
11	Uncertainty of wind speed measurement	57
11.1	Category B uncertainties: Wind speed – Introduction	57
11.2	Category B uncertainties: Wind speed – Hardware.....	57
11.3	Category B uncertainties: Wind speed – Meteorological mast mounted sensors.....	57
11.3.1	General	57
11.3.2	Pre-calibration	58
11.3.3	Post-calibration	58
11.3.4	Classification	58
11.3.5	Mounting	59
11.3.6	Lightning finial	60
11.3.7	Data acquisition.....	60
11.4	Category B uncertainties: Method – Cold climate	60
11.5	Combining uncertainties.....	60
11.5.1	General	60
11.5.2	Combining uncertainties in the wind speed measurement ($u_{V,i}$).....	61
11.5.3	Combining uncertainties in the wind speed measurement from cup or sonic anemometer ($u_{VS,i}$)	61
12	Reporting.....	61
Annex A	(informative) Wind tunnel calibration procedure for wind direction sensors.....	63
A.1	General requirements	63
A.2	Requirements of the wind tunnel	63
A.3	Instrumentation and calibration setup requirements	64
A.4	Calibration procedure.....	65
A.5	Data analysis	66
A.6	Uncertainty analysis.....	66
A.7	Reporting format.....	67
A.8	Example of uncertainty calculation	68
A.8.1	General	68
A.8.2	Measurement uncertainties generated by determination of the flow direction in the wind tunnel	68

A.8.3	Uncertainty contribution by uncertainties in the determination of the geometrical centreline α_{CL} (wind tunnel centreline)	68
A.8.4	Contribution by uncertainties in the determination of flow direction α_{dir}	68
Annex B (informative)	Mast flow distortion correction for lattice masts	73
Annex C (informative)	Nacelle instrument mounting	76
C.1	General.....	76
C.2	Preferred method of anemometer's mounting	76
C.3	Preferred position of anemometer	76
Annex D (informative)	Spinner anemometers	78
Bibliography		79
Figure 1	Tilt angular response $V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$ of a cup anemometer as a function of flow angle α compared to cosine response	21
Figure 2	Wind tunnel torque measurements $Q_A - Q_F$ as a function of angular speed ω of a cup anemometer rotor at 8 m/s	22
Figure 3	Example of bearing friction torque Q_F as function of temperature for a range of angular speeds ω	24
Figure 4	Example of rotor torque coefficient C_{QA} as a function of speed ratio λ derived from step responses with κ_{low} equal to -5,5 and κ_{high} equal to -6,5	27
Figure 5	Classification deviations of example cup anemometer showing a class 1,69A (upper) and a class 6,56B (lower)	30
Figure 6	Classification deviations of example cup anemometer showing a class 8,01C (upper) and a class 9,94D (lower)	31
Figure 7	Definition of volume for flow uniformity test	34
Figure 8	Example valid control anemometer direction sector for a single top-mounted anemometer on a triangular lattice meteorological mast.....	44
Figure 9	Example valid control anemometer direction sector for a single top-mounted anemometer on a tubular meteorological mast.....	45
Figure 10	Example of a top-mounted anemometer and requirements for mounting	47
Figure 11	Example of alternative top-mounted primary and control anemometers positioned side-by-side and wind vane and other instruments on the boom.....	48
Figure 12	Iso-speed plot of local flow speed around a cylindrical meteorological mast	50
Figure 13	Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a tubular meteorological mast and meteorological mast diameter d	51
Figure 14	Representation of a three-legged lattice meteorological mast.....	51
Figure 15	Iso-speed plot of local flow speed around a triangular lattice meteorological mast with a C_T of 0,5	52
Figure 16	Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a triangular lattice meteorological mast of leg distance L_m for various C_T values.....	53
Figure 17	3D CFD derived flow distortion for two different wind directions around a triangular lattice meteorological mast ($C_T = 0,27$)	55
Figure A.1	Example of calibration setup of a wind direction sensor in a wind tunnel.....	65
Figure B.1	Example of mast flow distortion	73
Figure B.2	Flow distortion residuals versus wind direction.....	75
Figure C.1	Mounting of anemometer on top of nacelle	77

Table 1 – Influence parameter ranges (10 min averages) of classes A, B, C, D and S.....	18
Table 2 – Tilt angle response of example cup anemometer	28
Table 3 – Friction coefficients of example cup anemometer	29
Table 4 – Miscellaneous data related to classification of example cup anemometer	29
Table 5 – Example of evaluation of anemometer calibration uncertainty.....	39
Table 6 – Estimation method for C_T for various types of lattice mast.....	54
Table A.1 – Uncertainty contributions in wind directions sensor calibration	71
Table A.2 – Uncertainty contributions and total standard uncertainty in wind direction sensor calibration	72

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-1:2022

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

Part 50-1: Wind measurement – Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments

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.

IEC 61400-50-1 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind energy generation systems. It is an International Standard.

This first edition of IEC 61400-50-1 is part of a structural revision that cancels and replaces the performance standards IEC 61400-12-1:2017 and IEC 61400-12-2:2013. The structural revision contains no technical changes with respect to IEC 61400-12-1:2017 and IEC 61400-12-2:2013, but the parts that relate to wind measurements, measurement of site calibration and assessment of obstacle and terrain have been extracted into separate standards.

The purpose of the re-structure was to allow the future management and revision of the power performance standards to be carried out more efficiently in terms of time and cost and to provide a more logical division of the wind measurement requirements into a series of separate standards which could be referred to by other use case standards in the IEC 61400 series and subsequently maintained and developed by appropriate experts.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
88/902/FDIS	88/916/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/standardsdev/publications.

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

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

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

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

INTRODUCTION

This part of IEC 61400 specifies procedures and methods which ensure that wind measurements using cup or sonic anemometers mounted on meteorological masts or wind turbine nacelles/spinners are carried out and reported consistently and in accordance with best practice. This document does not define the purpose or use case of the wind measurements. However, as this document forms part of the IEC 61400 series of standards, it is anticipated that the wind measurements carried out in accordance with this standard will be used in relation to some form of wind energy testing or resource assessment.

The main clauses of this document are not mutually dependent. Therefore, it is possible that a user will refer to only certain of the main clauses rather than all clauses to adapt this document to their specific use case. However, the main clauses are presented in a logical sequence that could be applied in practice.

The technical content of this document could previously be found in IEC 61400-12-1:2017 and IEC 61400-12-2:2013.

NOTE A technical correction to the value of the tolerance of the anemometer mounting tube has been made in 10.2.

Due to the increasing complexity of these source documents, IEC TC 88 decided that a re-structuring of the IEC 61400-12 series of standards into a number of more specific parts would allow more efficient management and maintenance going forward. This document has been created as part of that re-structuring process. The requirements on wind measurement specific to the use cases described in IEC 61400-12-1:2017 and IEC 61400-12-2:2013 (for example, the required location of the meteorological mast relative to the test turbine and the height of wind measurement relative to hub height) remain within the new editions of IEC 61400-12-1 and IEC 61400-12-2.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-1:2022

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

Part 50-1: Wind measurement – Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments

1 Scope

IEC 61400-50 specifies methods and requirements for the application of instruments to measure wind speed (and related parameters, e.g. wind direction, turbulence intensity). Such measurements are required as an input to some of the evaluation and testing procedures for wind energy and wind turbine technology (e.g. resource evaluation and turbine performance testing) described by other standards in the IEC 61400 series. This document is applicable specifically to the use of wind measurement instruments mounted on meteorological masts, turbine nacelles or turbine spinners which measure the wind at the location at which the instruments are mounted. This document excludes remote sensing devices which measure the wind at some location distant from the location at which the instrument is mounted (e.g. vertical profile or forward facing lidars). This document specifies the following:

- a) the classification parameters for cup and sonic anemometers such that the uncertainty in wind speed measurement for a specific type and model of anemometer exposed to a certain class of environmental conditions can be assessed;
- b) the procedure and requirements for classifying cup and sonic anemometers as, for example, part of the type testing of a specific anemometer model and type;
- c) the procedures and requirements for wind tunnel calibration of anemometers;
- d) an additional or alternative method of checking the consistency of the calibration of an anemometer in the field by carrying out an in-situ comparison with another anemometer;
- e) the requirements for the mounting of anemometers and other instruments on meteorological masts;
- f) the assessment of wind speed measurement uncertainty;
- g) reporting requirements.

2 Normative references

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

ISO 2533:1975, *Standard atmosphere*

ISO 3966, *Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

3 Terms and definitions

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

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>

3.1

accuracy

closeness of the agreement between the result of a measurement and a true value of the measurand

3.2

data set

collection of data sampled over a continuous period

3.3

distance constant

indication of the response time of an anemometer, defined as the length of air that shall pass the instrument for it to indicate 63 % of the final value for a step input in wind speed

3.4

flow distortion

change in air flow caused by obstacles, topographical variations, or other wind turbines that results in the wind speed at the measurement location being different from the wind speed at the wind turbine location

3.5

hub height

<of a wind turbine> height of the centre of the swept area of the wind turbine rotor above the ground at the tower

Note 1 to entry: For a vertical axis wind turbine the hub height is defined as the height of the centroid of the swept area of the rotor above the ground at the tower.

3.6

measurement period

period during which a statistically significant database has been collected for the use case

Note 1 to entry: A power performance test is an example of a use case.

3.7

measurement sector

sector of wind directions from which data are selected for the use case

Note 1 to entry: A measured power curve is an example of a use case.

3.8

obstacle

obstruction that blocks the wind and creates distortion of the flow

Note 1 to entry: Buildings and trees are examples of obstacles.

3.9

power performance

measure of the capability of a wind turbine to produce electric power and energy

3.10**standard uncertainty**

uncertainty of the result of a measurement expressed as a standard deviation

3.11**wind measurement equipment**

meteorological mast-mounted instruments or remote sensing device

3.12**wind shear**

change of wind speed with height

3.13**wind shear exponent**

α

exponent of the power law defining the variation of wind speed with height

Note 1 to entry: This parameter is used as a measure of the magnitude of wind shear and can be otherwise useful. The power law equation is:

$$v_{zi} = v_h \left(\frac{z_i}{H} \right)^\alpha \quad (1)$$

where

v_h is the hub height wind speed;

H is the hub height (m);

v_{zi} is the wind speed at height z_i ;

α is the wind shear exponent.

4 Symbols, units and abbreviated terms

Symbol	Description	Unit
A	swept area of the wind turbine rotor	m ²
B	barometric pressure	Pa
$B_{10\text{min}}$	measured air pressure averaged over 10 min	Pa
C_h	pitot tube head coefficient	
C_{QA}	generalized aerodynamic torque coefficient	
C_T	thrust coefficient	
c	sensitivity factor of a parameter (the partial differential)	
$c_{B,i}$	sensitivity factor of air pressure in bin i	W/Pa
$c_{d,i}$	sensitivity factor of data acquisition system in bin i	
c_{index}	sensitivity factor of index parameter	
$c_{k,i}$	sensitivity factor of component k in bin i	
$c_{T,i}$	sensitivity factor of air temperature in bin i	W/K
$c_{V,i}$	sensitivity factor of wind speed in bin i	Ws/m
$c_{\rho,i}$	sensitivity factor of air density correction in bin i	Wm ³ /kg

Symbol	Description	Unit
d	meteorological mast diameter	m
e	eccentricity	
$F(V)$	Rayleigh cumulative probability distribution function for wind speed	
$F_{a,\gamma}(a,\gamma, \bar{U})$	tilt and yaw response function for the sonic anemometer	
$f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$	correction function due to interference between the anemometer including its mounting tube and the wind tunnel flow	
H	hub height of wind turbine	m
h	height of obstacle	m
I	inertia of cup anemometer rotor	kg·m ²
$K_{B,t}$	barometer sensitivity	N/m ² V
$K_{B,s}$	barometer gain	
$K_{B,d}$	barometer sampling conversion	
$K_{T,t}$	temperature transducer sensitivity	K/A
$K_{T,s}$	temperature transducer gain	A/V
$K_{T,d}$	temperature transducer sampling conversion	
$K_{p,t}$	pressure transducer sensitivity	
$K_{p,s}$	pressure transducer gain	
$K_{p,d}$	pressure transducer sampling conversion	
k	class number	
k_b	blockage correction factor	
k_c	wind tunnel calibration factor	
k_f	wind tunnel correction factor to other tunnels (only used in uncertainty estimate)	
k_i	correction factor due to interference between the anemometer (including mounting tube) and test section enclosure, also including flow effects due to mounting tubes extending through the enclosure	
k_n	class number of anemometer sample number n ($n = 1, \dots, 5$ or more)	
k_p	correction factor due to interference caused by the anemometer (including mounting tube) on the velocity measured by the pitot tube	
k_ρ	humidity correction to density	
L_m	distance between adjacent legs of lattice meteorological mast	m
L	distance between the wind turbine and the wind measurement equipment	m
M	number of uncertainty components in each bin	
M_A	number of category A uncertainty components	
M_B	number of category B uncertainty components	
m	slope of the regression relating V_{control} to $V_{\text{primary_est}}$	

Symbol	Description	Unit
m	slope of the regression between V_1 and V_2	
N	number of bins	
N_h	number of hours in one year $\approx 8\,760$	h
N_i	number of 10 min data sets in wind speed bin i	
N_j	number of 10 min data sets in wind direction bin j	
n	number of samples within sampling interval	
n_h	number of available measurement heights	
P_w	vapour pressure	Pa
p	axial run-out deviation	
Q_A	aerodynamic torque	N·m
Q_F	friction torque	N·m
R	rotor radius	m
r_a	effective radius of angle measurement	
R_0	gas constant of dry air (287,05)	J/kg·K
R_d	distance to meteorological mast centre	m
R_w	gas constant of water vapour (461,5)	J/kg·K
REWS	rotor equivalent wind speed	
RSD	remote sensing device	
r	correlation coefficient	
s	category A standard uncertainty component	
s_A	category A standard uncertainty of tunnel wind speed time series	
$s_{k,i}$	category A standard uncertainty of component k in bin i	
s_i	combined category A uncertainties in bin i	
S	meteorological mast solidity	
T	absolute temperature	K
TI	turbulence intensity	
$T_{10\min}$	measured absolute air temperature averaged over 10 min	K
t	time	s
U	wind speed	m/s
U_d	centreline wind speed deficit	m/s
U_{eq}	equivalent horizontal wind speed	m/s
U_i	wind speed in bin i	m/s
U_j	wind speed in bin j	
U_{sonic}	sonic anemometer	
U_t	threshold wind speed	m/s
$\vec{U}$	instantaneous wind vector	
u	category B standard uncertainty component	

Symbol	Description	Unit
$u_{B,i}$	category B standard uncertainty of air pressure in bin i	Pa
$u_{c,i}$	combined standard uncertainty of the power in bin i	W
$u_{dVS,i}$	uncertainty component of data acquisition of the wind speed signal	
u_i	combined category B uncertainties in bin i	
u_{index}	category B standard uncertainty of index parameter	
$u_{k,i}$	category B standard uncertainty of component k in bin i	
$u_{M,cc,i}$	influence of measurement in cold climate on the classification of the anemometers	
$u_{V,i}$	category B standard uncertainty of wind speed in bin i	m/s
$u_{VHW,i}$	uncertainty on the hardware used and is one of $u_{VS,i}$, $u_{VR,i}$ or $u_{REWS,i}$	
$u_{VM,i}$	uncertainty related to the method applied	
$u_{VS,class,i}$	uncertainty related to the classification of the sensors	
$u_{VS,igt,i}$	uncertainty related to the flow distortion from lightning finial	
$u_{VS,mnt,i}$	uncertainty related to the mounting of the sensors	
$u_{VS,prec,cal,i}$	uncertainty relating to the pre-calibration	
$u_{VS,postcal,i}$	uncertainty related to the post-calibration	
$u_{v2,i}$	wind speed uncertainty assessment	
$u(t)$	measured wind speed by the cup anemometer at time t using the ordinary calibration function	
u_t	tunnel wind speed	
Δu	difference between wind tunnel wind speed and the indicated wind speed of the cup anemometer, at the beginning of the step response measurement, at time t_0	
V	wind speed	m/s
V_{ave}	annual average wind speed at hub height	m/s
V_{control}	wind speed of the control anemometer	
$V_{\text{control},i}$	wind speed of the control anemometer in bin i	
V_i	normalized and averaged wind speed in bin i	m/s
V_n	normalized wind speed	m/s
$V_{n,i,j}$	normalized wind speed of data set j in bin i	m/s
$V_{\text{primary},i}$	wind speed of the primary anemometer in bin i	
$V_{\text{primary_est}}$	estimated primary anemometer wind speed	
$V_{10\text{min}}$	measured wind speed averaged over 10 min	m/s
V_1	wind speed from sensor one	
V_2	wind speed from the second sensor	
v	transversal wind speed component	m/s

Symbol	Description	Unit
$\bar{v}$	average wind speed at the anemometer position	m/s
$\bar{v}_p$	average wind speed at the reference position	
v_{eq}	measured equivalent wind speed	m/s
WD	wind direction	
WME	wind measurement equipment	
w	vertical wind speed component	m/s
w_i	weighting function to define deviation envelope	
α	wind shear exponent from power law	
α	pitot static tube head coefficient	
α	angle to be measured (calibration value)	
α_{CL}	wind tunnel centreline	
$\alpha_{Digital}$	uncertainty by digital output signal	
α_{dir}	uncertainties in the determination of flow direction	
$\alpha_{incl.1}$	influence of the angle between the axes of rotation	
α_{item}	uncertainty by mounting the wind direction sensor	
$\alpha_{incl.2}$	uncertainty by possible malposition of the wind direction sensor	
α_{sensor}	uncertainties in the calibration of the reference yawing sensor	
α_{set}	aligning the centreline with the north marking of the wind direction sensor	
α_{Ω}	uncertainty by the determination of the ohmic resistance of a wind direction sensor	
ε_i	deviation in m/s for influence parameter combination i	
$\varepsilon_{max,i}$	maximum deviation for any wind speed bin i in the wind speed range	m/s
θ	disturbed sector	°
κ	von Karman constant 0,4	
λ	speed ratio	
λ_0	speed ratio for $C_{QA} = 0$	
ρ	air density	kg/m ³
τ	the time constant to be determined for the step response (τ_{low} for step response from below and τ_{high} for step response from above)	
ρ_0	reference air density	kg/m ³
ρ_{10min}	derived air density averaged over 10 min	kg/m ³
$\sigma_{P,i}$	standard deviation of the normalized power data in bin i	W
σ_{10min}	standard deviation of parameter averaged over 10 min	
$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	standard deviations of longitudinal/transversal/vertical wind speeds	
Φ	relative humidity (range 0 % to 100 %)	

Symbol	Description	Unit
ω	angular speed	s^{-1}
Δp_{ref}	mean differential pressure	

5 General

This document defines methods and requirements for carrying out wind measurements using instruments such as anemometers (cup and ultrasonic) mounted on meteorological masts, wind turbine nacelles (Annex C) and wind turbine spinners (Annex D). Requirements for calibration, classification and mounting are described. Wind measurements carried out in accordance with this document are useable for many purposes in the field of wind energy (e.g. power performance measurement, site assessment, load measurement, noise measurement) as described in other standards in the IEC 61400 series. The specific standard relating to the intended use case of the wind measurements should be referred to for limitations and additional requirements (e.g. height of measurement relative to turbine hub height in the case of power performance measurements). For wind measurements carried out using ground-mounted remote sensing devices (e.g. lidar and sodar), refer to IEC 61400-50-2 [1]¹. Although the wind measurements defined in this document relate mainly to the measurement of wind speed, an example of a procedure defining the calibration of wind direction sensors is provided in Annex A.

6 Classification of cup and sonic anemometry

6.1 General

Cup and sonic anemometers are wind measurement instruments that can be used in a wide range of wind energy related measurements. In order to transfer traceability they shall be calibrated in a wind tunnel in accordance with Clause 8. Wind tunnel calibrations are performed under controlled environmental conditions with a smooth and low turbulent flow. However, during measurements and operation in the field, these instruments are subject to turbulent flow and environmental conditions that can deviate significantly from wind tunnel calibration conditions. The field conditions can significantly influence the instrument characteristics and cause the instrument output to deviate from wind tunnel calibrations. If the ranges of the influence parameters during field operation are determined, then the systematic deviations can be analysed and the deviations in instrument output can be put into a classification scheme.

Known influence parameters on cup anemometer measurements are turbulence, air temperature, air density, and average upflow angle. Known influence parameters on sonic anemometer measurements are wind direction, upflow angle, and air temperature. These influence parameters shall be considered in the classification. Other environmental parameters can influence the instruments. If such influence parameters are known to give systematic deviations, the influence shall be analysed and included in the classification scheme. Furthermore, the combined effect of all influence parameters shall be assessed. The systematic deviations due to influence parameters shall be analysed in accordance with the procedures described in Clause 7 resulting in a classification specification of the type of anemometer. At least five samples of the anemometer type shall be assessed. Modification of an anemometer type that can influence the output requires a new assessment. Change in geometry of the anemometer type, measurement principle, software algorithm for calculation of the output, software settings, or supporting structure geometry, requires a new assessment.

The classification method only considers normal operation of the sensors. The method does not consider, for example, wear, malfunctioning or icing.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

6.2 Classification classes

The classification of an anemometer type is divided into five classes dependent on the purpose. Classes A, B, C and D are based on predefined terrain and climate ranges, see Table 1. Classes A and C shall be used for terrain that meets the requirements in IEC 61400-12-5 and in type A terrain in IEC 61400-12-3. Classes B and D shall be used for terrain that does not meet the requirements in IEC 61400-12-5. Classes B and D could be used in terrain type B in IEC 61400-12-3. If information about the influence parameter ranges during the measurements are available then class S may be used.

Class S is a special class, where the influence parameter ranges may be defined by the user, see Table 1. This can be for a special climate, for example cold climate conditions. Class S can also be used for uncertainty estimate for a measurement campaign where the influence parameter ranges are determined during the measurements. Class S may be used for measurements in type A, B and C terrain, see IEC 61400-12-3. The classification number k shall be used in determination of the wind speed operational characteristics uncertainty, as listed in 11.3.4. IEC 61400-12-5 provides an assessment of the terrain to evaluate if the flow distortion due to the terrain will be significant. For classification of cup and sonic anemometers, this terrain assessment supports the definition of the classification classes A, B, C and D.

Class A: Associated with terrain that meets the requirements of IEC 61400-12-5 and with general influence parameter ranges for this type of terrain.

Class B: Associated with terrain that does not meet the requirements of IEC 61400-12-5 and with general influence parameter ranges for this type of terrain.

Class C: Same as class A but with temperatures down to -20 °C .

Class D: Same as class B but with temperatures down to -20 °C .

For terrain or climate that deviates from classes A to D, a class S climate may be specified.

Class S: Associated with conditions that deviate from class A, B, C or D. In this class, the user defines the influence parameter ranges. This may be due to special or user defined terrain or climate conditions.

6.3 Influence parameter ranges

The minimum required influence parameter ranges of cup and sonic anemometer classification are listed in Table 1.

6.4 Classification of cup and sonic anemometers

The classification of an anemometer is specified by the amount of systematic deviations from calibrated values (calibration in accordance with Clause 8) where the systematic deviations are determined for values varying within the influence parameter ranges. For a sonic anemometer and for directional sensitive cup anemometers, a reference direction that is used for calibrations in accordance with Clause 8 shall be defined for the instrument type. The systematic deviations shall be derived for all values that are relevant for the class determination between minimum and maximum values for each parameter. The class number k_n of an anemometer sample number n shall be determined as the maximum systematic deviation from the wind tunnel calibration value, weighted with a wind speed function ε_i :

$$k_n = 100 \cdot \max |\varepsilon_i / w_i| \quad (2)$$

where

k_n is the class number of anemometer sample number n ($n = 1, \dots, 5$ or more);

w_i is a weighting function in m/s that defines the deviation envelope, see Equation (3);

ε_i is the deviation in m/s for influence parameter combination i .

NOTE A class number of 1 corresponds to 1 % at 10 m/s but more than 1 % below 10 m/s and less than 1 % above 10 m/s.

The weighting function w_i averages the influence of absolute and relative deviations:

$$w_i = 5 \text{ m/s} + 0,5 \cdot U_i \quad (3)$$

where

U_i is the wind speed in m/s for influence parameter combination i .

Table 1 – Influence parameter ranges (10 min averages) of classes A, B, C, D and S

Parameter	Class A Terrain meets requirements in IEC 61400-12-5 Range	Class B Terrain does not meet requirements in IEC 61400-12-5 Range	Class C Terrain meets requirements in IEC 61400-12-5 Range	Class D Terrain does not meet requirements in IEC 61400-12-5 Range	Class S ^a Special class with user defined ranges Range
Wind speed, V (m/s)	4 to 16	4 to 16	4 to 16	4 to 16	4 to 16
Turbulence intensity	0,03 to (0,12 + 0,48/ V)	0,03 to (0,12 + 0,96/ V)	0,03 to (0,12 + 0,48/ V)	0,03 to (0,12 + 0,96/ V)	User defined
Turbulence ^b structure $\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	1/0,8/0,5 ^c	1/0,8/0,5 ^c	1/0,8/0,5 ^c	1/0,8/0,5 ^c	User defined or 1/0,8/0,5 ^c
Air temperature (°C)	0 to 40	–10 to 40	–20 to 40	–20 to 40	User defined
Air density (kg/m ³)	0,9 to 1,35	0,9 to 1,35	0,9 to 1,35	0,9 to 1,35	User defined
Average upflow angle (°)	–3 to 3	–15 to 15	–3 to 3	–15 to 15	User defined
Wind direction ^d (°)	Cups and sonics: 0 to 360°	Cups and sonics: 0 to 360°	Cups and sonics: 0 to 360°	Cups and sonics: 0 to 360°	Cups: 0 to 360° Sonics: user defined

^a The influence parameter ranges determined during a specific measurement campaign include some parameters that are measured as part of the measurement: wind speed, turbulence, air temperature, air density. The upflow angle can be determined by mounting a bi-vane or three-dimensional sonic anemometer on the meteorology mast.

^b For generation of artificial wind, see for example 7.4.

^c A non-isotropic Kaimal turbulence spectrum with turbulence length scale 350 m.

^d If a cup anemometer is directionally sensitive (should be investigated on at least one sample), then directivity shall be included in the classification. For sonic anemometers directivity shall always be included in the classification, but for class S the wind direction range may be defined by the user.

For the five anemometer samples being tested for classification, the class is determined by the average of the k values plus half the range divided by $\sqrt{3}$ assuming a rectangular distribution (see Equation (4)).

$$k = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 k_n + \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

A classification, referring to a certain class, is expressed by kA , kB or kS , for example 1,7A or 2,5S. The operational characteristics standard uncertainty (see 11.3.4) of a cup or sonic anemometer can be derived from the classification assuming a rectangular uncertainty distribution, in which case the standard uncertainty to be used in the wind speed uncertainty assessment is:

$$u_{v2,j} = (0,05 \text{ m/s} + 0,005 \cdot U_j) \cdot k / \sqrt{3} \quad (5)$$

An example of a classification is described in Clause 7.

6.5 Reporting format

Reporting of the classification of the wind speed sensor shall specify all relevant details of the sensor, including all settings. Documentation of the class of a sonic anemometer shall specify the programmed configuration for which the classification is valid.

Relevant documentation shall be provided with detailed information on the procedures followed, the measurements performed as background for the classification, and documentation of the facilities and instruments used.

7 Assessment of cup and sonic anemometry

7.1 General

Assessment of anemometry for classification shall be derived from traceable wind tunnel tests, other laboratory tests and associated modelling of anemometer characteristics. A thorough assessment method should also include verification field tests.

An assessment of a type of cup or sonic anemometer shall include verified procedures to determine the influence of the following basic characteristics (also note Table 1):

- a) tilt angular response characteristics;
- b) yaw angular response characteristics;
- c) temperature induced effects on the anemometer performance.

Additionally, for cup anemometers the following characteristics shall be assessed:

- d) dynamic effects due to rotor torque characteristics.

Subclause 7.2 describes procedures for measuring anemometer characteristics. Subclause 7.3 describes a method for classification of cup anemometers with an example and 7.4 describes a method for classification of sonic anemometers. An actual assessment shall be based on the methodologies in 7.3 and 7.4, but could also be based on other assessment methods, as long as they include verified procedures to incorporate the influence of the parameters in Table 1. Subclause 7.5 presents a method for field comparison of anemometers.

7.2 Measurements of anemometer characteristics

7.2.1 Measurements in a wind tunnel for tilt angular response characteristics of cup anemometers

The tilt angular response is the measured wind speed at inclined flow angles relative to the measured wind speed at non-inclined flow. The tilt angular response of a cup anemometer shall be measured in a wind tunnel that fulfils the requirements described in Clause 8. Additionally, it shall be documented that the wind tunnel is sufficient in height for obtaining accurate tilt response characteristics.

The behaviour of an anemometer is strongly influenced by the free space around and especially underneath and above the anemometer. It is important that the tilting mechanism is designed in such a way that the centre of the sensing part of the anemometer is fixed but free to rotate, and the bottom plate of the wind tunnel shall be closed in order to prevent adverse flow effects. Therefore, no translatory motion can be performed by the rotor, instead only an inclination of the rotor plane is realized.

The tilt angle response may be measured with two alternative methods, one using a sweep and the other using fixed positions.

The determination of the anemometer's response to quasi-statically inclined flow should be performed with the help of an automatic tilt angle device installed in the wind tunnel. During the measurements, the anemometer is slowly tilted back and forth with a very slow sweep rate (less than $0,05^\circ/\text{s}$) so the influence on the results due to the angular speed can be neglected. Sweeps may only be used if the wind speed in the wind tunnel is kept within 0,5 % of the nominal wind speed for all tilt angles.

At non-inclined flow the tilt angle shall be fixed and measurements shall be performed for 300 seconds to ensure that sufficient data is collected for the zero bin ($\pm 0,5^\circ$). This zero bin data is used for normalization of the tilt angular response.

Recording of tilt angle, wind tunnel wind speed and anemometer output shall be made simultaneously and averaged. It can be meaningful to incorporate a finer resolution of the bin-averaging algorithm to account for higher gradients in the tilt angle response around zero degrees.

The tilt angular response should alternatively be determined by stepwise fixed position measurements, where the response at each angle is determined by Clause 8 wind tunnel calibration at selected nominal wind speeds in the wind speed range.

Measurement matrix recommendations:

- a) definition of flow angle: positive for upwards flow on cup rotor;
- b) tilt angle range and steps: at least -30° to $+30^\circ$ (for example $\pm 0^\circ$, $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$, $\pm 3^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 6^\circ$, $\pm 8^\circ$, ..., $\pm 30^\circ$);
- c) wind speed range and steps: 4 m/s to 16 m/s (for example 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s and 16 m/s);
- d) bin averaging range for the sweep method: bin width max. 2° .

An example of tilt angular response (including the "ideal" cosine shape) is shown in Figure 1.

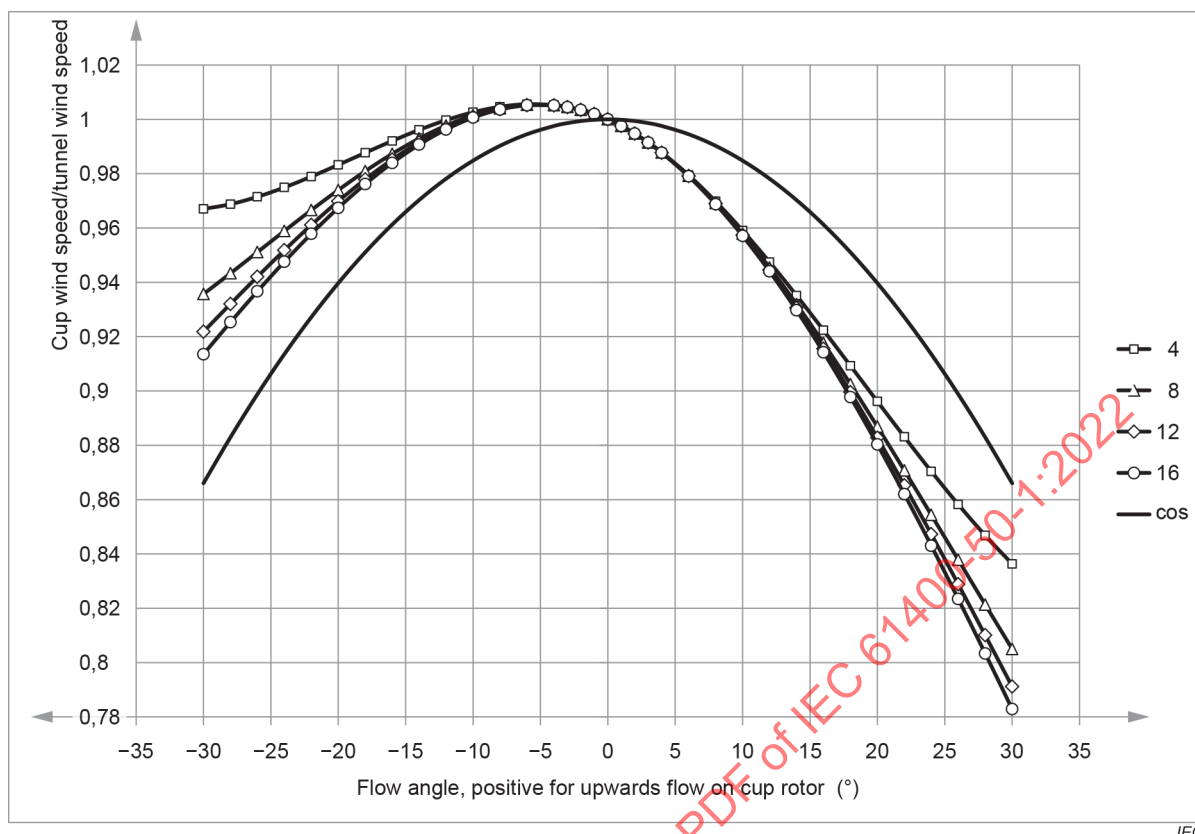


Figure 1 – Tilt angular response $V_\alpha/V_{\alpha=0}$ of a cup anemometer as a function of flow angle α compared to cosine response

7.2.2 Wind tunnel measurements of directional characteristics of cup anemometers

The design of certain cup anemometers (asymmetric housing shape, asymmetric cable entries, etc.) can have an adverse effect on the anemometer wind speed signal with respect to the horizontal flow direction and the reference direction used for calibration (yaw sensitivity). This effect is not desired since it usually cannot be corrected for. It can contribute substantially to the total uncertainty in the wind speed measurement. Yaw sensitivity measurements shall be conducted at wind speeds of 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s, and 16 m/s.

7.2.3 Wind tunnel measurements of cup anemometer rotor torque characteristics

The dynamic response of a cup anemometer to wind is governed by Equation (6), where I is the mass moment of inertia, ω is the angular velocity, t is time, Q_A is the aerodynamic rotor torque and Q_F is the torque due to friction (mainly in bearings).

$$I \frac{d\omega}{dt} = Q_A - Q_F \quad (6)$$

The net torque, $Q_A - Q_F$, on the cup anemometer rotor, and thus the rotor torque characteristics, can be measured in a wind tunnel.

The aerodynamic torque can be measured by forcing the rotor to turn at off-equilibrium specific angular speeds while measuring the torque with a torque sensor.

The aerodynamic rotor torque on the cup anemometer is equal to the reaction torque on the shaft, measured with the torque sensor, minus friction torque. Measurements close to the equilibrium angular speed should be very accurate and detailed. An example of a torque measurement, where the wind tunnel speed was kept constant at 8 m/s and the rotational speed of the rotor was varied, is shown in Figure 2.

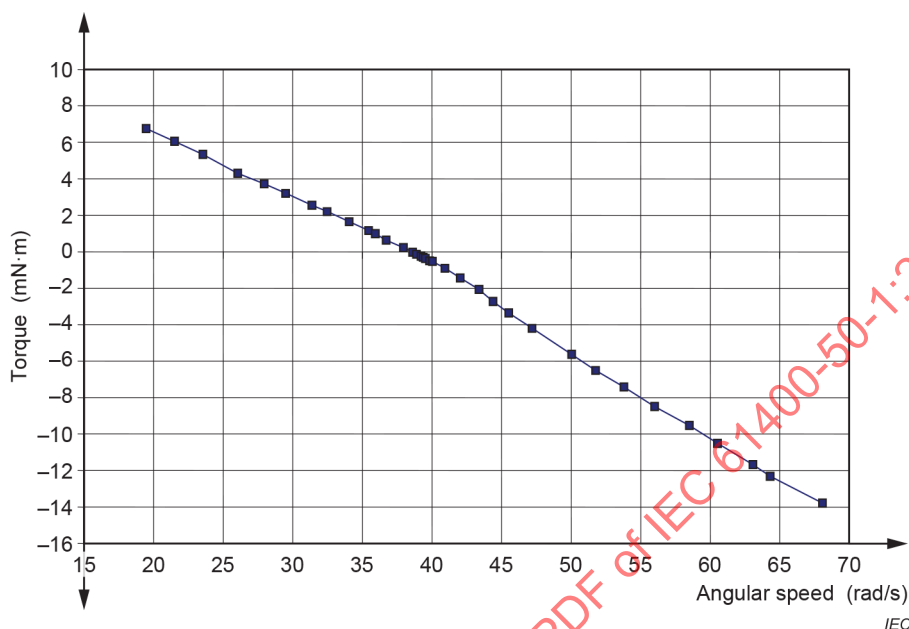


Figure 2 – Wind tunnel torque measurements $Q_A - Q_F$ as a function of angular speed ω of a cup anemometer rotor at 8 m/s

7.2.4 Wind tunnel measurements of step responses of cup anemometers

The rotor torque characteristics may alternatively be measured with a step response method in a wind tunnel. This method is less precise than the method in 7.2.3 because linear torque characteristics on either side of the equilibrium speed ratio (torque coefficient equal to zero, see 7.3.2) shall be assumed.

A step response is a method where a cup anemometer, in a wind tunnel of constant flow speed, is forced to an off-equilibrium rotational speed, above or below the equilibrium wind speed, where the recovery to equilibrium angular speed is monitored. The recovery region close to equilibrium is the important part of the recovery. It is recommended to use the data from the recovery region between 50 % and 98 % of the equilibrium rotor speed during the acceleration tests, and between 150 % and 102 % during the deceleration tests when fitting the torque coefficient lines.

The method to force the anemometer to operate off-equilibrium can be made by attaching a thin shaft to the top of the cup anemometer rotor, and extending it through a hole in the tunnel wall to a motor. The rotational speed is controlled by the motor, which is mechanically disengaged from the rotor when the measurement of the acceleration or deceleration is to start.

Alternatively, the off-equilibrium state can be achieved by applying one or more jets of compressed air to the one or the other side of the cup anemometer rotor. However, the upstream wind in the tunnel shall not be disturbed.

The off-equilibrium starting states should be well outside the rotational range for the analysis (50 % to 150 % of equilibrium rotor speed) to ensure the excitation device is not influencing the data used for fitting.

In case the torque characteristics can be expressed by a linear relationship on either side of torque equilibrium (torque equal to zero) then the step response can be expressed with Equation (7):

$$u(t) = u_t - \Delta u \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right) \quad (7)$$

where

- $u(t)$ is the measured wind speed by the cup anemometer at time t using the ordinary calibration function;
- u_t is the tunnel wind speed;
- Δu is the difference between wind tunnel wind speed and the indicated wind speed of the cup anemometer, at the beginning of the step response measurement, at time t_0 ;
- t is the time;
- τ is the time constant to be determined for the step response (τ_{low} for step response from below and τ_{high} for step response from above).

In fitting the data to the two unknown constants τ and t_0 , it is useful to reformulate equation and to use linear regression to determine the time constant τ :

$$\ln\left(\frac{u_t - u(t)}{\Delta u}\right) = \frac{t - t_0}{\tau} \quad (8)$$

An example of using the step response method results to determine the linear torque from the time constants is further described in 7.3.2.

7.2.5 Measurement of temperature induced effects on anemometer performance

7.2.5.1 General

Temperature induced effects influencing the anemometer performance shall be assessed.

7.2.5.2 Measurement of friction torque in a cup anemometer

The temperature dependent effects due to bearing friction shall be assessed by a flywheel test in a climate chamber [2].

Friction torque measurements shall be made by replacing the cup anemometer rotor with a flywheel, and by measuring the deceleration from a rotational speed corresponding to 20 m/s. There are two torques acting on the rotor: friction torque in the bearings and air friction torque on the flywheel (which shall be subtracted from the measured torque). There can be friction torque due to other causes than bearing friction, for example friction due to signal generation. Such torque shall be included in the friction torque measurements. The tests shall be performed at temperatures from -20 °C to $+40\text{ °C}$ at least with a 5 °C graduation. For each temperature, the friction can be expressed with a second order polynomial with three constants F_0 , F_1 and F_2 .

$$Q_F = F_0 + F_1\omega + F_2\omega^2 \quad (9)$$

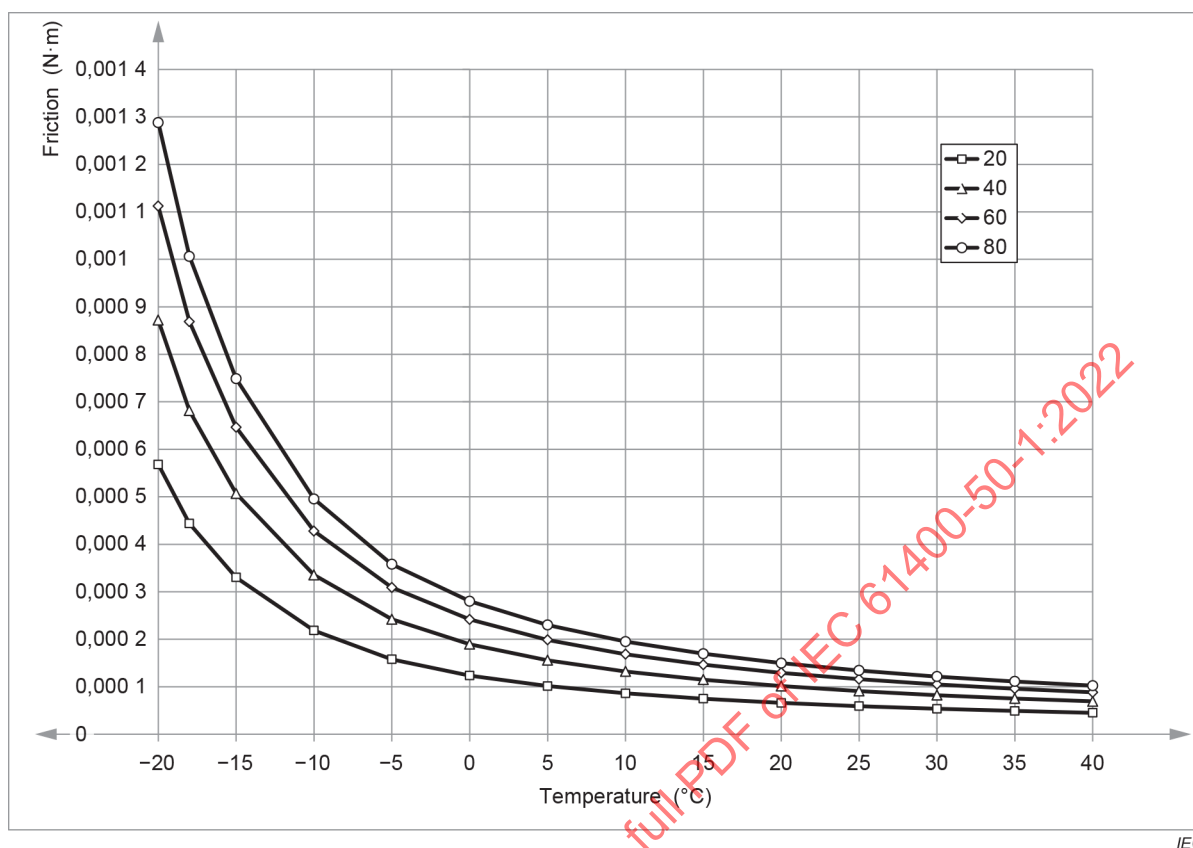


Figure 3 – Example of bearing friction torque Q_F as function of temperature for a range of angular speeds ω

7.2.5.3 Wind tunnel tests at different temperature and wind speeds

Influence of temperature effects on a whole anemometer (cup anemometers as well as sonic anemometers) can be verified with climate wind tunnel tests. The tests shall be performed at temperatures according to Table 1 from -20 °C to $+40\text{ °C}$ at a 5 °C graduation. The tests shall be conducted at 4 m/s , 8 m/s , 12 m/s and 16 m/s . The wind speed deviations from the standard calibration of the anemometer can then be determined. The findings of the wind tunnel tests shall not be biased by undesired effects (e.g. the accretion of rime upon the anemometer rotor). The results should be compared to simulated values calculated with the cup anemometer model in 7.3.2.

