

# **Technique d'équilibrage**

**Springer**

*Paris*

*Berlin*

*Heidelberg*

*New York*

*Hong Kong*

*Londres*

*Milan*

*Tokyo*

Hatto Schneider

# **Technique d'équilibrage**

**Traduction de la 6<sup>e</sup> édition allemande**

 Springer

## **Hatto Schneider**

Rotor Balancing Consulting  
Im Kantelacker 39  
64646 Heppenheim  
Allemagne

### *Traduction*

Adelink - Daniel Gondouin  
[www.adelink.com](http://www.adelink.com)

---

Traduit de la 6<sup>e</sup> édition allemande  
*Auswuchttechnik* by Hatto Schneider  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003  
Springer est membre du groupe Springer Science + Business Media

ISBN-10 : 2-287-32750-9 Springer Paris Berlin Heidelberg New York  
ISBN-13 : 978-2-287-32802-2 Springer Paris Berlin Heidelberg New York  
© Springer-Verlag France, Paris 2006  
Imprimé en France

Cet ouvrage est soumis au copyright. Tous droits réservés, notamment la reproduction et la représentation, la traduction, la réimpression, l'exposé, la reproduction des illustrations et des tableaux, la transmission par voie d'enregistrement sonore ou visuel, la reproduction par microfilm ou tout autre moyen ainsi que la conservation des banques de données. La loi française sur le copyright du 9 septembre 1965 dans la version en vigueur n'autorise une reproduction intégrale ou partielle que dans certains cas, et en principe moyennant le paiement des droits. Toute représentation, reproduction, contrefaçon ou conservation dans une banque de données par quelque procédé que ce soit est sanctionnée par la loi pénale sur le copyright.

L'utilisation dans cet ouvrage de désignations, dénominations commerciales, marques de fabrique, etc. même sans spécification ne signifie pas que ces termes soient libres de la législation sur les marques de fabrique et la protection des marques et qu'ils puissent être utilisés par chacun.

SPIN : 11682295

*Couverture : Jean-François Montmarché*

# Avant-propos

Livre de référence depuis de nombreuses années dans le domaine, *Auswuchttechnik*, souvent qualifié de « bible de l'équilibrage » méritait d'être accessible au plus grand nombre en langue française.

Écrit en langue allemande par un ancien collaborateur de la société, Schenck France se devait de prendre l'initiative de cette édition en langue française afin de répondre aux attentes d'un public toujours plus nombreux faisant confiance à notre marque.

Professionnels de l'industrie, de l'automobile, de l'aéronautique, spécialistes de la mécanique, experts de la prestation d'équilibrage, enseignants et élèves des lycées et écoles techniques, c'est en pensant à vous que nous avons décidé de réaliser ce livre.

Vous trouverez dans *Technique d'équilibrage* la synthèse des connaissances et des pratiques en matière d'équilibrage ainsi que les principales références aux normes qui régissent ce domaine d'activité, retracées de manière simple, accessibles et abondamment illustrées.

Nous tenons ici à remercier tout particulièrement quelques personnes ayant joué un rôle clé dans la réalisation de ce projet.

Tout d'abord, M. Franck Descours, Directeur de l'activité Schenck RoTec en France, qui, par son expertise des métiers de l'équilibrage, sa connaissance de la langue allemande et son implication personnelle, a apporté son aide à la validation technique de la traduction.

Mes remerciements vont également à M. Didier Hans, Directeur Commercial de Schenck RoTec et à M. Alain Boidin, Directeur Après-Vente de Schenck RoTec qui l'ont épaulé à chaque étape de cette réalisation.

Sans eux et sans leur dévouement, ce projet n'aurait pu voir le jour.

L'ensemble des équipes de Schenck en France se joint à moi pour vous souhaiter une lecture à la fois riche et plaisante.

