

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Wind energy generation systems –
Part 50-2: Wind measurement – Application of ground-mounted remote sensing
technology**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne –
Partie 50-2: Mesurage du vent – Application de la technologie de télédétection
montée au sol**



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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 50-2: Wind measurement – Application of ground-mounted remote sensing
technology**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne –
Partie 50-2: Mesurage du vent – Application de la technologie de télédétection
montée au sol**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-5602-2

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Symbols, units and abbreviated terms	10
5 General	11
6 Classification of RSDs	13
6.1 General.....	13
6.2 Data acquisition	14
6.3 Data preparation	15
6.4 Principle and requirements of a sensitivity test.....	15
6.5 Assessment of environmental variable significance	21
6.6 Assessment of interdependency between environmental variables.....	22
6.7 Calculation of accuracy class	24
6.8 Acceptance criteria	26
6.9 Classification of RSD	27
7 Verification of the performance of RSDs	27
8 Evaluation of uncertainty of measurements by RSDs	30
8.1 General.....	30
8.2 Reference uncertainty	30
8.3 Uncertainty resulting from the RSD calibration test	30
8.4 Uncertainty due to RSD classification	32
8.5 Uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume.....	33
8.6 Uncertainty due to mounting effects	34
8.7 Combining uncertainties in the wind speed measurement from RSD ($u_{VR,i}$)	34
9 Additional checks	34
9.1 Monitoring the performance of the RSD at the application site	34
9.2 Identification of malfunctioning of the RSD.....	34
9.3 Consistency check of the assessment of the RSD systematic uncertainties.....	34
9.4 In-situ test of the RSD.....	35
10 Application to SMC	36
11 Reporting.....	36
11.1 Common reporting on classification test, calibration test, and monitoring of the RSD during SMC.....	36
11.2 Additional reporting on classification test	37
11.3 Additional reporting on calibration test	37
11.4 Additional reporting on SMC	38
Annex A (informative) Uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume.....	39
Bibliography.....	40

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 (IEC 61400-50-1) 17

Figure 2 – Deviation versus upflow angle determined for an RSD with respect to the cup anemometer in Figure 1	17
Figure 3 – Example of sensitivity analysis against wind shear	19
Figure 4 – Example of wind shear versus turbulence intensity	23
Figure 5 – Example of percentage deviation of RSD and reference sensor measurements versus turbulence intensity	23
Figure 6 – Comparison of 10 min averages of the horizontal wind speed component as measured by an RSD and a cup anemometer	29
Figure 7 – Bin-wise comparison of measurement of the horizontal wind speed component of an RSD and a cup anemometer	29
Table 1 – Interfaces from other standards to IEC 61400-50-2	12
Table 2 – Interfaces from IEC 61400-50-2 to other standards	12
Table 3 – Bin width example for a list of environmental variables	18
Table 4 – Parameters derived from a sensitivity analysis of an RSD	20
Table 5 – Ranges of environmental parameters for sensitivity analysis	21
Table 6 – Example selection of environmental variables found to have a significant influence	22
Table 7 – Sensitivity analysis parameters remaining after analysis of interdependency of variables	24
Table 8 – Example scheme for calculating maximum influence of environmental variables	25
Table 9 – Preliminary accuracy classes of an RSD considering both all and only the most significant influential variables	26
Table 10 – Example final accuracy classes of an RSD	26
Table 11 – Example of uncertainty calculations arising from calibration of an RSD in terms of systematic uncertainties	31

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

**Part 50-2: Wind measurement – Application of
ground-mounted remote sensing technology**

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 61400-50-2 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind energy generation systems. It is an International Standard.

This first edition of IEC 61400-50-2 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
88/829/CDV	88/865/RVC

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/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 publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

This part of IEC 61400 specifies procedures and methods which ensure that wind measurements using ground-mounted remote sensing devices 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 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 [1]¹. Because of the increasing complexity of this source document, 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.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

Part 50-2: Wind measurement – Application of ground-mounted remote sensing technology

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 and 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 testing) described by other standards in the IEC 61400 series. This document is applicable specifically to the use of ground-mounted remote sensing wind measurement instruments, i.e. devices which measure the wind at some location generally above and distant from the location at which the instrument is mounted (e.g. sodars, vertical profiling lidars). This document specifically excludes other types of RSD such as forward facing or scanning lidars. This document specifies the following:

- a) the procedure and requirements for classifying ground-based RSDs in order to assess the uncertainty pertaining from sensitivity of the RSD response to meteorological conditions that can vary between the RSD calibration place and time and the use case (specific measurement campaign – SMC) place and time;
- b) the procedures and requirements for calibration of RSDs;
- c) the assessment of wind speed measurement uncertainty;
- d) additional checks of the RSD performance and measurement uncertainty during the SMC;
- e) application of the wind speed uncertainty derived from the RSD calibration and classification to the measurements taken during the SMC (e.g. interpolation of uncertainty or calibration results to different heights);
- f) requirements for reporting.

2 Normative references

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

IEC 61400-50-1, *Wind energy generation systems – Part 50-1: Wind measurement – Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments*

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

complex terrain

terrain surrounding the test site that features significant variations in topography and terrain *obstacles* (3.10) that can cause flow distortion

3.3

data set

collection of data sampled over a continuous period

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

EXAMPLE power performance test

3.7

measurement uncertainty

parameter, associated with the result of a measurement, which characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand

3.8

measurement volume

<of RSD> region within which wind flow characteristics can influence a wind speed measurement and which is defined by the scan geometry, device configuration or arrangement of the multiple beams penetrating the volume in order to acquire that measurement

3.9

method of bins

data reduction procedure that groups test data for a certain parameter into intervals (bins)

Note 1 to entry: For each bin, the number of data sets or samples and their sum are recorded, and the average parameter value within each bin is calculated.

3.10

obstacle

obstruction that blocks the wind and creates distortion of the flow

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

3.11**pitch and roll angles**

<of RSD> levelling angles

3.12**power performance**

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

3.13**probe volume**

<of RSD> region from which a single constituent physical measurement of, for example, Doppler shift or radial velocity, is acquired, several of which are typically required to derive a wind speed measurement

Note 1 to entry: The probe volume is a characteristic of the basic physical interaction of the remote sensing device with the atmosphere, rather than the wind speed measurement derived from these interactions, which is determined by the flow within the measurement volume.

3.14**radial velocity****line of sight velocity**

<RSD> projection of the wind speed vector onto the RSD line of sight

3.15**standard uncertainty**

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

3.16**swept area**

<horizontal axis wind turbine> projected area of the moving rotor upon a plane normal to the axis of rotation

Note 1 to entry: For teetering rotors, it is assumed that the rotor remains normal to the low-speed shaft. For a vertical axis wind turbine, it is the projected area of the moving rotor upon a vertical plane.

3.17**test site**

location and surroundings where an RSD is deployed for the purpose of providing measurements as part of a test of, for example, a wind turbine or testing of the RSD

3.18**wind shear**

change of wind speed with height

3.19**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.

3.20**wind veer**

change of wind direction with height

4 Symbols, units and abbreviated terms

Symbol	Description	Unit
avg	10 min average	
c	slope in linear regression	m/s
d_i	data in bin i	
M	number of environmental variables considered to have a relevant influence on the accuracy of the remote sensing device according to the classification test	
m	slope in linear regression	
m_j	slope describing the sensitivity of the wind speed measurement of the remote sensing device on the environmental variable j as gained from the combination of the results from a minimum of 3 classification tests	
$m_{\max}$	maximum slope	
$m_{\min}$	minimum slope a month	
m_n	slope of the n th test	
N	total number of data points in dataset	
N_{CT}	number of classification tests	
n_b	number of bins according to the ranges of variables given in Table 3	
n_i	number of data points in bin i	
REWS	rotor equivalent wind speed	
RSD	remote sensing device	
r^2	coefficient of determination in linear regression	
SMC	specific measurement campaign	
std	standard deviation	
$u_{\text{added_systematic},j,i}$	added category B standard uncertainty at measurement height j (not covered by the meteorological mast)	
$u_{\text{added_systematic},1,i}$	added category B uncertainty at the height of the top of the meteorological mast	
$u_{\text{systematic},j,i}$	cumulated other category B uncertainties of the remote sensing device at height j	
$u_{\text{systematic},1,i}$	cumulated other category B uncertainties of the remote sensing device at the height of the top of the meteorological mast	
$u_{\text{ver},i}$	standard uncertainty of calibration test in bin i in accordance with 8.3	m/s
$u_{\text{VR},i}$	uncertainty components combined to calculate the category B uncertainty for wind speed measurements from an RSD	
$u_{\text{VR,class},i}$	uncertainty related to the classification of the RSD	
$u_{\text{VR,flow},i}$	uncertainty related to the flow variation across the measurement volume of the RSD	
$u_{\text{VR,isc},i}$	uncertainty due to the in-situ test	
$u_{\text{VR,mnt},i}$	uncertainty related to the mounting of the RSD	
$u_{\text{VR,mon},i}$	uncertainty related to the monitoring of the RSD	
$u_{\text{VR,ver},i}$	uncertainty due to the verification test	
$u_{\text{VRcls,mh},i}$	uncertainty due to operational characteristics of the RSD at control mast height in bin i	
$u_{\text{VRvrf,mh},i}$	uncertainty of the RSD verification at control mast height in bin i	

Symbol	Description	Unit
$V_{\text{ref},i}$	mean value of the reference wind speed in bin i	m/s
V_{cup}	cup wind speed	
v_{RSD}	wind speed based on remote sensing device measurements	m/s
$v_{\text{reference}}$	wind speed based on reference sensor measurement	m/s
$v_{\text{reference}}$	wind speed measured by the reference wind speed sensor	m/s
$v_{\text{RSD,mh},i}$	wind speed of the RSD at control mast height in bin i	
$v_{\text{MM},i}$	wind speed of the control mast in bin i	
$\bar{v}_{\text{RSD},i}$	bin average of RSD at calibration test in bin i	m/s
$\bar{v}_{\text{Ref},i}$	bin average of reference measurement at calibration test in bin i	m/s
x_{centre}	centre of range covered by x_{SMC} and by the verification test $x_{\text{verification_test}}$	
$x_{\text{max},j,i}$	expected upper range limit of not measured environmental variable j in wind speed bin i	
$x_{\text{min},j,i}$	expected lower range limit of not measured environmental variable j in wind speed bin i	
x_{range}	maximum range of the environmental variable x between the SMC and the verification test (i.e. maximum of ranges of x_{SMC} and $x_{\text{verification_test}}$)	
x_{SMC}	environmental variable considered in the RSD classification and measured during the SMC	
$x_{\text{verification_test}}$	environmental variable considered in the RSD classification and measured during the SMC	
$x_{\text{SMC},j,i}$	mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the specific measurement campaign	
$\bar{x}_{\text{ver},j,i}$	mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the calibration test of the remote sensing device	
α_1	upflow angle into the probe volume	
α_2	upflow angle out of the probe volume	
Φ	opening angle of the RSD from the vertical	
$\sigma(d_i)$	standard deviation of the percentage wind speed deviations of the 10 min data in bin i	

5 General

This document defines methods and requirements for carrying out wind measurements using ground-mounted remote sensing devices (sodars and lidars). 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). The specific standard relating to the intended use case of the wind speed 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 cup or sonic anemometers mounted on a meteorological mast or turbine nacelle, refer to IEC 61400-50-1. Interfaces between this document and other standards are summarized in Table 1 and Table 2.

Table 1 – Interfaces from other standards to IEC 61400-50-2

Interface description	Reference to other standard	Reference to IEC 61400-50-2	Short use description	Format
Mounting of sensors on meteorological masts	IEC 61400-50-1	Subclause 6.1	Mounting of reference sensors on meteorological masts for RSD calibration and classification	
Assessment of obstacles and terrain	IEC 61400-12-5	Subclause 6.2	Filtering the dataset	From [deg] to [deg]
Side-mounted instruments on meteorological masts	IEC 61400-50-1:2022, Subclause 10.4	Subclause 6.2	Assessing the influence of meteorological mast wake on the RSD measurement	
Assessment of sectors free of meteorological mast wake	IEC 61400-50-1:2022, Subclause 9.3	Subclause 6.2		
Uncertainty of side-mounted instruments on meteorological masts	IEC 61400-50-1:2022, Clause 11	Subclause 6.2	Estimating additional uncertainty due to correction of meteorological mast effect on reference sensor in RSD calibration and classification	
Classification of mast-mounted wind sensors	IEC 61400-50-1:2022, Clause 6	Subclause 6.3		
Mounting of sensors on meteorological masts	IEC 61400-50-1	Clause 7	Mounting of reference sensors on meteorological masts for RSD calibration and classification	
Post-calibration or in-situ calibration of wind sensors	IEC 61400-50-1:2022, Subclause 11.3.3	Clause 7 Subclause 9.4	Application of RSD post-calibration or in-situ calibration	
Calibration of mast-mounted sensors	IEC 61400-50-1:2022, Clause 11	Subclause 8.1	Estimating uncertainty of reference sensors in RSD calibration	

Table 2 – Interfaces from IEC 61400-50-2 to other standards

Interface description	Reference to IEC 61400-50-2	Reference to other standard	Short use description	Format
Definition of RSD measurement heights for a power curve measurement	Subclause 6.1 Subclause 9.1 Clause 10	IEC 61400-12-1	Definition of RSD measurement heights for classification, hub height, REWS and/or shear measurement for a power curve measurement	Heights in metres [m]

When compared to measurements from a meteorological mast-mounted cup anemometer, remote sensing device (RSD) measurements typically display some degree of scatter. Some of this scatter arises due to the sensitivity of the RSD to various environmental conditions (e.g. temperature and wind shear). It is the task of the classification test (Clause 6) to identify and quantify these sensitivities for a number of discrete heights covering the measuring range of interest. As for cup anemometers it is assumed that these sensitivities will be type specific and

the classification test needs to be performed for each type of RSD for a minimum of two instruments of each type and at a minimum of two locations.

The remaining scatter in the cup anemometer comparison is considered to be random noise. This arises from a variety of sources. For example, the turbulent de-correlation in the wind due to the distance between the measurement locations leads to scatter. Also, the distance between the individual probe volumes of the remote sensor itself could contribute to such scatter. The random noise is assumed to be unit and site specific, i.e. it can vary between different evaluations of the same RSD.

Depending on the specific use case (e.g. resource assessment, power performance test, etc), a particular unit of an RSD could require a verification test (Clause 7) before being deployed for the specific measurement campaign (SMC). In some situations, it may alternatively be possible to perform the verification test during the SMC (e.g. during the power performance test). This test is a comparison of the RSD measurements to those from calibrated cup anemometers mounted on a meteorological mast spanning a significant portion of the height range of interest. The purpose of this test is to convey traceability to international standards to this particular device, in the form of an uncertainty. Usually the SMC using the RSD will take place at a different location and at a different time and therefore with a different distribution of environmental conditions than for the RSD verification test. Depending on the sensitivities identified during the classification test, the different environmental conditions will alter the performance of the RSD, increasing the uncertainty in relation to that determined in the verification test. Expressions for the uncertainty of the RSD are given in Clause 8.

Clause 9 describes how the cup anemometer measurements from a short meteorological mast can be used to monitor the performance of the RSD. By ensuring at least one common measuring height, it is possible to assess whether the uncertainty obtained in the classification and the verification test is consistent with the performance of the RSD during the SMC. If inconsistencies are identified from this monitoring, the corresponding uncertainties used in the SMC are increased. This provides a useful "safety net" for the methodology and a feedback mechanism that should promote realistic uncertainty assessments.

Reporting requirements for the complete methodology are given in Clause 11.

6 Classification of RSDs

6.1 General

The accuracy of the RSD can be influenced by meteorological variables. As the meteorological conditions during the SMC can be different from those prevailing during the RSD performance verification test, such influences are linked to additional uncertainty. It is therefore necessary to investigate the sensitivity of the performance of the RSD to meteorological variables. The results of such tests shall identify the variables that influence the performance of the RSD and determine the classification of the instrument.

The simplest of these evaluations entails considering the difference between the RSD measurement and a reference measurement as a function of one meteorological variable at a time. An accuracy class of the RSD shall be evaluated for certain ranges of various environmental variables similar to the classification of cup anemometers in accordance with IEC 61400-50-1, based on the empirical analysis of the sensitivities observed during classification tests. Care should be taken to allow for the possible interdependency of environmental variables (e.g. wind shear and turbulence intensity) so that sensitivities are not inadvertently double counted. The uncertainties arising due to RSD classification can then be evaluated.

A case-specific accuracy class may also be evaluated based on the sensitivities of the remote sensing system and the variation of the environmental variables observed during the RSD performance verification and SMC. It should be clearly stated whether a classification result has been derived generically on multiple units or whether it is based on a case-specific evaluation.

6.2 Data acquisition

The classification test is based on concurrent measurements obtained by the RSD and a tall reference meteorological mast with which it is compared. The measurements shall be co-located, such that they characterize flow within the same volume of air. The degrees of concurrency and co-location that shall apply to the measurements are those that enable the determination of the most precise and well understood relationship between them. In particular, the following apply.

- a) The same averaging intervals shall be used for the RSD and reference sensor being compared: 10 min averages shall be recorded. In addition to 10 min averages, the standard deviations and extreme values of the measured variables within the 10 min periods shall be recorded.
- b) The number of samples acquired by each instrument during each averaging interval to obtain an average shall be recorded.
- c) It shall be noted whether the individual samples acquired within the averaging interval by the RSD are cumulative values, representing, for example, a spectrum integrated from the beginning of the averaging interval to the moment at which the sample is acquired. This will have a bearing on statistics that require successive samples to be independent, such as standard deviation used in, for example, turbulence assessments.
- d) The device shall be sited and analysis of the measurements conducted in a manner that minimizes extraneous influences on the relationship between the RSD and reference sensor measurements. These influences can include, but are not limited to, flow perturbations, fixed echoes, and real variations in the flow between the RSD measurement volume and the reference instrument measurement location. The distance between the meteorological mast and the RSD shall be a compromise allowing good correlation between meteorological mast and RSD measurements, while at the same time preventing or limiting the influence of the meteorological mast on the RSD.
- e) The meteorological mast-mounted reference sensors shall comply with the requirements of IEC 61400-50-1. This applies especially to the calibration, classification and mounting.
- f) The reference meteorological mast should have a constant cross section and solidity across its height. In this way, the influence of the meteorological mast on boom-mounted anemometers remains constant with height and allows a more accurate comparison of the measured wind shear between the meteorological mast and the RSD.

The RSD and reference sensors shall be synchronized to within 1 % of the averaging interval, and this degree of synchronization shall be verified and tested for drift at least once a week. If comparison of time stamps indicates drift has occurred, the RSD system clock shall be reset to synchronize with the reference sensor system clock and remote sensing data time stamps adjusted to compensate for the drift over the period during which it is evident by linear interpolation.

Data shall be acquired until the following data coverage requirements are fulfilled.

- 1) Reference sensor wind speed measurements shall be binned into 0,5 m/s bins centred on integer multiples of 0,5 m/s.
- 2) The data shall be filtered in accordance with the recommendations of the device manufacturer and the requirements of 6.3. The following requirements shall be fulfilled after filtering.
 - a) The data acquisition requirements of a classification test shall not be considered fulfilled unless at least three pairs of valid concurrent, co-located and filtered measurements have been recorded in each wind speed bin centred between 4 m/s and 16 m/s inclusive.
 - b) The amount of acquired data shall cover a minimum of 180 hours.
 - c) The data acquisition campaign shall last at least three months and cover a significant span of environmental conditions (e.g. winter to summer). The database shall cover at least 25 % of the bins as described in Table 5 with a minimum number of data points as defined in Equation (3) for all variables which are known to influence the accuracy of the RSD.

For further use case specific RSD classification requirements, refer to the use case standards such as IEC 61400-12-1.

6.3 Data preparation

The following data filters shall be applied.

