



Institut luxembourgeois de la normalisation  
de l'accréditation, de la sécurité et qualité  
des produits et services

## ILNAS-EN IEC 61400-21-1:2019

### **Systèmes de génération d'énergie éolienne - Partie 21-1: Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques - Éoliennes**

Windenergieerzeugungsanlagen - Teil  
21-1: Messung und Bewertung der  
elektrischen Kennwerte -  
Windenergieanlagen

Wind energy generation systems - Part  
21-1: Measurement and assessment of  
electrical characteristics - Wind turbines

07/2019



## **Avant-propos national**

Cette Norme Européenne EN IEC 61400-21-1:2019 a été adoptée comme Norme Luxembourgeoise ILNAS-EN IEC 61400-21-1:2019.

Toute personne intéressée, membre d'une organisation basée au Luxembourg, peut participer gratuitement à l'élaboration de normes luxembourgeoises (ILNAS), européennes (CEN, CENELEC) et internationales (ISO, IEC) :

- Influencer et participer à la conception de normes
- Anticiper les développements futurs
- Participer aux réunions des comités techniques

<https://portail-qualite.public.lu/fr/normes-normalisation/participer-normalisation.html>

### **CETTE PUBLICATION EST PROTÉGÉE PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Aucun contenu de la présente publication ne peut être reproduit ou utilisé sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit - électronique, mécanique, photocopie ou par d'autres moyens sans autorisation préalable !

ILNAS-EN IEC 61400-21-1:2019

**NORME EUROPÉENNE**  
**EUROPÄISCHE NORM**  
**EUROPEAN STANDARD**

**EN IEC 61400-21-1**

Juillet 2019

---

ICS 27.180

Version française

**Systèmes de génération d'énergie éolienne - Partie 21-1:  
Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques -  
Éoliennes  
(IEC 61400-21-1:2019)**

Windenergieerzeugungsanlagen - Teil 21-1: Messung und  
Bewertung der elektrischen Kennwerte -  
Windenergieanlagen  
(IEC 61400-21-1:2019)

Wind energy generation systems - Part 21-1: Measurement  
and assessment of electrical characteristics - Wind turbines  
(IEC 61400-21-1:2019)

La présente Norme Européenne a été adoptée par le CENELEC le 2019-06-24. Les membres du CENELEC sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à cette Norme Européenne.

Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du CEN-CENELEC Management Centre ou auprès des membres du CENELEC.

La présente Norme Européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CENELEC dans sa langue nationale, et notifiée au CEN-CENELEC Management Centre, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CENELEC sont les comités électrotechniques nationaux des pays suivants: Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Macédoine du Nord, République de Serbie, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse et Turquie.



Comité Européen de Normalisation Electrotechnique  
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung  
European Committee for Electrotechnical Standardization

**CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Bruxelles**

## Avant-propos européen

Le texte du document 88/711/FDIS, future édition 1 de IEC 61400-21-1, préparé par le TC 88 "Systèmes de génération d'énergie éolienne", a été soumis au vote parallèle IEC-CENELEC et approuvé par le CENELEC en tant que EN IEC 61400-21-1:2019.

Les dates suivantes sont fixées:

- date limite à laquelle ce document doit être mis en application au niveau national par publication d'une norme nationale identique ou par entérinement (dop) 2020-03-24
- date limite à laquelle les normes nationales conflictuelles doivent être annulées (dow) 2022-06-24

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. Le CENELEC ne saurait être tenu pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

## Notice d'entérinement

Le texte de la Norme internationale IEC 61400-21-1:2019 a été approuvé par le CENELEC comme Norme Européenne sans aucune modification.

Dans la version officielle, ajouter dans la Bibliographie la note suivante pour la norme indiquée:

IEC 61400-27-1:2015    NOTE    Harmonisée comme EN 61400-27-1:2015 (non modifiée)

## Annexe ZA

### (normative)

### Références normatives à d'autres publications internationales avec les publications européennes correspondantes

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

NOTE 1 Dans le cas où une publication internationale est modifiée par des modifications communes, indiqué par (mod), l'EN/le HD correspondant(e) s'applique.

