

**Curtis Roads**

# **L'audio numérique**

**Musique et informatique**

*3<sup>e</sup> édition*

*Traduction et adaptation française : Jean de Reydellet*

DUNOD

Cet ouvrage est la 3<sup>e</sup> édition,  
mise à jour et enrichie, de la traduction française  
de l'ouvrage de Curtis Roads publié en langue anglaise sous le titre :  
*The Computer Music Tutorial*

Copyright 1<sup>ère</sup> édition © 1996 Massachusetts Institute of Technology  
*Authorized translation from the English Language edition published by MIT Press*  
*All rights reserved.*

© Dunod, 2016 pour la 3<sup>e</sup> édition française

Traduction et adaptation française : Jean de Reydellet

Photo de couverture : B&W Loudspeakers LTD, England

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 1998, 2007, 2016 pour la traduction française  
5 rue Laromiguière, 75005 Paris

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 972-2-10-070688-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

---

|                          |    |
|--------------------------|----|
| AVANT-PROPOS DE L'AUTEUR | XI |
|--------------------------|----|

---

|                            |      |
|----------------------------|------|
| AVANT-PROPOS DU TRADUCTEUR | XIII |
|----------------------------|------|

## PARTIE A – ENVIRONNEMENT ET OUTILS

---

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| CHAPITRE 1 – CONCEPTS AUDIONUMÉRIQUES | 3 |
|---------------------------------------|---|

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Origines : histoire de l'enregistrement audionumérique | 3  |
| 1.2  | Éléments fondamentaux des signaux sonores              | 10 |
| 1.3  | Représentations analogiques du son                     | 16 |
| 1.4  | Représentations numériques du son                      | 17 |
| 1.5  | Gamme dynamique des systèmes audionumériques           | 31 |
| 1.6  | Suréchantillonnage                                     | 33 |
| 1.7  | Supports audionumériques                               | 36 |
| 1.8  | Compression des données audio                          | 37 |
| 1.9  | Synthèse et traitement du signal                       | 39 |
| 1.10 | Conclusion   | 41 |

---

|                     |    |
|---------------------|----|
| CHAPITRE 2 – MIXAGE | 43 |
|---------------------|----|

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Mixage et gamme dynamique                      | 45 |
| 2.2 | Tables de mixage                               | 45 |
| 2.3 | Tables hybrides                                | 50 |
| 2.4 | Éléments des tables de mixage numériques       | 52 |
| 2.5 | Enregistrement et mixage multipiste            | 54 |
| 2.6 | Écoute audio                                   | 56 |
| 2.7 | Automatisation du mixage                       | 59 |
| 2.8 | Synchronisation du mixage audio et de la vidéo | 61 |
| 2.9 | Conclusion                                     | 65 |

|   |     |
|---|-----|
| <hr/>   |     |
| CHAPITRE 3 – TRANSFORMATION DE LA GAMME DYNAMIQUE                           | 67  |
| 3.1 Remodeleurs d'enveloppes  | 67  |
| 3.2 Extensions avec seuil ( <i>noise gates</i> )                            | 67  |
| 3.3 Compresseurs  | 69  |
| 3.4 Extenseurs  | 71  |
| 3.5 Limiteurs   | 71  |
| 3.6 Unités de réduction du bruit et compresseurs-extenseurs                 | 71  |
| 3.7 Dangers de la transformation de la gamme dynamique                      | 73  |
| <hr/>   |     |
| CHAPITRE 4 – LES FILTRES NUMÉRIQUES   | 75  |
| 4.1 Présentation de la théorie des filtres aux musiciens                    | 75  |
| 4.2 Filtres : origines  | 76  |
| 4.3 Réponse impulsionnelle, fréquentielle et de phase d'un filtre           | 78  |
| 4.4 Les filtres sous forme d'équations                                      | 79  |
| 4.5 Filtre passe-bas simple   | 80  |
| 4.6 Filtre passe-haut simple  | 82  |
| 4.7 Filtres à réponse impulsionnelle finie généraux                         | 83  |
| 4.8 Filtres à réponse impulsionnelle infinie simples                        | 85  |
| 4.9 Filtres à réponse impulsionnelle infinie généraux                       | 87  |
| 4.10 Comparaison des filtres FIR et des filtres IIR                         | 87  |
| 4.11 Conception d'un filtre à partir d'une spécification arbitraire         | 87  |
| 4.12 Blocs de construction des filtres complexes                            | 88  |
| 4.13 Filtres en peigne  | 89  |
| 4.14 Filtres passe-tout   | 93  |
| <hr/>   |     |
| CHAPITRE 5 – LA CONVOLUTION   | 95  |
| 5.1 L'opération de convolution  | 95  |
| 5.2 Convolution par impulsions élémentaires échelonnées et retardées        | 97  |
| 5.3 Définition mathématique de la convolution                               | 98  |
| 5.4 Comparaison de la convolution et de la multiplication                   | 99  |
| 5.5 La loi de la convolution  | 99  |
| 5.6 Relation entre convolution et filtrage                                  | 99  |
| 5.7 Convolution rapide  | 100 |
| 5.8 Signification musicale de la convolution                                | 101 |
| 5.9 Convolution avec des grains et des pulsars                              | 104 |
| 5.10 Comparaison de la convolution linéaire et de la convolution circulaire | 105 |
| 5.11 Déconvolution  | 105 |
| <hr/>   |     |
| CHAPITRE 6 – LES EFFETS DE RETARD   | 107 |
| 6.1 Les effets de retard temporel fixe                                      | 107 |
| 6.2 Les effets de retard temporel variable                                  | 111 |
| 6.3 Changement temps/hauteur  | 114 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| <hr/> |  |     |
|       | CHAPITRE 7 – LA SPATIALISATION   | 121 |
| 7.1   | Spatialisation du son  | 121 |
| 7.2   | Indications de localisation  | 126 |
| 7.3   | Haut-parleurs rotatifs   | 137 |
| 7.4   | Son surround   | 139 |
| <hr/> |  |     |
|       | CHAPITRE 8 – LA RÉVERBÉRATION  | 151 |
| 8.1   | Réverbération  | 151 |
| 8.2   | Modelage d'espaces sonores   | 161 |
| <hr/> |  |     |
|       | CHAPITRE 9 – RECONNAISSANCE DE LA HAUTEUR                                | 169 |
| 9.1   | Analyse de hauteur, de rythme et de forme d'onde : origines              | 169 |
| 9.2   | Reconnaissance de la hauteur et du rythme dans les systèmes MIDI         | 172 |
| 9.3   | Le problème de la détection de hauteur                                   | 173 |
| 9.4   | Méthodes de détection de hauteur   | 176 |
| <hr/> |  |     |
|       | CHAPITRE 10 – RECONNAISSANCE DU RYTHME                                   | 187 |
| 10.1  | Applications de reconnaissance du rythme                                 | 188 |
| 10.2  | Niveaux de reconnaissance du rythme                                      | 188 |
| 10.3  | Détection d'événement  | 189 |
| 10.4  | Transcription  | 191 |
| 10.5  | Récupération   | 195 |
| <hr/> |  |     |
|       | CHAPITRE 11 – ANALYSE SPECTRALE : MÉTHODES DE FOURIER                    | 197 |
| 11.1  | Applications de l'analyse spectrale                                      | 198 |
| 11.2  | Tracés spectraux   | 198 |
| 11.3  | Modèles derrière les méthodes d'analyses spectrales                      | 200 |
| 11.4  | Spectre et timbre  | 203 |
| 11.5  | Analyse spectrale : origines   | 204 |
| 11.6  | Le spectre de Fourier à court terme                                      | 208 |
| 11.7  | La représentation sonogramme   | 220 |
| 11.8  | Le vocodeur de phase   | 222 |
| <hr/> |  |     |
|       | CHAPITRE 12 – ANALYSE SPECTRALE :<br>MÉTHODES PAR DÉCOMPOSITION ATOMIQUE | 233 |
| 12.1  | Fondamentaux   | 233 |
| 12.2  | Méthodes   | 236 |
| 12.3  | Applications   | 238 |
| 12.4  | Conclusion : études avancées   | 242 |