- a) The reference meteorological mast shall be free of wakes from wind turbines and obstacles as defined in IEC 61400-12-5.
- b) Probe volumes within which the RSD acquires a radial velocity measurement shall be free of wakes and flow perturbation from wind turbines and obstacles as defined in IEC 61400-12-5. The influence of the wake of the reference meteorological mast on the measurements of the RSD shall be inspected by plotting the ratio of the RSD and reference sensor measurements as a function of wind direction. Criteria regarding the permissible values of this ratio can be developed with reference to the corresponding considerations for cup anemometry discussed in IEC 61400-50-1. RSD measurements shall be excluded if they are influenced by either the meteorological mast or its guy wires.
- c) Reference cup anemometers shall be free from the influence of the wakes of the meteorological mast, its guy wires or lightning receptor as defined in IEC 61400-50-1.
- d) The reference cup anemometers shall not be influenced by icing. This may be achieved by any means deemed to be suitable, subject to the requirement that the method and results are adequately documented.
- e) The measurements that are recorded for each averaging interval by both the RSD and reference sensors shall represent a single contiguous period of operation whose duration equals the averaging interval. However, as discussed in 6.4, there is a possibility that the data availability requirements may be relaxed. The influence that relaxing these requirements could have on the measurement accuracy should be checked by means of a sensitivity analysis. If the RSD does not record the proportion of the period in the 10 min averaging interval during which it has been available, a general quality factor shall be recorded to indicate the reliability of the measurement in a similar manner to device availability. Data may then be filtered or a sensitivity analysis may be performed with reference to the quality factor. Guidance shall be provided by the manufacturer regarding the appropriate treatment of the quality factor.
- f) In general, no filtering on precipitation should be undertaken. Precipitation should be treated as an environmental variable in the classification test. If an RSD manufacturer's guidelines make provision for filtering with reference to precipitation, these guidelines should be followed. If filtering is undertaken with reference to precipitation, the filtered data should be considered a special dataset and classification, calibration and application of the RSD should be conducted in a manner consistent with this.

Measurements of boom-mounted reference sensors may be corrected for meteorological mast effects (blockage effects and flow acceleration effects). Such correction of meteorological mast effects incurs additional uncertainty in comparison with top-mounted reference sensors. The correction may be achieved by any means deemed suitable for reducing the total uncertainty, subject to the requirement that the method and results are adequately documented. IEC 61400-50-1 provides an example method for mast flow distortion correction. Uncertainty associated with the use of boom-mounted anemometers is discussed in IEC 61400-50-1.

All filtering criteria that are used, and their respective effects on the dataset, shall be recorded and reported.

6.4 Principle and requirements of a sensitivity test

The deviation observed between the measurements of the RSD and the reference sensors shall be analysed in terms of their sensitivity to different environmental variables. The evaluation of the RSD accuracy class in terms of the absolute measurement of the horizontal wind speed component is the minimum requirement. The RSD accuracy class may be derived in terms of other parameters (e.g. turbulence intensity or wind direction) depending on the wind flow parameters acquisition entailed by the SMC.

Only the evaluation of accuracy class in terms of horizontal wind speed is treated here.

The initial sensitivity to be tested shall relate to the relaxation of the criterion described in 6.3 e). The sensitivity of the deviation between the reference sensors and the RSD on the availability of the RSD within the averaging interval or the corresponding quality factor of the measurements (as defined by the manufacturer) shall be examined. Remote sensing data shall be deemed acceptable if characterized by a level of availability or by a quality factor that has been demonstrated to have no significant influence on the deviation between the reference sensors and the RSD measurements.

The percentage deviation between 10 min averages of the output parameter under consideration acquired by the RSD and reference sensors at one height level is considered as a dependent variable which is analysed as a function of one environmental variable by means of a classification test:

$$\frac{(v_{\text{RSD}} - v_{\text{reference}})}{v_{\text{reference}}} \times 100 \% \quad (2)$$

All available environmental variables are considered to be potentially within the scope of the sensitivity analysis. A non-exhaustive list of variables to consider can be: wind shear exponent, turbulence intensity, rain, wind direction, air temperature, air density, temperature difference at two different heights, upflow angle, wind veer, and cloud cover. Some relevant parameters can be instrument-specific, for example data availability or quality factor, and may be specified by the manufacturer.

Sensitivity to an environmental parameter can be an artefact of an easily remedied error in the configuration of the RSD. For example, a marked sensitivity to wind shear can arise when there is a systematic error in the heights associated with the RSD wind speed measurements. If a strong sensitivity is observed with an RSD, or a significant variation in sensitivity between tests is observed, the device should be checked for such errors. If errors are detected and corrected, the sensitivity tests should be repeated.

Where the reference cup anemometer exhibits a known sensitivity to an environmental variable, an attempt should be made to remove the influence of this sensitivity from the sensitivity test. This may be done by any means deemed to be suitable with the requirement that the method and results are adequately documented. As an example, Figure 1 shows the effect of upflow angle on wind speeds measured by a commonly used class 1,7A cup anemometer as determined from industry standard wind tunnel tests.

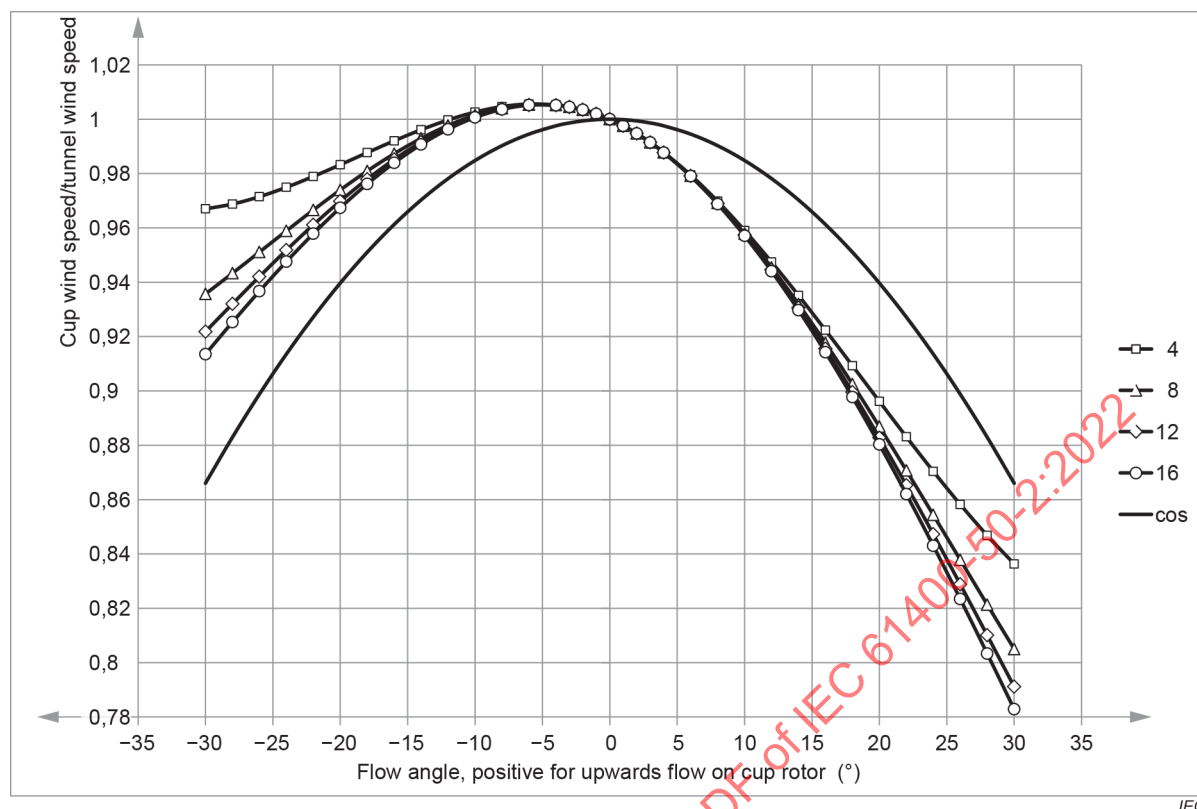
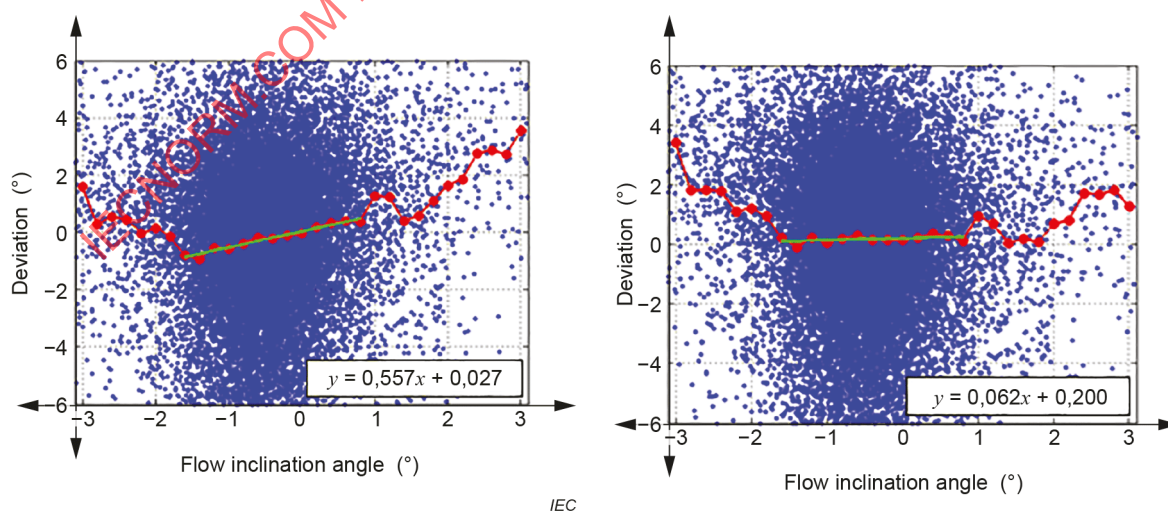


Figure 1 – Tilt angular response $V_\alpha/V_{\alpha=0}$ of a cup anemometer as a function of flow angle α compared to cosine response (IEC 61400-50-1)

Figure 2a) shows the response of an RSD to upflow angle determined with respect to data from a cup anemometer of the type represented by Figure 1. In Figure 2b) a linear model has been fitted to the data in Figure 1 in the region between $\pm 3^\circ$ and used to adjust the data points to remove the effect of the cup anemometer response. It can be seen from Figure 2 that the sensitivity recorded for the RSD in Figure 2a) in this case is at least partially attributable to the reference cup anemometer.



a) before adjustment for cup anemometer response

b) after adjustment for cup anemometer response

Figure 2 – Deviation versus upflow angle determined for an RSD with respect to the cup anemometer in Figure 1

Environmental variables shall be analysed to identify any interdependency. Where this exists, further analysis shall be undertaken to identify which of the environmental variables influences measurement deviation. This may be done by any means deemed to be suitable with the requirement that the method and results are adequately documented. Documentation should include sufficient detail for the replication of results from the data acquired during the classification test. Suggested methodologies for achieving this are detailed in 6.6. Only environmental variables found to have a direct influence on measurement deviation shall be included in the sensitivity analysis. These variables are then considered to be independent.

If any environmental variables that are known to directly influence measurement deviation are omitted from the sensitivity test, this is likely to result in additional uncertainty at the application stage, as defined in Clause 9. If subsequent monitoring of the RSD with a short anemometer meteorological mast during the SMC shows the results of the sensitivity test have been unduly conservative, revision of the environmental variables included in the sensitivity test is permitted.

A one-dimensional, two-parametric ordinary least squares (OLS) linear regression analysis shall be performed for each pair of dependent and independent variables. The following parameters are calculated from the regression analysis:

- a) slope: m ;
- b) offset: c ;
- c) coefficient of determination, which in the case of OLS linear regression is the correlation coefficient: r^2 ;
- d) standard deviation of the independent variable: std ;
- e) mean value of the independent variable: avg .

The estimation of the slope m and the offset c shall be performed on bin-averaged data for the measured environmental variable (see example in Figure 3), where the size of the bin to be used is given in Table 3.

Table 3 – Bin width example for a list of environmental variables

Independent variable	Bin width	Unit
Wind shear exponent	0,05	Dimensionless
Turbulence intensity	0,01	Dimensionless
Rain	0,1	mm
Remote sensing device availability	1	%
Wind direction	5	°
Air temperature	2	°C
Air density	0,05	kg m ⁻³
Temperature gradient	0,002	K/m
Upflow	0,2	°
Wind veer gradient	0,04	°/m

For variables to be included in the sensitivity analysis that are not listed in Table 3, suitable bin widths should be chosen with respect to range and distribution of the data.

For a specific environmental variable, bins should only be included in the sensitivity test where they meet the criteria listed in Equations (3) and (4):

$$n_i > \frac{N}{2n_b} \quad (3)$$

where

n_b is the number of bins according to the ranges of variables given in Table 5;

N is the total number of data points;

n_i is the number of data points in bin i .

Equation (4) shall be applied only when sensitivities on the wind speed measurement are analysed:

$$\frac{\sigma(d_i)}{\sqrt{n_i}} \frac{v_{\text{ref},i}}{100} < 0,03 \text{ m/s} \quad (4)$$

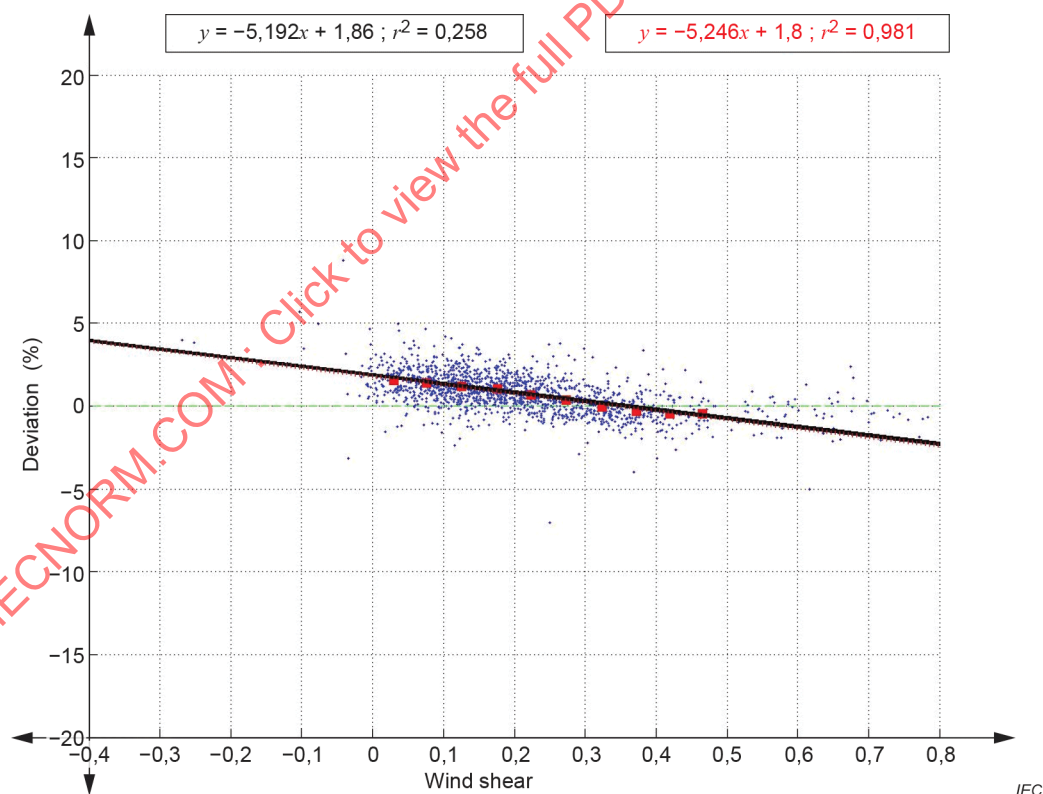
where

d_i is the data in bin i ;

$\sigma(d_i)$ is the standard deviation of the percentage wind speed deviations of the 10 min data in bin i ;

$V_{\text{ref},i}$ is the mean value of the reference wind speed in bin i .

The correlation coefficient (r^2), standard deviation of the independent variables (std) and mean value of the independent variables (avg) shall be estimated using the 10 min data in the bins included in the sensitivity test.



Linear regressions are plotted for 10 min data (black) and for bin-averaged data (red).

Figure 3 – Example of sensitivity analysis against wind shear

Sensitivity is defined as the slope multiplied by the standard deviation of the independent variable: $m \times \text{std}$. The sensitivity indicates the extent, expressed as a percentage, that the deviation between the RSD and the reference sensor measurements is changed by a change in the independent variable of one standard deviation.

Table 4 – Parameters derived from a sensitivity analysis of an RSD

Height above ground level [m]	Independent variable [-]	avg independent variable [unit variable]	std independent variable [unit variable]	m [%/unit variable]	Sensitivity $m \times \text{std}$ [%]	r^2 [-]	$m \times \text{std} \times r$ [%]
135	Wind shear exponent	0,21	0,19	-2,324	-0,45	0,235	-0,218
104		0,21	0,2	-1,918	-0,38	0,085	-0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Turbulence intensity	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Rain (yes = 1, no = 0)	0,02	0,13	0,205	0,03	0,001	0,001
104		0,04	0,19	1,168	0,22	0,028	0,037
72		0,03	0,18	0,499	0,09	0,007	0,008
135	Wind direction	247,28	31,62	-0,007	-0,22	0,059	-0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Air temperature at 131 m	14,66	2,7	0,044	0,12	0,016	0,015
104		14,56	2,66	-0,042	-0,11	0,008	-0,010
72		15,16	3,43	-0,091	-0,31	0,083	-0,089
135	Air density	1,23	0,01	16,43	-0,24	0,065	-0,061
104		1,23	0,01	1,804	0,03	0	0,000
72		1,22	0,02	5,208	0,08	0,005	0,006
135	Temperature difference between 133 m and 10 m	-0,69	1,36	-0,112	-0,15	0,027	-0,025
104		-0,69	1,36	-0,444	-0,6	0,217	-0,279
72		-0,64	1,53	-0,281	-0,43	0,158	-0,171
135	Upflow angle	0,35	1,37	-0,085	-0,12	0,015	-0,015
72		-0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Wind veer between 133 m and 35 m	15,36	10,01	-0,036	-0,36	0,145	-0,137
104		15,26	10,05	-0,07	-0,71	0,298	-0,388
72		15	9,26	-0,036	-0,33	0,092	-0,100

An example of a sensitivity analysis of an RSD conducted with respect to a variety of environmental parameters is shown in Table 4. The sensitivity of the device has been analysed at three different heights. Only remote sensing data with availability within the averaging interval of 80 % or more have been considered for the test. As can be seen from Table 4, and following significance criteria that are defined in 6.5, the wind shear, turbulence intensity, wind direction, air temperature difference (as simple indicator for stratification), upflow angle and wind veer appear to have a significant influence on the deviation between the remote sensing and reference cup anemometer measurements of wind speed. The other independent variables appear not to be significant. However, some variables that appear to influence the performance of the RSD might not have an influence. If their variation is correlated with the variation of some other variables that also have an influence, this correlation could be the reason for their apparent influence. Interdependency between variables shall be analysed to identify which variables exert a genuine meaningful influence as discussed in 6.6 before estimating the final accuracy class of the RSD. For example, multivariate regression techniques may be employed to achieve this.

The classification is analogous to the existing classification of cup and sonic anemometers in accordance with IEC 61400-50-1. The RSD class can be evaluated for either pre-defined conditions or for the specific conditions prevailing during the application of the RSD.

Conditions analogous to the A-classification of cup and sonic anemometry in accordance with IEC 61400-50-1 are presented in Table 5.

