

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**1400-2**

Première édition  
First edition  
1996-04

---

---

**Aérogénérateurs –**

**Partie 2:  
Sécurité des petits aérogénérateurs**

**Wind turbine generator systems –**

**Part 2:  
Safety of small wind turbines**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 1400-2: 1996

## Numéros des publications

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

## Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

## Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI\*
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Catalogue en ligne)\*
- **Bulletin de la CEI**  
Disponible à la fois au «site web» de la CEI\* et comme périodique imprimé

## Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (IEV).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

\* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

## Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

## Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

## Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site\***
- **Catalogue of IEC publications**  
Published yearly with regular updates (On-line catalogue)\*
- **IEC Bulletin**  
Available both at the IEC web site\* and as a printed periodical

## Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

\* See web site address on title page.

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**1400-2**

Première édition  
First edition  
1996-04

**Aérogénérateurs –**

**Partie 2:  
Sécurité des petits aérogénérateurs**

**Wind turbine generator systems –**

**Part 2:  
Safety of small wind turbines**

© IEC 1996 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission  
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland  
e-mail: [inmail@iec.ch](mailto:inmail@iec.ch) IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

**U**

Pour prix, voir catalogue en vigueur  
For price, see current catalogue

## SOMMAIRE

|                                                                        | Pages |
|------------------------------------------------------------------------|-------|
| AVANT-PROPOS .....                                                     | 6     |
| INTRODUCTION .....                                                     | 8     |
| Articles                                                               |       |
| 1 Généralités .....                                                    | 10    |
| 1.1 Domaine d'application et objet .....                               | 10    |
| 1.2 Références normatives .....                                        | 10    |
| 1.3 Définitions .....                                                  | 12    |
| 1.4 Symboles et unités .....                                           | 16    |
| 1.5 Abréviations .....                                                 | 20    |
| 2 Éléments principaux .....                                            | 20    |
| 2.1 Généralités .....                                                  | 20    |
| 2.2 Assurance qualité .....                                            | 22    |
| 3 Conditions externes .....                                            | 22    |
| 4 Conception de la structure .....                                     | 22    |
| 4.1 Généralités .....                                                  | 22    |
| 4.2 Méthodologie de conception .....                                   | 24    |
| 4.3 Charges .....                                                      | 24    |
| 4.4 Cas de charges .....                                               | 24    |
| 4.5 Calcul de charges simplifié .....                                  | 26    |
| 4.6 Calcul des contraintes .....                                       | 34    |
| 4.7 Facteurs de sécurité et valeurs caractéristiques de matériau ..... | 36    |
| 5 Protection des petits aérogénérateurs (PAG) .....                    | 38    |
| 5.1 Généralités .....                                                  | 38    |
| 5.2 Exigences de fonctionnement du système de protection .....         | 38    |
| 6 Structure de support .....                                           | 40    |
| 6.1 Généralités .....                                                  | 40    |
| 6.2 Tours .....                                                        | 40    |
| 6.3 Fondations et ancrages .....                                       | 40    |
| 6.4 Autres structures de support .....                                 | 40    |
| 7 Système électrique des petits aérogénérateurs .....                  | 40    |
| 7.1 Généralités .....                                                  | 40    |
| 7.2 Compatibilité électromagnétique .....                              | 42    |
| 7.3 Conditions de fonctionnement .....                                 | 42    |
| 7.4 Protection contre les contacts directs et indirects .....          | 42    |
| 7.5 Dispositifs de contact .....                                       | 42    |
| 7.6 Mauvais fonctionnement du système électrique .....                 | 42    |
| 7.7 Conducteurs .....                                                  | 42    |

## CONTENTS

|                                                             | Page |
|-------------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD .....                                              | 7    |
| INTRODUCTION .....                                          | 9    |
| Clause                                                      |      |
| 1 General .....                                             | 11   |
| 1.1 Scope and object .....                                  | 11   |
| 1.2 Normative references .....                              | 11   |
| 1.3 Definitions .....                                       | 13   |
| 1.4 Symbols and units .....                                 | 17   |
| 1.5 Abbreviations .....                                     | 21   |
| 2 Principal elements .....                                  | 21   |
| 2.1 General .....                                           | 21   |
| 2.2 Quality assurance .....                                 | 23   |
| 3 External conditions .....                                 | 23   |
| 4 Structural design .....                                   | 23   |
| 4.1 General .....                                           | 23   |
| 4.2 Design methodology .....                                | 25   |
| 4.3 Loads .....                                             | 25   |
| 4.4 Load cases .....                                        | 25   |
| 4.5 Simplified load calculation .....                       | 27   |
| 4.6 Stress calculation .....                                | 35   |
| 4.7 Safety factors and characteristic material values ..... | 37   |
| 5 SWTGS protection .....                                    | 39   |
| 5.1 General .....                                           | 39   |
| 5.2 Functional requirements of the protection system .....  | 39   |
| 6 Support structure .....                                   | 41   |
| 6.1 General .....                                           | 41   |
| 6.2 Towers .....                                            | 41   |
| 6.3 Foundations and anchors .....                           | 41   |
| 6.4 Other support structures .....                          | 41   |
| 7 Electrical system of the SWTGS .....                      | 41   |
| 7.1 General .....                                           | 41   |
| 7.2 Electromagnetic compatibility .....                     | 43   |
| 7.3 Operating conditions .....                              | 43   |
| 7.4 Protection against direct and indirect contacts .....   | 43   |
| 7.5 Switching devices .....                                 | 43   |
| 7.6 Malfunction of electrical system .....                  | 43   |
| 7.7 Conductors .....                                        | 43   |

| Articles                                                                          | Pages |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 8 Documentation .....                                                             | 44    |
| 9 Essais .....                                                                    | 46    |
| 9.1 Généralités .....                                                             | 46    |
| 9.2 Essais sur composants .....                                                   | 46    |
| 9.3 Essais de fonctionnement .....                                                | 46    |
| 9.4 Essais dynamiques .....                                                       | 48    |
| <br>Tableaux                                                                      |       |
| 1 Cas de charges de calcul pour la méthode simplifiée de calcul des charges ..... | 26    |
| 2 Contraintes équivalentes .....                                                  | 36    |
| 3 Facteurs de sécurité .....                                                      | 38    |
| <br>Figures                                                                       |       |
| 1 Définition des systèmes d'axes pour EAH .....                                   | 20    |
| 2 Coefficients de traînée $C_d$ .....                                             | 34    |
| <br>Annexe                                                                        |       |
| A Bibliographie .....                                                             | 50    |

| Clause                                                               | Page |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| 8 Documentation .....                                                | 45   |
| 9 Testing .....                                                      | 47   |
| 9.1 General .....                                                    | 47   |
| 9.2 Component tests .....                                            | 47   |
| 9.3 Operational tests .....                                          | 47   |
| 9.4 Dynamic tests .....                                              | 49   |
| Tables                                                               |      |
| 1 Design load cases for the simplified load calculation method ..... | 27   |
| 2 Equivalent stresses .....                                          | 37   |
| 3 Safety factors .....                                               | 39   |
| Figures                                                              |      |
| 1 Definition of the system of axes for HAWT .....                    | 21   |
| 2 Drag coefficient $C_d$ .....                                       | 35   |
| Annex                                                                |      |
| A Bibliography .....                                                 | 51   |

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## AÉROGÉNÉRATEURS –

### Partie 2: Sécurité des petits aérogénérateurs

#### AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant des questions techniques, représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales; ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 1400-2 a été établie par le comité d'études 88 de la CEI: Systèmes à turbogénérateurs éoliens.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

| FDIS       | Rapport de vote |
|------------|-----------------|
| 88/53/FDIS | 88/65/RVD       |

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

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## WIND TURBINE GENERATOR SYSTEMS –

## Part 2: Safety of small wind turbines

## FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 1400-2 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind turbine generator systems.

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

| FDIS       | Report on voting |
|------------|------------------|
| 88/53/FDIS | 88/65/RVD        |

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

Annex A is for information only.

## INTRODUCTION

La présente partie de la CEI 1400 expose de façon générale les exigences minimales de sécurité des petits aérogénérateurs et n'est pas conçue pour servir de prescription intégrale de conception ou de manuel d'instruction.

La conformité à cette norme ne dégage pas toute personne, organisme ou société de leur responsabilité de se conformer à toutes les autres règles applicables.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-2:1996  
Withdrawn

## INTRODUCTION

This part of IEC 1400 outlines minimum safety requirements for small wind turbine generator systems, and is not intended for use as a complete design specification or instruction manual.

Compliance with this standard does not relieve any person, organization, or corporation from the responsibility of observing other applicable regulations.

Withdrawing  
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61400-2:1996

## AÉROGÉNÉRATEURS –

### Partie 2: Sécurité des petits aérogénérateurs

#### 1 Généralités

##### 1.1 *Domaine d'application et objet*

La présente partie de la CEI 1400 traite de la philosophie relative à la sécurité, l'assurance de la qualité et l'intégrité de l'ingénierie, et elle spécifie les prescriptions relatives à la sécurité des petits aérogénérateurs (PAG), comprenant leur conception, leur installation et leur maintenance, ainsi que leur exploitation dans des conditions externes spécifiques. Le but de cette norme est de fixer un niveau approprié de protection contre les risques et dommages que ces systèmes pourraient causer pendant leur durée de vie.

Cette norme se préoccupe de tous les sous-systèmes des PAG tels que les mécanismes de contrôle et de protection, les systèmes électriques internes, les systèmes mécaniques, les structures de support, les fondations et l'interconnexion électrique avec la charge.

Cette norme s'applique aux PAG ayant une surface balayée inférieure à 40 m<sup>2</sup> et fonctionnant à une tension en dessous de 1 000 V c.a. ou 1 500 V c.c.

Il convient d'utiliser cette norme avec les normes CEI et ISO appropriées (voir 1.2).

