

Collection de la Direction  
des Études et Recherches  
d'Électricité de France



# **Vibrations des machines et diagnostic de leur état mécanique**

Jacques Morel

Préface de  
Gilbert Riollet

  
EYROLLES

# SOMMAIRE GÉNÉRAL

Préface .....	XI
Avant-Propos .....	XIII
Table des matières .....	XV
Chapitre 1. Notions de vibrations .....	1
Chapitre 2. Equations du mouvement .....	15
Chapitre 3. Vitesses critiques .....	49
Chapitre 4. Organisation de l'énergie.....	67
Chapitre 5. La mesure des vibrations.....	85
Chapitre 6. Analyse des vibrations .....	119
Chapitre 7. Diagnostic de l'état mécanique d'une machine.....	163
Chapitre 8. Surveillance vibratoire .....	245
Chapitre 9. Moyens de lutte contre les vibrations.....	279
Chapitre 10. Equilibrage des machines tournantes .....	309
Chapitre 11. Mise en équation du mouvement de $N$ solides reliés entre eux par des ressorts et des amortisseurs.....	329
Index .....	369

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Chapitre 1. Notions de vibrations</b> .....	1
1.1 <i>Quelques définitions</i> .....	1
1.2 <i>Déplacement - Vitesse - Accélération</i> .....	4
1.3 <i>Représentation vectorielle de la vibration sinusoïdale</i> .....	6
1.4 <i>Vibration périodique</i> .....	9
1.5 <i>Composition des vibrations</i> .....	9
1.6 <i>Degré de liberté</i> .....	11
1.7 <i>Raideur - Amortissement</i> .....	12
 <b>Chapitre 2. Equations du mouvement</b> .....	 15
Système masse ressort .....	15
2.1 <i>Système à 1 degré de liberté non amorti ou système conservatif</i> .....	16
2.1.1 <i>Oscillations libres - Fréquences propres</i> .....	17
2.1.2 <i>Oscillations forcées</i> .....	17
2.2 <i>Système à 1 degré de liberté amorti</i> .....	18
2.2.1 <i>Oscillations libres</i> .....	19
2.2.2 <i>Oscillations forcées</i> .....	20
2.2.3 <i>Equations sans dimension</i> .....	21
Résumé système masse ressort .....	23
2.3 <i>Système à 2 degrés de liberté - Notion de couplage</i> .....	24
2.3.1 <i>Notion de mode propre</i> .....	25
2.3.2 <i>Résolution de l'équation matricielle</i> .....	27
2.4 <i>Système à N degrés de liberté</i> .....	30
2.5 <i>Systèmes continus</i> .....	31
2.6 <i>Phénomènes non linéaires</i> .....	36
2.7 <i>Exercices</i> .....	37
2.7.1 <i>Exercice n° 1</i> .....	37
2.7.2 <i>Exercice n° 2</i> .....	38
2.7.3 <i>Exercice n° 3</i> .....	38
2.7.4 <i>Exercice n° 4</i> .....	39
2.7.5 <i>Exercice n° 5</i> .....	39
2.8 <i>Corrigés des exercices</i> .....	40