7.2.6 Wind tunnel measurements of directional characteristics of sonic anemometers

The directional influence on the output of sonic anemometers shall be measured in a wind tunnel that fulfils the requirements described in Clause 8.

The determination of the anemometer's response to quasi statically inclined and/or yawed air flow shall be performed with the help of an automatic tilt and yaw angle device installed in the wind tunnel. During the measurements, the anemometer is positioned in a fixed tilt angle. The yaw direction can be specified for fixed yaw positions with measurements for 30 s averages, or it can be yawed continuously with a sweep rate of about $1^\circ/\text{s}$.

NOTE The use of fixed yaw directions improves measurement accuracy while the use of a slow sweep rate method is an advantage to reveal the detailed changes that can occur.

The yawing shall be performed for the pre-defined measurement sector of the sonic anemometer. The tilt angle of the sonic anemometer shall be fixed for the following tilt angles: 0° , $\pm 2^\circ$, $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$. Tilt angles should be added or omitted if there is clear evidence that they are needed or unneeded. The measurements shall be performed for the wind speeds: 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s, and 16 m/s. For each direction the deviation of the indicated wind speed of the sonic anemometer from the ordinary calibration at the reference direction shall be derived.

7.3 A cup anemometer classification method based on wind tunnel and laboratory tests and cup anemometer modelling

7.3.1 Method

The classification method shall use an appropriate cup anemometer model to determine deviations due to influence parameters according to Table 1. The cup anemometer model shall be verified to be able to include all the influence parameters properly. The method shall be based on the wind tunnel and laboratory measurements described in 7.2. Furthermore, the method shall use an artificial wind generator in order to generate three-dimensional time domain input wind data for the cup anemometer model. The deviations ε_i shall be determined from the differences between the 10 min horizontal wind speed input averages from the artificial wind generator and the 10 min cup anemometer model response averages.

7.3.2 Example of a cup anemometer model

7.3.2.1 General

The example cup anemometer model is a physical model that simulates cup anemometer response in time domain, see references [2] and [3]. Some physical properties of the cup anemometer shall be measured and used throughout the assessment. These are: rotor inertia I , frontal area of one cup A and radius R from shaft centre to the centre of the cups.

The response of the cup anemometer to the three-dimensional wind shall be derived from a torque equilibrium differential equation, where the torque on the rotor consists of aerodynamic torque minus friction torque (right hand side of equation), see Equation (6).

From the differential equation the angular speed of the cup anemometer ω is found, and using the wind tunnel calibration values, the response from the resulting aerodynamic torque and friction torques due to wind variations is determined. The aerodynamic torque Q_A is a function of the instantaneous wind vector $\vec{U} = \{u, v, w\}$ as determined by the artificial wind generator. From the wind vector, the upflow angle and the scalar of the wind vector are determined:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) \quad (10)$$

$$|\vec{U}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (11)$$

An equivalent horizontal wind speed is found by multiplying the scalar of the wind vector with the angular response measured in wind tunnel for the instantaneous upflow angle:

$$U_{eq} = F_\alpha(\alpha, |\vec{U}|) \cdot |\vec{U}| \quad (12)$$

Here $F_\alpha(\alpha, |\vec{U}|)$ is the tilt angular response of the cup anemometer as shown in Figure 1.

The aerodynamic torque can be expressed by a generalized torque curve which has been verified to be valid for all wind speeds and all rotational speeds [2]:

$$Q_A = \frac{1}{2} \rho A R U_{eq}^2 C_{QA}(\lambda) \quad (13)$$

where

- ρ is the air density;
- A is the cup area of one cup;
- R is the radius to a cup;
- U_{eq} is the equivalent horizontal wind speed;
- C_{QA} is the generalized aerodynamic rotor torque coefficient.

The generalized aerodynamic rotor torque coefficient is derived from the wind tunnel torque measurements in 7.2.3 or 7.2.4, where U_{eq} in this case is substituted by the tunnel wind speed:

$$C_{QA} = C_{QA}(\lambda) = \frac{Q_Q}{\frac{1}{2} \rho A R U_{eq}^2} \quad (14)$$

The generalized aerodynamic rotor torque coefficient is a function of the speed ratio:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_{eq} - U_t} \quad (15)$$

where

U_t is a threshold wind speed (derived as the remaining calibration offset when the friction influence has been subtracted; if friction is zero the threshold wind speed is equal to the calibration offset).

In case the rotor torque coefficient can be characterized by two linear curves on either side of the torque equilibrium then two corresponding time constants can be determined by wind tunnel step response measurements, see 7.2.4 and [4]. The linear torque characteristics can then be determined from the τ values, for low- and high-speed ratios, from Equation (16):

$$\kappa = -\frac{2I(u_0 + \Delta u - U_t)}{\rho A R^2 (u_0 + \Delta u)^2 \tau} \quad (16)$$

The generalized aerodynamic rotor torque coefficient can then be expressed by:

$$\text{for } \lambda \leq \lambda_0 : C_{QA} = \kappa_{low}(\lambda - \lambda_0) \text{ and for } \lambda > \lambda_0 : C_{QA} = \kappa_{high}(\lambda - \lambda_0) \quad (17)$$

where

λ_0 is the speed ratio for $C_{QA} = 0$.

An example of the rotor torque coefficient is shown in Figure 4.

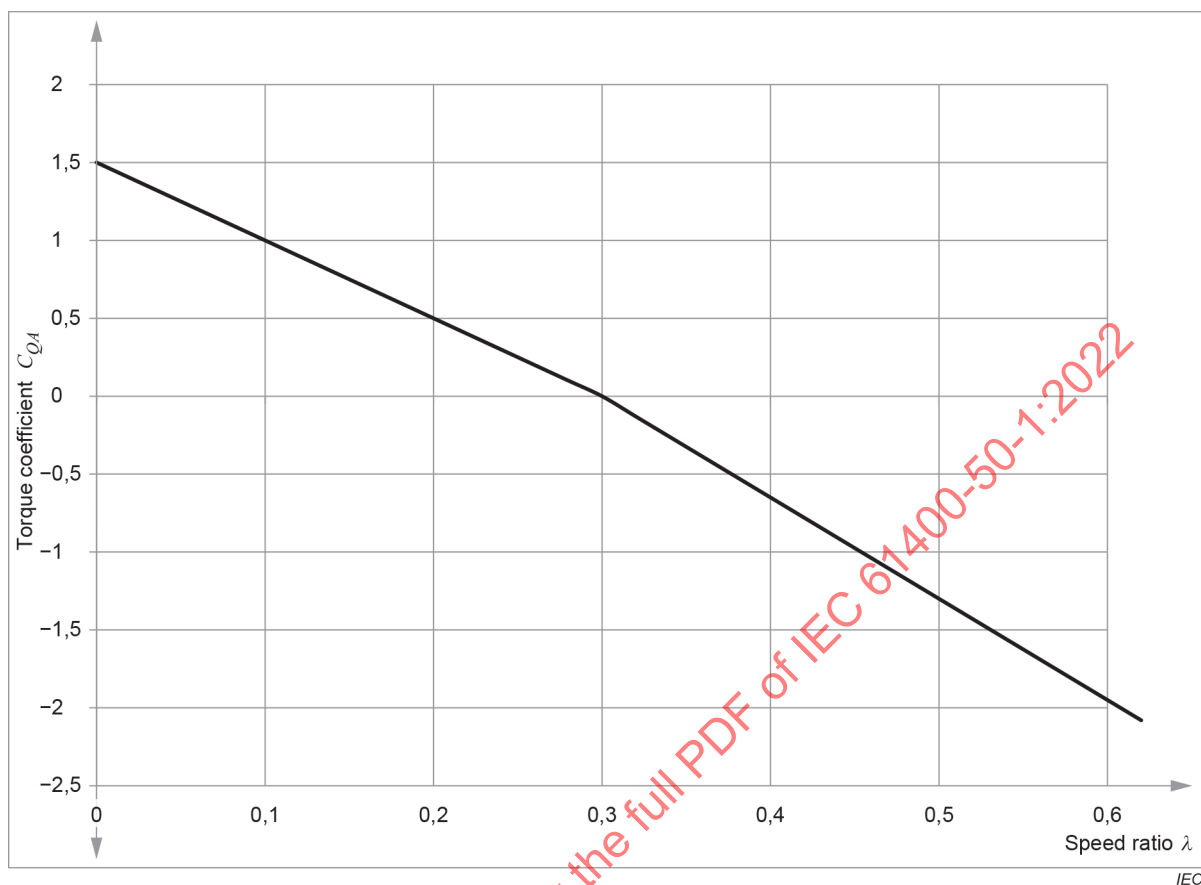


Figure 4 – Example of rotor torque coefficient C_{Q4} as a function of speed ratio λ derived from step responses with κ_{low} equal to $-5,5$ and κ_{high} equal to $-6,5$

The friction torque is a function of the temperature and the rotational speed as found from the friction measurements in 7.2.5.2:

$$Q_F = Q_F(T, \omega) \quad (18)$$

7.3.2.2 Influence parameter range variations and example class determination

The influence parameter ranges shall be varied by using a turbulence model that generates artificial three-dimensional 10 min time series wind speeds with a sample speed of at least 10 Hz. Exposing the cup anemometer model to such artificial winds, the responses of the cup anemometer are derived and the deviations from the horizontal wind speed of the artificial winds are found. The deviations for all combinations of the influence parameter ranges can be derived by a Monte Carlo process. The deviations determine the class as expressed in Equation (2). An example of classification of a cup anemometer is shown in Figure 5 and with the characteristics shown in Figure 3 and Figure 4 and with the data presented in Table 2 and Table 3. Other data related to the classification are shown in Table 4.

Deviations for classes A, B, C and D of all influence parameters are shown in Figure 5 and Figure 6. The resulting classes are 1,69A, 6,56B, 8,01C and 9,94D.

Table 2 – Tilt angle response of example cup anemometer

Wind speed, V (m/s)	4	8	12	16
Angle, α (deg)	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$
–30	0,967 005	0,935 689	0,921 815	0,913 545
–28	0,968 769	0,943 307	0,932 028	0,925 304
–26	0,971 484	0,951 098	0,942 067	0,936 683
–24	0,974 941	0,958 908	0,951 805	0,947 569
–22	0,978 933	0,966 583	0,961 111	0,957 850
–20	0,983 253	0,973 974	0,969 863	0,967 413
–18	0,987 695	0,980 930	0,977 934	0,976 148
–16	0,992 055	0,987 304	0,985 199	0,983 945
–14	0,996 131	0,992 948	0,991 538	0,990 698
–12	0,999 722	0,997 717	0,996 829	0,996 301
–10	1,002 628	1,001 468	1,000 954	1,000 648
–8	1,004 651	1,004 057	1,003 793	1,003 637
–6	1,005 594	1,005 344	1,005 233	1,005 166
–4	1,005 262	1,005 188	1,005 155	1,005 136
–3	1,004 558	1,004 526	1,004 513	1,004 505
–2	1,003 462	1,003 452	1,003 448	1,003 446
–1	1,001 951	1,001 950	1,001 949	1,001 949
0	1,000 000	1,000 000	1,000 000	1,000 000
1	0,997 595	0,997 594	0,997 593	0,997 593
2	0,994 750	0,994 740	0,994 736	0,994 734
3	0,991 490	0,991 458	0,991 445	0,991 437
4	0,987 838	0,987 764	0,987 731	0,987 712
6	0,979 458	0,979 208	0,979 097	0,979 030
8	0,969 803	0,969 209	0,968 945	0,968 789
10	0,959 068	0,957 908	0,957 394	0,957 088
12	0,947 450	0,945 445	0,944 557	0,944 029
14	0,935 147	0,931 964	0,930 554	0,929 714
16	0,922 359	0,917 608	0,915 503	0,914 249
18	0,909 287	0,902 522	0,899 526	0,897 740
20	0,896 133	0,886 854	0,882 743	0,880 293
22	0,883 101	0,870 751	0,865 279	0,862 018
24	0,870 397	0,854 364	0,847 261	0,843 025
26	0,858 228	0,837 842	0,828 811	0,823 427
28	0,846 801	0,821 339	0,810 060	0,803 336
30	0,836 325	0,805 009	0,791 135	0,782 865

Table 3 – Friction coefficients of example cup anemometer

Temperature (°C)	F_0 (N·m)	F_1 (N·m·s)	F_2 (N·m·s ²)
–20	2,000E-04	2,000E-05	–8,000E-08
–18	1,563E-04	1,563E-05	–5,714E-08
–15	1,163E-04	1,163E-05	–4,000E-08
–10	7,692E-05	7,692E-06	–3,077E-08
–5	5,556E-05	5,556E-06	–2,222E-08
0	4,348E-05	4,348E-06	–1,739E-08
5	3,571E-05	3,571E-06	–1,429E-08
10	3,030E-05	3,030E-06	–1,212E-08
15	2,632E-05	2,632E-06	–1,053E-08
20	2,326E-05	2,326E-06	–9,302E-09
25	2,083E-05	2,083E-06	–8,333E-09
30	1,887E-05	1,887E-06	–7,547E-09
35	1,724E-05	1,724E-06	–6,897E-09
40	1,587E-05	1,587E-06	–6,349E-09

Table 4 – Miscellaneous data related to classification of example cup anemometer

Classification list	Value
Cup diameter	75 mm
Cup area A	0,004 417 87 m ²
Radius to cup centre R	65 mm
Rotor inertia I	0,000 2 kg·m ²
Equilibrium speed ratio λ_0	0,3
Calibration temperature	20 °C
Calibration barometric pressure	101 3 hPa
Calibration air density ρ	1,203 821 kg/m ³
Calibration turbulence intensity	0,003
Calibration turbulence structure	Isotropic $\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w = 1/1/1$
Calibration coefficients A and B	0,679 55 and 0,258 70
Calibration friction coefficients F_0 , F_1 and F_2 at 20 °C	see Table 3 for 20 °C
Torque coefficient slopes κ_{low} and κ_{high}	–5,0 and –6,5

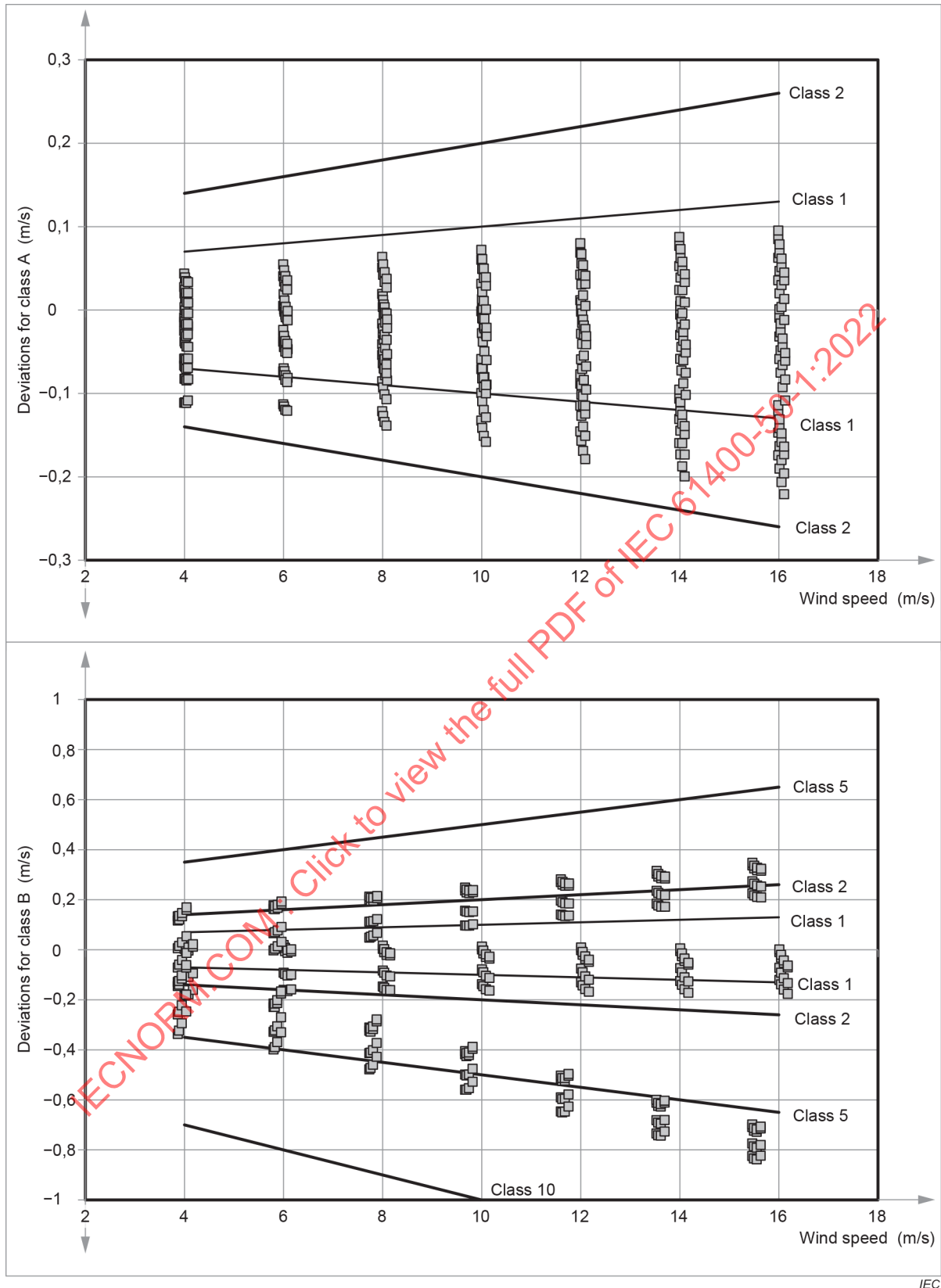


Figure 5 – Classification deviations of example cup anemometer showing a class 1,69A (upper) and a class 6,56B (lower)

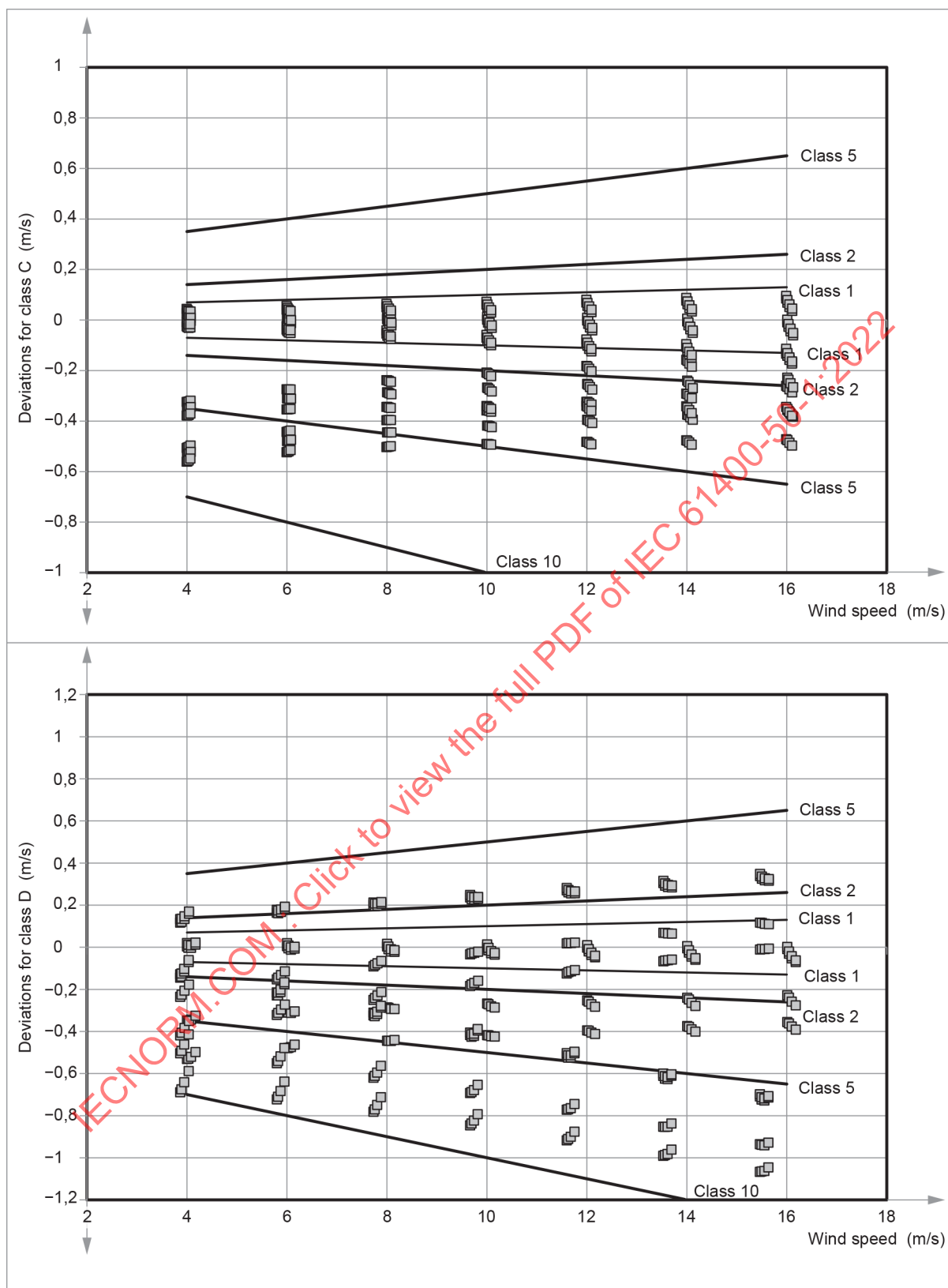


Figure 6 – Classification deviations of example cup anemometer showing a class 8,01C (upper) and a class 9,94D (lower)

7.4 A sonic anemometer classification method based on wind tunnel tests and sonic anemometer modelling

The classification method uses a sonic anemometer model to determine deviations due to influence parameters. The method is based on wind tunnel and laboratory measurements as described in 7.2.6 and 7.2.5.3. Furthermore, the sonic anemometer classification method uses an artificial wind generator similar to the one for the cup anemometer model, see 7.3.2, in order to generate three-dimensional time domain input wind data for the sonic anemometer model.

The response of the sonic anemometer is a function of the instantaneous wind vector $\vec{U} = \{u, v, w\}$ as determined by the artificial wind generator. From the wind vector, the upflow angle and the scalar of the wind vector are determined by Equations (10) and (11). The response is then determined by interpolation in the measured data from the wind tunnel measurements:

$$U_{\text{sonic}} = F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|) \cdot |\vec{U}| \quad (19)$$

where

$F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|)$ is the tilt and yaw response function for the sonic anemometer.

Deviations are determined from differences between sonic anemometer model responses and artificial wind data averages, see 7.3.2.2. The relevant influence parameters are tilt and yaw angular responses and temperature induced effects.

7.5 Free field comparison measurements

In a free field comparison measurement, two anemometers can be compared. The comparison measurement can be used to verify that the methods being used in classification of the instruments are consistent, see 7.3 and 7.4. The comparison of anemometers requires that both anemometers are calibrated in the same wind tunnel. The setup in the field should be made in accordance with the mounting procedures for two top-mounted anemometers as described in 10.3, using the maximum distance between them. A 3D ultrasonic anemometer (u , v , and w calibrated) shall be mounted on a boom below the two sensors to measure the environmental influence parameter ranges (flow angle, turbulence, turbulence spectrum), for a class S measurement campaign classification analysis. Additionally, air temperature shall be measured on the same boom for determination of the temperature range, and air pressure shall be measured for determination of the air density range. Time traces of the 3D sonic anemometer shall be recorded, while 10 min average measurements in a relatively small sector perpendicular to the boom are acceptable for the two anemometers under comparison. An acceptable database (at least 180 h) shall be collected for a wind speed range of 4 m/s to 16 m/s and a range of turbulence intensities (for instance from 0,04 to 0,14). Comparison of two anemometers should then be made by deriving a class S classification of the two anemometers from laboratory tests, and comparing these with the field measurements.

8 Wind tunnel calibration procedure for anemometers

8.1 General requirements

The general requirements for the calibration of anemometers are summarized as follows.

- a) The calibration of the anemometer shall be carried out in a wind tunnel that is suitable for the calibration of anemometers.

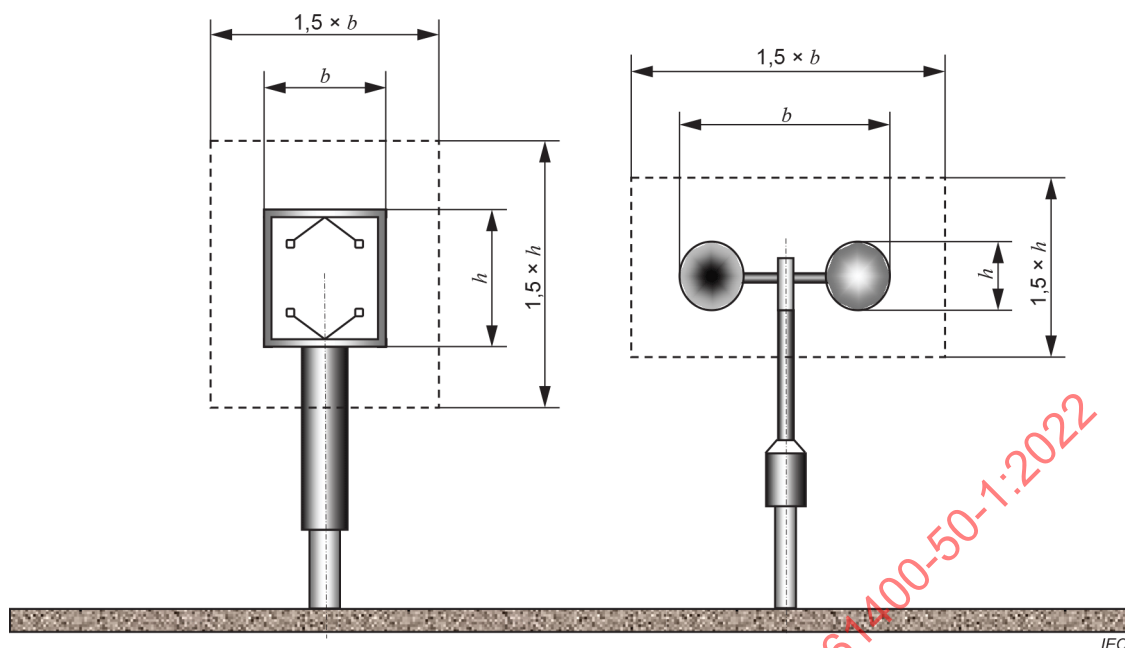
- b) All transducers and measuring equipment relevant for the calibration of anemometers shall have calibrations traceable to international standards. Calibration certificates and reports shall contain all relevant traceability information (e.g. including details of accreditations where available).
- c) The reference wind speed shall be measured with a pitot static tube that shall be of NPL type with ellipsoidal head in accordance with ISO 3966. The pitot-static tube shall be calibrated for appropriate wind speed ranges, and shall be documented. The reference wind speed may alternatively be measured by LDA (laser Doppler anemometry) with well documented uncertainties.
- d) Consistency of the experimental setup shall be verified by at least daily comparative calibrations of the facility's "quality control anemometer".
- e) Flow quality shall be verified as required in 8.2.
- f) The repeatability of the calibration shall be verified as required in 8.2.
- g) Anemometer calibration shall be supported by a thorough assessment of calibration uncertainty, carried out in accordance with ISO/IEC Guide 98-3:2008.

8.2 Requirements for the wind tunnel

The presence of the anemometer shall not substantially affect the flow field in the wind tunnel. During measurements the anemometer will to some extent be influenced by wind tunnel blockage and boundary effects. The blockage area ratio (BR) – defined as the ratio of the anemometer projected area, perpendicular to flow direction, (including its mounting system and projected area of a spinning rotor) to the total test section area – shall not exceed 0,05. Blockage effects shall always be accounted for in accordance with 8.4.3.

It is recommended that the wind tunnel test section has a height of at least 1,0 m and a width of at least 1,0 m.

The flow in the cross-sectional area, where the anemometer will be located, shall be uniform. Flow uniformity should be measured using velocity sensing devices, i.e. pitot tubes, hot wires or laser Doppler velocimetry, to measure flow profiles in longitudinal, transversal and vertical directions. Over the calibration wind speed range, the maximum difference in the mean velocity between any two points inside the measurement volume shall be less than 0,2 %. The mean value shall be calculated during at least five minutes and the measurement volume shall cover the active volume of the anemometer with 50 % margin in all directions as shown in Figure 7. Uniformity shall be tested over a period of at least five minutes for wind speeds of approximately 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s and 16 m/s each.



The volume will also extend $1,5 \times b$ in depth (along the flow).

Figure 7 – Definition of volume for flow uniformity test

The stability of the flow shall be measured in the middle of the volume of which uniformity was verified. The flow can be considered stable if ten consecutive 30 second means are within 0,5 % of their average value.

Cup anemometers are very sensitive to horizontal wind gradients. Different horizontal wind gradients can be seen depending on pollution of nets and smoothing devices. Therefore, it is useful to check the horizontal wind gradient by using two identical pitot tubes. They shall be placed at the exact position where the anemometer will be placed with their heads spanning approximately the area covered by the cup anemometer's rotating cups. A set of measurements shall be made and the linear regression between the dynamic pressures measured by the two pitot tubes shall be calculated. The difference in wind speed shall be less than 0,2 % over a period of at least five minutes. The influence due to the presence of the anemometer type to be calibrated (including mounting tube) on the flow speed measured by the pitot tube shall be verified to be less than $\pm 0,2$ %.

The axial turbulence intensity in wind speed at the anemometer's position shall be below 2 %. The turbulence intensity shall include longitudinal wind speed fluctuations with frequencies of up to 10 Hz. The data for turbulence measurements shall be acquired for a duration of 60 s per wind speed at a sampling rate of at least 20 Hz. Turbulence assessment shall be performed for at least the flow speeds 7 m/s, 10 m/s and 13 m/s with a device that is suitable to measure wind speed fluctuations with a cut-off frequency of at least 20 Hz. Deviations from the above requirements shall be assessed through suitable tests and be considered in the uncertainty evaluation.

The wind tunnel calibration factor, which gives the relation between the conditions at the reference measurement position and those at the anemometer position, shall be appraised using pitot tubes for a speed range of 4 m/s to 16 m/s.

The calibration setup shall undergo a detailed examination of the repeatability of anemometer calibrations. The calibration facility shall designate reference anemometers of representative size for use in these tests. The standard deviation and maximum deviation of the quality control anemometer output in the calibration speed range should be less than 0,2 % and 0,6 %, respectively, of the mean value.

8.3 Instrumentation and calibration setup requirements

Dedicated external signal conditioning equipment such as frequency to voltage converters, etc. shall be calibrated in isolation from the anemometer, so allowing the anemometer's calibration to be derived and reported in isolation from the signal conditioning equipment.

The resolution of the data acquisition system shall be at least 0,02 m/s. In the case of an analogue voltage instrument, the signal shall be adequately buffered to prevent its attenuation by low impedance logging equipment.

Mounting arrangements can have dramatic effects on instrument performance, particularly if the ratio of tube diameter to rotor diameter is high. Therefore during calibration the anemometer shall be mounted on top of a tube in order to minimize flow distortion and only one anemometer may be calibrated at a time. This tube shall be of the same diameter as the one on which the anemometer will be mounted in service in the free atmosphere. The vertical distance between the anemometer rotor and the upper and lower boundaries of the wind tunnel test section should not be less than 0,5 m. In case of a directional sensitive anemometer with respect to horizontal flow, a reference orientation shall be defined and documented and referred to during calibration. The anemometer shall be positioned at the test section perpendicular to the flow field of the wind tunnel as accurately as possible. The maximum deviation of the anemometer mounting tube is 0,2°. An example of a typical cup anemometer tilt response is shown in Figure 1.

It is important to ensure that the anemometer is not influenced by the presence of any reference wind speed measurement equipment. Conversely, the presence of the anemometer shall not affect the flow in the region of the reference instrument. If flow distortion effects are encountered, then the pitot tube shall be repositioned. This effect can be assessed by removing and then reinstating the anemometer and afterwards the reference instrument, and ascertaining whether the output of the remaining instrument changes.

The pitot static tubes shall be positioned in the test section aligned with the mean flow direction. The maximum misalignment allowed is 0,5°.

NOTE Misalignment of pitot static tubes can lead to a bias in differential pressure measurement. An alignment to within 0,5° of the mean flow direction assures a bias in differential pressure reading of less than 0,1 % for the NPL type pitot tube (note ISO 3966:2020, Figure A.5).

During calibration, the anemometer output signal shall be examined to ensure that it is not subject to interference or noise.

8.4 Calibration procedure

8.4.1 General procedure for cup and sonic anemometers

This procedure relates to the calibration of the horizontal wind speed measurement from a cup or sonic anemometer. The anemometer shall run in for minimum 5 min at about 10 m/s before the calibration procedure begins. Calibration shall be performed under both rising and falling wind speed in the range of 4 m/s to 16 m/s at a calibration interval of 1 m/s or less. If heating is switched on during calibrations, it shall be noted in the calibration certificate.

NOTE 1 m/s intervals can also be realized with the allowance for 2 m/s jumps, for example 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 15 m/s, 13 m/s, 11 m/s, 9 m/s, 7 m/s, 5 m/s.

The sampling frequency shall be at least 1 Hz and the sampling interval at least 30 s. This sampling interval can be increased when low resolution anemometers are calibrated. It is important to ensure that anemometer and reference wind speed readings span the same period of time. Before collecting data at each wind speed, adequate time shall be allowed for stable flow conditions to become established, see 8.2. This can take 1 min, but will vary from facility to facility.

8.4.2 Procedure for the calibration of sonic anemometers

Sonic anemometers are designed to measure 2D or 3D wind components. Where the use case of the wind measurement requires the measurement of horizontal wind speed (e.g. for power performance measurement), sonic anemometers shall be set up for measurement of horizontal wind speed preferably internally or by post processing.

During calibration the complete sonic anemometer shall be placed in the wind tunnel test section. The active part of the sonic anemometer shall be located within the test section volume. The yaw alignment shall be set at the reference calibration yaw direction, see 8.3. It is often advantageous to set a yaw alignment that imposes the least flow disturbance from the supports of the acoustic transceivers.

The setup parameters of the sonic anemometer during its calibration shall be documented in the calibration certificate or alternatively in an annex of the calibration certificate. The calibration holds only for identical settings of the sensor and identical signal output format.

For this test the sonic anemometer shall be calibrated at variable wind speeds in accordance with 8.4.1. Calibrations of additional yaw position (i.e. yaw angle for maximum flow disturbance from the supports) can be performed if desired. Calibrations of additional yaw positions should be performed at 10 m/s as a quality control of compliance with classification results.

Status signal of the sonic anemometer (if available) shall be monitored during the calibrations. The status signal shall be used to exclude erroneous data.

8.4.3 Determination of the wind speed at the anemometer position

Air density ρ shall be calculated on the basis of the mean wind tunnel air temperature T , relative humidity Φ and barometric pressure B , using Equation (20) (standard uncertainty less than 10^{-3} kg/m³):

$$\rho = \frac{1}{T} \left(\frac{B}{R_0} - \Phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (20)$$

where

B is the barometric pressure [Pa];

T is the absolute temperature [K];

Φ is the relative humidity (range 0 to 1);

R_0 is the gas constant of dry air [287,05 J/kgK];

R_w is the gas constant of water vapour [461,5 J/kgK];

P_w is the vapour pressure [Pa].

Vapour pressure P_w depends on mean air temperature.

$$P_w = 0,000\,020\,5 \cdot \exp(0,063\,184\,6 \cdot T) \quad (21)$$

The mean flow speed at anemometer position is calculated from mean differential pressure ΔP_{ref} at reference position using Equation (22):

$$\bar{v} = f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots) \alpha k_c \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2\Delta p_{\text{ref},i}}{\rho}} \quad (22)$$

where

- α is the pitot static tube head coefficient;
- k_c is the wind tunnel calibration factor, which gives the relation between the conditions at the reference measurement position and those at the anemometer position;
- $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ is a correction function due to interference between the anemometer including its mounting tube and the wind tunnel flow;
- k_b is the interference correction factor due to blockage;
- k_i is the correction factor due to interference between the anemometer (including mounting tube) and test section enclosure, also including flow effects due to mounting tubes extending through the enclosure;
- k_p is the correction factor due to interference caused by the anemometer (including mounting tube) on the velocity measured by the pitot tube;
- $\bar{v}$ is the average wind speed at the anemometer position;
- $\bar{v}_p$ is the average wind speed at the reference position;
- n is the number of samples within the sampling interval.

The correction function $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ should be equal to one for a test section without an anemometer and its supporting tube. The influence of the correction function on the calibration results shall be assessed and included in the calibration facility setup report and uncertainty calculation.

8.5 Data analysis

A linear regression analysis shall be carried out on the calibration data for the estimation of the following regression parameters: offset, slope, regression coefficient, standard uncertainty. The wind speed values shall be regressed upon the anemometer outputs.

If the correlation coefficient, r , for the data is less than 0,999 95, then it shall be checked if it is due to anemometer non-linearity or to other reasons. In case of anemometer non-linearity, it shall be documented in the certificate.

8.6 Uncertainty analysis

It is important to identify the uncertainty of the horizontal wind speed incident upon the anemometer. An uncertainty analysis shall be carried out in accordance with ISO/IEC Guide 98-3:2008, comprising both category A and category B uncertainty. The magnitude of the net uncertainty shall be assessed statistically and shall take account of:

- a) flow speed measurement uncertainty (pitot tubes, transducers, air density evaluation, etc.);
- b) wind tunnel calibration factor;
- c) wind tunnel correction factors through the correction function $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ defined in Equation (22);
- d) the influence of wind tunnel cross section size;
- e) measurement of anemometer output;

- f) the influence of non-vertical anemometer alignment for each anemometer type in the uncertainty assessment;
- g) statistical uncertainty due to short term scatter of the anemometer output (variation of the indicated anemometer signal, i.e. fluctuation of the angular rotor velocity, bias from signal generation, sampling bias, over the averaging time);
- h) uncertainty due to the difference between the result of the wind tunnel performing the calibration and the average result of other wind tunnels as determined through proficiency testing to the extent not covered by other uncertainty components;
- i) uncertainty due to linearization of calibration expression.

8.7 Reporting format

The relevant documentation shall provide information on the procedure followed and the facility used for calibrating the anemometers (report on the calibration facility setup) and on the individual anemometer calibration. The calibration facility setup report shall contain the following information as a minimum:

- a) description of the wind tunnel (including test section, settling chamber, flow straighteners, fan arrangement);
- b) sketch of the wind tunnel showing the positions of anemometer and pitot tube(s) in the test section;
- c) flow quality measurements;
- d) blockage effect assessment;
- e) influence of mounting height of the anemometer;
- f) influence of bottom plate;
- g) influence of mounting position into reference measurement;
- h) influence of the correction function;
- i) turbulence measurements;
- j) instrumentation certificates;
- k) measurement procedure;
- l) data evaluation procedure;
- m) repeatability documentation of the anemometer calibration;
- n) uncertainty analysis;
- o) deviations from these requirements.

The calibration report of an anemometer shall as a minimum contain the following information:

- 1) make, type and serial number of the tested anemometer and cup serial number if transported separately;
- 2) specification of yaw orientation during calibration (yaw sensitive devices);
- 3) tube diameter of the mounting system;
- 4) make, type and serial number of external converters;
- 5) name and address of the customer;
- 6) signatures from the persons who carried out the calibration, checked the results and approved their issue;
- 7) name of the wind tunnel;
- 8) environmental conditions during calibration (air temperature, air pressure and humidity);
- 9) regression parameters (offset, slope, regression coefficient);
- 10) uncertainty due to linearization (scatter of residuals);
- 11) uncertainty due to the correction function $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$;

- 12) tabular and graphical presentation (deviations from linear regression line amplified) of all calibration points and regression results;
- 13) uncertainty associated to each measuring point;
- 14) reference to the corresponding calibration facility setup report;
- 15) date of the calibration;
- 16) photo showing the anemometer and the mounting in the wind tunnel.

8.8 Example uncertainty calculation

As it is practically impossible to measure the flow velocity at the place of the anemometer and as the sensor in the wind tunnel experiences a significantly smaller flow field as in the free atmosphere, corrections are necessary. The optimization of the wind tunnel in terms of the corrections as well as the determination of the correction factor is crucial for the calculation of the measurement uncertainty.