|   |     |
|---|-----|
| <hr/>   |     |
| CHAPITRE 13 – ANALYSE SPECTRALE : AUTRES MÉTHODES                   | 243 |
| 13.1 Analyse du son sans la méthode de Fourier                      | 243 |
| 13.2 Analyse par banque de filtres à Q constant                     | 245 |
| 13.3 Analyse par ondelettes   | 248 |
| 13.4 Analyse du signal par distribution de Wigner-Ville             | 255 |
| 13.5 Analyse spectrale par autorégression                           | 257 |
| 13.6 Analyse par d'autres fonctions                                 | 259 |
| 13.7 Modèles d'audition   | 260 |
| 13.8 Systèmes comprenant le signal                                  | 262 |
| <hr/>   |     |
| CHAPITRE 14 – MIDI  | 269 |
| 14.1 Comparaison des données de contrôle MIDI et du son             | 270 |
| 14.2 Origines : la spécification MIDI 1.0                           | 270 |
| 14.3 Possibilités musicales du MIDI                                 | 272 |
| 14.4 Matériel MIDI  | 273 |
| 14.5 Pilotes MIDI   | 278 |
| 14.6 Canaux MIDI  | 278 |
| 14.7 Messages MIDI  | 280 |
| 14.8 Modes MIDI   | 286 |
| 14.9 Contrôle continu par MIDI                                      | 289 |
| 14.10 Fichiers MIDI standards                                       | 290 |
| 14.11 Transfert de données audio                                    | 292 |
| 14.12 Contrôle temporel du MIDI                                     | 293 |
| 14.13 Contrôle de machine MIDI et contrôle de show MIDI             | 295 |
| 14.14 Accessoires MIDI  | 296 |
| 14.15 Limites du MIDI   | 297 |
| 14.16 Accélérer les communications MIDI                             | 300 |
| 14.17 Écriture de logiciel de musique MIDI                          | 302 |
| 14.18 Contacts sur le MIDI  | 304 |
| 14.19 Conclusion  | 304 |
| <hr/>   |     |
| CHAPITRE 15 – INTERCONNEXIONS DE SYSTÈME                            | 307 |
| 15.1 Alimentations en courant alternatif                            | 307 |
| 15.2 Câbles audio analogiques                                       | 309 |
| 15.3 Patchbays  | 310 |
| 15.4 Lignes série électroniques                                     | 312 |
| 15.5 Câbles MIDI  | 313 |
| 15.6 Liaisons audionumériques                                       | 315 |
| 15.7 Câbles en fibre optique  | 318 |
| 15.8 Liaisons de synchro  | 320 |
| 15.9 Ports et bus parallèles  | 323 |
| 15.10 Contrôleurs d'accès direct à la mémoire et mémoires partagées | 324 |
| 15.11 Réseaux   | 325 |
| 15.12 Conclusion  | 331 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CHAPITRE 16 – LA PSYCHOACOUSTIQUE ET LA SYNTHÈSE</b> | <b>333</b> |
| 16.1 Perception de l'intensité                          | 334        |
| 16.2 L'oreille humaine                                  | 336        |
| 16.3 Perception des caractéristiques temporelles        | 337        |
| 16.4 Perception de la fréquence                         | 339        |
| 16.5 Perception du bruit                                | 341        |
| 16.6 Fusion et perception du timbre                     | 342        |
| 16.7 Effets de masques                                  | 343        |
| 16.8 Conclusion : psychoacoustique et perception        | 345        |
| 16.9 Remerciements                                      | 345        |

## **PARTIE B – SYNTHÈSE SONORE**

|  |            |
|--|------------|
| <b>CHAPITRE 17 – INTRODUCTION À LA SYNTHÈSE</b>                          | <b>349</b> |
| 17.1 Origines : histoire de la synthèse numérique du son                 | 349        |
| 17.2 Synthèse par lecture de table d'onde fixe                           | 352        |
| 17.3 Bruit de lecture de table et oscillateurs interpolants              | 354        |
| 17.4 Synthèse de formes d'ondes variant dans le temps                    | 356        |
| 17.5 Logiciels de synthèse   | 360        |
| 17.6 Synthèse numérique en temps réel                                    | 362        |
| 17.7 Comparaison de la synthèse différée et de la synthèse en temps réel | 364        |
| 17.8 Spécification des sons musicaux                                     | 364        |
| 17.9 Conclusion  | 371        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CHAPITRE 18 – L'ÉCHANTILLONNAGE</b>                                  | <b>373</b> |
| 18.1 Musique Concrète et échantillonnage : origines                     | 373        |
| 18.2 Bouclage   | 377        |
| 18.3 Transposition de hauteur   | 379        |
| 18.4 Conversion du taux d'échantillonnage sans transposition de hauteur | 381        |
| 18.5 Problèmes du rééchantillonnage                                     | 382        |
| 18.6 Réduction et compression des données dans les échantillonneurs     | 382        |
| 18.7 Bibliothèques d'échantillons                                       | 384        |
| 18.8 Évaluation des échantillonneurs                                    | 384        |
| 18.9 Modelage des transitions note à note                               | 385        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CHAPITRE 19 – LA SYNTHÈSE ADDITIVE</b> | <b>389</b> |
| 19.1 Synthèse additive                    | 389        |
| 19.2 Analyse/resynthèse additive          | 398        |

