

TRAITEMENT
DU SIGNAL
ET DE L'IMAGE

Information - Commande - Communication

Temps-fréquence

concepts et outils

sous la direction de
Franz Hlawatsch
François Auger

 **hermes**

Lavoisier

Temps-fréquence

concepts et outils

sous la direction de
Franz Hlawatsch
François Auger

© LAVOISIER, 2005

LAVOISIER
11, rue Lavoisier
75008 Paris

Serveur web : www.hermes-science.com

ISBN 2-7462-1033-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 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" (article 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.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

hermes
Science
— publications —

Table des matières

| | |
|---|----|
| Avant-propos | 17 |
| PREMIÈRE PARTIE. CONCEPTS ET OUTILS FONDAMENTAUX | 21 |
| Chapitre 1. Temps-fréquence énergétique : quelques introductions | 23 |
| Patrick FLANDRIN | |
| 1.1. Introduction | 23 |
| 1.2. Atomes | 24 |
| 1.3. Énergie | 26 |
| 1.3.1. Distributions | 26 |
| 1.3.2. Appareils | 26 |
| 1.3.3. Classes | 28 |
| 1.4. Corrélations | 30 |
| 1.5. Probabilités | 31 |
| 1.6. Mécanique | 33 |
| 1.7. Mesures | 34 |
| 1.8. Géométries | 36 |
| 1.9. Conclusion | 38 |
| 1.10. Bibliographie | 39 |
| Chapitre 2. Fréquence instantanée d'un signal | 43 |
| Bernard PICINBONO | |
| 2.1. Introduction | 43 |
| 2.2. Approches intuitives | 44 |
| 2.3. Définitions mathématiques | 46 |
| 2.3.1. Ambiguïté du problème | 46 |
| 2.3.2. Signal analytique et transformée de Hilbert | 46 |
| 2.3.3. Application à la définition de la fréquence instantanée | 48 |
| 2.3.4. Méthodes instantanées | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4. Comparaison critique des différentes définitions | 52 |
| 2.4.1. Intérêt du filtrage linéaire | 52 |
| 2.4.2. Bornes des quantités introduites | 53 |
| 2.4.3. Caractère instantané | 54 |
| 2.4.4. Interprétation par la moyenne | 54 |
| 2.5. Couples canoniques | 55 |
| 2.6. Signaux de phase | 56 |
| 2.6.1. Facteurs de Blaschke | 57 |
| 2.6.2. Singularités oscillatoires | 61 |
| 2.7. Signaux de phase asymptotiques | 63 |
| 2.7.1. Chirp parabolique | 64 |
| 2.7.2. Chirp cubique | 66 |
| 2.8. Conclusions | 66 |
| 2.9. Bibliographie | 67 |
| Chapitre 3. Analyse temps-fréquence linéaire I : représentations de type Fourier | 69 |
| Rémi GRIBONVAL | |
| 3.1. Introduction | 69 |
| 3.2. Analyse de Fourier à court terme | 70 |
| 3.2.1. Transformée de Fourier à court terme | 71 |
| 3.2.2. Cartes d'énergie temps-fréquence | 72 |
| 3.2.3. Rôle de la fenêtre | 74 |
| 3.2.4. Reconstruction/synthèse | 79 |
| 3.2.5. Redondance | 79 |
| 3.3. Transformée de Gabor ; Frames de Weyl-Heisenberg et de Wilson | 80 |
| 3.3.1. Echantillonnage de la transformée de Fourier à court terme | 80 |
| 3.3.2. Frames de Weyl-Heisenberg | 80 |
| 3.3.3. Transformée de Zak et frames de Weyl-Heisenberg «critiques» | 82 |
| 3.3.4. Théorème de Balian-Low | 83 |
| 3.3.5. Bases et frames de Wilson, cosinus locaux | 84 |
| 3.4. Dictionnaires d'atomes temps-fréquence ; représentations adaptatives | 85 |
| 3.4.1. Dictionnaires multi-échelles d'atomes temps-fréquence | 86 |
| 3.4.2. Algorithme de poursuite | 86 |
| 3.4.3. Représentation temps-fréquence | 88 |
| 3.5. Applications à quelques signaux audio | 88 |
| 3.5.1. Analyse de structures superposées | 88 |
| 3.5.2. Analyse des variations de fréquence instantanée | 89 |
| 3.5.3. Transposition d'un signal audio | 90 |
| 3.6. Algorithmes discrets | 91 |
| 3.6.1. Transformée de Fourier rapide | 91 |
| 3.6.2. Bancs de filtres ; convolution rapide | 92 |
| 3.6.3. Transformée de Fourier à court terme discrète | 93 |

