

Marc THOMAS, Frédéric LAVILLE

Simulation
des vibrations mécaniques
par Matlab, Simulink et Ansys

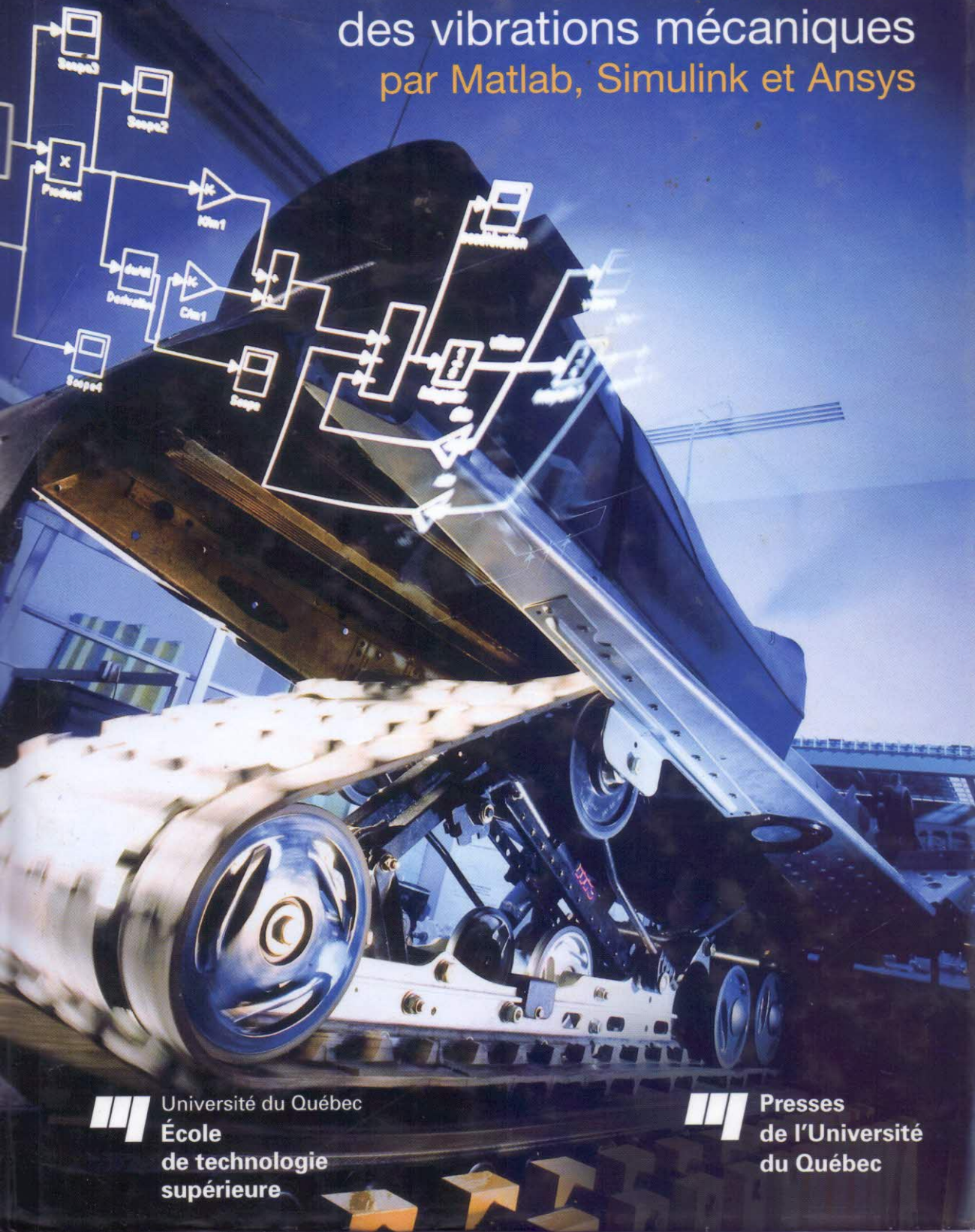


TABLE DES MATIÈRES

1	MOUVEMENT HARMONIQUE	1
1.1	Les vibrations	1
1.2	Mouvement harmonique	2
1.2.1	Définitions de la vibration (norme AFNOR 90.001)	2
1.2.2	Définitions de déplacement, vitesse et accélération	4
1.2.2.1	<i>Déplacement</i>	4
1.2.2.2	<i>Vitesse</i>	5
1.2.2.3	<i>Accélération</i>	6
1.2.3	Choix entre déplacement, vitesse et accélération	7
1.3	Les unités	8
1.4	Récapitulatif	8
1.5	Exercices – Chapitre 1	10
2	MODÉLISATION DES SYSTÈMES MÉCANIQUES PAR DES ÉLÉMENTS DISCRETS	13
2.1	Introduction	13
2.2	Degrés de liberté	15
2.3	Éléments des systèmes mécaniques	15
2.3.1	Éléments de masse	15
2.3.1.1	<i>Translation</i>	15
2.3.1.2	<i>Rotation</i>	16
2.3.2	Éléments d'amortisseur	18
2.3.2.1	<i>Amortissement visqueux C</i>	18
2.3.2.2	<i>Amortissement structural (ou hystérétique)</i>	22
2.3.2.3	<i>Le frottement sec (de Coulomb)</i>	22
2.3.3	Éléments de ressort K	23
2.3.3.1	<i>Ressort en translation</i>	23
2.3.3.2	<i>Ressort en rotation</i>	24
2.4	Discrétisation des systèmes	24
2.4.1	Méthode de discrétisation	24
2.4.2	Deuxième étape : représentation simplifiée	26
2.4.3	Notion de paramètres équivalents de masse, amortisseur et raideur	26
2.4.4	Méthode des énergies équivalentes	31
2.4.4.1	<i>Rigidité équivalente par équivalence énergétique</i>	32
2.4.4.2	<i>Masse équivalente</i>	34
2.5	Modélisation de poutres continues en système à 1 ddl	37
2.6	Récapitulatif	38
2.7	Exercices – Chapitre 2	40
3	ÉQUATIONS DU MOUVEMENT DES SYSTÈMES MÉCANIQUES	51
3.1	Introduction	51
3.2	Approche newtonienne	51
3.2.1	Identification des variables	51
3.2.2	Détermination du nombre d'inconnues	51

3.2.3	Tracé des diagrammes de corps libre (DCL)	52
3.2.3.1	<i>Méthode des déplacements relatifs virtuels</i>	52
3.2.3.2	<i>Méthode systématique de mise en équation</i>	52
3.2.4	Écrire les équations aux nœuds	53
3.2.5	Détermination et mise en en forme des équations finales	54