Table 5 – Ranges of environmental parameters for sensitivity analysis

Independent variable		Max.	Min.	Range	Source
Wind shear exponent	[-]	0,80	–0,40	1,20	N/A
Turbulence intensity	[-]	0,24	0,03	0,21	This document
Rain (yes = 1, no = 0)	[-]	1	0	1	Definition of sensor
Availability	[%]	100	80	20	Definition of filter
Wind direction	[°]	360	0	180	Deviation of 2 directions has a maximum of 180°
Air temperature	[°C]	40	0	40	This document
Air density	[kg/m ³]	1,35	0,90	0,45	This document
Temperature gradient from 133 m to 10 m height	[K/m]	0,06	–0,02	0,08	N/A
Upflow angle	[°]	3	–3	6	This document
Wind veer from 133 m to 35 m height	[°/m]	0,2	–0,2	0,4	N/A

The availability range of the RSD shall be consistent with the range to be applied during deployment in the field. Unless otherwise determined by the configuration of the reference sensors, the limits of the air temperature difference observed between the two height levels indicated shall be 10 times the standard lapse rate between the considered height levels (the standard lapse rate is 0,65 K/100 m) and the wind veer range shall be four times the standard deviation of the difference between the 10 min average wind directions at the heights indicated.

6.5 Assessment of environmental variable significance

The significance of a variable is assessed by measuring its degree of influence on the RSD measurement. The sensitivity tests could indicate that no significant relationship exists between the dependent variable and some of the independent variables. Therefore, only relevant independent variables shall be considered. Relevance is determined where

- a sensitivity of at least 0,5 is demonstrated, or
- a product of correlation coefficient r and sensitivity of at least 0,1 is found.

The sensitivity analysis of an independent variable shall be relevant for all measurement heights if one of the above conditions is fulfilled for a single height.

For a sensitivity of 0,5 or more, a significant influence of the independent variable on the accuracy of the RSD is directly measured during the classification test. The correlation coefficient may modify this criterion as it indicates the significance of the relationship between the dependent and independent variables. The correlation coefficient and the sensitivity both indicate the relevance of an independent variable. Thus, the product of both measures defines the second, alternative condition in item b) above.

Environmental variables for which the measured range does not cover at least 25 % of the bins as described in Table 5 with a minimum number of data points as defined by Equation (3) should be excluded from the sensitivity analysis. Sensitivity results derived for these variables would be unrepresentative of any relationship with measurement deviation. Although a variable may be eliminated from the sensitivity analysis due to insufficient variation for the reliable

establishment of a relationship with measurement deviation, it could be the case that a wider range of variation is observed during application of the device in the course of the SMC. If the variable in question is found to have an influence on measurement deviation through the monitoring process during the SMC, the device may be rejected. Alternatively, the additional uncertainty shall be applied to the results to adequately reflect this, following Clause 8. Environmental variables that are determined to influence measurement deviation only through their correlation with other environmental variables, as discussed in 6.6, should be excluded from the sensitivity analysis.

The selection of relevant independent variables for an RSD is illustrated in Table 6.

Table 6 – Example selection of environmental variables found to have a significant influence

Height above ground level [m]	Independent variable [-]	avg independent variable [unit variable]	std independent variable [unit variable]	m [%/unit variable]	Sensitivity $m \times \text{std}$ [%]	r^2 [-]	$m \times \text{std} \times r$ [%]
135	Wind shear exponent	0,21	0,19	-2,324	-0,45	0,235	-0,218
104		0,21	0,2	-1,918	-0,38	0,085	-0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Turbulence intensity	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Wind direction	247,28	31,62	-0,007	-0,22	0,059	-0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Temperature difference between 133 m and 10 m	-0,69	1,36	-0,112	-0,15	0,027	-0,025
104		-0,69	1,36	-0,444	-0,6	0,217	-0,279
72		-0,64	1,53	-0,281	-0,43	0,158	-0,171
135	Upflow angle	0,35	1,37	-0,085	-0,12	0,015	-0,015
72		-0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Wind veer between 133 m and 35 m	15,36	10,01	-0,036	-0,36	0,145	-0,137
104		15,26	10,05	-0,07	-0,71	0,298	-0,388
72		15	9,26	-0,036	-0,33	0,092	-0,100

6.6 Assessment of interdependency between environmental variables

The sensitivity analysis in 6.4 makes the assumption that the environmental variables under consideration are independent, i.e. uncorrelated. In practice this is not always the case. This can lead to entries being registered in the accuracy class for specific variables due to their correlation with other variables rather than through any direct relationship with measurement deviation. An illustration of the effect of correlation between environmental variables can be seen in Figure 4 and Figure 5 for wind shear and turbulence intensity. Figure 4 shows the relationship between wind shear and turbulence intensity during a classification test. It can be seen that wind shear and turbulence intensity at this test site are not entirely uncorrelated during the measurement period in question. This manifests itself in Figure 5 as a clustering of the data points within the scatter plot of measurement deviation against turbulence intensity according to the magnitude of the wind shear. This clustering can skew the line fit from which the sensitivity of the device with respect to turbulence intensity is determined. Through this mechanism, a relationship in the sensitivity test can be transferred from an environmental

variable that is directly correlated to measurement deviation to one that is not if the environmental variables are not mutually independent.

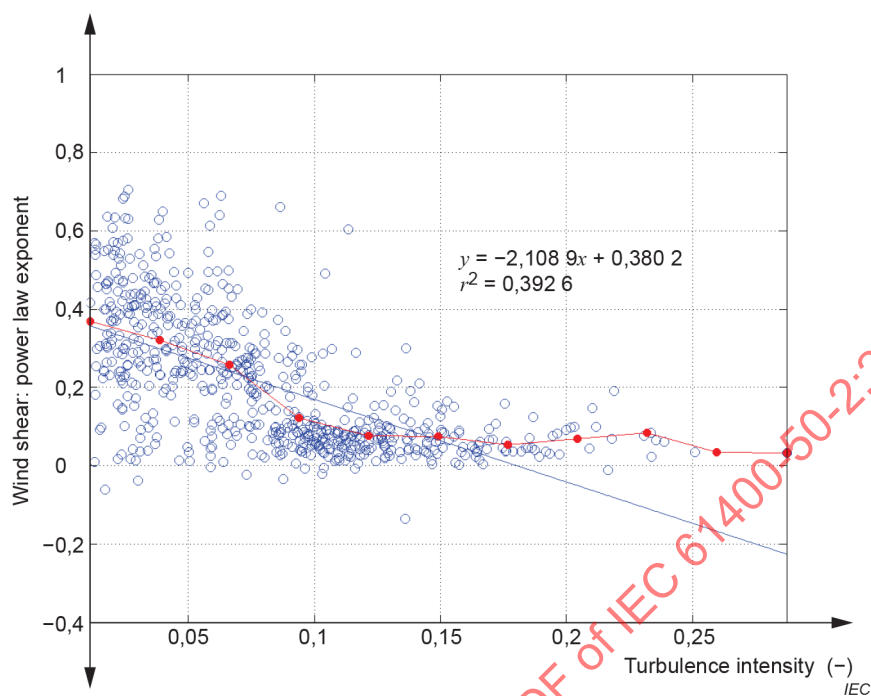
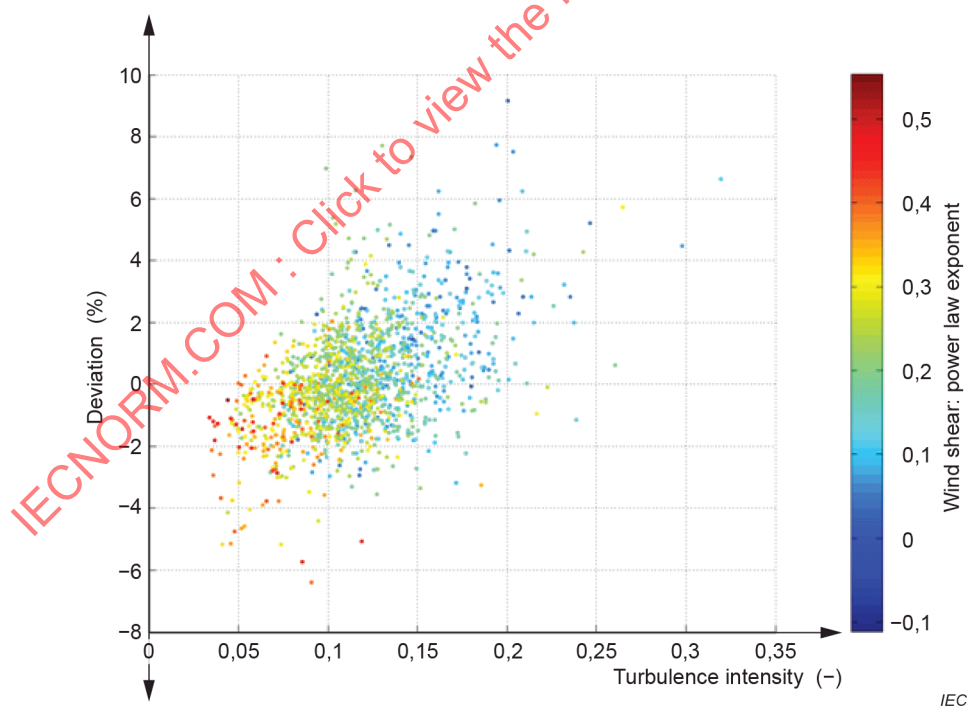


Figure 4 – Example of wind shear versus turbulence intensity



The colour indicates the wind shear.

Figure 5 – Example of percentage deviation of RSD and reference sensor measurements versus turbulence intensity

In order to mitigate overestimation of uncertainty it is necessary to eliminate from the sensitivity analysis any correlated environmental variables that can be demonstrated not to directly influence measurement deviation. An example is shown in Figure 5, where it is clear the

inclusion of both turbulence intensity and wind shear in the calculation of the uncertainty estimate would result in "double counting" of uncertainty contributions due to the relationship evident between them. The elimination of correlated environmental variables may be done by any means deemed suitable with the requirement that the method and results are adequately documented, as discussed in 6.4. Documentation should include sufficient detail for the replication of results from the data acquired during the classification test.

Dependencies between environmental variables have been analysed for the data used in Table 6. Variables that do not have a direct influence on the measurement deviation and that are correlated with one or more variables that do have a direct influence on measurement deviation have been eliminated from the sensitivity test. After removing the effect of the wind shear from the dataset, the remaining influence of the turbulence intensity was not relevant. The remaining variables are shown in Table 7. Only wind shear, upflow angle and wind veer appear to have a significant influence on the deviation between the remote sensing and reference cup anemometer wind speed measurements.

Table 7 – Sensitivity analysis parameters remaining after analysis of interdependency of variables

Height above ground level [m]	Independent variable [-]	avg independent variable [unit variable]	std independent variable [unit variable]	m [%/unit variable]	Sensitivity $m \times \text{std}$ [-]	r^2 [-]	$m \times \text{std} \times r$ [-]
135	Wind shear exponent	0,21	0,19	-2,324	-0,45	0,235	-0,218
104		0,21	0,2	-1,918	-0,38	0,085	-0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Upflow angle	0,35	1,37	-0,085	-0,12	0,015	-0,015
72		-0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Wind veer between 133 m and 35 m	15,36	10,01	-0,036	-0,36	0,145	-0,137
104		15,26	10,05	-0,07	-0,71	0,298	-0,388
72		15	9,26	-0,036	-0,33	0,092	-0,100

6.7 Calculation of accuracy class

The general principle of the calculation of accuracy classes is as follows.

- Define ranges of all remaining variables having significant influence as described in the example of Table 7.
- Calculate the maximum deviation of each independent variable on the accuracy of the RSD by multiplication of the regression slope m and the range of the independent variable, as taken from Table 5. An illustrative example is given in Table 8.
- Calculate the accumulated maximum influence of all independent variables on the accuracy of the RSD by considering the different variables as fully independent of each other, such that the maximum measurement errors caused by each individual variable are added in quadrature.

In relation to item c), it is acknowledged that the environmental variables under consideration are not fully independent of each other. However, with respect to uncertainty assessments, the differences between environmental conditions prevailing during the application of the RSD for the purposes of the SMC and during the RSD performance verification test are a key consideration. These differences are highly dependent on the SMC site and on the RSD performance verification test site. This site dependency decouples the variables from each other with respect to uncertainty calculations. Therefore, to estimate the accumulated maximum influence, independence between variables is a necessary assumption, despite the efforts undertaken in 6.6 for addressing the interdependency of variables.

The preliminary accuracy classes resulting from this scheme are presented in Table 9. These have been calculated as the sum in quadrature of the maximum deviations of both all and only the individual significant environmental variables in accordance with Table 8 and Table 6. The values do not represent the final classification result.

Table 8 – Example scheme for calculating maximum influence of environmental variables

Height above ground level [m]	Independent variable [-]	Range variable [unit variable]	m [%/unit variable]	$m \times \text{range}$ [-]
135	Wind shear exponent	1,20	-2,324	2,79
104		1,20	-1,918	2,30
72		1,20	0,607	0,73
135	Turbulence intensity	0,21	8,855	1,86
104		0,21	13,902	2,92
72		0,21	15,812	3,32
135	Rain (yes=1, no=0)	1,00	0,205	0,21
104		1,00	1,168	1,17
72		1,00	0,499	0,50
135	RSD availability	20,00	0,017	0,34
104		20,00	-0,068	1,36
72		20,00	-0,318	6,37
135	Wind direction	180,00	-0,007	1,28
104		180,00	0,012	2,24
72		180,00	0,003	0,51
135	Air temperature at 131 m	40,00	0,044	1,76
104		40,00	-0,042	1,69
72		40,00	-0,091	3,65
135	Air density	0,45	-16,430	7,39
104		0,45	1,804	0,81
72		0,45	5,208	2,34
135	Temperature difference between 133 m and 10 m	8,00	-0,112	0,90
104		8,00	-0,444	3,55
72		8,00	-0,281	2,25
135	Upflow angle	6,00	-0,085	0,51
72		6,00	0,665	3,99
135	Wind veer between 133 m and 35 m	40,00	-0,036	1,45
104		40,00	-0,070	2,81
72		40,00	-0,036	1,42

Table 9 – Preliminary accuracy classes of an RSD considering both all and only the most significant influential variables

Height [m]	Accuracy classes	
	Considering all variables [-]	Considering only significant influential variables [-]
135	8,6	3,2
104	7,1	3,6
72	9,7	4,3

To calculate the final accuracy class, the preliminary accuracy class shall be divided by $\sqrt{2}$. The maximum influences as calculated in Table 8 are valid under the assumption that the performance verification test of the RSD has been conducted at one extreme of the ranges of all environmental variables while the SMC is conducted at the opposite extreme, which is considered to be an unlikely scenario. A more likely assumption is that the variables x during both measurements lie close to the centre of the maximum range with a maximum deviation of half of the range:

$$\begin{aligned} x_{\text{SMC}} &\in \left[x_{\text{centre}} - \frac{x_{\text{range}}}{2}; x_{\text{centre}} + \frac{x_{\text{range}}}{2} \right] \\ x_{\text{verification_test}} &\in \left[x_{\text{centre}} - \frac{x_{\text{range}}}{2}; x_{\text{centre}} + \frac{x_{\text{range}}}{2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

If the conditions during RSD performance verification test and the SMC are considered independent of each other, the deviations of the environmental variables have the maximum ranges:

$$d(x_{\text{SMC}} - x_{\text{verification_test}}) = \sqrt{\left(\frac{x_{\text{range}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{x_{\text{range}}}{2}\right)^2} = \frac{x_{\text{range}}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

The resulting accuracy classes for the influences of variables given as examples in Table 8 are shown in Table 10.

Table 10 – Example final accuracy classes of an RSD

Height [m]	Final accuracy class [-]
135	2,3
104	2,5
72	3,0

6.8 Acceptance criteria

The classification test shall be performed for a minimum of two devices of the specific type of RSD at a minimum of two different sites. This will enable type-specific classification, provided the results of these tests converge sufficiently. At least one of the test devices shall be tested at two different sites, resulting in a minimum of three tests required to achieve type classification.

If the results are too divergent, an individual unit may be withdrawn on the assumption that it is malfunctioning and is therefore not representative of the instrument type. A withdrawal of a unit on these grounds is subject to the requirements stated above regarding the minimum number

of individual units tested to derive a type-specific classification. A type-specific classification is not possible if the withdrawal of units on the grounds that they are malfunctioning results in an insufficient number of tested units. If units are withdrawn, consideration should be given to the number of units withdrawn compared to the number accepted as representative. The reason for withdrawal of a unit from the sensitivity test shall be well justified and reported.

Results of these classifications are considered to converge sufficiently if the order of magnitude of the influence of the environmental variables considered is coherent among the different classification tests (e.g. for each significant independent variable, the magnitude of the sensitivity derived from each individual test differs by no more than 50 % from the mean value).

6.9 Classification of RSD

The class is determined from a minimum of three classification tests (two units at the same location and one unit at two different locations).

The final sensitivity slope should be used in Equation (2) to calculate the uncertainty. The final slopes result from the combination of the slopes from the various classification tests as follows.

- a) Every significant independent variable resulting from every classification test should be considered (i.e. if a variable is found to be significant and independent in one test out of three, it should be considered in the final class).
- b) For every significant independent variable:
 - interpolate the slope to the height of interest for every classification test;
 - combine the slopes from the various classification tests using Equation (7) (the average of the slopes plus half of the range divided by $\sqrt{3}$):

$$m = \frac{1}{N_{CT}} \sum_{n=1}^{N_{CT}} m_n + \frac{m_{\max} - m_{\min}}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

where N_{CT} is the number of classification tests, m_n the slope of the n th test, $m_{\max}$ the maximum slope and $m_{\min}$ the minimum slope of the N_{CT} test slopes.

7 Verification of the performance of RSDs

Verification of the performance of the RSD shall be carried out by calibrating measurements acquired by the RSD against concurrent and co-located measurements of the same wind flow parameters acquired by meteorological mast-mounted reference sensors which would have been deemed in conformity with IEC 61400-50-1. Depending on the use of the RSD in the SMC, the accuracy shall be evaluated in relation to those same RSD output parameters considered during the classification test and which are relevant to the SMC.

The calibration shall be conducted not earlier than one year prior to the start of the SMC for its results still to be considered valid in relation to the SMC in which the RSD is being deployed. Alternatively, the calibration test can be performed during the SMC. If the calibration test is performed prior to the SMC, the RSD shall either be stored or shall be directly transported to the location where the SMC will take place at the end of the calibration test.

For some use cases, such as a power performance test, a repetition of the RSD calibration test shall be performed after the SMC. Refer to the relevant use case standard (e.g. IEC 61400-12-1) for specific requirements in this respect. As an alternative, an in-situ test of the RSD against the meteorological mast present at the SMC site can be performed. Deviations of the calibration test methodology or of such deviations implied by the in-situ test shall be treated like deviations of cup anemometer calibrations as defined in IEC 61400-50-1.

Regarding data acquisition and data preparation, the calibration test is conducted in the same way as the sensitivity analysis as described in 6.2 and 6.3, with the exception that criterion

6.2 c) is relaxed, such that it is sufficient to acquire 180 h of data. The requirements on the heights of the reference sensors described in 6.2 in relation to classification tests also apply to verification tests.

The method of bins shall be used to compare the measurements acquired using the RSD and the reference sensors. The bin-wise deviation between the RSD measurement and the measurement of the reference sensor is considered the key result. 0,5 m/s wide reference wind speed bins centred on multiple integers of 0,5 m/s shall be applied for the comparison of horizontal wind.

If comparisons of other parameters are required for the SMC, the bins can be defined as follows.

- a) 5° wide wind direction bins shall be applied for comparison of wind directions, centred on multiple integers of 5°.
- b) 0,1 m/s wide bins may be used for the comparison of vertical wind speeds and the comparison of standard deviations of the horizontal wind speed, centred on multiple integers of 0,1 m/s.
- c) 1 % (0,01) wide bins may be used for comparison of turbulence intensities, centred on multiple integers of 1 % (0,01).

The raw data, expressed as 10 min averages, shall be presented as a scatter plot of the measurements acquired by the RSD against the measurements acquired by the reference sensor. In addition, the deviations between the RSD measurements and reference measurements shall be plotted against the reference measurements. These shall be shown on the same plot, an example of which is shown in Figure 6. For the first scatter plot, the correlation coefficient shall be computed. For the second scatter plot, the mean value and standard deviation of the deviations shall be computed. For both scatter plots, mean values and standard deviations per bin of the dependent variable shall be calculated (Table 11).

