

## Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	17
<b>Chapitre 1. Méthodes d'analyse du signal musical</b> . . . . .	21
Boris DOVAL	
1.1. Introduction . . . . .	21
1.2. Outils d'analyse du signal sonore . . . . .	23
1.2.1. Le signal musical et sa numérisation . . . . .	23
1.2.2. Analyse à court terme dans le domaine temporel . . . . .	24
1.2.3. Analyse à court terme dans le domaine fréquentiel . . . . .	25
1.2.4. Robustesse . . . . .	28
1.3. Analyse de l'enveloppe temporelle . . . . .	29
1.3.1. Enveloppe temporelle . . . . .	29
1.3.2. Estimation de l'enveloppe temporelle . . . . .	30
1.3.3. Segmentation . . . . .	32
1.4. Analyse des partiels et du bruit . . . . .	33
1.4.1. Partiels d'un signal . . . . .	33
1.4.2. Détection et sélection de pics . . . . .	34
1.4.3. Interpolation spectrale des pics . . . . .	36
1.4.4. Suivi de partiels . . . . .	37
1.4.5. Estimation de la partie bruit . . . . .	39
1.5. Analyse du fondamental . . . . .	41
1.5.1. Fréquence fondamentale . . . . .	42
1.5.2. Concevoir un algorithme de détermination du fondamental . . . . .	43
1.5.3. Prétraitements . . . . .	44
1.5.4. Méthodes temporelles . . . . .	45
1.5.5. Méthodes temporelles à court terme . . . . .	47
1.5.6. Méthodes fréquentielles à court terme . . . . .	48
1.5.7. Suivi de la fréquence fondamentale . . . . .	51
1.6. Analyse de l'enveloppe spectrale . . . . .	54
1.6.1. Enveloppe spectrale . . . . .	55

1.6.2. Estimation par prédiction linéaire (LPC) . . . . .	55
1.6.3. Estimation par cepstre discret . . . . .	57
1.6.4. Formants . . . . .	58
1.7. Suivi de notes et applications . . . . .	58
1.7.1. Quantification de la fréquence fondamentale . . . . .	60
1.7.2. Détection de début et de fin de notes . . . . .	60
1.7.3. Suivi de partition . . . . .	61
1.8. Bibliographie . . . . .	62
<b>Chapitre 2. La synthèse additive</b> . . . . .	<b>67</b>
Sylvain MARCHAND	
2.1. Le modèle additif . . . . .	68
2.1.1. Représentation des sons . . . . .	69
2.1.2. Transformations sonores . . . . .	74
2.1.3. Modèles dérivés . . . . .	77
2.2. Synthèse des partiels en temps réel . . . . .	77
2.2.1. Oscillateurs logiciels . . . . .	78
2.2.2. Utilisation de la transformée de Fourier inverse . . . . .	82
2.2.3. Résultats comparatifs . . . . .	89
2.3. Contrôle des partiels . . . . .	92
2.3.1. Variation des paramètres . . . . .	92
2.3.2. Rééchantillonnage par les splines . . . . .	97
2.4. Accélération par la psycho-acoustique . . . . .	99
2.4.1. Echelles perceptives . . . . .	100
2.4.2. Seuil d'audibilité . . . . .	101
2.4.3. Phénomène de masquage . . . . .	101
2.4.4. Algorithme général . . . . .	103
2.5. Techniques non linéaires . . . . .	105
2.5.1. Remarque préliminaire . . . . .	106
2.5.2. Synthèse par modulation d'amplitude . . . . .	106
2.5.3. Synthèse par modulation de fréquence . . . . .	107
2.6. Synthétiser les bruits . . . . .	109
2.6.1. Approximation du spectre . . . . .	110
2.6.2. Transformée de Fourier inverse . . . . .	110
2.6.3. Technique <i>overlap-add</i> . . . . .	111
2.7. Bibliographie . . . . .	111
<b>Chapitre 3. Techniques de spatialisation des sons</b> . . . . .	<b>119</b>
Véronique LARCHER, Arnaud LABORIE, Rémy BRUNO, Sébastien MONTOYA	
3.1. Introduction. . . . .	119
3.2. Rôle de la spatialisation dans la composition musicale . . . . .	120
3.2.1. Mise en espace « acoustique » . . . . .	120

