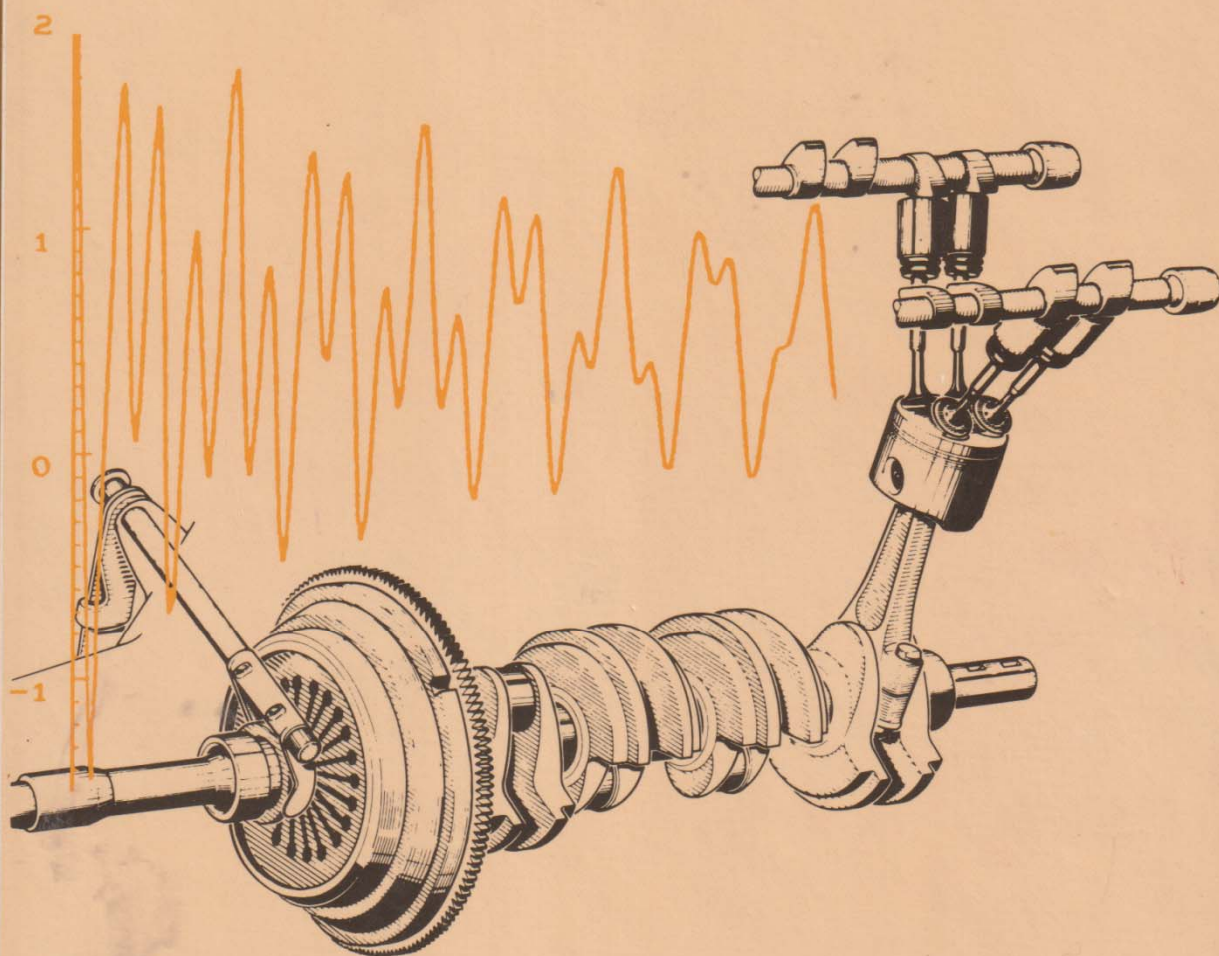


L. Bourgain, R. Dart, J. Bourgain

Machines tournantes et circuits pulsés

**Applications industrielles
et médicales
de l'analyse spectrale**



Dunod

Table des matières

Chapitre 1. Les fonctions sinusoïdales

1.1. Introduction	1
1.2. Représentations de la fonction sinusoïdale.....	2
1.3. Relations fondamentales.....	3
1.3.1. Déplacement, vitesse et accélération d'un point matériel.....	3
1.3.2. Travail d'une fonction sinusoïdale.....	4
1.4. Principe de la conservation de l'énergie.....	5
1.5. Fréquence critique et fréquence propre.....	6