Ideally, the uncertainty calculation should be applied independently to each wind speed calibration condition used in a calibration test. For this example, take a notional calibration point of 10 m/s using a wind tunnel rated at 25 m/s.

Table 5 deals with each uncertainty source; first with those of category B.

To avoid repetition, a detailed assessment of barometric pressure measurement has been left out, as it can be dealt with in the same way as temperature measurement.

Table 5 – Example of evaluation of anemometer calibration uncertainty

Error source u_i	Discussion	Value u_i	Sensitivity value c_i	$u_i c_i$ m/s
u_f , wind tunnel correction factor, f	An uncertainty on the correction factor $f(k_b, k_t, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ based on investigation of calibration influence factors.			
u_t , wind tunnel calibration factor, k_c	Wind tunnel calibration can be carried out by using two pitot tubes, one at the permanent reference position and one at the location to be occupied by the test anemometer. By swapping the two pitot systems, all category B errors can be eliminated, and standard regression analysis can be applied to yield a correction factor (the intercept being forced through the origin) and a related category A standard uncertainty. Assume the correction has a value of 1,02 and the standard uncertainty is 0,01.	0,01	$C_t = 0,5 \text{ v}/k_c$ $= 0,5 \times 10/1,02$ $= 4,90 \text{ m/s}$	0,049
u_B , blockage correction factor, k_B	If a solid object is positioned in the flow of the wind tunnel, the flow will be affected depending on the relation between object size and wind tunnel area. Conditional on the spatial dimensions of the specimen, a raise in the flow velocity occurs in a closed measurement section because of the continuity. In an open measurement section, the current will be widened, which is equivalent to a speed reduction. Assuming the blockage effect is known, the uncertainty value of 0,1 % is appropriate. The calibration facility setup report shall present the calculations applied and estimated value of the correction factor and the associated uncertainty.	0,001	$C_t = \text{v}/k_B$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01

Error source u_i	Discussion	Value u_i	Sensitivity value c_i	$u_i c_i$ m/s
u_{k_i} , position correction factor, k_i	An anemometer needs a certain free space (depending on the size of the mounting pipe and the anemometer) below and above it, to experience the same flow conditions as in free atmosphere. Therefore, the centre of the measurement section is not necessarily the best position for the specimen. If the wind tunnel is small and thus the mounting pipe is too short, an error of up to 2 % can occur. Only from a certain length of the mounting pipe, the influence begins to decrease. This free length amounts to approximately 50 cm above the base plate. Assuming the position effect is known, the uncertainty value of 0,1 % can be appropriate.	0,001	$C_p = v/k_p$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
u_p , position correction factor, k_p	The flow around the anemometer exerts some influence on the flow around the reference pitot tube. Assuming the influence effect is known, the uncertainty value of 0,1 % of the effect can be appropriate.	0,001		
u_{FD} , flow correction factor, k_{FD}	Mostly, anemometers are mounted on measurement masts of considerable length – a situation which cannot be reproduced in the wind tunnel. If an anemometer is mounted on a tube stub and if this stub is mounted in a wind tunnel with an open measurement section, the current can escape downward. This means a loss of impetus for the anemometer and thus a systematic error. By installing a base-plate, this loss can be considerably reduced. Assuming a base-plate is installed the standard uncertainty value of 0,1 % is appropriate; otherwise the influence shall be examined.	0,001	$C_{FD} = v/k_{FD}$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
$u_{p,t}$ pressure transducer, $K_{p,t}$	The calibration certificate for the pressure transducer shows a maximum uncertainty of 0,5 Pa in the range from 0 to 500 Pa.	0,5 Pa	$c_{p,t} = 0,5 \text{ v}/K_{p,t}$ $= 0,5 \times 10/5000$ $= 0,001$	0,000 5
$u_{p,s}$ pressure transducer signal conditioning gain, $K_{p,s}$ and $u_{p,d}$ pressure transducer data sampling conversion $K_{p,d}$	The calibration of the equipment used to measure the pressure transducer output shows a maximum uncertainty of 0,000 15 V in the range from 0 to 10 V.	0,000 15 V	$c_{p,s} = 0,5 \text{ v}/K_{p,s}$ $= 0,5 \times 10/0,01$ $= 500$	0,010
$u_{T,t}$ ambient temperature transducer, $K_{T,t}$, $u_{T,s}$ temperature signal conditioning gain, $K_{T,s}$ and $u_{T,d}$ temperature signal digital conversion, $K_{T,d}$	The calibration of the equipment used to measure the temperature shows a maximum uncertainty of 0,1 °C in the range from 10 °C to 30 °C.	0,1 °C	$c_{T,t} = 0,5 \text{ v}/K_{T,t}$ n/a n/a	0,001

Error source u_i	Discussion	Value u_i	Sensitivity value c_i	$u_i c_i$ m/s
u_h pitot tube head coefficient, C_h	The head coefficient of a pitot tube depends upon the angle of attack of the wind. Two error sources are possible, one related to the accuracy with which the pitot tube is set up in alignment with the mean flow direction, and the other due to turbulent variations in instantaneous flow direction. Assume the nominal head coefficient, C_h , is 0,997, and assume also that it is possible to deduce that the standard deviation on angle of attack is 2°. Relevant ISO standards suggest this will give rise to a 0,1 % change in head coefficient.	0,000 997	$C_h = -0,5 v/C_h$ $= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	0,005
u_{pcal} pitot tube calibration	From the calibration certificate of the pitot tube, an uncertainty of 0,25 % in the range of 4 m/s to 16 m/s can be used.	0,002 5	$C_{\text{ph}} = -0,5 v/C_h$ $= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	
$u_{B,t}$ sensitivity of barometer, $K_{B,t}$, $u_{B,s}$ signal conditioning gain on barometer, $K_{B,s}$ and $u_{B,d}$ digital conversion of barometer signal, $K_{B,d}$	The calibration of the barometer shows a maximum uncertainty of 0,5 hPa in the range from 900 hPa to 1 100 hPa.	0,5 hPa	$c_{B,t} = -0,5 v/K_{B,t}$	
s_A statistical uncertainty in the mean of the wind speed time series	Assume the turbulence intensity is 2 %, and that 2 Hz sampling over 30 s is used, giving 60 samples. The standard uncertainty in the mean value of 10 m/s is then given by $\sqrt{1/60 \times 0,02 \times 10}$	0,026	1	0,026
u_ρ , humidity correction to density, k_ρ or u_ϕ , relative humidity ϕ	The calibration of the relative humidity measurement equipment shows an uncertainty of less than 2 % in the range 10 to 95 %. A value of 2 % is selected for the calculation. $c_\phi = \frac{\partial \bar{v}}{\partial k_\rho} \cdot \frac{\partial k_\rho}{\partial \phi} = \frac{1}{2} \frac{\bar{v}}{k_\rho} 0,378 \frac{P_w}{B}$ At 15 °C, $P_w = 1\,700$ Pa and assuming $B = 1\,013$ mbar = 101 300 Pa, k_ρ is evaluated as 0,997 and c_ϕ (at 10 m/s) is 0,032.	$u_\phi =$ 0,02 % RH	$c_\rho = 0,032$	0,001

The combined standard uncertainty can be obtained by taking the root mean square of the contributory uncertainties in the right-hand column. For the values which have been dealt with, this amounts to 0,06 m/s.

The example shows that category B uncertainty is liable to dominate. Extending the calibration period can help reduce the category A uncertainty, but will have no effect on category B. Furthermore, category B uncertainty sources, although not correlated with one another for a particular wind speed, are fully self-correlated across wind speeds, meaning that good apparent calibrations (good straight lines) can be obtained, whilst still retaining significant uncertainty.

9 In-situ comparison of anemometers

9.1 General

Where it is required to prove that an anemometer does not change its calibration during a measurement period, there are two methods available. The anemometer can be calibrated in a wind tunnel after the measurement period to show the differences to the calibration before the measurement period. Alternatively (or additionally) an in-situ comparison, made by comparing the primary anemometer to a control anemometer installed in close proximity during the measurement period, can be carried out. This method does not identify a gradual degradation of the calibration of the anemometer if the control anemometer degrades at a similar rate. The in-situ comparison should be repeated on a regular basis to identify problems at an early stage.

9.2 Prerequisite

During the measurement period the two anemometers are installed on the meteorological mast in accordance with Clause 10. The primary anemometer is the instrument being used for the measurement of interest. The other anemometer is the control anemometer and is used for the in-situ comparison. The anemometers can be installed in three variants:

- a) variant 1: top mounted in accordance with 10.2;
- b) variant 2: alternative top mounted in accordance with 10.3;
- c) variant 3: both anemometers side-mounted in accordance with 10.4.

9.3 Analysis method

Two databases will be compared using the 10 min average values recorded during the measurement period. The first database includes data that start directly after the installation of the anemometers. The second database includes data for the last part of the measurement period. Each database shall meet the following requirements.

- a) A range from 4 m/s to 12 m/s shall be covered.
- b) Wind directions shall be in the valid measurement sector.
- c) Each wind speed bin shall have a minimum of three points of data. There are two possible choices of binning the data as follows:
 - 1) Binning option 1: Wind speed bins of 1 m/s width, centred on 1,0 m/s values, based on the control anemometer wind speed from one wind direction bin not larger than $\pm 15^\circ$.
 - 2) Binning option 2: Wind speed bins of 4 m/s width centred on 2 m/s, 6 m/s, 10 m/s and 14 m/s based on the control anemometer wind speed and wind direction bins of 10° .

This wind speed range of 0 to 16 m/s is for this interim analysis step only and the final analysis shall be based on the 4 m/s to 12 m/s range.
- d) Include a wind direction sector with the meteorological mast free of wakes of any wind turbines and with the anemometers free of wakes of the meteorological mast as follows:
 - 1) In the case of side-by-side anemometer mounting (variant 2) and using only wind speed binning for one wind direction sector (binning option 1), the wind direction sector shall include the wind direction that is 90° to the boom direction and in acceptable wind directions.
 - 2) In the case of a top-mounted anemometer (variant 1), the wind direction bin(s) shall be out of the wake of the meteorological mast. Therefore the horizontal connection lines (see Figure 8 and Figure 9) between the centre of the control anemometer and any part of the meteorological mast shall have a minimum angular distance of 45° to the border of the bin(s).
- e) Maximum duration shall be eight weeks.

The wind direction bin(s) used for the analysis shall be clearly stated in the report.

If 1 m/s wind speed bins and one wind direction bin of 30° (binning option 1) are applied, a linear regression is performed with the primary anemometer as the dependent variable and the control anemometer as the independent variable. This regression will be used to calculate the estimated primary anemometer wind speed, termed $V_{\text{primary_est}}$.

$$V_{\text{primary_est}} = m \cdot V_{\text{control}} + b \quad (23)$$

where

m is the slope of the regression relating V_{control} to $V_{\text{primary_est}}$;

b is the offset of the regression relating V_{control} to $V_{\text{primary_est}}$;

V_{control} is the wind speed of the control anemometer.

The intention is to show a change over time in the behaviour of an anemometer, not an absolute calibration.

If 4 m/s width wind speed bins and 10° wind direction bins (binning option 2) are applied, a piecewise linear interpolation between wind speed bins in each wind direction bin from the first database can be used to estimate the primary anemometer wind speed based on Equation (24):

$$V_{\text{primary_est}} = \frac{V_{\text{primary},i} - V_{\text{primary},i-1}}{V_{\text{control},i} - V_{\text{control},i-1}} (V_{\text{control}} - V_{\text{control},i-1}) + V_{\text{primary},i-1} \quad (24)$$

In this case, only data of the control anemometer within the wind speed bins covered by the first database in each wind direction bin shall be used for the evaluation of the in-situ comparison in the second database. Equation (24) may be used for extrapolation up to the borders of the covered wind speed bins. If there is only one wind speed bin covered in a wind direction bin, the ratio of the bin averages of the wind speeds measured by the primary anemometer and the control anemometer shall be used as correction factor for the measurement of the control anemometer.

9.4 Evaluation criteria

Apply the regression or the piecewise linear interpolations from the first database to the control anemometer measurements of the second database resulting in an estimated primary anemometer wind speed for each 10 min period.

Calculate the average of differences (systematic deviation) in the measured and estimated primary anemometer wind speed for 1 m/s wide wind speed bins centred around 1 m/s values. The systematic deviation is:

$$\gamma = \frac{\sum (V_{\text{primary_est}} - V_{\text{primary}})}{n} \quad (25)$$

Calculate the standard uncertainty of wind speed differences (statistical deviation) of the estimated primary anemometer and the measured primary anemometer wind speeds for each wind speed bin. The standard uncertainty of the wind speed differences is the standard deviation of wind speed differences divided by the square root of the number of measured data points. The standard uncertainty is:

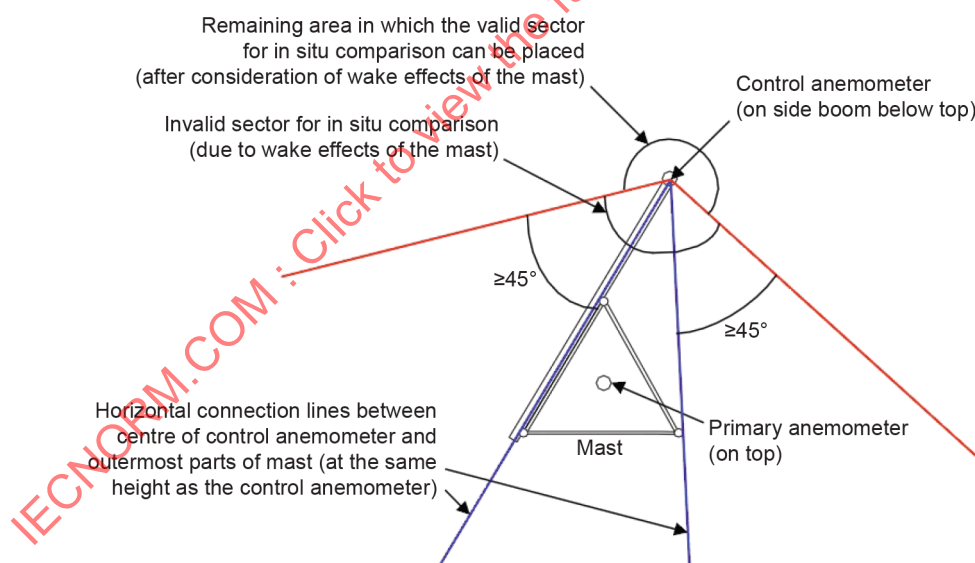
$$\sigma = \frac{\text{stdev}(y)}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V_{\text{primary_est}} - V_{\text{primary}})^2}{n}}}{\sqrt{n}} \quad (26)$$

If the root-sum-square of the average of differences (systemic deviation) and the standard uncertainty of wind speed differences (statistical deviation) does not exceed 0,1 m/s in any bin between 4 m/s and 12 m/s, the in-situ test has passed.

$$\delta = \sqrt{\gamma^2 + \sigma^2} < 0,1 \text{ m/s} \quad (27)$$

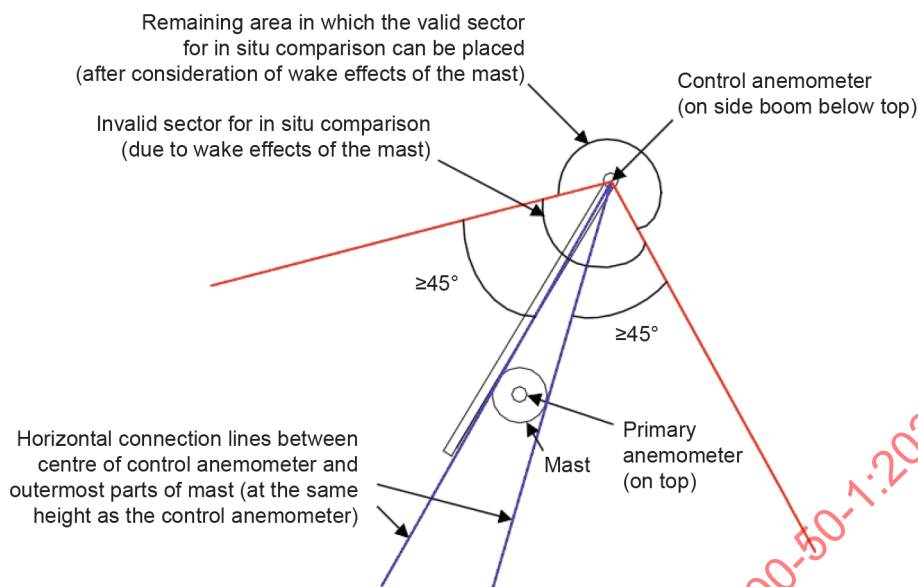
If the value δ is above 0,1 m/s in at least one bin and does not exceed 0,2 m/s in all bins between 4 m/s and 12 m/s, the uncertainty of the anemometer calibration $u_{V1,i}$ shall be increased at least to the maximum value of δ in the wind speed range 4 m/s to 12 m/s. If the value δ is larger than 0,2 m/s in any bin between 4 m/s and 12 m/s, the in-situ test should be shifted to an earlier period until δ no longer exceeds 0,2 m/s. The measurement campaign data after this period shall be rejected, and the uncertainty of the anemometer calibration $u_{V1,i}$ of the remaining measurement campaign data shall be treated as in the case of no data rejection.

NOTE The in-situ test can be repeated often during the measurement campaign to aid in the identification of intermittent anemometer degradation.



IEC

Figure 8 – Example valid control anemometer direction sector for a single top-mounted anemometer on a triangular lattice meteorological mast



IEC

Figure 9 – Example valid control anemometer direction sector for a single top-mounted anemometer on a tubular meteorological mast

10 Mounting of instruments on the meteorological mast

10.1 General

Appropriate arrangement of instruments on the meteorological mast is important for accurate wind measurements (where instruments are to be mounted on a wind turbine nacelle rather than on a meteorological mast, refer to Annex C for guidance). The arrangement of anemometers on a meteorological mast shall include at least a primary top-mounted anemometer and a control anemometer. The purpose of the control anemometer is to provide a means of in-situ consistency checking of the primary anemometer as described in Clause 9. Before using an anemometer classified in accordance with the requirements of the intended purpose (e.g. in a power performance measurement), it is recommended that the geometry of the anemometer is checked with the geometry description that corresponds to the anemometer type on which the classification was made. In particular, the anemometer shall be located to minimize flow distortions, especially from mast and boom influences. When minimal flow distortion across a wide wind direction range is required, then this is obtained with a single top-mounted anemometer. However, a side-by-side arrangement of two top-mounted anemometers provides redundancy and a robust method of anemometer consistency checking with only marginally increased flow distortion if both adequate horizontal separation and a stable mounting structure for the anemometers are achieved. When anemometers are mounted on side booms at elevations below the meteorological mast top, flow distortion from both the meteorological mast and the boom is significant and shall be taken into account. Irrespective of the type of mounting arrangement, the boom structure shall be sufficiently stable to avoid significant vibrations. Those other instruments on the meteorological mast which are required to be mounted close to the primary anemometer mounting height (control anemometer, wind vanes, temperature and pressure sensors) should be mounted in a way that avoids interference with the primary anemometer.

10.2 Single top-mounted anemometer

To achieve negligible flow distortion of the wind speed measurements over a wide wind direction range, a single top-mounted anemometer is the ideal configuration. Where this configuration is adopted all provisions of 10.2 shall be met. However, careful consideration should be given to whether sufficiently robust anemometer consistency checks against a lower elevation anemometer can be achieved with this configuration. This is particularly the case where the meteorological mast is of large cross-sectional area and as a consequence the lower anemometer is subject to more significant meteorological mast interference effects than the top-mounted anemometer or in cases where large variations in wind shear are experienced.

The anemometer shall be supported such that the anemometer cups are at least 1,5 m above the meteorological mast and any other sources of flow disturbance and such that no parts of the support structure or meteorological mast extend outside of an 11:1 half-cone whose vertex is coincident with the anemometer cups.

NOTE 1 Where the anemometer is an allowable type of anemometer other than a cup anemometer (e.g. an ultrasonic anemometer), then "cups" has the meaning "sensor measuring elements" throughout Clause 10.

NOTE 2 The cone is defined such that the base of the cone is of diameter equal to the characteristic width (maximum width of the mast or protrusions for a distance of 4 m below the cups) of the mast and the height of the cone equals 11 times the radius of the cone base.

The anemometer shall be mounted on a round vertical tube of the same ($\pm 1,5$ mm) outer diameter as used during calibration (and classification), but of no larger diameter than the body of the anemometer. The combined length of the tube and anemometer (measured to the anemometer cups) shall be at least 0,75 m. Furthermore, the anemometer shall be held steady, which can necessitate the mounting of the small-diameter vertical tube concentric with another tube of larger diameter to provide a stable structure. This additional tube shall not be of greater diameter than the anemometer body for a height of 1,5 m below the cups. The bracket connecting the anemometer to the vertical tube shall be compact, smooth, and symmetrical. Where the anemometer is designed for internal cable routing in the support tube, the cable shall be routed inside the vertical tube. For other configurations (e.g. pig tail), the cable should be spirally wound around the vertical tube (approximately three turns per metre or similar to that used during calibration and classification). The anemometer should be calibrated with the same cable attachment and routing configuration as is to be used in the field. The anemometer (and mounting tube) inclination from vertical shall be less than 2° . It is recommended that this is verified by measurement. No other instruments shall be positioned closer than 1,5 m to the anemometer cups nor outside of the 11:1 half-cone to a distance of at least 4 m below the anemometer cups. In this case, the control anemometer for the top-mounted anemometer shall be a side-mounted anemometer located at least 4 m and no more than 6 m below the top-mounted anemometer and otherwise satisfying the requirements for side-mounted anemometers in 10.4. Figure 10 shows an example of a top-mounting configuration.

Dimensions in metres

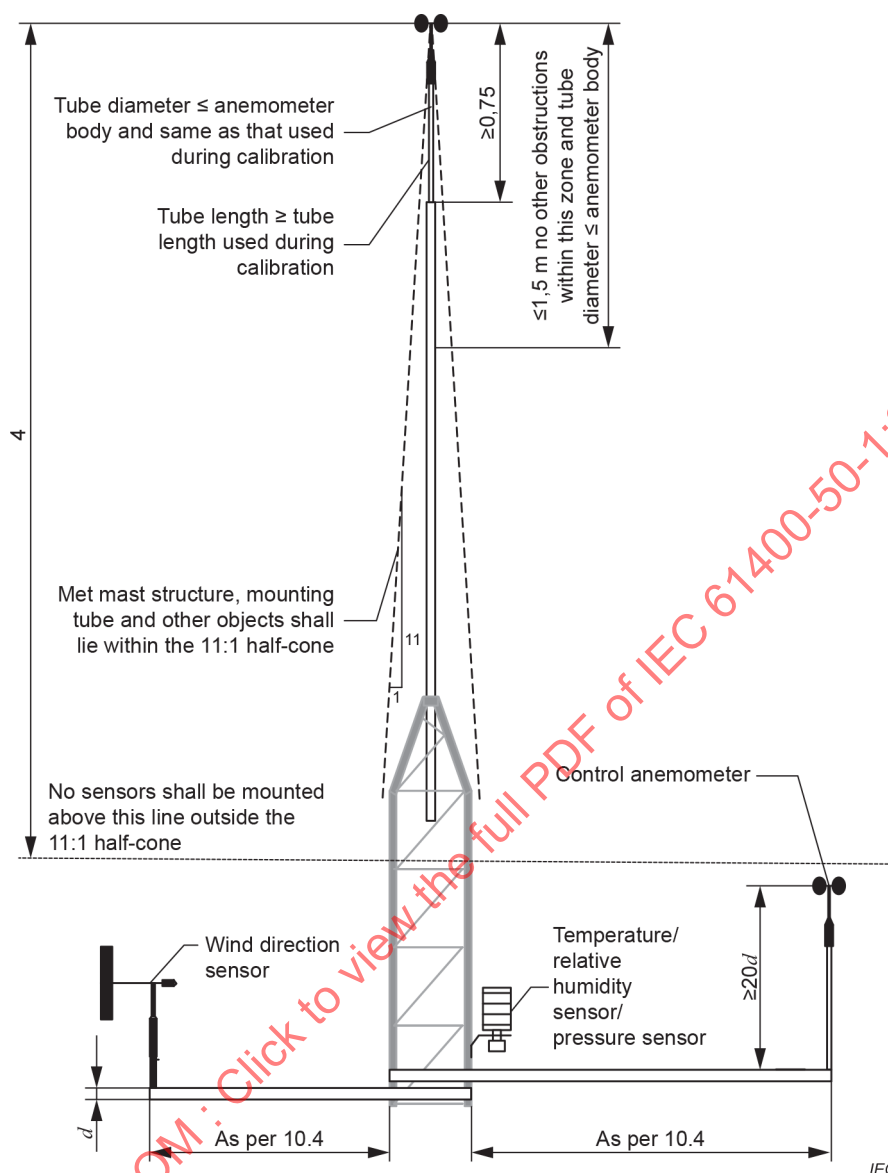


Figure 10 – Example of a top-mounted anemometer and requirements for mounting

10.3 Side-by-side top-mounted anemometers

In the side-by-side arrangement, all mounting conditions in 10.2 shall be met in addition to those specified here. The anemometer cups shall be mounted above the boom by a minimum of 20 times the boom diameter, but 25 times the boom diameter is recommended. The boom, consisting of both the horizontal portion and vertical stems, shall be of round cross-section. The anemometers shall be separated by at least 2,5 m and no more than 4,0 m. No parts of the meteorological mast shall extend beyond a 11:1 half-cone whose vertex is coincident with the midpoint between the cups of the two top-mounted anemometers (the top boom itself is excluded from this requirement provided that it meets the foregoing dimensional criteria). No other instruments shall be positioned closer than 1,5 m to the anemometer cups nor outside the 11:1 half-cone to a distance of at least 4 m below the anemometer cups. Figure 11 shows an example of a side-by-side configuration. It is recommended that the boom is mounted concentric with the meteorological mast axis or centrally on the upwind side of the meteorological mast.

NOTE "Upwind" is dependent on the use case. For example, in the case of a power performance measurement where a relatively narrow direction sector of interest is used, then "upwind" is the direction which places the instruments on the upwind side of the mast relative to the turbine. However, in the case of a resource assessment measurement, "upwind" can mean the side of the meteorological mast which faces the expected predominant wind direction sectors.

The influence of one anemometer on the other shall be assessed and the measurement sector restricted such that the overall uncertainty of the wind speed measurement remains within the desired limits. The uncertainty due to flow distortion from other instruments, the meteorological mast and booms shall be determined.

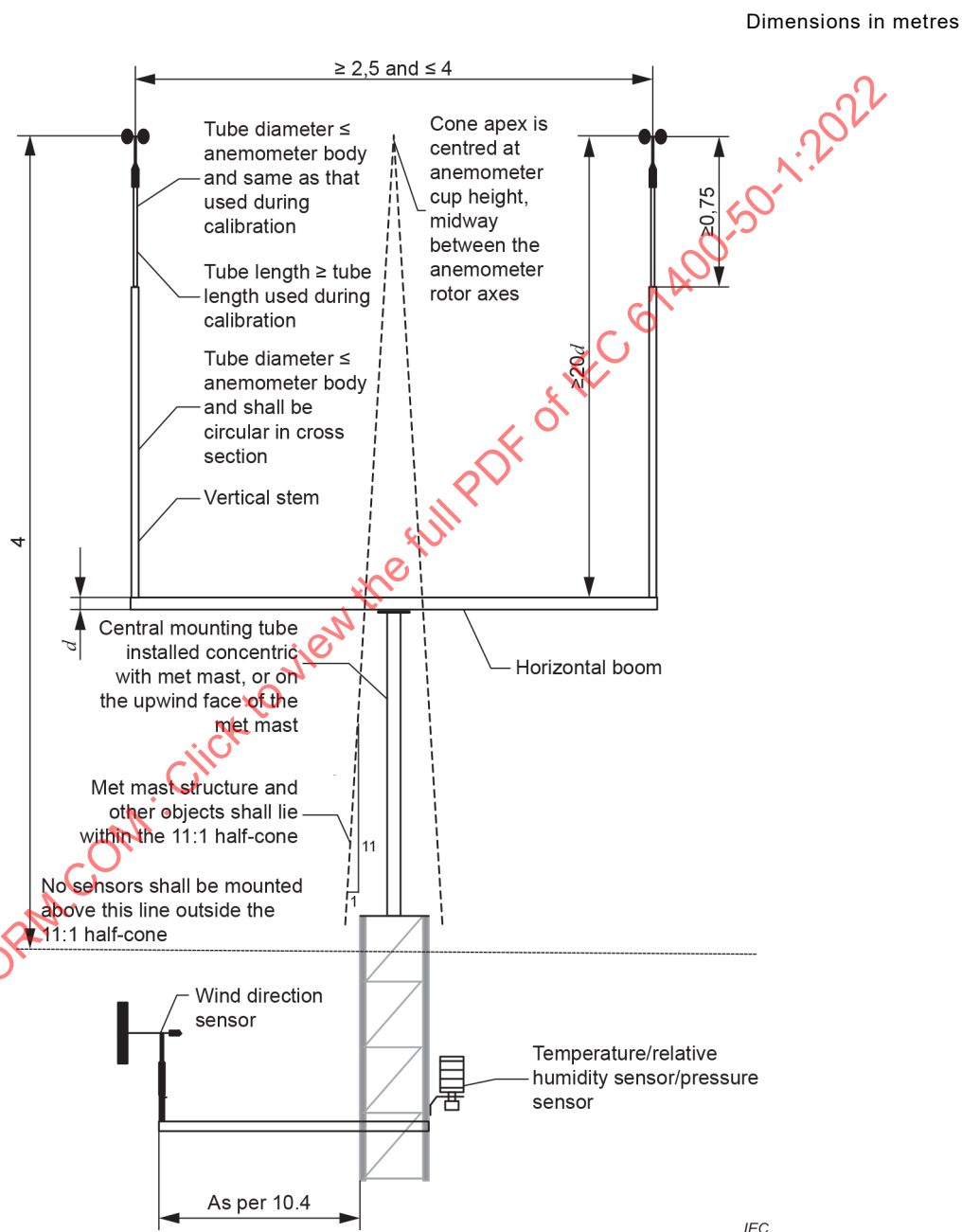


Figure 11 – Example of alternative top-mounted primary and control anemometers positioned side-by-side and wind vane and other instruments on the boom

10.4 Side-mounted instruments

10.4.1 General

Side-mounted instruments such as anemometers and wind direction sensors are influenced by flow distortion from the meteorological mast, boom and guy wires. The influence of a round tubular boom is 0,5 % at a separation distance of 20 boom diameters above the boom. Flow distortion at the anemometer cup location due to booms should be kept below 0,5 %. The anemometer shall be mounted on a round vertical tube of the same ($\pm 0,1$ mm) outer diameter as used during calibration (and classification), but of no larger diameter than the body of the anemometer. Wind direction sensors should be mounted at a distance from the meteorological mast of no less than half of that recommended for anemometers. There shall be at least 20 boom diameters vertical separation from side-mounted instruments to booms above. This separation requirement applies where a side-mounted anemometer is being used as a control anemometer for another side-mounted anemometer at a different height as well as to the case where side-mounted anemometers at different heights are being used for wind shear measurement. In the case where the side-mounted anemometer is being used as a control anemometer to another side-mounted anemometer, the vertical separation to the primary instrument shall be in the range 4 m to 6 m where the side booms are on the same side of the mast as each other and pointing in the same direction. Alternatively, the control anemometer side boom may be mounted at the same height as the other side-mounted anemometer but pointing in a different direction such that the flow distortion requirements at both anemometer locations are satisfied within the measurement sector.

An anemometer operating in the wake of the meteorological mast is highly disturbed. Depending on the use case of the wind measurements, it may not be allowable to use wake-affected measurements (e.g. in a power performance test). Where these measurements are used, the influence of the inclusion of these measurements on the overall wind speed measurement uncertainty shall be assessed. Flow distortion upstream of the meteorological mast can be significant. There shall be adequate separation between the anemometer and the meteorological mast to keep meteorological mast flow distortion below 1 %. Guidance for appropriate anemometer to meteorological mast separation is given in 10.4.2 and 10.4.3.

Wakes from meteorological mast guys can have a strong influence on anemometers over surprisingly long distances. Location of anemometers downstream of guys shall be avoided in important wind direction sectors.

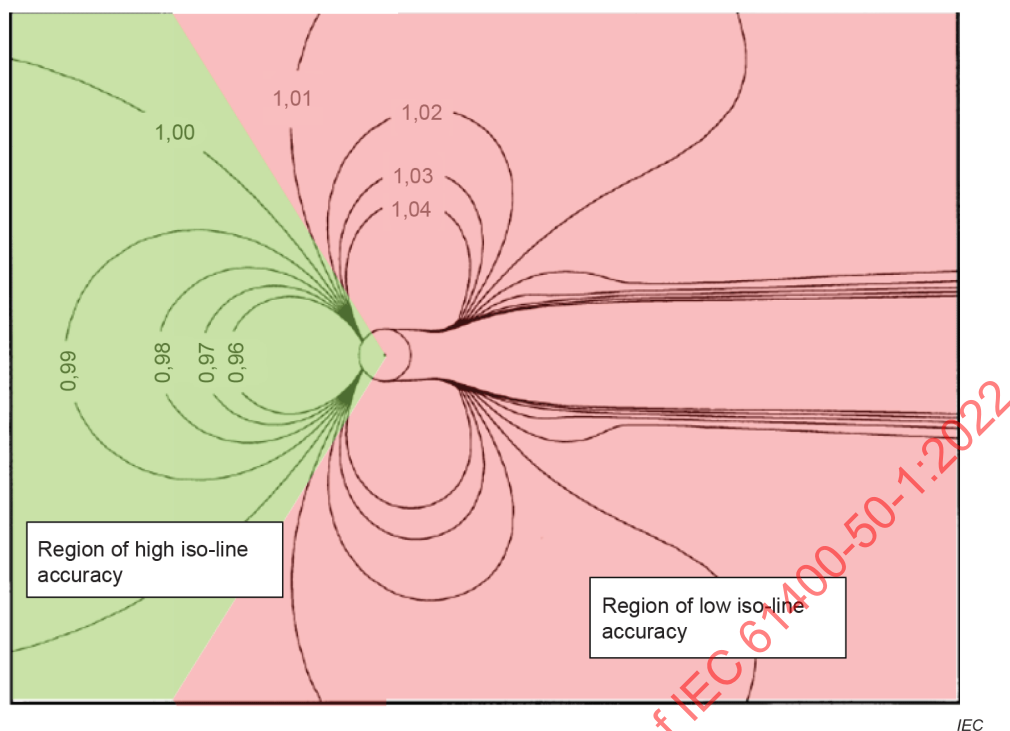
It is largely up to the user to determine what degree of disturbance and hence uncertainty is acceptable, but recommended good practice is to avoid meteorological mast- and boom-induced flow distortions greater than 1 % and 0,5 %, respectively.

Correction of side-mounted anemometers for meteorological mast flow distortion is permitted and further described in 10.4.4 and Annex B.

Meteorological masts can either be of cylindrical or lattice construction. The required separation of the anemometer from the meteorological mast depends upon the type of meteorological mast and solidity.

10.4.2 Tubular meteorological masts

An approximation of the flow disturbance in the vicinity of a tubular meteorological mast can be obtained from Figure 12, which shows an iso-speed plot of the flow around a tubular meteorological mast from a Navier-Stokes analysis. The least disturbance can be seen to occur if facing the wind at 45°. More generally, it can be seen that there is a retardation of the flow upwind of the meteorological mast, acceleration around it, and a wake behind it. Due to the complexity of the flow in the mast wake influenced region, Figure 12 is accurate only for the upwind zone of least disturbance as indicated by the green shading.



NOTE Flow speed is normalized by free-field wind speed (from the left); analysis by two-dimensional Navier-Stokes computations for which the green shaded region on the left is considered accurate and the red shaded region on the right inaccurate due to inaccuracies in modelling flow in and behind the separation zone.

Figure 12 – Iso-speed plot of local flow speed around a cylindrical meteorological mast

It is evident from Figure 12 that for an anemometer mounted within the $\pm 45^\circ$ sector relative to the wind direction on the upwind side of the meteorological mast the greatest distortion of the wind speed relative to free stream occurs when the anemometer is directly upwind of the meteorological mast. Figure 13 shows the relative wind speed as a function of distance upwind of the meteorological mast.

NOTE Wind speed distortion can be higher than shown in Figure 13 if winds approach from angles greater than 45° from the anemometer – mast alignment.

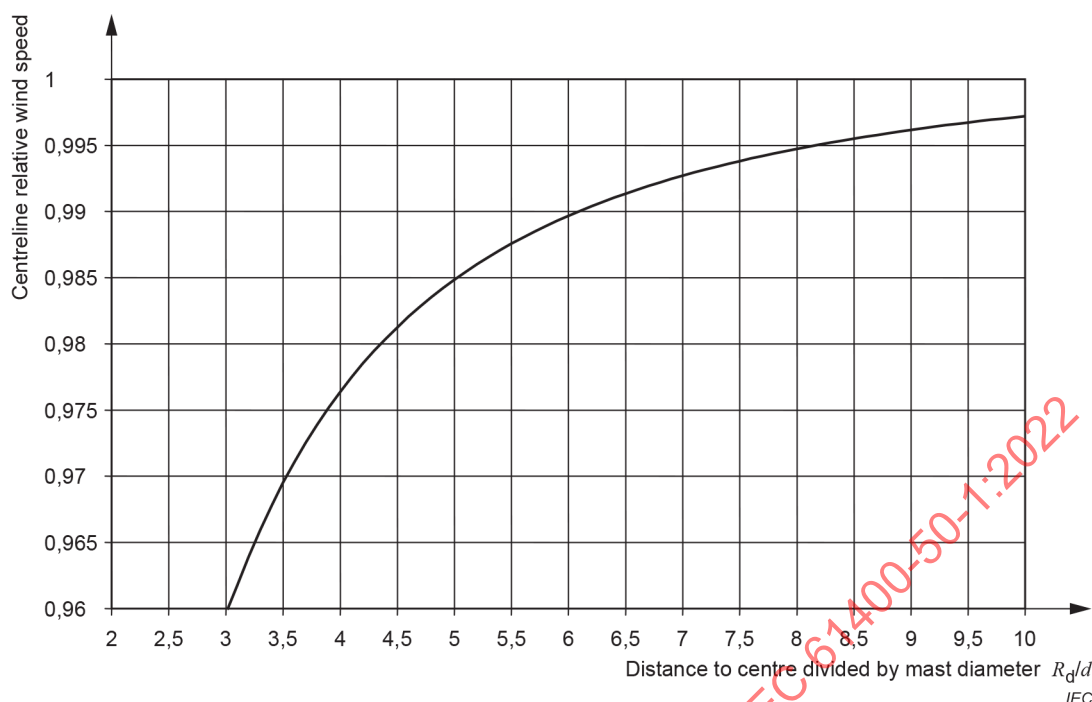
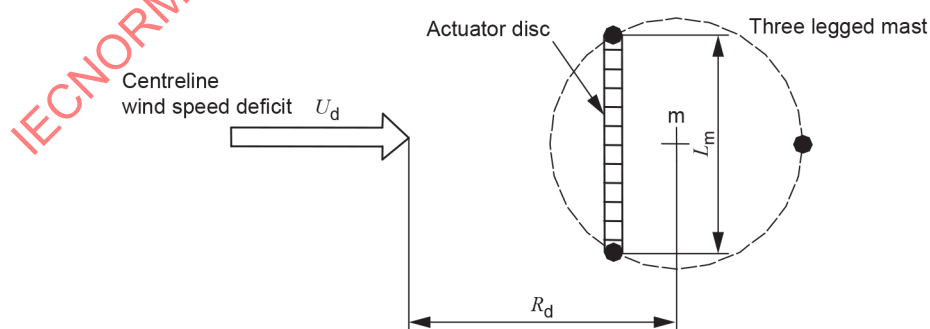


Figure 13 – Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a tubular meteorological mast and meteorological mast diameter d

A 99,5 % relative wind speed is seen to occur at R_d/d of 8,2. The corresponding value for a 99 % relative wind speed is 6,1.

10.4.3 Lattice meteorological masts

Analysis of the flow around a lattice structure can be based upon a combination of actuator disc and Navier-Stokes theory and analysis. The degree to which flow is disturbed by the meteorological mast is a function of the solidity of the meteorological mast, the drag of the individual members, the orientation of the wind and the separation of the measurement point from the meteorological mast. Figure 14 shows the dimensions of interest on a top-view of a triangular lattice meteorological mast.



IEC

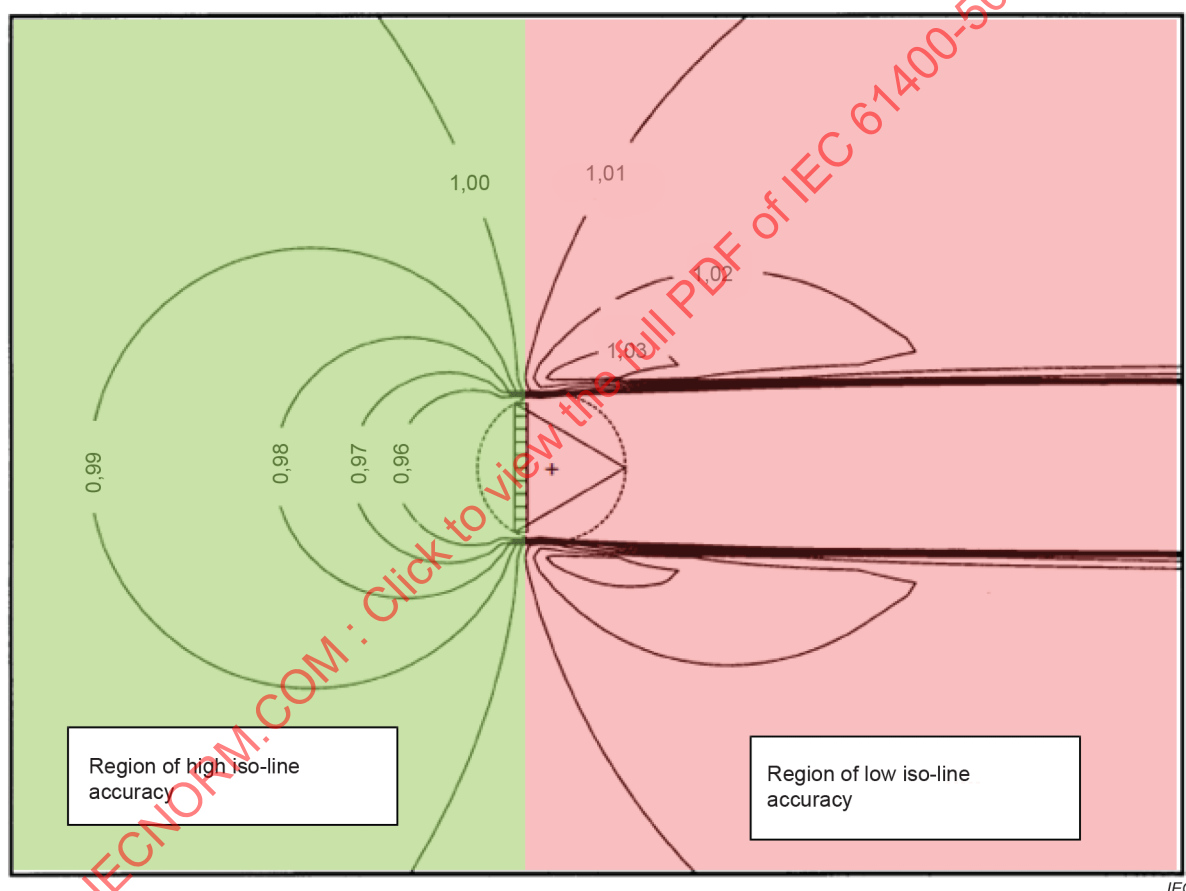
NOTE The figure shows the centreline wind speed deficit and the actuator disc representation of the meteorological mast with the leg distance L_m and distance R_d from the centre of the meteorological mast (m) to the point of observation.