NOTE 2 Les informations les plus récentes concernant les dernières versions des Normes Européennes listées dans la présente annexe sont disponibles à l'adresse suivante: [www.cenelec.eu](http://www.cenelec.eu).

<u>Publication</u>	<u>Année</u>	<u>Titre</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Année</u>
IEC 61000-3-2	2014	Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-2: Limites - Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils $\leq 16$ A par phase)	EN 61000-3-2	2014
IEC 61000-3-3	-	Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-3: Limites - Limitation des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension, pour les matériels ayant un courant assigné $< 16$ A par phase et non soumis à un raccordement conditionnel	EN 61000-3-3	-
IEC 61000-4-7	2002	Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 4-7: Techniques d'essai et de mesure - Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'interharmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés	EN 61000-4-7	2002
+ A1	2008		+ A1	2009
IEC 61000-4-15	2010	Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 4-15: Techniques d'essai et de mesure - Flickermètre - Spécifications fonctionnelles et de conception	EN 61000-4-15	2011
IEC 61000-4-30	-	Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 4-30: Techniques d'essai et de mesure - Méthodes de mesure de la qualité de l'alimentation	EN 61000-4-30	-
IEC 62008	-	Caractéristiques de performance et méthodes d'étalonnage pour les systèmes d'acquisition de données numériques et logiciels appropriés	EN 62008	-
IEC/TR 61000-3-6	-	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems	-	-
IEC/TR 61000-3-7:2008	-	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems	-	-
IEC/TR 61000-3-14	-	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems	-	-
IEC/TR 61869-103	2012	Instrument transformers - The use of instrument transformers for power quality measurement	-	-



# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



**Wind energy generation systems –  
Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind  
turbines**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne –  
Partie 21-1: Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques – Éoliennes**

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	155
INTRODUCTION.....	157
1 Domaine d'application .....	158
2 Références normatives .....	159
3 Termes et définitions .....	159
4 Symboles et unités .....	171
5 Termes abrégés .....	172
6 Spécifications relatives aux éoliennes .....	173
7 Conditions d'essai et systèmes d'essai .....	173
7.1 Généralités .....	173
7.2 Vue d'ensemble des niveaux d'essai exigés .....	173
7.3 Validité de l'essai.....	174
7.4 Conditions d'essai.....	175
7.5 Matériel d'essai.....	176
8 Mesurage et essai des caractéristiques électriques .....	178
8.1 Généralités .....	178
8.2 Aspects liés à la qualité de puissance .....	178
8.2.1 Généralités .....	178
8.2.2 Papillotement en fonctionnement continu.....	178
8.2.3 Variation de papillotement et de tension pendant les opérations de commutation .....	182
8.2.4 Harmoniques, interharmoniques et composantes à fréquence plus élevée .....	184
8.3 Fonctionnement en régime établi .....	187
8.3.1 Généralités .....	187
8.3.2 Observation de la puissance active en fonction de la vitesse du vent.....	187
8.3.3 Puissance maximale .....	190
8.3.4 Caractéristiques puissance réactive ( $Q = 0$ ).....	191
8.3.5 Capacité de puissance réactive .....	192
8.3.6 Dépendance de la tension du diagramme QP .....	193
8.3.7 Taux de déséquilibre .....	194
8.4 Contrôle de performance .....	195
8.4.1 Généralités .....	195
8.4.2 Contrôle de puissance active.....	195
8.4.3 Limitation du taux de variation de la puissance active.....	198
8.4.4 Contrôle de fréquence .....	201
8.4.5 Inertie synthétique .....	204
8.4.6 Contrôle de puissance réactive.....	205
8.5 Performances dynamiques .....	208
8.5.1 Généralités .....	208
8.5.2 Capacité d'alimentation continue en cas de défaillance .....	208
8.6 Déconnexion du réseau .....	216
8.6.1 Généralités .....	216
8.6.2 Protection du réseau .....	216
8.6.3 Essai du taux de variation de fréquence RoCoF ( $df/dt$ ) du dispositif de protection .....	222
8.6.4 Essai de reconnexion .....	223