Chapitre 2. Systèmes soumis a plusieurs entrées sinusoïdales

2.1. Introduction	11
2.2. Combinaison linéaire de deux mouvements de même périodicité.....	12
2.3. Combinaison de n vibrations de même périodicité.....	12
2.4. Combinaison de n vibrations de périodicité différente.....	12
2.5. Applications	14
2.6. Energie d'une sinusoïde. Théorème de Parseval	15
2.7. Formulaire.....	16

Chapitre 3. Les transformées de Laplace

3.1. La transformée de Laplace	19
3.2. De l'intérêt des transformées de Laplace et de Fourier.....	19
3.2.1. Le calcul symbolique.....	20
3.2.2. L'analyse spectrale.....	20
3.3. Transformées de Laplace de quelques fonctions	21
3.3.1. Le dictionnaire d'images	21
3.3.2. Transformée de Laplace du train d'impulsions rectangulaires	22
3.3.3. Transformée de Laplace des fonctions sinus et cosinus.....	24
3.3.4. Transformée de Laplace du train d'échelons vitesse.....	25

3.3.5. Transformée de Laplace du train d'impulsions sinusoïdales	25
3.4. La transformée de Fourier	26
3.5. Application des transformées de Laplace et de Fourier	27
3.5.1. Résolution des équations différentielles.....	27
3.5.2. Excitation des structures par un train d'impulsions rectangulaires	27
3.5.3. Excitation des structures par un train d'échelons vitesse	28
3.5.4. Excitation des structures par un train d'impulsions sinusoïdales.....	29
3.6. La jet ventilation haute fréquence	30
3.6.1. Principe de la jet ventilation haute fréquence(V.H.F.).....	30
3.6.2. Description d'un ensemble V.H.F.....	31
3.6.3. Définition comparative des respirateurs VS 600 et GR 300. Etude théorique et résultats d'essais.....	32

Chapitre 4. Les systèmes du premier ordre

4.1. Introduction	35
4.1.1 Déplacements et déformations	35
4.1.2. Les degrés de liberté	36
4.1.3. L'ordre des équations différentielles	36
4.2. Exemples de système du premier ordre	37
4.2.1. Le thermomètre	37
4.2.2. Le circuit R.C.	37
4.2.3. Le circuit électrique LR.....	37
4.2.4. les systèmes mécaniques.....	38
4.3. Résolution de l'équation différentielle 4.1.....	38
4.3.1. Réponse à une entrée sinusoïdale.....	38
4.3.2. Réponse à l'échelon unité	41
4.3.3. Réponse à un échelon vitesse.....	42
4.4. Détermination du gain statique et de la constante de temps.....	43
4.4.1. Application du formulaire de l'oscillation forcée	43
4.4.2. Application du formulaire de l'oscillation libre.....	44
4.4.3. Application du formulaire de l'échelon vitesse.....	44
4.5. Application : constante de temps du respirateur VS 600	45
4.6. La constante de temps et des capteurs de mesure	46
4.6.1. Le variomètre	47
4.6.2. L'altimètre	47
4.6.3. Le microphone	47

Chapitre 5. Les systèmes du second ordre

5.1. Introduction	49
5.1.1. La linéarité et les petits mouvements.....	50
5.1.2. Les forces d'amortissement internes et externes	50