The bin averages of the remote sensing measurements shall be plotted as a function of the bin averages of the reference sensor measurements (Figure 7). A two-parameter ordinary least squares (OLS) linear regression shall be plotted through the data points that lie within the reference wind speed range 4 m/s to 16 m/s inclusive. The total uncertainty of the RSD remaining from its calibration test shall be assessed as described in 8.3 (Figure 7, Table 11).

The bin-averaged deviations of the RSD measurements and reference measurements shall be compared to the standard uncertainty of the calibration test reduced by the bin averaged deviations as given by Formula (8) where all components have consistent units:

$$\sqrt{u_{\text{ver},i}^2 - (\bar{V}_{\text{RSD},i} - \bar{V}_{\text{Ref},i})^2} \quad (8)$$

where

$\bar{V}_{\text{RSD},i}$ is the bin average of RSD at calibration test in bin i ;

$\bar{V}_{\text{Ref},i}$ is the bin average of reference measurement at calibration test in bin i ;

$u_{\text{ver},i}$ is the standard uncertainty of calibration test in bin i in accordance with 8.3.

The wind speed measurements of the RSD may be corrected based on the calibration test results in order to remove a bias. Such a correction is recommended if the bin-averaged deviations exceed the above expression (at least in one bin). The wind speed correction may consist of a linear regression of the bin averaged reference sensor measurements versus the RSD measurements.

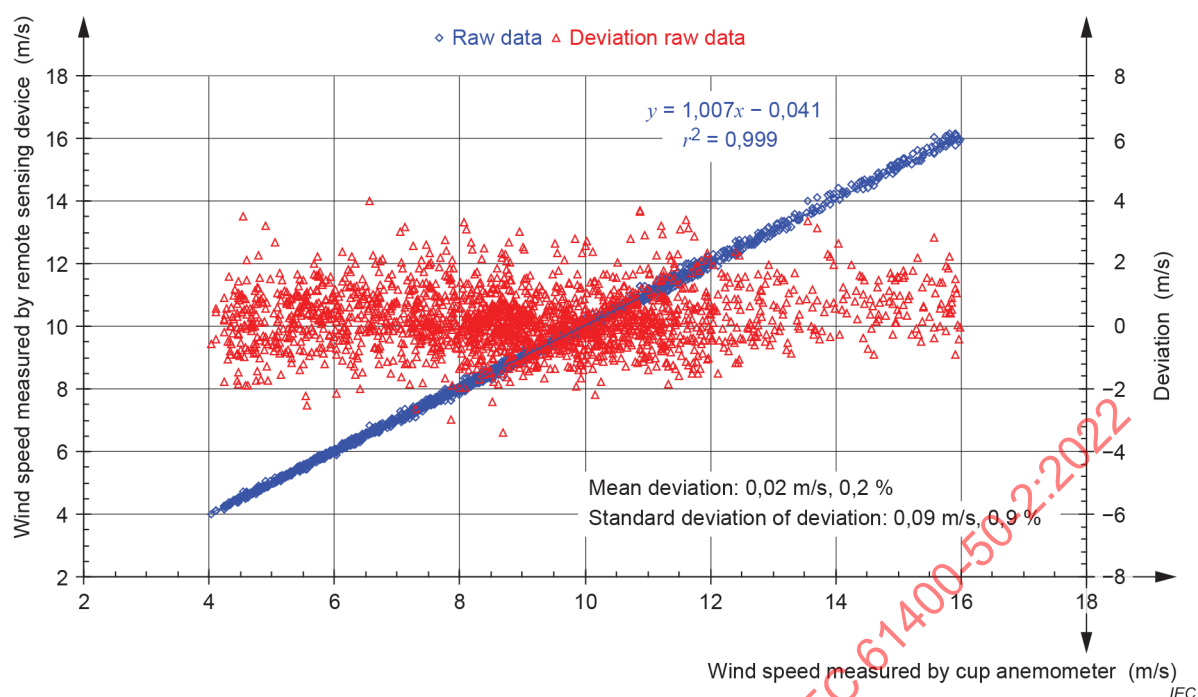


Figure 6 – Comparison of 10 min averages of the horizontal wind speed component as measured by an RSD and a cup anemometer

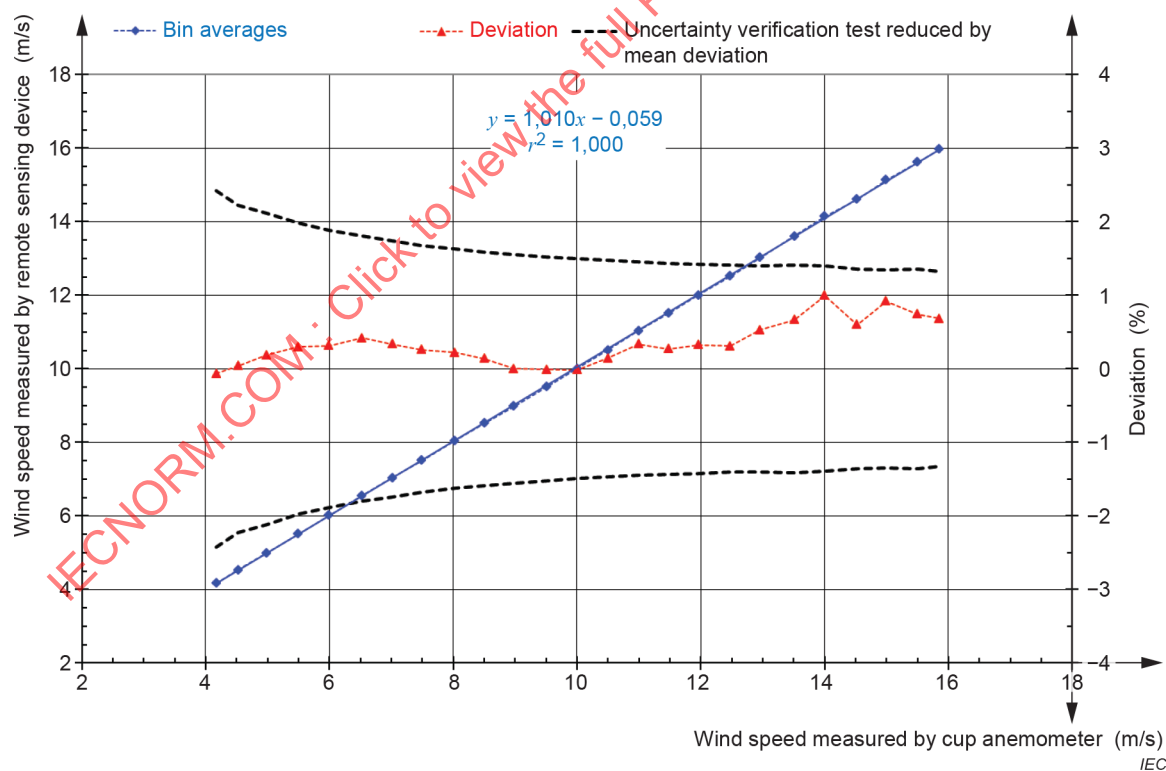


Figure 7 – Bin-wise comparison of measurement of the horizontal wind speed component of an RSD and a cup anemometer

The considerations discussed in 6.4 in relation to errors and sensitivities detected during classification tests that are artefacts of incorrect RSD configuration – in particular, the introduction of errors and sensitivities to wind shear as a result of incorrect assignment of measurement heights – should also be considered in the context of calibration tests, see reference [2].

8 Evaluation of uncertainty of measurements by RSDs

8.1 General

The following components shall be taken into account for the evaluation of the uncertainty of the measurements with RSDs:

- a) uncertainty resulting from the RSD calibration test in accordance with 8.3;
- b) uncertainty resulting from the RSD classification in accordance with 8.4;
- c) uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume of the RSD in accordance with 8.5;
- d) uncertainty due to mounting effects of the RSD in accordance with 8.6;
- e) a possible uncertainty due to unexpected results of the monitoring of the RSD's accuracy on the application site in accordance with 9.1 to 9.3;
- f) uncertainty related to the in-situ check of the device in accordance with 9.4;
- g) uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume.

The different uncertainty components shall be assumed to be independent of each other and shall be added in quadrature.

8.2 Reference uncertainty

The following uncertainty components are considered for the evaluation of the standard uncertainty of the reference sensor (in case of a cup anemometer) and shall be considered to be independent of each other and thus shall be added in quadrature:

- a) wind tunnel calibration;
- b) cup anemometer effects in accordance with the anemometer classification;
- c) cup anemometer mounting effects;
- d) uncertainty of any applied meteorological mast correction to the reference cup anemometer measurements.
- e) uncertainty in the data acquisition system of the reference instrument for the wind speed in bin i .

Refer to IEC 61400-50-1 for specific details of these reference sensor uncertainty components.

8.3 Uncertainty resulting from the RSD calibration test

The measurements of the RSD are linked to the following systematic uncertainties (category B uncertainties) resulting from the calibration test, which shall be calculated for each bin of the measurement of the RSD:

- a) the standard uncertainty of the reference sensor in accordance with 8.2;
- b) the mean deviation of the RSD measurements and the reference sensor measurements. If a correction of the measurement of the RSD is performed, the average deviation between the corrected measurements of the RSD and the reference sensor measurements is evaluated;
- c) the standard uncertainty of the measurement of the RSD calculated as the standard deviation of the measurements divided by the square root of the number of data records per bin (category A uncertainty of calibration test);
- d) uncertainty of the RSD due to mounting effects during the calibration test;
- e) uncertainty of the RSD due to non-homogenous flow within the measurement volume during the calibration test in accordance with 8.5.

Site effects may be considered as an additional uncertainty if the RSD and the reference sensor meteorological mast are separated from each other by a significant distance that compromises

conformity with 6.2 d). In particular, an additional uncertainty in wind speed of 1 % of the separation distance divided by the measurement height shall be applied. The separation distance is the distance between the centroid of the measurement volume and the reference sensor being used for the test. The measurement height is the height at which the comparison between the reference sensor and the RSD is being performed.

Uncertainties of the data acquisition system of the RSD are automatically integrated in the calibration test results and shall not be considered additionally.

The different uncertainty components shall be assumed to be independent of each other and shall be added in quadrature for each wind speed bin. An example calculation is shown in Table 11. The total category B uncertainty of the measurements of the RSD resulting from the calibration test shall be taken into account as category B uncertainty of the SMC in any case.

Table 11 – Example of uncertainty calculations arising from calibration of an RSD in terms of systematic uncertainties

V_{cup}	V_{RSD}	Number of data sets	V_{RSD} max.	V_{RSD} min.	V_{RSD} std	V_{RSD} std/ $\sqrt{n}$	Mean deviation	V_{cup} uncertainty	Mounting uncertainty RSD	V_{RSD} uncertainty
[m/s]	[m/s]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]
4,133	4,148	15	4,30	4,00	0,090	0,023	0,4	2,3	0,5	2,4
4,528	4,525	33	4,85	4,28	0,139	0,024	0,0	2,2	0,5	2,3
5,064	5,086	26	5,31	4,74	0,141	0,028	0,4	2,0	0,5	2,2
5,538	5,593	47	5,92	5,28	0,166	0,024	1,0	1,9	0,5	2,2
5,985	6,025	44	6,27	5,72	0,141	0,021	0,7	1,9	0,5	2,0
6,513	6,546	45	6,80	6,26	0,158	0,024	0,5	1,8	0,5	1,9
6,995	7,019	87	7,33	6,73	0,151	0,016	0,3	1,7	0,5	1,8
7,500	7,501	109	7,83	7,14	0,156	0,015	0,0	1,7	0,5	1,7
8,010	8,013	118	8,41	7,69	0,160	0,015	0,0	1,6	0,5	1,6
8,512	8,537	145	8,97	8,22	0,183	0,015	0,3	1,6	0,5	1,6
8,993	9,033	146	9,45	8,71	0,176	0,015	0,4	1,5	0,5	1,6
9,498	9,554	121	9,97	9,16	0,171	0,016	0,6	1,5	0,5	1,6
10,008	10,059	166	10,57	9,63	0,181	0,014	0,5	1,5	0,5	1,6
10,506	10,536	106	10,91	10,25	0,141	0,014	0,3	1,5	0,5	1,5
11,003	11,037	78	11,52	10,68	0,185	0,021	0,3	1,4	0,5	1,5
11,502	11,510	59	11,92	11,13	0,188	0,025	0,1	1,4	0,5	1,4
12,000	12,035	63	12,62	11,68	0,217	0,027	0,3	1,4	0,5	1,5
12,519	12,521	68	12,97	12,15	0,182	0,022	0,0	1,4	0,5	1,4
12,957	12,998	64	13,40	12,64	0,186	0,023	0,3	1,4	0,5	1,4
13,469	13,470	40	13,87	13,17	0,177	0,028	0,0	1,4	0,5	1,4
14,011	14,014	25	14,36	13,67	0,192	0,038	0,0	1,3	0,5	1,4
14,444	14,490	30	14,83	14,21	0,172	0,031	0,3	1,3	0,5	1,4
14,983	14,951	14	15,48	14,62	0,246	0,066	-0,2	1,3	0,5	1,4
15,509	15,585	17	15,92	15,38	0,135	0,033	0,5	1,3	0,5	1,4
15,990	16,038	16	16,24	15,77	0,130	0,032	0,3	1,3	0,5	1,4
16,475	16,479	10	16,69	16,22	0,149	0,047	0,0	1,3	0,5	1,3
17,066	17,140	12	17,50	16,75	0,227	0,065	0,4	1,3	0,5	1,4
17,515	17,682	13	17,91	17,44	0,153	0,042	1,0	1,3	0,5	1,6
18,001	18,020	8	18,32	17,82	0,157	0,056	0,1	1,3	0,5	1,3
18,430	18,549	13	18,82	18,25	0,173	0,048	0,6	1,3	0,5	1,5
18,849	18,980	4	19,16	18,80	0,149	0,075	0,7	1,3	0,5	1,5
19,415	19,430	3	19,67	19,23	0,223	0,129	0,1	1,3	0,5	1,4

The uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume is assumed to be zero.

It is pointed out that the statistical standard uncertainty of the measurement of an RSD related to single 10-minute averages of a measured variable as resulting from the calibration test is given by the standard deviation of the deviations of the measurements of the RSD and the reference sensor. This uncertainty is significantly higher than the statistical uncertainty of the bin averages of the calibration test described in 8.3 c). However, the statistical uncertainty of single 10-minute averages is automatically included in the category A uncertainty of the bin averages of the SMC if the primary parameter is the horizontal wind speed (e.g. in a power performance test), and shall therefore not be accounted for by additional means.

8.4 Uncertainty due to RSD classification

Sensitivity of the device due to varying conditions introduces uncertainty because the meteorological conditions during the application (SMC) of the remote sensor can deviate from the meteorological conditions present during the calibration test. The standard uncertainty arising from the accuracy class as determined in accordance with 6.7 shall be the final accuracy class number divided by $\sqrt{3}$.

The accuracy class in accordance with 6.7 represents the maximum measurement error of the RSD due to the influence of environmental conditions within each 10 min period (after the associated calibration test). This uncertainty includes uncertainties due to a variation of the environmental variables around its mean values as present at the SMC in each wind speed bin. However, the uncertainty due to this variation of the environmental variables at the SMC is of statistical nature and is fully reflected in the category A uncertainty of the bin averages of the SMC (e.g. category A uncertainty of a power performance test) and should therefore not be accounted for as category B uncertainty of the wind speed measurement. The category B uncertainty of the wind speed measurement due to the influence of environmental variables on the performance of the RSD should rather take into account only the deviations of the mean values of the environmental variables during the calibration test and the SMC, and should be calculated for each wind speed bin. There are three ways of calculating the uncertainty due to these variables.

- 1) The environmental variable is measured during the SMC:

$$u_{VR, \text{class}, i} = v_i \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot |\bar{x}_{SMC, j, i} - \bar{x}_{ver, j, i}| \right)^2} \quad (9)$$

where

$u_{VR, \text{class}, i}$ is the category B standard uncertainty of wind speed measurement in wind speed bin i due to the influence of the environmental variables on the performance of the RSD;

M is the number of environmental variables considered to have a relevant influence on the accuracy of the RSD in accordance with the classification test;

m_j is the slope describing the sensitivity of the wind speed measurement of the RSD on the environmental variable j as gained from the combination of the results from a minimum of three classification tests;

$\bar{x}_{SMC, j, i}$ is the mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the SMC;

$\bar{x}_{ver, j, i}$ is the mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the calibration test of the RSD.

2) The environmental variable is not measured during the SMC:

$$u_{VR,class,i} = v_i \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot \frac{\max(|x_{min,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}|, |x_{max,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}|)}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (10)$$

where

- M is the number of environmental variables considered to have a relevant influence on the accuracy of the RSD in accordance with the classification test;
- m_j is the slope describing the sensitivity of the wind speed measurement of the RSD on the environmental variable j as gained from the combination of results from a minimum of three classification tests;
- $x_{min,j,i}$ is the expected lower range limit of not measured environmental variable j in wind speed bin i ;
- $x_{max,j,i}$ is the expected upper range limit of not measured environmental variable j in wind speed bin i ;
- $\bar{x}_{ver,j,i}$ is the mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the performance verification test of the RSD.

3) If a fixed range is expected:

$$u_{VR,class,i} = v_i \frac{\text{accuracy class}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

NOTE Equation (11) is inaccurate because the variation of the environmental variable is included, which is already included in the uncertainties of category A of the SMC.

The intention of option 2) above is in the case where the relevant environmental variables are not measured during the SMC, then the maximum range of that variable as present at the SMC shall be estimated, and the deviation between the mean values of the environmental variables during the SMC and during the calibration test in Equation (7) shall be replaced by the expected maximum absolute deviation of that variable as present during the SMC from its mean value present during the calibration test divided by $\sqrt{3}$.

However, as the classification derivation is based on the assumption of a linear response to perturbations in the independent variables, where the maximum and minimum values of the independent variables during the SMC or calibration test exceed the ranges obtained during the classification sensitivity tests, care should be taken when interpreting the classification uncertainty result. If the calibration test includes the same data as the SMC, the uncertainty in accordance with 8.4 becomes equal to zero.

8.5 Uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume

Many remote wind sensing devices assume equivalent wind conditions in regions within the measurement volume that have significant spatial separation. This assumption can be violated in complex terrain. Even in terrain not classified as complex in accordance with IEC 61400-12-3, significant errors can occur due to the non-homogeneity of the flow. The uncertainty linked to the assumption of equivalent wind conditions in spatially separated probe volumes shall be assessed. RSDs should be subject to a rigorous and thorough analysis of the influence of non-uniform flow on measurement bias with reference to their particular configuration.

For example, the combination of a suitable flow model and a model reproducing the RSD horizontal wind speed extraction algorithm might be used to assess the uncertainty due to non-homogeneous flow.

A simplified alternative to estimate this uncertainty applicable to many monostatic systems implemented by observations of the Doppler effect is given by the method used by Bingöl et al. [3], with extensions by Albers et al. [4] and is summarized in Annex A.

The user should consult with the RSD manufacturer for the best method for evaluating the uncertainty for their specific device at the test site.

8.6 Uncertainty due to mounting effects

The uncertainty of the RSD due to non-ideal levelling of the device shall be estimated. The uncertainty is highly dependent on the type of instrument being used.

8.7 Combining uncertainties in the wind speed measurement from RSD ($u_{VR,i}$)

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for wind speed measurements from an RSD device, $u_{VR,i}$:

$$u_{VR,i} = \sqrt{u_{VR,ver,i}^2 + u_{VR,isc,i}^2 + u_{VR,class,i}^2 + u_{VR,mnt,i}^2 + u_{VR,flow,i}^2 + u_{VR,mon,i}^2} \quad (12)$$

where

- $u_{VR,ver,i}$ is the uncertainty due to the verification test;
- $u_{VR,isc,i}$ is the uncertainty due to the in-situ test;
- $u_{VR,class,i}$ is the uncertainty related to the classification of the RSD;
- $u_{VR,mnt,i}$ is the uncertainty related to the mounting of the RSD;
- $u_{VR,flow,i}$ is the uncertainty related to the flow variation across the measurement volume of the RSD;
- $u_{VR,mon,i}$ is the uncertainty related to the monitoring of the RSD.