[www.schenck-france.fr](http://www.schenck-france.fr)

Bruno Braure  
Schenck France  
Président

## Préface à la 6<sup>e</sup> édition allemande

Deux ans après la 5<sup>e</sup> édition, qui avait été totalement remaniée, voici l'édition suivante de l'ouvrage *Technique d'équilibrage*. Seuls deux chapitres ont été profondément modifiés :

- dans la 5<sup>e</sup> édition nous avons déjà signalé que les normes pour la protection sur les machines à équilibrer devaient être révisées en raison des nouvelles évolutions. Depuis, la nouvelle édition de la norme ISO 7475 a été publiée. Le chapitre 15 – « Protection lors de l'équilibrage » – a été mis à jour ;
- certains termes et définitions de la technique d'équilibrage ont été discutés au niveau international et modifiés dans la nouvelle édition de la norme ISO 1925. Même si l'unanimité n'a pas encore été trouvée, le chapitre 17.2 a été modifié en conséquence : il précise certaines contradictions et les améliorations envisageables de la norme actuelle. Des modifications ont été effectuées avant tout dans les domaines Balourd (17.2.3) et Rotors Flexibles (17.2.6).

La préface de la 5<sup>e</sup> édition est reproduite sans modification.

Heppenheim, décembre 2002

Hatto Schneider

## Préface à la 5<sup>e</sup> édition

Les premiers rotors, notamment les moulins à vent ou à eau, ont vraisemblablement été équilibrés dès l'Antiquité. C'est à partir du début de l'ère industrielle, au XIX<sup>e</sup> siècle, puis au XX<sup>e</sup> siècle que cette activité est devenue vraiment intéressante, lorsque de nouveaux types importants de balourds ont été découverts.

Pratiquement tout ce qui tourne ou qui est monté sur des paliers est aujourd'hui équilibré. La gamme des rotors va de l'induit d'un modèle réduit de chemin de fer au générateur d'une centrale électrique, du disque dur d'un ordinateur aux satellites de communication, du sèche-cheveux aux réacteurs d'avions. Le développement de ces machines s'accélère encore au début de ce nouveau millénaire, avec des concepts inédits, des matériaux, des traitements et des séries encore plus grandes.

Les exigences envers la technique d'équilibrage sont donc de plus en plus grandes, aussi bien en théorie qu'en pratique. Les connaissances du contexte et

des activités connexes à ce domaine spécifique augmentent donc en conséquence.

L'ouvrage *Technique d'équilibrage* a été publié pour la première fois il y a trente ans chez VDI Verlag, et à été réédité plusieurs fois. Il a été bien accueilli dans le monde entier, et a été notamment traduit en anglais et en chinois.

La 5<sup>e</sup> édition a été prise en charge par Springer-Verlag en coopération avec la VDI. Elle a été profondément remaniée et décrit l'état des connaissances, tel qu'il apparaît aujourd'hui dans les normes et directives ISO, DIN ISO et VDI.

En de nombreux points, nous mentionnons ou expliquons des aspects complémentaires, en effectuant par exemple une description exhaustive du balourd des rotors, depuis l'état rigide jusqu'à l'état flexible. Certains de ses aspects demanderont encore plusieurs années pour arriver à maturité dans une norme ou directive.

Cet ouvrage veut permettre une découverte systématique de ce domaine spécifique, aussi bien pour un étudiant que pour un professionnel. C'est avec cet objectif qu'il a été réorganisé, et illustré de schémas, d'illustrations et de tableaux actuels.

Il peut également servir d'ouvrage de consultation pour les personnes expérimentées dans la construction, l'acquisition de machines, la préparation des travaux, la production, le développement et la recherche. En ce sens, l'indice a été détaillé et les références croisées dans le texte sont moins nombreuses.

L'équilibrage d'un rotor impose certaines opérations spécifiques, qui varient suivant la fonction, la construction, le processus de fabrication choisi, le nombre de pièces prévu, les directives de réception, les conditions ultérieures de service, etc. C'est pourquoi l'équilibrage prend constamment de nouvelles formes, ce qui rend cette petite étape du processus de production si intéressante, voire la transforme en un véritable défi de technique et d'organisation.

