

# Table des matières

<b>Chapitre 1. Théorie des vibrations</b> .....	<b>13</b>
1.1. Problématique .....	13
1.1.1. Justification des essais en environnement mécanique.....	13
1.1.2. Qualité des essais en environnement .....	14
1.1.3. Ensembles générateurs de vibrations .....	14
1.1.4. Terminologie « chocs et vibrations » .....	15
1.1.5. Méthodes d'essais .....	15
1.1.6. Incertitude de mesure .....	15
1.1.7. Comparaison interlaboratoire et essais d'aptitude .....	16
1.1.8. Management de la métrologie .....	16
1.2. Les différents types de signaux mécaniques .....	16
1.2.1. Généralités .....	16
1.2.2. Préalables mathématiques.....	17
1.2.2.1. Cercle trigonométrique.....	17
1.2.2.2. Vecteurs et représentation de Fresnel.....	17
1.2.2.3. Mouvement sinusoïdal rectiligne.....	18
1.2.2.4. Paramètres de cinématique.....	21
1.2.3. Types de signaux mécaniques.....	25
1.2.3.1. Signaux périodiques stationnaires .....	26
1.2.3.2. Signaux « quasi sinusoïdaux » stationnaires.....	28
1.2.3.3. Signaux « complexes » .....	28
1.2.3.4. Signaux aléatoires stationnaires .....	28
1.2.3.5. Signaux aléatoires non stationnaires.....	29
1.2.3.6. Signaux transitoires.....	29
1.2.4. Les différents types de signaux mécaniques – Approche pratique .....	29
1.3. Théorie des vibrations – Rappels.....	31
1.3.1. Loi fondamentale de la dynamique .....	31
1.3.2. Notion de degré de liberté.....	31
1.3.3. Systèmes à un degré de liberté .....	32
1.3.3.1. Eléments constitutifs du modèle à 1 ddl .....	32
1.3.3.2. Systèmes vibrants en translation .....	32
1.3.3.3. Systèmes vibrants en rotation .....	33
1.3.4. Oscillations libres d'un système non amorti.....	34
1.3.4.1. Systèmes en translation.....	34
1.3.4.2. Systèmes en rotation .....	35
1.3.5. Oscillations libres d'un système amorti.....	35
1.3.6. Oscillations forcées d'un système amorti.....	39
1.3.6.1. Equation du mouvement .....	39
1.3.6.2. Pulsation, amplitude et phase de la réponse.....	40
1.3.6.3. Expressions en variables normalisées .....	41
1.3.6.4. Cercle d'admittance de vitesse.....	43
1.3.6.5. Bande passante .....	45
1.3.6.6. Admittance accélération.....	46
1.3.6.7. Transmissibilité .....	47