##### 1.2 *Références normatives*

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 1400. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 1400 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 364: *Installations électriques des bâtiments*

CEI 529: 1989, *Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP)*

CEI 1000: *Compatibilité électromagnétique (CEM)*

CEI 1400-1: 1994, *Aérogénérateurs – Partie 1: Spécifications de sécurité*

CEI CISPR 11: 1990, *Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations électromagnétiques des appareils industriels, scientifiques et médicaux (ISM) à fréquence radioélectrique*

ISO 2394: 1986, *Principes généraux de la fiabilité des constructions*  
Additif 1 (1988)

ISO 9001: 1994, *Systèmes qualité – Modèle pour l'assurance de la qualité en conception, développement, production, installation et prestations associées*

ISO 9002: 1994, *Systèmes qualité – Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées*

ISO 9003: 1994, *Systèmes qualité – Modèle pour l'assurance de la qualité en contrôle et essais finals*

## WIND TURBINE GENERATOR SYSTEMS –

### Part 2: Safety of small wind turbines

#### 1 General

##### 1.1 Scope and object

This part of IEC 1400 deals with safety philosophy, quality assurance, engineering integrity and specifies requirements for the safety of small wind turbine generator systems (SWTGS), including design, installation, maintenance and operation under specified external conditions. Its purpose is to provide the appropriate level of protection against damage from hazards from these systems during their planned lifetime.

This standard is concerned with all subsystems of SWTGS such as protection mechanisms, internal electrical systems, mechanical systems, support structures, foundations and the electrical interconnection with the load.

This standard applies to SWTGS with swept area smaller than 40 m<sup>2</sup> and generating at a voltage below 1 000 V a.c. or 1 500 V d.c.

This standard should be used together with the appropriate IEC and ISO standards (see 1.2).

##### 1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 1400. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 1400 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 364: *Electrical installations of buildings*

IEC 529: 1989, *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*

IEC 1000: *Electromagnetic compatibility (EMC)*

IEC 1400-1: 1994, *Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements*

IEC CISPR 11: 1990, *Limits and methods of measurement of electromagnetic disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment*

ISO 2394: 1986, *General principles on reliability for structures*  
Addendum 1 (1988)

ISO 9001: 1994, *Quality systems – Model for quality assurance in design, development, production, installation and servicing*

ISO 9002: 1994, *Quality systems – Model for quality assurance in production, installation and servicing*

ISO 9003: 1994, *Quality systems – Model for quality assurance in final inspection and test*

### 1.3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 1400, les définitions suivantes sont applicables.

**1.3.1 frein (aérogénérateurs):** Mécanisme capable de réduire la vitesse du rotor ou d'arrêter la rotation.

**1.3.2 système de contrôle (aérogénérateurs):** Sous-système qui reçoit des informations afférentes à l'état de la turbine et/ou son environnement et qui régule la turbine afin de la maintenir dans ses paramètres de fonctionnement.

**1.3.3 vitesse de démarrage ( $V_{in}$ ):** Vitesse du vent la plus basse à la hauteur du moyeu à partir de laquelle la turbine éolienne commence à fournir une puissance utile à l'arbre (voir hauteur du moyeu).

**1.3.4 vitesse de coupure ( $V_{out}$ ):** Vitesse maximale du vent à la hauteur du moyeu acceptée par une turbine spécifique pour la fourniture de puissance utilisable (voir hauteur du moyeu).

**1.3.5 limites de conception:** Paramètres maximaux ou minimaux utilisés lors de la conception.

**1.3.6 situation de projet:** Mode possible de fonctionnement du PAG (par exemple production d'énergie, immobilisé, etc.)

**1.3.7 conditions externes (aérogénérateurs):** Facteurs ayant une influence sur le fonctionnement d'une turbine, y compris les régimes de vent, d'autres facteurs climatiques (neige, glace, etc.).

**1.3.8 sûreté intégrée (fail-safe):** Qualité de conception d'un composant prévenant que sa panne présente des conditions dangereuses.

**1.3.9 rafale:** Variation temporaire de la vitesse du vent, caractérisée par sa durée, son amplitude et son temps de front.

**1.3.10 éolienne à axe horizontal (EAH):** Turbine pourvue d'un rotor dont l'axe est parallèle au vent.

**1.3.11 moyeu:** Élément servant à attacher les pales ou assemblages de pales à l'axe du rotor.

**1.3.12 hauteur du moyeu (aérogénérateurs):** Hauteur du centre du rotor par rapport au sol. Pour les éoliennes à axe vertical, la hauteur du moyeu est la hauteur du plan équatorial.

**1.3.13 au ralenti (aérogénérateurs):** Condition d'un aérogénérateur en rotation lente sans production énergétique.

### 1.3 Definitions

For the purpose of this part of IEC 1400, the following definitions apply:

**1.3.1 brake (wind turbines):** Device capable of reducing the rotor speed or stopping rotation.

**1.3.2 control system (wind turbines):** Subsystem that receives information about the condition of the wind turbine and/or its environment, and adjusts the wind turbine in order to maintain it within its operating limits.

**1.3.3 cut-in wind speed ( $V_{in}$ ):** Lowest wind speed at hub height at which the wind turbine starts to produce useable power (see hub height).

**1.3.4 cut-out wind speed ( $V_{out}$ ):** Maximum wind speed at hub height at which the wind turbine is designed to produce useable power (see hub height).

**1.3.5 design limits:** Maximum or minimum values used in a design.

**1.3.6 design situation:** Possible mode of wind turbine operation (for example power production, parking etc.)

**1.3.7 external conditions (wind turbines):** Factors affecting the operation of wind turbine, including the wind regime, other climatic factors (snow, ice, etc.).

**1.3.8 fail-safe:** Design property of an item which prevents its failures from resulting in critical faults.

**1.3.9 gust:** Temporary change in the wind speed which may be characterized by its rise-time, its amplitude and its duration.

**1.3.10 horizontal axis wind turbine (HAWT):** Wind turbine whose rotor axis is substantially parallel to the wind flow.

**1.3.11 hub:** Fixture for attaching the blades or blade assembly to the rotor shaft.

**1.3.12 hub height (wind turbines):** Height of the centre of the wind turbine rotor above the terrain surface. For a vertical axis wind turbine, the hub height is the height of the equator plane.

**1.3.13 idling (wind turbines):** Condition of a wind turbine generator that is rotating slowly and not producing power.

**1.3.14 état-limite:** État d'une structure et les charges qui agissent sur elle, au-delà duquel la structure ne satisfait plus aux exigences pour lesquelles elle a été conçue (voir ISO 2394).

NOTE – Le but des calculs de conception (c'est-à-dire l'exigence nominale pour l'état-limite) est de limiter la probabilité qu'un état-limite puisse être atteint au-dessous d'une certaine valeur prescrite pour le type de structure considéré (voir ISO 2394).

**1.3.15 cas de charge:** Combinaison d'une situation de projet avec une condition externe qui résulte en un chargement de la structure.

**1.3.16 vitesse moyenne du vent:** Valeur moyenne statistique de relevés de la vitesse instantanée du vent, pendant un intervalle de temps déterminé qui peut varier de quelques secondes à plusieurs années.

**1.3.17 nacelle:** Carter contenant la transmission et d'autres pièces constituant d'un aérogénérateur, placé au sommet d'un pylône de support d'une éolienne à axe horizontal.

**1.3.18 immobilisé:** Situation à laquelle le PAG retourne après une coupure normale.

**1.3.19 puissance de sortie:** Puissance fournie par un dispositif sous une forme et dans un but déterminés.

NOTE – (aérogénérateurs) La puissance électrique fournie par un aérogénérateur.

**1.3.20 système de protection (aérogénérateurs):** Système qui garantit qu'un aérogénérateur en fonctionnement reste à l'intérieur de ses paramètres limites.

**1.3.21 puissance assignée:** Quantité de puissance attribuée, en général par un fabricant à une condition de fonctionnement spécifiée d'un composant, appareil ou dispositif.

NOTE – (aérogénérateurs) Puissance électrique maximale continue fournie par un aérogénérateur selon ses spécifications, et dans des conditions normales de fonctionnement.

**1.3.22 vitesse du vent assignée ( $V_R$ ):** Vitesse du vent stipulée à laquelle un aérogénérateur atteint sa puissance assignée.

**1.3.23 vitesse extrême du vent de référence ( $V_{exr}$ ):** Valeur moyenne sur 10 min de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu avec un temps de répétition de 50 ans.

**1.3.24 vitesse du rotor (aérogénérateurs):** Vitesse de rotation du rotor d'un aérogénérateur autour de son axe.

**1.3.25 durée de vie sûre:** Durée de vie prescrite avec une probabilité de panne catastrophique déclarée.

**1.3.26 coupure (aérogénérateurs):** État transitoire d'un aérogénérateur entre la phase de production d'énergie et celle d'un arrêt ou une période au ralenti.

**1.3.27 structure de support (aérogénérateurs):** Éléments d'un aérogénérateur composés du pylône de support et des fondations.

**1.3.28 surface balayée (pour EAH):** Surface de la projection du cercle décrit par les extrémités des pales tournants sur un plan perpendiculaire à la direction du vent.

**1.3.14 limit state:** State of a structure and the loads acting upon it beyond which the structure no longer satisfies the design requirements (see ISO 2394).

NOTE – The purpose of design calculations (that is the design requirement for the limit state) is to keep the probability of a limit state being reached below a certain value prescribed for the type of structure in question (see ISO 2394).

**1.3.15 load case:** Combination of a design situation and an external condition which results in a structural loading.

**1.3.16 mean wind speed:** Statistical mean of the instantaneous value of the wind speed averaged over a given time period which can vary from a few seconds to many years.

**1.3.17 nacelle:** Housing which contains the drive-train and other equipment on top of a HAWT tower.

**1.3.18 parking:** Situation to which a wind turbine returns after a normal shut-down.

**1.3.19 power output:** Power delivered by a device in a specific form and for a specific purpose.

NOTE – (wind turbines) The electric power delivered by a WTGS.

**1.3.20 protection system (wind turbines):** System which ensures that the wind turbine remains within its design limits.

**1.3.21 rated power:** Quantity of power assigned, generally by a manufacturer, for a specified operating condition of a component, device or equipment.

NOTE – (wind turbines) Maximum continuous electrical power output which the wind turbine is designed to achieve under normal operating conditions.

**1.3.22 rated wind speed ( $V_R$ ):** Specified wind speed at which a wind turbine's rated power is achieved.

**1.3.23 reference extreme wind speed ( $V_{ext}$ ):** 10 min average wind speed at hub height with a recurrence interval of 50 years.

**1.3.24 rotor speed (wind turbines):** Rotational speed of a wind turbine rotor about its axis.

**1.3.25 safe life:** Prescribed service life with a declared probability of catastrophic failure.

**1.3.26 shut-down (wind turbines):** Transitional state of a wind turbine between power production and standstill or idling.

**1.3.27 support structure (wind turbines):** Part of a wind turbine comprising the tower and foundation.

**1.3.28 swept area (for HAWT):** Area of the projection, upon a plane perpendicular to the wind velocity vector, of the circle along which the rotor blade tips move during rotation.