Figure 14 – Representation of a three-legged lattice meteorological mast

The flow distortion is a function of the assumed thrust coefficient, C_T , which in turn depends upon the solidity of the meteorological mast and the drag on the individual members. C_T can be regarded as the total drag force per unit length of the mast, divided by the dynamic pressure and the leg distance L_m .

The leg distance shall represent the face width. For significant leg diameters (leg diameter greater than 5 % of face width) one leg diameter should be added to the distance between the leg centres to get the leg distance.

Figure 15 shows the computed flow around a lattice meteorological mast having a C_T of 0,5. At typical distances of the anemometer, $R_d > 2 \times L_m$, this flow disturbance is very little affected by meteorological mast orientation (whether the face or a corner is oriented into the wind), and it can therefore be assumed to be the same. However, Figure 15 is accurate only for the upwind zone of least disturbance as indicated by the green shading.



NOTE The flow speed is normalized by free-field wind speed (from the left); the analysis was implemented by two-dimensional Navier-Stokes computation and actuator disc theory for which the green shaded region on the left is considered accurate and the red shaded region on the right inaccurate due to inaccuracies in modelling flow in and behind the separation zone.

Figure 15 – Iso-speed plot of local flow speed around a triangular lattice meteorological mast with a C_T of 0,5

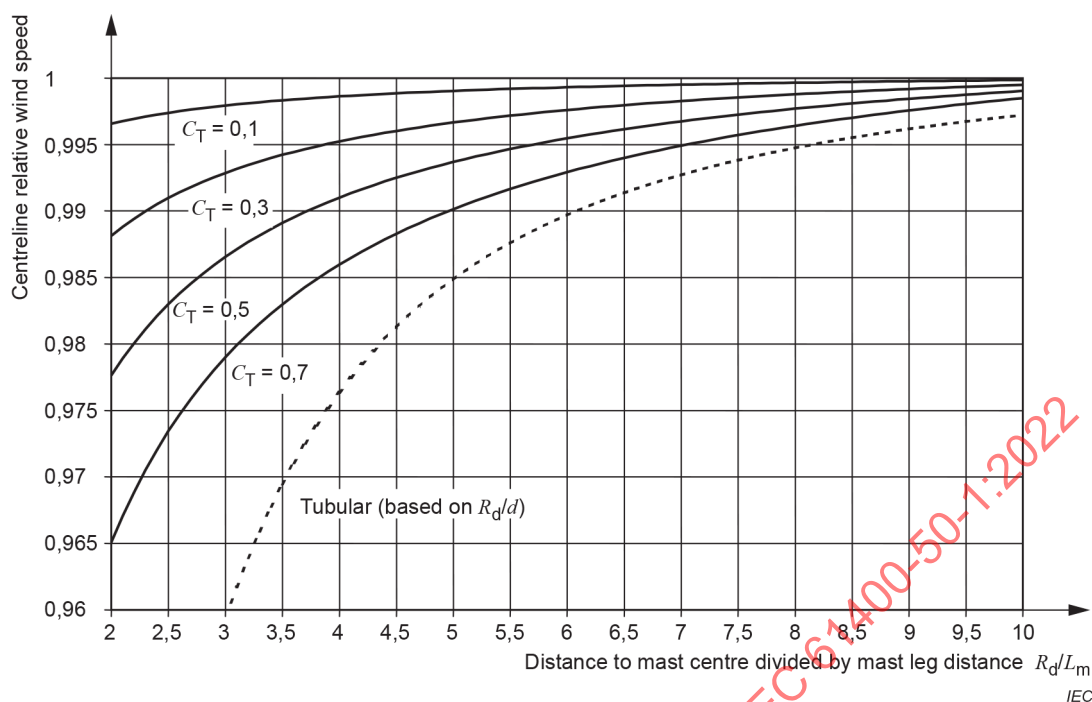


Figure 16 – Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a triangular lattice meteorological mast of leg distance L_m for various C_T values

When the flow direction is perpendicular to a meteorological mast face, minimum distortion is obtained when the anemometer is placed at an angle of 90° to the flow direction. Otherwise, the flow distortion can be determined by considering the upwind deficit as a function of distance. Figure 16 shows the computed centreline relative wind speeds for lattice towers having various C_T values. Note, however, that wind speed distortion can be higher than shown in Figure 16 if winds approach from angles greater than 100° from the anemometer boom alignment.

Equation (28) can be used to estimate the centreline wind speed deficit U_d as a function of C_T and R_d/L_m :

$$U_d = 1 - \left(0,062C_T^2 + 0,076C_T \right) \cdot \left(\frac{L_m}{R_d} - 0,082 \right) \quad (28)$$

C_T can be estimated from local building codes or, within the ranges specified, from Table 6. In this table, the solidity S is defined as the ratio of the projected area of all structural members on the side of the meteorological mast to the total exposed area.

Table 6 – Estimation method for C_T for various types of lattice mast

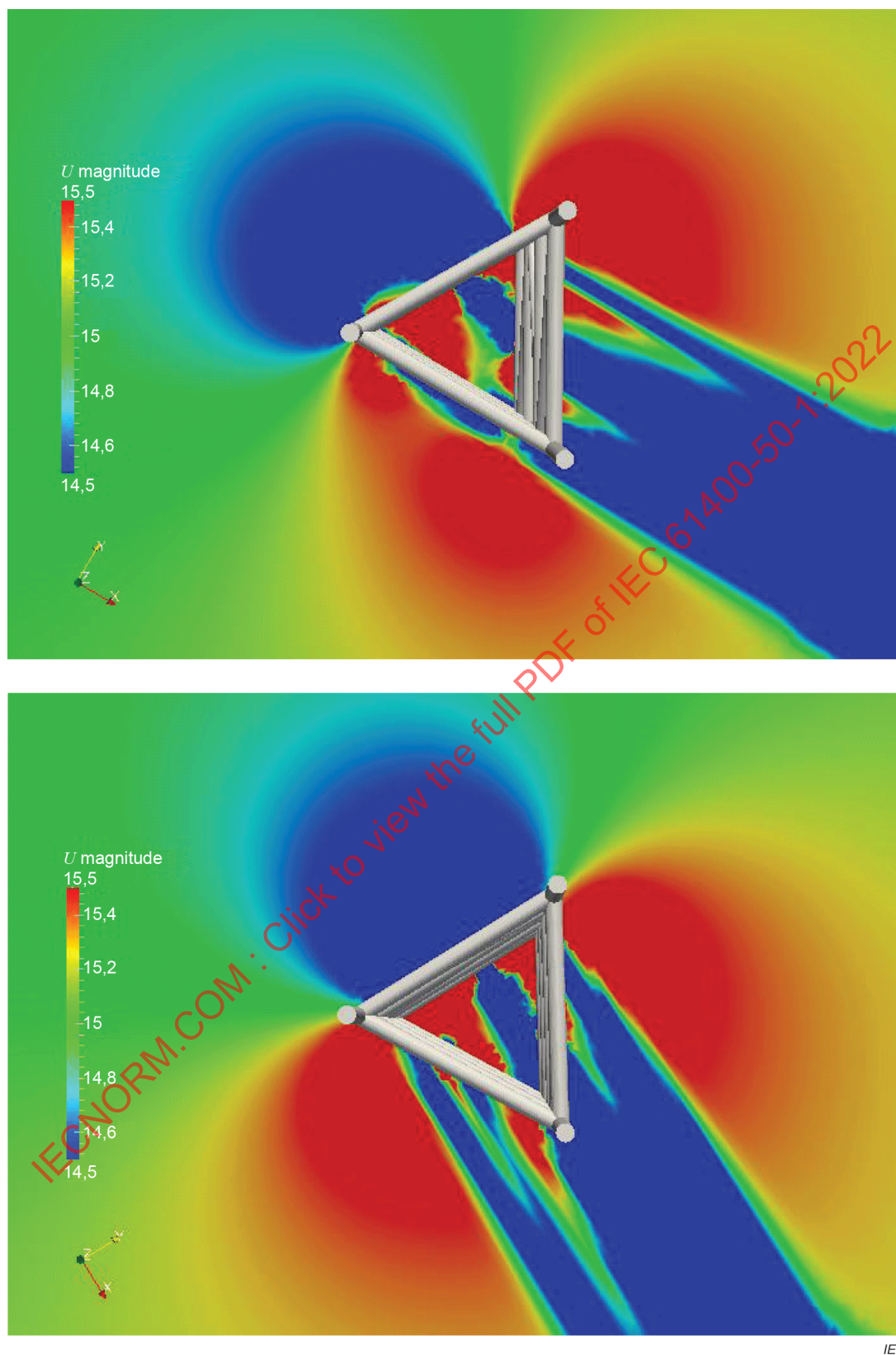
Type of mast	Plan section	Expression for C_T	Valid range
Square cross-section, members with sharp edges		$4,4(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,5$
Square cross-section, round members		$2,6(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,3$
Triangular cross-section, round members		$2,1(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,3$

Alternatively, if the desired maximum centreline wind speed deficit is specified, the distance R_d can be obtained from Equation (29):

$$R_d = \frac{L}{\frac{1 - U_d}{(0,062C_T^2 + 0,076C_T)} + 0,082} \quad (29)$$

For a lattice meteorological mast with a C_T of 0,5 and a 99,5 % centreline wind speed deficit, R_d shall be 5,7 times the meteorological mast leg distance L_m . A wind speed deficit of 99 % will reduce the distance R_d to 3,7 times the meteorological mast leg distance.

The above equations and charts represent somewhat idealized meteorological mast geometry and flow conditions. The flow interference will be significantly more complex in those cases where secondary support structures such as lattice work, cross-bracing, cable ladders, flanges and attachment brackets are also present at or near the height level of the anemometer or where the flow direction is not parallel to the meteorological mast cross section axis of symmetry. Figure 17 illustrates the CFD derived flow (from the left) where the relative position and hence influence of the cross-bracing on the flow distortion changes with height. Note that the distortion is asymmetric but that the optimum location for minimum flow distortion is still at 90° to the flow direction.



For flow direction, see the red arrow lower left in each figure graphic.

Figure 17 – 3D CFD derived flow distortion for two different wind directions around a triangular lattice meteorological mast ($C_T = 0,27$)

10.4.4 Flow distortion correction of side-mounted anemometers

Correction of side-mounted anemometers for meteorological mast flow distortion is permitted and further described in Annex B. The technical basis for the correction and the effect of the correction shall be documented. The booms shall have identical orientations to ensure similarity of flow distortion between different heights. The meteorological mast and boom design should have similar flow distortion effect at the sensor with a maximum allowed difference in wind speed distortion of 1 % between all different heights. The meteorological mast cross-sectional dimensions should be consistent at each elevation, thus in the case of free-standing meteorological masts where the meteorological mast cross-sectional area is larger at the lower elevations, special care should be taken following the recommendations in 10.4.2 and 10.4.3. An alternative option is to mount a second anemometer at each measurement height on a separate boom and to limit the measurement sector such that the wind speed measurements do not deviate by more than 1 %.

10.5 Lightning protection

A lightning finial (attractor) can protect the top-mounted instruments. If lightning protection is installed, a number of precautions shall be taken. The lightning finial should be mounted at the top of the meteorological mast in such a way that

- a) the anemometer is separated horizontally by at least 30 times the finial diameter from the finial, and
- b) the anemometer is not in the wake of the finial when the wind is in the most important direction sectors.

NOTE The most important direction sectors depend on the use case of the wind measurements.

Where these conditions cannot be met, the flow distortion on the anemometer shall be assessed and an additional uncertainty shall be added.

10.6 Mounting of other meteorological instruments

The control anemometer should be located as close to the primary anemometer as possible, whilst still satisfying the minimum separation requirements of 10.2 to 10.4, in order to provide a good correlation between the two instruments during the test. This correlation should be validated to ensure that the primary anemometer does not change its calibration during the test (see Clause 9). However, the control anemometer shall not interfere with the primary anemometer and shall also be free of flow disturbance from other instruments.

The wind direction sensor shall be mounted 4 m to 10 m below the primary anemometer. It shall be mounted so that flow distortion effects are minimized with respect to the measurement sector. The horizontal separation of the wind direction sensor from the meteorological mast should be at least half that required for an anemometer.

Temperature, humidity and pressure sensors shall be mounted in accordance with the requirements of the specific use case standard (e.g. power performance) but in any case shall be located at a minimum of 1,5 m below the primary anemometer whilst meeting the mounting requirements for other instruments defined in 10.2 and 10.3. The temperature sensor shall be mounted in a radiation shield. The pressure sensor may be mounted in a weatherproof box. However, care should be taken to ensure that the box is properly vented so that pressure readings are not influenced by the pressure distribution around the box.

Where the height at which atmospheric pressure is measured is not the height of interest (e.g. hub height), the atmospheric pressure shall be adjusted to the height of interest in accordance with ISO 2533:1975. Furthermore, the air temperature shall be adjusted to the height of interest assuming that the atmosphere varies in accordance with ISO 2533:1975.

Examples of suitable arrangements for other meteorological instruments and top-mounted anemometers are shown in Figure 10 and Figure 11.

10.7 Data acquisition system

A digital data acquisition system having a sampling rate per channel of at least 1 Hz shall be used to collect measurements and store either sampled data or statistics of the data sets as required by the specific use case.

The calibration and accuracy of the data system chain (transmission, signal conditioning and data recording) shall be verified by injecting known signals from a traceable, calibrated source at the transducer ends and comparing these inputs against the recorded readings. As a guideline, the uncertainty of the data acquisition system should be negligible compared with the uncertainty of the sensors.

11 Uncertainty of wind speed measurement

11.1 Category B uncertainties: Wind speed – Introduction

The wind speed measurement uncertainty consists of two components, each of which again consists of multiple subcomponents. These components are:

- a) the uncertainty related to use of sensing hardware (cups, sonic);
- b) the uncertainty related to the methods applied.

The symbol for this uncertainty component is $u_{V,i}$.

There can be further components to the wind speed uncertainty which are specific to the use case. Refer to the appropriate use case standard for further details.

These uncertainty components as well as the sub-components are discussed in 11.2 to 11.4.

11.2 Category B uncertainties: Wind speed – Hardware

The wind speed uncertainty related to hardware consists of the following component, which again consists of multiple subcomponents:

- a) the uncertainty related to use of sensors placed in a meteorological mast (cup anemometers and sonic anemometers).

The symbol for this uncertainty component is $u_{VHW,I}$.

11.3 Category B uncertainties: Wind speed – Meteorological mast mounted sensors

11.3.1 General

This uncertainty component covers the uncertainty related to the use of cup anemometers and sonic anemometers mounted on meteorological masts (either top mounted or side mounted).

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,i}$ (V stands for wind speed and S stands for sensors).

This uncertainty component has six sub-components:

- a) the uncertainty related to the calibration of the sensor before start of the measurement campaign;
- b) the uncertainty related to the calibration of the sensor during or after the measurement campaign;
- c) the uncertainty related to the operational characteristics as determined by the classification of the sensor;

- d) the uncertainty related to the mounting of the sensor;
- e) the uncertainty related to the mounting of the lightning finial;
- f) the uncertainty related to the data acquisition of the signal from the sensor.

11.3.2 Pre-calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to calibration of the sensor before the test. This includes the variability of repeated tests for one test facility as well as the variability of repeated tests between various facilities.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,precal,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause 8.

For a specific measurement campaign, the values as indicated on the calibration for the sensors employed shall be used for the uncertainty calculation.

11.3.3 Post-calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the in-situ calibration and/or the post-calibration of the sensor during and/or after the specific measurement campaign (e.g. power performance test).

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,postcal,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause 9.

If both an in-situ calibration has been done during the specific measurement campaign and a post-calibration has been done after the specific measurement campaign, the magnitude for this uncertainty component shall be taken from the post-calibration.

If a post-calibration is done, the magnitude of this uncertainty component shall be the maximum difference between the pre-calibration and post-calibration in the wind speed range of 4 m/s to 12 m/s, up to a maximum of 0,2 m/s.

Owing to the inherent uncertainty of the calibration, the expectation is that small differences will occur between the pre-calibration and post-calibration. The best estimate of the calibration value for a specific sensor will be the average of the calibrations done; in the limit of a very large amount of calibrations the average will converge towards the centre of the distribution.

As only the pre-calibration is used to determine the wind speed from the sensor, the maximum difference can therefore be used as an added uncertainty contribution.

If only an in-situ calibration is done according to Clause 9, the magnitude of this uncertainty component shall be the maximum value of δ in the wind speed range of 4 m/s to 12 m/s, up to a maximum of 0,2 m/s.

11.3.4 Classification

This uncertainty component covers the uncertainty related to the operational characteristics of the sensor as determined by the classification of the sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,class,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause 6.

The magnitude of this uncertainty shall be taken from the classification report. The terrain type that the sensor is used in shall match the terrain type of the classification of the sensor (class A, B or S).

A reference to the classification report shall be included in the use case measurement report.

The measured range of the influence parameters used for the classification as defined in Clause 6 shall be reported for the same data set used for the measurement campaign report. If upflow is not measured, compliance with the accuracy class shall be justified with reference to the local terrain slopes for the wind directions experienced by fitting a plane to the terrain within a distance of five times the measurement height relative to the position of the WME in accordance with IEC 61400-1:2019 [5], 11.2.1.

Where wind measurements from multiple sources or masts are combined to derive results (e.g. the reference mast and turbine mast anemometers used to derive a site calibration in accordance with IEC 61400-12-3 or a multi-mast resource assessment relating wind speed measurements from multiple masts distributed about a site for a shorter term to a longer term reference mast on the site), the operational uncertainty of the reference anemometer shall be included in the uncertainty component of the dependent wind speed measurement. This can be none, some or all of the reference anemometer uncertainty from the concurrent mast measurement campaign (e.g. the site calibration), depending on whether the measured range of influence parameters experienced by the reference sensor on the reference meteorological mast during the concurrent campaign is significantly different from the range of influence parameters experienced by the reference sensor on the reference meteorological mast during the non-concurrent periods of the campaign.

By default, half of the operational uncertainty of the reference mast anemometer and all of the operational uncertainty of the secondary mast anemometer during the concurrent mast campaign and half of the operational uncertainty of the anemometer during the non-concurrent part of the campaign shall be included. These shall be added using the root-sum-square approach.

11.3.5 Mounting

This uncertainty component covers the uncertainty related to the mounting of the sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,mnt,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause 10.

This uncertainty component has three default values corresponding to the three mounting arrangements allowed by Clause 10 (single top-mounted anemometer, side-by-side top-mounted anemometer and side-mounted anemometer).

For a single top-mounted anemometer the default magnitude for this uncertainty component is 0,5 % of the measured wind speed.

For a side-by-side top-mounted anemometer the default magnitude for this uncertainty component is 1,0 %.

For a side-mounted anemometer the default magnitude for this uncertainty component is one the following:

- a) for non-flow-corrected signals, 1,5 % of the measured signal;
- b) for a flow-corrected signal in accordance with 10.4.4, the root-sum-square of half the mean correction applied to the wind speed signal and 0,5 % of the measured signal. Wake effects shall be excluded for the correction to be applied.

The same correction principle can also be applied to two top-mounted anemometers in a goal-post configuration, with the same default magnitude for the flow-corrected signal.

11.3.6 Lightning finial

This uncertainty component covers the uncertainty related to a possible top-mounted lightning finial and its influence on a top-mounted anemometer when the requirements in 10.5 for the mounting of the lightning finial cannot be met.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,igt,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component where the requirements of 10.5 are not met is 0,1 % to 0,2 % of the wind speed signal.

11.3.7 Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the wind speed signal.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dVS,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % to 0,2 % of the full range of the measured wind speed signal.

Considering a wind speed range of 30 m/s of the measurement channel and an uncertainty of the data acquisition system of 0,1 % of this range, the standard uncertainty from data acquisition is 0,03 m/s.

11.4 Category B uncertainties: Method – Cold climate

This uncertainty component covers the uncertainty related to the influence of measurement in cold climate on the classification of the anemometers.

The symbol for this uncertainty component is $u_{M,cc,i}$.

If an extended temperature range is required, the uncertainty component for the sensor classification shall be based on a class C, D or S classification report; this is covered by the uncertainty component $u_{VS,class,i}$.

Although ice detection is recommended, it cannot be avoided that snow and ice will accrete on the mounting structure and thus influence the measured wind speed. This aspect is covered by the uncertainty component as discussed here.

Please note that these considerations already should be considered for 'normal' class B measurements, as class B extends to –10 °C and most snow and ice occurs around 0 °C. If a measurement is exposed to more than a few days of snow and/or ice, this additional uncertainty component shall be applied. Otherwise this component can be set to zero.

The default magnitude of this uncertainty component is 0,5 % to 1 % of wind speed.

11.5 Combining uncertainties

11.5.1 General

In 11.5, the equations and further considerations to combine uncertainty components to an aggregate level are presented and discussed. An example is the calculation of the site calibration uncertainty based on the uncertainty components of the site calibration uncertainty.

11.5.2 Combining uncertainties in the wind speed measurement ($u_{V,i}$)

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for wind speed, $u_{V,i}$:

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{VHW,i}^2 + u_{VM,i}^2} \quad (30)$$

where

$u_{VHW,i}$ is the uncertainty on the hardware used and is one of $u_{VS,i}$, $u_{VR,i}$ or $u_{REWS,i}$;

$u_{VM,i}$ is the uncertainty related to the method applied.

11.5.3 Combining uncertainties in the wind speed measurement from cup or sonic anemometer ($u_{VS,i}$)

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for wind speed measurements from cup or sonic anemometer, $u_{VS,i}$:

$$u_{VS,i} = \sqrt{u_{VS,precal,i}^2 + u_{VS,postcal,i}^2 + u_{VS,class,i}^2 + u_{VS,mnt,i}^2 + u_{VS,lgt,i}^2 + u_{dVS,i}^2} \quad (31)$$

where

$u_{VS,precal,i}$ is the uncertainty relating to the pre-calibration;

$u_{VS,postcal,i}$ is the uncertainty related to the post-calibration;

$u_{VS,class,i}$ is the uncertainty related to the classification of the sensors;

$u_{VS,mnt,i}$ is the uncertainty related to the mounting of the sensors;

$u_{VS,lgt,i}$ is the uncertainty related to the flow distortion from lightning finial;

$u_{dVS,i}$ is the uncertainty related to the data acquisition of the wind speed signal.

12 Reporting

The test report shall contain the following information.

a) A description of the site where the wind measurement equipment is located:

- 1) photographs of all measurement sectors taken from the WME location;
- 2) a test site map showing the surrounding area covering a radial distance of at least 20 times the WME top measurement height and indicating the topography, location of the wind measurement equipment, significant obstacles, existing wind turbines, and measurement sector (where the specific use case restricts this to less than 360°);
- 3) a table of the coordinates and elevation of WME and any significant obstacles considered in the assessment of obstacles.

b) A description of the test equipment:

- 1) identification of all WME and data acquisition system, including documentation of calibrations of sensors, wind measurement equipment, transmission lines, and data acquisition system;
- 2) sketch of the arrangement of the meteorological mast showing dimensions of the mast and instrument mounting, to document conformance with Clause 10;

- 3) description of method to ensure the calibration of the WME was maintained over the duration of the measurement period and documentation of results that show that the calibration is maintained.
- c) A description of the measurement procedure:
- 1) documentation of the procedural steps, test conditions, sampling rate, averaging time, and measurement period, including:
 - documentation of the calibrations, corrections or transfer functions applied by the data logger and/or by post-processing;
 - 2) a test log book that records all important events during the measurement campaign, including:
 - a listing of all maintenance activities that occurred during the test;
 - 3) a complete list of all filter criteria used to produce the reported result, including:
 - the parameter, measurement or time period or combination of parameters being filtered on;
 - the range or logical criteria for the filter;
 - the justification for the filter;
 - the order that the filters were applied with the number of points removed in each iteration. Alternatively, the number of data points the filter would remove from the database by itself;
 - the starting number of datasets in the database and the final number of datasets after all filters have been applied.
- d) Measured data shall be presented in both tabular and graphical formats, providing statistics of important meteorological parameters:
- 1) scatter plots of mean wind speed and turbulence intensity as a function of wind direction;
 - 2) scatter plots of the turbulence intensity as a function of wind speed, and the average turbulence intensity in each wind speed bin shall be presented.
- e) Uncertainty of measurement (see Clause 11):
- 1) uncertainty assumptions on all uncertainty components shall be provided.
- f) Deviations from the procedure:
- 1) any deviations from the requirements of this document shall be clearly documented in a separate clause. Each deviation shall be supported with the technical rationale and an estimate of its effect on test results.

Annex A (informative)

Wind tunnel calibration procedure for wind direction sensors

A.1 General requirements

The general requirements for the calibration of wind direction sensing devices including wind vanes and sonic anemometers operating as wind direction sensing devices are summarized as follows.

- a) The calibration of the wind direction sensor shall be carried out in an operating wind tunnel that is suitable for the calibration of wind direction sensors.
- b) All transducers and measuring equipment relevant for the calibration of wind direction sensors shall have traceable calibrations. Calibration certificates and reports shall contain all relevant traceability information (e.g. including details of accreditations where available). All reference standards used during the calibration of the wind direction sensor shall be stated within the test report of the calibration campaign.
- c) Prior to every calibration campaign (when a batch of wind direction sensors is being calibrated) the integrity of the experimental setup shall be verified by means of a comparative calibration of the calibration facility's "quality control wind direction sensor".
- d) Flow quality measurements shall be carried out in accordance with Clause A.2.
- e) The repeatability of the calibration shall be verified in accordance with Clause A.2.
- f) Wind direction sensor calibration shall be supported by a thorough assessment of calibration uncertainty, carried out in accordance with ISO/IEC Guide 98-3.

A.2 Requirements of the wind tunnel

The wind tunnel shall meet the requirements of Clause 8.

The presence of the wind direction sensor shall not substantially affect the direction of the flow (field) in the wind tunnel. The presence of the wind direction sensor during its calibration can cause a flow diversion that is not encountered by the wind direction sensor when operated in the open field. To keep these effects at an acceptable level, the blockage ratio – defined as the ratio of the wind direction sensor frontal area with the fin oriented in line with the flow plus its mounting system to the total test section area – shall not exceed 0 for an open test section and 0,05 for a closed test section.

Special focus shall additionally be applied to verify that the horizontal direction of the wind tunnel flow is aligned parallel in relation to the test section centreline. The uniformity of the flow field (as required in Clause 8) and the direction of flow shall be assessed prior to the calibration of the wind direction sensor. The flow direction shall be surveyed relative to the test section centreline at the representative location of the wind direction sensor by utilizing direction-sensitive flow measuring devices (i.e. two-hole conical yaw meter). The measured horizontal direction of flow shall be parallel to the test section centreline within $0,2^\circ$, the deviation shall be considered in the data evaluation.

The facility shall undergo a detailed examination of the repeatability of wind direction sensor calibrations. The facility shall designate at least one reference wind direction sensor for use in these tests. The reference wind direction sensor(s) shall be used only for checking performance of this and other wind direction sensor calibration facilities. The repeatability examination shall include at least 10 calibrations of the quality control wind direction sensor. The repeatability test shall not be conducted in succession. It is more representative if the calibrations are conducted over a longer time span. This will provoke a greater range of atmospheric conditions during the tests. The maximum difference between calibrations of the same reference sensor should be less than $0,5^\circ$ at 8 m/s wind speed throughout the measuring range of the wind direction sensor excluding the north band (wind vanes) where usually undefined conditions exist. This process shall be repeated after any modification or recalibration of the facility.

The facility's average reference wind direction sensor calibration (as determined from repeatability tests described above) should agree with the average result of other calibration facilities within a deviation of the indicated equivalent flow direction of less than 1° throughout the measuring range, excluding the north band, at a wind speed of 8 m/s.

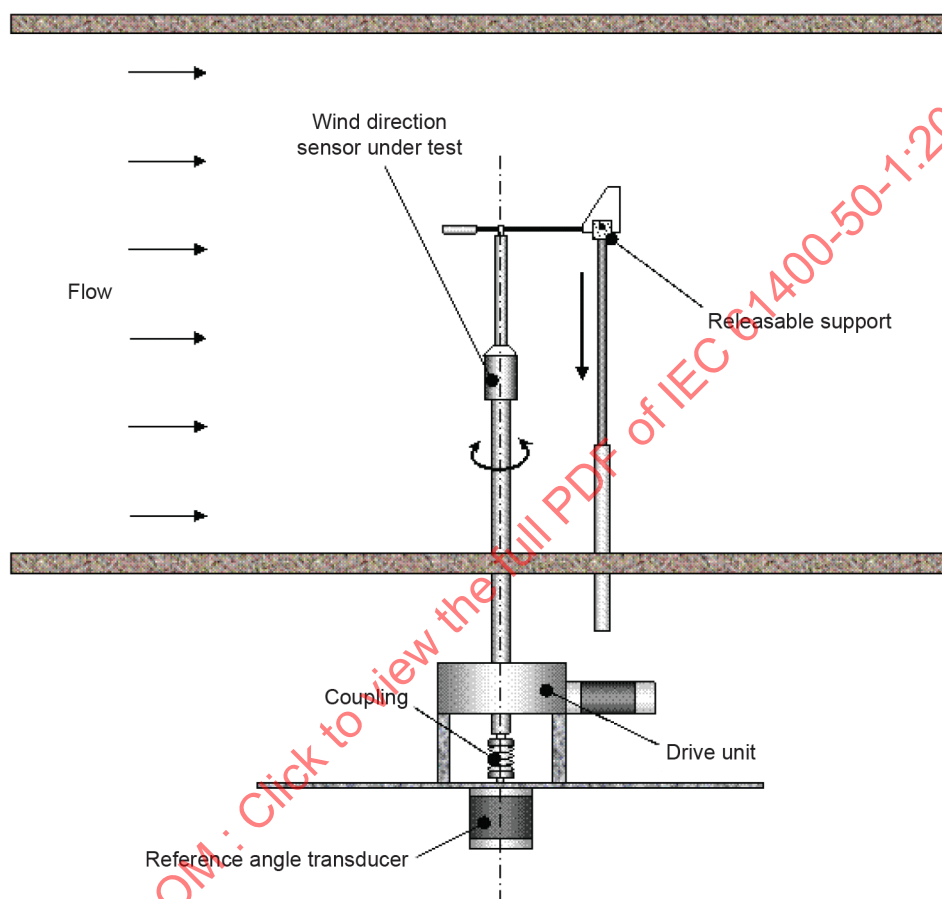
A.3 Instrumentation and calibration setup requirements

Dedicated external signal conditioning equipment such as instrument amplifiers shall be calibrated in isolation from the wind direction sensor, so that the wind direction sensor's calibration can be derived and reported in isolation from the signal conditioning equipment. The resolution of the data acquisition system used shall be at least 12 bits. In the case of an analogue voltage instrument, the signal shall be adequately buffered to prevent its attenuation by low impedance logging equipment. Such effects are easily overlooked since "believable" signals are still registered. The reference angle measurement system shall be the direct type (direct angle encoding, counting of increments, measuring proportional quantity such as magnetic, inductive or potentiometric methods). The shaft of the reference angle measurement system shall be connected to the shaft of the wind direction sensor rotation mechanism by means of a backlash-free coupling. The coupling shall be resistant to torsion and flexible to bending (flexion-elastic) in order to achieve the maximum possible elimination of assembly-influencing quantities (tolerances of concentricity and angles of both axes of rotation). The axes of rotation shall be oriented concentric and coaxial. The housing of the reference angle measurement system shall be securely fixed in a backlash-free manner. The reference angle measurement sensor shall be positioned in the tunnel as accurately as possible, and it may not disturb the wind direction sensor under test. The maximum deviation allowed is $0,1^\circ$.

During calibration the wind direction sensor shall be mounted on top of a tube in order to minimize flow distortion. This tube shall be of the same dimensions as the one on which the wind direction sensor will be mounted in service in the free atmosphere. It is important to ensure that the flow field around the wind direction sensor is not influenced by the presence of any reference wind speed measurement equipment. Conversely the presence of the wind direction sensor shall not affect the direction of the flow in a significant way.

The wind direction sensor shall be mounted at the test section perpendicular to the flow field of the wind tunnel as accurately as possible. The maximum deviation allowed is $0,2^\circ$. The fin shall also be aligned relative to the datum line/north mark and held there in position by an adjustable support until the calibration process begins. An accurate alignment of the wind direction sensor and its fin can be achieved by an appropriate device such as a mechanical jig or the employment of an optical instrument (i.e. 2D laser level). The wind direction sensor output signal shall be examined during calibration to ensure that it is not subject to interference or noise. The determination of the wind tunnel flow speed shall be in accordance with Clause 8.

The wind direction sensor shall be aligned relative to the datum line (centreline) of the wind tunnel. The mechanical reference indicator (usually the north mark) of the wind direction sensor shall be properly aligned in relation to the datum line of the wind tunnel. It is not acceptable to perform the angular alignment of the wind direction sensor just by utilizing its electrical output signal. This would provoke an angular deviation between the external reference mark and the indicated value from the internal angular transducer of the wind direction sensor. This deviation would later be difficult to identify since the alignment of the vane at the meteorological mast is usually realized by means of the north mark. The proper angular alignment for the calibration shall be assured using an adequate method to measure the external reference mark.



IEC

Figure A.1 – Example of calibration setup of a wind direction sensor in a wind tunnel

A.4 Calibration procedure

Generally the wind direction sensor shall be directionally positioned by means of an adequate rotation mechanism (i.e. rotary table) while the direction and the speed of the flow remains unchanged. The output signal of the wind direction sensor is then assessed in relation to the reference angle measurement system installed at the rotation mechanism. Figure A.1 illustrates an example of a calibration setup in a wind tunnel.

The procedure for the calibration of wind direction sensors is as follows.

The wind direction sensor is rotated at a constant yaw rate or stepwise. The indicated yaw angle (measured value of the wind direction sensor) is simultaneously recorded together with the reference yaw angle (measured value of the rotation mechanism). The selected rate of rotation is a compromise between adequate measurement precision and feasible measurement time. The recommended rate is $0,5^\circ/\text{s}$. For a stepwise procedure, it is important to have an adequately fine increment of less than 3° in order not to miss erroneous direction data. The sampling frequency shall be high enough (usually 1 Hz or faster) to have a sampling bias within acceptable limits. The temperature of the wind direction sensor shall not vary significantly during its calibration to minimize an additional uncertainty due to temperature-induced effects upon the indicated direction. A run-in time of > 1 min shall be included to minimize temperature deviation between the wind direction sensor and the flow in the wind tunnel prior to the calibration run.

The calibration process shall consist of at least two complete yaw sweeps (including the north jump) for each of the above procedures. The two sweeps shall be in opposite directions to account for possible hysteresis effects. There shall be an angular overlap of the data points of at least 10° at the beginning and the end of each sweep. A possible sequence can cover a clockwise sweep from -10° to 370° and a counterclockwise run from 370° to -10° for the subsequent sweep.

The calibration shall be performed at a constant wind speed of $(8 \pm 0,8)$ m/s. The average wind speed should not vary throughout the duration of the wind direction sensor calibration.

A.5 Data analysis

Only the horizontal wind vector shall be considered during the wind direction sensor data assessment. The evaluation of the wind direction signal shall, for both wind vanes and sonic anemometers, be performed using the method of vector averaging as described in ISO 16622 [6].

All relevant data shall be evaluated as bin-averaged data. Data of the reference yaw sensor are hereby used as a basis to define the bin interval for the remaining database. The bin-width shall have at least a resolution of 10° , centred at 5° , 15° , etc. of the yawing device. The bin-width shall be reduced to adequately assess the behaviour of certain sensor types (i.e. sonic anemometer) or to better represent sensor characteristics (i.e. excessive non-linearity).

A.6 Uncertainty analysis

It is important to identify the uncertainty of the horizontal flow direction measurement in conjunction with the wind direction sensor.

An uncertainty analysis shall be carried out in accordance with ISO/IEC Guide 98-3 for the expression of uncertainty comprising both category A and category B uncertainty. The magnitude of the net uncertainty shall be assessed statistically and shall account for:

- measurement uncertainty of the reference angle measuring system (reference angle transducer, coupling, mounting, electrical transducers, digital conversion, etc.);
- uncertainty of the flow direction sensed by the wind direction sensor, including an assessment of possible flow diversion due to the presence of the wind direction sensor;
- mounting uncertainty of the wind direction sensor (alignment of north mark and fin relative to the wind tunnel centreline);
- category A uncertainty due to short-term scatter (signal of wind direction sensor can vary over time due to unsteady flow conditions);
- category A uncertainty due to long-term scatter (scatter/drift of calibration results of the reference wind direction sensor over time for a number of calibrations);

- f) uncertainty when measuring the electrical signal of the wind direction sensor (electrical transducer, digital conversion, etc.).

A.7 Reporting format

The relevant documentation shall provide information on the procedure followed and the facility used for calibrating the wind direction sensor (test report on the calibration campaign) and on the individual wind direction sensor calibration (wind direction sensor calibration report). The test report on the calibration facility setup shall contain the following information as a minimum:

- 1) description of the wind tunnel (including test section, settling chamber, flow straighteners, fan arrangement);
- 2) sketch of the wind tunnel showing the exact positions of the wind direction sensor and pitot tube(s) in the test section;
- 3) flow quality measurements;
- 4) turbulence measurements;
- 5) instrumentation certificates;
- 6) measurement procedure;
- 7) data evaluation procedure;
- 8) repeatability documentation of wind direction sensor calibration;
- 9) uncertainty analysis;
- 10) deviations from these requirements.

The calibration report of a wind direction sensor shall as a minimum contain the following information:

- a) make, type and serial number of the tested wind direction sensor and fin serial number if the item can be separated;
- b) tube diameter of the mounting system;
- c) make, type and serial number of external converters, if taken (i.e. frequency-to-voltage converters);
- d) name and address of the customer;
- e) signatures from the persons who carried out the calibration, checked the results and approved their issue;
- f) name of the wind tunnel;
- g) environmental conditions during calibration (air temperature, barometric air pressure and humidity);
- h) regression parameters (offset and slope), in tabular and graphical presentation of all calibration points;
- i) information of measured north dead-band width;
- j) table containing the following information:
 - 1) bin number;
 - 2) average reference (flow) direction per bin;
 - 3) average indicated direction signal of the wind direction sensor per bin;
 - 4) uncertainty per bin;
 - 5) wind tunnel flow speed per bin;
- k) graphical presentation that includes:
 - 1) indicated wind direction sensor signal as a function of reference yaw angle per bin;
 - 2) scatter plot of wind direction sensor signal vs. reference yaw angle if sweep is used;
 - 3) scatter plot of residuals of sensor signal vs. reference yaw angle;

- 4) residuals per bin (deviation between indicated wind direction sensor signal and result of wind direction sensor calibration function).
- 5) uncertainty associated with each measuring point;
- l) reference to the corresponding calibration campaign report and date of the calibration;
- m) photo showing the wind direction sensor and the mounting in the wind tunnel;
- n) rate of angular velocity, data bin-width and number of acquired data points per bin.

A.8 Example of uncertainty calculation

A.8.1 General

The determination of the measurement uncertainty is based on the assumption that the following three main sources contribute to the total uncertainty:

- a) determination of flow direction in the wind tunnel (type B);
- b) uncertainty due to the wind direction sensor to be calibrated (wind vane, sonic anemometer) (category B);
- c) repeatability (category A).

In the following, only category B uncertainties are considered. To determine the total uncertainty, the category A component shall be included as well.

A.8.2 Measurement uncertainties generated by determination of the flow direction in the wind tunnel

To evaluate the measurement uncertainty in the determination of the flow direction, the following individual uncertainties shall be considered:

A.8.3 Uncertainty contribution by uncertainties in the determination of the geometrical centreline α_{CL} (wind tunnel centreline)

Assuming that the centreline is defined with simple geometrical methods and the lines are accurate to 2 mm for a test section of 1,00 m by 2,00 m, the uncertainty of the geometrical centreline is $0,1^\circ$. Accepting a rectangular distribution, the contribution to the total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

A.8.4 Contribution by uncertainties in the determination of flow direction α_{dir}

A.8.4.1 General

Calibration of flow direction occurs by means of a wedge type probe. A well designed wind tunnel shows practically no deviation of the flow direction from the geometrical centreline of the wind tunnel. The contribution to uncertainty is deemed to be $0,1^\circ$. Accepting a rectangular distribution, the contribution to the total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

A.8.4.2 Contribution by uncertainties in the calibration of the reference yawing sensor α_{sensor}

The reference angle is defined by using an electronic yawing sensor. Contribution to uncertainty resulting from the calibration of this sensor is assumed to be $0,35^\circ$. Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,2^\circ$.