1.3.7. Systèmes à plusieurs degrés de liberté couplés .....	48
1.3.7.1. Oscillations libres d'un système non amorti.....	48
1.3.7.2. Oscillations libres d'un système à deux ddl amorti .....	53
1.3.7.3. Oscillations forcées d'un système à deux degrés de liberté amorti .....	56
1.4. Notion d'impédance mécanique.....	58
1.4.1. Généralités .....	58
1.4.2. Définitions.....	59
1.4.2.1. Paramètres associés à l'impédance mécanique .....	59
1.4.2.2. Représentation vectorielle .....	60
1.4.2.3. Transformée de Fourier et transformée de Laplace des fonctions non sinusoïdales .....	61
1.4.2.4. Calculs d'impédances simples d'éléments discrets usuels .....	61
1.4.2.5. Principes d'utilisation.....	63
1.4.2.6. Règles d'association .....	64
1.4.2.7. Théorèmes généraux de la mécanique .....	65
1.4.2.8. Modélisation générale des structures par un réseau d'impédances .....	70
1.4.3. Résonance et antirésonance .....	72
1.4.3.1. Antirésonance .....	72
1.4.3.2. Résonance .....	73
1.4.3.3. Impédance d'un système à 2 ddl amorti .....	75
1.4.4. Problèmes posés par la simulation en laboratoire d'environnement .....	78
1.4.5. Conclusion.....	80
1.5. Analogies électromécaniques .....	80
1.5.1. Généralités .....	80
1.5.2. Analogie de Maxwell du type « force tension ».....	82
1.5.2.1. Avantages et inconvénients de l'analogie de Maxwell.....	83
1.5.3. Analogie de Darrieus « force intensité » .....	83
1.5.3.1. Construction de l'analogie de Darrieus.....	85
1.5.4. Unités et correspondance mécanique électrique.....	86
1.5.5. Etablissement des schémas électriques.....	87
1.6. Simulation par ordinateur analogique et logique .....	90
1.6.1. Généralités .....	90
1.6.2. Structure d'un ordinateur analogique et logique.....	90
1.6.3. Résolution de divers systèmes .....	90
1.6.4. Programmation séquentielle des ordinateurs analogiques .....	91
1.7. Conclusion.....	92
<b>Chapitre 2. Analyse des signaux .....</b>	<b>93</b>
2.1. Généralités .....	93
2.1.1. Forme temporelle ou spectrale .....	93
2.1.2. Fonctions de corrélation.....	93
2.1.3. Probabilités.....	94
2.1.4. Analyses spectrales .....	94
2.1.5. Notion de spectre de choc .....	96
2.2. Densité spectrale de puissance .....	97
2.2.1. Généralités .....	97
2.2.2. Etude de la DSP.....	99
2.2.2.1. Introduction .....	99
2.2.2.2. Considérations d'utilisation .....	102
2.2.2.3. Spectre de coïncidence et de quadrature.....	113
2.2.2.4. Conclusion .....	114
2.3. Série de Fourier – Intégrale de Fourier .....	115
2.3.1. Généralités .....	115
2.3.2. Considérations d'utilisation .....	117

2.3.3. Exploitation des résultats .....	117
2.3.4. Exemple de calcul .....	118
<b>Chapitre 3. Préparation des essais.....</b>	<b>121</b>
3.1. Analyse de la demande d'essai et des spécifications d'essais associées .....	121
3.1.1. La revue de la demande d'essai .....	121
3.1.2. L'analyse de la spécification d'essais .....	122
3.1.3. La proposition commerciale ou le contrat .....	123
3.1.4. La revue de la commande.....	123
3.2. La mise en route de l'essai.....	123
3.3. Les montages d'essais.....	124
3.3.1. Généralités .....	124
3.3.2. Principes de construction .....	126
3.3.3. Notions de RdM.....	130
3.3.4. Influence de la fabrication .....	135
3.3.5. Conclusion.....	136
3.4. Le déroulement de l'essai .....	137
3.5. Le rapport d'essais .....	138
<b>Chapitre 4. Les essais.....</b>	<b>141</b>
4.1. Les essais de vibration sinus .....	141
4.1.1. Essais à fréquence fixe .....	141
4.1.2. Essais en sinus balayé.....	142
4.1.2.1. Définitions .....	142
4.1.2.2. Vibrations en sinus balayé .....	143
4.1.2.3. Origine et propriétés des principaux types de balayage.....	144
4.1.3. Conclusion.....	158
4.2. Les essais de vibrations en bruits ou aléatoires .....	158
4.2.1. Généralités .....	158
4.2.2. Notions sur les fonctions aléatoires .....	160
4.2.2.1. Processus aléatoire.....	160
4.2.3. Les vibrations aléatoires .....	165
4.2.3.1. Généralités .....	165
4.2.3.2. Densité de probabilité .....	165
4.2.3.3. Densité de probabilité des valeurs crêtes.....	166
4.2.3.4. Densité spectrale de puissance.....	167
4.3. Les essais particuliers .....	170
<b>Chapitre 5. Applications aux matériels .....</b>	<b>175</b>
5.1. Sources et effets des vibrations .....	175
5.1.1. Généralités .....	175
5.1.2. Sources des vibrations.....	175
5.1.3. Effets des vibrations .....	176
5.1.4. Notions de fatigue et de dommages dus aux vibrations .....	176
5.1.4.1. Généralités .....	176
5.1.4.2. Les courbes de Wöhler .....	177
5.1.4.3. Linéarité.....	178
5.1.4.4. Règle de Miner.....	178
5.2. Les équipements électroniques .....	179
5.2.1. Dans les véhicules terrestres.....	179
5.2.2. Dans les navires et les sous-marins .....	180
5.2.3. Dans les avions, hélicoptères, missiles .....	181
5.2.4. Conclusion.....	182