5.2. Réponse des systèmes du second ordre à une excitation sinusoïdale.....	51
5.3. Etude de l'oscillation libre.....	53
5.4. Détermination de ω_n et η à partir de l'oscillation libre.....	56
5.4.1. Méthode des trois points	56
5.4.2. Méthode du décrétement logarithmique.....	57
5.4.3. Application: mesure des coefficients d'amortissement.....	58
5.5. Etude de l'oscillation forcée.....	59
5.6. Détermination de ω_n et η à partir de l'oscillation forcée	65
5.6.1. Méthode des amplitudes.....	65
5.6.2. Méthode des phases	70
5.6.3. Méthode du $\Delta f / f$	71
5.6.4. Méthode des maxima de la partie réelle.....	73
5.6.5. Méthode de la partie imaginaire.....	75
5.6.6. Méthode du maximum du graphe amplitude / fréquence	75
5.7. Réponse en fréquence pour $\eta=0$	76
5.7.1. Approche mathématique.....	77
5.7.2. L'oscillation libre : $\omega_0 = 0$	77
5.7.3. L'excitation forcée ($\omega_0 \neq 0$)	77
Cas particulier de $\omega \neq \omega_n$	78
5.7.4. Extension aux systèmes à deux degrés de liberté.....	79
5.7.5. L'excitation forcée: $\omega = \omega_n$ et $\omega_0 \neq 0$	80
5.8. Réponse à l'échelon unité.....	81
5.9. Critères des systèmes du deuxième ordre.....	83
5.9.1. Critères basés sur la réponse transitoire	84
5.9.2. Critères basés sur la réponse forcée.....	84
5.10. Réponse au choc	86

Chapitre 6. Les systèmes régis par une équation aux dérivées partielles du second ordre

6.1. Introduction.....	89
6.1.1. Propagation des ondes longitudinales.....	90
6.1.2. Réflexion des ondes longitudinales	90
6.1.3. La vitesse de propagation et la vitesse de déplacement	91
6.2. Mise en équations	92
6.2.1. La corde vibrante	92
6.2.2. Les ondes longitudinales dans les poutres	93
6.2.3. Les ondes acoustiques dans les tuyauteries	94
6.2.4. La vitesse du son dans les fluides	97
6.3. Résolution mathématique de l'équation de la propagation.....	98
6.4. Introduction des conditions aux limites.....	99
6.4.1. Conditions "Libre - Libre".....	100
6.4.2. Conditions "encasté - encasté".....	102
6.4.3. Poutre droite avec masse rapportée en extrémité.....	103

6.5. Application : mesure du module d'Young.....	104
6.6. Masse et raideur apparentes	107
6.6.1. Masse apparente d'un barreau en traction compression.....	109
6.6.2. Calcul de la raideur apparente	110
6.6.3. Application.....	110
6.7. Amortissement interne des matériaux	110
6.8. Les ondes de torsion	111
6.8.1. Méthodes de la résistance des matériaux.....	112
6.8.2. Méthodes de la mécanique des milieux continus.....	113
6.8.3. Vitesse de propagation des ondes de torsion.....	115
6.8.4. Les contraintes dans les poutres parallélipédiques	116
 <i>Chapitre 7. Les systèmes régis par une équation aux dérivées partielles du quatrième ordre</i>	
7.1. Introduction	119
7.2. Méthodes de la résistance des matériaux	120
7.2.1. Système à un degré de liberté.....	120
7.2.2. Systèmes à plusieurs degrés de liberté.....	124
7.2.3. Les méthodes énergétiques.....	125
7.2.4. Méthode des matrices de transfert.....	127
7.3. Méthode de la mécanique des milieux continus	135
7.3.1. Etude des poutres uniformes	136
7.3.2. Etude des poutres à inertie variable	136
7.3.2.1. Application: ligne d'arbre de la figure 7.1	136
7.3.2.2. Application : ligne d'arbre de centrifugeuse.....	145
7.3.2.3. Application : ligne d'arbre avec masse en porte à faux.....	146
Influence du rapport I_d/I_a	148
7.4. Mesure du module d'Young.....	149
7.5. Coefficient X_1^2 d'une poutre en flexion avec masse rapportée en extrémité.....	152
 <i>Chapitre 8. Les bases mathématiques de l'analyse spectrale</i>	
8.1. Introduction.....	159
8.1.1 Représentations temporelle et fréquentielle	160
8.1.2. Détection des criques de vilebrequins par l'oreille humaine	161
8.1.3. Etude sommaire de la chaîne auditive	161
8.1.4. Comparaison de la chaîne auditive et de la chaîne spectrale.....	162
8.1.5. Détection des criques de vilebrequin.....	162
8.1.6. Identification des raies des spectres	163
8.2. Théorie de l'analyse spectrale	163