Annexe A (informative) Rapport .....	224
A.1 Vue d'ensemble .....	224
A.2 Généralités .....	224
A.3 Aspects liés à la qualité de puissance .....	226
A.4 Fonctionnement en régime établi .....	236
A.5 Performance dynamique (voir 8.5) .....	254
A.6 Déconnexion du réseau (voir 8.6) .....	259
Annexe B (informative) Fluctuations de tension et papillotement .....	263
B.1 Fonctionnement continu .....	263
B.2 Opérations de commutation .....	263
B.3 Essai de vérification de la procédure de mesure de papillotement .....	264
B.3.1 Généralités .....	264
B.3.2 Essai des performances de réseau fictif .....	266
B.3.3 Tension déformée $u_m(t)$ avec de multiples passages par zéro .....	266
B.3.4 Tension déformée $u_m(t)$ avec modulation interharmonique .....	267
B.3.5 Variations de faible fréquence .....	267
B.4 Déduction des définitions .....	268
B.4.1 Coefficient de papillotement .....	268
B.4.2 Facteur de papillotement sur un échelon .....	268
B.4.3 Facteur de variation de tension .....	269
Annexe C (normative) Mesure de la puissance active, de la puissance réactive et de la tension .....	270
C.1 Généralités .....	270
C.2 Convention des signes du générateur .....	270
C.3 Calcul des grandeurs de séquences positives, négatives et égales à zéro .....	271
C.3.1 Calculs du phaseur .....	271
C.3.2 Calcul des grandeurs de séquence positive au moyen de composantes de phaseur .....	274
C.3.3 Calcul des grandeurs de séquence négative au moyen de composantes de phaseur .....	275
C.3.4 Calcul des grandeurs de séquence égale à zéro au moyen de composantes de phaseur .....	276
Annexe D (informative) Évaluation harmonique .....	278
D.1 Généralités .....	278
D.2 Méthodes d'analyse générale .....	278
D.2.1 Généralités .....	278
D.2.2 Tensions harmoniques .....	278
D.2.3 Angles de phase harmoniques et amplitudes .....	278
D.2.4 Analyse statistique .....	282
D.2.5 Ajustement du taux d'échantillonnage .....	282
D.2.6 Détermination de la distorsion de fond de la tension harmonique .....	283
D.2.7 Variations diurnes de la tension et du courant harmoniques .....	283
D.2.8 Mise à l'arrêt des éoliennes environnantes ou des charges .....	284
D.2.9 Harmoniques de courant et de tension sur la puissance .....	284
D.2.10 Commutation des filtres .....	285
D.2.11 Mesures de source normalisée .....	285
D.2.12 Flux de puissance d'harmoniques + mesures de tension, angle de phase .....	286
D.2.13 Harmoniques de tension avec et sans fonctionnement de l'éolienne soumise à l'essai .....	287