2.8.1	Exercice n° 1 .....	40
2.8.2	Exercice n° 2 .....	41
2.8.3	Exercice n° 3 .....	42
2.8.4	Exercice n° 4 .....	44
2.8.5	Exercice n° 5 .....	46
<b>Chapitre 3. Vitesses critiques .....</b>		<b>49</b>
3.1	<i>Mise en équation du mouvement</i> .....	49
3.2	<i>Définition et détection des vitesses critiques</i> .....	52
3.3	<i>Mouvement des rotors continus</i> .....	53
3.3.1	Mise en équation .....	53
3.3.2	Conclusions pratiques : les vitesses critiques des rotors et leur détection .....	55
3.3.3	Influence de la raideur des appuis sur le comportement vibratoire d'une ligne d'arbre .....	56
3.3.4	Influence de l'effet gyroscopique .....	59
3.4	<i>Identification des vitesses critiques</i> .....	61
3.4.1	Analyse des variations de vitesses .....	62
3.4.2	Analyse de la réponse à une excitation aléatoire ...	64
3.4.2.1	Fréquences propres, amortissement .....	64
3.4.2.2	Déformées modales .....	65
3.4.3	Excitation par une force extérieure appliquée au rotor	65
<b>Chapitre 4. Organisation de l'énergie .....</b>		<b>67</b>
4.1	<i>Introduction</i> .....	67
4.2	<i>Notions d'organisation</i> .....	68
4.3	<i>Exemples de phénomènes organisés</i> .....	69
4.3.1	Une rivière .....	69
4.3.2	Le vent dans une forêt .....	70
4.3.3	Le vent sous une porte .....	70
4.3.4	Une roue de voiture en rotation .....	71
4.4	<i>Nature de synchronisation et d'instabilité</i> .....	71
4.4.1	Phénomènes aéroélastiques/aéroacoustiques .....	71
4.4.1.1	En automobile .....	73
4.4.1.2	Dans les réchauffeurs .....	73
4.4.1.3	Le pont de Tacoma .....	73
4.4.1.4	Les vibrations d'un échangeur de chaleur	73
4.4.2	Exemples de phénomènes instables ou synchronisés	75
4.4.2.1	Instruments de musique .....	75
4.4.2.2	Écoulements hydrauliques .....	76

4.4.2.3	Film liquide en rotation .....	77
4.4.2.4	Frottements, relaxation .....	78
4.5	<i>Organisation de l'énergie par les structures</i> .....	79
4.5.1	Les deux formes de l'énergie : énergie potentielle et énergie cinétique .....	79
4.5.2	Relation entre amortissement et amplification .....	81
4.6	<i>Interprétation d'un spectre</i> .....	81
<b>Chapitre 5.</b>	<b>La mesure des vibrations</b> .....	<b>85</b>
5.1	<i>Quelle grandeur mesurer ?</i> .....	85
5.2	<i>Où et quoi mesurer ?</i> .....	86
5.2.1	Qu'est-ce-qu'on veut faire ? .....	87
5.2.2	Choix possibles .....	88
5.2.2.1	Mesure absolue ou relative .....	88
5.2.2.2	Une ou deux directions .....	89
5.2.2.3	Trajectoire .....	89
5.2.2.4	Emplacements des capteurs .....	91
5.3	<i>Type de mesure/Notion de descripteur</i> .....	92
5.4	<i>Capteurs de vibrations</i> .....	93
5.4.1	Spécifications des capteurs .....	94
5.4.2	Classification des capteurs .....	98
5.4.3	Principe de fonctionnement d'un capteur .....	98
5.4.3.1	Principe du capteur sismique .....	99
5.4.4	Principaux types de capteurs .....	101
5.4.4.1	Capteurs électrodynamiques .....	101
5.4.4.2	Accéléromètres piézoélectriques .....	102
5.4.4.3	Accéléromètres piézorésistifs .....	107
5.4.4.4	Capteurs inductifs à variation d'impédance .....	108
5.4.4.5	Capteurs électromagnétiques .....	111
5.4.4.6	Capteurs capacitifs .....	112
5.4.4.7	Extensométrie .....	113
5.4.4.8	Autres procédés de mesure des vibrations .....	114
5.4.5	Fixation des capteurs .....	115
5.4.6	Définition d'une référence de phase .....	115
<b>Chapitre 6.</b>	<b>Analyse des vibrations</b> .....	<b>119</b>
6.1	<i>Introduction</i> .....	119
6.2	<i>Éléments d'analyse des signaux</i> .....	119
6.2.1	Signal sinusoïdal .....	120