**1.3.29 Intensité de turbulence:** Écart type de la vitesse du vent divisée par la vitesse moyenne du vent, quand l'écart type et la vitesse moyenne ont été déterminées à partir d'un même échantillonnage de vitesses de vent mesurées à un intervalle spécifié.

**1.3.30 cisaillement du vent:** Variation de la vitesse du vent dans le plan normal la direction du vent.

**1.3.31 vitesse du vent:** Dans un point spécifié de l'espace, la vitesse de déplacement d'une minuscule quantité d'air autour de ce point spécifié.

**1.3.32 aérogénérateur:** Système destiné à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

**1.3.33 régulation d'orientation (pour EAH):** Changement de direction de l'axe du rotor autour d'un axe vertical.

#### 1.4 Symboles et unités

|        |                                                                     |                                                                             |             |
|--------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1.4.1  | $A$                                                                 | surface d'une section                                                       | $[m^2]$     |
| 1.4.2  | $A_{\text{proi}}$                                                   | projection d'une surface sur un plan perpendiculaire à la direction du vent | $[m^2]$     |
| 1.4.3  | $B$                                                                 | nombre de pales                                                             | $[-]$       |
| 1.4.4  | $C_d$                                                               | coefficient de traînée                                                      | $[-]$       |
| 1.4.5  | $e$                                                                 | distance entre le rotor et le centre de la tour                             | $[m]$       |
| 1.4.6  | $e_r$                                                               | distance entre le centre de gravité du rotor et l'axe de rotation           | $[m]$       |
| 1.4.7  | $F$                                                                 | force                                                                       | $[N]$       |
| 1.4.8  | $F_{xB}, F_{yB}, F_{zB}$                                            | forces sur la pale au niveau du pied de pale                                | $[N]$       |
| 1.4.9  | $F_{x\text{-shaft}}, F_{y\text{-shaft}}$<br>et $F_{z\text{-shaft}}$ | forces sur l'arbre au point de fixation du rotor                            | $[N]$       |
| 1.4.10 | $g$                                                                 | accélération de gravité                                                     | $[ms^{-2}]$ |
| 1.4.11 | $h$                                                                 | hauteur de l'arbre du rotor au-dessus du sol                                | $[m]$       |
| 1.4.12 | $I_B$                                                               | moment d'inertie de la pale                                                 | $[kgm^2]$   |
| 1.4.13 | $I_{rb}$                                                            | distance du centre de gravité du rotor jusqu'au premier palier              | $[m]$       |
| 1.4.14 | $M_{\text{brake}}$                                                  | couple nominal du frein mécanique                                           | $[Nm]$      |
| 1.4.15 | $M_{xB}, M_{yB}, M_{zB}$                                            | moments sur la pale au niveau du pied de pale                               | $[Nm]$      |
| 1.4.16 | $M_{x\text{-shaft}}$                                                | moment de torsion sur l'arbre rotor au niveau du premier palier             | $[Nm]$      |
| 1.4.17 | $M_{b\text{-shaft}}$                                                | moment de flexion sur l'arbre rotor au niveau du premier palier             | $[Nm]$      |
| 1.4.18 | $m_B$                                                               | masse d'une pale                                                            | $[kg]$      |

**1.3.29 turbulence intensity:** Ratio of the wind speed standard deviation to the mean wind speed, determined from the same set of measured data samples of wind speed, and taken over a specified period of time.

**1.3.30 wind shear:** Variation of wind velocity across a plane normal to the wind direction.

**1.3.31 wind speed:** At a specified point in space, the speed of motion of a minute amount of air surrounding the specified point.

**1.3.32 wind turbine generator system:** System which converts the kinetic energy in the wind into electrical energy.

**1.3.33 yawing (for HAWT):** Rotation of the rotor axis about a vertical axis.

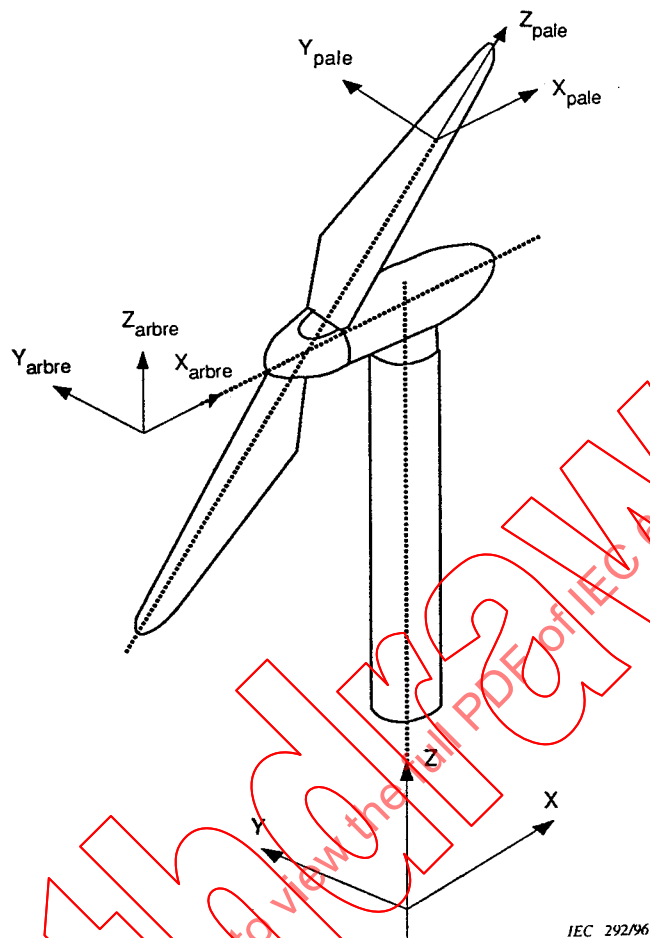
#### 1.4 Symbols and units

|        |                                                 |                                                                       |             |
|--------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1.4.1  | $A$                                             | section area                                                          | $[m^2]$     |
| 1.4.2  | $A_{proj}$                                      | area projected on to a plane perpendicular to the wind direction      | $[m^2]$     |
| 1.4.3  | $B$                                             | number of blades                                                      | $[-]$       |
| 1.4.4  | $C_d$                                           | drag coefficient                                                      | $[-]$       |
| 1.4.5  | $e$                                             | distance between rotor and tower centre                               | $[m]$       |
| 1.4.6  | $e_r$                                           | distance from the centre of gravity of the rotor to the rotation axis | $[m]$       |
| 1.4.7  | $F$                                             | force                                                                 | $[N]$       |
| 1.4.8  | $F_{xB}, F_{yB}, F_{zB}$                        | forces on blade at the blade root                                     | $[N]$       |
| 1.4.9  | $F_{x-shaft}, F_{y-shaft}$<br>and $F_{z-shaft}$ | forces on the rotor shaft at the rotor attachment point               | $[N]$       |
| 1.4.10 | $g$                                             | acceleration due to gravity                                           | $[ms^{-2}]$ |
| 1.4.11 | $h$                                             | height above ground of the rotor shaft                                | $[m]$       |
| 1.4.12 | $I_B$                                           | blade moment of inertia                                               | $[kgm^2]$   |
| 1.4.13 | $l_{rb}$                                        | distance from rotor centre of gravity to first bearing                | $[m]$       |
| 1.4.14 | $M_{brake}$                                     | nominal torque of mechanical brake                                    | $[Nm]$      |
| 1.4.15 | $M_{xB}, M_{yB}, M_{zB}$                        | moments on the blade at the blade root                                | $[Nm]$      |
| 1.4.16 | $M_{x-shaft}$                                   | torsion moment on the rotor shaft at the first bearing                | $[Nm]$      |
| 1.4.17 | $M_{b-shaft}$                                   | bending moment on the rotor shaft at the first bearing                | $[Nm]$      |
| 1.4.18 | $m_B$                                           | mass of a blade                                                       | $[kg]$      |

|        |                      |                                                                            |                      |
|--------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1.4.19 | $m_r$                | masse du rotor                                                             | [kg]                 |
| 1.4.20 | $m_n$                | masse de la nacelle                                                        | [kg]                 |
| 1.4.21 | $n$                  | vitesse du rotor                                                           | [r/min]              |
| 1.4.22 | $n_{\max}$           | vitesse maximale du rotor                                                  | [r/min]              |
| 1.4.23 | $n_R$                | vitesse du rotor pour la vitesse de vent assignée                          | [r/min]              |
| 1.4.24 | $P_R$                | puissance assignée du PAG                                                  | [W]                  |
| 1.4.25 | $Q_R$                | couple mécanique de l'arbre du rotor pour la vitesse de vent assignée      | [Nm]                 |
| 1.4.26 | $R$                  | rayon du rotor                                                             | [m]                  |
| 1.4.27 | $R_{cgB}$            | distance du centre de gravité de la pale à la jonction pied de pale/ moyeu | [m]                  |
| 1.4.28 | $R_{\text{char}}$    | résistance caractéristique du matériau                                     | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.29 | $V_{\text{in}}$      | vitesse du vent de démarrage                                               | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.30 | $V_{\text{out}}$     | vitesse du vent de coupure                                                 | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.31 | $V_{\text{hub}}$     | vitesse du vent à la hauteur du moyeu                                      | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.32 | $V_R$                | vitesse du vent assignée                                                   | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.33 | $V_{\text{extr}}$    | vitesse extrême du vent de référence                                       | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.34 | $W_b$                | module d'inertie                                                           | [m <sup>3</sup> ]    |
| 1.4.35 | $\gamma$             | facteur de sécurité                                                        | [-]                  |
| 1.4.36 | $\eta$               | rendement                                                                  |                      |
| 1.3.37 | $\lambda_R$          | rapport de vitesse d'extrémité de pale à $V_R$                             | [-]                  |
| 1.4.38 | $\rho$               | densité de l'air                                                           | [kgm <sup>-3</sup> ] |
| 1.4.39 | $\sigma$             | contrainte                                                                 | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.40 | $\sigma_c$           | contrainte de calcul (calculée à partir des charges de calcul)             | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.41 | $\sigma_{\text{eq}}$ | contrainte équivalente                                                     | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.42 | $\tau$               | contrainte de cisaillement                                                 | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.43 | $\omega$             | vitesse angulaire d'orientation                                            | [s <sup>-1</sup> ]   |