9 Additional checks

9.1 Monitoring the performance of the RSD at the application site

Where the use case (e.g. power performance) requires monitoring of the RSD performance at the application site, a meteorological mast reaching at least the minimum of 40 m or the lowest measurement height of interest (e.g. lower tip height in the case of a power performance test) shall be applied at the SMC for monitoring the performance of the RSD. The set-up of the meteorological mast and the RSD and the data preparation shall comply with the requirements described in 6.2 and 6.3 with the exception that the meteorological mast has only a relatively small height and may be equipped with reference sensors only at the top of the meteorological mast. The data analysis described in 9.1 to 9.3 shall be undertaken.

9.2 Identification of malfunctioning of the RSD

Time series plots of the wind measurements (wind speed and wind direction) performed with the meteorological mast shall be compared to time series plots of the measurements of the respective wind measurements of the RSD. In addition, scatter plots of the measurements of the wind speed and wind direction of the RSD versus the respective measurements with the meteorological mast shall be inspected. Periods with obvious outlier data or other anomalies shall be excluded from the SMC dataset.

9.3 Consistency check of the assessment of the RSD systematic uncertainties

Note that 9.3 does not apply if the RSD calibration is done simultaneously with the SMC (SMC). The comparison and analysis of the measurements of the RSD and the reference sensors at common measurement heights as performed for a calibration test in accordance with Clause 7 shall be repeated with the meteorological mast at the SMC site for the full duration of the SMC. It is expected that the absolute value of the mean deviation of the measurements of the RSD

and the reference sensor per wind speed bin at the SMC does not exceed the square root of the sum of the squares of the following uncertainty components:

- a) the category B standard uncertainty of the measurement of the RSD resulting from the calibration test performed prior to the SMC assessed in full accordance with 8.3;
- b) systematic effects of environmental variables on the performance of the RSD at the SMC as assessed in accordance with the relevant equation given in 8.4, taking into account only mean deviations of the influential environmental variables at the SMC and the calibration measurement prior to the SMC.

Three scenarios are possible depending on the above evaluation and shall be treated as follows.

- 1) No additional uncertainty needs to be added if the following criterion is met:

$$\sqrt{u_{VRvf,mh,i}^2 + u_{VRcls,mh,i}^2} > |v_{RSD,mh,i} - v_{MM,i}| \quad (13)$$

where

- $u_{VRvf,mh,i}$ is the uncertainty of the RSD verification at control mast height in bin i ;
- $u_{VRcls,mh,i}$ is the uncertainty due to operational characteristics of the RSD at control mast height in bin i ;
- $v_{RSD,mh,i}$ is the wind speed of the RSD at control mast height in bin i
- $v_{MM,i}$ is the wind speed of the control meteorological mast in bin i .

- 2) If (13) is not met and the measurement height of the RSD and the control meteorological mast are equal, the following uncertainty shall be added:

$$u_{VRmon,i} = |v_{RSD,mh,i} - v_{MM,i}| - \sqrt{u_{VRvf,mh,i}^2 + u_{VRcls,mh,i}^2} \quad (14)$$

- 3) If (13) is not met and the measurement heights of the RSD and the control meteorological mast are not the same, $u_{VRmon,i}$ shall be calculated as follows:

$$u_{VRmon,i} = u_{added_systematic,j,i} = u_{added_systematic,1,i} \frac{u_{systematic,j,i}}{u_{systematic,1,i}} \quad (15)$$

where

- $u_{added_systematic,j,i}$ is the added category B standard uncertainty at measurement height j (not covered by the meteorological mast);
- $u_{added_systematic,1,i}$ is the added category B uncertainty at the height of the top of the meteorological mast;
- $u_{systematic,j,i}$ is the cumulated other category B uncertainties of the RSD at height j ;
- $u_{systematic,1,i}$ is the cumulated other category B uncertainties of the RSD at the height of the top of the meteorological mast.

The added category B uncertainty shall be cumulated with the other category B uncertainties of the RSD measurements in quadrature.

9.4 In-situ test of the RSD

In order to check the consistency of the accuracy of the measurements of the RSD throughout the SMC, the meteorological mast present at the test site may be used to perform an in-situ test of the RSD similar to the in-situ test of cup anemometers defined in IEC 61400-50-1. If in-situ testing is performed, it shall be done for all common measurement heights covered by the meteorological mast and the RSD.

A successful in-situ test can replace a repetition of the calibration test after the SMC.

10 Application to SMC

If a measurement height required for the SMC is between two measurement heights available from the calibration test or the classification test, linear interpolation of the results of the calibration test or of the classification test in accordance with the height shall be performed. Linear extrapolation of the results of the calibration test or of the classification test should not be performed. Other types of extrapolation are permitted as long as they are conservative. If the measurements required for the SMC extend beyond the height range covered by the calibration test or the classification test, a higher uncertainty than the uncertainty pertaining to the nearest height covered by the calibration test or the classification test shall be considered.

Probe volumes within which the RSD acquires a radial velocity measurement shall be free of wakes and flow perturbation from wind turbines and obstacles as defined in IEC 61400-12-5. For clarity:

- a) the measurement volume is the region within which wind flow characteristics can influence a wind speed measurement and is defined by the scan geometry, device configuration or arrangement of the multiple beams penetrating the volume in order to acquire that measurement;
- b) the probe volume is the region from which a single constituent physical measurement of, for example, Doppler shift or radial velocity, is acquired, several of which are typically required to derive a wind speed measurement. The probe volume is a characteristic of the basic physical interaction of the RSD with the atmosphere, rather than the wind speed measurement derived from these interactions, which is determined by the flow within the measurement volume.

Device-specific measures should be undertaken in accordance with the advice and guidance of the manufacturers of the RSD employed. The aim is to comply with the general requirements in measurement height.

The same RSD configuration, operating parameters, software, firmware and performance related hardware components shall be used during the SMC as were used during device classification and during the calibration test. No major changes shall be implemented that might affect performance between calibration, classification and SMC.

The following measurements are required for the SMC, the calibration test and for the classification test if the RSD requires data filtering in that respect for the provision of accurate measurements:

- 1) measurement of precipitation;
- 2) measurement of cloud height;
- 3) measurement of ambient acoustic noise level.

The need for such measurements shall be reasonably assessed during the classification test.

Refer to the appropriate use case standard (e.g. IEC 61400-12-1) for further requirements specific to the use case.

11 Reporting

11.1 Common reporting on classification test, calibration test, and monitoring of the RSD during SMC

The reports on the classification test, on the calibration test and on the monitoring of the RSD during the SMC shall include the following common contents:

- a) all details of the set-up of the reference measurement and all details of the test site as required for a power performance test;

- b) all details of the set-up of the RSD, including exact position of the RSD, relative position to reference meteorological mast, orientation, version and set-up of operating software, pitch and roll angle and its monitoring;
- c) serial number and type of the RSD;
- d) measurement period;
- e) description of data analysis including filtering;
- f) presentation of raw data as described in Clause 7;
- g) bin-wise analysis of measurement of RSD versus reference measurement including graphical and tabular documentation as described in Clause 7 and 8.3;
- h) analysis of uncertainty of reference measurements, where applicable in accordance with 8.2;
- i) environmental conditions during the test remaining after all data filtering: at least all variables having a significant influence on the accuracy of the RSD as resulting from the classification test shall be documented. Each of these variables shall be plotted as a function of the wind speed at the evaluation height and shall be bin-averaged against this wind speed using bins with a width of 0,5 m/s centred on multiple integers of 0,5 m/s. In addition, the distribution of these variables shall be shown. For the performance monitoring at the SMC, this documentation is limited to the available measurements of environmental conditions;
- j) all calibration certificates of all reference sensors and of the data acquisition system.

11.2 Additional reporting on classification test

The report about the classification test shall contain the following in addition to the items given in 11.1:

- a) scatter plots of 10 min data and bin averages related to the sensitivity analysis for all considered variables as detailed in 6.4;
- b) description and reasoning of the selection of considered environmental variables;
- c) complete documentation of the process of the identification and elimination of insignificant environmental variables;
- d) complete documentation of the process of the investigation of inter-correlations of the considered environmental variables;
- e) sensitivity parameters, sensitivities, correlation coefficients, mean values and standard deviations of all variables considered in accordance with Clause 6;
- f) ranges of environmental variables considered for the classification;
- g) choice of the classification method;
- h) classification results for the parameter ranges defined in Table 5.

11.3 Additional reporting on calibration test

The report about the calibration test shall contain the following in addition to the items given in 11.1:

- a) standard uncertainty of the RSD resulting from the calibration test in accordance with 8.3;
- b) if the calibration test is repeated after the SMC test: comparison of results of calibration tests and consequences of the comparison;
- c) additional reporting on monitoring of RSD during application;
- d) any anomalies of the measurements in accordance with 9.2;
- e) amount and periods of data filtered out based on data check in accordance with 9.2;
- f) uncertainty analysis in accordance with 8.3 and 8.4;

- g) bin-wise representation of evaluation criteria in accordance with 9.3 and added uncertainty;
- h) training and test period, results and consequences of in-situ test, so far performed.

11.4 Additional reporting on SMC

The report about the SMC shall contain the following in addition to the items given in 11.1 and the reporting requirements specific to the SMC:

- a) full uncertainty assessment of measurements of the RSD in accordance with Clause 8;
- b) realization of air density measurements and description of associated data corrections to hub height where relevant.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-2:2022

Annex A (informative)

Uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume

A simplified alternative to estimate this uncertainty applicable to many monostatic RSD systems implemented by observations of the Doppler effect is given by the method used by Bingöl et al. [3], with extensions by Albers et al. [4] and is summarized here.

$$u_{VR,flow,i} = \frac{(\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha_1)) \cdot v_i}{2 \cdot \tan(\Phi)} \quad (16)$$

where

α_1 is the upflow angle into the probe volume;

α_2 is the upflow angle out of the probe volume;

Φ is the opening angle of the RSD from the vertical.

As a first estimation for the upflow angles into and out of the probe volume, 1° and -1° , respectively, may be used.

This default first estimate results in an uncertainty component of 2 % to 3 % of the measured wind speed (depending on the RSD opening angle). Alternatively, the method based on terrain slope to approximate upflow angle in accordance with IEC 61400-1:2019, 11.2.1 may be used.

The user should consult with the RSD manufacturer for the best method for evaluating the uncertainty for their specific device at the test site.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-2:2022

Bibliography

- [1] IEC 61400-12-1:2017, *Wind energy generation systems – Power performance measurements of electricity producing wind turbines*
- [2] Lindelow et al., Wind shear proportional errors in the horizontal wind speed send by focused range gated lidars, IOP conf. Series: Earth and Env. Sc., Vol. 1, 2008
- [3] Bingöl, F., Mann, J., and Foussekis, D., Modelling conically scanning lidar error in complex terrain with WAsP engineering, Riso-R-1664(EN), 2008
- [4] Albers, A., Janssen, A.W., Mander, J., How to Gain Acceptance for Lidar Measurements, Proceedings of German Wind Energy Conference, 2010

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-2:2022

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-50-2:2022

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	44
INTRODUCTION.....	46
1 Domaine d'application	47
2 Références normatives	47
3 Termes et définitions	47
4 Symboles, unités et termes abrégés	50
5 Généralités	51
6 Classification des RSD	53
6.1 Généralités	53
6.2 Acquisition de données	54
6.3 Préparation des données	55
6.4 Principes et exigences d'un essai de sensibilité	56
6.5 Évaluation de l'importance d'une variable environnementale	62
6.6 Évaluation de l'interdépendance entre les variables environnementales	63
6.7 Calcul de la classe d'exactitude	66
6.8 Critères d'acceptation	68
6.9 Classification du RSD	69
7 Vérification de la performance des RSD	69
8 Évaluation de l'incertitude des mesurages des RSD	72
8.1 Généralités	72
8.2 Incertitude de référence	73
8.3 Incertitude résultant de l'essai d'étalonnage du RSD	73
8.4 Incertitude due à la classification du RSD	75
8.5 Incertitude due à l'écoulement non homogène dans le volume de mesure	76
8.6 Incertitude due aux effets de montage	76
8.7 Composition des incertitudes relatives au mesurage de la vitesse du vent par un RSD ($u_{VR,i}$)	77
9 Contrôles supplémentaires	77
9.1 Surveillance de la performance du RSD sur le site d'application	77
9.2 Identification d'un dysfonctionnement du RSD	77
9.3 Vérification de la cohérence de l'évaluation des incertitudes systématiques du RSD	77
9.4 Essai in situ du RSD	78
10 Application relative à la SMC	79
11 Rapports	80
11.1 Rapport commun sur l'essai de classification, l'essai d'étalonnage et la surveillance du RSD lors du SMC	80
11.2 Rapport supplémentaire sur l'essai de classification	80
11.3 Rapport supplémentaire sur l'essai d'étalonnage	81
11.4 Rapport supplémentaire sur la SMC	81
Annexe A (informative) Incertitude due à l'écoulement non homogène dans le volume de mesure	82
Bibliographie	83

Figure 1 – Réponse de l'angle d'inclinaison d'un anémomètre $V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$ à coupelles en fonction de l'angle d'écoulement α comparée à la réponse du cosinus (IEC 61400-50-1) 57

Figure 2 – Écart par rapport à l'angle d'écoulement ascendant déterminé pour un RSD selon l'anémomètre à coupelles de la Figure 1	58
Figure 3 – Exemple d'analyse de sensibilité en fonction du cisaillement du vent	60
Figure 4 – Exemple de cisaillement du vent par rapport à l'intensité des turbulences	64
Figure 5 – Exemple d'écart en pourcentage des mesurages du RSD et du capteur de référence par rapport à l'intensité de la turbulence.....	65
Figure 6 – Comparaison des moyennes sur 10 min de la composante de vitesse horizontale du vent mesurée par un RSD et par un anémomètre à coupelles	71
Figure 7 – Comparaison par tranche du mesurage de la composante de vitesse horizontale du vent par un RSD et par un anémomètre à coupelles	72
Tableau 1 – Interfaces d'autres normes avec l'IEC 61400-50-2	52
Tableau 2 – Interfaces de l'IEC 61400-50-2 avec d'autres normes	52
Tableau 3 – Exemple de largeur de tranche pour une liste de variables environnementales.....	59
Tableau 4 – Paramètres déduits d'une analyse de sensibilité d'un RSD	61
Tableau 5 – Plages des paramètres environnementaux pour l'analyse de la sensibilité.....	62
Tableau 6 – Exemple de choix de variables environnementales qui se révèlent avoir un impact significatif	63
Tableau 7 – Paramètres de l'analyse de sensibilité restants après l'analyse de l'interdépendance des variables.....	66
Tableau 8 – Exemple de schéma de calcul de l'impact maximal des variables environnementales.....	67
Tableau 9 – Classes d'exactitude préliminaires d'un RSD en prenant en considération toutes les variables ou des variables d'influence les plus importantes seulement.....	68
Tableau 10 – Exemple de classes d'exactitude finales d'un RSD	68
Tableau 11 – Exemple de calculs d'incertitude dus à l'étalonnage d'un RSD en matière d'incertitudes systématiques	74

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 50-2: Mesurage du vent – Application de la technologie de télédétection montée au sol

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61400-50-2 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 61400-50-2 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 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
88/829/CDV	88/865/RVC

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/publications/.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61400, publiées sous le titre *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 de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

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

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

INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 61400 spécifie les procédures et les méthodes qui assurent que les mesurages du vent à l'aide des dispositifs de télédétection (RSD – remote sensing device) montés au sol 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 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 leur cas d'utilisation spécifique. Cependant, les articles principaux sont présentés dans une séquence logique qui peut être appliquée dans la pratique.

Au préalable, le contenu technique de ce document peut être consulté dans l'IEC 61400-12-1:2017[1]¹. 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.

¹ Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 50-2: Mesurage du vent – Application de la technologie de télédétection montée au sol

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 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 par télédétection montés au sol, c'est-à-dire des dispositifs qui mesurent le vent à un endroit généralement situé au-dessus et éloigné de l'endroit dans lequel l'instrument est monté (par exemple, sodars, lidars à profil vertical). Le présent document exclut spécifiquement d'autres types de RSD tels que les lidars dirigés vers l'avant ou les lidars à balayage. Le présent document spécifie les points suivants:

- a) la procédure et les exigences de classification des RSD au sol afin d'évaluer l'incertitude liée à la sensibilité de la réponse du RSD aux conditions météorologiques qui peuvent varier entre le lieu et le moment de l'étalonnage du RSD et le lieu et le moment du cas d'utilisation (SMC – specific measurement campaign, campagne de mesure spécifique).
- b) les procédures et les exigences relatives à l'étalonnage des RSD.
- c) l'évaluation de l'incertitude de mesure de la vitesse du vent.
- d) les contrôles supplémentaires des performances du RSD et de l'incertitude de mesure pendant la SMC.
- e) l'application de l'incertitude de la vitesse du vent dérivée de l'étalonnage et de la classification du RSD aux mesurages effectués pendant la SMC (par exemple, interpolation de l'incertitude ou des résultats de l'étalonnage à différentes hauteurs).
- f) exigences relatives aux 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).

IEC 61400-50-1, *Wind energy generation systems – Part 50-1: Wind measurement – Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments* (disponible en anglais seulement)

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

terrain complexe

terrain qui entoure le site d'essai et qui présente des variations topographiques notables et des *obstacles* (3.10) qui peuvent entraîner une distorsion de l'écoulement de l'air

3.3

ensemble de données

collection de données échantillonnées sur une période continue

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

<des éoliennes> 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 (par exemple l'essai de performance de puissance)

3.7

incertitude de mesure

paramètre, associé au résultat de mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent raisonnablement être attribuées au mesurande

3.8

volume de mesure

<du RSD> zone dans laquelle les caractéristiques d'écoulement du vent peuvent avoir une influence sur un mesurage de la vitesse du vent, et qui est définie par la configuration de la géométrie de balayage, la configuration du dispositif ou l'agencement des multiples faisceaux qui pénètrent dans le volume afin d'acquies ce mesurage

3.9

méthode des tranches

procédure de réduction des données selon laquelle les données d'essai pour un paramètre donné sont groupées en intervalles (tranches)

Note 1 à l'article: Pour chaque tranche, le nombre d'ensembles de données ou d'échantillons et leur somme sont enregistrés, et la moyenne de la valeur du paramètre à l'intérieur de chaque tranche est calculée.

3.10

obstacles

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.

3.11**angle de pas et angle de roulis**

<du RSD> angles de nivellement

3.12**performance de puissance**

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

3.13**volume de sonde**

<du RSD> zone à partir de laquelle un seul mesurage physique constituant du décalage Doppler, de la vitesse radiale, par exemple, est acquis, dont plusieurs sont généralement exigées pour déduire un mesurage de la vitesse du vent

Note 1 à l'article: Le volume de sonde est une caractéristique de l'interaction physique de base du dispositif de télédétection avec l'atmosphère, plutôt que du mesurage de la vitesse du vent déduite de ces interactions, qui est déterminée par l'écoulement à l'intérieur du volume de mesure.

3.14**vitesse radiale****vitesse de vue linéaire**

<RSD> projection du vecteur vitesse du vent sur la vue linéaire du RSD

3.15**incertitude-type**

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

3.16**surface balayée**

<d'une éolienne à axe horizontal> surface projetée par le rotor mobile sur un plan perpendiculaire à l'axe de rotation

Note 1 à l'article: Pour les rotors à balancier, il est pris pour hypothèse que le rotor reste perpendiculaire par rapport à l'arbre primaire. Pour une éolienne à axe vertical, il s'agit de la surface projetée par le rotor mobile sur un plan vertical.