8.2.1. Les fonctions périodiques	164
8.2.2. Les fonctions presque périodiques.....	167
8.3. Les fonctions aléatoires ou apériodiques.....	169

Chapitre 9. Analyse numérique et applications

9.1. Introduction	173
9.2. Terminologie et symboles	174
9.3. Formulaires	174
9.4. Le théorème de Shannon	176
9.5. Les relations échantillonnées.....	177
9.6. Analyse manuelle d'une fonction périodique.....	179
9.6.1. Introduction à l'erreur de troncature.....	180
9.7. Coefficients de Fourier des impulsions.....	181
9.7.1. Coefficients du train d'impulsions triangulaires	181
9.7.2. Coefficient de l'impulsion rectangulaire	182
9.7.3. Coefficient de l'impulsion de DIRAC	183
9.7.4. Coefficient de l'impulsion sinusoïdale.....	183
9.7.5. Coefficient de Fourier du choc sinusoïdal.....	184
9.8. Convergence des séries de Fourier.....	184
9.9. Etude de l'injecteur de la VHF	185
9.9.1. Etude statique de l'injecteur	185
9.9.2. Etude dynamique de l'injecteur.....	185
9.9.3. Coefficient de Fourier de l'Injecteur	187

Chapitre 10. Analyseurs de spectres. Erreurs inhérentes et mise en œuvre

10.1. Introduction	189
10.2. Erreurs inhérentes à la mise en condition des signaux	190
10.3. Erreurs à l'échantillonnage.....	191
10.4. Erreurs liées au repliement.....	192
10.5. L'erreur de troncature	193
10.5.1. Aspect mathématique.....	194
10.5.2. Les fonctions de pondération	196
10.5.3. Critères de choix des fenêtres de pondération.....	200
10.5.4. Tracé expérimental de la fonction $z(t)$	201
10.6. Moyennage fréquentiel et moyennage synchrone.....	201
10.7. Les bruits de fond: origine et théorie.....	204
10.8. Mise en œuvre des analyseurs de spectres	207
10.9. La présentation des résultats.....	212
10.9.1. Régime permanent.....	213
10.9.2. Régime transitoire	214
10.10. Interprétation physique des spectres	217

Chapitre 11. Fonctions calculées par les analyseurs

11.1 Introduction	219
11.2. Les fonctions calculées par les analyseurs monovoie.....	220

11.2.1. Les fonctions du domaine temporel	220
11.2.2. Le spectre linéaire.....	221
11.2.3. Spectre de puissance	222
11.2.4. Densité spectrale de puissance D.S.P.....	223
11.2.5. La comparaison des spectres.....	223
11.3. Les fonctions calculées par les analyseurs bivoies.....	224
11.3.1. La fonction de transfert $H(j\omega)$	224
11.3.2. Calcul de la fonction de transfert par les analyseurs	225
11.3.3. La fonction de cohérence	225
11.3.4. Le principe de réciprocité des transformées de FOURIER	228
11.3.5. La fonction d'autocorrélation.....	229
11.3.6. La fonction d'intercorrélation	230
11.3.7. Histogramme des amplitudes	231
11.4. Recherche des relations de cause à effet.....	233
<i>Chapitre 12. L'impédance mécanique</i>	
12.1. Introduction	235
12.2. Théorie de l'impédance mécanique	237
12.2.1. Définitions et terminologie.....	237
12.2.2. La fonction de transfert des systèmes du second ordre	238
12.2.3. Différents types de comportement.....	239
12.2.4. Mise en oeuvre des abaques de l'impédance mécanique	240
12.3. La méthode "1.2.3.".....	241
12.4. La chaîne d'impédance mécanique	248
12.4.1. L'excitateur	248
12.4.2. La cellule de force.....	251
12.5. Etalonnage des chaînes	251
12.5.1. Correction de masse	251
12.5.2. Procédure d'essais.....	252
12.5.3. Etalonnage des chaînes acoustiques.....	252
12.6. Principales applications.....	253
<i>Chapitre 13. Les capteurs</i>	
13.1. Introduction	255
13.2. L'effet piézo-électrique.....	257
13.3. Les accéléromètres	258
13.3.1. Théorie de l'accéléromètre.....	258
13.3.2. Liaison capteur- structure	260
13.3.3. La chaîne de mesure	267
13.3.4. Comportement aux environnements non vibratoires	270
13.3.5. Performance aux chocs.....	271
13.3.6. Sensibilité transversale (ou transverse)	271