A.8.4.3 Contribution by aligning the centreline with the north marking of the wind direction sensor α_{set}

Using a laser, the sensor (north marking, fin, wind tunnel centreline) can be aligned. Assuming that the laser beam has a maximum deviation of 1 mm from the centreline, the uncertainty contribution is less than $0,1^\circ$. A contribution to total uncertainty of $0,1^\circ$ is assumed. Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

A.8.4.4 Contribution due to influence of the angle between the axes of rotation $\alpha_{\text{incl.1}}$

When mounting the reference unit on the turning drive, errors can occur in the angle between the rotary axes of the turning drive and the reference unit (inclination of the calibrated object relative to the calibration device inclination). The rotary axes do not align, but a coupling between the shafts of the reference and of the calibrated object compensates within certain limits for the effect of the position of the angle measurement planes. The angle error can be calculated using Equation (A.1):

$$\delta\alpha_{\text{incl.1}} = 0,125 \cdot (2 \cdot p / r_a)^2 \cdot \sin\alpha \quad (\text{A.1})$$

where, in accordance with VDI/VDE 2648 [7],

α is the angle to be measured (calibration value);

p is the axial run-out deviation;

r_a is the effective radius of angle measurement.

With an assumed deviation of the levels of 1 mm and a radius of 50 mm for the yaw sensor, the extreme case of $\alpha = 90^\circ$ results in an uncertainty of $0,01^\circ$.

A.8.4.5 Contribution to uncertainty by potential eccentricity between wind direction sensor and reference unit α_{Exz}

By mounting the wind direction sensor on the turning drive of the reference unit, eccentricities can occur, referring to the parallel misalignment between the respective rotary axes. The rotary axes do not align. The angle error that can occur because of the parallel misalignment can be calculated using Equation (A.2):

$$\delta\alpha_{\text{Exz}} = 2 \cdot (e / r_a) \cdot \sin(\alpha / 2) \quad (\text{A.2})$$

where, in accordance with VDI/VDE 2648 [7],

α is the angle to be measured (calibration value);

e is the eccentricity;

r_a is the effective radius of angle measurement.

Based on an assumed eccentricity of the rotary axes of 0,2 mm and a radius of 50 mm, the uncertainty of the extreme case of $\alpha = 180^\circ$ is $0,2^\circ$.

A.8.4.6 Contribution to measurement uncertainty by the wind direction sensor

Wind direction sensors can have different output signals. There are also digital sensors indicating directly the azimuth direction angle in degree. Usually the specimen is a wind direction sensor with an analogue output signal (current or voltage) or a potentiometric sensor.

A.8.4.7 Contribution to uncertainty by digital output signal α_{Digital}

Half of the digital resolution is assumed to contribute to the measurement uncertainty.

A.8.4.8 Contribution to measurement uncertainty by analogue output signal α_{Analog}

Sensors with an analogue signal (typically 10 V or 20 mA) are supposed to contribute to uncertainty with the resolution of the analogue-to-digital conversion. Assuming a measurement system with a resolution of 12 bit, the contribution to uncertainty is $360^\circ/4096 = 0,1^\circ$. Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

A.8.4.9 Contribution to uncertainty by the determination of the ohmic resistance of a wind direction sensor α_{Ω}

The resistance of a potentiometric wind-vane can only be determined by means of a known voltage/current measurement. When determining the resistance of a potentiometric wind-vane (typically several k Ω) by means of indirect resistance measurement of voltage and constant current, the following uncertainties can occur:

- | | |
|---|-----------------|
| a) percentage error of instrument shunt | 0,030 %; |
| b) error current through measurement system | 0,020 %; |
| c) resolution of analogue-to-digital conversion | 0,025 %; |
| d) assumed measurement uncertainty | 0,05 % ~ 0,16°. |

Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,1^\circ$.

A.8.4.10 Contribution to uncertainty by mounting the wind direction sensor α_{item}

Typical wind direction sensors have a diameter of approximately 50 mm. The north marking often has a breadth of 1 mm and is therefore typically 2° . For the alignment of the north marking with a laser beam an uncertainty of 0,25 mm is assumed, thus resulting in a contribution to uncertainty of $0,25^\circ$. Assuming a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,15^\circ$.

A.8.4.11 Contribution to uncertainty by possible malposition of the wind direction sensor $\alpha_{\text{incl.2}}$

When mounting the wind direction sensor on the turning drive and the reference unit, angle errors in the alignment angle between the rotary axes can occur. The angle error is assumed to be $0,05^\circ$.

A.8.4.12 Result of the uncertainty calculation

To determine the total standard uncertainty, the individual uncertainties listed in Table A.1 and Table A.2 have been considered.

Table A.1 – Uncertainty contributions in wind directions sensor calibration

Factor	Uncertainty category	Uncertainty distribution	Sensitivity coefficient	Measurement uncertainty ^a	Standard uncertainty ^b	Contribution to uncertainty ^c	Unit
Reproducibility	A	1	1	-		0,1	deg
Determination of geometrical centreline	B	2	1	0,1	$u_{CL} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CL$	0,06	deg
Determination of flow direction	B	2	1	0,1	$u_{DIR} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot DIR$	0,06	deg
Reference yaw sensor	B	1	1	0,35	$u_{REF} = \frac{1}{2} \cdot REF$	0,2	deg
Inclination angle	B	2	1	0,01	$u_{incl.1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot INCL.1$	0,01	deg
Eccentricity	B	2	1	0,2	$u_{EXZ} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot EXZ1$	0,12	deg
1 = normal distribution; 2 = rectangular distribution ^a This is the value to be assigned to the component represented by the abbreviations CL, DIR, REF, etc. ^b This is the method of evaluation of the standard uncertainty from the component of uncertainty (CL, DIR, REF, etc) and the distribution type. ^c This is the numerical result of the standard uncertainty evaluation.							

The calculation of the standard measurement uncertainty, in degrees, in the determination of the flow direction is carried out by means of quadratic accumulation:

$$u_{Flow_dir} = (u_{CL}^2 + u_{DIR}^2 + u_{REF}^2 + u_{incl.1}^2 + u_{EXZ1}^2)^{0,5} \quad (A.3)$$

$$u_{Flow_dir} = (0,06^2 + 0,06^2 + 0,2^2 + 0,01^2 + 0,12^2)^{0,5} = 0,25 \quad (A.4)$$

Table A.2 – Uncertainty contributions and total standard uncertainty in wind direction sensor calibration

Factor	Uncertainty category	Uncertainty distribution	Sensitivity coefficient	Measurement uncertainty ^a	Standard uncertainty evaluation ^b	Contribution to uncertainty ^c	Unit
Digital output signal	B	2	1	half of digital resolution	$u_{\text{Digital}} = \frac{1}{2} \cdot \text{LSB}$	-	deg
Or analogue output signal	B	2	1	0,1	$u_{\text{Analog}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{ANALOG}$	0,06	deg
Or potentiometric sensor	B	1	1	0,2	$u_{\Omega} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Omega$	0,12	deg
Mounting of sensor	B	1	1	0,25	$u_{\text{Mounting}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Mounting}$	0,15	deg
Inclination angle	B	2	1	0,01	$u_{\text{INCL.2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{INCL.2}$	0,01	deg
Eccentricity	B	2	1	0,2	$u_{\text{EXZ2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{EXZ2}$	0,12	deg
1 = normal distribution; 2 = rectangular distribution ^a This is the value to be assigned to the component represented by the abbreviations LSB, ANALOG, Ω, etc. ^b This is the method of evaluation of the standard uncertainty from the component of uncertainty (LSB, ANALOG, Ω, etc.) and the distribution type. ^c This is the numerical result of the standard uncertainty evaluation.							

The total standard uncertainty, in degrees, for, for example, a potentiometric wind vane is:

$$u_{\text{Total}} = (u_{\text{Flow_dir}}^2 + u_{\Omega}^2 + u_{\text{Mounting}}^2 + u_{\text{INCL.2}}^2 + u_{\text{EXZ2}}^2)^{0,5} \quad (\text{A.5})$$

$$u_{\text{Total}} = (0,25^2 + 0,12^2 + 0,15^2 + 0,01^2 + 0,12^2)^{0,5} = 0,34 \quad (\text{A.6})$$

The contributions to total standard uncertainty by the individual uncertainty sources therefore result in a total standard uncertainty of 0,34 °for $k = 1$ for a potentiometric wind vane. Usually this value is multiplied with the coverage factor $k = 2$.

Annex B (informative)

Mast flow distortion correction for lattice masts

This Annex B gives guidance regarding a possible method to determine a correction for flow distortion of side mounted anemometers. In this Annex B, a more detailed approach is presented for a lattice mast. A similar method can work for other types of mast configuration but it is likely that specific changes need to be made to allow for the differences in the configuration. Other methods to determine a correction can be applied but shall be documented in sufficient detail to allow the results to be reproduced by a third party based on the reported information.

The starting point is to do a linear regression between two anemometers installed on different booms at the same measurement height. The residuals of the regression can be determined and plotted against wind direction for the full 0 to 360° sector. Other filters may be applied to ensure data quality. This plot will normally show two things.

- For specific directions large flow distortions will be visible, indicating wakes from mast, guy wires or other sensors.
- A slowly changing sine wave is normally visible with a period of 360°.

An example is given in Figure B.1. This example is for a goal-post design for the top of the mast but it illustrates the expected signal behaviour. As shown in the graph it can be beneficial to also plot the expected wakes as determined from the geometric setup as this will help to correctly interpret the plot. Care should be taken when there are too many and/or too strong wakes, from masts, guys and other sensors as the wakes can overshadow the sine-wave of interest and thereby make this method impractical or impossible to apply.

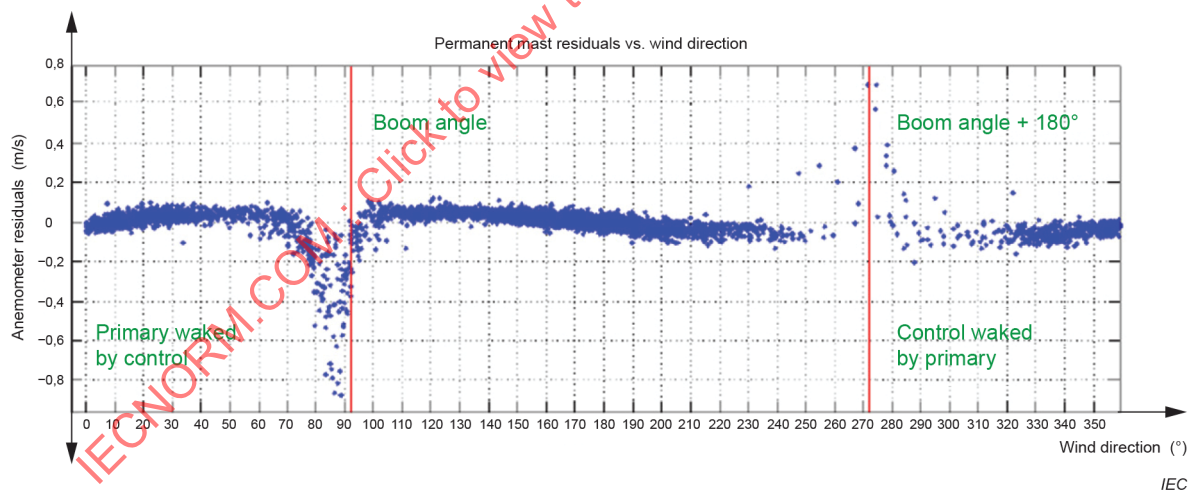


Figure B.1 – Example of mast flow distortion

The sine wave is the flow distortion from the mast and other hardware at the same measurement height that we aim at correcting. This is done by finding suitable values for the parameters in Equation (B.1).

$$V_1 = m \cdot V_2 + B + A \sin(\text{WD} + \text{Centre}) \quad (\text{B.1})$$

where

V_1 is the wind speed from sensor one;

V_2 is the wind speed from the second sensor;

m is the slope of the regression between V_1 and V_2 ;

B is the offset of the regression between V_1 and V_2 ;

A is a scaling parameter;

WD is the wind direction.

Centre is the wind direction where the residuals are expected to be zero;

In the above examples where the boom angles are 92° and 272° , Centre = 182° . Figure 12, Figure 15 and Figure 17 can be useful in assessing the directions where flow distortion is equal at both sensor locations. Solutions within the measurement sector (or closest to) are most useful.

A is a scaling parameter that we need to solve for. A can be found by iteration; by first setting A to zero and picking another point in the data (keeping away from the wakes data), we can determine the current value for the residuals. In the graph above, we see a residual value of 0,03 at 150° and a residual value of 0 at 182° . Now we define Centre = 182° and require a value of zero for V_1 at 150° . This determines the value for A of 0,06 (note the negative sign for the sine at an angle of $150^\circ + 180^\circ = 330^\circ$). Further checking of other points is recommended to make sure we have the right value for A and that this is not based on accidental outlier data.

A reflects the magnitude of the sum effect of the flow distortion on both anemometers. Therefore, each anemometer wind speed shall be corrected by half of amplitude A in accordance with Equations (B.2) and (B.3).

$$V_{1\text{corr}} = V_1 + \frac{A}{2} \sin(\text{WD} + \text{Centre}) \quad (\text{B.2})$$

$$V_{2\text{corr}} = V_2 - \frac{A}{2} \sin(\text{WD} + \text{Centre}) \quad (\text{B.3})$$

The flow distortion correction shown here does not correct to zero flow distortion but only normalizes to the direction where the flow distortion effect is the same at both anemometers. The direction at which the flow distortion is zero can be estimated from the flow speed graphs in 10.4, and the final flow correction can be adjusted accordingly.

The corrected wind speeds can now be used to recalculate residuals, which can be plotted in the same graph to show the improvement. Figure B.2 shows that the residuals of the corrected signal (in red) are clearly less dependent on wind direction than the original (in blue).

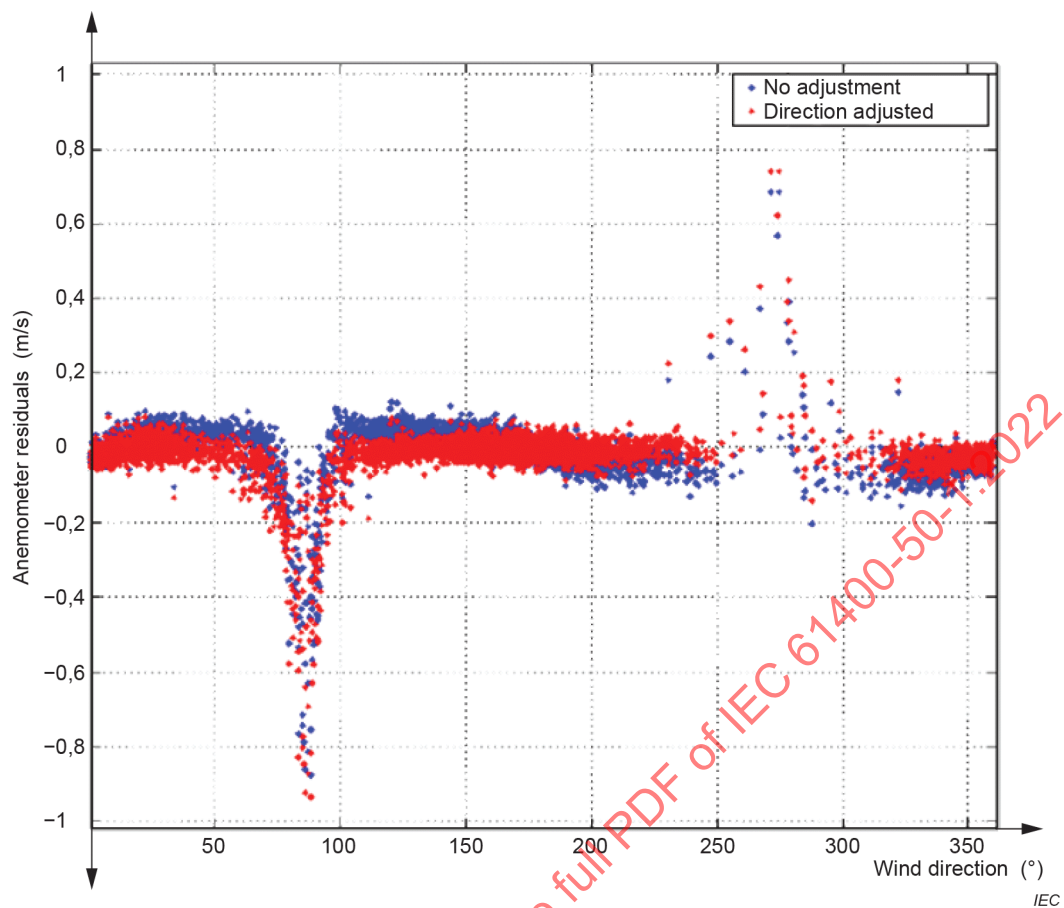


Figure B.2 – Flow distortion residuals versus wind direction

Annex C (informative)

Nacelle instrument mounting

C.1 General

Appropriate arrangement of instruments on the nacelle is important for accurate wind turbine testing. In particular, the anemometer should be mounted to minimize flow distortions, especially from boom influences. The anemometer on the nacelle should be positioned to make it insensitive to turbine settings and the flow distortion caused by the complexity of the surrounding terrain. Other instruments and objects on the nacelle should be mounted in a way that avoids interference with the anemometer.

C.2 Preferred method of anemometer's mounting

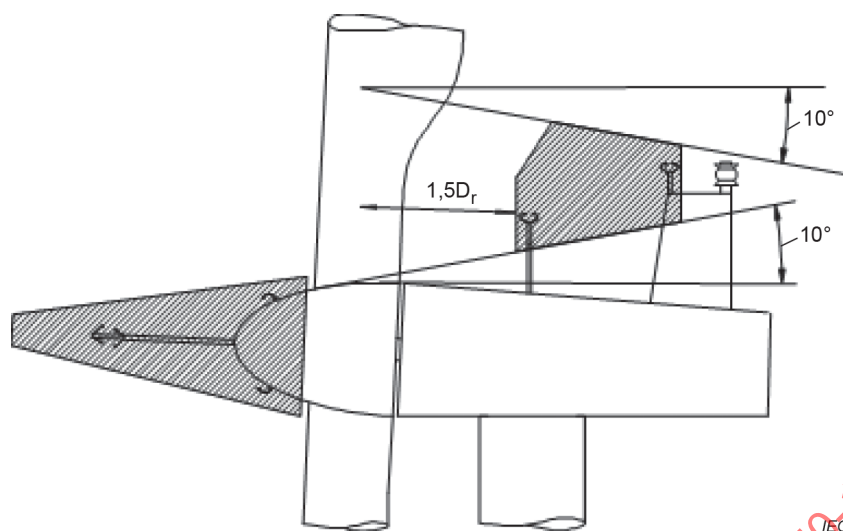
The preferred method for mounting the anemometer is vertically on top of a tube with no other instruments or equipment nearby. All provisions of Clause C.2 apply in order to achieve negligible distortion of the wind measurements induced by the mounting. The anemometer should be mounted on a round vertical tube, with the same outer diameter as used during calibration, which carries the cable to the anemometer inside. The angle deviation from vertical should be less than 2° , and it is recommended to use an inclinometer to verify the verticality of the anemometer during installation. The tube should be no larger in diameter than the body of the anemometer. The bracket connecting the anemometer to the vertical tube should be compact, smooth, and symmetrical.

C.3 Preferred position of anemometer

The anemometer should be located in the symmetry plane of the nacelle. It should be located somewhere along the nacelle where the movements and vibrations are small. A candidate location, if possible, is to mount the anemometer on the extension of the tower centre.

A wind sensor mounted on the nacelle should be mounted above the boundary layer caused by the nacelle, indicated by the 10° line in Figure C.1, and it should also be mounted outside the influence of root vortices caused by the change from cylindrical blade root to profiled blade, indicated by the upper line of the grey area. Additionally, the sensor should be mounted at least one and a half blade root diameters ($1,5D_r$) behind the blade root centre, and it should not be mounted on the downwind side of railings or in the wake of other sensors or warning lights. The sensor should not be mounted within 1 m of the downwind end of the nacelle. A wind sensor mounted on the spinner can be mounted, centred on the shaft axis, on a rod extending from the spinner at a practical distance based on engineering experience. Alternatively, it can be mounted on the spinner surface in the case that the measurement principle of the sensor is based on the flow over the spinner. Either way, it shall be mounted at least $0,6D_r$ in front of the blade root centre.

Figure C.1 shows the recommended locations for the anemometer. In Figure C.1, D_r is used for the blade root diameter.



The anemometer should be mounted inside the hatched areas.

Figure C.1 – Mounting of anemometer on top of nacelle

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-1:2022

Annex D (informative)

Spinner anemometers

Although the spinner anemometer comprises a set of 1-D ultrasonic anemometers, the calibration procedure for ultrasonic anemometers is not applicable, as it addresses 2-D or 3-D ultrasonic anemometers for standard mounting only. The calibration procedure which is described in Annex D is used when using 1-D ultrasonic anemometers mounted at the spinner of a wind turbine.

A spinner anemometer in the context of Annex D is meant to be an arrangement of three 1-D ultrasonic anemometers mounted on the spinner surface of a wind turbine.

The sensors are mounted symmetrically on the spinner surface in a plane upwind of the blades. Each 1-D sensor is placed between the blade roots and measures the flow over the spinner. According to Clause C.3, the minimum distance of the sensors shall be $0.6D_r$, with D_r being the root diameter of the rotor blade.

In axial flow with the flow stagnation point directly on the nose centre, all sonic sensors measure the same wind speed. In skew air flow, the stagnation point moves away from the nose. A sonic sensor closer to the stagnation point experiences reduced wind speed, while a sensor further away experiences increased wind speed. This results in a sinusoidal variation in wind speed seen by each sonic sensor during rotation. The spinner anemometer includes an algorithm to transform the wind speeds measured by the three sonic sensors to horizontal wind speed, yaw misalignment and flow inclination angle. The algorithm utilizes two spinner anemometer constants, k_1 and k_2 . These are specific to the design of the spinner and blade roots and the mounting of the sonic sensors on the spinner. The two constants need to be calibrated in order to measure the wind accurately at the spinner. The constants are considered to represent free wind speed measurements when the wind turbine is stopped and the rotor is pointing into the wind. During operation, the measurements represent the wind at the spinner as it is disturbed by the induced wind speed due to the rotor blades, and this will cause measurements at the spinner to deviate from free wind measurements.

For the calibration procedure and application of spinner anemometers, refer to [8].

Bibliography

- [1] IEC 61400-50-2, *Wind energy generation systems – Part 50-2: Wind measurements – Application of ground-mounted remote sensing technology*
 - [2] J-Å Dahlberg, T.F. Pedersen, P. Busche, ACCUWIND – Methods for classification of cup anemometers, Risø-R-1555(EN), May 2006
 - [3] T.F. Pedersen, J-Å Dahlberg, P. Busche, ACCUWIND – Classification of five cup anemometers according to IEC 61400-12-1, Risø-R-1556(EN), May 2006
 - [4] T.F. Pedersen, Quantification of linear torque characteristics of cup anemometers with step responses, Risø-I-3131(EN), February 2011
 - [5] IEC 61400-1:2019, *Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements*
 - [6] ISO 16622, *Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for mean wind measurements*
 - [7] VDI/VDE 2648, *Transducers and measuring systems for measurement of angle*
 - [8] F. Ormel, *OMC clarification sheet – Use of spinner anemometers*, IECRE, November 2015
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	84
INTRODUCTION.....	86
1 Domaine d'application	87
2 Références normatives	87
3 Termes et définitions	87
4 Symboles, unités et abréviations	89
5 Généralités.....	94
6 Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons.....	94
6.1 Généralités	94
6.2 Classes de classification	95
6.3 Plages des paramètres d'influence.....	96
6.4 Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons	96
6.5 Format de rapport	98
7 Évaluation des anémomètres à coupelles et à ultrasons	98
7.1 Généralités	98
7.2 Mesurages des caractéristiques des anémomètres	99
7.2.1 Mesurages des caractéristiques de réponse de l'angle d'inclinaison des anémomètres à coupelles dans une soufflerie	99
7.2.2 Mesurages des caractéristiques directionnelles des anémomètres à coupelles dans une soufflerie	100
7.2.3 Mesurages des caractéristiques de couple du rotor de l'anémomètre à coupelles dans une soufflerie	100
7.2.4 Mesurages des réponses échelonnées des anémomètres à coupelles dans une soufflerie	101
7.2.5 Mesurages des effets induits de la température sur la performance de l'anémomètre	102
7.2.6 Mesurages des caractéristiques directionnelles des anémomètres à ultrasons dans une soufflerie	104
7.3 Méthode de classification des anémomètres à coupelles fondée sur les essais en soufflerie et en laboratoire et sur la modélisation de l'anémomètre à coupelles	104
7.3.1 Méthode	104
7.3.2 Exemple de modèle d'anémomètre à coupelles.....	104
7.4 Méthode de classification d'anémomètre à ultrasons fondée sur les essais en soufflerie et sur la modélisation de l'anémomètre à ultrasons.....	112
7.5 Mesurages de comparaison sur site libre	112
8 Procédure d'étalonnage de la soufflerie pour les anémomètres	113
8.1 Exigences générales.....	113
8.2 Exigences pour la soufflerie	113
8.3 Exigences de configuration de l'instrumentation et de l'étalonnage	115
8.4 Procédure d'étalonnage	115
8.4.1 Procédure générale pour les anémomètres à coupelles et à ultrasons	115
8.4.2 Procédure d'étalonnage des anémomètres à ultrasons	116
8.4.3 Détermination de la vitesse du vent à l'emplacement de l'anémomètre	116
8.5 Analyse des données.....	117
8.6 Analyse d'incertitude.....	118
8.7 Format de rapport	118
8.8 Exemple de calcul d'incertitude.....	119

9	Comparaison in situ des anémomètres	123
9.1	Généralités	123
9.2	Conditions préalables	123
9.3	Méthode d'analyse	123
9.4	Critères d'évaluation	124
10	Montage des instruments sur le mât météorologique	126
10.1	Généralités	126
10.2	Anémomètre unique monté en tête de mât	127
10.3	Anémomètres montés côte à côte en tête de mât	129
10.4	Instruments montés latéralement	131
10.4.1	Généralités	131
10.4.2	Mâts météorologiques tubulaires	132
10.4.3	Mâts météorologiques en treillis	133
10.4.4	Correction de la distorsion de l'écoulement des anémomètres montés latéralement	138
10.5	Protection contre la foudre	138
10.6	Montage d'autres instruments météorologiques	138
10.7	Système d'acquisition de données	139
11	Incertitude de mesure de la vitesse du vent	139
11.1	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Introduction	139
11.2	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Matériel	139
11.3	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent - Capteurs montés sur des mâts météorologiques	139
11.3.1	Généralités	139
11.3.2	Pré-étalonnage	140
11.3.3	Post-étalonnage	140
11.3.4	Classification	141
11.3.5	Montage	141
11.3.6	Paratonnerre	142
11.3.7	Acquisition de données	142
11.4	Incertitudes de catégorie B: Méthode – Climat froid	142
11.5	Composition des incertitudes	143
11.5.1	Généralités	143
11.5.2	Composition des incertitudes relatives au mesurage de la vitesse du vent ($u_{V,i}$)	143
11.5.3	Composition des incertitudes relatives au mesurage de la vitesse du vent par un anémomètre à coupelles ou à ultrasons ($u_{VS,i}$)	143
12	Rapports	144
Annex A (informative) Procédure d'étalonnage de la soufflerie pour les capteurs de direction du vent		146
A.1	Exigences générales	146
A.2	Exigences pour la soufflerie	146
A.3	Exigences de configuration de l'instrumentation et de l'étalonnage	147
A.4	Procédure d'étalonnage	148
A.5	Analyse des données	149
A.6	Analyse d'incertitude	149
A.7	Format de rapport	150
A.8	Exemple de calcul d'incertitude	151
A.8.1	Généralités	151

A.8.2	Incertitudes de mesure pour la détermination de la direction de l'écoulement dans la soufflerie.....	151
A.8.3	Contribution d'incertitude pour la détermination de l'axe central géométrique α_{CL} (axe central de la soufflerie).....	151
A.8.4	Contribution d'incertitudes pour la détermination de la direction de l'écoulement α_{dir}	152
Annex B (informative)	Correction de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât pour les mâts en treillis	156
Annex C (informative)	Montage des instruments sur la nacelle	159
C.1	Généralités	159
C.2	Méthode préférentielle de montage de l'anémomètre	159
C.3	Position préférentielle de l'anémomètre	159
Annex D (informative)	Anémomètres montés sur le nez du rotor	161
Bibliographie.....		162
Figure 1	Réponse de l'angle d'inclinaison $V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$ d'un anémomètre à coupelles en fonction de l'angle d'écoulement α comparée à la réponse du cosinus	100
Figure 2	Mesurages du couple en soufflerie $Q_A - Q_F$ en fonction de la vitesse angulaire ω d'un rotor d'anémomètre à coupelle à 8 m/s	101
Figure 3	Exemple de couple de frottement des paliers Q_F en fonction de la température pour une plage de vitesses angulaires ω	103
Figure 4	Exemple de coefficient de couple du rotor C_{QA} en fonction du rapport de vitesse λ déduit à partir des réponses échelonnées avec κ_{low} égal à -5,5 et κ_{high} égal à -6,5	106
Figure 5	Écarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 1,69A (image du haut) et une classe 6,56B (image du bas)	110
Figure 6	Écarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 8,01C (image du haut) et une classe 9,94D (image du bas).....	111
Figure 7	Définition du volume pour l'essai d'uniformité d'écoulement	114
Figure 8	Exemple de secteur de direction d'un anémomètre de commande valide pour un anémomètre unique monté en tête de mât sur un mât météorologique en treillis triangulaire	126
Figure 9	Exemple de secteur de direction d'un anémomètre de commande valide pour un anémomètre unique monté en tête de mât sur un mât météorologique tubulaire.....	126
Figure 10	Exemple d'anémomètre monté en tête de mât et exigences de montage	128
Figure 11	Exemple d'anémomètre de commande et d'anémomètre principal alternatifs montés en tête de mât et côte à côte, avec une girouette et d'autres instruments sur la flèche	130
Figure 12	Tracé des isovitesses de la vitesse locale d'écoulement autour d'un mât météorologique cylindrique	132
Figure 13	Vitesse du vent par rapport à l'axe central en fonction de la distance R_d à partir du centre d'un mât météorologique tubulaire et du diamètre d du mât météorologique	133
Figure 14	Représentation d'un mât météorologique en treillis à trois pieds	133
Figure 15	Tracé des isovitesses de la vitesse locale d'écoulement autour d'un mât météorologique en treillis triangulaire pour lequel $C_T = 0,5$	134

Figure 16 – Vitesse du vent par rapport à l'axe central en fonction de la distance R_d du centre d'un mât météorologique en treillis triangulaire et de la distance entre les pieds L_m pour plusieurs valeurs de C_T	135
Figure 17 – Distorsion de l'écoulement déduite par la mécanique des fluides numérique 3D pour deux directions différentes du vent autour d'un mât météorologique en treillis triangulaire ($C_T = 0,27$)	137
Figure A.1 – Exemple de montage d'étalonnage d'un capteur de direction du vent dans une soufflerie	148
Figure B.1 – Exemple de distorsion de l'écoulement au niveau du mât.....	156
Figure B.2 – Résidus de la distorsion de l'écoulement en fonction de la direction du vent	158
Figure C.1 – Montage de l'anémomètre sur le sommet de la nacelle	160
Tableau 1 – Plages des paramètres d'influence (moyennes de 10 min) des classes A, B, C, D et S	97
Tableau 2 – Réponse de l'angle d'inclinaison de l'exemple d'anémomètre à coupelles.....	107
Tableau 3 – Coefficients de frottement de l'exemple d'anémomètre à coupelles.....	108
Tableau 4 – Données diverses relatives à la classification de l'exemple d'anémomètre à coupelles	109
Tableau 5 – Exemple d'évaluation de l'incertitude d'étalonnage d'un anémomètre	120
Tableau 6 – Méthode d'estimation de la valeur C_T pour plusieurs types de mâts en treillis.....	136
Tableau A.1 – Contributions d'incertitude dans l'étalonnage du capteur de direction du vent	154
Tableau A.2 – Contributions d'incertitude et incertitude-type totale d'étalonnage du capteur de direction du vent.....	155

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Partie 50-1: Mesurages du vent – Application d'instruments météorologiques montés sur mât, nacelle et nez de rotor

AVANT-PROPOS

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

L'IEC 61400-50-1 a été établie par le comité d'études 88 de l'IEC: Systèmes de génération d'énergie éolienne. Il s'agit d'une Norme internationale.

La présente première édition de l'IEC 61400-50-1 fait partie d'une révision structurelle qui annule et remplace les normes de performance IEC 61400-12-1:2017 et IEC 61400-12-2:2013. Cette révision structurelle ne contient aucune modification technique par rapport à l'IEC 61400-12-1:2017 et à l'IEC 61400-12-2:2013. Toutefois, les parties relatives aux mesurages du vent, au mesurage de l'étalonnage du site et à l'évaluation des obstacles et du terrain ont été extraites vers des normes distinctes.

Cette restructuration a pour objet de permettre, à l'avenir, une gestion et une révision plus efficaces des normes de performance de puissance en matière de temps et de coût, ainsi que de fournir une division plus logique des exigences de mesure du vent en une série de normes

distinctes auxquelles d'autres normes de cas d'utilisation de la série IEC 61400 pourront faire référence. Ces normes distinctes pourront ultérieurement être maintenues et élaborées par les experts appropriés.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
88/902/FDIS	88/916/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/standardsdev/publications.

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

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

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

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

INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 61400 spécifie les procédures et les méthodes qui assurent que les mesurages du vent à l'aide d'anémomètres à coupelles ou à ultrasons montés sur des mâts météorologiques ou sur des nacelles/nez de rotor d'éoliennes sont effectués puis consignés de manière cohérente et selon les meilleures pratiques. Le présent document ne définit pas l'objectif ou le cas d'utilisation des mesurages du vent. Toutefois, le présent document faisant partie de la série IEC 61400, il est prévu que les mesurages du vent soient effectués conformément à la présente norme soient utilisés dans le cadre d'une certaine forme d'essai de l'énergie éolienne ou d'évaluation des ressources.

Les articles principaux du présent document ne sont pas mutuellement dépendants. Un utilisateur peut donc se référer uniquement à certains des articles principaux plutôt qu'à tous les articles pour adapter le présent document à son leur d'utilisation spécifique. Cependant, les articles principaux sont présentés dans une séquence logique qui peut être appliquée dans la pratique.

Le contenu technique du présent document pouvait être consulté auparavant dans l'IEC 61400-12-1:2017 et dans l'IEC 61400-12-2:2013.

NOTE Une correction technique de la valeur de tolérance du tube de montage de l'anémomètre a été effectuée en 10.2.

En raison de la complexité croissante de ces documents sources, le CE 88 de l'IEC a décidé, en vue d'une gestion et d'une maintenance plus efficaces, de restructurer la série de normes IEC 61400-12 en un certain nombre de parties plus spécifiques. Le présent document a été créé dans le cadre de ce processus de restructuration. Les exigences sur le mesurage du vent spécifique aux cas d'utilisation décrits dans l'IEC 61400-12-1:2017 et dans l'IEC 61400-12-2:2013 (par exemple, l'emplacement exigé du mât météorologique par rapport à l'éolienne d'essai et la hauteur du mesurage du vent par rapport à la hauteur du moyeu) restent dans les nouvelles éditions de l'IEC 61400-12-1 et de l'IEC 61400-12-2.

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Partie 50-1: Mesurages du vent – Application d'instruments météorologiques montés sur mât, nacelle et nez de rotor

1 Domaine d'application

L'IEC 61400-50 spécifie les méthodes et les exigences pour l'application des instruments de mesure de la vitesse du vent (et des paramètres associés, par exemple la direction du vent et l'intensité des turbulences). Ces mesurages sont exigés pour certaines procédures d'évaluation et d'essai de l'énergie éolienne et de la technologie des éoliennes (par exemple, l'évaluation des ressources et les essais de performance des éoliennes) décrites dans d'autres normes de la série IEC 61400. Le présent document s'applique spécifiquement à l'utilisation d'instruments de mesure du vent montés sur des mâts météorologiques, des nacelles d'éolienne ou des nez de rotors d'éolienne qui mesurent le vent à un endroit dans lequel les instruments sont montés. Le présent document exclut les dispositifs de télédétection qui mesurent le vent à un endroit éloigné de celui dans lequel l'instrument est monté (par exemple, les lidars à profil vertical ou orientés vers l'avant). Le présent document spécifie les points suivants:

- a) les paramètres de classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons de manière à pouvoir évaluer l'incertitude de mesure de la vitesse du vent pour un type et un modèle spécifiques d'anémomètre exposé à une certaine classe de conditions d'environnement;
- b) la procédure et les exigences de classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons dans le cadre, par exemple, de l'essai de type d'un modèle et d'un type d'anémomètre spécifique;
- c) les procédures et les exigences pour l'étalonnage de la soufflerie des anémomètres;
- d) une méthode supplémentaire ou alternative pour vérifier la cohérence de l'étalonnage d'un anémomètre sur le terrain en effectuant une comparaison in situ avec un autre anémomètre;
- e) les exigences relatives au montage des anémomètres et autres instruments sur les mâts météorologiques;
- f) l'évaluation de l'incertitude de mesure de la vitesse du vent;
- g) les exigences en matière de rapports.

2 Références normatives

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

ISO 2533:1975, *Atmosphère type*

ISO 3966, *Mesurage du débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Termes et définitions

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

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.1

exactitude

étroitesse de l'accord entre le résultat de mesure et une valeur vraie du mesurande

3.2

ensemble de données

collection de données échantillonnées sur une période continue

3.3

constante de distance

indication du temps de réponse d'un anémomètre définie comme la longueur de l'écoulement d'air qui doit passer à travers l'instrument afin que celui-ci indique 63 % de la valeur finale pour une variation en échelon de la vitesse du vent en entrée

3.4

distorsion de l'écoulement

changement dans l'écoulement de l'air causé par des obstacles, des variations topographiques ou par d'autres éoliennes, qui se traduit par un écart entre la vitesse du vent à l'emplacement de mesure et la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne

3.5

hauteur du moyeu

<d'une éolienne> hauteur du centre de la surface balayée par le rotor de l'éolienne par rapport au sol au niveau du mât

Note 1 à l'article: Pour une éolienne à axe vertical, la hauteur du moyeu est la hauteur du centroïde de la surface balayée par le rotor par rapport au sol au niveau du mât.

3.6

période de mesure

période pendant laquelle une base de données statistiquement significative a été collectée pour le cas d'utilisation

Note 1 à l'article: Un essai de performance de puissance est un exemple de cas d'utilisation.

3.7

secteur de mesure

secteur des directions du vent dans lequel les données sont choisies pour le cas d'utilisation

Note 1 à l'article: Une courbe de puissance mesurée est un exemple de cas d'utilisation.

3.8

obstacle

objet qui fait obstacle au vent et qui crée une distorsion de l'écoulement

Note 1 à l'article: Les bâtiments et les arbres sont des exemples d'obstacles.

3.9

performance de puissance

mesure de l'aptitude d'une éolienne à produire de la puissance et de l'énergie électriques

3.10

incertitude-type

incertitude du résultat de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type

3.11**matériel de mesure du vent**

instruments montés sur un mât météorologique ou dispositif de télédétection

3.12**cisaillement du vent**

variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur

3.13**exposant de cisaillement du vent**

α

exposant de la loi exponentielle qui définit la variation de la vitesse du vent selon de la hauteur

Note 1 à l'article: Ce paramètre est utilisé comme mesure de l'amplitude du cisaillement du vent et peut être utile à d'autres égards. L'équation exponentielle est la suivante:

$$v_{zi} = v_h \left(\frac{z_i}{H} \right)^\alpha \quad (1)$$

où

v_h est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu;

H est la hauteur du moyeu (m);

v_{zi} est la vitesse du vent à la hauteur z_i ;

α est l'exposant de cisaillement du vent.