3.2.2. Apport de l'électro-acoustique et de l'informatique sur la spatialisation . . . . .	121
3.3. Perception de l'incidence de sources sonores dans l'espace . . . . .	123
3.3.1. Les indices acoustiques de localisation . . . . .	123
3.3.2. Indices de localisation et techniques de spatialisation . . . . .	127
3.4. Les techniques binaurales et transaurales . . . . .	127
3.4.1. Encodage des indices de localisation . . . . .	127
3.4.2. Décodage pour une écoute au casque ou sur haut-parleurs. . . . .	129
3.4.3. Principales applications musicales . . . . .	130
3.4.4. Performances et limites . . . . .	131
3.5. Les techniques stéréophoniques et les potentiomètres panoramiques . . . . .	133
3.5.1. Principe d'encodage et de restitution . . . . .	133
3.5.2. Système d'enregistrement . . . . .	134
3.6. L'holophonie ou <i>Wave Field Synthesis</i> . . . . .	135
3.6.1. Modèle de représentation . . . . .	136
3.6.2. Principe d'enregistrement et de restitution . . . . .	137
3.6.3. Echantillonnage, fréquence limite et aliasing spatial . . . . .	138
3.6.4. Réduction du nombre de sources secondaires . . . . .	139
3.7. Les systèmes Ambisonic . . . . .	141
3.7.1. Modèle de représentation initial : les harmoniques sphériques . . . . .	141
3.7.2. Généralisation du modèle de représentation : les fonctions de Fourier-Bessel . . . . .	144
3.7.3. Principe d'enregistrement . . . . .	146
3.7.4. Synthèse . . . . .	147
3.7.5. Traitement . . . . .	148
3.7.6. Principe de restitution . . . . .	149
3.7.7. Ambisonic et holophonie . . . . .	151
3.8. Conclusion . . . . .	151
3.9. Bibliographie . . . . .	152
<b>Chapitre 4. Ordonnement pour les systèmes musicaux temps réel . . . . .</b>	<b>157</b>
Yann ORLAREY . . . . .	
4.1. Introduction. . . . .	157
4.2. Spécification du problème . . . . .	158
4.2.1. Définitions . . . . .	159
4.2.2. Opérations sur l'ordonnanceur . . . . .	159
4.2.3. Coût d'ordonnement . . . . .	160
4.2.4. Utilisation de l'ordonnanceur . . . . .	160
4.3. L'algorithme d'ordonnement . . . . .	161
4.3.1. L'histoire de Monsieur Nay et de la société DO-IT . . . . .	161
4.3.2. Implémentation de l'algorithme de Nay. . . . .	163
4.4. Performances . . . . .	170

4.4.1. Contexte des mesures . . . . .	170
4.4.2. Performances pour des séjours courts . . . . .	171
4.4.3. Performances pour des séjours moyens . . . . .	172
4.4.4. Performances pour des séjours longs . . . . .	173
4.5. Conclusion . . . . .	173
4.6. Bibliographie . . . . .	174
<b>Chapitre 5. MidiShare : une architecture logicielle pour la musique . . . . .</b>	<b>175</b>
Yann ORLAREY, Dominique FOBER et Stéphane LETZ	
5.1. Introduction. . . . .	175
5.2. MidiShare : une architecture logicielle pour la musique. . . . .	176
5.2.1. Le modèle conceptuel . . . . .	177
5.2.2. Des mécanismes sophistiqués pour la gestion du temps. . . . .	178
5.2.3. Une boîte à outils canonique . . . . .	179
5.3. Exemples . . . . .	183
5.3.1. Un squelette typique . . . . .	183
5.3.2. Un écho. . . . .	185
5.3.3. Un séquenceur. . . . .	188
5.4. Quelques difficultés de la programmation temps réel . . . . .	190
5.4.1. Composer avec la latence . . . . .	190
5.4.2. Dérive temporelle. . . . .	192
5.5. Conclusion . . . . .	193
5.6. Bibliographie. . . . .	194
<b>Chapitre 6. Grammaires, automates et musique . . . . .</b>	<b>195</b>
Marc CHEMILLIER	
6.1. Introduction. . . . .	195
6.2. La hiérarchie de Chomsky . . . . .	195
6.2.2. Equivalence entre grammaires et automates . . . . .	197
6.2.3. Tables de transition et chaînes de Markov . . . . .	198
6.2.4. Transductions rationnelles. . . . .	200
6.2.5. Notion de <i>parsing</i> . . . . .	201
6.3. Grammaires formelles et musique . . . . .	202
6.3.1. L'article de Curtis Roads . . . . .	202
6.3.2. Deux automates musicaux. . . . .	204
6.4. Grammaire de substitutions de jazz. . . . .	208
6.4.1. Règles de Steedman . . . . .	208
6.4.2. Moteur d'application des règles . . . . .	211
6.4.3. Arrangement des grilles pour piano . . . . .	214
6.4.4. Analyse par automate fini avec Lex . . . . .	216
6.5. Automate sériel . . . . .	221
6.5.1. Régularité du langage sériel. . . . .	221