|        |                      |                                                                                 |                      |
|--------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1.4.19 | $m_r$                | mass of the rotor                                                               | [kg]                 |
| 1.4.20 | $m_n$                | mass of the nacelle                                                             | [kg]                 |
| 1.4.21 | $n_s$                | speed of the rotor                                                              | [r/min]              |
| 1.4.22 | $n_{\max}$           | maximum speed of the rotor                                                      | [r/min]              |
| 1.4.23 | $n_R$                | rotor speed at rated wind speed                                                 | [r/min]              |
| 1.4.24 | $P_R$                | SWTGS rated power                                                               | [W]                  |
| 1.4.25 | $Q_R$                | rotor shaft torque at rated wind speed                                          | [Nm]                 |
| 1.4.26 | $R$                  | radius of the rotor                                                             | [m]                  |
| 1.4.27 | $R_{\text{cgB}}$     | distance from the centre of gravity of a blade to the blade root – hub junction | [m]                  |
| 1.4.28 | $R_{\text{char}}$    | characteristic material strength                                                | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.29 | $V_{\text{in}}$      | cut-in wind speed                                                               | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.30 | $V_{\text{out}}$     | cut-out wind speed                                                              | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.31 | $V_{\text{hub}}$     | wind speed at hub height                                                        | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.32 | $V_R$                | rated wind speed                                                                | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.33 | $V_{\text{extr}}$    | reference extreme wind speed                                                    | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| 1.4.34 | $W_b$                | section modulus                                                                 | [m <sup>3</sup> ]    |
| 1.4.35 | $\gamma$             | safety factor                                                                   | [–]                  |
| 1.4.36 | $\eta$               | efficiency                                                                      |                      |
| 1.4.37 | $\lambda_R$          | tip speed ratio at $V_R$                                                        | [–]                  |
| 1.4.38 | $\rho$               | density of air                                                                  | [kgm <sup>-3</sup> ] |
| 1.4.39 | $\sigma$             | stress                                                                          | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.40 | $\sigma_d$           | design stress (calculated from design loads)                                    | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.41 | $\sigma_{\text{eq}}$ | equivalent stress                                                               | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.42 | $\tau$               | shear stress                                                                    | [Nm <sup>-2</sup> ]  |
| 1.4.43 | $\omega$             | angular rate of yawing                                                          | [s <sup>-1</sup> ]   |

Pour définir les directions des charges, on utilise les systèmes d'axe de la figure 1.



NOTE – Le système d'axes des pales tourne avec le rotor.  
Le système d'axes de l'arbre principal tourne avec la nacelle.  
Le système d'axes de la tour est fixe.

Figure 1 – Définition des systèmes d'axes pour EAH

### 1.5 Abréviations

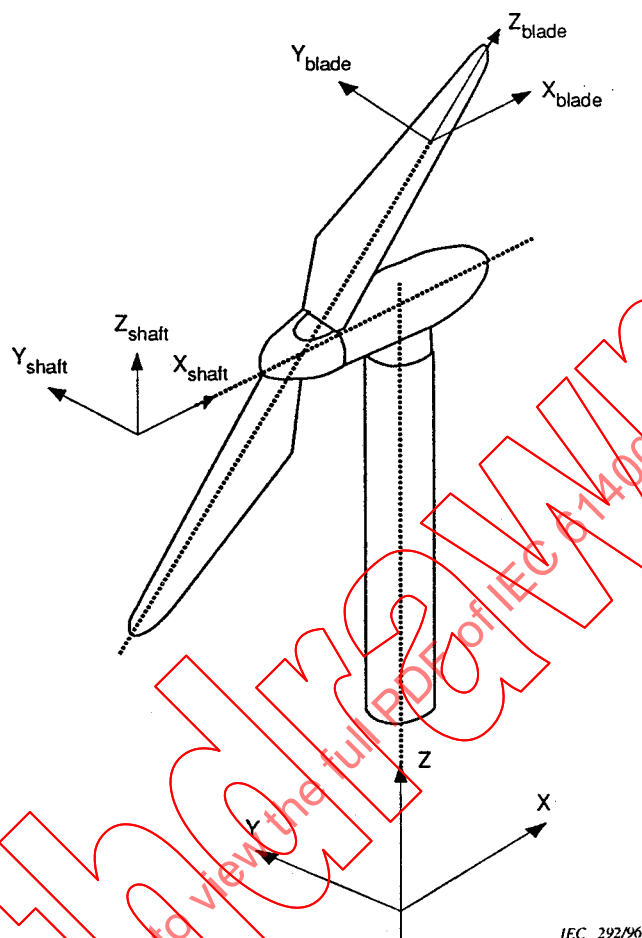
PAG Petit aérogénérateur  
EAH Éolienne à axe horizontal

## 2 Éléments principaux

### 2.1 Généralités

L'intégrité de l'ingénierie des systèmes de structure, mécaniques, électriques et de contrôle doit être réalisée en appliquant les spécifications de cette norme concernant la conception, la fabrication et la gestion de la qualité.

To define the directions of the loads, the system of axes shown in figure 1 are used.



NOTE – The blade axis system rotates with the rotor.  
The shaft axis system rotates with the nacelle.  
The tower axis system is fixed.

**Figure 1 – Definition of the system of axes for HAWT**

## 1.5 Abbreviations

SWTGS Small wind turbine generator system  
HAWT Horizontal axis wind turbine

## 2 Principal elements

### 2.1 General

The engineering integrity includes the design of the structural, mechanical, electrical and control systems. It shall be achieved by following the requirements of this standard in respect to design, manufacture and quality management.

Une combinaison de technologies existantes est utilisée pour l'installation, l'exploitation et la maintenance des petits aérogénérateurs. Les procédures de sécurité établies pour ces technologies doivent être suivies.

## 2.2 Assurance qualité

L'assurance qualité doit faire partie intégrante de la conception, de l'approvisionnement et de la fabrication des aérogénérateurs et de tous leurs composants et de la documentation relative au montage, à l'installation à l'exploitation et, à la maintenance.

Il est recommandé que le système d'assurance qualité soit conforme aux prescriptions de l'ISO 9001, de l'ISO 9002 et de l'ISO 9003.

## 3 Conditions externes

Les conditions externes décrites dans cet article doivent être prises en considération dans la conception du PAG. Ces conditions dépendent du site prévu ou d'un site-type pour l'installation d'un PAG. Deux classes de PAG sont définies, à savoir une classe normale et une classe spéciale. Le but de la classe normale est de couvrir la plupart des applications. Les paramètres pour la classe normale des PAG représentent les valeurs caractéristiques de plusieurs sites variés et ne sont pas réajustés pour une représentation précise d'un site spécifique. La responsabilité de vérifier que les conditions d'un site, lors d'une installation réelle, sont plus sûres que celles décrites pour une catégorie donnée d'aérogénérateur incombe à l'ingénieur en chef du projet ou au propriétaire de l'équipement. Pour les cas où des conditions de conception spéciales sont nécessaires, on appliquera la classe spéciale. Les paramètres pour les conditions externes de la classe spéciale doivent être établis et prescrits par le concepteur.

Pour la classe normale, on doit considérer les valeurs suivantes comme conditions externes:

- vitesse du vent de référence:  $V_{\text{exr}} = 35 \text{ m/s}$  à la hauteur du moyeu;
- une gamme de températures de fonctionnement normal du système de  $-10 \text{ °C}$  à  $+40 \text{ °C}$ ;
- une gamme de températures de fonctionnement extrême du système de  $-20 \text{ °C}$  à  $+50 \text{ °C}$ ;
- une humidité relative de 95 %;
- une composition atmosphérique équivalente à celle d'une atmosphère continentale non polluée;
- une densité de l'air au niveau de la mer de  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ .

## 4 Conception de la structure

### 4.1 Généralités

La conception de la structure d'un PAG doit être basée sur la vérification de l'intégrité de la structure des composants porteurs. La résistance ultime et la résistance à la fatigue des éléments de la structure doivent être vérifiées par des essais ou calculs démontrant la sécurité structurelle du PAG en fonction du niveau de sécurité préconisé.

Il convient que la conception de la structure soit basée, selon l'applicabilité, sur l'ISO 2394.

A combination of existing technologies is used in the installation, operation and maintenance of SWTGS. Safety procedures, which have been established in those technologies, shall be followed.

## 2.2 Quality assurance

Quality assurance shall be an integral part of the design, procurement and manufacture of a SWTGS and all its components; and also of the documentation of assembly, installation, operation and maintenance.

It is recommended that the quality system complies with the requirements of ISO 9001, ISO 9002 and ISO 9003.

## 3 External conditions

The external conditions described in this clause shall be considered in the design of the SWTGS. These conditions are dependent on the intended site or site type for the SWTGS installation. Two turbine classes are defined: a normal class and a special class. The intention of the normal class is to cover most applications. The parameters for the normal SWTGS class are intended to represent the characteristic values of many different sites and are not adjusted to give a precise representation of any specific site. It is the responsibility of the project engineer or the equipment owner to verify that conditions at the actual installation site are more benign than those prescribed for the given turbine class. To cover cases where special design conditions are necessary, the special class shall be applied. The values for the external conditions for the special class shall be defined and specified by the designer.

For the normal class, the following values for the external conditions shall be considered:

- a reference extreme wind speed  $V_{\text{exr}}$  of 35 m/s at hub height;
- a normal system operation temperature range of  $-10\text{ °C}$  to  $40\text{ °C}$ ;
- an extreme system operation temperature range of  $-20\text{ °C}$  to  $+50\text{ °C}$ ;
- a relative humidity of 95 %;
- an atmospheric content equivalent to that of a non-polluted inland atmosphere;
- a sea level air density  $\rho = 1,225\text{ kg/m}^3$ .

## 4 Structural design

### 4.1 General

The SWTGS structural design shall be based on a verification of the structural integrity of the load-carrying components. The ultimate and fatigue strength of the structural members of the SWTGS shall be verified by testing or calculation to demonstrate the structural safety of a SWTGS with the appropriate safety level.

The structural design should be based on ISO 2394, where applicable.

Un niveau de sécurité adéquat doit être déterminé et vérifié par des calculs ou essais qui démontrent que les charges de conception ne dépassent pas la résistance de conception applicable.

#### 4.2 Méthodologie de conception

La vérification de l'accomplissement de l'intégrité de l'ingénierie doit être faite par des méthodes de calcul et/ou par des essais. La sélection des conditions d'essai ainsi que les charges d'essai doit tenir compte du niveau de sécurité approprié.