6.2.2	Fonction périodique (décomposition en série de Fourier).....	121
6.2.3	Fonction non périodique (transformée de Fourier) ..	122
6.2.4	Notion de spectre .....	123
6.2.5	Analyseurs de vibrations .....	128
6.2.5.1	Filtres.....	128
6.2.5.2	Analyseurs temps réel .....	130
6.2.5.3	Analyseurs à compression de temps .....	130
6.2.5.4	Analyseurs à transformée de Fourier rapide (FFT).....	130
6.2.6	Vibrations aléatoires - Propriétés statistiques des signaux .....	131
6.3	Traitements particuliers - Analyses spécifiques .....	133
6.3.1	Machines tournantes.....	133
6.3.1.1	Analyse synchrone .....	133
6.3.1.2	Sommation périodique .....	134
6.3.2	Chocs, impulsions.....	135
6.3.3	Evaluation du risque de fatigue ou du dommage ...	138
6.3.3.1	Phénomène de concentration de contrainte .....	139
6.3.3.2	Fatigue des matériaux.....	141
6.3.3.3	Estimation du dommage - Cumul de fatigue .....	142
6.3.3.4	Conditions d'environnement.....	144
6.3.4	Analyse des transitoires .....	145
6.3.5	Recherche des corrélations .....	146
6.3.5.1	Qu'est-ce que la corrélation? .....	147
6.3.5.2	Extension de la notion de corrélation ou de liaison .....	148
6.3.5.3	Sensibilité d'un paramètre à un autre .....	150
6.3.6	Recherche des fréquences propres .....	152
6.3.6.1	Excitation par une force sinusoïdale .....	152
6.3.6.2	Excitation par une force aléatoire connue .....	154
6.3.6.3	Excitation par choc.....	154
6.3.6.4	Analyse du bruit de fond.....	156
6.3.7	Recherche des vitesses critiques.....	158
6.3.8	Analyse de déformées de structures.....	158
6.3.9	Analyse modale.....	160
<b>Chapitre 7. Diagnostic de l'état mécanique d'une machine .....</b>		<b>163</b>
7.1	<i>La vibration, un bon indicateur d'état .....</i>	164

7.2	<i>Reconnaître les défauts</i> .....	164
7.2.1	Déséquilibre massique des rotors .....	167
7.2.1.1	Altérations mécaniques .....	168
7.2.1.2	Altérations thermiques .....	170
7.2.2	Dégradations du lignage .....	178
7.2.3	Défauts de paliers .....	182
7.2.3.1	Paliers fluides - Défauts de lubrification - Instabilité .....	182
7.2.3.2	Défauts des roulements .....	188
7.2.4	Altération des rotors .....	189
7.2.4.1	Arbres dissymétriques .....	189
7.2.4.2	Fissuration transverse d'arbre .....	192
7.2.4.3	Pertes d'aubes .....	195
7.2.4.4	Dégradation des bobinages (moteurs, alter- nateurs) .....	196
7.2.5	Altération des stators .....	196
7.2.6	Organes d'admission, soupapes, robinetterie .....	196
7.2.7	Défauts des accouplements .....	199
7.2.8	Engrenages, réducteurs, multiplicateurs .....	202
7.2.9	Jeu, desserrage, mauvaise fixation .....	204
7.2.10	Détection des corps errants .....	205
7.2.11	Vibrations des pompes et machines hydrauliques .....	205
7.2.12	Défauts des capteurs .....	210
7.2.12.1	Capteur à patin .....	210
7.2.12.2	Capteur sans contact .....	210
7.2.13	Fréquences propres .....	211
7.3	<i>L'information, base du diagnostic</i> .....	214
7.3.1	En amont : traitement des signaux .....	214
7.3.2	En aval : traitement des informations .....	214
7.3.3	Quel est le problème? .....	215
7.3.4	Où est localisé le défaut? .....	215
7.3.5	Quand a-t-on vu une anomalie? .....	215
7.3.6	Comment peut être décrit le défaut? .....	216
7.3.7	Pourquoi ce défaut? .....	218
7.3.7.1	Quelle corrélation peut-on établir? .....	218
7.3.7.2	Quelles caractéristiques de la machine peu- vent favoriser (ou interdire) le défaut ima- giné? .....	218
7.4	<i>Méthodologie du diagnostic</i> .....	219
7.4.1	Un problème de tri .....	219