La diversité du problème apparaît clairement lorsque l'on pense que le coût par pièce peut aller de quelques centimes à plusieurs milliers d'euros dans certains cas.

La recherche d'une solution optimale pour cette opération complexe ne s'appuie pas sur quelques recettes, mais sur une connaissance solide des bases théoriques de l'équilibrage, de son exécution pratique et de la performance des différents systèmes d'équilibrage.

J'espère que cet ouvrage sera un fidèle compagnon pour tous ceux qui affrontent en permanence de nouveaux problèmes d'équilibrage dans leur activité quotidienne.

# Sommaire

	<b>Avant-propos</b> .....	V
	<b>Préface à la 6<sup>e</sup> édition allemande</b> .....	VII
<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	1
1.1	Développement de la technique d'équilibrage .....	2
1.2	Normes et directives .....	8
<b>2</b>	<b>Principes physiques</b> .....	9
2.1	Grandeurs physiques .....	9
2.2	Scalars et vecteurs .....	9
2.2.1	Addition .....	10
2.2.2	Multiplication .....	10
2.3	Système d'unités.....	12
2.3.1	Grandeurs fondamentales .....	12
2.3.2	Grandeurs dérivées .....	12
2.4	Lois physiques .....	13
2.4.1	Équation fondamentale de la dynamique .....	13
2.4.2	Gravitation.....	14
2.5	Rotation .....	14
2.5.1	Angle plan .....	15
2.5.2	Vitesse angulaire .....	16
2.5.3	Vitesse tangentielle.....	16
2.5.4	Accélération angulaire .....	17
2.5.5	Accélération tangentielle .....	17
2.5.6	Couple d'entraînement .....	17
2.5.7	Moment d'inertie .....	18
2.5.8	Accélération radiale .....	18
2.5.9	Force centrifuge .....	19
2.6	Oscillations .....	20
2.6.1	Oscillateur simple sous l'action de la force centrifuge.....	20
2.6.1.1	Domaine sous-critique .....	23
2.6.1.2	Domaine de résonance .....	24
2.6.1.3	Domaine surcritique .....	24
2.6.2	Degrés de liberté .....	25



---

2.6.3	Raideur dynamique .....	25
<b>3</b>	<b>Théorie du rotor rigide .....</b>	<b>27</b>
3.1	Définitions et explications .....	28
3.2	Balourd d'un rotor en forme de disque .....	30
3.3	Balourd d'un rotor (cas général) .....	31
3.4	Balourd statique .....	33
3.5	Moment de balourd .....	36
3.6	Balourd quasi statique .....	37
3.7	Balourd dynamique .....	39
3.8	Représentation d'un balourd .....	40
3.8.1	Dernière approche .....	44
<b>4</b>	<b>Théorie du rotor flexible .....</b>	<b>47</b>
4.1	Rotor plastique .....	48
4.2	Rotor à corps élastique .....	48
4.3	Rotor à arbre élastique .....	50
4.3.1	Rotor à arbre élastique idéal .....	51
4.3.2	Influence de la rigidité des paliers .....	52
4.3.3	Fréquence à l'arrêt et vitesse critique .....	54
4.3.4	Rotor à arbre élastique (cas général) .....	55
4.3.5	Action des balourds sur les rotors à arbre élastique .....	55
4.3.5.1	Balourds modaux .....	56
4.3.5.2	Balourd modal équivalent .....	56
4.3.6	Correction d'un rotor à arbre élastique .....	57
4.3.6.1	Premier mode de flexion .....	58
4.3.6.2	Deuxième mode de flexion.....	59
4.3.6.3	Troisième mode de flexion .....	60
<b>5</b>	<b>Tolérances et évaluation du rotor rigide .....</b>	<b>61</b>
5.1	Critères d'évaluation .....	61
5.1.1	Masse du rotor et balourd résiduel admissible.....	61
5.1.2	Vitesse de service et balourd résiduel admissible .....	62
5.2	Détermination du balourd résiduel admissible .....	62
5.2.1	Classes de qualité et groupes de rotors .....	63
5.2.2	Détermination expérimentale .....	65
5.2.3	Détermination à partir des forces admissibles aux paliers .....	66
5.3	Répartition sur les plans de correction.....	66
5.3.1	Rotors avec un plan de correction .....	67
5.3.2	Rotor avec deux plans de correction .....	68
5.4	Calcul du balourd résiduel .....	73
5.5	Calcul de la qualité d'équilibrage atteinte .....	75
5.6	Contrôle du balourd .....	76
<b>6</b>	<b>Tolérances et évaluation du rotor flexible .....</b>	<b>77</b>
6.1	Tolérances de balourd selon DIN ISO 11342 .....	77