3.3	Système Masse-Ressort (approche newtonienne)	55
3.4	Système Masse-Ressort-Amortisseur (approche newtonienne)	57
3.4.1	Mise en forme des équations en vue de leur résolution	58
3.4.2	Tracé des DCL	59
3.5	Approche basée sur la conservation d'énergie	64
3.6	Exercices – Chapitre 3	68
4	RÉPONSE À UNE EXCITATION TRANSITOIRE D'UN SYSTÈME À 1 DEGRÉ DE LIBERTÉ (1^{RE} PARTIE)	95
4.1	Introduction	96
4.2	Équation d'un système masse - ressort - amortisseur à un degré de liberté	96
4.3	Résolution analytique directe	98
4.3.1	Principe de résolution	98
4.3.2	Sens physique des termes de la solution	98
4.4	Réponse libre d'un système masse - ressort (sans amortisseur, donc conservatif)	99
4.4.1	Fréquence naturelle	100
4.4.2	Réponse libre non amortie	102
4.4.3	Principes de conception	104
4.5	Réponse libre d'un système masse - ressort - amortisseur (non conservatif)	106
4.5.1	Amortissement critique	107
4.5.2	Mouvement sur amorti ($\zeta > 1$)	110
4.5.3	Mouvement sous amorti ($\zeta < 1$)	111
4.5.3.1	<i>Réponse du système sous amorti</i>	112
4.5.3.2	<i>Décrément logarithmique</i>	114
4.5.3.3	<i>Détermination du temps d'arrêt des oscillations</i>	118
4.6	Calcul de la réponse libre dans l'environnement MATLAB	118
4.7	Calcul de la réponse vibratoire par transformées de Laplace	119
4.8	Simulation de l'excitation transitoire à l'aide de Ansys	121
4.8.1	Calcul de la fréquence naturelle d'un système masse ressort à 1 ddl à l'aide de Ansys	122
4.8.2	Calcul de la fréquence naturelle d'un système à 1 ddl en torsion à l'aide de Ansys	123
4.8.3	Calcul de la réponse transitoire d'un système masse ressort amortisseur à 1 ddl à l'aide de Ansys	124
4.9	Récapitulatif : Schéma de résolution par la méthode analytique directe	126
4.10	Exercices – Chapitre 4	128
5	RÉPONSE À UNE EXCITATION TRANSITOIRE D'UN SYSTÈME À 1 DEGRÉ DE LIBERTÉ (2^E PARTIE : EXCITATION TRANSITOIRE FORCÉE, MÉTHODES ANALYTIQUE ET NUMÉRIQUE)	141
5.1	Excitation transitoire forcée, méthode analytique	141
5.1.1	Les fonctions singulières	141