|   |     |
|---|-----|
| CHAPITRE 20 – LA SYNTHÈSE PAR TABLES D'ONDES MULTIPLES                    | 409 |
| 20.1 Fondu enchaîné de tables d'ondes                                     | 409 |
| 20.2 Empilement d'ondes   | 412 |
| CHAPITRE 21 – LA SYNTHÈSE PAR TERRAINS D'ONDES                            | 415 |
| 21.1 Terrains et orbites  | 415 |
| 21.2 Création de formes d'ondes prévisibles à partir des terrains d'ondes | 416 |
| 21.3 Orbites périodiques  | 417 |
| 21.4 Orbites variant dans le temps  | 418 |
| CHAPITRE 22 – LA SYNTHÈSE GRANULAIRE                                      | 421 |
| 22.1 Synthèse granulaire : historique                                     | 421 |
| 22.2 Grains sonores   | 422 |
| 22.3 Instrument générateur de grain                                       | 424 |
| 22.4 Organisations granulaires de haut niveau                             | 424 |
| 22.5 Évaluation de la synthèse granulaire                                 | 435 |
| CHAPITRE 23 – LA SYNTHÈSE PULSAR  | 437 |
| 23.1 Synthèse pulsar de base  | 438 |
| 23.2 Spectres de la synthèse pulsar de base                               | 443 |
| 23.3 Synthèse pulsar avancée  | 445 |
| 23.4 Implémentations de la synthèse pulsar                                | 450 |
| 23.5 Composer avec les pulsars  | 451 |
| 23.6 Applications musicales de la synthèse pulsar                         | 452 |
| 23.7 Conclusion   | 452 |
| CHAPITRE 24 – LA SYNTHÈSE SOUSTRACTIVE                                    | 455 |
| 24.1 Synthèse soustractive  | 455 |
| 24.2 Analyse/resynthèse soustractive                                      | 466 |
| 24.3 Codage prédictif linéaire  | 468 |
| CHAPITRE 25 – LA SYNTHÈSE PAR MODULATION                                  | 479 |
| 25.1 Signaux bipolaires et unipolaires                                    | 480 |
| 25.2 Modulation en anneau   | 481 |
| 25.3 Modulation d'amplitude   | 485 |
| 25.4 Modulation de fréquence  | 488 |
| 25.5 Modulation de fréquence à multiples porteuses                        | 497 |
| 25.6 Modulation de fréquence à multiples modulantes                       | 499 |
| 25.7 Modulation de fréquence bouclée                                      | 502 |
| 25.8 Distorsion de phase  | 509 |
| 25.9 Synthèse par distorsion non linéaire                                 | 509 |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 25.10   | Modulations générales  | 517        |
| 25.11   | Conclusion   | 518        |
| <b>CHAPITRE 26 – LA SYNTHÈSE PAR MODÈLES PHYSIQUES</b>        |  | <b>519</b> |
| 26.1  | Synthèse par modèles physiques                                     | 519        |
| 26.2  | Analyse de source et de paramètres pour les modèles physiques      | 537        |
| 26.3  | Synthèse Karplus-Strong (corde pincée et tambour)                  | 539        |
| <b>CHAPITRE 27 – LA SYNTHÈSE ANALOGIQUE VIRTUELLE</b>         |  | <b>545</b> |
| 27.1  | Comparaison de numérique et d'analogique                           | 545        |
| 27.2  | Analogique virtuelle   | 546        |
| 27.3  | Évolution de la synthèse analogique                                | 548        |
| 27.4  | Questions soulevées par l'émulation de synthèse analogique         | 550        |
| 27.5  | Amplificateurs, compresseurs et égaliseurs par modelage analogique | 556        |
| 27.6  | Conclusion   | 557        |
| <b>CHAPITRE 28 – LA SYNTHÈSE FORMANTIQUE</b>                  |  | <b>559</b> |
| 28.1  | Synthèse par fonction d'onde formantique et CHANT                  | 561        |
| 28.2  | Analyse/resynthèse FOF   | 568        |
| 28.3  | VOSIM  | 570        |
| 28.4  | Synthèse par fonction de fenêtrage                                 | 572        |
| <b>CHAPITRE 29 – LA SYNTHÈSE PAR SEGMENTS DE FORME D'ONDE</b> |  | <b>577</b> |
| 29.1  | Interpolation de forme d'onde                                      | 578        |
| 29.2  | SAWDUST  | 582        |
| 29.3  | SSP  | 583        |
| 29.4  | Synthèse par instruction   | 584        |
| <b>CHAPITRE 30 – LA SYNTHÈSE CONCATÉNATIVE</b>                |  | <b>587</b> |
| 30.1  | Fondamentaux   | 588        |
| 30.2  | Deux approches générales   | 591        |
| 30.3  | Perspectives historiques   | 593        |
| 30.4  | Conclusion   | 593        |
| <b>CHAPITRE 31 – LA SYNTHÈSE GRAPHIQUE</b>                    |  | <b>595</b> |
| 31.1  | Graphiques dans la synthèse sonore : origines                      | 595        |
| 31.2  | Interaction avec l'UPIC  | 596        |
| 31.3  | Synthèse graphique avec le MIDI                                    | 599        |
| 31.4  | Évaluation de la synthèse sonore graphique                         | 599        |

|   |     |
|---|-----|
| CHAPITRE 32 – LA SYNTHÈSE STOCHASTIQUE ET CHAOTIQUE | 601 |
| 32.1 Modulation de bruit                            | 601 |
| 32.2 Synthèse stochastique de forme d'onde          | 605 |
| BIBLIOGRAPHIE                                       | 611 |
| INDEX DES SUJETS                                    | 655 |
| INDEX DES NOMS                                      | 672 |

# Avant-propos de l'auteur

Après des décennies de recherche musicale, les conditions d'un âge d'or de création dans la musique électronique et informatique ont émergé. Un certain nombre de facteurs cruciaux, à la fois techniques et esthétiques, se mettent en place pour favoriser cette tendance.

La musique informatique est le sujet d'un nombre de publications plus élevé qu'à aucun autre moment dans le passé. La recherche est florissante, et des douzaines de festivals servent de terrain d'expérimentation pour la musique électronique. Une industrie variée est apparue autour de la création de nouveaux synthétiseurs, logiciels et composants audio. La mentalité purement commerciale est contrebalancée par un vigoureux marché alternatif d'instruments exotiques et de logiciels gratuits. Les outils d'organisation du son — les appareils d'édition et de mixage — ont atteint un degré d'efficacité indéniable, tandis que leur prix a chuté. Le coût d'un studio à base d'informatique — inimaginable pour un musicien individuel il y a encore vingt ans — est souvent inférieur au prix d'un instrument traditionnel.

Les avancées dans les domaines de la recherche et de la technologie ne relatent cependant qu'une partie de l'histoire. Nous possédons maintenant une meilleure compréhension des implications esthétiques de cette approche de la musique. Nous voyons qu'elle se déploie sur de multiples échelles temporelles, et nos méthodes de synthèse, d'analyse et de transformation du son reflètent cela. La perspective des échelles multiples a commencé avec l'exploration du microson et de ses effets, depuis les procédés granulaires jusqu'aux masses sonores en mutations continues. Couplée à cet aperçu, la spatialisation du son a évolué pour devenir un élément à part entière de la composition. Ces perspectives ont eu un impact profond sur notre conception de la forme musicale.

Les nouveaux outils et matériaux sonores conduisent inévitablement à de nouvelles stratégies d'organisation. Parmi celles-ci se trouvent des processus basés sur les mutations sonores, le contrepoint timbral et spatial, le contrôle détaillé de masses sonores complexes, les juxtapositions de paysages sonores virtuels et réels, la coalescence et la désintégration sonore, le contrepoint microtonal, et l'interaction entre l'échelle microtemporelle et les autres échelles de temps qui ne peut être réalisée par des instruments acoustiques.

C'est pour moi un grand plaisir que de pouvoir présenter cette troisième édition française de *L'audionumérique*. J'ai la chance d'avoir comme collaborateur Jean de Reydellet, qui aura été la

force motrice de cette publication. J'ai également la chance d'avoir trouvé en Dunod un éditeur visionnaire, qui aura su prévoir le besoin d'une édition révisée et actualisée de ce livre. Je suis heureux d'annoncer qu'avec cette nouvelle édition, le lecteur francophone possède la version la plus récente et la plus à jour de toutes celles qui existent, y compris en langue anglaise.

Curtis Roads  
Santa Barbara, novembre 2015

## Présentation des collaborateurs

### **Curtis Roads**

Curtis Roads est compositeur et professeur au Media Arts and Technology, University of California, Santa Barbara.

### **Jean de Reydellet** (chapitre 7)

Titulaire d'une maîtrise en musicologie, Jean de Reydellet s'est spécialisé dans les technologies informatiques et matérielles appliquées à la musique.

### **John Strawn** (chapitre 1 et chapitre 17)

Titulaire d'un doctorat de Stanford, John Strawn est le fondateur de S Systems, Inc, société fournissant des services de conseil et d'expertise en programmation pour de nombreux acteurs de l'industrie audio.

### **Bob L. Sturm** (chapitre 12 et chapitre 30)

Après avoir obtenu un doctorat à l'University of California, Santa Barbara, Bob L. Sturm travaille à Paris puis Copenhague. Il est maintenant maître de conférences en médias numériques à la School of Electronic Engineering and Computer Science, au sein de la Queen Mary University de Londres.

### **John William Gordon** (chapitre 16)

John William Gordon a obtenu le premier doctorat en informatique musicale au monde, au sein du CCRMA de la Stanford University. Au cours de sa carrière, il a conçu des logiciels liés à l'acoustique, des solutions de traitement du signal et des systèmes de surveillance.

# Avant-propos du traducteur

*L'audio numérique*, version française de l'ouvrage *The Computer Music Tutorial* de Curtis Roads, voit aujourd'hui le jour dans sa troisième édition. Dix-sept années se sont écoulées depuis la sortie de la première édition, qui constituait déjà une somme de connaissances remarquable dans les domaines de l'informatique musicale et de la synthèse du son. La seconde édition, conçue dès l'origine pour augmenter le nombre des informations fournies au lecteur, et divisée en deux parties, avait permis l'ajout de nombreux chapitres ou parties : MIDI, interconnexion de systèmes, supports audio numériques, compression des données audio, formats de son surround, protocoles réseau, synthèse pulsar et synthèse par émulation analogique.