Les calculs doivent être effectués en utilisant des méthodes de conception appropriées. Le niveau de charge dans tout essai doit refléter les facteurs de sécurité de la vérification calculée correspondante.

La conception d'un PAG doit être basée sur les valeurs de calcul pour les conditions externes combinées avec la situation de projet applicable au PAG, à partir desquelles les cas de charge doivent être définis. Tous les cas de charge applicables doivent être analysés en fonction de l'intégrité mécanique.

Il doit être vérifié que les états-limites ne dépassent pas ceux de conception du PAG. Les états-limites ultimes à prendre en considération comprennent:

- la perte d'équilibre de la structure ou d'une partie du PAG considérée comme un corps rigide;
- la défaillance suite à une déformation excessive, une rupture (y compris une rupture de fatigue), ou une perte de stabilité de la structure ou tout composant de la structure, y compris les structures de support.

#### 4.3 Charges

Les types suivants de charges doivent être considérés dans la conception:

- **Charges aérodynamiques**

Les charges aérodynamiques sont des charges statiques et dynamiques provoquées par le flux de l'air et son interaction avec les pièces fixes et mobiles du PAG. Le flux de l'air dépend de la vitesse de rotation du rotor, la vitesse moyenne du vent à travers le plan du rotor, la turbulence, la densité de l'air, les formes aérodynamiques et leurs effets interactifs, y compris les effets aéroélastiques.

- **Charges d'inertie et de gravité**

Les charges d'inertie et de gravité provoquent une charge statique et dynamique du PAG, due aux vibrations, à la rotation et à la gravité.

Les excitations dynamiques et le couplage des modes vibratoires doivent être considérés comme il convient dans le calcul des charges.

#### 4.4 Cas de charges

Ce paragraphe définit les cas de charge de calcul du PAG et spécifie le nombre minimum de cas de charge à considérer.

Pour les besoins de conception, la vie d'un PAG peut être divisée en groupes de situations de projet représentant les conditions les plus significatives rencontrées par le PAG. Ces situations de projet sont définies dans cette norme comme les modes de fonctionnement du PAG.

An acceptable safety level shall be ascertained and verified by calculation or tests to demonstrate that the design loading will not exceed the relevant design resistance.

#### 4.2 *Design methodology*

Verification of the achievement of engineering integrity shall be made by calculation and/or by testing. The selection of test conditions, including the test loads, shall take account of the appropriate safety level.

Calculations shall be performed using appropriate design methods. The load level in any proof test shall reflect the level of safety applied in the corresponding calculated verification.

The design of a SWTGS shall be based on design values for the external conditions in combination with the relevant design situation for the SWTGS from which the load cases are derived. All relevant load cases shall be analysed with respect to the engineering integrity.

It shall be verified that limit states are not exceeded for the wind turbine design. Ultimate limit states which may require consideration include:

- loss of equilibrium of the structure, or any part of the SWTGS which is considered as a rigid body;
- failure by excessive deformation, fracture (including fracture induced by fatigue), or loss of stability of the structure or any part of it, including support structure.

#### 4.3 *Loads*

The following types of loads shall be considered in the design:

- **Aerodynamic loads**

Aerodynamic loads are static and dynamic loads which are caused by the airflow and its interaction with the stationary and moving parts of a SWTGS. The airflow is dependent upon the rotational speed of the rotor, the average wind speed across the rotor plane, the turbulence, the density of the air, and the aerodynamic shapes and their interactive effects, including aeroelastic effects.

- **Inertial and gravitational loads**

Inertial and gravitational loads result in static and dynamic loads acting on the SWTGS, due to vibration, rotation and gravity.

Dynamic excitations and coupling of vibrating modes shall be considered in the load calculations where appropriate.

#### 4.4 *Load cases*

This subclause describes the definition of design load cases of SWTGS, and specifies the minimum number of load cases to be considered.

For design purposes, the life of a SWTGS can be classified by a set of design situations representing the most significant conditions which the SWTGS may experience. In this standard, these design situations are defined by the operational modes of the SWTGS.

Les cas de charge doivent être déterminés à partir de la combinaison des conditions externes avec les situations de projet spécifiques. Tout cas de charge ayant une probabilité d'occurrence raisonnable selon le type de PAG doit être considéré, en combinaison avec le comportement du système de contrôle et protection.

En règle générale, les cas de charge de calcul utilisés pour valider l'intégrité de la structure d'un PAG doivent être définis à partir des combinaisons de situations de projet normales avec les conditions externes à la fois normales et extrêmes. En cas de panne du PAG, le cas de charge doit être défini à partir d'une combinaison de la situation de calcul de cette panne associée aux conditions externes applicables, en se basant sur une probabilité raisonnable d'occurrence.

En 4.5, une pratique recommandée est indiquée comme procédure de calcul des charges simplifiée. En règle générale la méthode est seulement valable pour EAH avec un moyeu rigide et des pales cantilever. Pour diminuer le volume des calculs et pour simplifier les calculs à exécuter, seul un nombre limité de cas de charges sera pris en compte dans cette procédure. Quand cette pratique est appliquée, l'influence des phénomènes dynamiques est prise en compte dans le conservatisme des calculs.

Parallèlement, les cas de charges peuvent être définis et les calculs de charges peuvent être conduits en accord avec la CEI 1400-1. Cette procédure devra être suivie pour les petits aérogénérateurs qui ne sont pas conformes à l'hypothèse mentionnée à l'alinéa ci-dessus.

Pour le calcul simplifié, les cas de charge à considérer sont résumés dans le tableau 1.

**Tableau 1 – Cas de charges de calcul pour la méthode simplifiée de calcul des charges**

| Situation de calcul  | Cas de charge                                             | Vitesse du vent                                       | Type d'analyse  | Remarques                                                                                                                             |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Production d'énergie | A Charge de vent cyclique durant le fonctionnement normal | Vitesse de vent variable cycliquement autour de $V_R$ | Fatigue         | La puissance oscille cycliquement entre $1,5 P_R$ et $9,5 P_R$<br>La vitesse du rotor varie cycliquement entre $1,5 n_R$ et $0,5 n_R$ |
|                      | B Orientation                                             | $V_{hub} = V_R$                                       | Charges ultimes | Vitesse d'orientation maximale possible                                                                                               |
|                      | C Perte de connexion électrique                           | $V_{hub} = V_{exr}$                                   | Charges ultimes | Mesurer la vitesse du rotor pour une vitesse de vent normal et extrapoler à $V_{exr}$                                                 |
| Coupure              | D Coupure normale                                         | $V_{hub} = V_R$                                       | Charges ultimes | Couple de freinage                                                                                                                    |
| Immobilisé           | E Exposition minimale                                     | $V_{hub} = 1,4 V_{exr}$                               | Charges ultimes | Position immobilisée normale                                                                                                          |
|                      | F Exposition maximale                                     | $V_{hub} = V_{exr}$                                   | Charge ultimes  | Surface d'attaque maximale                                                                                                            |

Les autres cas de charges de calcul en relation avec la sécurité doivent être considérés, si la conception spécifique du PAG le requiert.

#### 4.5 Calcul de charges simplifié

La méthode pour calculer les cas de charges donnés dans le tableau 1 est décrite ci-dessous.

The load cases shall be determined from the combination of specific design situations with external conditions. All relevant load cases based upon the type of SWTGS and with reasonable probability of occurrence shall be considered, together with the behaviour of the control and protection system.

Generally, the design load cases used to determine the structural integrity of a SWTGS shall be defined from the combinations of normal design situations with both normal and extreme external conditions. In case of a failure in the SWTGS, the load case shall be determined from a combination of the failure design situation with the appropriate external conditions, based on a reasonable probability of occurrence.

In 4.5 a recommended practice is given for a simplified load calculation procedure. In general, the method is only valid for HAWT with rigid hub and cantilever blades. To reduce the number of calculations and to simplify the calculations to be performed, only a limited number of load cases will be considered in this procedure. If this method is applied, the influences of dynamics are taken into account in the conservatism of the calculations.

Alternatively, load cases can be defined and load calculations can be performed in accordance with IEC 1400-1. This procedure will have to be followed for SWTGS which do not comply with the assumption mentioned in the above paragraph.

For the simplified calculation, the load cases to be considered are summarized in table 1.

**Table 1 – Design load cases for the simplified load calculation method**

| Design situation | Load case |                                             | Wind inflow                            | Type of analysis | Remarks                                                                                                                          |
|------------------|-----------|---------------------------------------------|----------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Power production | A         | Cyclic wind loading during normal operation | Cyclic varying wind speed around $V_R$ | Fatigue          | Power alternates cyclically between $1,5 P_R$ and $9,5 P_R$<br>Rotor speed alternates cyclically between $1,5 n_R$ and $0,5 n_R$ |
|                  | B         | Yawing                                      | $V_{hub} = V_R$                        | Ultimate loads   | Maximum possible yaw speed                                                                                                       |
|                  | C         | Loss of electrical connection               | $V_{hub} = V_{exr}$                    | Ultimate loads   | Measure the rotor speed at normal wind speed and extrapolate to $V_{exr}$                                                        |
| Shut-down        | D         | Normal shut-down                            | $V_{hub} = V_R$                        | Ultimate loads   | Braking torque                                                                                                                   |
| Parked           | E         | Minimum exposure                            | $V_{hub} = 1,4 V_{exr}$                | Ultimate loads   | Normal parking position                                                                                                          |
|                  | F         | Maximum exposure                            | $V_{hub} = V_{exr}$                    | Ultimate loads   | Maximum attack area                                                                                                              |

Other design load cases relevant for safety shall be considered, if required by the specific SWTGS design.

#### 4.5 Simplified load calculation

The method to calculate the load cases listed in table 1 is described below.

#### 4.5.1 Production d'énergie

Les trois cas de charges suivants doivent être considérés.

##### 4.5.1.1 Fonctionnement en service normal (cas de charge A)

Pour le cas de charge *service normal*, on admet que la charge de calcul est une charge de fatigue.

Pour définir l'amplitude des forces et moments en pieds de pale, on estime que:

- les forces aérodynamiques agissent sur la pale aux 2/3 de  $R$  et dans l'axe  $z$  de la pale;
- la puissance électrique varie cycliquement entre  $1,5 P_R$  et  $0,5 P_R$  où  $P_R$  est la puissance électrique assignée;
- la vitesse du rotor varie cycliquement entre  $1,5 n_R$  et  $0,5 n_R$

Les amplitudes à considérer dans l'estimation de la fatigue sont des amplitudes crête/crête.