5.1.2	Fonction de réponse impulsionnelle (I.R.F.)	142
5.1.3	Réponse forcée à une impulsion	144
5.1.4	Réponse à une excitation arbitraire quelconque	149
5.1.5	Fonction échelon	151
5.1.6	Fonction créneau	156
5.1.7	Fonction rampe	157
5.1.8	Relations entre fonctions rampe, échelon et impulsion	158
5.2	Résolution numérique à l'aide de SIMULINK	159
5.2.1	Écriture des équations adaptée au calcul numérique	159
5.2.2	Construction de schémas-blocs	160
5.2.2.1	<i>Point de distribution</i>	160
5.2.2.2	<i>Sommation</i>	161
5.2.2.3	<i>Multiplication par une constante (ou gain)</i>	161
5.2.2.4	<i>Intégration</i>	161
5.2.3	Signaux d'excitation (ou signaux sources)	162
5.2.4	Graphiques de sortie	162
5.2.5	Principe de construction du schéma-bloc	162
5.2.6	Paramètres importants pour la simulation numérique	164
5.3	Simulation de la réponse aux impulsions et fonctions échelons à l'aide d'ANSYS	167
5.3.1	Calcul à l'aide de Ansys de la réponse transitoire d'un système masse ressort amortisseur à 1 ddl soumis à une fonction créneau	167
5.3.2	Calcul à l'aide de Ansys de la réponse transitoire d'un système masse ressort amortisseur à 1 ddl soumis à une fonction échelon	171
5.4	Exercices – Chapitre 5	173
6	RÉPONSE À UNE EXCITATION FORCÉE HARMONIQUE D'UN SYSTÈME À UN DEGRÉ DE LIBERTÉ	177
6.1	Introduction	177
6.2	Présentation de la méthode de résolution analytique	177
6.2.1	Principe de résolution	177
6.2.2	Sens physique des termes de la solution	179
6.3	Introduction à l'excitation harmonique	180
6.4	Méthode générale de résolution appliquée au cas d'une excitation harmonique	180
6.4.1	Système à 1 degré de liberté	180
6.4.2	Résolution	180
6.5	Réponse en fréquence : amplification	184
6.5.1	Représentation graphique de la réponse en amplitude	185
6.5.2	Propriétés du module de l'amplification vibratoire	185
6.5.3	Principes de conception	190
6.6	Réponse d'un système forcé non amorti	192
6.7	Réponse forcée non amortie à la résonance	194
6.8	Mesure d'amortissement	195
6.9	Modèle Simulink	201
6.10	Excitation arbitraire périodique	202
6.10.1	Décomposition d'un signal en série de Fourier	203
6.10.2	Niveau efficace	204