6.2	Proposition de l'auteur .....	78
6.2.1	Représentation du balourd d'un rotor .....	78
6.2.2	Limites de tolérance .....	79
6.2.3	Distribution sur plusieurs balourds .....	80
6.2.4	Différents déséquilibres .....	81
6.2.4.1	Rotor équilibré .....	81
6.2.4.2	Équilibrage en un plan .....	81
6.2.4.3	Équilibrage en deux plans .....	82
6.2.4.4	Équilibrage en plusieurs plans .....	83
6.2.5	Proposition .....	84
6.2.6	Vitesse nominale .....	85
6.3	Évaluation d'un balourd .....	85
6.3.1	Machine à équilibrer basse vitesse .....	86
6.3.2	Machine ou installation à équilibrer haute vitesse .....	86
6.3.2.1	Vibrations admissibles .....	86
6.3.2.2	Balourds admissibles .....	87
6.3.3	Au banc d'essai .....	87
6.3.4	Sur site .....	87
6.4	Vulnérabilité et sensibilité au déséquilibre des machines .....	88
6.4.1	Classification des vulnérabilités des machines .....	88
6.4.2	Domaines des sensibilités modales .....	89
6.4.3	Courbes enveloppes .....	90
6.4.4	Détermination expérimentale des sensibilités modales .....	93
<b>7</b>	<b>Procédures d'équilibrage des rotors rigides .....</b>	<b>95</b>
7.1	Corps sans arbre propre .....	95
7.1.1	Balourds provoqués par le montage de prise de pièce .....	95
7.1.2	Méthode d'équilibrage par retournement .....	99
7.1.3	Autres applications de la méthode .....	102
7.1.4	Faux-arbres, adaptateurs .....	102
7.2	Rotors assemblés .....	102
7.2.1	Interchangeabilité des pièces .....	103
7.2.2	Corrections des erreurs d'assemblage .....	104
7.2.3	Masses équivalentes ( <i>dummies</i> ) .....	104
7.3	Rotors avec clavettes .....	104
7.3.1	Arbre avec clavette entière .....	105
7.3.2	Arbre avec demi-clavette .....	105
7.3.3	Influence sur le balourd .....	106
7.3.4	Mémorisation de l'influence .....	106
7.3.5	Mesures de compensation à la fabrication .....	106
<b>8</b>	<b>Procédures d'équilibrage des rotors flexibles .....</b>	<b>107</b>
8.1	Catégories de rotors .....	107
8.1.1	Catégories de base des rotors à arbre élastique .....	107
8.1.2	Principes d'équilibrage .....	108
8.1.3	Rotor avec disques .....	109