D.2.14	Mesures sur différents sites .....	288
D.2.15	Modèle harmonique .....	288
D.3	Détermination de l'amplitude harmonique influencée par les harmoniques spatiaux dans les systèmes DFAG .....	288
Annexe E (informative) Évaluation de la qualité de puissance des éoliennes et des centrales éoliennes .....		290
E.1	Généralités .....	290
E.2	Fluctuations de tension .....	290
E.2.1	Généralités .....	290
E.2.2	Fonctionnement continu .....	291
E.2.3	Opérations de commutation .....	291
E.3	Harmoniques de courant, interharmoniques et composantes à fréquence plus élevée .....	293
Annexe F (informative) Lignes directrices pour le transfert des résultats d'essais à différentes variantes de turbines dans la même plateforme de produits .....		294
Bibliographie .....		298
Figure 1 – Exemple de réponse d'échelon .....		168
Figure 2 – Description du système de mesure, y compris les composants les plus importants .....		177
Figure 3 – Réseau fictif pour la simulation d'une tension fictive .....		179
Figure 4 – Puissance active en fonction de la vitesse du vent (exemple) .....		188
Figure 5 – Nombre de mesures dans les tranches de puissance (exemple) .....		189
Figure 6 – Nombre de mesures dans les tranches de vitesse du vent (exemple) .....		190
Figure 7 – Exemple de diagramme de capacité QP pour une tension donnée au niveau de l'éolienne .....		193
Figure 8 – Ajustement de la valeur de référence de la puissance active .....		196
Figure 9 – Exemple d'échelon de réponse de puissance active .....		197
Figure 10 – Exemple de puissance active disponible et de puissance active en mode de limitation du taux de variation .....		200
Figure 11 – Exemple d'une fonction de contrôle de puissance active $P = f(f)$ , avec les différents points de mesure et les échelons de fréquence associés .....		202
Figure 12 – Inertie synthétique – définitions .....		205
Figure 13 – Essai pour l'erreur statique .....		206
Figure 14 – Essai de la réponse dynamique de l'éolienne (exemple) .....		207
Figure 15 – Exemple de matériel d'essai UVRT .....		209
Figure 16 – Tolérances de la tension de séquence positive pour l'événement de sous-tension avec l'éolienne déconnectée à l'essai .....		210
Figure 17 – Tolérance de l'événement de surtension de séquence positive .....		211
Figure 18 – Exemple d'unité d'essai d'un condensateur OVRT .....		212
Figure 19 – Exemple d'un diagramme d'essai de sous-tension .....		213
Figure 20 – Exemple d'une courbe de capacité de surtension .....		214
Figure 21 – Exemple d'échelon de variation pour l'essai de surtension ou de surfréquence .....		219
Figure 22 – Exemple d'impulsion de variation pour l'essai de surtension ou de surfréquence .....		220
Figure 23 – Exemple des niveaux d'essai pour déterminer le temps de relâchement .....		221
Figure A.1 – Papillotement de tension $P_{st}$ vs. puissance active .....		227

Figure A.2 – Coefficient de papillotement $c(30^\circ)$ vs. puissance active .....	227
Figure A.3 – Coefficient de papillotement $c(50^\circ)$ vs. puissance active .....	227
Figure A.4 – Coefficient de papillotement $c(70^\circ)$ vs. puissance active .....	227
Figure A.5 – Coefficient de papillotement $c(85^\circ)$ vs. puissance active .....	228
Figure A.6 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s .....	228
Figure A.7 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s .....	228
Figure A.8 – Séries temporelles de puissance active et réactive de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s .....	229
Figure A.9 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s .....	229
Figure A.10 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s .....	229
Figure A.11 – Séries temporelles de puissance active et réactive de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s .....	230
Figure A.12 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 1 du générateur vers l'étape 2 .....	230
Figure A.13 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 1 du générateur vers l'étape 2 .....	230
Figure A.14 – Séries temporelles de puissance active et réactive de commutation de l'étape 1 du générateur vers l'étape 2 .....	231
Figure A.15 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 2 du générateur vers l'étape 1 .....	231
Figure A.16 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 2 du générateur vers l'étape 1 .....	231
Figure A.17 – Séries temporelles de puissance active et réactive de commutation de l'étape 2 du générateur vers l'étape 1 .....	231
Figure A.18 – Max. des 95 <sup>es</sup> centiles de courants harmoniques entiers vs. le rang d'harmonique .....	236
Figure A.19 – Max. des 95 <sup>es</sup> centiles de courants interharmoniques vs. la fréquence .....	236
Figure A.20 – Max. des 95 <sup>es</sup> centiles des composantes de courant à fréquence plus élevée vs. la fréquence .....	236
Figure A.21 – Puissance active en fonction de la vitesse du vent .....	237
Figure A.22 – Puissance réactive vs. puissance active .....	238
Figure A.23 – Diagramme QP .....	239
Figure A.24 – Diagramme QP .....	240
Figure A.25 – Diagramme QP .....	241
Figure A.26 – Taux de déséquilibre de courant moyen sur 1 min en puissance active .....	242
Figure A.27 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance active, de la puissance disponible et de la puissance de sortie active mesurée pendant le contrôle de la puissance active pour l'évaluation de l'erreur statique .....	242
Figure A.28 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant le contrôle de la puissance active au cours de l'essai de l'erreur statique .....	242
Figure A.29 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance active, de la puissance disponible et de la puissance de sortie active mesurée pendant le contrôle de la puissance active pour l'évaluation du temps de stabilisation .....	243
Figure A.30 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation .....	243