7.4.2	Méthode .....	221
7.4.3	Symptômes .....	225
7.4.3.1	Analyse des évolutions .....	225
7.4.3.2	Analyse des discontinuités .....	225
7.4.3.3	Signal temporel ou spectre .....	227
7.4.3.4	Fréquence .....	228
7.4.3.5	Déformées .....	230
7.4.4	Etats de référence .....	230
7.4.5	Retour d'expérience : fiches de défauts .....	231
7.5	<i>Exemples de diagnostic</i> .....	233
7.5.1	Exemple n° 1 .....	233
7.5.2	Exemple n° 2 .....	234
7.5.3	Exemple n° 3 .....	236
7.5.4	Exemple n° 4 .....	238
7.5.5	Exemple n° 5. Instabilité .....	240
<b>Chapitre 8. Surveillance vibratoire</b> .....		245
8.1	<i>Objectifs de la surveillance</i> .....	245
8.2	<i>Les trois stratégies de surveillance</i> .....	246
8.2.1	Surveillance a minima .....	246
8.2.2	Bilan de santé .....	247
8.2.3	Surveillances spécialisées .....	247
8.3	<i>Comportement « normal » d'une machine - Critères d'évaluation - Limites admissibles</i> .....	248
8.3.1	Classification des machines .....	248
8.3.2	Base de l'évaluation : la Norme .....	249
8.3.3	Limites admissibles .....	251
8.3.4	Exemple d'application : suivi vibratoire des groupes de pompage - Critères d'appréciation .....	253
8.3.4.1	Domaine d'application .....	253
8.3.4.2	Grandeurs à prendre en considération ....	253
8.3.4.3	Interprétation et exploitation des résultats	253
8.3.4.4	Classification des critères d'appréciation .	254
8.3.4.5	Critères d'appréciation .....	255
8.4	<i>Bilan de santé d'une machine : vers la maintenance conditionnelle</i> .....	257
8.4.1	Choix d'une stratégie .....	257
8.4.1.1	Coût de la maintenance .....	258
8.4.1.2	Coût de la surveillance .....	258
8.4.1.3	Fonctions de la surveillance conditionnelle	258

8.4.2	Connaître les machines .....	259
8.4.2.1	Défauts-types, taux de pannes, coûts .....	259
8.4.2.2	Surveiller ou guérir .....	260
8.4.3	Acquérir les données .....	261
8.4.3.1	Choix des paramètres .....	261
8.4.3.2	Politique de maintenance .....	261
8.4.3.3	Matériels d'acquisition - Collecteurs de données .....	262
8.4.4	Stocker - Traiter .....	262
8.4.5	Utiliser .....	262
8.4.6	Etat actuel .....	263
8.5	<i>Surveillance des machines importantes</i> .....	263
8.5.1	Introduction .....	263
8.5.2	Etapes de la mise en place d'une fonction <i>surveillance vibratoire</i> .....	264
8.5.3	Etudes préliminaires .....	266
8.5.3.1	Choix des paramètres descripteurs .....	266
8.5.3.2	Système d'acquisition et de stockage .....	267
8.5.3.3	Traitement des informations .....	267
8.5.4	Procédures de traitement .....	268
8.5.5	Critères de surveillance - Retour d'expérience .....	271
8.5.6	Vers la surveillance automatique .....	271
8.5.6.1	Détection automatique d'anomalies .....	272
8.5.6.2	Vers le diagnostic automatique .....	275
<b>Chapitre 9. Moyens de lutte contre les vibrations</b> .....		279
9.1	<i>Introduction</i> .....	279
9.2	<i>Possibilités d'action : forces ? ou réponses ?</i> .....	281
9.3	<i>Intervention au niveau des forces d'excitation</i> .....	281
9.3.1	Equilibrage des machines tournantes .....	282
9.3.2	Instabilité dynamique due aux films d'huile dans les paliers .....	282
9.3.3	Alignement des paliers .....	284
9.3.4	Vibrations auto-excitées .....	285
9.3.4.1	Vibration de faisceaux de tubes, réchauffeurs .....	285
9.3.4.2	Instabilité de flamme dans une chaudière .....	286
9.3.4.3	Instabilité hydraulique de vanne ou clapet .....	287
9.4	<i>Intervention au niveau de la transmission des efforts</i> .....	288
9.4.1	Isolation - suspension .....	288