13.3.7. Stabilité à long terme.....	272
13.3.8. Technologies des capteurs piezo électriques.....	272
13.3.9. Etalonnage des accéléromètres.....	275
13.3.9.1. Méthodes absolues.....	275
13.3.9.2. Méthodes par comparaison.....	275
13.4. Les microphones.....	276
13.4.1. Microphone condensateur.....	276
13.4.2. Microphone piézo-électrique.....	277
13.5. Capteurs de déplacement.....	277
13.6. Capteurs sismiques.....	280
13.7. Capteurs de force.....	281
13.8. Capteurs de pression.....	282
13.9. Instrumentation diverse.....	282
13.9.1. Les anémomètres.....	282
13.10. L'enregistrement magnétique.....	282

Chapitre 14. Les excitations par choc et les excitations aléatoires

14.1. Introduction.....	285
14.2. Etude théorique du choc.....	286
14.2.1. L'impulsion rectangulaire.....	286
14.2.2. Le train d'impulsion rectangulaire.....	290
14.2.3. L'impulsion sinusoïdale.....	291
14.2.4. L'impulsion expérimentale.....	293
14.3. Aspect expérimental.....	294
14.3.1. Le matériel d'excitation.....	294
14.3.2. Technique de mesure.....	295
14.3.3. Choix des paramètres de l'analyse et du choc.....	295
14.3.4. Incidence des bruits de fond.....	295
14.3.5. Précautions opératoires.....	296
14.4. L'excitation aléatoire.....	297
14.4.1. Les principales lois de variation.....	298
14.4.2 L'utilisation des moyennages dans les essais d'excitation aléatoire.....	299
14.4.3. Influence de la bande d'analyse.....	300
14.5. Excitation programmée des essais de fatigue.....	300
14.6. Caractéristiques dynamiques d'un barreau en aluminium.....	301

Chapitre 15. L'analyse modale

15.1. Introduction.....	309
15.2. L'amortisseur dynamique.....	310
15.3. Réponse en fréquence des système à n degrés de liberté sans amortissement.....	313
15.4. Réponse en fréquence des systèmes à n degrés de liberté avec amortissement.....	316
15.5. Le théorème des résidus.....	317

15.6. Applications : poutre excitée en flexion et compression.....	318
15.6.1. Comportement dynamique dans les basses fréquences	319
15.6.2. Comportement au voisinage de la première résonance de flexion.....	322
15.7. Application: étude des machines tournantes.....	326
15.7.1. Description de la ligne d'arbre de la centrifugeuse.....	327
15.7.2. Etude théorique	328
15.7.3. Résultats des essais d'impédance mécanique	330
15.7.4. Résultats et exploitation des essais en rotation.....	332
15.7.5. La réponse aux balourds	335
15.8. Conclusion	336
 <i>Chapitre 16. Les forces excitatrices</i>	
16.1. Introduction	337
16.2. Les ailettes de compresseur ou de turbine	338
16.2.1. Déplacement et déformation	338
16.2.2. Calcul des modes propres de flexion et de torsion	339
16.2.3. Caractéristiques métallurgiques du matériau constitutif	342
16.2.4. Contrôle de la qualité métallurgique	346
16.2.5. Contrôle du montage	346
16.2.6. Mesures en rotation.....	347
16.3. Forces excitatrices synchrones de la fréquence de rotation	348
16.3.1. Ecart entre vitesse nominale et vitesses critiques de flexion et torsion	349
16.3.2. Mesure des vitesses critiques de flexion.....	349
16.3.3. Qualité de la rotation	350
16.4. Forces excitatrices de fréquence $2f$	350
16.4.1. Les non-linéarités	350
16.4.2. Les désalignements.....	351
16.4.3. Les défauts au droit des liaisons.....	352
16.4.4. Cas particulier de la liaison par tirant central	353
16.5. Les autres forces excitatrices.....	354
16.6. Etude des écoulements dans les tuyauteries.....	355
16.6.1. Les écoulements permanents.....	355
16.6.2. Les écoulements non permanents.....	356
16.6.2.1. Comportement aux faibles fréquences d'excitation	357
16.6.2.2. Comportement aux fréquences élevées	359
16.7. Etude modale de la maquette de la V.H.F.	360
16.7.1. Réponse théorique.....	360
16.7.2. Résultats expérimentaux	361
16.7.3. Exploitation des résultats d'essais	363
16.7.4. Annexe 1 - Formulaire de la V.H.F.....	364