4 Symboles, unités et abréviations

Symbole	Description	Unité
A	surface balayée par le rotor de l'éolienne	m ²
B	pression atmosphérique	Pa
$B_{10\min}$	pression atmosphérique moyennée sur une période de 10 min	Pa
C_h	coefficient de la tête du tube de Pitot	
C_{QA}	coefficient de couple aérodynamique généralisé	
C_T	coefficient de poussée	
c	facteur de sensibilité d'un paramètre (dérivée partielle)	
$c_{B,i}$	facteur de sensibilité de la pression atmosphérique dans la tranche i	W/Pa
$c_{d,i}$	facteur de sensibilité du système d'acquisition de données dans la tranche i	
c_{index}	facteur de sensibilité du paramètre d'indice	
$c_{k,i}$	facteur de sensibilité de la composante k dans la tranche i	
$c_{T,i}$	facteur de sensibilité de la température de l'air dans la tranche i	W/K
$c_{V,i}$	facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i	Ws/m
$c_{\rho,i}$	facteur de sensibilité de la correction de la masse volumique de l'air dans la tranche i	Wm ³ /kg
d	diamètre du mât météorologique	m
e	excentricité	

Symbole	Description	Unité
$F(V)$	fonction de distribution de probabilité cumulative de Rayleigh pour la vitesse du vent	
$F_{\alpha,\gamma}(\alpha,\gamma, \vec{U})$	fonction de réponse d'inclinaison et d'orientation pour l'anémomètre à ultrasons	
$f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$	fonction de correction due à l'interférence entre l'anémomètre, y compris son tube de montage, et l'écoulement de la soufflerie	
H	hauteur du moyeu des éoliennes	m
h	hauteur de l'obstacle	m
I	inertie du rotor de l'anémomètre à coupelles	kg·m ²
$K_{B,t}$	sensibilité du baromètre	N/m ² V
$K_{B,s}$	gain atmosphérique	
$K_{B,d}$	conversion d'échantillonnage du baromètre	
$K_{T,t}$	sensibilité du transducteur de température	K/A
$K_{T,s}$	gain du transducteur de température	A/V
$K_{T,d}$	conversion d'échantillonnage du transducteur de température	
$K_{p,t}$	sensibilité du transducteur de pression	
$K_{p,s}$	gain du transducteur de pression	
$K_{p,d}$	conversion d'échantillonnage du transducteur de pression	
k	numéro de classe	
k_b	facteur de correction de l'obstruction	
k_c	facteur d'étalonnage de la soufflerie	
k_f	facteur de correction de la soufflerie par rapport aux autres souffleries (uniquement utilisé pour les estimations de l'incertitude)	
k_i	facteur de correction dû à l'interférence entre l'anémomètre (y compris son tube de montage) et l'enveloppe de la section d'essai, comprenant également les effets de l'écoulement provoqués par les tubes de montage qui s'étendent jusqu'à l'enveloppe	
k_n	numéro de classe du numéro de l'échantillon d'anémomètre n ($n = 1 \dots 5$ ou plus)	
k_p	facteur de correction dû à l'interférence provoquée par l'anémomètre (y compris son tube de montage) sur la vitesse mesurée par le tube de Pitot	
k_ρ	facteur de correction d'humidité par rapport à la masse volumique	
L_m	distance entre les pieds adjacents du mât météorologique en treillis	m
L	distance entre l'éolienne et le matériel de mesure du vent	m
M	nombre de composantes d'incertitude dans chaque tranche	
M_A	nombre de composantes d'incertitude de catégorie A	
M_B	nombre de composantes d'incertitude de catégorie B	
m	pente de la régression qui lie V_{control} et $V_{\text{primary_est}}$	

Symbole	Description	Unité
m	est la pente de la régression entre V_1 et V_2	
N	nombre de tranches	
N_h	nombre d'heures dans une année $\approx 8\,760$	h
N_i	nombre d'ensembles de données de 10 min dans la tranche i de vitesse du vent	
N_j	nombre d'ensembles de données de 10 min dans la tranche j de direction du vent	
n	nombre d'échantillons dans un intervalle d'échantillonnage	
n_h	nombre de hauteurs de mesure disponibles	
P_w	pression de vapeur	Pa
p	écart de battement circulaire	
Q_A	couple aérodynamique	N·m
Q_F	couple de frottement	N·m
R	rayon du rotor	m
r_a	rayon effectif du mesurage de l'angle	
R_0	constante des gaz pour l'air sec (287,05)	J/kg·K
R_d	distance jusqu'au centre du mât météorologique	m
R_w	constante des gaz pour la vapeur d'eau (461,5)	J/kg·K
REWS	(rotor equivalent wind speed) vitesse du vent équivalente du rotor	
RSD	(remote sensing device) dispositif de télédétection	
r	coefficient de corrélation	
s	composante d'incertitude-type de catégorie A	
s_A	incertitude-type de catégorie A sur le chronogramme de la vitesse du vent dans la soufflerie	
$s_{k,i}$	incertitude-type de catégorie A sur la composante k dans la tranche i	
s_i	incertitudes composées de catégorie A dans la tranche i	
S	solidité du mât météorologique	
T	température absolue	K
TI	intensité des turbulences	
$T_{10\text{min}}$	température absolue de l'air moyennée sur une période de 10 min	K
t	temps	s
U	vitesse du vent	m/s
U_d	déficit de vitesse du vent de l'axe central	m/s
U_{eq}	vitesse horizontale du vent équivalente	m/s
U_i	vitesse du vent dans la tranche i	m/s
U_j	vitesse du vent dans la tranche j	
U_{sonic}	anémomètre à ultrasons	

Symbole	Description	Unité
U_t	seuil de vitesse du vent	m/s
$\vec{U}$	vecteur vent instantané	
u	composante d'incertitude-type de catégorie B	
$u_{B,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la pression atmosphérique dans la tranche i	Pa
$u_{c,i}$	incertitude-type composée sur la puissance dans la tranche i	W
$u_{dVS,i}$	composante d'incertitude de l'acquisition de données des signaux de vitesse du vent	
u_i	incertitudes composées de catégorie B dans la tranche i	
u_{index}	incertitude-type de catégorie B sur le paramètre d'indice	
$u_{k,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la composante k dans la tranche i	
$u_{M,cc,i}$	influence du mesurage dans un climat froid sur la classification des anémomètres	
$u_{V,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la vitesse du vent dans la tranche i	m/s
$u_{VHW,i}$	incertitude relative au matériel utilisé et est égale à $u_{VS,i}$, $u_{VR,i}$ ou $u_{REWS,i}$	
$u_{VM,i}$	incertitude relative aux méthodes appliquées	
$u_{VS,class,i}$	incertitude relative à la classification des capteurs	
$u_{VS,lgt,i}$	incertitude relative à la distorsion de l'écoulement due au paratonnerre	
$u_{VS,mnt,i}$	incertitude relative au montage des capteurs	
$u_{VS,precal,i}$	incertitude relative au pré-étalonnage	
$u_{VS,postcal,i}$	incertitude relative au post-étalonnage	
$u_{v2,i}$	évaluation de l'incertitude de la vitesse du vent	
$u(t)$	vitesse du vent mesurée par l'anémomètre à coupelles au moment t à l'aide de la fonction d'étalonnage ordinaire	
u_t	vitesse du vent dans la soufflerie	
Δu	différence entre la vitesse du vent dans la soufflerie et la vitesse du vent indiquée par l'anémomètre à coupelles, au début du mesurage de la réponse échelonnée, à l'instant t_0	
V	vitesse du vent	m/s
V_{ave}	moyenne annuelle de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu	m/s
$V_{control}$	vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande	
$V_{control,i}$	vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande dans la tranche i	
V_i	vitesse du vent normalisée et moyennée dans la tranche i	m/s
V_n	vitesse du vent normalisée	m/s
$V_{n,i,j}$	vitesse du vent normalisée de l'ensemble de données j dans la tranche i	m/s

Symbole	Description	Unité
$V_{\text{primary},i}$	vitesse du vent mesurée par l'anémomètre primaire dans la tranche i	
$V_{\text{primary_est}}$	vitesse du vent estimée de l'anémomètre primaire	
$V_{10\text{min}}$	vitesse du vent moyennée sur une période de 10 min	m/s
V_1	vitesse du vent mesurée par le premier capteur	
V_2	vitesse du vent mesurée par le second capteur	
v	composante de la vitesse du vent transversale	m/s
$\bar{v}$	vitesse moyenne du vent à l'emplacement de l'anémomètre	m/s
$\bar{v}_p$	vitesse moyenne du vent à l'emplacement de référence	
v_{eq}	vitesse du vent équivalente mesurée	m/s
WD	(wind direction) direction du vent	
WME	(wind measurement equipment) matériel de mesure du vent	
w	composante verticale de la vitesse du vent	m/s
w_i	fonction de pondération pour la détermination de l'enveloppe des écarts	
α	exposant de cisaillement du vent calculé à l'aide de la loi exponentielle	°
α	coefficient de la tête du tube de Pitot double	
α	angle à mesurer (valeur d'étalonnage)	
α_{CL}	axe central de la soufflerie	
α_{Digital}	incertitude par le signal de sortie numérique	
α_{dir}	incertitudes pour la détermination de la direction de l'écoulement	
$\alpha_{\text{incl.1}}$	influence de l'angle entre les axes de rotation	
α_{item}	incertitude par le montage du capteur de direction du vent	
$\alpha_{\text{incl.2}}$	incertitude par un éventuel mauvais positionnement du capteur de direction du vent	
α_{sensor}	incertitudes pour l'étalonnage du capteur d'orientation de référence	
α_{set}	alignement de l'axe central avec l'indicateur du nord par le capteur de direction du vent	
α_{Ω}	incertitude par la détermination de la résistance ohmique d'un capteur de direction du vent	
ε_i	écart en m/s pour la combinaison des paramètres d'influence i	
$\varepsilon_{\text{max},i}$	écart maximal pour toutes les tranches i de vitesse du vent dans la plage de vitesses du vent	m/s
θ	secteur perturbé	°
κ	constante de von Karman 0,4	
λ	rapport de vitesses	
λ_0	rapport de vitesses pour $C_{QA} = 0$	
ρ	masse volumique de l'air	kg/m ³

Symbole	Description	Unité
τ	constante de temps à déterminer pour la réponse échelonnée (τ_{low} pour la réponse échelonnée du dessous et τ_{high} pour la réponse échelonnée du dessus)	
ρ_0	masse volumique de l'air de référence	kg/m ³
$\rho_{10\text{min}}$	masse volumique de l'air déduite moyennée sur une période de 10 min	kg/m ³
$\sigma_{P,i}$	écart-type des données de puissance normalisées dans la tranche i	W
$\sigma_{10\text{min}}$	écart-type du paramètre moyenné sur une période de 10 min	
$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	écarts-types des vitesses longitudinale/transversale/verticale du vent	
Φ	humidité relative (plage de 0 % à 100 %)	
ω	vitesse angulaire	s ⁻¹
Δp_{ref}	pression différentielle moyenne	

5 Généralités

Le présent document définit les méthodes et les exigences relatives à la réalisation de mesurages du vent à l'aide d'instruments tels que des anémomètres (à coupelles et à ultrasons) montés sur des mâts météorologiques, des nacelles d'éoliennes (Annex C) et des nez de rotors d'éoliennes (Annex D). Les exigences en matière d'étalonnage, de classification et de montage sont décrites. Les mesurages du vent effectués conformément au présent document peuvent être utilisés à de nombreuses fins dans le domaine de l'énergie éolienne (par exemple, mesurage de la performance de puissance, évaluation du site, mesurage de la charge, mesurage du bruit), comme cela est décrit dans d'autres normes de la série IEC 61400. Il convient de se référer à la norme spécifique relative au cas d'utilisation prévu des mesurages du vent pour connaître les limites et les exigences supplémentaires (par exemple, la hauteur du mesurage par rapport à la hauteur du moyeu de l'éolienne dans le cas de mesurages de la performance de puissance). Pour les mesurages du vent effectués à l'aide de dispositifs de télédétection montés au sol (par exemple, lidars et sodars), se référer à l'IEC 61400 50-2 [1]¹. Bien que les mesurages de vent définis dans le présent document se rapportent principalement au mesurage de la vitesse du vent, un exemple de procédure qui définit l'étalonnage et les capteurs de direction du vent est donné dans l'Annex A.

6 Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons

6.1 Généralités

Les anémomètres à coupelles et à ultrasons sont des instruments de mesure qui peuvent être utilisés dans une large plage de mesurages liés à l'énergie éolienne. Afin de transférer la traçabilité, ils doivent être étalonnés dans une soufflerie conformément à l'Article 8. L'étalonnage des souffleries est effectué dans des conditions environnementales contrôlées avec un écoulement lisse et peu turbulent. Lors des mesurages et de l'exploitation sur site, ces instruments sont toutefois soumis à un écoulement turbulent et à des conditions environnementales qui peuvent différer de manière significative par rapport aux conditions d'étalonnage de la soufflerie. Les conditions du site peuvent influencer de façon significative les caractéristiques de l'instrument et provoquer un écart entre les résultats donnés par l'instrument et les étalonnages de la soufflerie. Lorsque les plages des paramètres d'influence

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

lors de l'exploitation sur site sont déterminées, les écarts systématiques peuvent être analysés et les écarts dans les résultats des instruments peuvent être intégrés à un système de classification.

Les paramètres d'influence connus sur les mesurages des anémomètres à coupelles sont les turbulences, la température de l'air, la masse volumique de l'air et l'angle d'écoulement ascendant moyen. Les paramètres d'influence connus sur les mesurages des anémomètres à ultrasons sont la direction du vent, l'angle d'écoulement ascendant et la température de l'air. Ces paramètres d'influence doivent être pris en considération dans la classification. D'autres paramètres environnementaux peuvent influencer les instruments. S'il est admis que ces paramètres d'influence donnent des écarts systématiques, leur influence doit être analysée et incluse dans le système de classification. L'effet combiné de tous les paramètres d'influence doit en outre être évalué. Les écarts systématiques dus aux paramètres d'influence doivent être analysés conformément aux procédures décrites à l'Article 7 et donner lieu à une spécification de classification du type de l'anémomètre. Au moins cinq échantillons du type d'anémomètre doivent être évalués. La modification d'un type d'anémomètre qui peut avoir une influence sur le résultat exige une nouvelle évaluation. Les modifications apportées à la configuration du type d'anémomètre, au principe de mesure, à l'algorithme logiciel pour le calcul de la sortie, aux paramètres logiciels ou à la configuration de la structure de support exigent une nouvelle évaluation.

La méthode de classification ne prend en considération qu'une exploitation normale des capteurs. La méthode ne tient pas compte, par exemple, de l'usure, des dysfonctionnements ou du givrage.

6.2 Classes de classification

La classification des types d'anémomètres est divisée en cinq classes en fonction de l'objectif. Les classes A, B, C et D reposent sur des plages de terrains et de climats prédéfinies (voir Tableau 1). Les classes A et C doivent être utilisées pour les terrains qui satisfont aux exigences de l'IEC 61400-12-5 et au terrain de type A de l'IEC 61400-12-3. Les classes B et D doivent être utilisées pour les terrains qui ne satisfont pas aux exigences de l'IEC 61400-12-5. Les classes B et D peuvent être utilisées dans un terrain de type B de l'IEC 61400-12-3. Lorsque des informations sur les plages des paramètres d'influence lors des mesurages sont disponibles, la classe S peut être utilisée.

La classe S est une classe spéciale, dans laquelle les plages des paramètres d'influence peuvent être définies par l'utilisateur (voir Tableau 1). Elle peut être destinée à un climat spécial, par exemple un climat froid. La classe S peut également être utilisée pour estimer l'incertitude lors d'une campagne de mesurages, dans laquelle les plages des paramètres d'influence sont déterminées lors des mesurages. La classe S peut être utilisée pour les mesurages dans les terrains de type A, B et C (voir IEC 61400-12-3). Le numéro de classification k doit être utilisé pour déterminer l'incertitude liée aux caractéristiques opérationnelles de la vitesse du vent, comme cela est indiqué en 11.3.4. L'IEC 61400-12-5 fournit une évaluation du terrain, afin d'évaluer si la distorsion de l'écoulement due au terrain est significative. Pour la classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons, cette évaluation du terrain prend en charge la définition des classes de classification A, B, C et D.

Classe A: Associée aux terrains qui satisfont aux exigences de l'IEC 61400-12-5 et aux plages des paramètres d'influence générales pour ce type de terrain.

Classe B: Associée aux terrains qui ne satisfont pas aux exigences de l'IEC 61400-12-5 et aux plages des paramètres d'influence générales pour ce type de terrain.

Classe C: Comme pour la classe A, mais avec des températures jusqu'à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Classe D: Comme pour la classe B, mais avec des températures jusqu'à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pour un terrain ou un climat qui s'écarte des classes A à D, un climat de classe S peut être spécifié.

Classe S: Associée à des conditions qui s'écartent des classes A, B, C ou D. Dans cette classe, l'utilisateur définit les plages des paramètres d'influence. Cela peut être dû à des conditions climatiques ou de terrain particulières ou définies par l'utilisateur.

6.3 Plages des paramètres d'influence

Les plages minimales de paramètres d'influence exigées pour la classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons sont données dans le Tableau 1.

6.4 Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons

La classification d'un anémomètre est spécifiée par la quantité d'écarts systématiques par rapport aux valeurs étalonnées (étalonnage conforme à l'Article 8), lorsque les écarts systématiques sont déterminés pour des valeurs comprises dans les plages des paramètres d'influence. Pour un anémomètre à ultrasons et pour des anémomètres à coupelles sensibles à la direction, une direction de référence utilisée pour les étalonnages conformément à l'Article 8 doit être définie pour le type d'instrument. Les écarts systématiques doivent être déduits pour toutes les valeurs pertinentes pour la détermination de la classe entre les valeurs minimale et maximale de chaque paramètre. Le numéro de classe k_n d'un numéro d'échantillon d'anémomètre n doit être déterminé comme l'écart systématique maximal par rapport à la valeur d'étalonnage de la soufflerie, pondérée à l'aide de la fonction de vitesse du vent ε_i :

$$k_n = 100 \cdot \max |\varepsilon_i / w_i| \quad (2)$$

où

k_n est le numéro de classe du numéro de l'échantillon d'anémomètre n ($n = 1 \dots 5$ ou plus);

w_i est une fonction de pondération en m/s qui définit l'enveloppe des écarts, voir l'équation (3);

ε_i est l'écart en m/s pour la combinaison des paramètres d'influence i ;

NOTE Un numéro de classe de 1 correspond à 1 % à 10 m/s, mais à plus de 1 % au-dessous de 10 m/s et à moins de 1 % au-dessus de 10 m/s.

La fonction de pondération w_i moyenne l'influence des écarts absolu et relatif:

$$w_i = 5 \text{ m/s} + 0,5 \cdot U_i \quad (3)$$

où

U_i est la vitesse du vent en m/s pour la combinaison des paramètres d'influence i .

**Tableau 1 – Plages des paramètres d'influence
(moyennes de 10 min) des classes A, B, C, D et S**

Paramètre	Classe A Le terrain satisfait aux exigences de l'IEC 61400-12-5 Plage	Classe B Le terrain ne satisfait pas aux exigences de l'IEC 61400-12-5 Plage	Classe C Le terrain satisfait aux exigences de l'IEC 61400-12-5 Plage	Classe D Le terrain ne satisfait pas aux exigences de l'IEC 61400-12-5 Plage	Classe S ^a Classe spéciale avec plages définies par l'utilisateur Plage
Vitesse du vent, V (m/s)	4 à 16	4 à 16	4 à 16	4 à 16	4 à 16
Intensité des turbulences	0,03 à (0,12 + 0,48/ V)	0,03 à (0,12 + 0,96/ V)	0,03 à (0,12 + 0,48/ V)	0,03 à (0,12 + 0,96/ V)	Défini par l'utilisateur
Structure des turbulences ^b $\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	1/0,8/0,5 ^c	1/0,8/0,5 ^c	1/0,8/0,5 ^c	1/0,8/0,5 ^c	Défini par l'utilisateur ou 1/0,8/0,5 ^c
Température de l'air (°C)	0 à 40	-10 à 40	-20 à 40	-20 à 40	Défini par l'utilisateur
Masse volumique de l'air (kg/m ³)	0,9 à 1,35	0,9 à 1,35	0,9 à 1,35	0,9 à 1,35	Défini par l'utilisateur
Angle d'écoulement ascendant moyen (°)	-3 à 3	-15 à 15	-3 à 3	-15 à 15	Défini par l'utilisateur
Direction du vent ^d (°)	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0 à 360°	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0 à 360°	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0 à 360°	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0 à 360°	Anémomètres à coupelles: 0 à 360° Anémomètres à ultrasons: défini par l'utilisateur
^a Les plages des paramètres d'influence déterminées lors d'une campagne de mesure spécifique incluent des paramètres mesurés dans le cadre du mesurage: vitesse du vent, turbulences, température de l'air, masse volumique de l'air. L'angle d'écoulement ascendant peut être déterminé en montant un anémomètre à ultrasons à deux girouettes ou tridimensionnel sur le mât météorologique. ^b Pour la production de vent artificiel, voir par exemple en 7.4. ^c Un spectre de turbulences de Kaimal anisotrope avec échelle de longueur des turbulences de 350 m. ^d Dans le cas où un anémomètre à coupelles est sensible à la direction (il convient de le vérifier sur au moins un échantillon), la directivité doit être incluse dans la classification. Pour les anémomètres à ultrasons, la directivité doit toujours être incluse dans la classification, alors que pour la classe S, la plage de directions du vent peut être définie par l'utilisateur.					

Pour les cinq échantillons d'anémomètres à l'essai pour la classification, la classe est déterminée par la moyenne des valeurs k plus la moitié de la plage divisée par $\sqrt{3}$, avec en prenant pour hypothèse une distribution rectangulaire (voir équation (4)).

$$k = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 k_n + \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Une classification qui fait référence à une classe donnée est exprimée par kA , kB ou kS , par exemple 1,7A ou 2,5S. L'incertitude-type des caractéristiques opérationnelles (voir 11.3.4) d'un anémomètre à ultrasons ou d'un anémomètre à coupelles peut être déduite à partir de la classification en prenant pour hypothèse une distribution d'incertitude rectangulaire. Dans ce cas, l'incertitude-type à utiliser dans l'évaluation de l'incertitude de la vitesse du vent est:

$$u_{v2,j} = (0,05 \text{ m/s} + 0,005 \cdot U_j) \cdot k / \sqrt{3} \quad (5)$$

Un exemple de classification est décrit à l'Article 7.

6.5 Format de rapport

Les rapports de classification du capteur de vitesse du vent doivent spécifier toutes les informations pertinentes concernant le capteur, notamment l'ensemble des paramètres. La documentation de la classe d'un anémomètre à ultrasons doit spécifier la configuration programmée pour laquelle la classification est valide.

La documentation adéquate doit être fournie avec des informations détaillées sur les procédures suivies, les mesurages réalisés dans le contexte de la classification, ainsi que la documentation des installations et des instruments utilisés.

7 Évaluation des anémomètres à coupelles et à ultrasons

7.1 Généralités

L'évaluation de l'anémométrie pour la classification doit être déduite à partir d'essais en soufflerie traçables, d'autres essais en laboratoire et de la modélisation associée de caractéristiques des anémomètres. Il convient d'inclure également des essais de vérification sur site dans une évaluation poussée.

L'évaluation d'un type d'anémomètre à ultrasons ou à coupelles doit comprendre des procédures vérifiées afin de déterminer l'influence des caractéristiques de base suivantes (voir aussi le Tableau 1):

- a) caractéristiques de réponse de l'angle d'inclinaison;
- b) caractéristiques de réponse de l'angle d'orientation;
- c) effets induits par la température sur la performance de l'anémomètre.

Les caractéristiques suivantes doivent en outre être évaluées pour les anémomètres à coupelles:

- d) effets dynamiques dus aux caractéristiques de couple du rotor.

Le paragraphe 7.2 décrit les procédures de mesure des caractéristiques de l'anémomètre. Le paragraphe 7.3 décrit une méthode de classification des anémomètres à coupelles avec un exemple. Le paragraphe 7.4 décrit une méthode de classification des anémomètres à ultrasons. Une évaluation réelle doit être fondée sur les méthodologies des 7.3 et 7.4, mais peut également être fondée sur d'autres méthodes d'évaluation, à condition qu'elles incluent des procédures vérifiées afin d'inclure l'influence des paramètres du Tableau 1. Le paragraphe 7.5 présente une méthode pour la comparaison des anémomètres sur le terrain.

7.2 Mesurages des caractéristiques des anémomètres

7.2.1 Mesurages des caractéristiques de réponse de l'angle d'inclinaison des anémomètres à coupelles dans une soufflerie

La réponse de l'angle d'inclinaison est la vitesse du vent mesurée aux angles d'écoulement inclinés par rapport à la vitesse du vent mesurée à l'écoulement non incliné. La réponse de l'angle d'inclinaison d'un anémomètre à coupelles doit être mesurée dans une soufflerie qui satisfait aux exigences décrites à l'Article 8. Le fait que la hauteur de la soufflerie soit suffisante pour obtenir des caractéristiques de réponse d'inclinaison exactes doit en outre être documenté.

Le comportement d'un anémomètre est fortement influencé par l'espace libre qui l'entoure, particulièrement en dessous et au-dessus de l'anémomètre. Il est important que le mécanisme d'inclinaison soit conçu de sorte que le centre du détecteur de l'anémomètre soit fixe, mais en mesure de tourner. La plaque de fond de la soufflerie doit en outre être fermée afin d'éviter toute nuisance liée à l'écoulement. Aucun mouvement de translation ne peut donc être effectué par le rotor; seule une inclinaison du plan du rotor a lieu.

La réponse de l'angle d'inclinaison peut être mesurée de deux manières différentes: par balayage ou à partir de positions fixes.

Il convient de déterminer la réponse de l'anémomètre à un écoulement de l'air incliné quasi statiquement avec l'aide d'un dispositif d'angle d'inclinaison automatique installé dans la soufflerie. Pendant les mesurages, l'anémomètre est lentement incliné dans un sens et dans l'autre avec une vitesse de balayage très lente (moins de 0,05°/s); l'influence sur les résultats de la vitesse angulaire peut alors être négligée. Les balayages ne peuvent être utilisés que si la vitesse du vent dans la soufflerie reste inférieure à 0,5 % de la vitesse du vent nominale pour tous les angles d'inclinaison.

À un écoulement non incliné, l'angle d'inclinaison doit être fixé et les mesurages doivent être effectués pendant 300 s afin de garantir que suffisamment de données sont collectées depuis la tranche zéro ($\pm 0,5^\circ$). Ces données de tranche zéro sont utilisées pour la normalisation de la réponse de l'angle d'inclinaison.

Les enregistrements de l'angle d'inclinaison, de la vitesse du vent dans la soufflerie et des résultats de l'anémomètre doivent être simultanés et moyennés. Il peut être utile d'intégrer une résolution plus fine de l'algorithme de moyennage de tranche afin de tenir compte de gradients plus élevés dans la réponse de l'angle d'inclinaison autour de zéro degré.

À défaut, il convient de déterminer la réponse de l'angle d'inclinaison par des mesurages progressifs de la position fixée, où la réponse à chaque angle est déterminée par l'étalonnage de la soufflerie de l'Article 8 à des vitesses du vent nominales choisies dans la plage de vitesses du vent.

Recommandations concernant la matrice de mesure:

- définition de l'angle d'écoulement: positif pour écoulement montant sur rotor à coupelles;
- étapes et plage d'angles d'inclinaison: au moins -30° à $+30^\circ$ (par exemple, $\pm 0^\circ$, $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$, $\pm 3^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 6^\circ$, $\pm 8^\circ$... $\pm 30^\circ$);
- étapes et plage de vitesses du vent: 4 m/s à 16 m/s (par exemple, 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s);
- plage de moyennage de tranche pour la méthode de balayage: largeur de tranche max 2° .

Un exemple de réponse de l'angle d'inclinaison (y compris la forme "idéale" de cosinus) est représenté à la Figure 1.

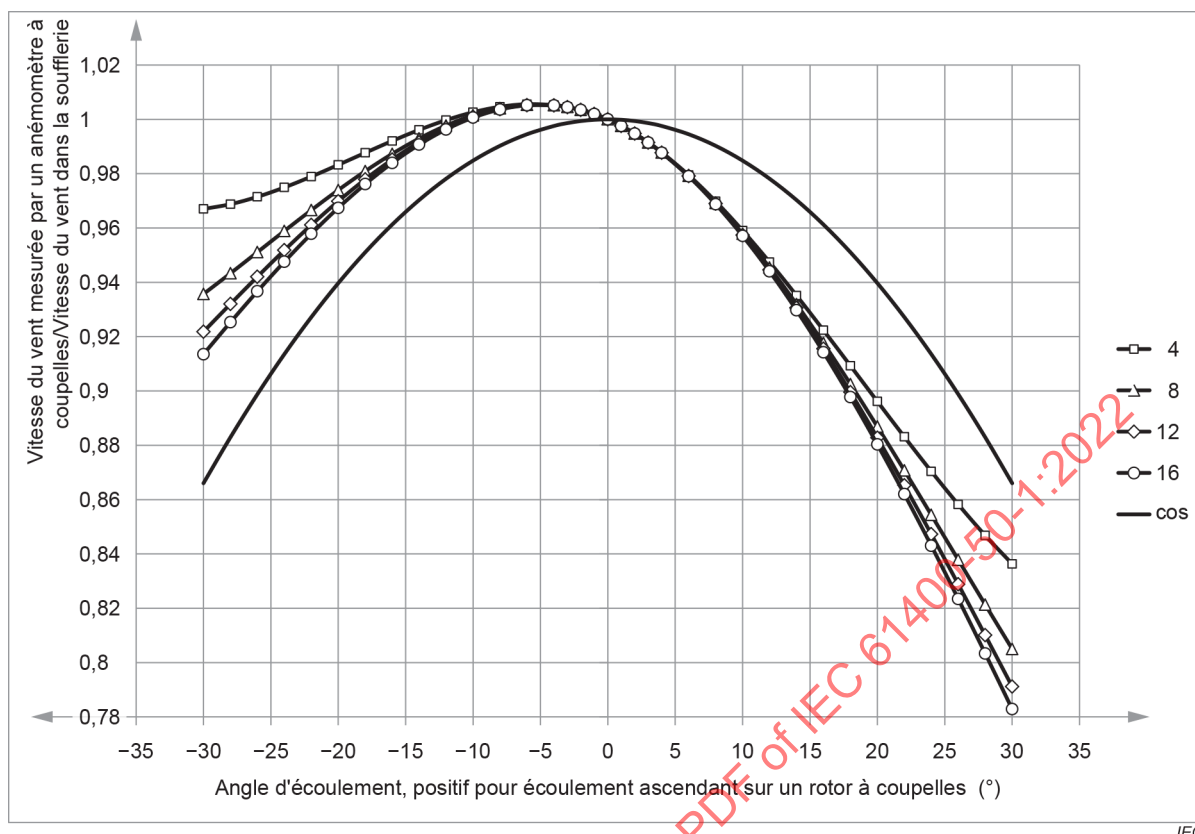


Figure 1 – Réponse de l'angle d'inclinaison $V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$ d'un anémomètre à coupelles en fonction de l'angle d'écoulement α comparée à la réponse du cosinus

7.2.2 Mesurages des caractéristiques directionnelles des anémomètres à coupelles dans une soufflerie

La conception de certains anémomètres à coupelles (une forme de logement asymétrique, des entrées de câbles asymétriques, etc.) peut nuire au signal de vitesse du vent de l'anémomètre par rapport à la direction de l'écoulement horizontal et la direction de référence utilisée pour l'étalonnage (sensibilité de l'orientation). Cet effet n'est pas souhaité, car il ne peut pas généralement pas être corrigé. Il peut contribuer de façon substantielle à l'incertitude totale du mesurage de la vitesse du vent. Les mesurages de sensibilité à l'orientation doivent être effectués à des vitesses du vent de 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s.

7.2.3 Mesurages des caractéristiques de couple du rotor de l'anémomètre à coupelles dans une soufflerie

La réponse dynamique d'un anémomètre à coupelles est gouvernée par l'équation (6), où I est le moment d'inertie de la masse, ω est la vitesse angulaire, t est la durée, Q_A est le couple aérodynamique du rotor et Q_F est le couple dû au frottement (principalement sur les paliers).

$$I \frac{d\omega}{dt} = Q_A - Q_F \quad (6)$$

Le couple net, $Q_A - Q_F$, sur le rotor de l'anémomètre à coupelles et donc les caractéristiques du couple du rotor peuvent être mesurées dans une soufflerie.

Le couple aérodynamique peut être mesuré en obligeant le rotor à tourner à des vitesses angulaires spécifiques en déséquilibre tout en mesurant le couple avec un capteur de couple.

Le couple aérodynamique du rotor de l'anémomètre à coupelles est égal au couple de réaction sur l'arbre, mesuré par le capteur de couple, moins le couple de frottement. Il convient que les mesurages proches de la vitesse angulaire à l'équilibre soient très exacts et détaillés. Un exemple de mesurage du couple, dans lequel la vitesse de la soufflerie a été maintenue à un niveau constant de 8 m/s et dans lequel la vitesse de rotation du rotor a été soumise à des variations, est donné à la Figure 2.

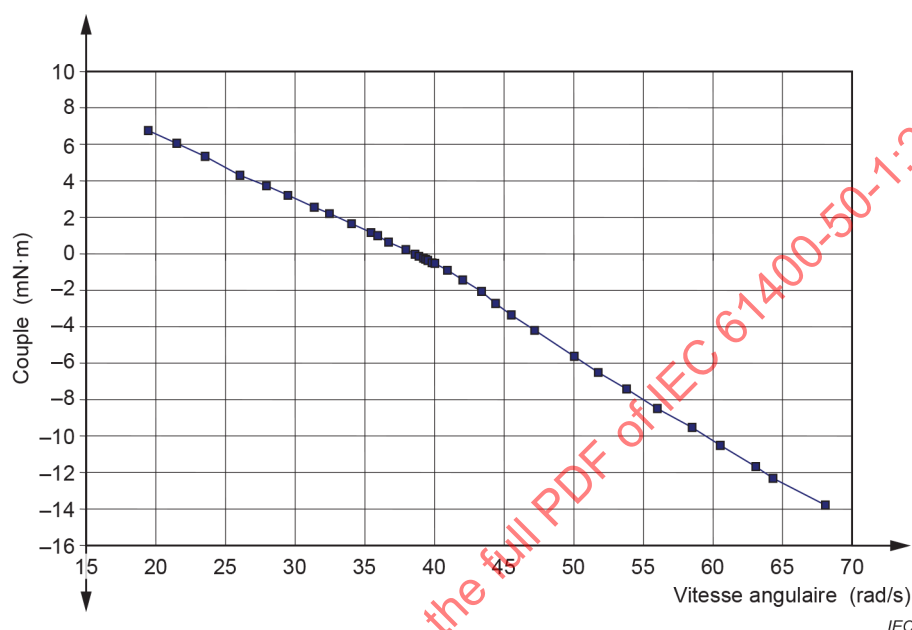


Figure 2 – Mesurages du couple en soufflerie $Q_A - Q_F$ en fonction de la vitesse angulaire ω d'un rotor d'anémomètre à coupelle à 8 m/s

7.2.4 Mesurages des réponses échelonnées des anémomètres à coupelles dans une soufflerie

Les caractéristiques du couple du rotor peuvent également être mesurées avec une méthode de réponse échelonnée dans une soufflerie. Cette méthode est moins précise que celle décrite en 7.2.3. En effet, les caractéristiques de couple linéaire des deux côtés du rapport de vitesse à l'équilibre (coefficient de couple égal à zéro, voir 7.3.2) doivent faire l'objet d'une hypothèse.

Une réponse échelonnée est une méthode dans laquelle un anémomètre à coupelles, dans une soufflerie avec une vitesse d'écoulement constante, est forcé à une vitesse de rotation en déséquilibre, supérieure ou inférieure à la vitesse du vent à l'équilibre, la récupération de la vitesse angulaire à l'équilibre étant surveillée. La région de récupération proche de l'équilibre est la partie importante de la récupération. Il est recommandé d'utiliser les données de la région de récupération entre 50 % et 98 % de la vitesse du rotor à l'équilibre lors des essais d'accélération et entre 150 % et 102 % lors des essais de décélération au cours de l'installation des lignes de coefficient de couple.

Pour forcer l'anémomètre à fonctionner en déséquilibre, la méthode peut consister à fixer un arbre intermédiaire sur le dessus du rotor de l'anémomètre à coupelles et à le raccorder à un moteur en le faisant passer par un trou à travers la cloison de la soufflerie. La vitesse de rotation est contrôlée par le moteur, qui est mécaniquement désengagé du rotor quand le mesurage de l'accélération ou de la décélération doit commencer.

L'état de déséquilibre peut également être atteint en appliquant un ou plusieurs jets d'air comprimé d'un côté ou de l'autre du rotor de l'anémomètre à coupelles. Toutefois, le vent en amont dans la soufflerie ne doit pas être perturbé.

Il convient que les états de départ en déséquilibre soient bien en dehors de la plage de rotations pour l'analyse (de 50 % à 150 % de la vitesse du rotor à l'équilibre), afin de garantir que le dispositif d'excitation n'influe pas sur les données utilisées pour l'installation.

Lorsque les caractéristiques du couple peuvent être exprimées par une relation linéaire d'un côté ou de l'autre de l'équilibre du couple (couple égal à zéro), la réponse échelonnée peut être exprimée par l'équation (7):

$$u(t) = u_t - \Delta u \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \quad (7)$$

où

$u(t)$ est la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre à coupelles au moment t à l'aide de la fonction d'étalonnage ordinaire;

u_t est la vitesse du vent dans la soufflerie;

Δu est la différence entre la vitesse du vent dans la soufflerie et la vitesse du vent indiquée par l'anémomètre à coupelles, au début du mesurage de la réponse échelonnée, à l'instant t_0 ;

t est le temps;

τ est la constante de temps à déterminer pour la réponse échelonnée (τ_{low} pour la réponse échelonnée du dessous et τ_{high} pour la réponse échelonnée du dessus).

Lors de l'installation des données dans les deux constantes inconnues τ et t_0 , il est utile de reformuler l'équation et d'utiliser la régression linéaire pour déterminer la constante de temps τ :

$$\ln\left(\frac{u_t - u(t)}{\Delta u}\right) = \frac{t - t_0}{\tau} \quad (8)$$

Un exemple d'utilisation des résultats de la méthode de réponse échelonnée pour déterminer le couple linéaire des constantes de temps est décrit de manière plus approfondie en 7.3.2.

7.2.5 Mesurages des effets induits de la température sur la performance de l'anémomètre

7.2.5.1 Généralités

Les effets induits par la température qui influent sur la performance de l'anémomètre doivent être évalués.

7.2.5.2 Mesurage du couple de frottement dans un anémomètre à coupelles

Les effets dépendants de la température et dus au frottement des paliers doivent être évalués par un essai du volant d'inertie dans une chambre climatique [2].

Les mesurages du couple de frottement doivent être faits en remplaçant le rotor de l'anémomètre à coupelles par un volant d'inertie et en mesurant la décélération d'une vitesse de rotation qui correspond à 20 m/s. Deux couples agissent sur le rotor: le couple de frottement

des paliers et le couple de frottement de l'air sur le volant d'inertie (qui doit être soustrait du couple mesuré). Le couple de frottement peut être dû à d'autres causes que le frottement des paliers, par exemple à l'émission d'un signal. Un tel couple doit être inclus dans les mesurages de couple de frottement. Les essais doivent être effectués à des températures comprises entre -20 °C et +40 °C, avec une graduation de 5 °C au moins. Pour chaque température, le frottement peut être exprimé sous la forme d'un polynôme de deuxième ordre avec trois constantes, F_0 , F_1 et F_2 .

$$Q_F = F_0 + F_1\omega + F_2\omega^2 \quad (9)$$

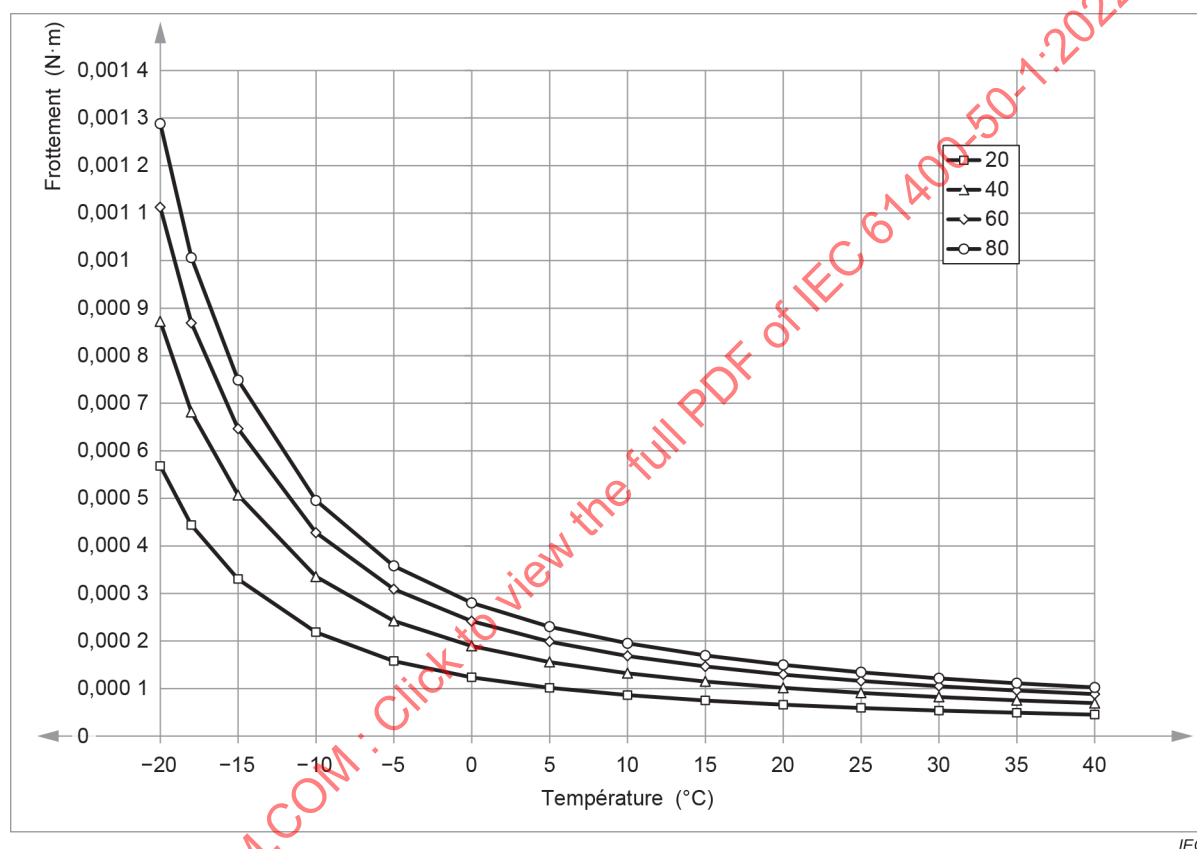


Figure 3 – Exemple de couple de frottement des paliers Q_F en fonction de la température pour une plage de vitesses angulaires ω

7.2.5.3 Essais de soufflerie à différentes températures et vitesses du vent

L'influence des effets de la température sur un anémomètre entier (que ce soit un anémomètre à coupelles ou un anémomètre à ultrasons) peut être vérifiée à l'aide d'essais en souffleries climatiques. Les essais doivent être effectués à des températures comprises entre -20 °C et +40 °C, avec une graduation de 5 °C au moins, conformément au Tableau 1. Les essais doivent être effectués à 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s. Les écarts de la vitesse du vent par rapport à l'étalonnage normal de l'anémomètre peuvent alors être déterminés. Les conclusions des essais en soufflerie ne doivent pas être biaisées par des effets indésirables (par exemple, l'accumulation de givre sur le rotor de l'anémomètre). Il convient de comparer les résultats aux valeurs simulées calculées avec le modèle d'anémomètre à coupelles en 7.3.2.

7.2.6 Mesurages des caractéristiques directionnelles des anémomètres à ultrasons dans une soufflerie

L'influence directionnelle de la sortie des anémomètres à ultrasons doit être mesurée dans une soufflerie qui satisfait aux exigences décrites à l'Article 8.

La réponse de l'anémomètre à un écoulement de l'air incliné et/ou orienté quasi statiquement doit être déterminée avec l'aide d'un dispositif d'angle d'inclinaison et d'orientation installé dans la soufflerie. Lors des mesurages, l'anémomètre est positionné avec un angle d'inclinaison fixe. La direction d'orientation peut être spécifiée pour les emplacements d'orientation fixes avec des mesurages pour des moyennes de 30 s ou peut être orientée de façon continue avec une vitesse de balayage d'environ 1°/s.

NOTE L'utilisation de directions d'orientation fixes améliore l'exactitude de mesure, alors que l'utilisation d'une vitesse de balayage lente est un avantage pour révéler, de façon détaillée, les variations susceptibles de se produire.

L'orientation doit être effectuée pour le secteur de mesure prédéfini de l'anémomètre à ultrasons. L'angle d'inclinaison de l'anémomètre à ultrasons doit être fixé pour les angles d'inclinaison suivants: 0°, ±2°, ±5°, ±10°, ±15°, ±20°, ±30°. Il convient d'ajouter ou d'omettre les angles d'inclinaison selon qu'ils soient manifestement nécessaires ou inutiles. Les mesurages doivent être effectués pour les vitesses du vent suivantes: 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s. Pour chaque direction, l'écart entre la vitesse du vent indiquée par l'anémomètre à ultrasons et l'étalonnage ordinaire à la direction de référence doit être déduit.