3.17**site d'essai**

emplacement et environnement où un RSD est déployé afin de fournir des mesurages dans le cadre d'un essai, par exemple, d'une éolienne ou d'un essai du RSD

3.18**cisaillement du vent**

variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur

3.19**exposant de cisaillement du vent** α

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

Note 1 à l'article: Ce paramètre est utilisé comme mesurage 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

3.20

déviation de la trajectoire du vent

variation de la direction du vent en fonction de la hauteur

4 Symboles, unités et termes abrégés

Symbole	Description	Unité
avg	moyenne sur 10 minutes	
c	pente de la régression linéaire	[m/s]
d_i	données dans la tranche i	
M	nombre de variables environnementales réputées avoir une influence significative sur l'exactitude du dispositif de télédétection selon l'essai de classification	
m	pente de la régression linéaire	
m_j	pente qui décrit la sensibilité du mesurage de la vitesse du vent du dispositif de télédétection sur la variable environnementale j obtenue de la combinaison de résultats de 3 essais de classification au moins	
$m_{\max}$	pente maximale	
$m_{\min}$	pente minimale par mois	
m_n	pente du n ème essai	
N	nombre total de points de données dans l'ensemble de données	
N_{CT}	nombre d'essais de classification	
n_b	nombre de tranches selon les plages de variables données dans le Tableau 3	
ni	nombre de points de données dans la tranche i	
REWS	rotor equivalent wind speed (vitesse du vent équivalente du rotor)	
RSD	remote sensing device (dispositif de télédétection)	
r^2	coefficient de détermination en régression linéaire	
SMC	specific measurement campaign (campagne de mesure spécifique)	
std	écart-type	
$u_{\text{added_systematic},j,i}$	incertitude-type ajoutée de catégorie B à la hauteur de mesure j (non couverte par le mât météorologique)	
$u_{\text{added_systematic},1,i}$	incertitude ajoutée de catégorie B à la hauteur de la tête du mât météorologique	
$u_{\text{systematic},j,i}$	autres incertitudes cumulées de catégorie B du dispositif de télédétection à la hauteur j	
$u_{\text{systematic},1,i}$	autres incertitudes cumulées de catégorie B du dispositif de télédétection à la hauteur de la tête du mât météorologique.	
$u_{\text{ver},i}$	incertitude-type de l'essai d'étalonnage dans la tranche i conformément à 8.3	[m/s]
$u_{VR,i}$	composantes d'incertitude combinées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative aux mesurages de la vitesse du vent d'un RSD.	
$u_{VR,class,i}$	incertitude relative à la classification du RSD	
$u_{VR,flow,i}$	incertitude relative à la variation d'écoulement sur le volume de mesure du RSD	
$u_{VR,isc,i}$	incertitude relative à l'essai in situ	
$u_{VR,mnt,i}$	incertitude relative au montage du RSD	
$u_{VR,mon,i}$	incertitude relative à la surveillance du RSD	
$u_{VR,ver,i}$	incertitude relative à l'essai de vérification	

Symbole	Description	Unité
$u_{VRcls,mh,i}$	incertitude due aux caractéristiques de fonctionnement du RSD à la hauteur du mât de contrôle dans la tranche i	
$u_{VRvrf,mh,i}$	incertitude de la vérification du RSD à la hauteur du mât de contrôle dans la tranche i	
$V_{ref,i}$	valeur moyenne de la vitesse du vent de référence dans la tranche i	m/s
V_{cup}	vitesse du vent à coupelle	
v_{RSD}	vitesse du vent mesurée à l'aide d'un dispositif de télédétection	m/s
$v_{reference}$	vitesse du vent mesurée à l'aide d'un capteur de référence	m/s
$v_{reference}$	vitesse du vent mesurée par le capteur de vitesse du vent de référence	m/s
$v_{RSD,mh,i}$	vitesse du vent du RSD à la hauteur du mât de contrôle dans la tranche i	
$v_{MM,i}$	vitesse du vent du mât de contrôle dans la tranche i	
$\bar{V}_{RSD,i}$	moyenne de tranche du RSD lors de l'essai d'étalonnage dans la tranche i	m/s
$\bar{V}_{Ref,i}$	moyenne de tranche du mesurage de référence lors de l'essai d'étalonnage dans la tranche i	m/s
x_{centre}	centre de la plage couverte par x_{SMC} et par l'essai de vérification $x_{verification_test}$	
$x_{max,j,i}$	limite supérieure de la plage attendue pour la variable environnementale non mesurée j dans la tranche de vitesse du vent i	
$x_{min,j,i}$	limite inférieure de la plage attendue pour la variable environnementale non mesurée j dans la tranche de vitesse du vent i	
x_{range}	plage maximale de la variable environnementale x entre la SMC et l'essai de vérification (c'est-à-dire le maximum des plages de x_{SMC} et $x_{verification_test}$)	
x_{SMC}	variable environnementale prise en considération dans la classification RSD et mesurée pendant la SMC	
$x_{verification_test}$	variable environnementale prise en considération dans la classification RSD et mesurée pendant la SMC	
$x_{SMC,j,i}$	valeur moyenne de la variable environnementale j dans la tranche de vitesse du vent i présente lors de la campagne de mesure spécifique	
$\bar{x}_{ver,j,i}$	valeur moyenne de la variable environnementale j dans la tranche de vitesse du vent i présente lors de l'essai d'étalonnage sur le dispositif de télédétection	
α_1	angle d'écoulement ascendant vers le volume de sonde	
α_2	angle d'écoulement ascendant depuis le volume de sonde	
Φ	angle d'ouverture du RSD par rapport à la verticale	
$\sigma(d_i)$	écart-type des écarts de vitesse du vent en pourcentage des données pendant 10 min dans la tranche i	

5 Généralités

Le présent document définit les méthodes et les exigences relatives à la réalisation de mesurages du vent à l'aide de dispositifs de télédétection montés au sol (sodars et lidars). 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). Il convient de se référer à la norme spécifique relative au cas d'utilisation prévu des mesurages de la vitesse 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 des mesurages de la performance de puissance). Pour les mesurages du vent effectués à l'aide d'anémomètres à coupelles ou à ultrasons montés sur un mât météorologique ou une nacelle de l'éolienne, se référer à l'IEC 61400 50-1. Les interfaces de la présente norme avec d'autres normes sont résumées dans le Tableau 1 et le Tableau 2.

Tableau 1 – Interfaces d'autres normes avec l'IEC 61400-50-2

Description de l'interface	Référence à une autre norme	Référence à l'IEC 61400-50-2	Brève description de l'utilisation	Format
Montage des capteurs sur des mâts météorologiques	IEC 61400-50-1	Paragraphe 6.1	Montage de capteurs de référence sur des mâts météorologiques pour l'étalonnage et la classification du RSD	
Évaluation des obstacles et du terrain	IEC 61400-12-5	Paragraphe 6.2	Filtrage de l'ensemble des données	De [deg] à [deg]
Instruments montés latéralement sur des mâts météorologiques	IEC 61400-50-1:2022, paragraphe 10.4	Paragraphe 6.2	Évaluation de l'influence du sillage du mât météorologique sur le mesurage du RSD	
Évaluation des secteurs exempts de sillage du mât météorologique	IEC 61400-50-1:2022, paragraphe 9.3	Paragraphe 6.2		
Incertitude des instruments montés latéralement sur des mâts météorologiques	IEC 61400-50-1:2022, Article 11	Paragraphe 6.2	Estimation de l'incertitude supplémentaire due à la correction de l'effet du mât météorologique sur le capteur de référence dans l'étalonnage et la classification du RSD	
Classification des capteurs de vent montés sur mât	IEC 61400-50-1:2022, Article 6	Paragraphe 6.3		
Montage des capteurs sur des mâts météorologiques	IEC 61400-50-1	Paragraphe 7	Montage de capteurs de référence sur des mâts météorologiques pour l'étalonnage et la classification du RSD	
Étalonnage postérieur ou étalonnage in situ des capteurs de vent	IEC 61400-50-1:2022, paragraphe 11.3. 2	Article 7 Paragraphe 9.4	Application de l'étalonnage postérieur ou de l'étalonnage in situ du RSD	
Étalonnage des capteurs montés sur mât	IEC 61400-50-1:2022, Article 11	Paragraphe 8.1	Estimation de l'incertitude des capteurs de référence dans l'étalonnage du RSD	

Tableau 2 – Interfaces de l'IEC 61400-50-2 avec d'autres normes

Description de l'interface	Référence à l'IEC 61400-50-2	Référence à une autre norme	Brève description de l'utilisation	Format
Définition des hauteurs de mesure du RSD pour un mesurage de la courbe de puissance	Paragraphe 6.1 Paragraphe 9.1 Article 10	IEC 61400-12-1	Définition des hauteurs de mesure du RSD pour la classification, la hauteur du moyeu, la REWS et/ou le mesurage du cisaillement pour un mesurage de la courbe de puissance	Hauteur en [m]

Par rapport aux mesurages issus d'un anémomètre à coupelles monté sur un mât météorologique, les mesurages du dispositif de télédétection (RSD) affichent en général un certain degré de dispersion. Une certaine partie de cette dispersion est due à la sensibilité du RSD aux différentes conditions environnementales (la température et le cisaillement du vent, par exemple). Il incombe à l'essai de classification (Article 6) d'identifier et de quantifier ces sensibilités pour un certain nombre de hauteurs discrètes couvrant la plage de mesure concernée. À l'instar des anémomètres à coupelles, l'hypothèse retenue est la suivante: ces sensibilités dépendent du type, et il est nécessaire de procéder à l'essai de classification pour chaque type de RSD, pour au moins deux instruments de chaque type, et en au moins deux emplacements.

La dispersion restante dans la comparaison des anémomètres à coupelles est considérée comme un bruit aléatoire. Cela provient d'une diversité de sources. Par exemple, la décorrélation des turbulences dans le vent due à la distance entre les emplacements de mesure se traduit par une dispersion. De même, la distance entre les volumes de sonde individuels du capteur de télédétection lui-même peut contribuer à ce type de dispersion. L'hypothèse retenue est la suivante: le bruit aléatoire est spécifique à l'unité et au site, c'est-à-dire qu'il peut varier entre les différentes évaluations du même RSD.

Selon le cas d'utilisation spécifique (par exemple, évaluation des ressources, essai de performance de puissance, etc.), une unité particulière d'un RSD peut exiger un essai de vérification (Article 7) avant d'être déployée pour la campagne de mesure spécifique (SMC). Dans certaines situations, il peut être possible d'effectuer l'essai de vérification pendant la SMC (par exemple, pendant l'essai de performance de puissance). Cet essai consiste à comparer les mesurages du RSD à ceux des anémomètres à coupelles étalonnés montés sur un mât météorologique s'étendant sur une partie significative de la plage de hauteurs observée. Cet essai a pour objet d'assurer la traçabilité par rapport aux normes internationales de ce dispositif particulier, sous la forme d'une incertitude. En règle générale, la SMC effectuée à l'aide du RSD a lieu à un autre endroit et un autre moment et donc avec une distribution des conditions environnementales différentes de celle de l'essai de vérification du RSD. Selon les sensibilités identifiées lors de l'essai de classification, les différentes conditions environnementales modifient les performances du RSD, augmentant l'incertitude par rapport à celle déterminée dans l'essai de vérification. Les expressions d'incertitude du RSD sont présentées à l'Article 8.

L'Article 9 décrit comment les mesurages de l'anémomètre à coupelles provenant d'un mât météorologique court peuvent être utilisés pour surveiller les performances du RSD. En assurant au moins une hauteur de mesurage commune, la cohérence de l'incertitude obtenue dans le cadre de l'essai de classification et de l'essai de vérification avec les performances du RSD lors de la SMC peut être évaluée. En cas d'incohérence, les incertitudes correspondantes utilisées dans la SMC sont augmentées. Cela assure un "filet de sécurité" utile pour la méthodologie et un mécanisme de retour d'informations dont il convient qu'il favorise l'obtention d'évaluations d'incertitude réalistes.

Les exigences de rapport pour l'ensemble de la méthodologie sont données à l'Article 11.

6 Classification des RSD

6.1 Généralités

L'exactitude du RSD peut être influencée par des variables météorologiques. Les conditions météorologiques au cours de la SMC pouvant être différentes de celles qui prédominent pendant l'essai de vérification de performance du RSD, ces influences sont liées à une incertitude supplémentaire. Il est donc nécessaire de déterminer dans quelle mesure les performances du RSD sont sensibles aux variables météorologiques. Les résultats de ces essais doivent identifier les variables ayant un impact sur les performances du RSD et déterminer la classification de l'instrument.

La plus simple de ces évaluations implique de prendre en considération la différence entre le mesurage du RSD et le mesurage de référence en fonction d'une variable météorologique à la

fois. Une classe d'exactitude du RSD doit être évaluée pour certaines plages de différentes variables environnementales s'apparentant à la classification des anémomètres à coupelles conformément à l'IEC 61400-50-1, en s'appuyant sur l'analyse empirique des sensibilités observées lors des essais de classification. Il convient de veiller à assurer l'interdépendance possible des variables environnementales (cisaillement du vent et intensité des turbulences, par exemple) de manière à ne pas compter deux fois les sensibilités par inadvertance. Les incertitudes dues à la classification du RSD peuvent alors être évaluées.

Une classe d'exactitude spécifique au cas peut également être évaluée selon les sensibilités du système de télédétection et la variation des variables environnementales observées lors de la vérification des performances du RSD et de la SMC. Il convient d'établir clairement si un résultat de classification a été déduit de manière générique sur plusieurs unités ou s'il repose sur une évaluation spécifique au cas.

6.2 Acquisition de données

L'essai de classification repose sur des mesurages concurrents obtenus par le RSD et un mât météorologique de référence élevé auquel il est comparé. Les mesurages doivent être colocalisés, de manière à caractériser l'écoulement dans le même volume d'air. Les degrés de concurrence et de colocation qui doivent s'appliquer aux mesurages sont ceux permettant de déterminer la relation la plus précise et la mieux comprise entre eux. En particulier, ce qui suit s'applique:

- a) Les mêmes intervalles de moyennage doivent être utilisés pour le RSD et le capteur de référence faisant l'objet de la comparaison: des moyennes de 10 min doivent être enregistrées. Outre les moyennes de 10 min, les écarts-types et les valeurs extrêmes des variables mesurées dans les périodes de 10 min doivent être enregistrés.
- b) Le nombre d'échantillons acquis par chaque instrument lors de chaque intervalle de moyennage afin d'obtenir une moyenne doit être enregistré;
- c) Il faut noter si les échantillons individuels acquis dans l'intervalle de moyennage par le RSD sont des valeurs cumulées, représentant, par exemple, un spectre intégré entre le début de l'intervalle de moyennage et le moment d'acquisition de l'échantillon. Cela a un impact sur les statistiques, qui exigent que les échantillons successifs soient indépendants, comme l'écart-type utilisé, par exemple, pour les évaluations des turbulences.
- d) Le dispositif doit être installé sur site, et une analyse des mesurages est réalisée de manière à réduire le plus possible les influences extérieures sur la relation entre le RSD et les mesurages du capteur de référence. Ces influences peuvent inclure, entre autres: les écoulements, les échos fixes et les variations réelles de l'écoulement entre le volume de mesure du RSD et le point de mesure de l'instrument de référence. La distance entre le mât météorologique et le RSD doit être un compromis permettant une bonne corrélation entre les mesurages du mât météorologique et du RSD, tout en empêchant ou limitant l'influence du mât météorologique sur le RSD.
- e) Les capteurs de référence montés sur mât météorologique doivent satisfaire aux exigences de l'IEC 61400-50-1. Cela concerne particulièrement l'étalonnage, la classification et le montage.
- f) Il convient que le mât météorologique présente de préférence une section transversale et une solidité constantes sur toute sa hauteur. De cette manière, l'influence du mât météorologique sur les anémomètres montés sur la flèche reste constante et permet une comparaison plus exacte du cisaillement du vent mesuré entre le mât météorologique et le RSD.

Le RSD et les capteurs de référence doivent être synchronisés dans les limites de 1 % de l'intervalle de moyennage, et ce degré de synchronisation doit être vérifié et soumis à l'essai au moins une fois par semaine pour connaître la dérive. Si la comparaison des datations indique qu'une dérive s'est produite, l'horloge du RSD doit être réinitialisée pour être synchronisée avec celle du capteur de référence, les datations des données de télédétection étant ajustés de manière à compenser la dérive sur la période sur laquelle elle a été mise en évidence par interpolation linéaire.

Les données doivent être acquises tant que les exigences de couverture de données ci-dessous ne sont pas satisfaites.

- 1) Les mesurages de la vitesse du vent du capteur de référence doivent être répartis en tranches 0,5 m/s centrées sur des multiples entiers de 0,5 m/s.
- 2) Les données doivent être filtrées selon les recommandations du fabricant du dispositif et les exigences en 6.3. Les exigences suivantes doivent être satisfaites après le filtrage:
 - a) Les exigences d'acquisition de données d'un essai de classification ne doivent pas être considérées comme satisfaites tant qu'au moins 3 paires de mesurages concurrentes, colocalisées et filtrées valides n'ont pas été enregistrées dans chaque tranche de vitesse du vent centrée entre 4 m/s et 16 m/s (valeurs extrêmes incluses);
 - b) La quantité de données acquises doit couvrir au moins 180 h;
 - c) La campagne d'acquisition de données doit durer au moins 3 mois et couvrir une variété suffisante de conditions environnementales (de l'hiver à l'été, par exemple). La base de données doit couvrir au moins 25 % des tranches, comme cela est décrit dans le Tableau 5, avec un nombre minimal de points de données, comme cela est défini dans l'Équation (3), pour toutes les variables réputées avoir un impact sur l'exactitude du RSD.

Pour d'autres exigences de classification RSD spécifiques à un cas d'utilisation, se référer aux normes de cas d'utilisation telles que l'IEC 61400-12-1.

6.3 Préparation des données

Les filtres de données suivants doivent être appliqués.

- a) Le mât météorologique de référence ne doit être soumis à aucun sillage de la part des éoliennes et des obstacles définis dans l'IEC 61400-12-5.
- b) Les volumes de sonde dans lesquels le RSD acquiert un mesurage de vitesse radiale ne doivent être soumis à aucun sillage et à aucune perturbation de l'écoulement dû aux éoliennes et aux obstacles décrits dans l'IEC 61400-12-5. L'influence du sillage du mât météorologique de référence sur les mesurages du RSD doit être examinée en traçant le rapport des mesurages du RSD et du capteur de référence selon la direction du vent. Les critères relatifs aux valeurs admissibles de ce rapport peuvent être élaborés en référence aux considérations correspondantes de l'anémométrie à coupelles présentées dans l'IEC 61400-50-1. Les mesurages du RSD doivent être exclus s'ils sont influencés soit par le mât météorologique, soit par les haubans.
- c) Les anémomètres à coupelles de référence ne doivent pas être soumis à l'influence des sillages du mât météorologique, de ses haubans ou du paratonnerre, définie dans l'IEC 61400-50-1.
- d) Les anémomètres à coupelles de référence ne doivent pas être influencés par le givrage. Cela peut être obtenu par toute méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats.
- e) Les mesurages enregistrés pour chaque intervalle de moyennage tant par le RSD que par les capteurs de référence doivent représenter une seule période contigüe de fonctionnement, de durée égale à l'intervalle de moyennage. Toutefois, comme cela est indiqué en 6.4, les exigences en matière de disponibilité des données peuvent être assouplies. Il convient de vérifier l'influence que l'assouplissement des exigences peut avoir sur l'exactitude de mesure par une analyse de sensibilité. Si le RSD n'enregistre pas la proportion de la période dans l'intervalle de moyennage de 10 min au cours de laquelle il a été disponible, un facteur de qualité générale doit être enregistré pour indiquer la fiabilité du mesurage d'une manière semblable à la disponibilité du dispositif. Ensuite, les données peuvent être filtrées ou une analyse de sensibilité peut être réalisée en faisant référence au facteur de qualité. Des recommandations doivent être fournies par le fabricant eu égard au traitement approprié du facteur de qualité.
- f) En règle générale, il convient de ne procéder à aucun filtrage de précipitations. Il convient de traiter les précipitations comme une variable environnementale dans l'essai de classification. Si les lignes directrices d'un fabricant de RSD prévoient un filtrage en fonction

des précipitations, il convient de les suivre. Si le filtrage est réalisé en fonction des précipitations, il convient de considérer les données filtrées comme un ensemble de données particulier, et de procéder en conséquence à la classification, à l'étalonnage et à l'application du RSD.