6.10.3 Propriétés d'orthogonalité	204
6.10.4 Réponse à une excitation décomposée en série de Fourier	207
6.10.5 Calcul numérique des coefficients de Fourier	208
6.11 Calcul de la réponse harmonique à l'aide d'ANSYS	212
6.12 Récapitulatif	215
6.13 Exercices – Chapitre 6	216
7 TRANSMISSIBILITÉ DES VIBRATIONS, MOUVEMENT DE LA BASE, DÉSÉQUILIBRE ET MOUVEMENT RELATIF D'UN SYSTÈME À 1 DEGRÉ DE LIBERTÉ	221
7.1 Transmissibilité des forces	221
7.1.1 Représentation graphique de la transmissibilité des forces	224
7.1.2 Quelques propriétés du module de la transmissibilité des forces	225
7.1.3 Principes d'isolation des machines	226
7.2 Mouvement harmonique de la base	228
7.2.1 Réponse à une excitation arbitraire périodique par la base	231
7.2.2 Simulation Simulink d'une excitation par la base	233
7.2.3 Force transmise à la masse par le déplacement de la base	235
7.3 Mouvement relatif de la masse par rapport à la base	238
7.4 Réponse d'un système amorti sous l'effet d'un déséquilibre	240
7.5 Récapitulatif	248
7.6 Tableau Récapitulatif	249
7.7 Exercices – Chapitre 7	250
8 AMORTISSEMENT DES VIBRATIONS	269
8.1 Introduction	269
8.2 Énergie dissipée par l'amortisseur visqueux	269
8.2.1 Calcul de l'énergie dissipée par cycle	269
8.2.2 Énergie dissipée à la résonance, notion de facteur de perte	271
8.2.3 Courbe force-déplacement	271
8.2.4 Amortissement visqueux équivalent	273
8.3 Amortissement de Coulomb	274
8.3.1 Étude du mouvement libre avec friction	275
8.3.2 Couple de frottement en torsion	283
8.3.3 Simulation de la réponse libre avec un amortissement de Coulomb à l'aide d'Ansys	283
8.3.4 Friction sous mouvement harmonique	286
8.4 Amortissement structural	287
8.4.1 Amortissement structural en vibration libre	290
8.4.2 Amortissement structural sous excitation harmonique	291
8.4.3 Simulation par ANSYS d'un amortissement structural	292
8.5 Module des matériaux viscoélastiques de Young	296
8.6 Conception des composites viscoélastiques	298
8.6.1 Revêtement simple	298
8.6.2 Revêtement en forme de sandwich	300
8.7 Récapitulatif	302
8.8 Exercices – Chapitre 8	303

9	RÉSONANCES, MODES ET RÉPONSES LIBRES DES SYSTÈMES À PLUSIEURS DEGRÉS DE LIBERTÉ	311
9.1	Introduction	311
9.2	Mise en équation d'un système sous forme matricielle	311
9.3	Calcul des fréquences de résonance et des modes	314
9.3.1	Calcul des fréquences de résonance d'un système à plusieurs degrés de liberté	315
9.3.1.1	<i>Valeurs et vecteurs propres</i>	315
9.3.1.2	<i>Analogie avec le problème mécanique</i>	315
9.3.2	Calcul des modes	318
9.3.3	Calcul des modes à l'aide de ANSYS	323
9.4	Réponse libre d'un système à 2 degrés de liberté.	325
9.5	Torsion	331
9.6	Coordonnées généralisées	331
9.7	Récapitulatif	334
9.8	Exercices – Chapitre 9	335
10	ANALYSE MODALE DES STRUCTURES	357
10.1	Introduction	357
10.2	Analyse modale d'un système non amorti	357
10.2.1	Orthogonalité des modes	359
10.2.2	Normalisation des modes	365
10.2.2.1	<i>Normalisation par rapport à l'unité</i>	365
10.2.2.2	<i>Normalisation par rapport à la masse</i>	366
10.3	Analyse modale d'un système amorti visqueux	368
10.4	Solution générale par formulation d'états	372
10.5	Modèle structural	374
10.6	Appropriation modale	376
10.7	Méthode autorégressive ARMA	379
10.7.1	Méthode 1: transformée en z	382
10.7.2	Méthode 2: covariance	382
10.7.3	Méthode AR	384
10.8	Exercices – Chapitre 10	387
11	VIBRATIONS FORCÉES HARMONIQUES À PLUSIEURS DEGRÉS DE LIBERTÉ ET ABSORBEURS DYNAMIQUES	413
11.1	Introduction	413
11.2	Méthode de compliance	413
11.3	Calcul de la réponse forcée harmonique d'un système à 2 degrés de liberté par la méthode de compliance	416
11.4	Absorbeur dynamique	419
11.4.1	Absorbeur dynamique non amorti	420
11.4.2	Absorbeur dynamique amorti	429
11.4.3	Absorbeur de Houdaille	433
11.5	Récapitulatif	435
11.6	Exercices – Chapitre 11	436