Figure A.31 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation .....	244
Figure A.32 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation.....	244
Figure A.33 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation .....	244
Figure A.34 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation.....	245
Figure A.35 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation .....	245
Figure A.36 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation.....	246
Figure A.37 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation .....	246
Figure A.38 – Séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau .....	247
Figure A.39 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée.....	247
Figure A.40 – Puissance active mesurée sur la variation de fréquence .....	247
Figure A.41 – Séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau .....	248
Figure A.42 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée.....	248
Figure A.43 – Puissance active mesurée sur la variation de fréquence .....	248
Figure A.44 – Essai 1, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$ .....	249
Figure A.45 – Essai 1, séries temporelles de la vitesse du vent pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$ .....	250
Figure A.46 – Essai 2, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$ .....	250
Figure A.47 – Essai 2, séries temporelles de la vitesse du vent pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$ .....	250
Figure A.48 – Essai 3, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et des valeurs de référence de la variation de fréquence du réseau pour $P > 0,8 \times P_n$ .....	250
Figure A.49 – Essai 3, séries temporelles de la vitesse du vent pour $P > 0,8 \times P_n$ .....	250
Figure A.50 – Essai 4, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $P > 0,8 \times P_n$ .....	251
Figure A.51 – Essai 4, séries temporelles de la vitesse du vent pour $P > 0,8 \times P_n$ .....	251
Figure A.52 – Essai 5, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $v > v_n$ .....	251
Figure A.53 – Essai 5, séries temporelles de la vitesse du vent pour $v > v_n$ .....	251
Figure A.54 – Essai 6, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $v > v_n$ .....	251
Figure A.55 – Essai 6, séries temporelles de la vitesse du vent pour $v > v_n$ .....	252
Figure A.56 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance réactive et de la puissance réactive mesurée au cours de l'essai de contrôle de puissance réactive.....	252

Figure A.57 – Séries temporelles de la puissance active au cours de l'essai de contrôle de puissance réactive .....	253
Figure A.58 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance réactive et de la puissance réactive mesurée au cours de l'essai de réponse dynamique de puissance réactive .....	253
Figure A.59 – Séries temporelles de la puissance active au cours de l'essai de réponse dynamique de puissance réactive .....	253
Figure A.60 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'entrée en creux/hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée .....	254
Figure A.61 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'élimination du creux/de la hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée .....	255
Figure A.62 – Tensions triphasées en tant que valeur efficace (1 période de phase) au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée .....	255
Figure A.63 – Tension de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée .....	255
Figure A.64 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'entrée en creux/hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée .....	257
Figure A.65 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'élimination du creux/de la hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	257
Figure A.66 – Tensions triphasées en tant que valeur efficace (1 période de phase) au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée .....	257
Figure A.67 – Tension fondamentale de séquence positive et négative au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	257
Figure A.68 – Courants triphasés en tant que valeur efficace (1 période de phase) au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée .....	257
Figure A.69 – Courant fondamental de séquence positive et négative au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.70 – Puissance active fondamentale de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.71 – Puissance réactive fondamentale de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.72 – Courant actif fondamental de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.73 – Courant réactif fondamental de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.74 – Vitesse du vent ou puissance disponible au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée .....	259
Figure A.75 – Tension au cours de l'essai de reconnexion de 10 s.....	260
Figure A.76 – Puissance active au cours de l'essai de reconnexion de 10 s, rétablissement compris .....	260
Figure A.77 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée au cours de l'essai de reconnexion de 10 s.....	261
Figure A.78 – Tension au cours de l'essai de reconnexion de 60 s.....	261
Figure A.79 – Puissance active au cours de l'essai de reconnexion de 60 s, rétablissement compris .....	261
Figure A.80 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée au cours de l'essai de reconnexion de 60 s.....	261
Figure A.81 – Tension au cours de l'essai de reconnexion de 600 s.....	261
Figure A.82 – Puissance active au cours de l'essai de reconnexion de 600 s, rétablissement compris .....	262