Cette troisième édition intègre quant à elle deux nouveaux chapitres. Les méthodes par décomposition atomique permettent l'émergence de techniques à fort potentiel pour des applications de traitement avancé de l'audio : débruitage, désaturation, correction de corruptions dans les signaux, ou encore séparation de sources ou détection de notes dans des environnements complexes. La synthèse concaténative quant à elle, constitue la méthode la plus aboutie de synthèse texte-parole actuellement existante. Elle est également utilisée dans les domaines de la synthèse vocale et de la synthèse d'instruments en intégrant des données de haut niveau telles que phrasés, transitions entre les notes ou nuances de jeu. Le livre a enfin fait l'objet d'une relecture qui a permis la correction d'un certain nombre d'erreurs et la suppression de quelques rares parties devenues obsolètes.

Je tiens tout d'abord à remercier Curtis Roads d'être parvenu au cours des années à réunir cet ensemble de connaissances et d'informations sur de nombreux sujets liés au travail sur le son, et d'avoir su les exprimer dans un style concis et clair. Il m'a fait l'honneur de m'accorder sa confiance lors de la réalisation de cette version en langue française, et parce qu'il est un homme épris de savoir, de recherche et de vérité, je ne peux éprouver à son égard qu'un sentiment de profond respect. J'exprime également ma gratitude à Horacio Vaggione, pour avoir assuré des cours passionnants, et pour sa capacité à placer constamment des concepts liés à la composition musicale au sein d'un ensemble plus grand d'idées esthétiques et philosophiques. À lui, ainsi qu'à Gérard Pape, ancien directeur du CCMIX (Centre de Composition Musicale Iannis Xenakis), j'adresse de chaleureux remerciements pour avoir permis à Curtis Roads d'assurer des cours sur le sol français dans

le cadre de l'université Paris 8 et du CCMIX, symbole de leur ardente passion à rendre accessibles nombre de sujets abordés dans ce livre sur un plan pratique, par l'utilisation du studio et de la composition musicale.

J'adresse ma reconnaissance à Jean-Baptiste Gugès et Cécile Rastier des Éditions Dunod. Leur professionnalisme, leur sensibilité, leur gentillesse et leur intelligence auront permis d'éditer un ouvrage d'un haut niveau de qualité, tant sur le fond que sur la forme. J'espère que chaque lecteur passionné par le son et la musique trouvera parmi ces pages matière à alimenter ses réflexions et son inspiration.

Jean de Reydellet

Novembre 2015

# ***Partie A***

---

## **Environnement et outils**



# Chapitre 1

## Concepts audionumériques

Curtis Roads et John Strawn

La fusion de l'enregistrement audionumérique et de la technologie de l'informatique musicale crée un médium artistique souple et puissant. Ce chapitre présente l'histoire et la technologie de l'enregistrement et de la reproduction audionumérique. Après avoir étudié cette introduction, vous devriez être accoutumé au vocabulaire de base et aux concepts de l'audionumérique. Par souci de brièveté, nous condenserons les grands sujets ; pour plus d'informations, se reporter à D. Davis (1988, 1992).

### 1.1 Origines : histoire de l'enregistrement audionumérique

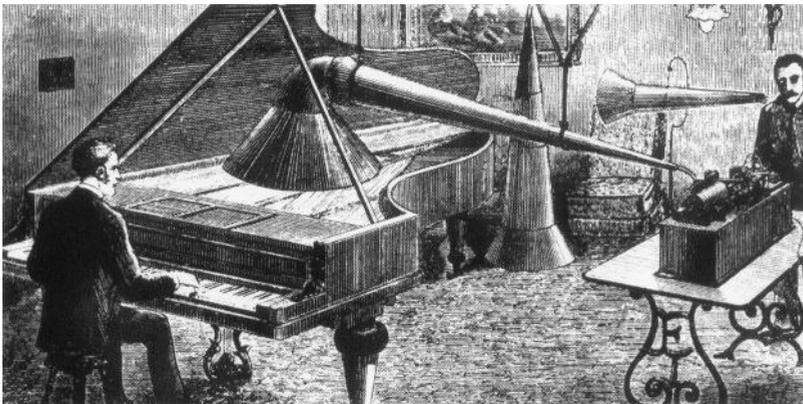


Figure 1.1 – Séance d'enregistrement par procédé mécanique avant 1900. Les vibrations sonores captées par le large cône situé au-dessus du piano étaient transformées sous forme de vibrations mécaniques d'un stylet qui perçait un cylindre de cire en rotation.

Haut-Parleurs  
**AMPLION**

Brevets E.-A. GRAHAM



Amplion Libellule, Prix **135** francs

Auditions à l'Exposition Internationale de T.S.F., Arts Décoratifs, quai d'Orsay

Compagnie Française **AMPLION**

131, rue de Vaugirard, 131, PARIS (15<sup>e</sup>)

R. C. Seine 216.437 B

Figure 1.2 - Haut-parleur Amplion, publicité de 1925.

L'histoire de l'enregistrement sonore est riche et commence avec les expérimentations de Thomas Edison et d'Émile Berliner dans les années 1870, puis fut marquée par le Telegraphone de Valdemar Poulsen, un enregistreur magnétique à fil métallique datant de 1898 (Read et Welch, 1976). L'enregistrement sonore des débuts était mécanique (figure 1.1).

Bien que l'invention de la lampe à triode en 1906 lançât l'ère de l'électronique, les enregistrements produits électroniquement ne furent pas mis en application avant 1924 (Keller, 1981). La figure 1.2 montre un haut-parleur à pavillon typique des années 1920.



Figure 1.3 – Prototype d'un enregistreur à bande portable Magnetophon de 1935, construit par AEG (avec l'aimable autorisation de BASF Aktiengesellschaft).

L'enregistrement optique sur film fut présenté pour la première fois en 1922 (Ristow, 1993). L'enregistrement sur bande recouverte de matériau magnétique pulvérisé fut développé en Allemagne dans les années 1930 (figure 1.3), mais ne s'étendit au reste du monde qu'après la Seconde Guerre mondiale. Les enregistreurs allemands Magnetophon étaient largement en avance sur les enregistreurs à fil métallique ou à ruban d'acier, qui nécessitaient une soudure pour faire un raccord. Les Magnetophon et leurs descendants étaient des enregistreurs *analogiques*. Le terme « analogique » fait référence à la forme d'onde codée sur la bande : une proche analogie de la forme d'onde sonore captée par le microphone. L'enregistrement analogique continue d'être amélioré, mais doit faire face

à des limites physiques fondamentales. Ces limites sont plus apparentes lors de copies d'un support analogique à un autre : un bruit additionnel est inévitable.

Pour plus d'informations sur l'enregistrement analogique, en particulier sur les machines multi-pistes, voir le chapitre 2.