12 LES VIBRATIONS DES SYSTÈMES CONTINUS	457
12.1 Les vibrations des câbles	457
12.1.1 Fréquences naturelles et modes des câbles	460
12.1.1.1 <i>Solution spatiale et conditions aux frontières</i>	461
12.1.1.2 <i>Solution temporelle</i>	462
12.1.2 Réponse vibratoire d'un câble	462
12.1.3 Modes vibratoires des câbles	464
12.2 Les vibrations des poutres en flexion	466
12.2.1 Solution temporelle	467
12.2.2 Solution spatiale	468
12.2.3 Exemple de conditions aux frontières	468
12.3 Les vibrations de membranes	474
12.3.1 Équations du mouvement	474
12.3.2 Conditions initiales et aux frontières	476
12.3.3 Réponse vibratoire	477
12.3.4 Conditions aux frontières d'une membrane encastrée	478
12.4 Les vibrations de plaques minces	479
12.4.1 Conditions aux frontières	480
12.4.2 Application pour une plaque rectangulaire appuyée sur ses bords	481
12.4.3 Calculs simplifiés des résonances de plaques carrées ou circulaires	482
12.4.4 Calculs simplifiés des résonances de plaques carrées ou circulaires	483
12.4.5 Calculs simplifiés des résonances de plaques rectangulaires	483
12.5 Exercices – Chapitre 12	485
13 ÉTUDE DE L'ANALYSE MODALE EXPÉRIMENTALE (AME)	487
13.1 Analyse Modale Expérimentale (AME)	487
13.2 Systèmes de mesures	488
13.2.1 Excitation	488
13.2.1.1 <i>Excitateur électrodynamique</i>	488
13.2.1.2 <i>Vérin hydraulique</i>	489
13.2.1.3 <i>Excitation harmonique</i>	490
13.2.1.4 <i>Excitation par une force aléatoire connue</i>	491
13.2.1.5 <i>Excitation par choc</i>	492
13.2.1.6 <i>Marteau d'impact</i>	493
13.2.2 L'accéléromètre	494
13.2.2.1 <i>Gamme de fréquences des accéléromètres</i>	498
13.2.2.2 <i>Principes de conception d'un accéléromètre</i>	500
13.2.3 Capteur de forces	504
13.2.4 Amplificateurs conditionneurs	505
13.3 Traitement du signal	505
13.3.1 Forme exponentielle des séries de Fourier	508
13.3.2 Transformée de Fourier	508
13.3.3 Échantillonnage des signaux	512
13.3.3.1 <i>Phénomène de recouvrement</i>	514
13.3.3.2 <i>Théorème de Shannon</i>	515
13.3.3.3 <i>Principe d'incertitude de Heisenberg</i>	516
13.3.4 Transformée discrète de Fourier	519