Les valeurs pour le rapport de vitesse  $\lambda_R$  d'extrémité de pale (à la vitesse de vent assignée) et pour le couple du rotor  $Q_R$  (à la vitesse de vent assignée) sont données par les équations (1)

$$\lambda_R = \frac{R \times n_R \times \pi}{V_R \times 30} \quad (1)$$

$$Q_R = \frac{P_R \times 30}{n_R \times \pi \times \eta}$$

où le rendement  $\eta$  est égal à 0,8, si aucune autre valeur n'est connue.

##### Charges en pied de pale

L'amplitude de la force centrifuge en pied de pale est donnée par l'équation (2):

$$\Delta F_{zB} = 2 m_B R_{cgB} \left( \frac{\pi n_R}{30} \right)^2 \quad (2)$$

L'amplitude des moments de flexion en pied de pale est donnée par les équations (3):

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_R}{B} + 2 m_B g R_{cgB} \quad (3)$$

$$\Delta M_{yB} = \lambda_R \frac{Q_R}{B}$$

##### Charges sur l'arbre du rotor

L'amplitude de la force axiale de poussée sur l'arbre est donnée par l'équation (4):

$$\Delta F_{x\text{-shaft}} = \frac{3 \lambda_R Q_R}{2 R} \quad (4)$$

#### 4.5.1 Power production

The following three load cases are to be considered.

##### 4.5.1.1 Normal operation (load case A)

For the load case *normal operation*, it is assumed that the design load is a fatigue load.

To determine the range of the forces and moments in the root of the blades it is assumed that:

- the aerodynamic forces act on the blade at  $2/3 R$  and on the z-axis of the blade;
- the electrical power output varies cyclically between  $1,5 P_R$  and  $0,5 P_R$ , where  $P_R$  is the rated electrical power;
- the rotor speed varies cyclically between  $1,5 n_R$  and  $0,5 n_R$ .

The ranges are to be considered in the fatigue assessment as peak-to-peak values.

The values for the tip speed ratio  $\lambda_R$  (at rated wind speed) and the rotor torque  $Q_R$  (at rated wind speed) are given by the equations (1)

$$\lambda_R = \frac{R \times n_R \times \pi}{V_R \times 30} \quad (1)$$

$$Q_R = \frac{P_R \times 30}{n_R \times \pi \times \eta}$$

where the efficiency  $\eta$  can be taken as 0,8, if no other value is known.

##### Loads in the blade root

The range of the centrifugal force in the root of the blades is given in equation (2):

$$\Delta F_{zB} = 2 m_B R_{cgB} \left( \frac{\pi n_R}{30} \right)^2 \quad (2)$$

The range of the bending moments in the root of the blades is given by equations (3):

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_R}{B} + 2 m_B g R_{cgB} \quad (3)$$

$$\Delta M_{yB} = \lambda_R \frac{Q_R}{B}$$

##### Loads on the rotor shaft

The range of the thrust force in the rotor shaft is given by equation (4):

$$\Delta F_{x-shaft} = \frac{3 \lambda_R Q_R}{2 R} \quad (4)$$

Les amplitudes des moments de torsion et de flexion dans l'arbre sont données respectivement par les équations (5):

$$\begin{aligned}\Delta M_{x\text{-shaft}} &= Q_R \\ \Delta M_{y\text{-shaft}} &= 2 m_r g l_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x\text{-shaft}}\end{aligned}\quad (5)$$

#### 4.5.1.2 En orientation (cas de charge B)

Pour le cas de charge *en orientation*, les charges ultimes (forces et moments gyroscopiques) doivent être calculées en estimant que le maximum se produit pour la vitesse d'orientation  $\omega_{\max}$ . Pour la vitesse d'orientation  $\omega_{\max}$  on doit prendre les valeurs de calcul. Parallèlement, on peut utiliser les valeurs des mesures de la vitesse d'orientation maximale, si elles sont disponibles. Si l'on ne dispose ni de valeurs théoriques, ni de valeurs expérimentales pour  $\omega_{\max}$  les calculs doivent prendre en compte une vitesse d'orientation maximale  $\omega_{\max} = 1$  rad/s. Le calcul simplifié prend comme hypothèse un moyeu rigide.

##### Charges en pied de pale

Le moment de flexion maximal résultant du mouvement d'orientation est donné par l'équation (6):

$$M_{yB,\max} = m_B \omega_{\max}^2 e R_{cgB} + 2 \omega_{\max} I_B \frac{\pi n_R}{30} + \frac{R}{9} \Delta F_{x\text{-shaft}} \quad (6)$$

Les autres forces et moments sont faibles et peuvent être négligés.

##### Charges sur l'arbre du rotor

Pour un PAG à deux pales, le moment de flexion de l'arbre dû au mouvement d'orientation est donné par l'équation (7):

$$M_{b\text{-shaft},\max} = 2 B \omega_{\max} I_B \frac{\pi n_R}{30} + m_r g l_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x\text{-shaft}} \quad (7)$$

Pour les PAG à trois pales et plus, le moment de flexion de l'arbre dû au mouvement d'orientation est donné par l'équation (8):

$$M_{b\text{-shaft},\max} = B \omega_{\max} I_B \frac{\pi n_R}{30} + m_r g l_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x\text{-shaft}} \quad (8)$$

Les autres forces et moments pendant l'orientation sont faibles et déphasés et peuvent être négligés.

#### 4.5.1.3 Perte de charge électrique (cas de charge C)

La vitesse du rotor maximale possible en fonctionnement  $n_{\max}$  au moment de la perte de charge électrique doit être estimée par une extrapolation linéaire à  $V_{\text{exr}}$  à partir de la vitesse du rotor sans charge mesurée ou calculée à une vitesse de vent normale. Si la vitesse du rotor est limitée par les effets des systèmes de contrôle et de protection, cela doit être pris en compte dans l'extrapolation.

The ranges of the torsion and bending moments in the rotor shaft are given by equations (5):

$$\begin{aligned}\Delta M_{x\text{-shaft}} &= Q_R \\ \Delta M_{y\text{-shaft}} &= 2 m_r g l_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x\text{-shaft}}\end{aligned}\quad (5)$$

#### 4.5.1.2 Yawing (load case B)

For the load case *yawing*, the ultimate loads (gyroscopic forces and moments) shall be calculated assuming the maximum occurring yaw speed  $\omega_{\max}$ . For the yaw speed  $\omega_{\max}$ , the design values shall be taken. Alternatively, measured values of the maximum yaw speed may be used, if available. If the design values or measured values for  $\omega_{\max}$  are not available, the calculations shall assume a maximum yaw rate of  $\omega_{\max} = 1 \text{ rad/s}$ . The simplified calculation assumes a rigid hub.

##### Loads in the blade root

The maximum bending moment due to yaw motion is given by equation (6):

$$M_{yB,\max} = m_B \omega_{\max}^2 e R_{cgB} + 2 \omega_{\max} I_B \frac{\pi n_R}{30} + \frac{R}{9} \Delta F_{x\text{-shaft}} \quad (6)$$

The other forces and moments are small and can be assumed as zero.

##### Loads on the rotor shaft

For a two bladed SWTGS the shaft bending moment due to yaw motion is given by equation (7):

$$M_{b\text{-shaft},\max} = 2 B \omega_{\max} I_B \frac{\pi n_R}{30} + m_r g l_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x\text{-shaft}} \quad (7)$$

For three and more bladed SWTGS, the shaft bending moment due to yaw motion is given by equation (8):

$$M_{b\text{-shaft},\max} = B \omega_{\max} I_B \frac{\pi n_R}{30} + m_r g l_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x\text{-shaft}} \quad (8)$$

The other forces and moments during yawing are small or not in phase and can be assumed as zero.

#### 4.5.1.3 Loss of electrical load (load case C)

The maximum possible operational rotor speed  $n_{\max}$  at loss of electrical load shall be derived by linear extrapolation to  $V_{\text{exr}}$  from the speed of the unloaded rotor, measured or calculated at a normal wind speed. If the rotor speed is limited by the actions of the control and protection systems, this shall be taken into account in the extrapolation.

### Charges en pied de pale

La force centrifuge en pied de pale est donnée par l'équation (9):

$$F_{zB,max} = m_B R_{cgB} \left( \frac{\pi n_{max}}{30} \right)^2 \quad (9)$$

### Charges sur l'arbre du rotor

Le moment de flexion dans l'arbre dû au déséquilibre du rotor à la vitesse du rotor maximale est donné par l'équation (10):

$$M_{b-shaft,max} = \left[ m_r e_r \left( \frac{\pi n_{max}}{30} \right)^2 + m_r g \right] l_{rB} \quad (10)$$

où  $e_r = 0,001 R$

### 4.5.2 Coupure (cas de charge D)

Dans le cas des PAG avec système de freinage sur l'arbre d'entraînement (frein mécanique ou électrique), le moment de freinage peut être plus élevé que le moment moteur maximal. Dans ces cas, le moment de freinage  $M_{brake}$  doit être utilisé dans les calculs de conception du PAG.

### Charges en pied de pale

Le moment de flexion latéral en pied de pale pendant une coupure mécanique est donné par l'équation (11):

$$M_{xb,max} = \frac{M_{x-shaft,max}}{B} + m_B g R_{cgB} \quad (11)$$

### Charges sur l'arbre du rotor

Le moment de torsion maximal sur l'arbre durant la coupure est calculé par l'équation (12):

$$M_{x-shaft,max} = M_{brake} + Q_r \quad (12)$$

Dans l'équation (12), on estime que le frein se met en action pendant que le générateur est connecté à la charge.

### 4.5.3 PAG immobilisé

Les deux cas de charge suivants doivent être considérés.

#### 4.5.3.1 PAG immobilisé normalement (cas de charge E)

Dans ce cas de charge, le PAG est immobilisé dans la position normale favorable, notamment avec une exposition au vent minimale. Les charges sur les parties exposées du PAG doivent être calculées en estimant une vitesse de vent extrême de référence, multipliée par un coefficient de rafale de 1,4.

### Loads in the blade root

The centrifugal load in the blade root is given by equation (9):

$$F_{zB,max} = m_B R_{cgB} \left( \frac{\pi n_{max}}{30} \right)^2 \quad (9)$$

### Loads on the rotor shaft

The bending moment in the rotor shaft due to rotor unbalance at maximum rotor speed is given by equation (10):

$$M_{b-shaft,max} = \left[ m_r e_r \left( \frac{\pi n_{max}}{30} \right)^2 + m_r g \right] l_{rB} \quad (10)$$

where  $e_r = 0,001 R$ .