6.5.2. Programme d'analyse par automate fini . . . . .	223
6.6. Bibliographie . . . . .	227
<b>Chapitre 7. Programmation visuelle pour la composition . . . . .</b>	<b>231</b>
Gérard ASSAYAG et Carlos AGON	
7.1. Introduction . . . . .	231
7.1.1. Modèles de langages à objet . . . . .	233
7.1.2. Modèles de langages visuels . . . . .	234
7.1.3. Le langage visuel Max . . . . .	234
7.2. Le langage visuel d'OpenMusic . . . . .	235
7.2.1. Spécification lexicale . . . . .	235
7.2.2. Spécification syntaxique . . . . .	237
7.2.3. Sémantique opérationnelle . . . . .	238
7.3. Implémentation . . . . .	239
7.3.1. Partie statique . . . . .	240
7.3.2. Protocole dynamique . . . . .	241
7.4. L'environnement OM . . . . .	243
7.4.1. <i>Workspaces</i> . . . . .	243
7.4.2. Packages . . . . .	244
7.4.3. Classes . . . . .	244
7.4.4. Sous-classage . . . . .	245
7.4.5. Patches, factories, instances, éditeurs . . . . .	246
7.4.6. Fonctions génériques, méthodes . . . . .	247
7.4.7. �diteurs musicaux . . . . .	248
7.5. Maquettes . . . . .	249
7.6. Quelques exemples musicaux . . . . .	257
7.6.1. Approche fonctionnelle . . . . .	257
7.6.2. Approche par objets . . . . .	259
7.7. Conclusion . . . . .	263
7.8. Bibliographie . . . . .	265
<b>Chapitre 8. Modèles temporels pour la synthèse musicale . . . . .</b>	<b>269</b>
Myriam DESAINTE-CATHERINE	
8.1. Introduction . . . . .	269
8.2. Les systèmes à base de pistes . . . . .	271
8.2.1. Un extrait d'une partie instrumentale . . . . .	271
8.2.2. Plusieurs parties instrumentales . . . . .	273
8.2.3. Utilité pratique . . . . .	274
8.3. Les systèmes hiérarchiques . . . . .	275
8.3.1. Combinaison temporelle . . . . .	275
8.3.2. Exemples . . . . .	276
8.3.3. Edition hiérarchique . . . . .	276

8.4. Les systèmes fonctionnels hiérarchiques . . . . .	277
8.4.1. Représentation des structures musicales . . . . .	277
8.4.2. Opérateurs structuraux . . . . .	279
8.4.3. Représentations graphiques des structures musicales . . . . .	280
8.4.4. Extraction d'informations à partir des termes fonctionnels . . . . .	281
8.4.5. Structures musicales et formes musicales . . . . .	284
8.4.6. Discussion . . . . .	285
8.4.7. Les opérateurs rythmiques d'OpenMusic . . . . .	292
8.5. L'approche logique . . . . .	294
8.5.1. Le paradigme logique . . . . .	295
8.5.2. La maintenance de relations temporelles . . . . .	296
8.5.3. Limitations dans le cadre musical . . . . .	297
8.6. Les systèmes hiérarchiques basés sur les grammaires . . . . .	299
8.6.1. Sémantique temporelle de hiérarchies musicales . . . . .	299
8.6.2. Evaluation . . . . .	302
8.6.3. Grammaires attribuées relationnelles . . . . .	305
8.6.4. Limitations du formalisme . . . . .	306
8.7. Conclusion . . . . .	307
8.8. Bibliographie . . . . .	308
<b>Chapitre 9. Algorithmes et techniques pour l'analyse musicale . . . . .</b>	<b>311</b>
Emilios CAMBOUROPOULOS et Pierre-Yves ROLLAND	
9.1. Introduction . . . . .	311
9.2. Frontières locales . . . . .	313
9.3. Accents locaux et structure métrique . . . . .	315
9.4. Patterns musicaux . . . . .	318
9.4.1. Un algorithme d'induction de patterns basée sur des répétitions exactes . . . . .	321
9.4.2. Un algorithme d'induction de patterns basée sur des répétitions approximatives . . . . .	322
9.5. Segmentation . . . . .	328
9.6. Similitude musicale et catégorisation . . . . .	331
9.7. Conclusion . . . . .	334
9.8. Annexes . . . . .	334
9.8.1. L'algorithme MDFL (version améliorée) . . . . .	334
9.8.2. L'algorithme Unscramble . . . . .	335
9.8.3. L'algorithme FExPat . . . . .	337
9.9. Bibliographie . . . . .	338