Figure A.83 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée au cours de l'essai de reconnexion de 600 s .....	262
Figure B.1 – Procédures de mesure du papillotement pendant le fonctionnement continu de l'éolienne .....	263
Figure B.2 – Procédures de mesure des variations de tension et de papillotement pendant les opérations de commutation de l'éolienne .....	264
Figure C.1 – Directions positives de la puissance active, de la puissance réactive, des tensions de phase instantanées et des courants de phase instantanés avec convention du générateur .....	270
Figure C.2 – Exemple de diagrammes de phaseur de puissance de la convention du générateur dans chaque quadrant avec tension de phase instantanée et courant respectifs .....	271
Figure D.1 – Définition des angles de phase de la ligne spectrale dans la convention de générateur – (5 <sup>e</sup> harmonique avec $\alpha_{15} = + 120^\circ$ et $\alpha_{U5} = + 170^\circ$ montré à titre d'exemple, ainsi le 5 <sup>e</sup> angle de phase harmonique est $\varphi_5 = + 170^\circ - 120^\circ = + 50^\circ$ ) .....	279
Figure D.2 – Comparaison de l'agrégation d'amplitude harmonique (pointillés) pas d'amplitude agrégée directement à partir de la transformée de Fourier discrète avec une fenêtre de 10 cycles, (tirets) agrégation de 10 secondes .....	280
Figure D.3 – Comparaison du rapport d'angle dominant (PAR) .....	282
Figure F.1 – Diagramme général d'une éolienne générique (source: IEC 61400-27-1) .....	295
Tableau 1 – Vue d'ensemble des niveaux d'essai exigés .....	174
Tableau 2 – Spécification des exigences pour les appareils de mesure.....	177
Tableau 3 – Nombre de séries temporelles de 10 min par tranche de vitesse du vent .....	187
Tableau 4 – Nombre de mesures par tranche de puissance (10 min en moyenne) .....	188
Tableau 5 – Valeurs de puissance active maximale mesurée .....	191
Tableau 6 – Précision des valeurs de contrôle de la puissance active.....	198
Tableau 7 – Résultats de l'essai de référence de puissance active .....	198
Tableau 8 – Calcul du taux de variation de la puissance active .....	200
Tableau 9 – Exemple de réglages pour la fonction de puissance active dépendante de la fréquence.....	203
Tableau 10 – Essai pour l'erreur statique .....	208
Tableau 11 – Essai pour la réponse dynamique .....	208
Tableau 12 – Exemple d'événements de sous-tension .....	213
Tableau 13 – Exemple d'essais de surtension.....	215
Tableau 14 – Essais de protection du réseau.....	218
Tableau A.1 – Rapport général d'informations.....	224
Tableau A.2 – Données générales .....	225
Tableau A.3 – Données nominales.....	225
Tableau A.4 – Conditions d'essai .....	226
Tableau A.5 – Coefficient de papillotement par tranche de puissance (95 <sup>e</sup> centile).....	226
Tableau A.6 – Mise en marche à la vitesse de démarrage .....	228
Tableau A.7 – Démarrage en puissance nominale active .....	229
Tableau A.8 – Cas le plus défavorable de commutation entre générateurs.....	230
Tableau A.9 – Informations générales relatives aux essais .....	232
Tableau A.10 – 95 <sup>e</sup> centile d'amplitudes harmoniques de 10 min par tranche de puissance .....	232