Les mesurages des capteurs de référence montés sur la flèche peuvent être corrigés pour tenir compte des effets du mât météorologique (effets d'obstruction et effets d'accélération de l'écoulement). Ces corrections des effets du mât météorologique induisent une incertitude supplémentaire par rapport aux capteurs de référence montés en tête de mât. La correction peut être obtenue par toute méthode jugée adaptée pour la réduction de l'incertitude totale, conformément à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats. L'IEC 61400-50-1 fournit un exemple de méthode pour la correction de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât. L'incertitude associée à l'utilisation d'anémomètres montés sur la flèche est présentée dans l'IEC 61400-50-1.

Tous les critères de filtrage utilisés et leurs effets respectifs sur l'ensemble de données doivent être enregistrés et consignés dans un rapport.

6.4 Principes et exigences d'un essai de sensibilité

L'écart observé entre les mesurages du RSD et des capteurs de référence doit être analysé en matière de sensibilité aux différentes variables environnementales. L'évaluation de la classe d'exactitude du RSD en matière de mesurage absolu de la composante horizontale de la vitesse du vent est l'exigence minimale. La classe d'exactitude du RSD peut être déduite d'autres paramètres (par exemple, l'intensité de la turbulence ou la direction du vent) selon l'acquisition des paramètres d'écoulement du vent qu'implique la SMC.

Seule l'évaluation d'une classe d'exactitude en matière de vitesse horizontale du vent est traitée ici.

La sensibilité initiale à soumettre à l'essai doit se rapporter à l'assouplissement des critères décrits en 6.3. La sensibilité de l'écart entre les capteurs de référence et le RSD relative à la disponibilité de ce dernier dans les limites de l'intervalle de moyennage ou du facteur de qualité correspondant des mesurages (défini par le fabricant) doit être examinée. Les données de télédétection doivent être considérées comme acceptables si elles se caractérisent par un niveau de disponibilité ou un facteur de qualité dont il a été démontré qu'il n'a aucun impact significatif sur l'écart entre les mesurages des capteurs de référence et ceux du RSD.

L'écart en pourcentage entre les moyennes de 10 min du paramètre de sortie à l'étude acquis par le RSD et les capteurs de référence à un niveau de hauteur est considéré comme une variable dépendante, qui est analysée comme dépendant d'une variable environnementale dans le cadre d'un essai de classification:

$$\frac{(v_{\text{RSD}} - v_{\text{reference}})}{v_{\text{reference}}} \times 100 \% \quad (2)$$

Toutes les variables environnementales sont considérées comme pouvant relever du domaine d'application de l'analyse de sensibilité. Une liste non exhaustive de variables à prendre en considération peut être: l'exposant de cisaillement du vent, l'intensité des turbulences, la pluie, la direction du vent, la température de l'air, la masse volumique de l'air, le différentiel de température à deux hauteurs différentes, l'angle d'écoulement ascendant, la déviation de la trajectoire du vent et la couverture nuageuse. Certains paramètres pertinents peuvent être spécifiques à l'instrument (la disponibilité des données ou le facteur de qualité, par exemple) et peuvent être spécifiés par le fabricant.

La sensibilité d'un paramètre environnemental peut être l'artefact d'une erreur aisément corrigée dans la configuration du RSD. Par exemple, une sensibilité marquée au cisaillement du vent peut apparaître en cas d'erreur systématique dans les hauteurs associées aux mesurages de la vitesse du vent du RSD. Si une forte sensibilité est observée avec un RSD ou en cas de variation significative de la sensibilité entre les essais, il convient de contrôler le

dispositif pour ce type d'erreur. Si des erreurs sont détectées et corrigées, il convient de répéter les essais de sensibilité.

Si l'anémomètre à coupelles de référence présente une sensibilité connue à une variable environnementale, il convient de tenter de supprimer l'influence de cette sensibilité de l'essai de sensibilité. Cela peut être obtenu par toute méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats. Par exemple, la Figure 1 représente les effets de l'angle d'écoulement ascendant sur la vitesse du vent mesurée par un anémomètre à coupelles usuel de classe 1,7A, déterminés après des essais en soufflerie normalisés de l'industrie.

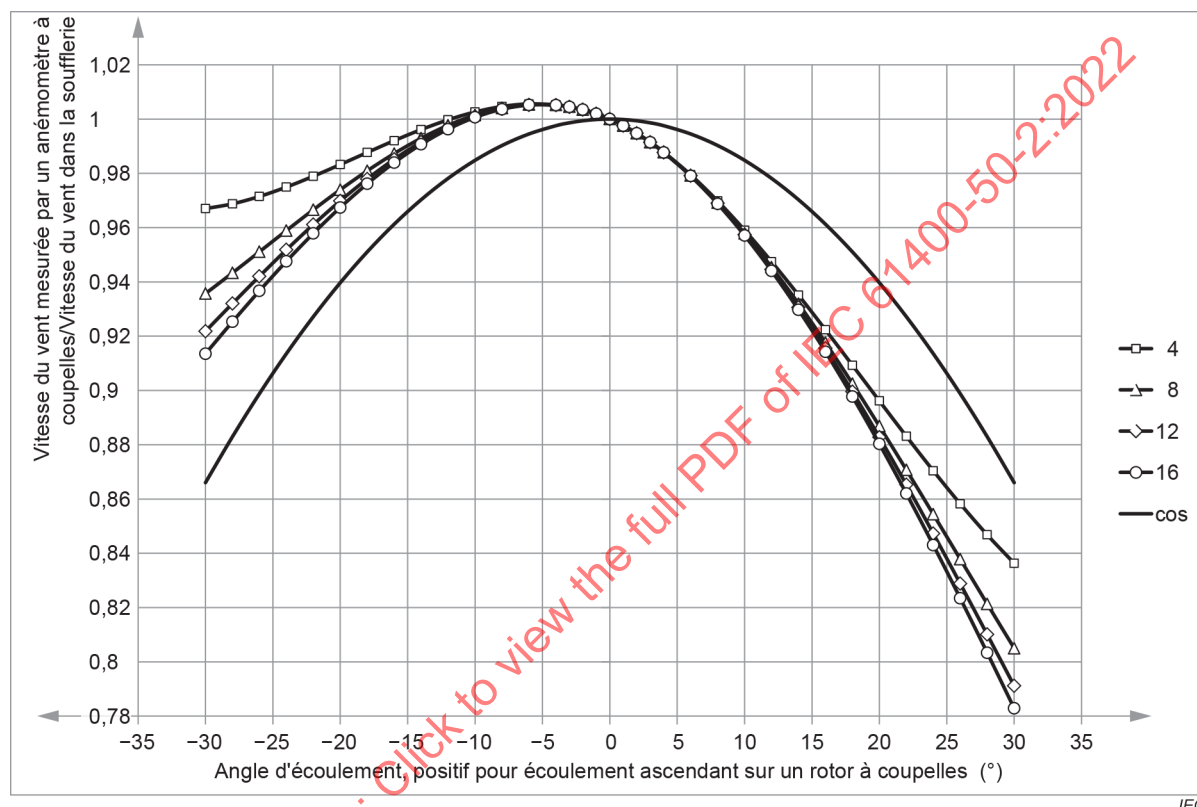


Figure 1 – Réponse de l'angle d'inclinaison d'un anémomètre $V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$ à coupelles en fonction de l'angle d'écoulement α comparée à la réponse du cosinus (IEC 61400-50-1)

La Figure 2 a) indique la réponse d'un RSD à l'angle d'écoulement ascendant déterminé selon les données issues d'un anémomètre à coupelles du type représenté par la Figure 1. À la Figure 2 b), un modèle linéaire a été adapté aux données de la Figure 1 dans la région entre $\pm 3^{\circ}$ et utilisé pour ajuster les points de données afin de supprimer les effets de la réponse de l'anémomètre à coupelles. La Figure 2 démontre que la sensibilité enregistrée du RSD de la Figure 2 a) est dans ce cas au moins partiellement imputable à l'anémomètre à coupelles de référence.

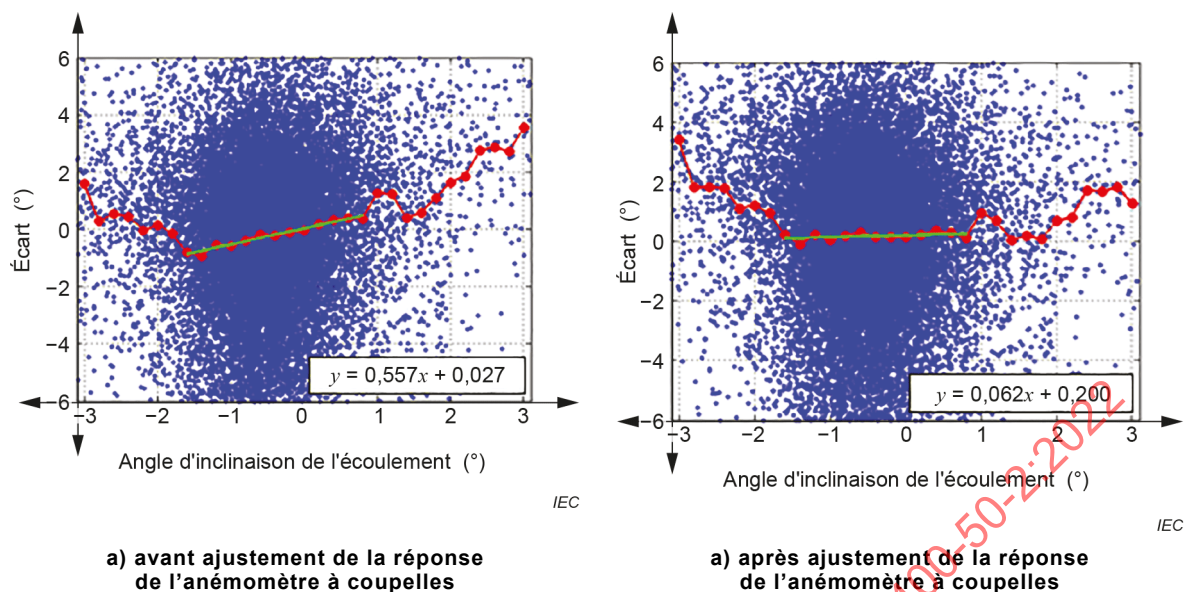


Figure 2 – Écart par rapport à l'angle d'écoulement ascendant déterminé pour un RSD selon l'anémomètre à coupelles de la Figure 1

Les variables environnementales doivent être analysées pour identifier les interdépendances. Dans ce cas, des analyses plus approfondies doivent être réalisées pour identifier laquelle des variables environnementales a un impact sur l'écart de mesure. Cela peut être obtenu par toute méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats. Il convient que la documentation comporte suffisamment d'informations détaillées pour la réplication des résultats à partir des données acquises lors de l'essai de classification. Les méthodologies suggérées pour y parvenir sont décrites en 6.6. Seules les variables environnementales s'étant révélées avoir un impact direct sur l'écart de mesure doivent être incluses dans l'analyse de sensibilité. Ces variables sont alors considérées comme indépendantes.

Si des variables environnementales réputées avoir un impact direct sur l'écart de mesure sont ignorées dans l'essai de sensibilité, cela est susceptible de donner lieu à une incertitude supplémentaire au stade de l'application, comme cela est défini à l'Article 9. Si une surveillance ultérieure du RSD avec un mât météorologique d'anémomètre court réalisée lors de la SMC démontre que les résultats de l'essai de sensibilité sont excessivement prudents, une révision des variables environnementales incluses dans l'essai de sensibilité est admise.

Une analyse de régression linéaire par la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS – ordinary least squares) à une dimension et deux paramètres doit être réalisée pour chaque paire de variables dépendantes et indépendantes. Les paramètres suivants sont calculés à partir de l'analyse de régression:

- la pente: m ;
- le décalage: c ;
- le coefficient de détermination qui, dans le cas de la régression linéaire par la méthode des moindres carrés, est le coefficient de corrélation: r^2 ;
- l'écart-type de la variable indépendante: std ;
- la valeur moyenne de la variable indépendante: avg .

La pente m et le décalage c doivent être estimés sur des données moyennées par tranche pour la variable environnementale mesurée (voir l'exemple donné à la Figure 3), la taille de la tranche à utiliser étant donnée dans le Tableau 3.

Tableau 3 – Exemple de largeur de tranche pour une liste de variables environnementales

Variable indépendante	Largeur de tranche	Unité
Exposant de cisaillement du vent	0,05	Sans dimension
Intensité des turbulences	0,01	Sans dimension
Pluie	0,1	Mm
Disponibilité du dispositif de télédétection	1	%
Direction du vent	5	°
Température de l'air	2	°C
Masse volumique de l'air	0,05	kg m ⁻³
Gradient de température	0,002	K/m
Angle d'écoulement ascendant	0,2	°
Gradient de déviation de la trajectoire du vent	0,04	°/m

S'agissant des variables à inclure dans l'analyse de sensibilité et qui ne figurent pas dans le Tableau 3, il convient de choisir des largeurs de tranches adaptées en fonction de la plage et de la répartition des données.

S'agissant d'une variable environnementale particulière, il convient d'inclure les tranches dans l'essai de sensibilité uniquement lorsqu'elles satisfont aux critères figurant dans les Équations (3) et (4):

$$n_i > \frac{N}{2n_b} \quad (3)$$

où

n_b est le nombre de tranches en fonction des plages de variables données dans le Tableau 5;

N est le nombre total de points de données;

n_i est le nombre de points de données dans la tranche i .

L'Équation (4) doit être appliquée seulement lorsque les sensibilités sur le mesurage de la vitesse du vent sont analysées:

$$\frac{\sigma(d_i)}{\sqrt{n_i}} \frac{v_{\text{ref},i}}{100} < 0,03 \text{ m/s} \quad (4)$$

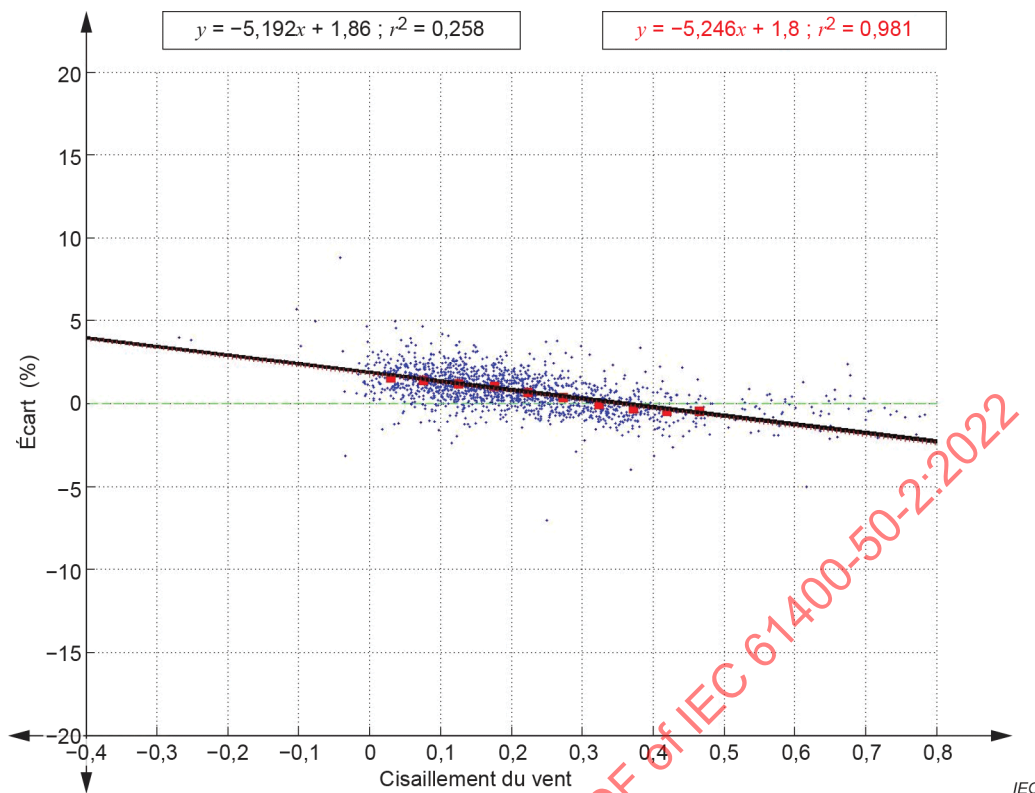
où

d_i sont les données dans la tranche i ;

$\sigma(d_i)$ est l'écart-type des écarts de vitesse du vent en pourcentage des données pendant 10 min dans la tranche i ;

$V_{\text{ref},i}$ est la valeur moyenne de la vitesse du vent de référence dans la tranche i .

Le coefficient de corrélation (r^2), l'écart-type des variables indépendantes (std) et la valeur moyenne des variables indépendantes (avg) doivent être estimés à l'aide des données sur 10 min dans les tranches incluses dans l'essai de sensibilité.



Les régressions linéaires sont tracées pour les données sur 10 min (en noir) et pour les données moyennées par tranche (en rouge).

Figure 3 – Exemple d'analyse de sensibilité en fonction du cisaillement du vent

La sensibilité se définit comme la pente multipliée par l'écart-type de la variable indépendante: $m \times \text{std}$. La sensibilité indique l'étendue, exprimée en pourcentage, de la variation de l'écart entre les mesurages du RSD et du capteur de référence par suite d'une variation de la variable indépendante d'un écart-type.

Tableau 4 – Paramètres déduits d'une analyse de sensibilité d'un RSD

Hauteur par rapport au niveau du sol	Variable indépendante	avg Variable indépendante	std Variable indépendante	m	Sensibilité $m \times \text{std}$	r^2	$m \times \text{std} \times r$
[m]	[-]	[unité variable]	[unité variable]	[%/unité variable]	[%]	[-]	[%]
135	Exposant de cisaillement du vent	0,21	0,19	-2,324	-0,45	0,235	-0,218
104		0,21	0,2	-1,918	-0,38	0,085	-0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Intensité des turbulences	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Pluie (oui = 1, non = 0)	0,02	0,13	0,205	0,03	0,001	0,001
104		0,04	0,19	1,168	0,22	0,028	0,037
72		0,03	0,18	0,499	0,09	0,007	0,008
135	Direction du vent	247,28	31,62	-0,007	-0,22	0,059	-0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Température de l'air à 131 m	14,66	2,7	0,044	0,12	0,016	0,015
104		14,56	2,66	-0,042	-0,11	0,008	-0,010
72		15,16	3,43	-0,091	-0,31	0,083	-0,089
135	Masse volumique de l'air	1,23	0,01	-16,43	-0,24	0,065	-0,061
104		1,23	0,01	1,804	0,03	0	0,000
72		1,22	0,02	5,208	0,08	0,005	0,006
135	Différentiel de température entre 133 m et 10 m	-0,69	1,36	-0,112	-0,15	0,027	-0,025
104		-0,69	1,36	-0,444	-0,6	0,217	-0,279
72		-0,64	1,53	-0,281	-0,43	0,158	-0,171
135	Angle d'écoulement ascendant	0,35	1,37	-0,085	-0,12	0,015	-0,015
72		-0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	15,36	10,01	-0,036	-0,36	0,145	-0,137
104		15,26	10,05	-0,07	-0,71	0,298	-0,388
72		15	9,26	-0,036	-0,33	0,092	-0,100

Le Tableau 4 donne un exemple d'analyse de sensibilité d'un RSD réalisée selon divers paramètres environnementaux. La sensibilité du dispositif a été analysée à trois hauteurs différentes. Seules les données de télé-détection dont la disponibilité est comprise dans l'intervalle de moyennage d'au moins 80 % ont été prises en considération pour l'essai. Comme le démontre le Tableau 4, et conformément aux critères de signification définis en 6.5, le cisaillement du vent, l'intensité des turbulences, la direction du vent, le différentiel de température de l'air (comme simple indicateur de stratification), l'angle d'écoulement ascendant et la déviation de la trajectoire du vent s'avèrent avoir un impact significatif sur l'écart entre les mesurages de la vitesse du vent réalisés par le RSD et ceux de l'anémomètre à coupelles de référence. Les autres variables indépendantes s'avèrent ne pas être importantes. Toutefois, certaines variables qui semblent avoir un impact sur les performances du RSD peuvent n'avoir aucune influence. Si leur variation est corrélée avec la variation de certaines autres variables qui ont également une influence, cette corrélation peut être la raison de leur apparente influence. L'interdépendance entre les variables doit être analysée de manière à identifier les variables

qui exercent une véritable influence, comme cela est examiné en 6.6, avant d'estimer la classe d'exactitude finale du RSD. Par exemple, des techniques de régression multidimensionnelles peuvent être utilisées pour y parvenir.