7.3 Méthode de classification des anémomètres à coupelles fondée sur les essais en soufflerie et en laboratoire et sur la modélisation de l'anémomètre à coupelles

7.3.1 Méthode

La méthode de classification doit utiliser un modèle d'anémomètre à coupelles approprié pour déterminer les écarts dus aux paramètres d'influence, conformément au Tableau 1. Il faut vérifier que le modèle d'anémomètre à coupelles est en mesure d'inclure correctement tous les paramètres d'influence. La méthode doit reposer sur les mesurages en soufflerie et en laboratoire décrits en 7.2. La méthode doit en outre utiliser un générateur de vent artificiel afin de générer des données de vent d'entrée de domaine de temps tridimensionnel pour le modèle d'anémomètre à coupelles. Les écarts ε_i doivent être déterminés à partir des différences entre les moyennes d'entrée de vitesse horizontale du vent sur 10 min du générateur de vent artificiel et les moyennes de réponse du modèle d'anémomètre à coupelles sur 10 min.

7.3.2 Exemple de modèle d'anémomètre à coupelles

7.3.2.1 Généralités

Le modèle d'anémomètre à coupelles donné en exemple est un modèle physique qui simule la réponse de l'anémomètre à coupelles dans le temps; voir références [2] et [3]. Certaines propriétés physiques de l'anémomètre à coupelles doivent être mesurées et utilisées tout au long de l'évaluation. Il s'agit de l'inertie I du rotor, de la surface frontale d'une coupelle A et du rayon R entre le centre de l'arbre et le centre des coupelles.

La réponse de l'anémomètre à coupelles au vent tridimensionnel doit être déduite à partir d'une équation différentielle à l'équilibre du couple, dans laquelle le couple sur le rotor est égal au couple aérodynamique moins le couple de frottement (côté droit de l'équation), voir l'équation (6).

La vitesse angulaire de l'anémomètre à coupelles ω est trouvée à partir de l'équation différentielle. La réponse du couple aérodynamique et des couples de frottement dus aux variations de vent est déterminée à l'aide des valeurs d'étalonnage de la soufflerie. Le couple aérodynamique Q_A est fonction du vecteur de vent instantané $\vec{U} = \{u, v, w\}$ déterminé par le générateur de vent artificiel. L'angle d'écoulement ascendant et le scalaire du vecteur de vent sont déterminés à partir du vecteur de vent:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) \quad (10)$$

$$|\vec{U}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (11)$$

Une vitesse horizontale du vent équivalente est trouvée en multipliant le scalaire du vecteur de vent par la réponse angulaire mesurée dans la soufflerie pour l'angle d'écoulement ascendant instantané:

$$U_{eq} = F_{\alpha}(\alpha, |\vec{U}|) \cdot |\vec{U}| \quad (12)$$

Dans le cas présent, $F_{\alpha}(\alpha, |\vec{U}|)$ est la réponse de l'angle d'inclinaison de l'anémomètre à coupelles, comme cela est représenté à la Figure 1.

Le couple aérodynamique peut être exprimé par une courbe de couple généralisé dont la validité a été vérifiée pour toutes les vitesses du vent et toutes les vitesses de rotation [2]:

$$Q_A = \frac{1}{2} \rho A R U_{eq}^2 C_{QA}(\lambda) \quad (13)$$

où

ρ est la masse volumique de l'air;

A est la surface d'une coupelle;

R est le rayon d'une coupelle;

U_{eq} est la vitesse horizontale du vent équivalente;

C_{QA} est le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor.

Le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor est déduit à partir des mesurages de coupe de soufflerie en 7.2.3 ou en 7.2.4, où U_{eq} dans ce cas est remplacé par la vitesse du vent dans la soufflerie:

$$C_{QA} = C_{QA}(\lambda) = \frac{Q_Q}{\frac{1}{2} \rho A R U_{eq}^2} \quad (14)$$

Le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor est fonction du rapport de vitesse:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_{eq} - U_t} \quad (15)$$

où

U_t est un seuil de vitesse du vent (déduit comme le reste du décalage de l'étalonnage après soustraction de l'influence du frottement; lorsque le frottement est égal à zéro, le seuil de vitesse du vent est égal au décalage de l'étalonnage).

Lorsque le coefficient de couple du rotor peut être caractérisé par deux courbes linéaires des deux côtés du couple à l'équilibre, deux constantes de temps correspondantes peuvent être

déterminées par les mesurages de réponse échelonnée de la soufflerie (voir 7.2.4 et [4]). Les caractéristiques de couple linéaire peuvent alors être déterminées à partir des valeurs de τ , pour les rapports de vent bas et élevé respectivement, de l'équation (16):

$$\kappa = -\frac{2I(u_0 + \Delta u - U_t)}{\rho A R^2 (u_0 + \Delta u)^2 \tau} \quad (16)$$

Le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor peut être exprimé par:

$$\text{for } \lambda \leq \lambda_0 : C_{QA} = \kappa_{\text{low}}(\lambda - \lambda_0) \text{ and for } \lambda > \lambda_0 : C_{QA} = \kappa_{\text{high}}(\lambda - \lambda_0) \quad (17)$$

où

λ_0 est le rapport de vitesse pour $C_{QA} = 0$.

Un exemple de coefficient de couple du rotor est donné à la Figure 4.

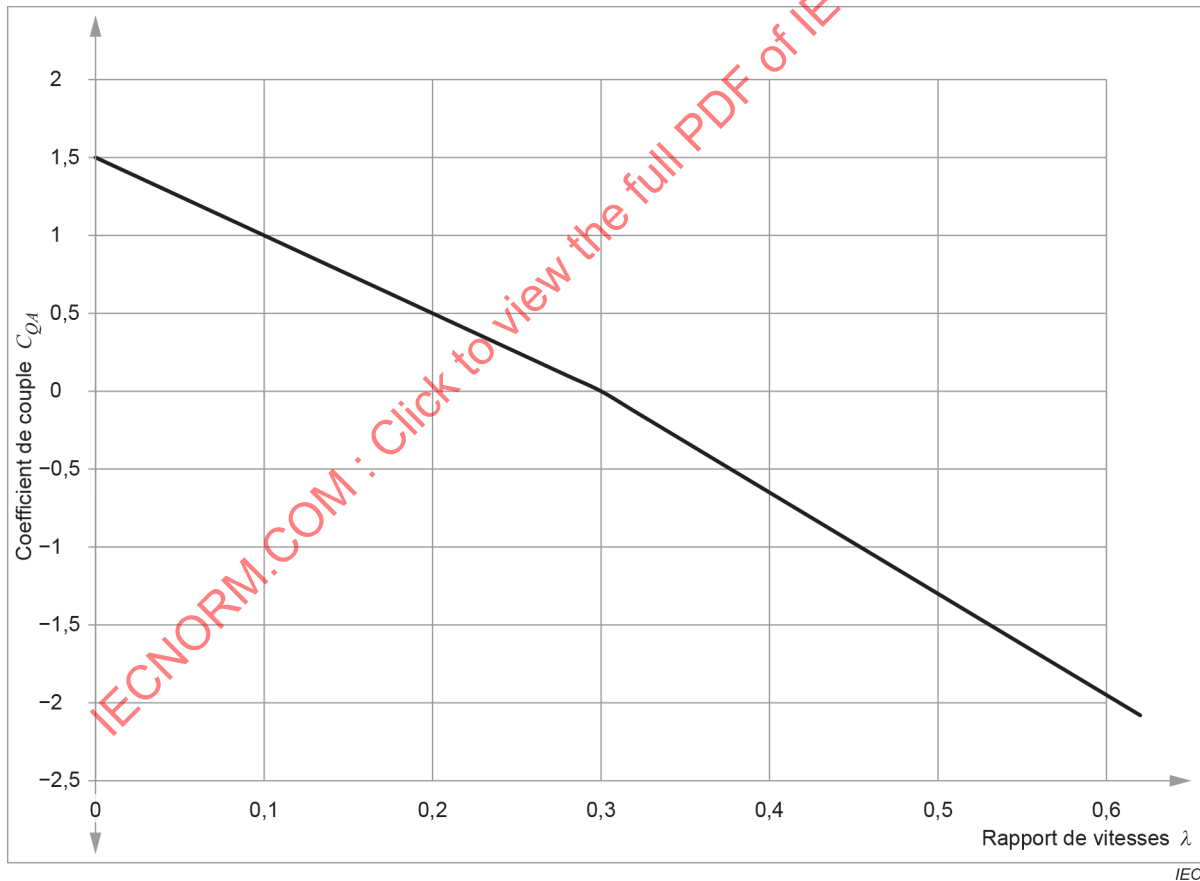


Figure 4 – Exemple de coefficient de couple du rotor C_{QA} en fonction du rapport de vitesse λ déduit à partir des réponses échelonnées avec κ_{low} égal à $-5,5$ et κ_{high} égal à $-6,5$

Le couple de frottement est une fonction de la température et de la vitesse de rotation, issue des mesurages de frottement en 7.2.5.2:

$$Q_F = Q_F(T, \omega) \quad (18)$$

7.3.2.2 Variations de la plage de paramètres d'influence et exemple de détermination de classe

Les plages des paramètres d'influence doivent être variées à l'aide d'un modèle de turbulences qui génère des chronogrammes tridimensionnels artificiels de la vitesse du vent sur des périodes de 10 min avec un échantillon de vitesse d'au moins 10 Hz. En exposant le modèle d'anémomètre à coupelles à ces vents artificiels, les réponses de l'anémomètre à coupelles sont déduites et les écarts par rapport à la vitesse horizontale des vents artificiels sont trouvés. Les écarts pour toutes les combinaisons de plages des paramètres d'influence peuvent être déduits à l'aide de la méthode de Monte-Carlo. Les écarts déterminent la classe comme cela est exprimé dans l'équation (2). Un exemple de classification d'un anémomètre à coupelles est donné à la Figure 5; les caractéristiques sont représentées à la Figure 3 et à la Figure 4; et les données sont répertoriées dans le Tableau 2 et le Tableau 3. D'autres données relatives à la classification sont disponibles dans le Tableau 4.

Les écarts de tous les paramètres d'influence pour les classes A, B, C et D sont indiqués à la Figure 5 et à la Figure 6. Les classes qui en résultent sont 1,69A, 6,56B, 8,01C et 9,94D.

Tableau 2 – Réponse de l'angle d'inclinaison de l'exemple d'anémomètre à coupelles

Vitesse du vent, V (m/s)	4	8	12	16
Angle, α (deg)	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$
-30	0,967 005	0,935 689	0,921 815	0,913 545
-28	0,968 769	0,943 307	0,932 028	0,925 304
-26	0,971 484	0,951 098	0,942 067	0,936 683
-24	0,974 941	0,958 908	0,951 805	0,947 569
-22	0,978 933	0,966 583	0,961 111	0,957 850
-20	0,983 253	0,973 974	0,969 863	0,967 413
-18	0,987 695	0,980 930	0,977 934	0,976 148
-16	0,992 055	0,987 304	0,985 199	0,983 945
-14	0,996 131	0,992 948	0,991 538	0,990 698
-12	0,999 722	0,997 717	0,996 829	0,996 301
-10	1,002 628	1,001 468	1,000 954	1,000 648
-8	1,004 651	1,004 057	1,003 793	1,003 637
-6	1,005 594	1,005 344	1,005 233	1,005 166
-4	1,005 262	1,005 188	1,005 155	1,005 136
-3	1,004 558	1,004 526	1,004 513	1,004 505
-2	1,003 462	1,003 452	1,003 448	1,003 446
-1	1,001 951	1,001 950	1,001 949	1,001 949
0	1,000 000	1,000 000	1,000 000	1,000 000
1	0,997 595	0,997 594	0,997 593	0,997 593
2	0,994 750	0,994 740	0,994 736	0,994 734
3	0,991 490	0,991 458	0,991 445	0,991 437
4	0,987 838	0,987 764	0,987 731	0,987 712

Vitesse du vent, V (m/s)	4	8	12	16
Angle, α (deg)	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$
6	0,979 458	0,979 208	0,979 097	0,979 030
8	0,969 803	0,969 209	0,968 945	0,968 789
10	0,959 068	0,957 908	0,957 394	0,957 088
12	0,947 450	0,945 445	0,944 557	0,944 029
14	0,935 147	0,931 964	0,930 554	0,929 714
16	0,922 359	0,917 608	0,915 503	0,914 249
18	0,909 287	0,902 522	0,899 526	0,897 740
20	0,896 133	0,886 854	0,882 743	0,880 293
22	0,883 101	0,870 751	0,865 279	0,862 018
24	0,870 397	0,854 364	0,847 261	0,843 025
26	0,858 228	0,837 842	0,828 811	0,823 427
28	0,846 801	0,821 339	0,810 060	0,803 336
30	0,836 325	0,805 009	0,791 135	0,782 865

**Tableau 3 – Coefficients de frottement
de l'exemple d'anémomètre à coupelles**

Température (°C)	F_0 (N·m)	F_1 (N·m·s)	F_2 (N·m·s ²)
-20	2,000E-04	2,000E-05	-8,000E-08
-18	1,563E-04	1,563E-05	-5,714E-08
-15	1,163E-04	1,163E-05	-4,000E-08
-10	7,692E-05	7,692E-06	-3,077E-08
-5	5,556E-05	5,556E-06	-2,222E-08
0	4,348E-05	4,348E-06	-1,739E-08
5	3,571E-05	3,571E-06	-1,429E-08
10	3,030E-05	3,030E-06	-1,212E-08
15	2,632E-05	2,632E-06	-1,053E-08
20	2,326E-05	2,326E-06	-9,302E-09
25	2,083E-05	2,083E-06	-8,333E-09
30	1,887E-05	1,887E-06	-7,547E-09
35	1,724E-05	1,724E-06	-6,897E-09
40	1,587E-05	1,587E-06	-6,349E-09

Tableau 4 – Données diverses relatives à la classification de l'exemple d'anémomètre à coupelles

Liste de classification	Valeur
Diamètre de la coupelle	75 mm
Surface de la coupelle A	0,004 417 87 m ²
Rayon au centre de la coupelle R	65 mm
Inertie I du rotor	0,000 2 kg·m ²
Rapport de vitesse à l'équilibre λ_0	0,3
Température d'étalonnage	20 °C
Pression atmosphérique d'étalonnage	101 3 hPa
Masse volumique de l'air d'étalonnage ρ	1,203 821 kg/m ³
Intensité des turbulences d'étalonnage	0,003
Structure des turbulences d'étalonnage	$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w = 1/1/1$ isotrope
Coefficients d'étalonnage A et B	0,679 55 et 0,258 70
Coefficients de frottement d'étalonnage F_0 , F_1 et F_2 à 20 °C	voir Tableau 3 pour 20 °C
Pentes de coefficient de couple κ_{low} et κ_{high}	-5,0 et -6,5

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-1:2022

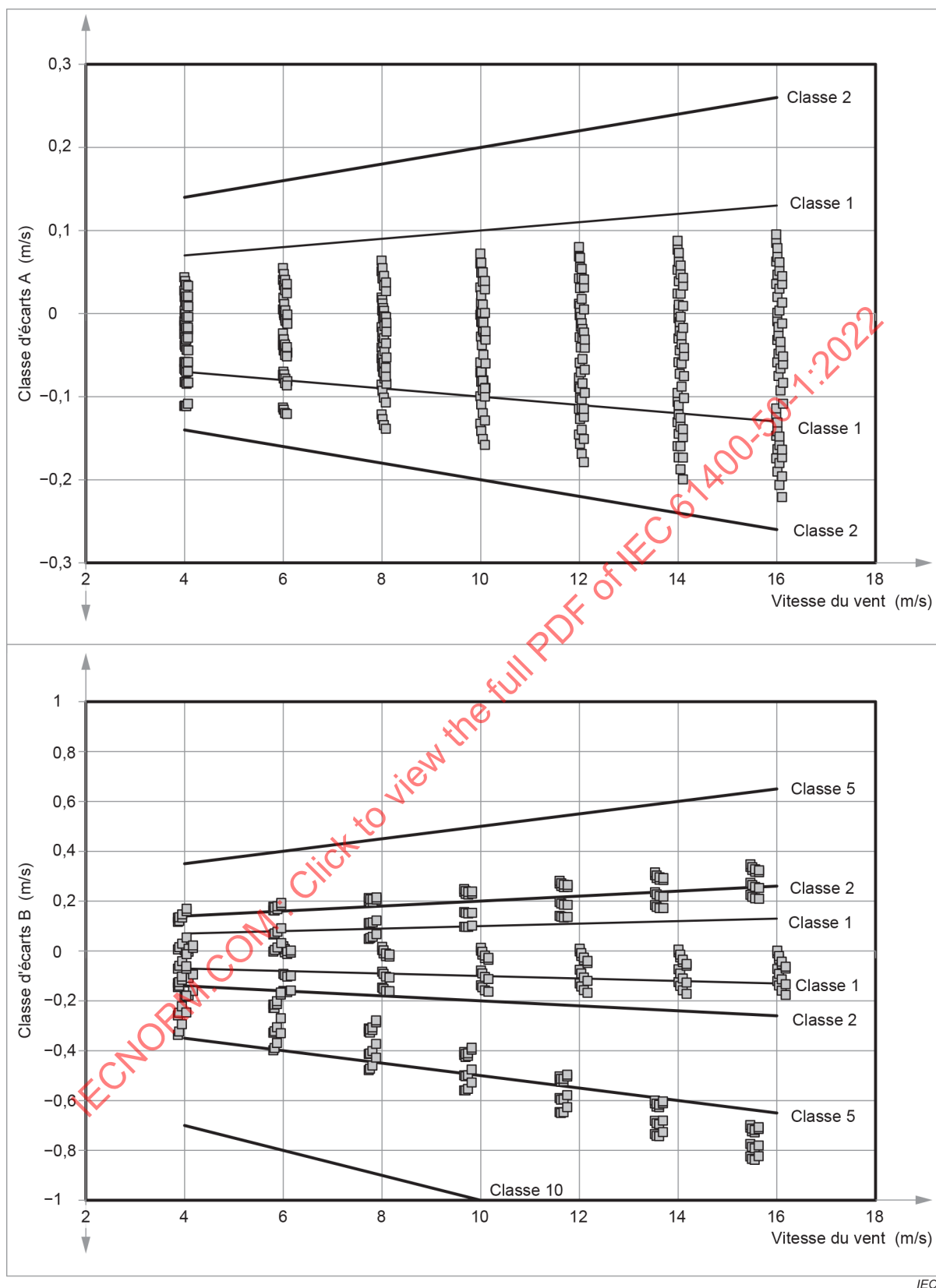


Figure 5 – Écarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 1,69A (image du haut) et une classe 6,56B (image du bas)

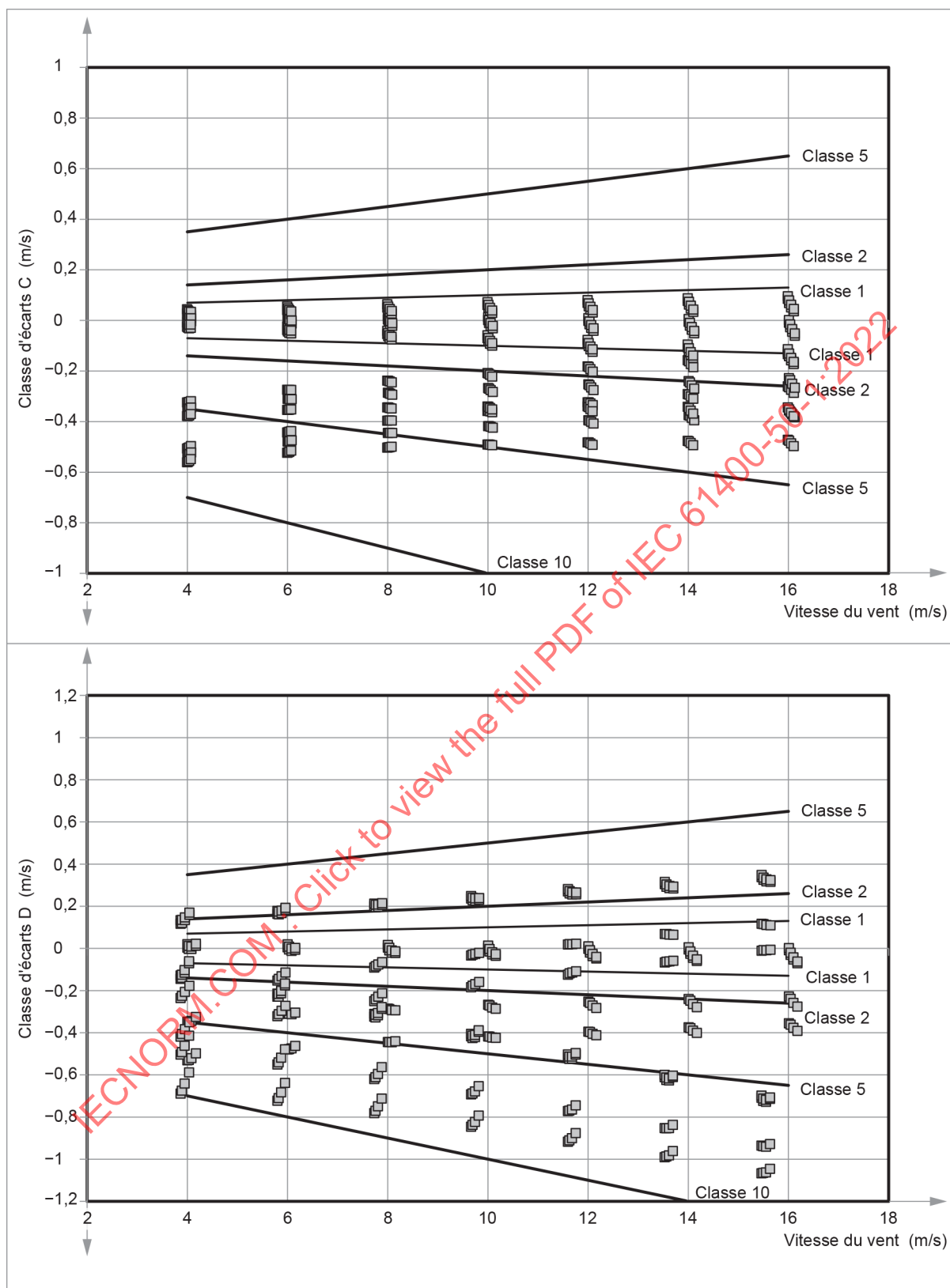


Figure 6 – Écarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 8,01C (image du haut) et une classe 9,94D (image du bas)

7.4 Méthode de classification d'anémomètre à ultrasons fondée sur les essais en soufflerie et sur la modélisation de l'anémomètre à ultrasons

La méthode de classification utilise un modèle d'anémomètre à ultrasons pour déterminer les écarts dus aux paramètres d'influence. La méthode est fondée sur les mesurages en soufflerie et en laboratoire décrits en 7.2.6 et en 7.2.5.3. La méthode de classification de l'anémomètre à ultrasons utilise en outre un générateur de vent artificiel similaire à celui du modèle de l'anémomètre à coupelles, afin de générer des données de vent d'entrée de domaine de temps tridimensionnel pour le modèle d'anémomètre à ultrasons; voir 7.3.2.

La réponse de l'anémomètre à ultrasons est fonction du vecteur de vent instantané $\vec{U} = \{u, v, w\}$ déterminé par le générateur de vent artificiel. L'angle d'écoulement ascendant et le scalaire du vecteur de vent sont déterminés à partir du vecteur de vent par les équations (10) et (11). La réponse est ensuite déterminée par l'interpolation dans les données mesurées dans une soufflerie:

$$U_{\text{sonic}} = F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|) \cdot |\vec{U}| \quad (19)$$

où

$F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|)$ est la fonction de réponse d'inclinaison et d'orientation pour l'anémomètre à ultrasons.

Les écarts sont déterminés à partir des différences entre les réponses du modèle d'anémomètre à ultrasons et les moyennes des données du vent artificiel; voir 7.3.2.2. Les paramètres d'influence pertinents sont les réponses des angles d'inclinaison et d'orientation, ainsi que les effets induits par la température.

7.5 Mesurages de comparaison sur site libre

Dans un mesurage de comparaison sur site libre, deux anémomètres peuvent être comparés. Le mesurage de comparaison peut être utilisé pour vérifier que les méthodes utilisées dans la classification des instruments sont cohérentes. Voir 7.3 et 7.4. La comparaison entre les anémomètres exige que les deux anémomètres soient étalonnés dans la même soufflerie. Il convient de configurer le site conformément aux procédures de montage pour deux anémomètres montés en tête de mât, comme cela est décrit en 10.3, avec une distance maximale entre eux. Un anémomètre à ultrasons 3D (étalonné u , v et w) doit être monté sur une flèche en dessous des deux capteurs pour mesurer les plages des paramètres d'influence environnementaux (angle d'écoulement, turbulences, spectre des turbulences) pour une analyse de classification de campagne de mesure de classe S. La température de l'air doit en outre être mesurée sur la même flèche pour déterminer la plage de températures et la pression atmosphérique doit être mesurée pour déterminer la plage de masses volumiques de l'air. Les traces temporelles de l'anémomètre à ultrasons 3D doivent être enregistrées, alors que des mesurages moyens sur 10 min dans un secteur relativement réduit et perpendiculaire à la flèche sont acceptables pour les deux anémomètres en cours de comparaison. Une base de données acceptable (au moins 180 h) doit être collectée pour une plage de vitesses du vent de 4 m/s à 16 m/s et une plage d'intensités des turbulences (par exemple, de 0,04 à 0,14). Afin de comparer deux anémomètres, il convient alors de dériver une classification de classe S des deux anémomètres des essais en laboratoire, puis de les comparer aux mesurages sur site.

8 Procédure d'étalonnage de la soufflerie pour les anémomètres

8.1 Exigences générales

Les exigences générales pour l'étalonnage des anémomètres sont résumées de la manière suivante:

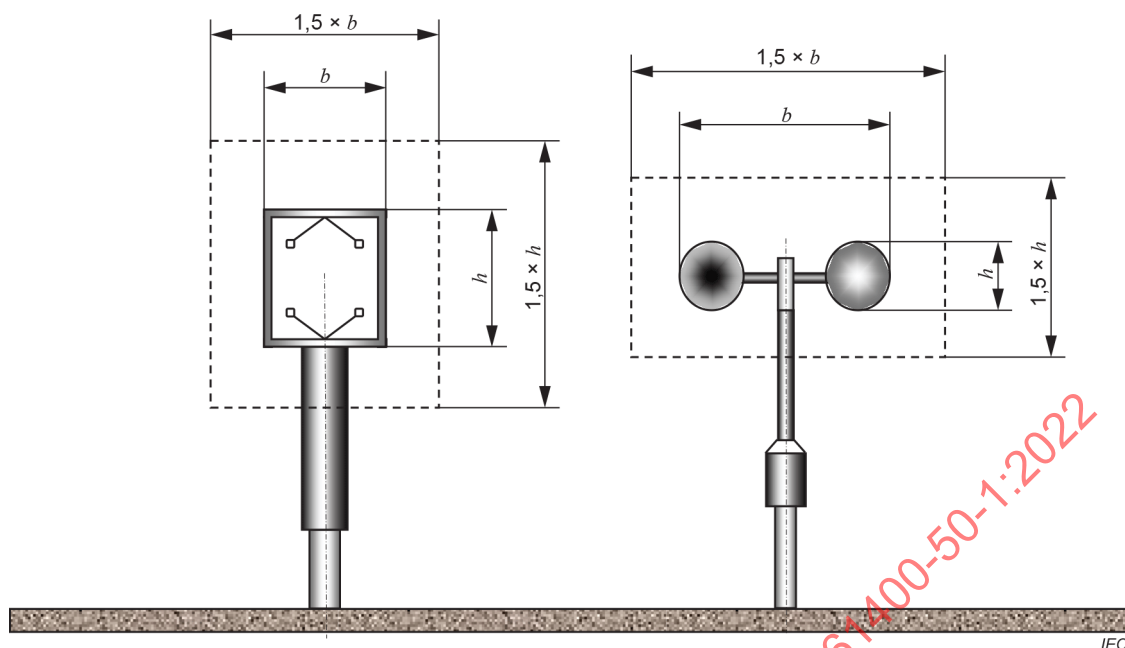
- a) l'étalonnage de l'anémomètre doit être réalisé dans une soufflerie qui est adaptée à l'étalonnage des anémomètres;
- b) tous les transducteurs et le matériel de mesure adaptés à l'étalonnage des anémomètres doivent présenter des étalonnages traçables, conformément aux normes internationales. Les certificats et rapports d'étalonnage doivent contenir toutes les informations pertinentes relatives à la traçabilité (y compris, par exemple, des précisions relatives aux accréditations, le cas échéant);
- c) la vitesse du vent de référence doit être mesurée au moyen d'un tube de Pitot double qui doit être de type NPL à tête ellipsoïdale, conformément à l'ISO 3966. Le tube de Pitot double doit être étalonné pour les plages de vitesses du vent appropriées et doit être documenté. En variante, la vitesse du vent de référence peut être mesurée par anémométrie laser Doppler (LDA, laser Doppler anemometry) avec des incertitudes bien documentées;
- d) la cohérence du montage expérimental doit être vérifiée par des étalonnages comparatifs au moins quotidiens de l'"anémomètre de commande de qualité" de l'installation;
- e) la qualité de l'écoulement doit être vérifiée comme cela est exigé en 8.2;
- f) la répétabilité de l'étalonnage doit être vérifiée, comme cela est exigé en 8.2;
- g) l'étalonnage de l'anémomètre doit s'appuyer sur une évaluation exhaustive de l'incertitude d'étalonnage, réalisée conformément à l'ISO/IEC Guide 98-3:2008.

8.2 Exigences pour la soufflerie

La présence de l'anémomètre ne doit pas affecter de manière considérable le champ d'écoulement dans la soufflerie. Au cours des mesurages, et jusqu'à un certain point, l'anémomètre est influencé par l'obstruction de la soufflerie et les effets de bord. Le rapport d'obstruction de surface (BR, blockage area ratio) ne doit pas dépasser 0,05. Il est défini comme le rapport de la surface projetée par l'anémomètre, perpendiculaire à la direction de l'écoulement (y compris son système de montage et la surface projetée par un rotor tournant), à la surface totale de la section d'essai. Les effets d'obstruction doivent toujours être pris en compte conformément à 8.4.3.

Il est recommandé que la section d'essai de la soufflerie présente une hauteur d'au moins 1,0 m et une largeur d'au moins 1,0 m.

L'écoulement doit être uniforme dans la surface de la section dans laquelle est monté l'anémomètre. Il convient de mesurer l'uniformité de l'écoulement avec les dispositifs de détection de la vitesse, c'est-à-dire les tubes de Pitot, les anémomètres à fils chauds ou la vélocimétrie laser Doppler, afin de mesurer les profils d'écoulement dans les directions longitudinale, transversale et verticale. Sur la plage de vitesses du vent d'étalonnage, la différence maximale de la vitesse moyenne entre deux points quelconques à l'intérieur du volume de mesure doit être inférieure à 0,2 %. La valeur moyenne doit être calculée sur au moins 5 minutes et le volume de mesure doit couvrir le volume actif de l'anémomètre, avec une marge de 50 % dans toutes les directions représentées à la Figure 7. L'uniformité doit être soumise à l'essai sur une période minimale de cinq minutes pour les vitesses du vent environ égales à 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s chacune.



Le volume présente également une profondeur de $1,5 \times b$ (le long de l'écoulement).

Figure 7 – Définition du volume pour l'essai d'uniformité d'écoulement

La stabilité de l'écoulement doit être mesurée au centre du volume pour lequel l'uniformité a été vérifiée. L'écoulement peut être considéré comme stable lorsque dix moyennes de 30 s consécutives sont comprises dans les 0,5 % de sa valeur moyenne.

Les anémomètres à coupelles sont très sensibles aux gradients horizontaux de vent. Différents gradients horizontaux de vent peuvent être observés en fonction de la pollution des filets et des dispositifs de lissage. Par conséquent, il est utile de vérifier le gradient horizontal de vent en utilisant deux tubes de Pitot identiques. Ils doivent être placés à la position exacte à laquelle l'anémomètre est lui-même placé, leurs têtes balayant de façon approximative la surface couverte par les coupelles des anémomètres à coupelles rotatives. Un ensemble de mesurages doit être réalisé, et la régression linéaire doit être calculée entre les pressions dynamiques mesurées par les deux tubes de Pitot. La différence de vitesse du vent doit être inférieure à 0,2 % sur une période minimale de cinq minutes. Il faut vérifier que l'influence de la présence du type d'anémomètre à étalonner (notamment le tube de montage) sur la vitesse de l'écoulement mesurée par le tube de Pitot est inférieure à $\pm 0,2$ %.

L'intensité des turbulences axiales dans la vitesse du vent à l'emplacement de l'anémomètre doit être inférieure à 2 %. L'intensité des turbulences doit inclure les fluctuations de la vitesse du vent longitudinale avec des fréquences allant jusqu'à 10 Hz. Les données relatives aux mesurages des turbulences doivent être obtenues pour une durée de 60 s par vitesse du vent à une fréquence d'échantillonnage minimale de 20 Hz. L'évaluation des turbulences doit être réalisée au moins pour les vitesses d'écoulement de 7 m/s, 10 m/s et 13 m/s avec un dispositif adapté au mesurage des fluctuations de la vitesse du vent dont la fréquence de coupure minimale est de 20 Hz. Les écarts par rapport aux exigences susmentionnées doivent être évalués par des essais appropriés et être examinés lors de l'évaluation de l'incertitude.

Le facteur d'étalonnage de la soufflerie, qui donne la relation entre les conditions à l'emplacement du mesurage de référence et les conditions à l'emplacement de l'anémomètre, doit être estimé à l'aide des tubes de Pitot pour une plage de vitesses allant de 4 m/s à 16 m/s.

Le montage d'étalonnage doit être soumis à un examen approfondi de la répétabilité des étalonnages des anémomètres. L'installation d'étalonnage doit désigner des anémomètres de référence de tailles représentatives destinés à être utilisés au cours de ces essais. Il convient que l'écart-type et l'écart maximal de la sortie de l'anémomètre de commande de qualité dans la plage de vitesses d'étalonnage soient respectivement inférieurs à 0,2 % et 0,6 % de leur valeur moyenne.

8.3 Exigences de configuration de l'instrumentation et de l'étalonnage

Le matériel spécifique de conditionnement du signal externe (notamment les convertisseurs fréquence-tension, entre autres) doit être étalonné séparément de l'anémomètre, permettant ainsi de déduire et de consigner les étalonnages de l'anémomètre et dudit matériel de manière séparée.

La résolution du système d'acquisition de données doit être au moins de 0,02 m/s. Dans le cas d'un instrument de mesure de la tension analogue, le signal doit être correctement mis en tampon afin d'empêcher son atténuation par un matériel d'enregistrement de faible impédance.

Les configurations de montage peuvent avoir des effets considérables sur la performance de l'instrument, plus particulièrement si le rapport du diamètre du tube au diamètre du rotor est élevé. Par conséquent, au cours de l'étalonnage, l'anémomètre doit être monté au sommet d'un tube afin de réduire le plus possible la distorsion de l'écoulement et un seul anémomètre peut être étalonné à la fois. Ce tube doit présenter le même diamètre que celui sur lequel l'anémomètre est monté pour son fonctionnement dans l'atmosphère libre. Il convient que la distance verticale entre le rotor de l'anémomètre et les limites inférieure et supérieure de la section d'essai de la soufflerie soit au moins égale à 0,5 m. Si l'anémomètre est sensible à la direction de l'écoulement horizontal, une orientation de référence doit être définie, documentée et utilisée au cours de l'étalonnage. L'anémomètre doit être positionné au niveau de la section d'essai, perpendiculaire au champ d'écoulement de la soufflerie, de manière aussi exacte que possible. L'écart maximal du tube de montage de l'anémomètre est de 0,2°. Un exemple de réponse d'inclinaison d'un anémomètre à coupelles type est donné à la Figure 1.

Il est important de garantir que l'anémomètre n'est pas influencé par la présence d'un matériel de mesure de la vitesse du vent de référence. Réciproquement, la présence d'un anémomètre ne doit pas affecter l'écoulement dans la zone de l'instrument de référence. En cas d'effets de distorsion de l'écoulement, le tube de Pitot doit être remplacé. Ces effets peuvent être évalués en enlevant puis en réinstallant l'anémomètre puis l'instrument de référence, et enfin en vérifiant si la sortie de l'instrument restant varie ou non.

Les tubes de Pitot doubles doivent être placés dans la section d'essai en alignement avec la direction moyenne de l'écoulement. Le désalignement maximal admis est 0,5°.

NOTE Un désalignement des tubes de Pitot doubles peut mener à une polarisation lors du mesurage de la pression différentielle. Un alignement à 0,5° près de la direction moyenne de l'écoulement assure une polarisation de la valeur de pression lue différentielle de moins de 0,1 % pour le tube de Pitot de type NPL (voir l'ISO 3966:2020, Figure A.5).

Au cours de l'étalonnage, le signal de sortie de l'anémomètre doit être examiné pour garantir qu'il n'est pas soumis à des interférences ou nuisances sonores.

8.4 Procédure d'étalonnage

8.4.1 Procédure générale pour les anémomètres à coupelles et à ultrasons

Cette procédure concerne l'étalonnage du mesurage de la vitesse du vent horizontal à partir d'un anémomètre à coupelles ou à ultrasons. L'anémomètre doit fonctionner pendant au moins 5 min à une vitesse d'environ 10 m/s avant d'amorcer la procédure d'étalonnage. L'étalonnage doit être réalisé à des vitesses du vent à la fois croissantes et décroissantes, dans la plage de 4 m/s à 16 m/s, à un intervalle d'étalonnage de 1 m/s ou moins. Lorsque le chauffage est activé pendant les étalonnages, cela doit être noté dans le certificat d'étalonnage.

NOTE Des intervalles de 1 m/s peuvent également être appliqués avec des écarts de valeurs de 2 m/s, par exemple 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 15 m/s, 13 m/s, 11 m/s, 9 m/s, 7 m/s, 5 m/s.

La fréquence d'échantillonnage doit être d'au moins 1 Hz et l'intervalle d'échantillonnage d'au moins 30 s. Cet intervalle d'échantillonnage peut être augmenté lorsque des anémomètres basse résolution sont étalonnés. Il est important de garantir que les valeurs lues de la vitesse du vent mesurées par l'anémomètre et les valeurs lues de la vitesse du vent de référence couvrent la même période. Avant de recueillir les données à chaque vitesse du vent, une durée adéquate doit être admise puis établie pour des conditions d'écoulement stables (voir 8.2). Elle peut être de 1 min, mais varie selon les installations.

8.4.2 Procédure d'étalonnage des anémomètres à ultrasons

Les anémomètres à ultrasons sont conçus pour mesurer les composantes du vent 2D ou 3D. Lorsque le cas d'utilisation du mesurage du vent exige le mesurage de la vitesse horizontale du vent (par exemple, pour le mesurage de la performance de puissance), les anémomètres à ultrasons doivent être configurés pour mesurer la vitesse horizontale du vent, de préférence en interne ou par post-traitement.

Au cours de l'étalonnage, la totalité de l'anémomètre à ultrasons doit être placée dans la section d'essai de la soufflerie. La partie active de l'anémomètre à ultrasons doit être située dans le volume de la section d'essai. L'alignement d'orientation doit être établi sur la direction d'orientation d'étalonnage de référence, voir 8.3. Il est souvent avantageux d'établir un alignement d'orientation qui impose la plus faible perturbation de l'écoulement engendrée par les supports des émetteurs acoustiques.

Pendant l'étalonnage de l'anémomètre à ultrasons, ses paramètres de montage doivent être documentés dans le certificat d'étalonnage ou dans l'une de ses annexes. L'étalonnage couvre uniquement les réglages identiques du capteur et un format identique de signal de sortie.

Pour cet essai, l'anémomètre à ultrasons doit être étalonné à des vitesses du vent variables, conformément au 8.4.1. Les étalonnages de l'emplacement d'orientation supplémentaire (c'est-à-dire l'angle d'orientation pour la perturbation de l'écoulement maximale engendrée par les supports) peuvent être réalisés, si cela est souhaité. Il convient de réaliser les étalonnages des emplacements d'orientation supplémentaires à 10 m/s sous forme d'un contrôle qualité de la conformité aux résultats de la classification.

Le signal d'état de l'anémomètre à ultrasons (s'il est disponible) doit être surveillé au cours des étalonnages. Le signal d'état doit être utilisé pour exclure les données erronées.

8.4.3 Détermination de la vitesse du vent à l'emplacement de l'anémomètre

La masse volumique de l'air ρ doit être calculée sur la base de la température de l'air de la soufflerie T , l'humidité relative Φ et la pression atmosphérique B moyennes, en utilisant l'équation (20) (incertitude-type inférieure à 10^{-3} kg/m³):

$$\rho = \frac{1}{T} \left(\frac{B}{R_0} - \Phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (20)$$

où

B est la pression atmosphérique [Pa];

T est la température absolue [K];

Φ est l'humidité relative (plage de 0 à 1);

R_0 est la constante de gaz de l'air sec [287,05 J/kgK];

R_w est la constante de gaz de la vapeur d'eau [461,5 J/kgK];

P_w est la pression de vapeur [Pa].

La pression de vapeur P_w dépend de la température moyenne de l'air.

$$P_w = 0,000\,020\,5 \cdot \exp(0,063\,184\,6 \cdot T) \quad (21)$$

La vitesse moyenne de l'écoulement à l'emplacement de l'anémomètre est calculée à partir de la pression différentielle moyenne ΔP_{ref} à l'emplacement de référence en utilisant l'équation (22):

$$\bar{v} = f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots) \alpha k_c \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\text{ref},i}}{\rho}} \quad (22)$$

où

α	est le coefficient de la tête du tube de Pitot double;
k_c	est le facteur d'étalonnage de la soufflerie, qui donne la relation entre les conditions à l'emplacement du mesurage de référence et les conditions à l'emplacement de l'anémomètre;
$f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$	est une fonction de correction due à l'interférence entre l'anémomètre, y compris son tube de montage, et l'écoulement de la soufflerie;
k_b	est le facteur de correction de l'interférence dû à l'obstruction;
k_i	est le facteur de correction dû à l'interférence entre l'anémomètre (y compris son tube de montage) et l'enveloppe de la section d'essai, comprenant également les effets de l'écoulement provoqués par les tubes de montage s'étendant jusqu'à l'enveloppe;
k_p	est le facteur de correction dû à l'interférence provoquée par l'anémomètre (y compris son tube de montage) sur la vitesse mesurée par le tube de Pitot;
$\bar{v}$	est la vitesse moyenne du vent à l'emplacement de l'anémomètre;
$\bar{v}_p$	est la vitesse moyenne du vent à l'emplacement de référence;
n	est le nombre d'échantillons dans un intervalle d'échantillonnage.