Tableau A.11 – 95 <sup>e</sup> centile d'amplitudes harmoniques de 10 min par tranche de puissance .....	234
Tableau A.12 – 95 <sup>e</sup> centile d'amplitudes harmoniques de 10 min par tranche de puissance .....	235
Tableau A.13 – Puissance active en fonction de la vitesse du vent (voir 8.3.2) .....	236
Tableau A.14 – Ensemble de données de mesure .....	237
Tableau A.15 – Puissance active maximale .....	237
Tableau A.16 – Caractéristique de la puissance réactive .....	238
Tableau A.17 – Diagramme QP .....	239
Tableau A.18 – Diagramme QP à la tension maximale .....	240
Tableau A.19 – Diagramme QP à la tension minimale .....	241
Tableau A.20 – Diagramme P-IUF <sub>i</sub> .....	241
Tableau A.21 – Informations générales relatives aux essais .....	242
Tableau A.22 – Erreur statique .....	242
Tableau A.23 – Réponse dynamique .....	243
Tableau A.24 – Informations générales relatives aux essais .....	243
Tableau A.25 – Calcul du taux de variation de la puissance active au démarrage .....	243
Tableau A.26 – Informations générales relatives aux essais .....	244
Tableau A.27 – Limitation du taux de variation de la puissance active au démarrage .....	244
Tableau A.28 – Informations générales relatives aux essais .....	245
Tableau A.29 – Limitation du taux de variation de la puissance active pendant l'arrêt normal .....	245
Tableau A.30 – Informations générales relatives aux essais .....	245
Tableau A.31 – Limitation du taux de variation de la puissance active en fonctionnement normal .....	246
Tableau A.32 – Informations générales relatives aux essais .....	246
Tableau A.33 – Essai à $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$ .....	247
Tableau A.34 – Essai à $P > 0,8 \times P_n$ .....	248
Tableau A.35 – Résultats inertie synthétique .....	249
Tableau A.36 – Informations générales relatives aux essais .....	252
Tableau A.37 – Erreur statique .....	252
Tableau A.38 – Réponse dynamique .....	253
Tableau A.39 – Résultats pour les essais effectués lorsque l'éolienne n'est pas connectée .....	254
Tableau A.40 – Résultats pour les essais effectués lorsque l'éolienne est connectée .....	256
Tableau A.41 – Protection de tension .....	259
Tableau A.42 – Protection de fréquence .....	259
Tableau A.43 – Essai du circuit de déclenchement complet .....	259
Tableau A.44 – Résultats de l'essai RoCoF .....	260
Tableau A.45 – Informations générales relatives à l'essai RoCoF .....	260
Tableau A.46 – Résultats de l'essai de reconnexion .....	260
Tableau B.1 – Valeurs nominales de la vitesse du vent utilisées pour les essais de vérification .....	265
Tableau B.2 – Fluctuation du courant d'entrée relatif, $\Delta I/I$ , pour le coefficient de papillotement $c(\psi_k) = 2,00 \pm 5 \%$ lorsque $S_{k, fic} = 20 \cdot S_n$ .....	265

Tableau B.3 – Fluctuation du courant d'entrée relatif, $\Delta I/I$ , pour le coefficient de papillotement $c(\psi_k) = 2,00 \pm 5 \%$ lorsque $S_{k, \text{fic}} = 50 \cdot S_n$ .....	266
Tableau B.4 – Caractéristiques d'essai pour la tension déformée avec de multiples passages par zéro .....	267
Tableau D.1 – Exemple de présentation des résultats de mesures .....	287
Tableau E.1 – Spécifications des exposants conformément à l'IEC TR 61000-3-6 .....	293
Tableau F.1 – Principales composantes influençant les caractéristiques électriques de l'éolienne .....	296