### 4.5.2 Shut-down (load case D)

In the case of wind turbines with a braking system in the drive train (mechanical brake, electrical brake), the braking moment can be greater than the maximum driving moment. In these cases, the braking moment  $M_{brake}$  shall be used in the design calculations of the SWTGS.

### Loads in the blade root

The edgewise bending moment in the blade root at a mechanical shut-down is given by equation (11):

$$M_{xb,max} = \frac{M_{x-shaft,max}}{B} + m_B g R_{cgB} \quad (11)$$

### Loads on the rotor shaft

The maximum torsion moment on the shaft during shut-down is calculated by equation (12):

$$M_{x-shaft,max} = M_{brake} + Q_r \quad (12)$$

In equation (12) it is assumed that the brake is applied while the generator is connected to the load.

### 4.5.3 Parked SWTGS

The following two load cases are to be considered.

#### 4.5.3.1 Normally parked SWTGS (load case E)

In this load case, the wind turbine is parked in the normal favourable way, mostly with minimum wind exposure. The loads on the exposed parts of the SWTGS shall be calculated assuming the reference extreme wind speed, increased with a gust factor of 1,4.

#### Charges sur chaque composant

$$F = C_d \frac{1}{2} \rho (1,4 V_{\text{extr}})^2 A_{\text{proj}} \quad (13)$$

où

$C_d$  est le coefficient de traînée (voir figure 2);

$A_{\text{proj}}$  est la surface de l'élément projetée sur un plan perpendiculaire à la direction du vent.

#### 4.5.3.2 PAG immobilisé + panne (cas de charge F)

En cas de panne dans le système d'orientation, le PAG peut être exposé à un vent venant de toutes les directions. Ainsi, pour les buts du calcul, la surface d'attaque correspondant à l'angle d'orientation le plus défavorable doit être utilisé, pour le calcul de ce cas de charge. Les sollicitations sur les éléments du PAG, pendant son immobilisation sous vent extrême, doivent être définies comme suit:

#### Charges sur chaque composant

$$F = C_d \frac{1}{2} \rho V_{\text{extr}}^2 A_{\text{proj}} \quad (14)$$

où

$C_d$  est le coefficient de traînée (voir figure 2);

$A_{\text{proj}}$  est la surface de l'élément (dans sa position la plus défavorable) projetée sur un plan perpendiculaire à la direction du vent.

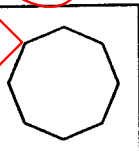
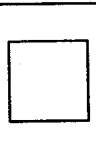
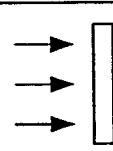
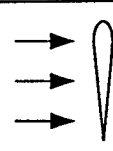
|                                   |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $D \text{ ou } l < 0,1 \text{ m}$ | 1,3                                                                                 | 1,3                                                                                 | 1,3                                                                                  | 1,6                                                                                   | 1,5                                                                                   |
| $D \text{ ou } l > 0,1 \text{ m}$ | 0,7                                                                                 | 1,2                                                                                 | 1,3                                                                                  | 1,6                                                                                   | 1,5                                                                                   |

Figure 2 – Coefficients de traînée  $C_d$

#### 4.6 Calcul des contraintes

Les contraintes calculées à partir des forces et moments particuliers à un cas de charge doivent être combinées pour obtenir les contraintes équivalentes. Les contraintes équivalentes qui en résultent doivent être comparées avec les contraintes admissibles du matériau (voir 4.7).

**Loads on each component**

$$F = C_d \frac{1}{2} \rho (1,4 V_{\text{exr}})^2 A_{\text{proj}} \quad (13)$$

where

$C_d$  is the drag coefficient (see figure 2);

$A_{\text{proj}}$  is the component area projected on to a plane perpendicular to the wind direction.

**4.5.3.2 Parked + fault (SWGTS) (load case F)**

In the case of a failure in the yaw mechanism, the SWTGS can be exposed to the wind from all directions. Thus, for design purposes, the attack area corresponding to the most unfavourable yaw angle shall be used in the calculations of this load case. The forces on parts of the SWTGS while parked during extreme wind speeds shall be determined as follows.

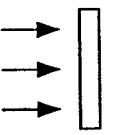
**Loads on each component**

$$F = C_d \frac{1}{2} \rho V_{\text{exr}}^2 A_{\text{proj}} \quad (14)$$

where

$C_d$  is the drag coefficient (see figure 2);

$A_{\text{proj}}$  is the component area (in its most unfavourable position) projected on to a plane perpendicular to the wind direction.

|                                   |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $D \text{ or } l < 0,1 \text{ m}$ | 1,3                                                                                 | 1,3                                                                                 | 1,3                                                                                 | 1,6                                                                                   | 1,5                                                                                   |
| $D \text{ or } l > 0,1 \text{ m}$ | 0,7                                                                                 | 1,2                                                                                 | 1,3                                                                                 | 1,6                                                                                   | 1,5                                                                                   |

**Figure 2 – Drag coefficients  $C_d$**

**4.6 Stress calculation**

The stresses calculated from the individual forces and moments within a load case have to be combined to find equivalent stresses. The resulting equivalent stresses have to be compared with the allowable material stresses (see 4.7).

Dans le calcul des contraintes, on doit tenir compte:

- des variations de contraintes;
- des concentrations de contraintes;
- de l'amplitude et de la direction des charges résultantes;
- des dimensions de l'élément;
- de la rugosité, du traitement de surface du composant;
- du type de charge (flexion, traction, torsion, etc.).

Le tableau 2 donne des indications pour le calcul des contraintes équivalentes à partir des valeurs unidirectionnelles.

**Tableau 2 – Contraintes équivalentes**

|                                                                                                                 | Pied de pale circulaire*                      | Pied de pale rectangulaire*                            | Arbre du rotor**                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Effort axial                                                                                                    | $\sigma_F = \frac{F_z}{A}$                    | $\sigma_F = \frac{F_z}{A}$                             | $\sigma_F = \frac{F_x}{A}$                                  |
| Flexion                                                                                                         | $\sigma_M = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W_b}$ | $\sigma_M = \frac{M_x}{W_{b'x}} + \frac{M_y}{W_{b'y}}$ | $\sigma_M = \frac{M_y}{W_b}$                                |
| Cisaillement                                                                                                    | Négligeable                                   | Négligeable                                            | $\tau_M = \frac{M_x}{2 W_b}$                                |
| Combiné (axial + flexion)                                                                                       | $\sigma_{eq} = \sigma_F + \sigma_M$           |                                                        | $\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_F + \sigma_M)^2 + 3 \tau_M^2}$ |
| * F, M, A et $W_b$ sont des valeurs en pied de pale<br>** F, M, A et $W_b$ sont des valeurs de l'arbre du rotor |                                               |                                                        |                                                             |

#### 4.7 Facteurs de sécurité et valeurs caractéristiques de matériau

Quand les charges découlent du calcul simplifié des charges de 4.5, les facteurs de sécurité donnés dans le tableau 3 doivent être utilisés. Les valeurs caractéristiques de matériau  $R_{char}$  doivent être tirées des codes nationaux et internationaux en vigueur et doivent être basées sur une probabilité de survie d'au moins 95 % avec une limite de confiance de 95 %. Si des codes reconnus ne sont pas disponibles, les valeurs représentatives du matériau doivent être tirées d'un nombre d'essais statistiquement significatif et la dérivation doit tenir compte des effets d'échelle, des tolérances, des dégradations dues aux actions externes et des défauts non détectés en temps normal.

La *résistance à la traction limite* (RTL) doit être considérée comme la valeur caractéristique de matériau  $R_{char}$  pour des matériaux se déformant plastiquement et non plastiquement, pour les charges ultimes et pour les charges de fatigue.

In the calculation of the stresses, account shall be taken of:

- the stress variations;
- the stress concentrations;
- the magnitude and direction of the resulting loads;
- component dimensions;
- component surface roughness, surface treatment;
- the type of load (bending, tensile, torsion, etc.).

Table 2 gives guidance for the calculation of the equivalent stresses from the unidirectional values.

**Table 2 – Equivalent stresses**

|                                                                                          | Circular blade root*                          | Rectangular blade root*                                | Rotor shaft**                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Axial load                                                                               | $\sigma_F = \frac{F_z}{A}$                    | $\sigma_F = \frac{F_z}{A}$                             | $\sigma_F = \frac{F_x}{A}$                                  |
| Bending                                                                                  | $\sigma_M = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W_b}$ | $\sigma_M = \frac{M_x}{W_{b'x}} + \frac{M_y}{W_{b'y}}$ | $\sigma_M = \frac{M_y}{W_b}$                                |
| Shear                                                                                    | Negligible                                    | Negligible                                             | $\tau_M = \frac{M_x}{2 W_b}$                                |
| Combined (axial + bending)                                                               | $\sigma_{eq} = \sigma_F + \sigma_M$           |                                                        | $\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_F + \sigma_M)^2 + 3 \tau_M^2}$ |
| * F, M, A and $W_b$ are blade root values<br>** F, M, A and $W_b$ are rotor shaft values |                                               |                                                        |                                                             |

#### 4.7 Safety factors and characteristic material values

When the loads are derived from the simplified load calculation of 4.5, the safety factors given in table 3 shall be used. The characteristic material values  $R_{char}$  shall be taken from recognized national or international codes, and shall be based on not less than 95 % survival probabilities with 95 % confidence limits. Where recognized codes are not available, the characteristic material values shall be derived from a statistically significant number of tests, and the derivation of the values shall account for scale effects, tolerances, degradation due to external actions, and defects which would not normally be detected.

The *ultimate tensile strength* (UTS) shall be taken as the characteristic material value  $R_{char}$  for both plastically and non-plastically deforming materials, both for fatigue and ultimate loads.

La règle de base est régie par l'équation suivante (15)

$$\sigma_d \leq \frac{R_{char}}{\gamma} \quad (15)$$

Les valeurs du facteur de sécurité à appliquer dépendent du cas de charge (fatigue ou charges limites) et du type de matériau (matériaux plastiquement ou non plastiquement déformable). Les valeurs à utiliser dans le calcul simplifié sont données au tableau 3.