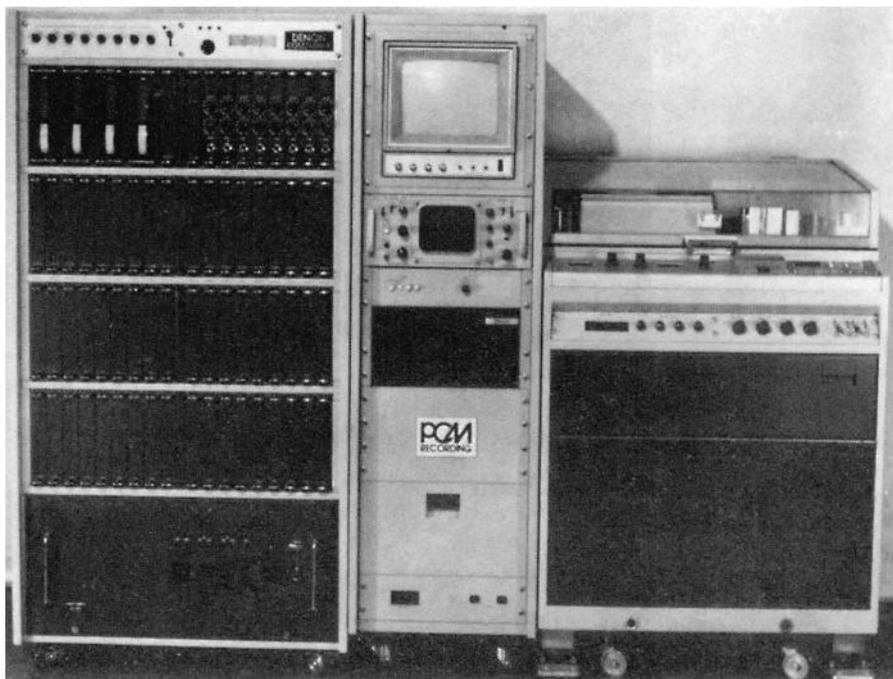
### 1.1.1 Expérimentation de l'enregistrement numérique

Le concept clé de l'enregistrement audionumérique est l'*échantillonnage*, c'est-à-dire la conversion de signaux analogiques continus (tels que ceux provenant d'un microphone) en signaux discrets *échantillonnés temporellement*. La clé de voûte théorique de l'échantillonnage est le *théorème de l'échantillonnage*, qui spécifie la relation entre le taux d'échantillonnage et la largeur de bande audio (voir la partie sur le théorème de l'échantillonnage plus loin dans ce chapitre). Ce théorème est également appelé *théorème de Nyquist* d'après les travaux de Harold Nyquist aux Bell Telephone Laboratories (Nyquist, 1928), mais une autre forme de ce théorème fut tout d'abord établie en 1841 par le mathématicien français Augustin Louis Cauchy (1789-1857). Le chercheur britannique Alec Reeves développa le premier système breveté de *modulation par impulsion* (PCM) pour la transmission de messages sous forme (numérique) de « dichotomie de l'amplitude, quantification du temps » (Reeves, 1938 ; Licklider, 1950 ; Black, 1953). Même aujourd'hui, l'enregistrement numérique est quelquefois appelé « enregistrement PCM ». Le développement de la *théorie de l'information* contribua à la compréhension de la transmission audionumérique (Shannon, 1948). La résolution des difficiles problèmes de conversion entre signaux analogiques et signaux numériques demanda deux décennies, et est encore en cours d'amélioration. Nous présenterons les procédés de conversion plus tard.

À la fin des années 1950, Max Mathews et son groupe de travail des Bell Telephone Laboratories générèrent les premiers sons synthétiques à partir d'un ordinateur. Les échantillons étaient écrits par l'ordinateur sur des armoires de stockage à bandes magnétiques volumineuses et coûteuses. La production de son à partir des nombres était effectuée de façon séparée en relisant la bande à travers une lampe « faite maison » de 12 bits, un « convertisseur numérique son » développé par Epsco Corporation (Roads, 1980 ; voir également le chapitre 17).

Hamming, Huffman et Gilbert sont à l'origine de la théorie de la *correction d'erreur numérique* datant des années 1950 et 1960. Plus tard, Sato, Blesser, Stockham et Doi contribuèrent à la correction d'erreur, ce qui permit la construction des premiers systèmes d'enregistrement audionumérique utilisables. Le premier enregistreur audionumérique monophonique spécialisé (basé sur un mécanisme de magnéscope), fut présenté par la compagnie japonaise de diffusion NHK (Nakajima et coll. 1983). Peu après, Denon développa une version améliorée (figure 1.4), et la course commença pour la mise sur le marché d'enregistreurs audionumériques (Iwamura et coll., 1973).

En 1977, le premier système d'enregistrement arriva sur le marché, le processeur Sony PCM-1, conçu pour coder des signaux audionumériques 13 bits sur des enregistreurs de vidéocassettes Sony de format Beta. En moins d'une année, il fut remplacé par les codeurs PCM en 16 bits tels que le Sony PCM-1600 (Nakajima et coll., 1978). À ce moment, la production se divisa en deux secteurs : des unités professionnelles et des unités « grand public », bien qu'un réel marché de masse pour ce type d'enregistreurs numériques ne se soit jamais matérialisé. Les Sony PCM-1610 et 1630 professionnels devinrent les normes pour le mastering des disques compacts (CD), tandis que les systèmes compatibles avec le Sony PCM-F1 (également appelés systèmes EIAJ pour Electronics Industry Association of Japan — Association de l'Industrie Électronique du Japon) devinrent de facto la norme pour l'enregistrement audionumérique à bas prix sur vidéocassette. Ces normes ont perduré durant les années 1980.



— Figure 1.4 – Enregistreur audionumérique construit en 1973 par Nippon Columbia (Denon) —  
et basé sur un enregistreur à bande vidéo 1 pouce (sur la droite).

L'Audio Engineering Society établit deux normes de fréquences d'échantillonnage en 1985 : 44,1 et 48 kHz. Ils révisèrent leurs spécifications en 1992 (Audio Engineering Society, 1992a, 1992b). Il existe également une fréquence d'échantillonnage de 32 kHz pour la radiodiffusion. Entre-temps, quelques compagnies développèrent des enregistreurs numériques de plus haute résolution capable de coder plus de seize bits à des taux d'échantillonnage plus élevés. Par exemple, une version de l'enregistreur numérique à bande X-86 de Mitsubishi codait en 20 bits à une fréquence d'échantillonnage de 96 kHz (Mitsubishi, 1986). Un certain nombre d'enregistreurs à haute résolution sont maintenant sur le marché.

### 1.1.2 Son numérique pour le public

Le son numérique atteignit tout d'abord le grand public en 1982 grâce au format disque compact (CD), un disque optique de 12 cm lu par un laser (figure 1.5). Le format CD fut développé conjointement par les sociétés Philips et Sony après des années de recherche. Ce fut un succès commercial énorme, car plus de 1,35 million de lecteurs et des dizaines de millions de disques furent vendus en moins de deux ans (Pohlman, 1989). Depuis lors, une variété de produits a été dérivée de la technologie du CD, dont le CD-Rom (*Read Only Memory* — Mémoire à lecture seule), le CD-I (Interactif), et d'autres formats mélangeant les données audio, les textes et les images.

Au début des années 1990, les constructeurs se recentrèrent sur un besoin de support numérique enregistrable. Différents supports apparurent, dont la DAT (*Digital Audio Tape* — Bande audionumérique), la DCC (*Digital Compact Cassette* — Cassette compacte numérique), le MD (Mini-Disc), et le CD-R (CD enregistrable). Voir plus bas la partie sur les supports audionumériques.