Il convient que la fonction de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ soit égale à 1 pour une section d'essai sans anémomètre et son tube de support. L'influence de la fonction de correction sur les résultats de l'étalonnage doit être évaluée et incluse dans le rapport de montage de l'installation d'étalonnage et le calcul d'incertitude.

8.5 Analyse des données

Une analyse par régression linéaire doit être réalisée sur les données d'étalonnage pour estimer les paramètres de régression suivants: décalage, pente, coefficient de régression et incertitude-type. Les valeurs de vitesse du vent doivent subir une régression par rapport aux sorties de l'anémomètre.

Lorsque le coefficient de corrélation r pour les données est inférieur à 0,999 95, il doit être vérifié s'il est provoqué par la non-linéarité de l'anémomètre ou par d'autres paramètres. Si l'anémomètre présente une non-linéarité, celle-ci doit être documentée dans le certificat.

8.6 Analyse d'incertitude

Il est important d'identifier l'incertitude de la vitesse horizontale du vent incidente sur l'anémomètre. Une analyse d'incertitude doit être réalisée conformément à l'ISO/IEC Guide 98-3:2008 et regrouper les deux catégories d'incertitudes A et B. L'amplitude de l'incertitude nette doit être évaluée d'un point de vue statistique et doit prendre en compte les éléments suivants:

- a) incertitude de mesure de la vitesse de l'écoulement (tubes de Pitot, transducteurs, évaluation de la masse volumique de l'air, etc.);
- b) facteur d'étalonnage de la soufflerie;
- c) facteurs de correction de la soufflerie de la fonction de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ définis dans l'équation (22);
- d) l'influence de la taille de la section de la soufflerie;
- e) mesurages de la sortie de l'anémomètre;
- f) l'influence de l'alignement de l'anémomètre non vertical pour chaque type d'anémomètre au cours de l'évaluation d'incertitude;
- g) incertitude statistique due à une dispersion à court terme de la sortie de l'anémomètre (variation du signal de l'anémomètre indiqué, c'est-à-dire fluctuation de la vitesse angulaire du rotor, polarisation issue de la génération du signal, polarisation de l'échantillonnage sur le temps de moyennage);
- h) incertitude due à la différence entre le résultat de la soufflerie dans laquelle est réalisé l'étalonnage et le résultat moyen d'autres souffleries déterminé par les essais d'aptitude, hors différence couverte par d'autres composantes d'incertitude;
- i) incertitude due à la linéarisation de l'expression de l'étalonnage.

8.7 Format de rapport

La documentation appropriée doit fournir les informations relatives à la procédure suivie, l'installation utilisée pour l'étalonnage des anémomètres (rapport de montage de l'installation d'étalonnage) et l'étalonnage de chaque anémomètre. Le rapport de montage de l'installation d'étalonnage doit, au moins, inclure les informations suivantes:

- a) description de la soufflerie (y compris section d'essai, chambre de dépôt, redresseurs d'écoulement, disposition des ventilateurs);
- b) croquis de la soufflerie qui représente les emplacements des anémomètres et du ou des tubes de Pitot dans la section d'essai;
- c) mesurages de la qualité de l'écoulement;
- d) évaluation de l'effet d'obstruction;
- e) influence de la hauteur de montage de l'anémomètre;
- f) influence de la plaque de fond;
- g) influence de l'emplacement de montage sur le mesurage de référence;
- h) influence de la fonction de correction;
- i) mesurages des turbulences;
- j) certificats d'instrumentation;
- k) procédure de mesure;
- l) procédure d'évaluation des données;
- m) documentation de répétabilité de l'étalonnage de l'anémomètre;
- n) analyse d'incertitude;
- o) écarts par rapport à ces exigences.

Le rapport d'étalonnage d'un anémomètre doit, au moins, inclure les informations suivantes:

- 1) marque, type et numéro de série de l'anémomètre à l'essai et numéro de série de la coupelle dans le cas où elle est transportée séparément;
- 2) spécification de l'orientation au cours de l'étalonnage (dispositifs sensibles à l'orientation);
- 3) diamètre du tube du système de montage;
- 4) marque, type et numéro de série des convertisseurs externes;
- 5) nom et adresse du client;
- 6) signatures des personnes qui ont réalisé l'étalonnage, vérifié les résultats et approuvé leur publication;
- 7) nom de la soufflerie;
- 8) conditions environnementales au cours de l'étalonnage (température de l'air, pression atmosphérique et humidité);
- 9) paramètres de régression (décalage, pente, coefficient de régression);
- 10) incertitude due à la linéarisation (dispersion des résidus);
- 11) incertitude due à la fonction de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$;
- 12) présentation sous forme de tableaux et graphiques (écarts par rapport à la ligne de régression linéaire amplifiés) de tous les points d'étalonnage et des résultats de régression;
- 13) incertitude associée à chaque point de mesure;
- 14) référence au rapport de montage de l'installation d'étalonnage correspondant;
- 15) date de l'étalonnage;
- 16) photo de l'anémomètre et du montage dans la soufflerie.

8.8 Exemple de calcul d'incertitude

Dans la mesure où la vitesse de l'écoulement ne peut pratiquement pas être mesurée à l'emplacement de l'anémomètre et où le champ d'écoulement du capteur est considérablement plus faible dans la soufflerie que dans l'atmosphère libre, des corrections sont nécessaires. L'optimisation de la soufflerie tant en matière de corrections que de détermination du facteur de correction est essentielle pour le calcul de l'incertitude de mesure.

Idéalement, il convient d'appliquer séparément le calcul d'incertitude à chaque condition d'étalonnage de la vitesse du vent utilisée dans un essai d'étalonnage. Cet exemple présente un point d'étalonnage théorique de 10 m/s qui utilise une soufflerie dont la valeur assignée est 25 m/s.

Le Tableau 5 couvre chaque source d'incertitude, en commençant par celles de la catégorie B.

Pour éviter les répétitions, une évaluation approfondie du mesurage de la pression atmosphérique a été omise, dans le sens où elle peut être traitée de la même manière que le mesurage de la température.

Tableau 5 – Exemple d'évaluation de l'incertitude d'étalonnage d'un anémomètre

Source d'erreur u_i	Explication	Valeur u_i	Valeur de sensibilité c_i	$u_i c_i$ m/s
u_f , facteur de correction de la soufflerie, f	Une incertitude sur le facteur de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ fondée sur l'examen des facteurs d'influence de l'étalonnage.			
u_t , facteur d'étalonnage de la soufflerie, k_c	L'étalonnage de la soufflerie peut être réalisé en utilisant deux tubes de Pitot, l'un situé à l'emplacement de référence permanent et l'autre à l'emplacement de l'anémomètre à l'essai. En intervertissant les deux systèmes de Pitot, toutes les erreurs de catégorie B peuvent être éliminées et l'analyse par régression normalisée peut être appliquée pour produire un facteur de correction (l'ordonnée à l'origine étant forcée à passer par l'origine) et une incertitude-type relative de catégorie A. Par hypothèse, la valeur de correction est 1,02 et l'incertitude-type est 0,01.	0,01	$C_t = 0,5 v/k_c$ $= 0,5 \times 10/1,02$ $= 4,90 \text{ m/s}$	0,049
u_B , facteur de correction de l'obstruction, k_B	Lorsqu'un objet solide est placé dans l'écoulement de la soufflerie, l'écoulement est affecté selon la relation entre la taille de l'objet et la surface de la soufflerie. En fonction des dimensions dans l'espace de l'éprouvette, la vitesse de l'écoulement augmente dans une section de mesure fermée en raison de la continuité. Dans une section de mesure ouverte, le courant est élargi, entraînant une réduction de la vitesse. En prenant pour hypothèse que l'effet d'obstruction est connu, une valeur d'incertitude de 0,1 % est appropriée. Le rapport de montage de l'installation d'étalonnage doit présenter les calculs appliqués et la valeur estimée du facteur de correction et de l'incertitude associée.	0,001	$C_f = v/k_B$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
u_{ki} , facteur de correction de l'emplacement, k_i	Un anémomètre nécessite un espace libre donné (en fonction de la taille de la canalisation de montage et de l'anémomètre) en dessous et au-dessus de lui afin de reproduire les mêmes conditions d'écoulement qu'en atmosphère libre. Ainsi, le centre de la section de mesure n'est pas nécessairement le meilleur emplacement pour l'éprouvette. Si la taille de la soufflerie est réduite et si, par conséquent, la canalisation de montage est trop courte, une erreur allant jusqu'à 2 % peut survenir. L'influence commence à diminuer seulement à partir de certaines longueurs de canalisation de montage. Cette longueur libre est égale à 50 cm environ au-dessus de la plaque d'appui. En prenant pour hypothèse que l'effet de l'emplacement est connu, une valeur d'incertitude de 0,1 % peut être appropriée.	0,001	$C_p = v/k_p$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
u_p , facteur de correction de l'emplacement, k_p	L'écoulement autour de l'anémomètre exerce une certaine influence sur l'écoulement autour du tube de Pitot de référence. En prenant pour hypothèse que l'effet de l'influence est connu, une valeur d'incertitude de 0,1 % de l'effet peut être appropriée.	0,001		

Source d'erreur u_i	Explication	Valeur u_i	Valeur de sensibilité c_i	$u_i c_i$ m/s
u_{FD} , facteur de correction de l'écoulement, k_{FD}	Les anémomètres sont souvent montés sur de très hauts mâts de mesure, situation qui ne peut pas être reproduite dans une soufflerie. Lorsqu'un anémomètre est monté sur une embase de tube, elle-même montée dans une soufflerie avec une section de mesure ouverte, le courant peut s'échapper vers le bas. Cela implique une perte d'impulsion pour l'anémomètre, et donc une erreur systématique. En installant une plaque d'appui, cette perte peut être considérablement réduite. En prenant pour hypothèse qu'une plaque d'appui est installée, une valeur d'incertitude-type de 0,1 % est appropriée. Sinon l'influence doit être examinée.	0,001	$C_{FD} = v/k_{FD}$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
$u_{p,t}$ transducteur de pression, $K_{p,t}$	Le certificat d'étalonnage du transducteur de pression affiche une incertitude maximale de 0,5 Pa dans la plage allant de 0 Pa à 500 Pa.	0,5 Pa	$c_{p,t} = 0,5 \text{ v}/K_{p,t}$ $= 0,5 \times 10/5000$ $= 0,001$	0,000 5
$u_{p,s}$ gain de conditionnement du signal du transducteur de pression, $K_{p,s}$ et $u_{p,d}$ conversion de l'échantillonnage de données du transducteur de pression $K_{p,d}$	L'étalonnage du matériel de mesure de la sortie du transducteur de pression affiche une incertitude maximale de 0,000 15 V dans la plage allant de 0 V à 10 V.	0,000 15 V	$c_{p,s} = 0,5 \text{ v}/K_{p,s}$ $= 0,5 \times 10/0,01$ $= 500$	0,010
$u_{T,t}$ transducteur de température ambiante, $K_{T,t}$, $u_{T,s}$ gain de conditionnement du signal de température, $K_{T,s}$ et $u_{T,d}$ conversion numérique du signal de température, $K_{T,d}$	L'étalonnage du matériel de mesure de la température affiche une incertitude maximale de 0,1 °C dans la plage allant de 10 °C à 30 °C.	0,1 °C	$c_{T,t} = 0,5 \text{ v}/K_{T,t}$ n/a n/a	0,001
u_h coefficient de la tête du tube de Pitot, C_h	Le coefficient de la tête du tube de Pitot dépend de l'angle d'attaque du vent. Deux sources d'erreur sont possibles: la première est liée à l'exactitude avec laquelle le tube de Pitot est réglé en alignement avec la direction moyenne de l'écoulement et la deuxième est due aux variations des turbulences dans la direction instantanée d'écoulement. Par hypothèse, le coefficient nominal de la tête, C_h , est 0,997 et l'écart-type de l'angle d'attaque est égal à 2. Les normes ISO pertinentes suggèrent que cela donne lieu à une augmentation de 0,1 % du coefficient de la tête.	0,000 997	$C_h = -0,5 \text{ v}/C_h$ $= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	0,005
u_{pcal} étalonnage du tube de Pitot	D'après le certificat d'étalonnage du tube de Pitot, une incertitude de 0,25 % dans la plage allant de 4 m/s à 16 m/s peut être utilisée.	0,002 5	$C_{ph} = -0,5 \text{ v}/C_h$ $= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	

Source d'erreur u_i	Explication	Valeur u_i	Valeur de sensibilité c_i	$u_i c_i$ m/s
$u_{B,t}$ sensibilité du baromètre, $K_{B,t}$, $u_{B,s}$ gain de conditionnement du signal du baromètre, $K_{B,s}$ et $u_{B,d}$ conversion numérique du signal du baromètre, $K_{B,d}$	L'étalonnage du baromètre affiche une incertitude maximale de 0,5 hPa dans la plage allant de 900 hPa à 1 100 hPa.	0,5 hPa	$c_{B,t} = -0,5 \text{ v}/k_{B,t}$	
s_A incertitude statistique de la moyenne du chronogramme de la vitesse du vent	Par hypothèse, l'intensité des turbulences est de 2 %, et un échantillonnage de 2 Hz sur une période de 30 s est utilisé, ce qui donne 60 échantillons. L'incertitude-type de la valeur moyenne de 10 m/s est alors donnée par $\sqrt{1/60} \times 0,02 \times 10$	0,026	1	0,026
u_{ρ} , correction d'humidité dans la masse volumique, k_{ρ} ou u_{Φ} , humidité relative, Φ	L'étalonnage du matériel de mesure de l'humidité relative affiche une incertitude de moins de 2 % dans la plage allant de 10 % à 95 %. Une valeur de 2 % est choisie pour le calcul. $c_{\Phi} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial k_{\rho}} \cdot \frac{\partial k_{\rho}}{\partial \Phi} = \frac{1}{2} \frac{\bar{v}}{k_{\rho}} 0,378 \frac{P_w}{B}$ Pour une température de 15 °C, $P_w = 1\,700 \text{ Pa}$ et, en prenant pour hypothèse que $B = 1\,013 \text{ mbar} = 101\,300 \text{ Pa}$, k_{ρ} est évalué à 0,997 et c_{Φ} (à 10 m/s) est égal à 0,032.	$u_{\Phi} = 0,02 \text{ \% RH}$	$c_{\rho} = 0,032$	0,001

L'incertitude-type composée peut être obtenue en utilisant la valeur efficace des incertitudes de contribution dans la colonne de droite. Pour les valeurs qui ont déjà été traitées, elle correspond à 0,06 m/s.

L'exemple démontre que l'incertitude de catégorie B est susceptible de prévaloir. L'extension de la période d'étalonnage peut permettre de réduire l'incertitude de catégorie A, mais n'a aucun effet sur la catégorie B. En outre, les sources d'incertitude de catégorie B, même si elles ne sont pas corrélées entre elles pour une vitesse du vent spécifique, sont complètement autocorrélées pour l'ensemble des vitesses du vent. En d'autres termes, des étalonnages apparents corrects (lignes parfaitement droites) peuvent être obtenus, malgré le maintien d'une incertitude considérable.

9 Comparaison in situ des anémomètres

9.1 Généralités

Il existe deux méthodes permettant de prouver qu'un anémomètre ne modifie pas son étalonnage pendant une période de mesure, lorsque cela est exigé. L'anémomètre peut être étalonné dans une soufflerie après la période de mesure pour indiquer les différences d'étalonnage avant la période de mesure. En variante (ou en supplément), une comparaison in situ, consistant à comparer l'anémomètre primaire à un anémomètre de commande installé à proximité pendant la période de mesure, peut être réalisée. Cette méthode n'identifie pas de dégradation progressive de l'étalonnage de l'anémomètre lorsque l'anémomètre de commande se dégrade à un rythme similaire. Il convient de répéter régulièrement la comparaison in situ pour identifier les problèmes le plus tôt possible.

9.2 Conditions préalables

Pendant la période de mesure, les deux anémomètres sont installés sur le mât météorologique conformément à l'Article 10. L'anémomètre primaire est l'instrument utilisé pour le mesurage observé. L'autre anémomètre est l'anémomètre de commande; il est utilisé pour la comparaison in situ. Les anémomètres peuvent être installés en trois variantes:

- a) variante 1: montage en tête de mât conformément au 10.2;
- b) variante 2: autre montage en tête de mât conformément au 10.3;
- c) variante 3: les deux anémomètres montés latéralement, conformément au 10.4.

9.3 Méthode d'analyse

Deux bases de données sont comparées à l'aide des valeurs moyennes sur 10 min enregistrées lors de la période de mesure. La première base de données inclut des données qui commencent directement après l'installation des anémomètres. La deuxième base de données inclut des données pour la dernière partie de la période de mesure. Chaque base de données doit satisfaire aux exigences suivantes.

- a) La plage comprise entre 4 m/s et 12 m/s doit être couverte.
- b) Les directions du vent doivent être dans le bon secteur de mesure.
- c) Chaque tranche de vitesse du vent doit avoir au moins trois points de données. Il existe deux possibilités de répartition en tranches des données:
 - 1) option de répartition en tranches 1: Des tranches de vitesse du vent d'une largeur de 1 m/s, centrées sur des valeurs de 1,0 m/s, fondées sur la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande d'une tranche de direction du vent inférieure ou égale à $\pm 15^\circ$.
 - 2) option de répartition en tranches 2: Des tranches de vitesse du vent d'une largeur de 4 m/s centrées sur des valeurs de 2 m/s, 6 m/s, 10 m/s et 14 m/s, fondées sur la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande et des tranches de direction du vent de 10° .

Cette plage de vitesses du vent de 0 m/s à 16 m/s est uniquement réservée à cette étape d'analyse intermédiaire et l'analyse finale doit reposer sur la plage de 4 m/s à 12 m/s.
- d) Inclure un secteur de direction du vent au mât météorologique libre de tout sillage d'une éolienne et aux anémomètres libres de tout sillage du mât météorologique comme suit:
 - 1) en cas de montage côte à côte des anémomètres (variante 2) et en n'utilisant la répartition en tranches de la vitesse du vent que pour un seul secteur de direction du vent (option de répartition en tranches 1), le secteur de direction du vent doit inclure la direction du vent à 90° de la direction de la flèche et dans des directions du vent acceptables;

- 2) dans le cas d'un anémomètre monté en tête de mât (variante 1), la ou les tranches de direction du vent doivent être en dehors du sillage du mât météorologique. Les lignes de connexion horizontales (voir Figure 8 et Figure 9) entre le centre de l'anémomètre de commande et une partie quelconque du mât météorologique doivent donc avoir une distance angulaire minimale de 45° par rapport aux bords de la ou des tranches.

e) La durée maximale doit être de huit semaines.

La ou les tranches de direction du vent utilisées pour l'analyse doivent être clairement indiquées dans le rapport.

Dans le cas où des tranches de vitesse du vent de 1 m/s et une tranche de direction du vent de 30° (option de répartition en tranches 1) sont appliquées, une régression linéaire est effectuée, l'anémomètre primaire étant la variable dépendante et l'anémomètre de commande étant la variable indépendante. Cette régression est utilisée pour calculer la vitesse du vent de l'anémomètre primaire, appelée $V_{\text{primary_est}}$.

$$V_{\text{primary_est}} = m \cdot V_{\text{control}} + b \quad (23)$$

où

m est la pente de la régression qui lie V_{control} et $V_{\text{primary_est}}$,

b est le décalage de la régression qui lie V_{control} et $V_{\text{primary_est}}$,

V_{control} est la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande.

L'objectif est de démontrer une évolution du comportement d'un anémomètre dans le temps, et non un étalonnage absolu.

Si des tranches de vitesse du vent de 4 m/s et des tranches de direction du vent de 10° (option de répartition en tranches 2) sont appliquées, une interpolation linéaire par morceaux entre les tranches de vitesse du vent dans chaque tranche de direction du vent de la première base de données peut être utilisée pour estimer la vitesse du vent de l'anémomètre primaire en fonction de l'équation (24):

$$V_{\text{primary_est}} = \frac{V_{\text{primary},i} - V_{\text{primary},i-1}}{V_{\text{control},i} - V_{\text{control},i-1}} (V_{\text{control}} - V_{\text{control},i-1}) + V_{\text{primary},i-1} \quad (24)$$

Dans ce cas, seules les données de l'anémomètre de commande dans les tranches de vitesse du vent couvertes par la première base de données dans chaque tranche de direction du vent doivent être utilisées pour l'évaluation de la comparaison in situ dans la deuxième base de données. L'équation (24) peut être utilisée pour l'extrapolation jusqu'aux limites des tranches de vitesse du vent couvertes. Dans le cas où une seule tranche de vitesse du vent est couverte dans une tranche de direction du vent, le rapport des moyennes de la tranche des vitesses du vent mesurées par l'anémomètre primaire et par l'anémomètre de commande doit servir de facteur de correction pour le mesurage de l'anémomètre de commande.

9.4 Critères d'évaluation

Appliquer la régression ou les interpolations linéaires par morceaux de la première base de données vers les mesurages de l'anémomètre de commande de la deuxième base de données dans une vitesse du vent estimée par l'anémomètre primaire pour chaque période de 10 min.

Calculer la moyenne des différences (écart systématique) dans la vitesse du vent mesurée et estimée de l'anémomètre primaire pour des tranches de vitesse du vent larges de 1 m/s centrées autour de valeurs de 1 m/s. L'écart systématique est:

$$\gamma = \frac{\sum (V_{\text{primary_est}} - V_{\text{primary}})}{n} \quad (25)$$

Calculer l'incertitude-type des différences entre les vitesses du vent (écart statistique) mesurée et estimée par l'anémomètre primaire pour chaque tranche de vitesse du vent. L'incertitude-type des différences de vitesse du vent est l'écart-type des différences de vitesse du vent divisé par la racine carrée du nombre de points de données mesurés. L'incertitude-type est:

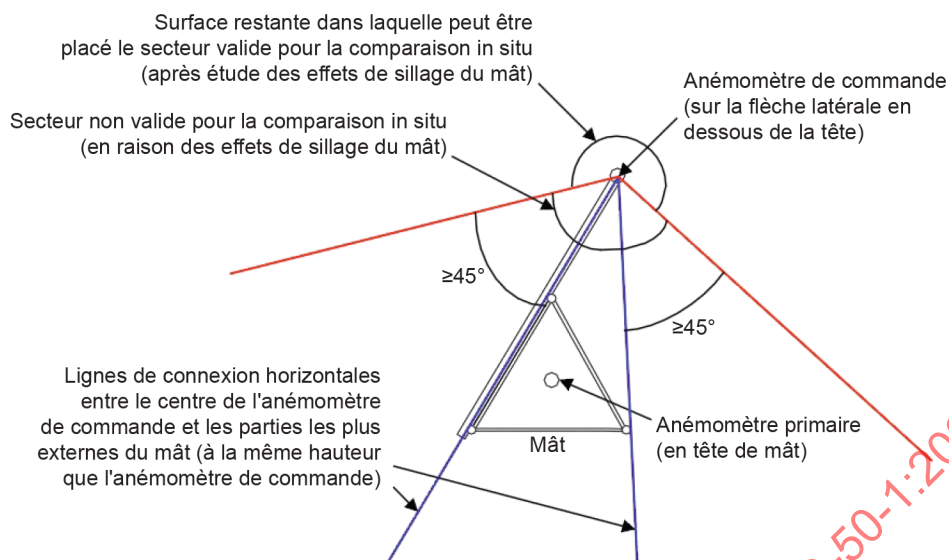
$$\sigma = \frac{\text{stdev}(\gamma)}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V_{\text{primary_est}} - V_{\text{primary}})^2}{n}}}{\sqrt{n}} \quad (26)$$

Lorsque le carré de la somme racine de la moyenne des différences (écart systématique) et l'incertitude-type des différences de vitesse du vent (écart statistique) ne dépasse pas 0,1 m/s dans une tranche entre 4 m/s et 12 m/s, l'essai in situ est réussi.

$$\delta = \sqrt{\gamma^2 + \sigma^2} < 0,1 \text{ m/s} \quad (27)$$

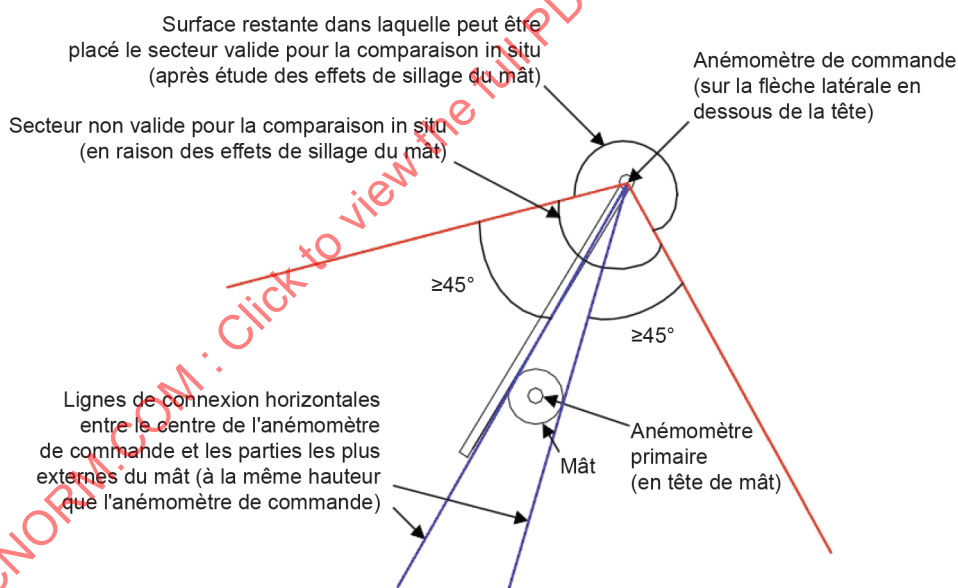
Lorsque la valeur δ est supérieure à 0,1 m/s dans au moins une tranche et ne dépasse pas 0,2 m/s dans toutes les tranches entre 4 m/s et 12 m/s, l'incertitude de l'étalonnage de l'anémomètre $u_{V1,i}$ doit être augmenté au moins jusqu'à la valeur maximale de δ dans la plage de vitesses du vent de 4 m/s à 12 m/s. Lorsque la valeur δ est supérieure à 0,2 m/s dans une tranche entre 4 m/s et 12 m/s, il convient de déplacer l'essai in situ à une période antérieure jusqu'à ce que δ ne dépasse plus 0,2 m/s. Les données de la campagne de mesure après cette période doivent être rejetées. L'incertitude de l'étalonnage de l'anémomètre $u_{V1,i}$ des données de la campagne de mesure restante doit être traitée comme en cas d'absence de rejet des données.

NOTE L'essai in situ peut être souvent répété lors de la campagne de mesure pour aider à identifier toute dégradation intermittente de l'anémomètre.



IEC

Figure 8 – Exemple de secteur de direction d'un anémomètre de commande valide pour un anémomètre unique monté en tête de mât sur un mât météorologique en treillis triangulaire



IEC

Figure 9 – Exemple de secteur de direction d'un anémomètre de commande valide pour un anémomètre unique monté en tête de mât sur un mât météorologique tubulaire

10 Montage des instruments sur le mât météorologique

10.1 Généralités

Un montage approprié des instruments sur le mât météorologique est important pour assurer l'exactitude des mesurages du vent (lorsque les instruments doivent être montés sur la nacelle d'une éolienne plutôt que sur un mât météorologique, voir l'Annex C pour des recommandations). Le montage des anémomètres sur un mât météorologique doit inclure au moins un anémomètre primaire en tête de mât, et un anémomètre de commande. L'objectif de

L'anémomètre de commande consiste à fournir un moyen de vérifier in situ la cohérence des mesurages de l'anémomètre primaire décrit à l'Article 9. Avant d'utiliser un anémomètre classifié selon les exigences de l'usage prévu (par exemple, pour un mesurage de performance de puissance), il est recommandé de contrôler sa configuration d'après la description de la configuration qui correspond à sa catégorie de classification. L'anémomètre doit en particulier être placé de façon à réduire le plus possible les distorsions d'écoulement, en particulier dues à l'influence du mât et de la flèche. Lorsqu'une distorsion de l'écoulement minimale est exigée sur une large plage de directions du vent, elle est obtenue à l'aide d'un anémomètre unique monté en tête de mât. Cependant, un montage côte à côte de deux anémomètres en tête de mât apporte une redondance et une méthode résistante de contrôle de la cohérence des anémomètres qui n'entraîne qu'une faible augmentation de la distorsion de l'écoulement lorsqu'une séparation horizontale adéquate et une structure stable de montage des anémomètres sont réunies. Lorsque les anémomètres sont montés sur des flèches latérales à des altitudes inférieures à la tête du mât météorologique, la distorsion de l'écoulement provenant à la fois du mât météorologique et de la flèche est considérable et elle doit être prise en compte. Indépendamment du type de configuration de montage, la structure de la flèche doit être suffisamment stable pour éviter des vibrations significatives. Il convient de placer les autres instruments qui doivent être montés sur le mât météorologique à proximité de la hauteur de l'anémomètre primaire (anémomètre de commande, girouettes, capteurs de température et de pression) de manière à éviter les interférences avec l'anémomètre primaire.

10.2 Anémomètre unique monté en tête de mât

Pour obtenir une distorsion de l'écoulement négligeable des mesurages de vitesses du vent sur une large plage de directions du vent, la configuration idéale est un anémomètre unique monté en tête de mât. Lorsque cette configuration est adoptée, toutes les dispositions de 10.2 doivent être satisfaites. Toutefois, il convient d'estimer avec attention si les contrôles de cohérence des anémomètres par rapport à un anémomètre d'altitude inférieure peuvent être suffisamment résistants dans le cadre de cette configuration. Cela est notamment le cas lorsque la surface de section du mât météorologique est large, l'anémomètre le moins élevé étant en effet soumis à des effets d'interférence au niveau du mât météorologique plus considérables que l'anémomètre monté en tête de mât, mais également lorsque de grandes variations du cisaillement du vent sont relevées.

L'anémomètre doit être monté de sorte que ses coupelles se situent au moins à 1,5 m au-dessus du mât météorologique et des autres sources de perturbation de l'écoulement et qu'aucune partie de la structure de support ou du mât météorologique ne doive s'étendre à l'extérieur d'un demi-cône 11:1 dont le vertex coïncide avec les coupelles de l'anémomètre.

NOTE 1 Lorsque l'anémomètre est un type admissible d'anémomètre autre qu'un anémomètre à coupelles (par exemple, un anémomètre à ultrasons), il convient d'interpréter le terme "coupelles" par des "éléments de mesure par détection" tout au long de l'Article 10.

NOTE 2 Le cône est défini par une base dont le diamètre est égal à la largeur caractéristique du mât (largeur maximale du mât ou saillies pour une distance de 4 m en dessous des coupelles) et une hauteur égale à 11 fois le rayon de sa base.

L'anémomètre doit être monté sur un tube vertical cylindrique de même diamètre extérieur ($\pm 1,5$ mm) que celui utilisé pendant l'étalonnage (et la classification), ledit diamètre n'étant pas supérieur à celui du corps de l'anémomètre. La longueur combinée du tube et de l'anémomètre (mesurée au niveau des coupelles de l'anémomètre) doit être d'au moins 0,75 m. En outre, la stabilité de l'anémomètre doit être maintenue, ce qui peut nécessiter le montage d'un tube vertical de diamètre réduit concentrique à un autre tube de plus grand diamètre afin d'assurer une structure stable. Le tube supplémentaire ne peut pas avoir un diamètre plus grand que le corps de l'anémomètre pour une hauteur de 1,5 m en dessous des coupelles. Le support qui relie l'anémomètre au tube vertical doit être compact, lisse et symétrique. Lorsque l'anémomètre est conçu pour l'acheminement d'un câble interne dans le tube de support, le câble doit être acheminé à l'intérieur du tube vertical. Pour les autres configurations (par exemple, fibres amorcées), il convient d'enrouler le câble autour du tube vertical (environ 3 r/min ou appliquer la procédure identique à celle utilisée pendant l'étalonnage et la classification). Il convient d'étalonner l'anémomètre avec un raccordement de câble et une configuration d'acheminement similaires à ceux qui doivent être utilisés sur le terrain. L'inclinaison de

l'anémomètre (et du tube de montage) par rapport à la position verticale doit être inférieure à 2° . Il est recommandé de réaliser ce mesurage à des fins de vérification. Aucun autre instrument ne doit être placé à moins de 1,5 m des coupelles de l'anémomètre ni à l'extérieur du demi-cône 11:1 pour une distance minimale de 4 m en dessous des coupelles. Dans ce cas, l'anémomètre de commande de l'anémomètre monté en tête de mât doit être un anémomètre monté latéralement situé à une distance comprise entre 4 m et 6 m en dessous de l'anémomètre monté en tête de mât et satisfaisant par ailleurs aux exigences relatives aux anémomètres montés latéralement données en 10.4. La Figure 10 représente un exemple de configuration de montage en tête de mât.

Dimensions en mètres

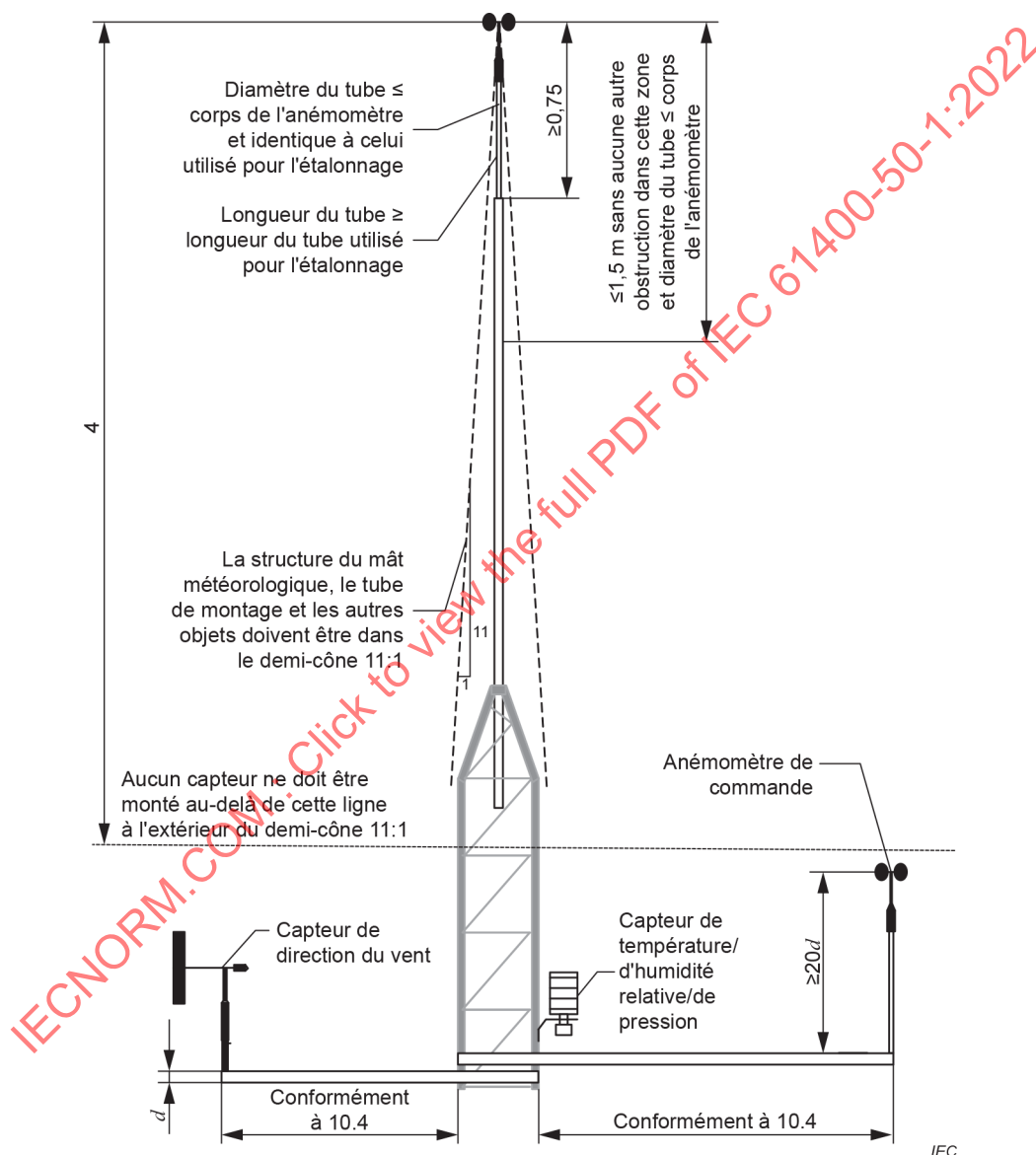


Figure 10 – Exemple d'anémomètre monté en tête de mât et exigences de montage

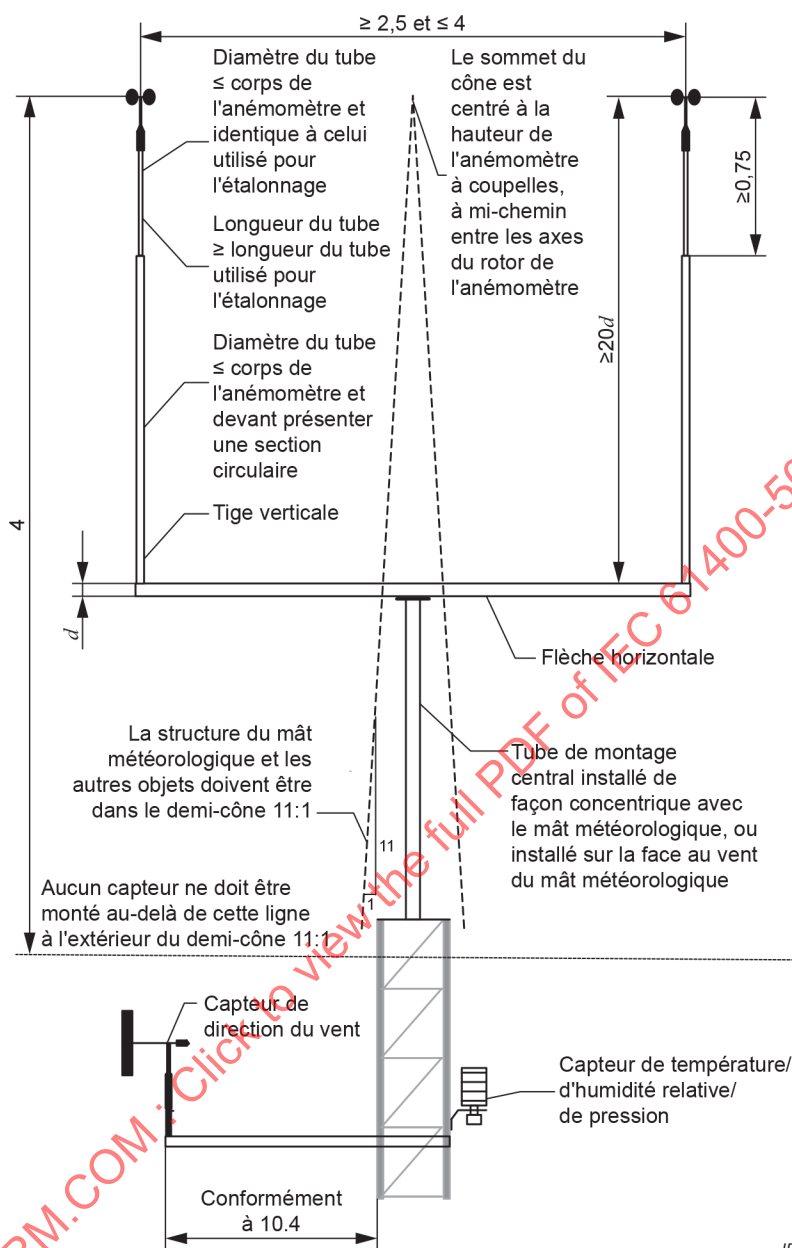
10.3 Anémomètres montés côte à côte en tête de mât

Pour le montage côte à côte, toutes les conditions de montage du 10.2 doivent être satisfaites en plus des conditions ici spécifiées. Les coupelles de l'anémomètre doivent être montées au-dessus de la flèche à une hauteur minimale de 20 fois le diamètre de la flèche. Toutefois, il est recommandé d'utiliser la hauteur de 25 fois le diamètre de la flèche. La flèche, composée de la partie horizontale et des tiges verticales, doit avoir une section cylindrique. Les anémomètres doivent être séparés par une distance comprise entre 2,5 m et 4,0 m. Aucune partie du mât météorologique ne doit s'étendre au-delà du demi-cône 11:1 dont le vertex coïncide avec le point médian entre les coupelles des deux anémomètres montés en tête de mât (la flèche au sommet est elle-même exclue de la présente exigence sous réserve qu'elle satisfasse aux critères de dimensions antérieurs). Aucun autre instrument ne doit être placé à moins de 1,5 m des coupelles de l'anémomètre ni à l'extérieur du demi-cône 11:1 pour une distance minimale de 4 m en dessous des coupelles. La Figure 11 représente un exemple de configuration de montage côte à côte. Il est recommandé de monter la flèche de façon concentrique par rapport à l'axe du mât météorologique ou au centre du côté exposé au vent du même mât.

NOTE La signification de l'expression "exposé au vent" dépend du cas d'utilisation. Par exemple, dans le cas d'un mesurage de la performance de puissance pour lequel un secteur observé de direction relativement étroite est utilisé, "exposé au vent" correspond alors à la direction qui place les instruments du côté exposé au vent du mât par rapport à l'éolienne. Cependant, dans le cas d'un mesurage d'évaluation des ressources, "exposé au vent" peut signifier le côté du mât météorologique qui fait face aux secteurs de direction du vent prédominant attendu.

L'influence d'un anémomètre sur un autre anémomètre doit être évaluée et le secteur de mesure restreint afin que l'incertitude globale de mesure de la vitesse du vent soit contenue dans les limites souhaitées. L'incertitude due à la distorsion de l'écoulement provenant d'autres instruments, du mât météorologique et des flèches doit être déterminée.

Dimensions en mètres



IEC

Figure 11 – Exemple d'anémomètre de commande et d'anémomètre principal alternatifs montés en tête de mât et côte à côte, avec une girouette et d'autres instruments sur la flèche