5.3. Conception des équipements électroniques soumis à des vibrations .....	182
5.3.1. Mode opératoire .....	182
5.3.1.1. Etablissement des spécifications retenues .....	182
5.3.1.2. Emplacement, zoning et système de fixation .....	182
5.3.1.3. Ensembles et sous-ensembles critiques .....	182
5.3.1.4. Méthode et phase de développement .....	183
5.3.2. Techniques de conception .....	184
5.3.2.1. Rigidifier les éléments des structures mécaniques support .....	185
5.3.2.2. Séparation des modes .....	187
5.3.2.3. Découplage des modes des sous-ensembles .....	187
5.3.2.4. Utilisation d'amortisseurs .....	188
5.3.3. Les cartes de circuits imprimés .....	189
5.3.3.1. Généralités .....	189
5.3.3.2. Fréquences minimales de sécurité des cartes .....	190
5.3.3.3. Rigidifier des cartes de CI .....	191
5.3.4. Montage des composants .....	195
5.3.4.1. Généralités .....	195
5.3.4.2. Précautions de montage des composants .....	196
5.3.5. Les boîtiers .....	197
5.3.5.1. Généralités .....	197
5.3.5.2. Les différents types de montage .....	198
5.3.5.3. Considérations sur la conception des boîtiers .....	201
5.3.6. Les câblages .....	202
5.3.7. Conclusion .....	203
5.4. Etude d'un cas particulier – Exemple d'analyse d'une baie électronique .....	203
<b>Chapitre 6. Pilotage des ensembles générateurs de vibrations et de chocs .....</b>	<b>209</b>
6.1. Principes généraux .....	209
6.2. Configuration type du matériel utilisé .....	211
6.3. Traçabilité de l'essai .....	211
6.4. Pilotage en mode sinusoïdal .....	212
6.4.1. Généralités .....	212
6.4.2. Génération du signal .....	213
6.4.3. Acquisition du signal .....	213
6.4.4. Mesures .....	213
6.4.5. Corrections .....	216
6.4.6. Sécurités sur les pilotes .....	217
6.4.7. Sécurités sur les voies de mesure .....	217
6.4.8. Sauvegardes .....	218
6.4.9. Temps différé .....	218
6.5. Pilotage en mode aléatoire .....	219
6.5.1. Génération du signal .....	219
6.5.2. Acquisition des mesures .....	225
6.6. Pilotage en chocs et transitoire .....	227
6.6.1. Génération sous forme temporelle .....	227
6.6.2. Génération et pilotage en spectre de choc .....	231
6.7. Pilotage en vibrations combinées .....	235
6.7.1. Généralités .....	235
6.7.2. Méthodes .....	236
6.7.3. Besoins actuels et nouveaux .....	237
6.8. Pilotage – Quelques règles essentielles .....	239