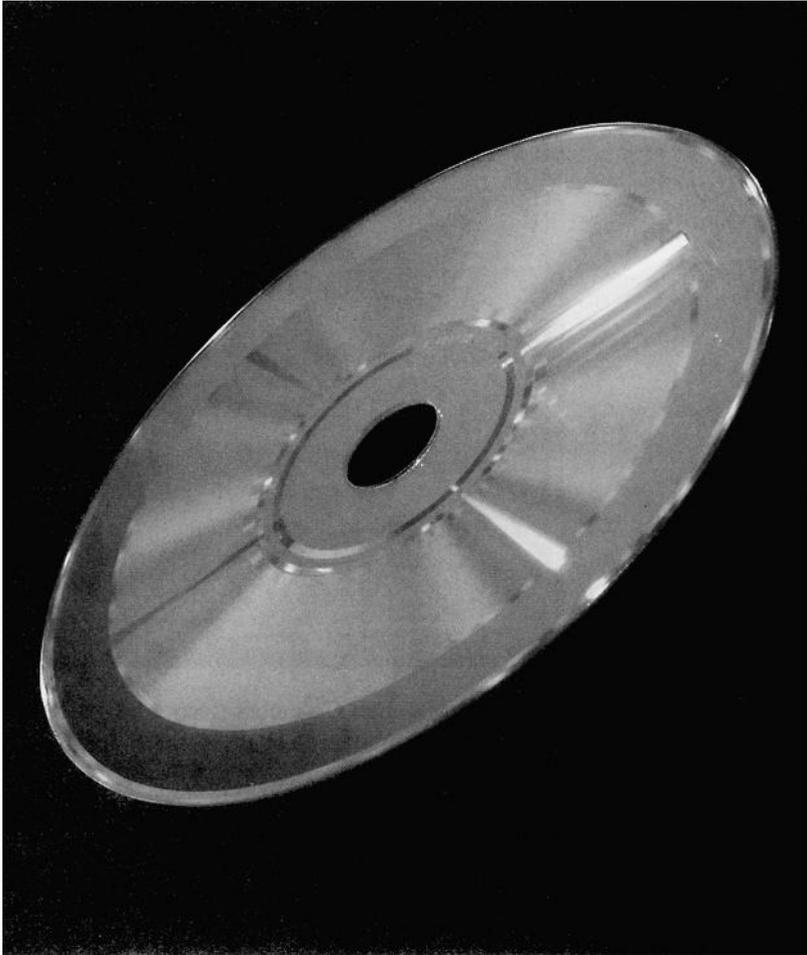


Figure 1.5 - Le disque compact Sony-Philips.

### 1.1.3 Son numérique pour les musiciens

Bien que les lecteurs de CD aient eu des convertisseurs 16 bits bon marché, les convertisseurs de bonne qualité n'étaient pas répandus avant 1988. Avant cette date, quelques centres de musique avaient développé des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique, mais les possesseurs d'ordinateurs personnels devaient attendre. Ils pouvaient acheter des synthétiseurs numériques et les contrôler par protocole MIDI, mais ils ne pouvaient directement synthétiser ou enregistrer des sons avec l'ordinateur.

Ce n'est qu'à la fin des années 1980 que des convertisseurs bon marché et de bonne qualité furent mis sur le marché pour les ordinateurs personnels. Ce développement proclama l'arrivée d'une nouvelle ère de la musique informatique. En peu de temps, la synthèse du son, l'enregistrement, et le traitement du son par ordinateur se répandirent. Des douzaines de *stations de travail audio* différentes apparurent sur le marché de la musique. Ces systèmes permettaient au musicien d'enregistrer

de la musique sur un disque dur connecté à l'ordinateur. Cette musique pouvait être éditée précisément sur l'écran de l'ordinateur, avec relecture à partir du disque dur.

### 1.1.4 Enregistrement numérique multipiste

Contrairement aux enregistreurs stéréophoniques qui enregistrent en même temps les canaux gauche et droit, les enregistreurs *multipistes* possèdent différents canaux séparés ou *pistes* qui peuvent être enregistrées à différents moments. Chaque piste peut par exemple enregistrer un instrument séparé, ce qui permet une flexibilité lors du mixage ultérieur. Un autre avantage des machines multipistes est qu'elles laissent les musiciens construire les enregistrements par couches, chaque nouvelle couche étant un accompagnement des couches enregistrées précédemment.

La British Broadcasting Company (BBC) développa un enregistreur numérique expérimental à dix canaux en 1976. Deux années plus tard, la société 3M, en association avec la BBC, présenta le premier enregistreur commercial 32 canaux (figure 1.6), accompagné d'un éditeur numérique de bande rudimentaire (Duffy, 1982). Le premier éditeur et mélangeur basé sur disque dur fut construit par la compagnie Soundstream de Salt Lake City, en Utah. Ce système permettait le mixage de huit pistes simultanées ou *fichiers sons* stockés sur disque dur (Ingebretsen et Stockham, 1984).



Figure 1.6 – Enregistreur numérique 32 pistes à bande de 3M, présenté en 1978.

Au milieu des années 1980, 3M et Soundstream s'étaient retirés du marché des enregistreurs numériques multipistes, dominé alors par les conglomérats Sony et Mitsubishi, plus tard rejoints par la compagnie Studer. Depuis un certain nombre d'années, l'enregistrement numérique multipiste était une activité très onéreuse (figure 1.7). La situation entra dans une nouvelle phase au début des années 1990, avec la présentation d'enregistreurs multipistes à bande peu onéreux, par les



Figure 1.7 – Enregistreur multipiste numérique Studer D820-48 DASH, présenté en 1991 à un prix de vente au détail d'environ 200 000 €.

compagnies Alesis et Tascam, et d'enregistreurs multipistes sur disque dur par diverses compagnies. Le chapitre 2 raconte l'histoire de l'enregistrement multipiste analogique.

## 1.2 Éléments fondamentaux des signaux sonores

Cette partie présente les éléments fondamentaux et la terminologie pour décrire les signaux sonores, y compris la fréquence, l'amplitude et la phase.

### 1.2.1 Fréquence et amplitude

Le son atteint les oreilles de l'auditeur après avoir été transmis par l'air depuis sa source. Les auditeurs entendent des sons, car la pression de l'air change légèrement dans leurs oreilles. Si la pression varie selon un modèle répétitif, nous disons que le son a une *forme d'onde périodique*. S'il n'y a pas

de modèle discernable, on parle de *bruit*. Entre ces deux extrêmes se trouve le vaste domaine des sons quasi périodiques et quasi bruiteux.

La répétition d'une forme d'onde périodique est appelée un *cycle*, et la *fréquence fondamentale* de la forme d'onde est le nombre de cycles qui se produit par seconde. Lorsque la longueur du cycle appelée *longueur d'onde* ou *période* augmente, la fréquence en cycles par seconde diminue, et vice versa. Dans le reste de ce livre, nous substituons Hz pour « cycles par seconde » en conformité avec la terminologie standard de l'acoustique (Hz est une abréviation de Hertz, d'après le nom de l'acousticien allemand Heinrich Hertz).

### ◆ Représentation dans le domaine temporel

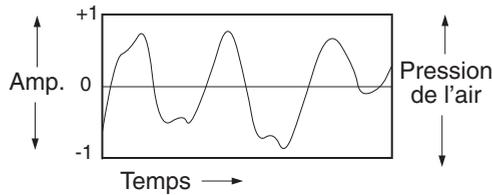


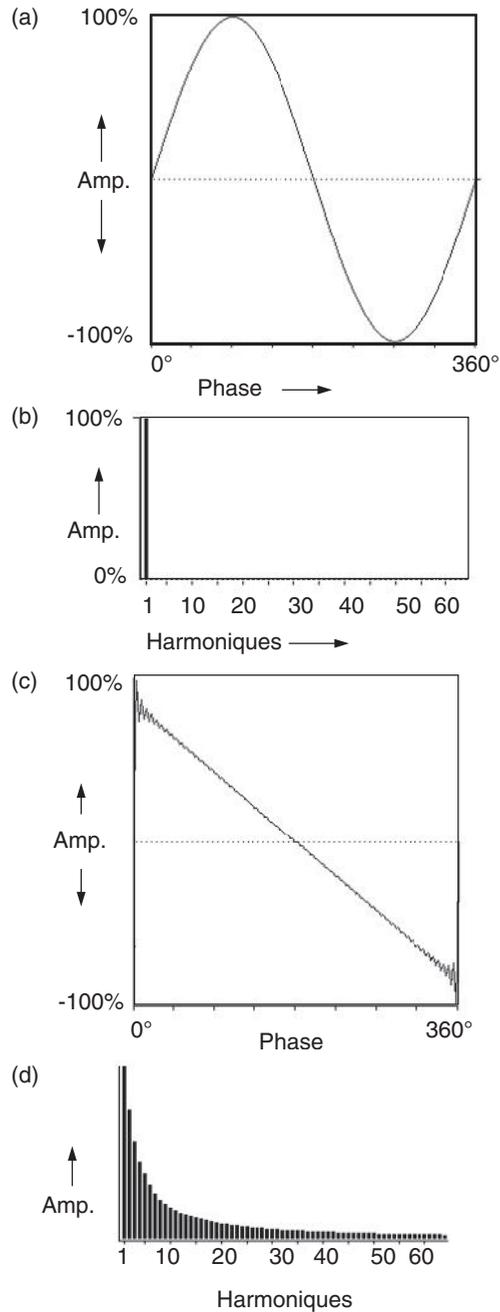
Figure 1.8 – Représentation dans le domaine temporel d'un signal. L'axe vertical montre la pression de l'air. Lorsque la courbe est près du sommet du graphique, la pression de l'air est plus élevée. Au-dessous de la ligne horizontale, la pression est réduite. Les variations de pression atmosphérique entendues comme du son peuvent survenir rapidement ; pour des sons musicaux, ce graphique peut ne durer qu'un millième de seconde (1 ms).