8.1.3.1	Rotor à disque unique .....	109
8.1.3.2	Rotor à deux disques .....	110
8.1.3.3	Rotor à plus de deux disques .....	110
8.1.4	Rotor à tronçons rigides .....	111
8.1.5	Rotor cylindrique .....	112
8.1.6	Rotor intégral .....	112
8.1.7	Combinaisons .....	112
8.1.8	Cas de réparation .....	112
8.2	Procédures d'équilibrage .....	113
8.2.1	Procédure A : équilibrage en un plan .....	113
8.2.2	Procédure B : équilibrage en deux plans .....	113
8.2.3	Procédure C : équilibrage des différentes pièces avant le montage .....	114
8.2.4	Procédure D : équilibrage après limitation du balourd initial .....	114
8.2.5	Procédure E : équilibrage pas à pas pendant le montage .....	114
8.2.5.1	Problème des transferts de balourds .....	114
8.2.5.2	Solution .....	115
8.2.6	Procédure F : équilibrage dans des plans optimaux .....	116
8.2.7	Procédure G : équilibrage pour différentes vitesses .....	116
8.2.7.1	Développement en série .....	117
8.2.7.2	Comportement en réponse .....	118
8.2.7.3	Rapport de correction .....	118
8.2.7.4	Recommandation .....	119
8.2.7.5	Assistance du calculateur .....	120
8.2.8	Procédure H : équilibrage à la vitesse nominale .....	121
8.2.9	Procédure I : équilibrage à une vitesse donnée .....	121
8.2.10	Procédure pour un comportement plastique .....	122
<b>9</b>	<b>Description de l'opération d'équilibrage</b> .....	<b>123</b>
9.1	Rotor avec arbre propre .....	123
9.1.1	Description tabulaire du type de rotor .....	124
9.1.2	Autres tableaux .....	124
9.1.3	Données maximales .....	124
9.1.4	Informations supplémentaires sur les rotors .....	124
9.2	Rotor sans arbre propre.....	126
9.3	Rotor à haute vitesse .....	128
<b>10</b>	<b>Machines à équilibrer</b> .....	<b>129</b>
10.1	Offre et documentation technique .....	129
10.1.1	Machines à équilibrer horizontales .....	129
10.1.1.1	Limites pour la masse du rotor et le balourd .....	129
10.1.1.2	Efficacité du cycle de mesure .....	130
10.1.1.3	Rapport de réduction du balourd .....	130
10.1.1.4	Dimensions du rotor.....	130
10.1.1.5	Portées de palier .....	132
10.1.1.6	Domaine de réglage des plans de correction .....	132
10.1.1.7	Entraînement .....	132

10.1.1.8	Freinage .....	132
10.1.1.9	Données supplémentaires .....	133
10.1.2	Machines à équilibrer verticales .....	133
10.1.2.1	Limites pour la masse du rotor et le balourd .....	134
10.1.2.2	Dimensions du rotor .....	134
10.1.2.3	Influence du moment de balourd .....	135
10.1.3	Balances d'équilibrage statique .....	136
10.1.4	Machines à équilibrer haute vitesse .....	136
10.1.4.1	Entraînement .....	137
10.1.4.2	Supports de paliers .....	137
10.1.4.3	Dispositif de mesure .....	138
10.2	Détails techniques et leur évaluation .....	138
10.2.1	Entraînement .....	138
10.2.1.1	Moteur à rotor en court-circuit .....	139
10.2.1.2	Moteur à bagues collectrices .....	139
10.2.1.3	Moteur à courant continu .....	139
10.2.1.4	Puissance de l'entraînement .....	140
10.2.1.5	Entraînement par arbre de transmission à cardan .....	140
10.2.1.6	Entraînement par courroie .....	141
10.2.1.7	Entraînement par champ magnétique rotatif .....	143
10.2.1.8	Entraînement propre .....	144
10.2.1.9	Entraînement par air comprimé .....	144
10.2.2	Systèmes d'affichage .....	145
10.2.3	Capteurs .....	147
10.2.4	Frein .....	147
10.2.5	Vitesse .....	147
10.2.6	Étalonnage et réglage de l'instrumentation de mesure .....	148
10.2.6.1	Machines à équilibrer à paliers souples .....	148
10.2.6.2	Machines à équilibrer à paliers rigides .....	149
10.2.7	Fondations .....	150
10.2.8	Plus petit balourd résiduel réalisable $U_{QER}$ .....	151
10.2.9	Paliers .....	151
10.2.9.1	Paliers à galets porteurs .....	151
10.2.9.2	Paliers prismatiques.....	152
10.2.9.3	Paliers lisses .....	152
10.2.9.4	Paliers broche .....	153
10.2.9.5	Paliers de service .....	153
10.2.9.6	Paliers spécifiques .....	154
10.2.10	Moment d'inertie, nombre de cycles .....	155
10.2.11	Traitement de la mesure .....	155
10.2.12	Rotors d'essai, masses d'essai .....	156
10.2.12.1	Rotors d'essai .....	156
10.2.12.2	Masses d'essai .....	157
10.2.13	Surcharge .....	157
10.2.14	Influences de l'environnement .....	158
10.2.15	Rapport de réduction du balourd $RRB$ .....	158
10.2.16	Efficacité .....	158