9.4.1.1	Isolation simple .....	288
9.4.1.2	Isolation d'un appareil placé en environne- ment vibratoire.....	292
9.4.2	Absorption des forces émises .....	293
9.4.2.1	Amortissement par matériaux viscoélasti- ques .....	294
9.4.2.2	Amortissement par frottement sec .....	294
9.4.3	Dispositifs accordés .....	294
9.4.3.1	Cas simplifié.....	295
9.5	<i>Intervention au niveau de la réponse des structures</i> .....	298
9.5.1	Déformées, coefficients d'amplification .....	298
9.5.2	Applications .....	299
9.5.2.1	Excitation sinusoïdale pure .....	299
9.5.2.2	Excitation composée .....	301
9.5.2.3	Excitation aléatoire .....	302
9.5.2.4	Excitation par chocs .....	303
9.6	<i>Recherche des coefficients d'amplification</i> .....	303
9.6.1	Première méthode : lâcher d'excitation.....	304
9.6.2	Deuxième méthode : excitation forcée .....	306
<b>Chapitre 10. Equilibrage des machines tournantes</b> .....		309
10.1	<i>Introduction</i> .....	309
10.1.1	Rotor rigide .....	310
10.1.2	Rotor flexible .....	312
10.1.3	Le rotor rigide existe-t-il? .....	313
10.2	<i>Méthodes d'équilibrage des rotors rigides</i> .....	313
10.2.1	Hypothèse de base : système linéaire .....	313
10.2.2	Equilibrage en un plan .....	313
10.2.3	Equilibrage en deux plans .....	315
10.3	<i>Equilibrage des rotors flexibles</i> .....	317
10.3.1	Méthode d'équilibrage .....	320
10.3.1.1	Principe de l'équilibrage multiplan. Méthode dite des coefficients d'influence .....	321
10.3.1.2	Recherche d'un optimum .....	322
10.3.2	Moyens .....	325
10.3.3	Procédures .....	325
10.3.3.1	Précision et erreurs .....	326
10.3.3.2	Pourquoi commet-on tant d'erreurs? .....	326
10.3.3.3	Procédures d'équilibrage .....	327

<b>Chapitre 11. Mise en équation du mouvement de <math>N</math> solides reliés entre eux par des ressorts et des amortisseurs</b> .....	329
11.1 <i>Introduction</i> .....	329
11.2 <i>Rappels sur le principe des travaux virtuels</i> .....	332
11.2.1 Définitions.....	332
11.2.2 Changement de repère.....	332
11.2.3 Principe de d'Alembert.....	333
11.2.4 Travail virtuel des quantités d'accélération.....	333
11.3 <i>Travail des quantités d'accélération</i> .....	334
11.3.1 Expression de la matrice inertie $[M_i]$ du solide $i$ ...	334
11.3.2 Extension à $N$ solides.....	336
11.4 <i>Travail des forces de liaison et extérieures</i> .....	337
11.4.1 Déplacement virtuel du point $\pi_{ie}$ .....	337
11.4.2 Vitesse virtuelle du point $\pi_{ie}$ .....	339
11.4.3 Expression du travail virtuel.....	340
11.4.3.1 Expression des forces.....	340
11.4.3.2 Travail des forces de raideur.....	341
11.4.3.3 Travail des forces d'amortissement.....	341
11.4.4 Travail des forces extérieures au système.....	342
11.4.5 Expression du travail dans un système à $N$ solides.....	342
11.5 <i>Equations du mouvement</i> .....	343
11.6 <i>Récapitulation</i> .....	343
11.7 <i>Cas particulier d'un seul solide</i> .....	346
11.7.1 Equations du mouvement.....	346
11.7.2 Conditions de découplage.....	347
11.7.2.1 Forme de la matrice $[M]$ .....	347
11.7.2.2 Forme de la matrice $[K]$ .....	348
11.7.2.3 Forme de la matrice $[B]$ .....	350
11.7.2.4 Conclusions.....	350
11.7.3 Exemples : fréquences propres d'un massif avec trois plans de symétrie.....	350
11.8 <i>Exercice : calcul des six fréquences propres d'une suspension</i> .....	352
11.8.1 Énoncé.....	352
11.8.2 Corrigé.....	354
11.9 <i>Rappels sur les tenseurs d'inertie</i> .....	361
11.10 <i>Formules de changement d'axes</i> .....	367
<b>Index</b> .....	369