Chapitre 17. Les paliers et les butées hydrodynamiques

17.1. Introduction	367
17.2. Théorie de la lubrification hydrodynamique	368
17.2.1 L'expérience fondamentale de NEWTON	368
17.2.2. L'équation différentielle de la lubrification	369
17.2.3. Etude de l'écoulement à travers une fente	369
17.2.4. Ecoulement à travers un capillaire.....	371
17.2.5 Effet de rapprochement (squeeze film).....	371
17.3. Les amortisseurs hydrauliques	372
17.4. Les butées hydrodynamiques	372
17.4.1. Théorie du "coin d'huile"	372
17.4.2. Calcul des performances des butées composites	373
17.4.3. Epaisseur minimale du film d'huile.....	379
17.4.4. Limitations technologiques.....	379
17.4.5. Suivi des butées en exploitation	384
17.4.6. Raideur des butées hydrodynamiques.....	384
17.5. Le palier lisse 180° (Journal Bearing).....	385
17.5.1. Raideur des paliers hydrodynamiques.....	386
17.5.2. Angle d'attitude	386
17.5.3. Tourbillons à 1/2 vitesse	386
17.6. Les paliers à patins oscillants.....	389

Chapitre 18. Les pignons et les roulements

18.1. Introduction	391
18.2. La lubrification élasto-hydrodynamique (L.E.H).....	391
18.2.1. Historique.....	391
18.2.2. Les paramètres de la LEH	392
18.2.3. Formulaire de la L.E.H.....	393
18.2.4. Facteurs de correction	394
18.2.4.1. La rugosité	394
18.2.4.2. Les déformations sous charge.....	395
18.2.4.3. La sous-alimentation en huile	395
18.3. Les engrenages.....	396
18.3.1. Principaux types d'engrenages.....	396
18.3.2. Bruits de pignons	398
18.3.2.1. Principales origines du bruit	398
18.3.3. Aspect fréquentiel.....	401
18.3.4. Les bancs d'essais d'étude et d'endurance.....	403
18.4. Les paliers lisses.....	404
18.5. Les roulements.....	405
18.5.1. Principaux types de roulements.....	405
18.5.2. Origine et détection des incidents	407
18.5.2.1. Origine des incidents.....	407

18.5.3. Aspect fréquentiel de la vibration des roulements	409
18.5.4. Instrumentation de mesure	413
18.5.4.1. Instrumentation spécifique.....	413
18.5.5. Le paramètre évolutif.....	414
 <i>Chapitre 19. Comportement en rotation des lignes d'arbre</i>	
19.1. Introduction	415
19.2. Description de la ligne d'arbre	416
19.2.1. Paliers.....	417
19.3. Fréquences propres et vitesses critiques.....	418
19.3.1. Résultats théoriques.....	418
19.3.2. Détermination expérimentale de la raideur du palier inférieur.....	420
19.4. Etude modale de la ligne d'arbre	421
19.4.1. Détermination des éléments de base du calcul.....	421
19.4.2. Résultats des essais de dépouillement.....	425
19.5. Etude expérimentale du comportement en flexion des lignes d'arbres	427
19.5.1. Etude en transitoire.....	428
19.5.2. Etudes en régime stabilisé	430
19.6. Les défauts d'alignement	431
19.6.1. L'alignement à froid.....	432
19.6.2. L'assemblage des brides.....	433
19.6.3. L'alignement à chaud.....	433
19.6.4. Le désalignement progressif.....	434
19.6.5. Conclusions.....	434
 <i>Chapitre 20. L'équilibrage des lignes d'arbre de machines tournantes</i>	
20.1. Introduction	435
20.A. Equilibrage des lignes d'arbre rigide	437
20.2. Notations.....	437
20.3. Définition.....	438
20.3.1. Les trièdres de référence.....	438
20.3.2. Les plans de référence	439
20.3.3. Les balourds.....	439
20.3.4. Le lancer	442
20.3.5. Les coefficients d'influence	442
20.4. Les opérations sur les vecteurs	442
20.5. Théorie de l'équilibrage des rotors rigides.....	443
20.5.1. Les équations de l'équilibrage.....	443
20.5.2. Résolution mathématique	444
20.6. Procédure d'équilibrage.....	445
20.6.1. Détermination des coefficients d'influence	446
20.6.2. Application numérique	447
20.7. Principales précaution opératoires.....	449