10.3	Conditions à réunir .....	159
<b>11</b>	<b>Contrôle des machines à équilibrer .....</b>	<b>161</b>
11.1	Statistiques concernant les balourds .....	162
11.1.1	Dispersion circulaire des résultats .....	163
11.1.2	Dispersion annulaire des résultats .....	164
11.1.3	Caractéristiques de distributions normales uni- et bidimensionnelles .....	165
11.1.4	Spécificités supplémentaires.....	166
11.1.5	Contrôle systématique ou par échantillonnage .....	166
11.1.6	Valeurs caractéristiques.....	167
11.1.7	Rejets.....	167
11.2	Rotors d'essai.....	167
11.2.1	Rotors d'essai type A .....	169
11.2.2	Rotors d'essai type B .....	170
11.2.3	Rotors d'essai type C .....	172
11.2.4	Conditions d'essai.....	173
11.3	Essai du plus petit balourd résiduel réalisable $U_{QER}$ .....	176
11.3.1	Conditions initiales.....	176
11.3.2	Correction.....	176
11.3.3	Tests avec masses d'essai.....	177
11.3.4	Interprétation du test $U_{QER}$ .....	177
11.3.5	Test $U_{QER}$ simplifié.....	179
11.4	Test du rapport de réduction du balourd $RRB$ .....	179
11.4.1	Conditions initiales.....	179
11.4.2	Tests avec masses d'essai.....	180
11.4.3	Interprétation du test $RRB$ .....	181
11.4.4	Test $RRB$ simplifié.....	182
11.5	Test du taux d'interaction du moment de balourd $ME$ .....	182
11.5.1	Interprétation du test $ME$ .....	182
11.6	Test de la compensation par retournement .....	183
11.6.1	Conditions initiales.....	183
11.6.2	Tests avec masses d'essai.....	183
11.6.3	Interprétation du test de la compensation par retournement.....	184
<b>12</b>	<b>Correction .....</b>	<b>185</b>
12.1	Types de correction .....	185
12.1.1	Enlèvement de matière .....	186
12.1.2	Déplacement de matière .....	188
12.1.3	Ajout de matière .....	188
12.2	Temps de correction .....	189
12.3	Écarts de correction .....	190
12.3.1	Masses de correction .....	191
12.3.2	Plans de correction .....	191
12.3.3	Rayons de correction .....	191
12.3.3.1	Correction radiale .....	192