Une méthode simple pour décrire les formes d'ondes sonores est de les dessiner sous forme de graphiques de pression d'air par rapport au temps (figure 1.8). Ceci est appelé représentation dans le *domaine temporel*. Lorsque la courbe est proche du bas du graphique, la pression est faible, et lorsque la courbe est proche du haut, la pression d'air a augmenté. L'*amplitude* de la forme d'onde est la quantité de changement de pression d'air ; nous pouvons mesurer l'amplitude comme la distance verticale entre le point de pression zéro et le point le plus haut (ou le plus bas) d'un segment de forme d'onde donné.

Un instrument acoustique crée du son en émettant des vibrations qui changent la pression de l'air autour de l'instrument. Un haut-parleur crée du son en se déplaçant d'avant en arrière selon les changements de tension dans un signal électronique. Lorsque le haut-parleur « entre » par rapport à sa position de repos, la pression d'air diminue. Lorsque le haut-parleur « sort », la pression d'air près du haut-parleur augmente. Pour créer un son audible, ces différentes vibrations doivent parvenir à une fréquence comprise entre 20 et 20 000 Hz.

### ◆ Représentation dans le domaine fréquentiel

Mise à part la fréquence fondamentale, il peut y avoir de nombreuses fréquences présentes dans une forme d'onde. Une représentation dans le *domaine fréquentiel* ou représentation du *spectre* montre le contenu fréquentiel d'un son. Les composants fréquentiels individuels du spectre sont appelés *harmoniques* ou *partiels*. Les fréquences harmoniques sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Si l'on considère une fondamentale ou *premier harmonique* de 440 Hz, son second harmonique sera 880 Hz, son troisième 1 320 Hz, et ainsi de suite. De façon plus générale, n'importe quel composant harmonique peut être appelé partiel, qu'il soit ou non multiple entier de la fondamentale. En fait, de nombreux sons n'ont pas de fréquence fondamentale particulière.



– Figure 1.9 – Représentations dans les domaines temporels et fréquentiels de quatre signaux. –  
 (a) Vue dans le domaine temporel d'un cycle de sinusoïde. (b) Spectre du composant unique de fréquence d'une sinusoïde. (c) Vue dans le domaine temporel d'une forme d'onde en dent-de-scie. (d) Spectre montrant le contenu fréquentiel d'une dent-de-scie décroissant de façon exponentielle.

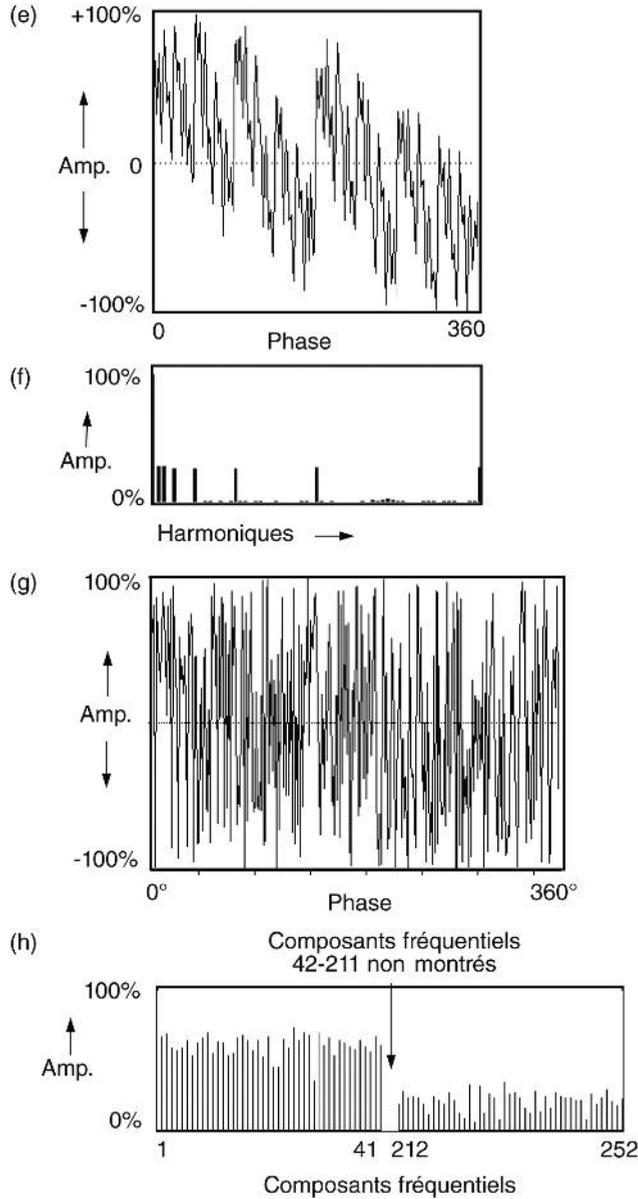


Figure 1.9 – Suite

(e) Vue dans le domaine temporel d'un cycle de forme d'onde complexe. Bien que la forme d'onde ait un aspect complexe, lorsqu'elle est répétée elle sonne de façon simple — comme un son d'orgue à anche. (f) Le spectre de la forme d'onde (e) montre qu'il est dominé par quelques fréquences. (g) Forme d'onde de bruit aléatoire. (h) Si la forme d'onde change constamment (chaque cycle est différent du cycle précédent), nous entendons du bruit. Le contenu du bruit est très complexe. Dans ce cas, l'analyse extrait 252 fréquences. Cet instantané ne montre pas comment leurs amplitudes varient dans le temps.

Le contenu fréquentiel d'une forme d'onde peut être représenté de nombreuses façons. Une représentation standard consiste à relever les partiels sous forme de lignes sur un axe  $x$ . La hauteur de chaque ligne indique la force (ou amplitude) de chaque composant fréquentiel. Le signal le plus pur est une forme d'onde dite *sinusoïde*, car elle peut être calculée grâce à la formule trigonométrique du sinus d'un angle. Une onde sinusoïdale pure représente juste un composant fréquentiel ou une ligne dans le spectre. La figure 1.9 montre les représentations dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel de quelques formes d'ondes. Remarquez que les relevés spectraux sont nommés « Harmoniques » sur leur axe horizontal, puisque l'algorithme d'analyse suppose que l'entrée est exactement une période de la fondamentale d'une forme d'onde périodique. Dans le cas du bruit à la figure 1.9g, cette supposition n'est pas valide, donc nous renommons les partiels « Composants fréquentiels ».