**Tableau 3 – Facteurs de sécurité**

| Cas de charge                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Acier | Matériaux ne se déformant pas plastiquement (par exemple bois, composites) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------|
| Cas de charge A (fatigue)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 10    | 10                                                                         |
| Cas de charge B, C, D, E, F (charges ultimes)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2     | 3                                                                          |
| NOTE – Pour les parties soudées en acier, la contrainte limite de fatigue ne doit pas dépasser 40 MPa. Le facteur de sécurité pour le cas de charge A inclut un facteur de conversion, depuis la résistance à la traction limite jusqu'à la limite de fatigue, égale à 8 pour les composites et à 10 pour l'acier. Le facteur matériau pour les composites est de 1,25 et 1,0 pour l'acier. Le facteur de charge dans les deux cas est égal à 1,0. |       |                                                                            |

Dans tous les autres cas, on doit appliquer les facteurs de sécurité et les valeurs caractéristiques de matériau en accord avec la CEI 1400-1.

## 5 Protection des petits aérogénérateurs (PAG)

### 5.1 Généralités

Un ou des systèmes de protection doivent être fournis si nécessaire pour maintenir le PAG à l'intérieur des limites de conception. En particulier les moyens doivent être disponibles afin de prévenir que la vitesse de rotation limite de calcul  $n_{max}$  ne soit dépassée. Une procédure sûre pour arrêter le PAG doit être précisée par le constructeur, y compris une spécification de la vitesse maximale du vent et les autres conditions dans lesquelles la procédure peut être exécutée.

### 5.2 Exigences de fonctionnement du système de protection

5.2.1 Le système combiné de contrôle et de protection doit être conçu pour être à sûreté intégrée (fail-safe). En général, il doit être capable de protéger le PAG dans tous les cas de défaillance isolée ou de défaut d'une source d'alimentation ou d'un composant à durée de vie limitée du système de protection.

5.2.2 La fonction de protection doit avoir priorité sur la fonction de contrôle en cas de conflit.

5.2.3 Le système de protection doit être capable de fonctionner d'une manière satisfaisante quand le PAG est sous contrôle manuel ou automatique.

The design requirement to be met is expressed by equation (15):

$$\sigma_d \leq \frac{R_{char}}{\gamma} \quad (15)$$

The values for the safety factor to be applied depend on the load case (fatigue or ultimate loads), and on the type of material (plastically or non-plastically deforming materials). The values to be used in the simplified calculation are given in table 3.

**Table 3 – Safety factors**

| Load case                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Steel | Non-plastically deforming materials:<br>(for example wood, composites) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------|
| Load case A<br>(fatigue)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 10    | 10                                                                     |
| Load cases B, C, D, E, F<br>(ultimate loads)                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2     | 3                                                                      |
| NOTE – For welded steel components, the fatigue limit stress shall not exceed 40 MPa. The safety factor for load case A includes a conversion factor from ultimate tensile strength to the fatigue strength of 8 for composites and 10 for steel. The material factor for composites is 1,25 and for steel 1,0. The load factor in both cases is 1,0. |       |                                                                        |

In all other cases, safety factors and characteristic material values shall be applied in accordance with IEC 1400-1.

## 5 SWTGS protection

### 5.1 General

Where necessary, a protection system or systems shall be provided to keep the SWTGS within its design limits. In particular, there shall be means to prevent the rotational speed design limit  $n_{max}$  being exceeded. A safe procedure for shut-down of the SWTGS shall be defined by the manufacturer, including a specification of the maximum wind and other conditions under which the procedure may be carried out.

### 5.2 Functional requirements of the protection system

5.2.1 The combined control and protection system shall be designed to be fail-safe. In general, it shall be able to protect the SWTGS from any single failure or fault in a power source, or in any non-safe-life component within the protection system.

5.2.2 The protection function shall overrule the control function in cases of conflict.

5.2.3 The protection system shall be capable of satisfactory operation when the turbine is under manual or automatic control.

5.2.4 Des mesures doivent être prises pour éviter la modification accidentelle ou non autorisée du système de protection

## 6 Structure de support

### 6.1 Généralités

La structure de support fait partie intégrante du PAG et doit être conçue pour résister aux charges de conception auxquelles elle sera soumise affectées des facteurs de sécurité recommandés dans l'article 4. La structure de support doit être telle qu'il n'y aura pas de danger de contact accidentel avec les parties mobiles du PAG, de la part de personnes ou d'animaux. La structure de support peut être conçue de différentes formes: tours ou autres systèmes fixes.

### 6.2 Tours

Celles-ci peuvent être soit indépendantes soit tenues par des haubans. Les tours doivent être conçues pour résister aux charges maximales (y compris les facteurs de sécurité) relatives à la conception du PAG. Les tours doivent être faites de matériaux compatibles avec leur fonction et doivent comporter une protection de longue durée contre l'environnement telle que la galvanisation ou l'anodisation selon les besoins. Tous les boulons ainsi que les dispositifs de verrouillage des attaches doivent être fournis avec toutes instructions concernant les couples de serrage. Des haubans appropriés doivent être fournis si besoin est et les moyens de verrouillage dûment précisés. Il convient de prendre soin de ne pas favoriser la corrosion électrolytique dans le cas d'utilisation de matériaux hétérogènes.

### 6.3 Fondations et ancrages

On doit fournir les instructions nécessaires, en ce qui concerne la fondation et ses ancrages, pour qu'ils résistent aux charges nominales du PAG (y compris les coefficients de sécurité, voir article 4).

On doit prendre en considération les conditions du sol.

### 6.4 Autres structures de support

Là où un PAG est attaché à une structure de support existante, on doit utiliser des dispositifs d'amarrage et de liaison appropriés au cas de charge. Ils doivent être considérés avec le même point de vue en ce qui concerne les cas de charge de calcul et la protection contre la corrosion. Les PAG, dans certains cas particuliers, tels que la charge des batteries à bord d'un navire, doivent avoir des dispositifs appropriés à la fonction et au lieu. Dans des circonstances spéciales pareilles où le public n'a pas accès, la nécessité de moyens de protection à proximité des pièces tournantes peut être abdiquée.

## 7 Système électrique des petits aérogénérateurs

### 7.1 Généralités

Le système électrique du PAG et chaque élément de l'équipement électrique doivent être conformes aux normes CEI appropriées. Lorsque les PAG sont reliés à un réseau électrique, on doit appliquer l'article 6 de la CEI 1400-1. Chaque élément de l'équipement électrique doit résister à toutes les conditions d'environnement de conception prévues sur le site d'accueil de même qu'aux contraintes mécaniques, chimiques et thermiques auxquelles le PAG peut être soumis pendant son fonctionnement.

5.2.4 Measures shall be taken to prevent the accidental or unauthorized adjustment of the protection system.

## 6 Support structure

### 6.1 General

The support structure is an integral part of the SWTGS, and shall be designed to withstand the appropriate design loads, including the safety factors prescribed in clause 4. The support structure shall be such that accidental contact, by people or livestock, with the moving parts of the SWTGS is avoided. The support structure may take several forms: towers or other fixtures.

### 6.2 Towers

These can be either free-standing or supported by guys. Towers shall be adequately designed to withstand the maximum loads (including safety factors) appropriate to the SWTGS design. All components shall be made with materials suited to the task, and shall incorporate long-life environmental protection such as galvanising or anodising, as appropriate. All bolts and fastener-locking devices shall be provided and torque instructions given. Suitable guys shall be supplied, if appropriate, and means of fastening clearly stated. Care should be taken, where dissimilar materials are used, not to encourage electrolytic corrosion.

### 6.3 Foundations and anchors

Foundation and anchor designs adequate to withstand the SWTGS design loading (with safety factors, see clause 4) shall be provided.

Consideration of soil conditions shall be made.

### 6.4 Other support structures

Fixtures and attachments appropriate to the loading shall be made where a SWTGS is fastened to an existing support structure. These shall be considered in the same way from a design loads and corrosion protection viewpoint. SWTGS in special circumstances, such as for battery charging aboard a vessel, shall have fixtures appropriate to the design and the position. In such special circumstances, where the general public does not have access, the need for protection near the moving parts may be waived.

## 7 Electrical system of the SWTGS

### 7.1 General

The electrical system of a SWTGS, and every item of electrical equipment used in it, shall comply with the relevant IEC standards. When a SWTGS connected to an electrical power network, clause 6 of IEC 1400-1 shall be applied. Every item of electrical equipment shall be able to withstand all the design environmental conditions assumed for the installation site, as well as the mechanical, chemical and thermal stresses to which the SWTGS may be subjected during operation.

Si toutefois un élément de l'équipement électrique ne possède pas, de par sa conception, les attributs correspondant à son emplacement, il peut être utilisé, à condition qu'une protection additionnelle adéquate soit fournie par l'ensemble des constituants du système électrique du PAG.

Chaque élément de l'équipement électrique sélectionné sur la base de ses caractéristiques de puissance doit être approprié au service demandé par l'équipement, en prenant en compte les cas de charge de conception qui peuvent se produire.

## 7.2 *Compatibilité électromagnétique*

Chaque matériel électrique doit avoir un niveau approprié de protection contre les perturbations électromagnétiques (CEI 1000).

Tout matériel électrique doit être sélectionné pour éviter des effets nocifs sur d'autres matériels du système électrique et sur l'environnement (CEI CISPR 11).

## 7.3 *Conditions de fonctionnement*

Le constructeur doit préciser les valeurs suivantes, à l'intérieur desquelles le système électrique du PAG pourra fonctionner sans dommages:

- le courant assigné;
- la tension assignée et les variations admises à l'enclenchement du PAG;
- la vitesse assignée du générateur.

## 7.4 *Protection contre les contacts directs et indirects*

Les personnes et les animaux doivent être protégés contre les dangers provenant de contacts directs ou indirects avec les pièces électriques du PAG sous tension (CEI 364). La protection contre les contacts directs avec les éléments électriques sous tension du PAG doit être au moins le degré IP23 de la CEI 529.

## 7.5 *Dispositifs de contact*

Des dispositifs adéquats doivent être prévus pour permettre d'isoler le système électrique ou le sous-système du PAG de tout générateur de courant pour les besoins de protection, maintenance, essais, détection de pannes ou réparation.

## 7.6 *Mauvais fonctionnement du système électrique*

Le système électrique du PAG doit comprendre des dispositifs appropriés pour fournir une protection contre le mauvais fonctionnement du PAG et du système électrique connecté. Une protection particulière doit être prévue pour tout courant en excès dû à la surcharge et aux courts-circuits.

## 7.7 *Conducteurs*

On doit prendre en considération les contraintes mécaniques, y compris celles résultant de la torsion du câble que pourraient subir les conducteurs pendant l'installation et le fonctionnement.