---

12.3.3.2	Correction en périphérie .....	192
12.3.3.3	Correction par écartement de deux masses de correction .....	192
12.3.4	Angle des masses de correction .....	192
12.3.5	Écarts acceptables lors de la correction .....	193
12.4	Rapport de réduction du balourd .....	194
<b>13</b>	<b>Préparation et réalisation de l'équilibrage</b> .....	<b>195</b>
13.1	Causes des balourds .....	195
13.2	Effets des balourds .....	196
13.3	Directives de fabrication et indications sur les plans .....	196
13.4	Étude de la correction .....	197
13.5	Préparation de l'opération .....	198
13.6	Chargement et déchargement .....	204
13.7	Préparation du rotor .....	205
13.8	L'équilibrage dans le processus de fabrication .....	206
<b>14</b>	<b>Défauts lors de l'équilibrage</b> .....	<b>207</b>
14.1	Limitation de la qualité d'équilibrage par le rotor .....	207
14.2	Défauts .....	207
14.2.1	Types de défauts .....	207
14.2.1.1	Défauts systématiques .....	208
14.2.1.2	Défauts aléatoires .....	208
14.2.1.3	Défauts scalaires .....	209
14.2.2	Explications .....	209
14.2.2.1	Pièces mobiles .....	209
14.2.2.2	Liquides ou solides à l'intérieur de cavités .....	212
14.2.2.3	Influences thermiques et effets de la gravité .....	213
14.2.2.4	Écoulement de l'air .....	213
14.2.2.5	Magnétisme .....	214
14.2.2.6	Inclinaison de roulements à billes .....	214
14.2.2.7	Montage incomplet .....	215
14.2.2.8	Accouplement sur le rotor .....	215
14.2.2.9	Jeu d'ajustement .....	215
14.2.2.10	Glissement de pièces rapportées .....	215
14.2.2.11	Balourd de l'outillage .....	216
14.2.2.12	Balourd dans l'élément d'entraînement .....	216
14.2.2.13	Désalignement de l'outillage .....	216
14.2.2.14	Excentricité du palier d'équilibrage .....	216
14.2.2.15	Défauts systématiques et aléatoires de la chaîne de mesure .....	217
14.3	Estimation du défaut global .....	217
14.4	Critères de réception .....	217
<b>15</b>	<b>Protection lors de l'équilibrage</b> .....	<b>219</b>
15.1	Dangers générés par le rotor .....	219
15.2	Classes de protection .....	220
15.2.1	Exemples de classes de protection .....	221

---

15.2.2	Classe de protection C .....	223
15.2.2.1	Énergie surfacique spécifique .....	223
15.2.2.2	Énergie absolue .....	224
15.2.2.3	Impact .....	224
15.2.2.4	Classe de protection C pour des machines à équilibrer universelles .....	225
15.2.3	Conception de la protection .....	226
15.2.4	Identification de la protection .....	226
15.3	Responsabilités .....	226
<b>16</b>	<b>Équilibrage sur site .....</b>	<b>227</b>
16.1	Valeurs limites de vibrations .....	227
16.2	Présentation du problème .....	228
16.3	Théorie de l'équilibrage sur site .....	229
16.3.1	Causes de balourds .....	229
16.3.2	Problématique .....	230
16.3.3	Méthode .....	230
16.3.3.1	Correction en un plan .....	230
16.3.3.2	Correction en deux plans .....	232
16.3.3.3	Correction en plusieurs plans .....	233
16.4	Pratique de l'équilibrage sur site .....	234
16.4.1	Moyens de mesure .....	234
16.4.2	Plans de mesure .....	235
16.4.3	Conditions à réunir .....	235
<b>17</b>	<b>Annexe .....</b>	<b>237</b>
17.1	Symboles .....	237
17.2	Termes et définitions .....	240
17.2.1	Mécanique .....	240
17.2.2	Systèmes de rotors .....	241
17.2.3	Déséquilibre, balourd .....	244
17.2.4	Équilibrage .....	247
17.2.5	Machines à équilibrer et équipement .....	250
17.2.6	Rotors flexibles .....	257
17.2.7	Corps-libres rigides en rotation .....	260
17.2.8	Outillages pour machine à équilibrer .....	260
17.3	Données de calculs .....	261
17.3.1	Multiples et sous-multiples décimaux .....	262
17.3.2	Coefficients de conversion des unités SI en unités pouces/livres .....	263
17.3.3	Nomogrammes, diagrammes .....	264
17.4	Normes .....	286
17.4.1	DIN ISO 1940-1 (2003) : Vibrations mécaniques – Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage pour les rotors en état rigide (constant). Partie I (2005) : Spécifications et vérification des tolérances d'équilibrage .....	287
17.4.2	DIN ISO 11342 : Vibrations mécaniques – Procédures et critères pour l'équilibrage mécanique de rotors flexibles .....	325

<b>Bibliographie</b> .....	373
<b>Source des illustrations</b> .....	376
<b>Index</b> .....	377