## 1.2.2 Phase

Le point de départ d'une forme d'onde périodique sur l'axe d'amplitude ou axe des  $y$  est sa *phase initiale*. Par exemple, une sinusoïde typique commence à l'amplitude 0 et achève son cycle à 0. Si l'on déplace le point de départ de  $2\frac{1}{4}$  sur l'axe horizontal (ou 90 degrés), la sinusoïde commence et s'achève à 1 sur l'axe d'amplitude. Par convention, on nomme cette forme d'onde cosinus. En effet, un cosinus est l'équivalent d'un sinus *déphasé* de 90 degrés (figure 1.10).

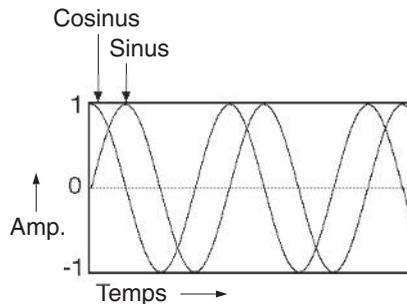


Figure 1.10 – Une sinusoïde est équivalente à une forme d'onde cosinus retardée ou légèrement déphasée.

Lorsque deux signaux commencent au même point, on dit qu'ils sont *en phase* ou en *alignement de phase*. Au contraire, lorsqu'un signal est légèrement retardé par rapport à un autre, on dit qu'ils sont *déphasés*. Lorsqu'un signal  $A$  est exactement l'opposé d'un autre signal  $B$  (c'est-à-dire déphasé de 180 degrés, pour qu'à chaque valeur positive de  $A$ , il existe une valeur correspondante négative pour le signal  $B$ ), nous disons que  $B$  est en *polarité inversée* par rapport à  $A$ . Nous pourrions également dire que  $B$  est une copie en *inversion de phase* de  $A$ . La figure 1.11 montre l'effet de l'addition de deux signaux en inversion de phase.

### ◆ Importance de la phase

On dit souvent que la phase est insignifiante à l'oreille humaine, parce que deux signaux totalement identiques à l'exception de leur phase sont difficiles à distinguer. En fait, les recherches montrent que des différences de 180 degrés en phase ou *polarité* absolue peuvent être distinguées par certaines personnes en condition de laboratoire (Greiner et Melton, 1991). Mais même en dehors de ce cas

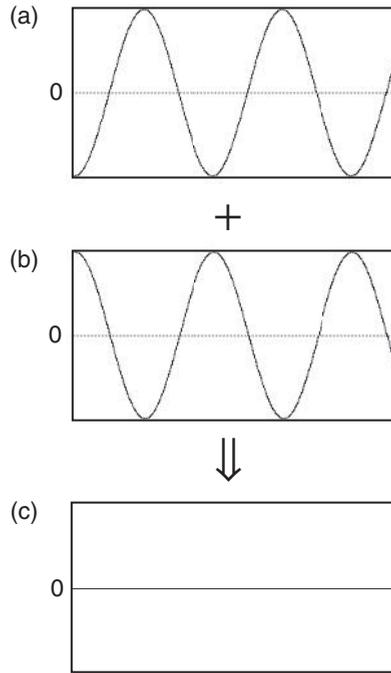


Figure 1.11 – Les effets de l'inversion de phase.

(b) est la copie en inversion de phase de (a).

Si les deux formes d'onde sont additionnées, leur résultat est nul (c).

particulier, la phase est un concept important pour diverses raisons. Tous les filtres utilisent le déphasage pour altérer les signaux. Un filtre déphase un signal (en retardant son entrée d'un temps très court) puis combine la version déphasée avec le signal originel pour créer des effets d'*annulation de phase en fonction de la fréquence* qui altèrent le spectre de l'original. Par « en fonction de la fréquence », nous voulons dire que tous les composants fréquentiels ne sont pas affectés de façon égale. Lorsque le déphasage change dans le temps, les bandes fréquentielles affectées changent également, créant des effets sonores de balayage appelés *phasing* ou *flanger* (voir le chapitre 6).

La phase est également importante dans les systèmes qui resynthétisent le son en se basant sur l'analyse d'un son existant. En particulier, ces systèmes ont besoin de connaître la phase initiale de chaque composant fréquentiel afin de replacer les différents composants dans le bon ordre (voir le chapitre 11). Les données de phase sont particulièrement critiques lors de restitution de sons *transitoires* courts et changeants rapidement, tels que l'attaque de sons instrumentaux.

Finalement, une grande attention a été portée depuis quelques années sur les composants audio qui déphasent leur signal d'entrée au minimum, car les déphasages dépendant de la fréquence distordent les signaux musicaux audibles et interfèrent avec l'*image* des haut-parleurs. L'image est la capacité d'un ensemble de haut-parleurs à créer une « image audio » stable, où chaque source est bien localisée à une place précise. Un déphasage involontaire est appelé *distorsion de phase*. Pour prendre une analogie avec l'image, un signal en distorsion de phase est « flou ».

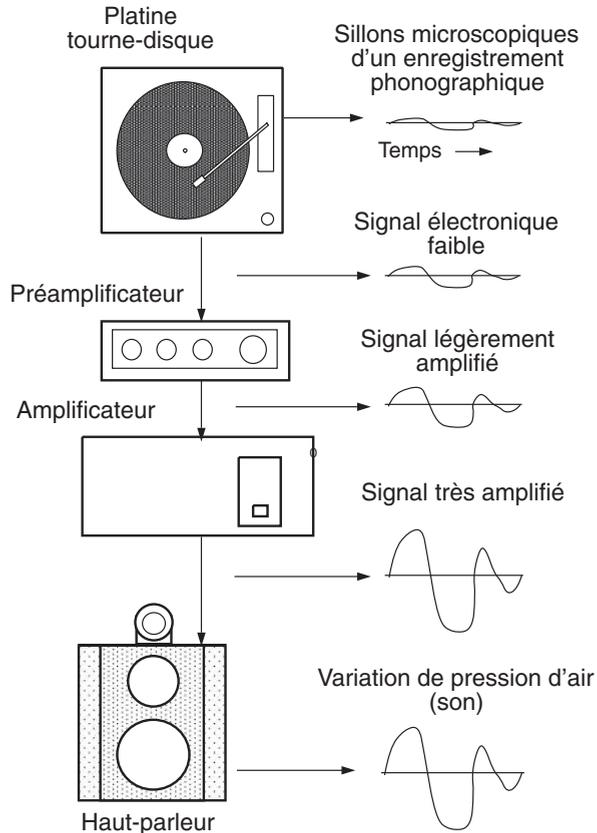
Maintenant que nous avons présenté les propriétés de base des signaux audio, nous allons comparer leurs deux représentations : analogique et numérique.

### 1.3 Représentations analogiques du son

La quantité électrique appelée *tension*, tout comme la pression de l'air, varie dans le fil métallique connectant un amplificateur avec des haut-parleurs selon les ondes sonores. Inutile de définir ici ce qu'est la tension. Pour les besoins de ce chapitre, nous pouvons simplement considérer qu'il est possible de modifier les propriétés électriques du fil métallique de façon à ce qu'elles suivent étroitement les changements de pression d'air.

Une des caractéristiques importantes des quantités variant dans le temps dont nous venons de parler (pression d'air et tension) est que chacune d'entre elles est plus ou moins analogue à l'autre. Un graphique des variations de pression d'air captées par un microphone a un aspect très similaire à celui d'un graphique des variations de la position du haut-parleur lorsque le son est lu. Le terme « analogue » sert à se souvenir de la relation qui lie ces quantités.

La figure 1.12 montre une chaîne audioanalogique. La courbe d'un signal audio peut être inscrite le long des sillons d'un disque phonographique. Les parois des sillons contiennent une représentation *temporelle continue* du son stocké sur le disque. Lorsque l'aiguille glisse à travers le sillon, elle se



— Figure 1.12 – La chaîne audioanalogique, commençant avec une forme d'onde analogique — transformée à partir des sillons d'un disque en tension, qui est ensuite envoyée dans un préamplificateur, un amplificateur, un haut-parleur, puis projetée dans l'air.