13.3.5	Effet du fenêtrage	521
13.3.6	Logiciel d'analyse spectrale	526
13.4	Analyse modale expérimentale (A.M.E.)	527
13.4.1	Fonction d'auto corrélation R_{xx} et de Corrélation croisée R_{xf}	527
13.4.2	Auto spectre S_{xx} et spectre croisé S_{xf}	528
13.4.3	Fonctions de transfert H	528
13.4.4	Cohérence des signaux	535
13.4.5	Technique de mesure	535
13.4.6	Recherche des fréquences naturelles	536
13.4.7	Méthodes de mesures d'amortissement	536
13.4.7.1	<i>Méthode 1 : Amplification maximale</i>	537
13.4.7.2	<i>Méthode 2 : Bande passante</i>	538
13.4.7.3	<i>Méthode 3 : partie réelle du signal</i>	538
13.4.7.4	<i>Méthode du décrétement logarithmique</i>	541
13.4.7.5	<i>Extraction des paramètres par la méthode de NYQUIST</i>	542
13.4.8	Mesure des modes	547
13.4.8.1	<i>Définition des modes</i>	547
13.4.8.2	<i>Analyse Modale</i>	548
13.4.8.3	<i>Amortissement proportionnel</i>	549
13.4.8.4	<i>Identification des matrices de rigidité et d'amortissement</i>	549
13.4.8.5	<i>Évaluation des modes</i>	551
13.4.9	Identification des paramètres physiques	558
13.5	Combinaison de systèmes complexes	559
13.6	Exercices – Chapitre 13	561
14	LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS, APPLIQUÉE AUX BARRES ET AUX POUTRES	567
14.1	Introduction	567
14.2	Méthode des éléments finis par la méthode des travaux virtuels	571
14.2.1	Relation déplacement de l'élément- déplacement des nœuds	571
14.2.2	Relation déformation de l'élément- déplacement des nœuds	571
14.2.3	Relation contrainte- déformation	572
14.2.4	Méthode des travaux virtuels	572
14.3	Éléments de barre (tension, compression)	573
14.3.1	Fonction de forme	574
14.3.2	Matrice élémentaire de rigidité d'une barre.	575
14.3.3	Matrice élémentaire de masse d'un élément de barre	576
14.4	Application des conditions aux frontières	577
14.5	Assemblage des éléments	579
14.6	Assemblages généralisés	585
14.6.1	Matrice de rigidité globale	586
14.6.2	Matrice de masse globale	587
14.7	Éléments de poutre	587
14.8	Masses concentrées	592
14.8.1	Comparaison entre masse répartie et masse concentrée	595
14.8.2	Masse répartie	595
14.8.3	Masse concentrée	596

14.9	Réduction de l'ordre des modèles	597
14.10	Simulation des vibrations de poutres à l'aide de Ansys	603
14.11	Exercices – Chapitre 14	606
15	ESSAIS DE QUALIFICATION ET DE FATIGUE SOUS EXCITATION HARMONIQUE ET ALÉATOIRE	613
15.1	Essais de qualification de produits par excitation harmonique	613
15.1.1	Organismes qui élaborent les spécifications	613
15.1.2	Essais à l'aide de vibrateurs électrodynamiques	614
15.2	Essais de vibrations harmoniques	615
15.2.1	Exemples d'essais de vibration	615
15.2.2	Essais de fatigue par excitation harmonique	617
15.3	Vibrations aléatoires	619
15.4	Différences entre vibrations sinusoïdales et aléatoires	624
15.5	Courbes d'excitation en vibration aléatoire	626
15.5.1	Essais de qualification sous vibrations aléatoires	629
15.5.2	Application de l'excitation aléatoire au déverminage des produits	632
15.6	Courbe de distribution normale (Gaussienne)	633
15.7	Système à 1 ddl soumis à une excitation aléatoire	635
15.8	Calcul de la durée de vie en fatigue	637
15.9	Systèmes à plusieurs degrés de liberté	644
15.10	Durée de vie en fatigue sous vibration combinée	648
15.11	Exercices – Chapitre 15	654
16	ESTIMATION DE L'EXPOSITION DES INDIVIDUS AUX VIBRATIONS	661
16.1	Introduction	661
16.2	Modes d'exposition aux vibrations	661
16.3	Domaines d'application de la norme ISO 2631	661
16.3.1	Direction des vibrations	662
16.3.2	Emplacement des mesurages	662
16.3.3	Intensité des vibrations	663
16.3.4	Appareils de mesurage	663
16.3.5	Analyse des vibrations sur bande large	664
16.3.6	Temps d'exposition	664
	16.3.6.1 Application de la norme ISO 2631	665
	16.3.6.2 Limites à la capacité réduite dues à la fatigue (ISO 2631-1985)	667
	16.3.6.3 Limites d'exposition en matière de sécurité (ISO 2631-1985)	668
	16.3.6.4 Limite au confort réduit (ISO 2631-1985)	668
16.4	Vibrations continues ou induites par des chocs dans les bâtiments (1 à 80 Hz)	668
16.4.1	Domaines d'application	669
16.4.2	Direction des vibrations	669
16.4.3	Évaluation des vibrations	669
16.4.4	Critères d'amplitudes acceptables	669
16.5	Estimation de l'exposition des individus aux vibrations verticales (0,1 à 0,63 Hz)	670
16.5.1	Domaines d'application	670
16.5.2	Limites d'inconfort sévère	670
16.6	Transmissibilité mécanique du corps humain dans la direction z (ISO 7962)	671