<b>Chapitre 10. Harmonisation musicale automatique et programmation par contraintes</b> . . . . .	291
François PACHET et Pierre ROY	
10.1. De l'harmonisation à la résolution de problèmes . . . . .	343
10.1.1. La musique tonale et les traités d'harmonie . . . . .	344
10.1.2. Les règles d'harmonie . . . . .	345
10.1.3. La composition automatique . . . . .	348
10.1.4. Le problème de la combinatoire . . . . .	348
10.2. Harmonisation automatique sous contraintes . . . . .	350
10.2.1. Les premières tentatives de modélisation du problème par les contraintes . . . . .	350
10.2.2. Utilisation de la satisfaction de contraintes . . . . .	351
10.2.4. Eléments algorithmiques . . . . .	354
10.2.5. Les techniques de recherche locale . . . . .	356
10.2.6. Autres approches . . . . .	357
10.2.7. Les systèmes existants . . . . .	359
10.3. Conclusion : le problème est-il résolu ? . . . . .	359
10.4. Bibliographie . . . . .	361
<b>Chapitre 11. L'analyse de Fourier</b> . . . . .	365
Sylvain MARCHAND	
11.1. La transformée de Fourier . . . . .	367
11.1.1. Notations . . . . .	367
11.1.2. Définitions . . . . .	367
11.1.3. Spectres . . . . .	369
11.1.4. Modèles sinusoidaux . . . . .	371
11.1.5. Transformée de Fourier à court terme . . . . .	372
11.2. Imprécisions de la transformée de Fourier classique . . . . .	374
11.2.1. Imprécision en fréquence . . . . .	377
11.2.2. Imprécision en amplitude . . . . .	378
11.2.3. Imprécision en phase . . . . .	379
11.2.4. Choix de la fenêtre d'analyse . . . . .	380
11.3. Méthodes pour l'amélioration de la précision . . . . .	386
11.3.1. Technique de l'interpolation parabolique . . . . .	386
11.3.2. Utilisation des dérivées du signal . . . . .	389
11.4. Bibliographie . . . . .	399
<b>Chapitre 12. MPEG, une norme pour la compression, la structuration et la description du son</b> . . . . .	403
Rémi RONFARD	
12.1. Introduction . . . . .	403

12.2. Bases psycho-acoustiques et algorithmiques . . . . .	404
12.2.1. Quantification et compression. . . . .	405
12.2.2. Psycho-acoustique. . . . .	405
12.2.3. Décomposition en sous-bandes . . . . .	407
12.3. Les formats MPEG-1 et MPEG-2 . . . . .	409
12.3.1. MPEG-1 Layer 1 . . . . .	410
12.3.2. MPEG-1 Layer 2 . . . . .	411
12.3.3. MPEG-1 Layer 3 . . . . .	411
12.3.4. MPEG-2 <i>Advanced Audio Coding</i> . . . . .	412
12.4. Traitement et analyse dans le domaine de compression . . . . .	413
12.4.1. Traitements et effets . . . . .	413
12.4.2. Analyse et indexation. . . . .	413
12.5. MPEG-4 et les objets sonores . . . . .	414
12.5.1. Description de scènes audio (MPEG-4 Audio BIFS) . . . . .	415
12.5.2. MPEG-4 <i>General Audio</i> . . . . .	415
12.5.3. MPEG-4 <i>Structured Audio</i> . . . . .	415
12.5.4. MPEG-4 <i>Text to speech</i> . . . . .	417
12.6. MPEG-7 et la description des sons et de la musique . . . . .	417
12.6.1. Métalangage de définition des descripteurs MPEG-7 . . . . .	418
12.6.2. Descripteurs MPEG-7 . . . . .	419
12.6.3. Schémas de description MPEG-7 . . . . .	420
12.7. Conclusion . . . . .	421
12.8. Bibliographie . . . . .	421
<b>Chapitre 13. Les normes MIDI et MIDIFiles . . . . .</b>	<b>291</b>
Stéphane LETZ	
13.1. Les normes MIDI et MIDIFiles . . . . .	423
13.1.1. Historique. . . . .	423
13.1.2. Présentation de la norme MIDI . . . . .	424
13.1.3. Extensions et sous-normes. . . . .	426
13.1.4. La norme MIDIFile . . . . .	427
13.1.5. <i>Parsing</i> d'un flot MIDI. . . . .	428
13.2. Représentation du temps et synchronisation. . . . .	433
13.2.1. Représentation du temps . . . . .	433
13.2.2. Synchronisation . . . . .	435
13.3. Limitations et évolution. . . . .	436
13.4. Bibliographie . . . . .	437
<b>Index . . . . .</b>	<b>439</b>