20.8. Sources d'erreurs dans les opérations d'équilibrage.....	455
20.9. Qualité d'équilibrage	463
20.9.1. Définition de la qualité d'équilibrage Norme E 90 600	463
20.9.2. Qualité d'équilibrage liée aux réactions sur les paliers.....	464
20.9.3. Critère lié aux mouvements de l'arbre dans les paliers hydrodynamiques à huile.....	465
20.9.4. Détermination du balourd unitaire à partir du critère de qualité.....	466
20.10. Equilibrage des compresseurs de l'usine EURODIF	467
20.11. Méthode d'équilibrage sans mesure de phase	469
20.11.1. Méthode de la sinusoïde.....	470
20.11.2. Méthode du parallélogramme	471
20.11.3. Méthode des trois lancers à 120 degrés	472
20.12. <i>Equilibrage des lignes d'arbre flexibles</i>	473
20.12. Approche théorique.....	473
20.12.1. Déformation élastique des rotors	473
20.12.2. Forces centrifuges dues aux balourds correcteurs	474
20.12.3. Equations de l'équilibre	475
20.12.4. Vitesses critiques et déformées.....	475
20.12.5. Equations de l'équilibrage	476
20.12.6. Procédure pratique de l'équilibrage des rotors élastique	478
20.12.7. Détermination des caractéristiques en flexion.....	478
20.13. Applications.....	479
20.13.1. Equilibrage in situ d'un rotor de turbine.....	479
20.13.2. Rotor d'ultracentrifugeuse	481
 <i>Chapitre 21. Le suivi vibratoire au service de la maintenance</i>	
21.1. Introduction	485
21.2. Description du moteur, support de l'étude fondamentale.....	486
21.3. Etude préalable du comportement dynamique des lignes d'arbre et des structures d'accueil	487
21.4. Les gammes de montage et le plan de contrôle	487
21.5. Le choix de l'instrumentation.....	489
21.6. Seuils d'alerte et d'alarme. Exploitation des expertises.....	490
21.7. Application: mise au point du moteur de la figure 21.1	493
21.8. Le suivi vibratoire.....	496
21.8.1. Historique du suivi vibratoire	496
21.8.2. Utilisation des filtres à fréquence centrale	499
21.8.3. Mise en service des filtres suiveurs	499
21.8.4. La captation des transitoires	500
21.8.4. Le suivi vibratoire dans le domaine fréquentiel	501
21.9. Le suivi vibratoire des grosses machines tournantes	503

21.9.1. Contrôle des roulements d'un turboréacteur.....	503
21.9.2. Suivi vibratoire des ailettes d'une turbo-machine.....	504
21.9.3. Mesure des faibles niveaux vibratoires.....	505
21.9.4. L'équilibrage des lignes d'arbre.....	506
21.9.5. Ecart insuffisant entre la fréquence critique et la fréquence de rotation	507
21.9.6. Désalignement des lignes d'arbres	508
21.9.7. Isolation vibratoire des machines tournantes.....	509
21.9.8. Les défauts des cages de roulement	511
21.10. Instrumentation basée sur la théorie des vibrations	511
21.10.1. La recherche des défauts internes métallurgiques.....	511
21.10.2. La détection des fuites.....	512
21.10.3. Les ultrasons	514
21.10.4. L'émission acoustique.....	514
21.10.5. L'interférométrie laser	514
21.11. Le contrôle des huiles	514
21.12. Organisation du suivi vibratoire	515