La classification s'apparente à la classification existante des anémomètres à coupelles et à ultrasons conformément à l'IEC 61400-50-1. La classe de RSD peut être évaluée pour les conditions prédéfinies ou pour les conditions particulières qui prévalent lors de l'application du RSD.

Des conditions analogues à la classification A des anémomètres à coupelles et à ultrasons conformément à l'IEC 61400-50-1 sont données dans le Tableau 5.

Tableau 5 – Plages des paramètres environnementaux pour l'analyse de la sensibilité

Variable indépendante	Max	Min	Plage	Source
Exposant de cisaillement du vent [-]	0,80	-0,40	1,20	N/A
Intensité des turbulences [-]	0,24	0,03	0,21	Le présent document
Pluie (oui = 1, non = 0) [-]	1	0	1	Définition du capteur
Disponibilité [%]	100	80	20	Définition du filtre
Direction du vent [°]	360	0	180	L'écart maximal entre 2 directions est de 180°.
Température de l'air [°C]	40	0	40	Le présent document
Masse volumique de l'air [kg/m ³]	1,35	0,90	0,45	Le présent document
Gradient de température entre 133 m et 10 m de hauteur [K/m]	0,06	-0,02	0,08	N/A
Angle d'écoulement ascendant [°]	3	-3	6	Le présent document
Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m de hauteur [°/m]	0,2	-0,2	0,4	N/A

La plage de disponibilités du RSD doit être cohérente avec la plage à appliquer lors du déploiement sur le terrain. Sauf si elles ont été déterminées par la configuration des capteurs de référence, les limites du différentiel de température de l'air observées entre les deux hauteurs indiquées doivent être égales à 10 fois le gradient normalisé entre les hauteurs prises en considération (le gradient normalisé est de 0,65 K/100 m), et la déviation de la trajectoire du vent doit être égale à 4 fois l'écart-type de la différence entre les directions moyennes du vent sur 10 min aux hauteurs indiquées.

6.5 Évaluation de l'importance d'une variable environnementale

L'importance d'une variable est évaluée en mesurant son degré d'influence sur le mesurage du RSD. Les essais de sensibilité peuvent indiquer qu'il n'existe aucune relation significative entre la variable dépendante et certaines variables indépendantes. Par conséquent, seules les variables indépendantes pertinentes doivent être prises en considération. La pertinence est déterminée dans les cas suivants:

- a) une sensibilité d'au moins 0,5 est démontrée, ou
- b) un produit du coefficient de corrélation r et de la sensibilité d'au moins 0,1 est déterminé.

L'analyse de sensibilité d'une variable indépendante doit être pertinente pour toutes les hauteurs de mesure si l'une des conditions ci-dessus est satisfaite pour une seule hauteur.

Pour une sensibilité d'au moins 0,5, un impact important de la variable indépendante sur l'exactitude du RSD est directement mesuré lors de l'essai de classification. Le coefficient de corrélation peut modifier ce critère, étant donné qu'il indique l'importance de la relation entre les variables dépendantes et les variables indépendantes. Le coefficient de corrélation et la

sensibilité indiquent la pertinence d'une variable indépendante. Le produit des deux mesurages définit donc la seconde condition alternative du point b) ci-dessus.

Il convient d'exclure de l'analyse de sensibilité les variables environnementales dont la plage mesurée ne couvre pas au moins 25 % des tranches, comme cela est décrit dans le Tableau 5, avec un nombre minimal de points de données défini par l'Équation (3). Les résultats de sensibilité déduits de ces variables ne sont pas représentatifs d'une relation avec l'écart de mesure. Même si une variable peut être éliminée de l'analyse de sensibilité en raison d'une variation insuffisante pour l'établissement fiable d'une relation avec l'écart de mesure, il se peut qu'une plage de variation plus étendue soit observée lors de l'application du dispositif dans le cadre de la SMC. S'il s'avère que la variable en question a un impact sur l'écart de mesure par l'intermédiaire du processus de surveillance lors de la SMC, le dispositif peut être rejeté. À défaut, l'incertitude supplémentaire doit être appliquée aux résultats de manière à refléter correctement cela, conformément à l'Article 8. Il convient d'exclure de l'analyse de sensibilité les variables environnementales dont il a été déterminé qu'elles influent sur l'écart de mesure uniquement par leur corrélation avec d'autres variables environnementales, comme cela est examiné en 6.6.

Un choix de variables indépendantes pertinentes pour un RSD est présenté dans le Tableau 6.

Tableau 6 – Exemple de choix de variables environnementales qui se révèlent avoir un impact significatif

Hauteur par rapport au niveau du sol [m]	Variable indépendante [-]	avg Variable indépendante [unité variable]	std Variable indépendante [unité variable]	m [%/unité variable]	Sensibilité $m \times \text{std}$ [%]	r^2 [-]	$m \times \text{std} \times r$ [%]
135	Exposant de cisaillement du vent	0,21	0,19	-2,324	-0,45	0,235	-0,218
104		0,21	0,2	-1,918	-0,38	0,085	-0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Intensité des turbulences	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Direction du vent	247,28	31,62	-0,007	-0,22	0,059	-0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Différentiel de température entre 133 m et 10 m	-0,69	1,36	-0,112	-0,15	0,027	-0,025
104		-0,69	1,36	-0,444	-0,6	0,217	-0,279
72		-0,64	1,53	-0,281	-0,43	0,158	-0,171
135	Angle d'écoulement ascendant	0,35	1,37	-0,085	-0,12	0,015	-0,015
72		-0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	15,36	10,01	-0,036	-0,36	0,145	-0,137
104		15,26	10,05	-0,07	-0,71	0,298	-0,388
72		15	9,26	-0,036	-0,33	0,092	-0,100

6.6 Évaluation de l'interdépendance entre les variables environnementales

L'analyse de sensibilité de 6.4 repose sur l'hypothèse selon laquelle les variables environnementales à l'étude sont indépendantes, c'est-à-dire non corrélées. Dans la pratique, cela n'est pas toujours le cas. Cela peut amener à enregistrer des entrées dans la classe d'exactitude correspondant à des variables particulières, compte tenu de leur corrélation avec

d'autres variables, plutôt que d'établir une relation directe avec l'écart de mesure. Une représentation des effets de la corrélation entre les variables environnementales peut être consultée à la Figure 4 et à la Figure 5 pour le cisaillement du vent et l'intensité des turbulences. La Figure 4 représente la relation entre le cisaillement du vent et l'intensité des turbulences lors d'un essai de classification. Elle démontre que le cisaillement du vent et l'intensité des turbulences au niveau du site d'essai ne sont pas totalement non corrélés lors de la période de mesure en question. Cela se manifeste à la Figure 5 sous la forme d'un groupement de points de données à l'intérieur du diagramme de dispersion de l'écart de mesure par rapport à l'intensité des turbulences en fonction de l'amplitude du cisaillement du vent. Ce groupement peut fausser la ligne à partir de laquelle est déterminée la sensibilité du dispositif à l'intensité des turbulences. À l'aide de ce mécanisme, une relation dans l'essai de sensibilité peut être transférée d'une variable environnementale directement corrélée à l'écart de mesure vers une autre variable qui ne l'est pas, si les variables environnementales ne sont pas mutuellement indépendantes.

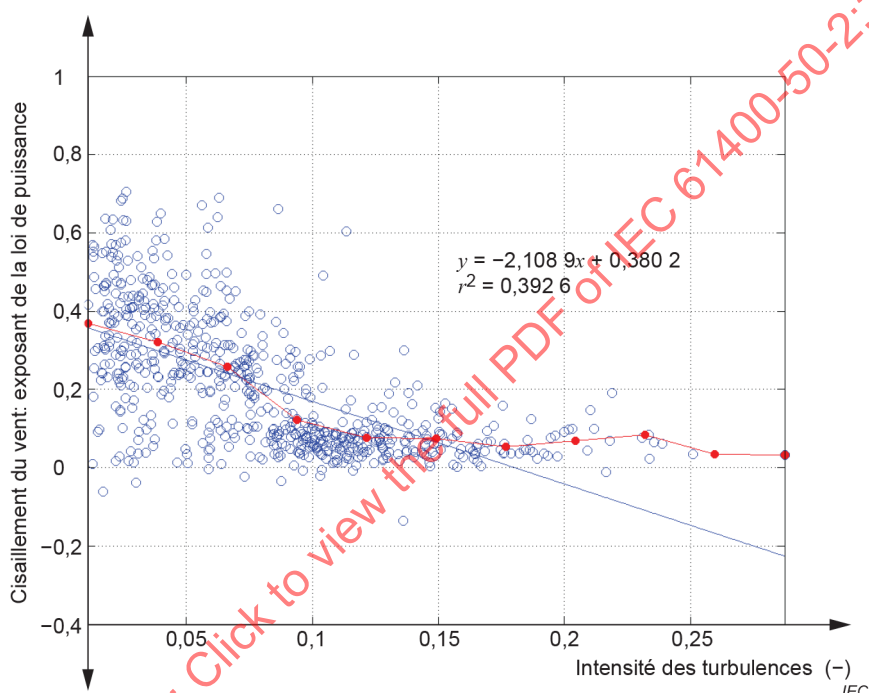
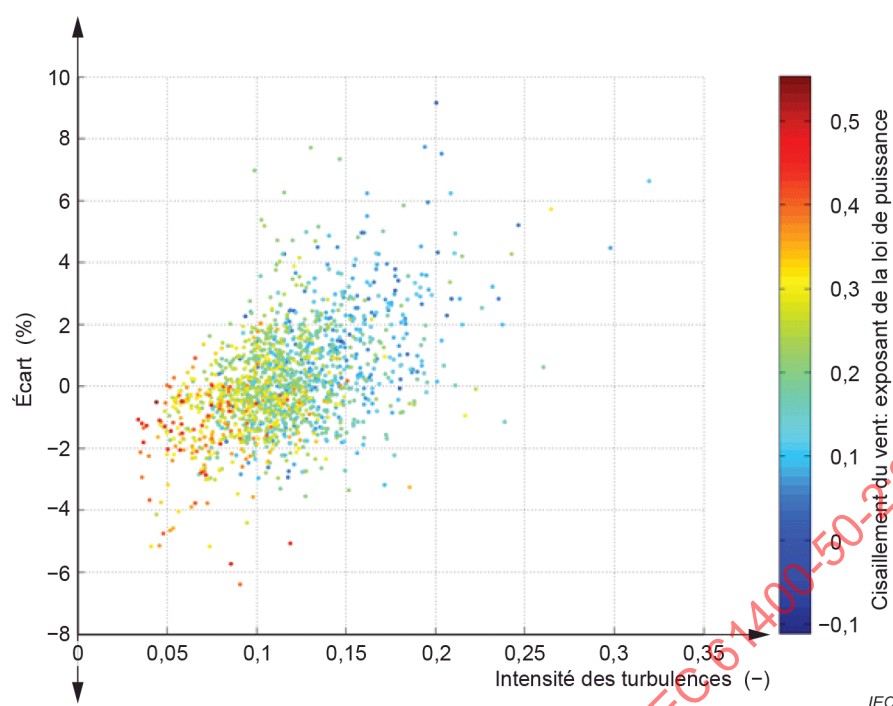


Figure 4 – Exemple de cisaillement du vent par rapport à l'intensité des turbulences



La couleur indique le cisaillement du vent.

Figure 5 – Exemple d'écart en pourcentage des mesurages du RSD et du capteur de référence par rapport à l'intensité de la turbulence

Afin d'atténuer la surestimation de l'incertitude, il est nécessaire d'éliminer de l'analyse de sensibilité toutes les variables environnementales dont il peut être démontré qu'elles n'ont aucun impact direct sur l'écart de mesure. Un exemple est donné à la Figure 5, où il apparaît clairement que l'inclusion de l'intensité des turbulences et du cisaillement du vent dans le calcul de l'estimation d'incertitude, et compte tenu de la relation qu'ils entretiennent, donne lieu à une "double comptabilisation" des contributions d'incertitude. L'élimination des variables environnementales corrélées peut être obtenue par toute méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats, comme cela est indiqué en 6.4. Il convient que la documentation comporte suffisamment d'informations détaillées pour la réplication des résultats à partir des données acquises lors de l'essai de classification.

Les dépendances entre les variables environnementales ont été analysées pour les données utilisées dans le Tableau 6. Les variables qui n'ont aucun impact direct sur l'écart de mesure mais qui sont corrélées à une ou plusieurs variables ayant un impact direct sur l'écart de mesure ont été éliminées de l'essai de sensibilité. Après le retrait des effets du cisaillement du vent de l'ensemble de données, l'influence restante de l'intensité des turbulences n'est plus pertinente. Les autres variables sont présentées dans le Tableau 7. Seuls le cisaillement du vent, l'angle d'écoulement ascendant et la déviation de la trajectoire du vent s'avèrent avoir un impact significatif sur l'écart entre les mesurages de la vitesse du vent réalisés par le RSD et ceux de l'anémomètre à coupelles de référence.

**Tableau 7 – Paramètres de l'analyse de sensibilité restants
après l'analyse de l'interdépendance des variables**

Hauteur par rapport au niveau du sol	Variable indépendante	avg Variable indépendante	std Variable indépendante	m	Sensibilité $m \times \text{std}$	r^2	$m \times \text{std} \times r$
[m]	[-]	[unité variable]	[unité variable]	[%/unité variable]	[-]	[-]	[-]
135	Exposant de cisaillement du vent	0,21	0,19	-2,324	-0,45	0,235	-0,218
104		0,21	0,2	-1,918	-0,38	0,085	-0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Angle d'écoulement ascendant	0,35	1,37	-0,085	-0,12	0,015	-0,015
72		-0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	15,36	10,01	-0,036	-0,36	0,145	-0,137
104		15,26	10,05	-0,07	-0,71	0,298	-0,388
72		15	9,26	-0,036	-0,33	0,092	-0,100

6.7 Calcul de la classe d'exactitude

Le principe général du calcul des classes d'exactitude est le suivant.

- Définir les plages de toutes les variables restantes ayant un impact significatif, comme cela est décrit dans l'exemple donné dans le Tableau 7.
- Calculer l'écart maximal de chaque variable indépendante sur l'exactitude du RSD en multipliant la pente de régression m par la plage de la variable indépendante, comme cela est présenté dans le Tableau 5. Un exemple est donné dans le Tableau 8.
- Calculer l'impact maximal cumulé de toutes les variables indépendantes sur l'exactitude du RSD, en partant du principe que les différentes variables sont totalement indépendantes les unes des autres, de manière à ajouter dans la quadrature les erreurs de mesure maximales engendrées par chaque variable individuelle.

En relation avec le point c), il est reconnu que les variables environnementales à l'étude ne sont pas totalement indépendantes les unes des autres. Toutefois, eu égard aux évaluations d'incertitude, les différences entre les conditions environnementales qui prévalent lors de l'application du RSD dans le cadre de la SMC et de l'essai de vérification de performance du RSD sont des éléments clés. Ces différences dépendent dans une très large mesure du site de la SMC et du site d'essai de vérification de performance du RSD. Cette dépendance de site dissocie les variables les unes des autres quant aux calculs d'incertitude. Par conséquent, pour estimer l'impact maximal cumulé, l'indépendance entre les variables est une hypothèse indispensable, malgré les efforts consentis en 6.6 pour traiter l'interdépendance des variables.

Les classes d'exactitude préliminaires résultant de ce schéma sont données dans le Tableau 9. Elles ont été calculées en ajoutant dans la quadrature les écarts maximaux de toutes les variables environnementales et des variables d'influence importantes uniquement, conformément au Tableau 8 et au Tableau 6. Les valeurs ne sont pas représentatives du résultat final de la classification.

Tableau 8 – Exemple de schéma de calcul de l'impact maximal des variables environnementales

Hauteur par rapport au niveau du sol [m]	Variable indépendante [-]	Variable de plage [unité variable]	m [%/unité variable]	$m \times \text{range}$ [-]
135	Exposant de cisaillement du vent	1,20	-2,324	2,79
104		1,20	-1,918	2,30
72		1,20	0,607	0,73
135	Intensité des turbulences	0,21	8,855	1,86
104		0,21	13,902	2,92
72		0,21	15,812	3,32
135	Pluie (oui=1, non=0)	1,00	0,205	0,21
104		1,00	1,168	1,17
72		1,00	0,499	0,50
135	Disponibilité du RSD	20,00	0,017	0,34
104		20,00	-0,068	1,36
72		20,00	-0,318	6,37
135	Direction du vent	180,00	-0,007	1,28
104		180,00	0,012	2,24
72		180,00	0,003	0,51
135	Température de l'air à 131 m	40,00	0,044	1,76
104		40,00	-0,042	1,69
72		40,00	-0,091	3,65
135	Masse volumique de l'air	0,45	-16,430	7,39
104		0,45	1,804	0,81
72		0,45	5,208	2,34
135	Différentiel de température entre 133 m et 10 m	8,00	-0,112	0,90
104		8,00	-0,444	3,55
72		8,00	-0,281	2,25
135	Angle d'écoulement ascendant	6,00	-0,085	0,51
72		6,00	0,665	3,99
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	40,00	-0,036	1,45
104		40,00	-0,070	2,81
72		40,00	-0,036	1,42

Tableau 9 – Classes d'exactitude préliminaires d'un RSD en prenant en considération toutes les variables ou des variables d'influence les plus importantes seulement

Hauteur	Classes d'exactitude	
	En prenant en considération toutes les variables	En prenant en considération seulement les variables d'influence importantes
[m]	[-]	[-]
135	8,6	3,2
104	7,1	3,6
72	9,7	4,3

Pour calculer la classe d'exactitude finale, la classe d'exactitude préliminaire doit être divisée par $\sqrt{2}$. Les impacts maximaux calculés dans le Tableau 8 sont valides en partant de l'hypothèse que l'essai de vérification de performance du RSD a été réalisé à l'un des extrêmes des plages de toutes les variables environnementales, alors que la SMC est réalisée à l'extrême opposé, ce qui est considéré comme un scénario improbable. Une hypothèse plus probable consiste à considérer que les variables x lors des deux mesurages sont proches du centre de la plage maximale, avec un écart maximal égal à la moitié de la plage:

$$x_{SMC} \in \left[x_{centre} - \frac{x_{range}}{2}; x_{centre} + \frac{x_{range}}{2} \right] \quad (5)$$

$$x_{verification_test} \in \left[x_{centre} - \frac{x_{range}}{2}; x_{centre} + \frac{x_{range}}{2} \right]$$

Si les conditions lors de l'essai de vérification de performance du RSD et de la SMC sont considérées comme indépendantes les unes des autres, les écarts des variables environnementales présentent les plages maximales:

$$d(x_{SMC} - x_{verification_test}) = \sqrt{\left(\frac{x_{range}}{2}\right)^2 + \left(\frac{x_{range}}{2}\right)^2} = \frac{x_{range}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Les classes d'exactitude obtenues concernant l'influence des variables données en exemple dans le Tableau 8 sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10 – Exemple de classes d'exactitude finales d'un RSD

Hauteur	Classe d'exactitude finale
[m]	[-]
135	2,3
104	2,5
72	3,0

6.8 Critères d'acceptation

L'essai de classification doit être réalisé sur au moins deux types spécifiques de RSD et sur au moins deux sites distincts. Cela permet de procéder à une classification spécifique au type, à condition que les résultats de ces essais soient suffisamment convergents. Au moins l'un des dispositifs d'essai doit être soumis à l'essai sur deux sites différents, au moins trois essais étant donc exigés pour obtenir la classification de type.