<b>Chapitre 7. Métrologie des moyens de mesures et d'essais .....</b>	<b>241</b>
7.1. Introduction aux capteurs accélérométriques .....	241
7.1.1. Généralités .....	241
7.1.2. Principe de fonctionnement .....	242
7.1.3. Principales caractéristiques .....	244
7.1.4. Etalonnage des capteurs accélérométriques .....	248
7.1.5. Précision des accéléromètres .....	250
7.1.6. Règles d'installation des capteurs .....	250
7.2. Amplificateurs de mesure .....	251
7.2.1. Généralités .....	251
7.2.2. Circuit équivalent .....	251
7.2.3. Amplificateur de tension .....	252
7.2.4. Convertisseurs de charge .....	253
7.3. Validation et vérification du moyen d'essais .....	257
7.4. Maîtrise de la métrologie dans un laboratoire d'essais .....	258
<b>Chapitre 8. Les moyens d'essais de vibrations .....</b>	<b>265</b>
8.1. Les excitateurs électrodynamiques .....	265
8.1.1. Description sommaire d'un excitateur électrodynamique .....	265
8.1.1.1. Vue éclatée .....	266
8.1.1.2. Vue simplifiée .....	266
8.1.2. Possibilités et performances en chocs .....	267
8.1.2.1. Possibilités .....	267
8.1.2.2. Performances en chocs .....	268
8.1.3. Production d'une impulsion d'accélération sur la table mobile d'un excitateur de vibrations .....	268
8.1.3.1. Limitations mécaniques .....	268
8.1.3.2. Limitations électriques .....	270
8.1.3.3. Déplacement maximal admissible .....	270
8.1.3.4. Limitations théoriques .....	270
8.1.3.5. Utilisation des consoles de pilotage actuelles .....	272
8.1.4. Modélisation d'un excitateur électrodynamique .....	273
8.1.4.1. Modèle mécanique .....	273
8.1.4.2. Cas de la table à vide ou chargée par une masse inerte .....	274
8.1.4.3. Cas de la table chargée par un système résonant .....	279
8.1.4.4. Influence de la charge résonante sur H(p) .....	284
8.1.5. Evaluation des paramètres de modélisation .....	285
8.1.5.1. Paramètres expérimentaux .....	285
8.1.5.2. Paramètres théoriques .....	287
8.1.5.3. Paramètres numériques .....	289
8.2. Les excitateurs hydrauliques .....	293
8.2.1. Généralités .....	293
8.2.1.1. Avantages .....	293
8.2.1.2. Inconvénients .....	293
8.2.2. Principe de fonctionnement .....	293
8.2.2.1. Le vérin .....	294
8.2.2.2. La servo valve .....	295
8.2.3. Equations de fonctionnement hydraulique .....	295
8.2.3.1. Généralités .....	295
8.2.3.2. Fonction de transfert des excitateurs hydrauliques .....	300
8.2.3.3. Application numérique .....	303
8.2.3.4. Distorsion harmonique .....	305
8.2.4. Utilisation en essais de chocs .....	305
8.2.5. Conclusion .....	307

<b>Conclusion .....</b>	<b>309</b>
<b>Annexe A. Lois fondamentales de l'hydraulique – Application à l'étude des générateurs de vibrations hydrauliques .....</b>	<b>311</b>
<b>Annexe B. Etude du modèle de base avec amortissement .....</b>	<b>325</b>
<b>Annexe C. Fréquences naturelles des cartes d'épaisseur 1,6 mm équipées de raidisseurs .....</b>	<b>329</b>
<b>Annexe D. Fréquences de résonances des cartes de CI en fonction des conditions de montage .....</b>	<b>333</b>
<b>Annexe E. Notion de Cepstrum.....</b>	<b>337</b>
<b>Annexe F. Tolérances sur les châssis de vibration.....</b>	<b>339</b>
<b>Annexe G. Détermination de l'incertitude de mesure – Exemple de méthode d'étalonnage des capteurs accélérométriques.....</b>	<b>341</b>
<b>Annexe H. Exemple d'allocations des EMT .....</b>	<b>371</b>
<b>Annexe I. Liste des méthodes d'essai en environnement normalisées .....</b>	<b>377</b>
<b>Annexe J. Stratégies de pilotage Synthèse simplifiée .....</b>	<b>389</b>
<b>Annexe K. Eléments mathématiques d'estimation des incertitudes (compléments) .....</b>	<b>395</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>413</b>
<b>Index .....</b>	<b>417</b>