| | |
|---|-----|
| 3.6.4. Transformée de Gabor discrète | 94 |
| 3.7. Conclusion | 95 |
| 3.8. Remerciements | 95 |
| 3.9. Bibliographie | 96 |
| Chapitre 4. Analyse temps-fréquence linéaire II : représentations de type ondelettes | 101 |
| Thierry BLU et Jérôme LEBRUN | |
| 4.1. Introduction : échelle et fréquence | 102 |
| 4.2. La transformation en ondelettes continue | 103 |
| 4.2.1. Analyse et synthèse | 103 |
| 4.2.2. Propriétés multi-échelles | 105 |
| 4.3. La transformation en ondelettes discrète | 106 |
| 4.3.1. Analyse multi-résolution | 106 |
| 4.3.2. Algorithme de Mallat | 112 |
| 4.3.3. Représentation graphique | 113 |
| 4.4. Bancs de filtres et ondelettes | 115 |
| 4.4.1. Génération de fonctions d'échelle régulières | 116 |
| 4.4.2. Liens avec la théorie de l'approximation | 119 |
| 4.4.3. Orthonormalité et bi-orthonormalité/Reconstruction parfaite | 120 |
| 4.4.4. Matrices polyphases et implémentation | 122 |
| 4.4.5. Conception de filtres d'ondelettes à réponse impulsionnelle finie | 122 |
| 4.5. Généralisation : les multi-ondelettes | 124 |
| 4.5.1. Banc de multi-filtres | 124 |
| 4.5.2. Balancement et conception de multi-filtres | 126 |
| 4.6. Autres extensions | 129 |
| 4.6.1. Paquets d'ondelettes | 129 |
| 4.6.2. Transformations redondantes : pyramides et «frames» | 129 |
| 4.6.3. Ondelettes multi-dimensionnelles | 131 |
| 4.7. Applications | 132 |
| 4.7.1. Compression et débruitage de signaux | 132 |
| 4.7.2. Mise en correspondance d'images | 133 |
| 4.8. Conclusion | 134 |
| 4.9. Remerciements | 134 |
| 4.10. Bibliographie | 134 |
| Chapitre 5. Analyse temps-fréquence quadratique I : la classe de Cohen | 139 |
| François AUGER et Éric CHASSANDE-MOTTIN | |
| 5.1. Introduction | 139 |
| 5.2. Représentation en temps <i>ou</i> en fréquence des signaux | 140 |
| 5.2.1. Notion de représentation d'un signal | 140 |
| 5.2.2. Représentations temporelles | 141 |
| 5.2.3. Représentations fréquentielles | 142 |

12 Temps-fréquence : concepts et outils

| | |
|---|-----|
| 5.2.4. Notion de stationnarité | 143 |
| 5.2.5. L'insuffisance des représentations monodimensionnelles | 144 |
| 5.3. Représentations en temps <i>et</i> en fréquence | 145 |
| 5.3.1. Représentations temps-fréquence «idéales» | 145 |
| 5.3.2. L'insuffisance du spectrogramme | 147 |
| 5.3.3. Défauts et qualités de la distribution de Rihaczek | 150 |
| 5.4. La classe de Cohen | 151 |
| 5.4.1. Représentations quadratiques covariantes par translation | 151 |
| 5.4.2. Définition de la classe de Cohen | 152 |
| 5.4.3. Paramétrisations équivalentes | 153 |
| 5.4.4. Propriétés supplémentaires | 154 |
| 5.4.5. Existence et localisation des interférences | 157 |
| 5.5. Principaux éléments | 164 |
| 5.5.1. Wigner-Ville et ses versions lissées | 164 |
| 5.5.2. Rihaczek et ses versions lissées | 167 |
| 5.5.3. Spectrogramme et représentation S | 167 |
| 5.5.4. Choi-Williams et distributions à interférences réduites | 168 |
| 5.6. Conclusion | 168 |
| 5.7. Bibliographie | 169 |

Chapitre 6. Analyse temps-fréquence quadratique II : discrétisation de la classe de Cohen 173
Stéphane GRASSIN

| | |
|---|-----|
| 6.1. RTF quadratique des signaux discrets | 174 |
| 6.1.1. RTF des signaux déterministes à temps continu | 175 |
| 6.1.2. Equation d'échantillonnage | 176 |
| 6.1.3. Les fonctions d'autocorrélation du signal discret | 176 |
| 6.1.4. RTF d'un signal discret en fonction de sa FAC généralisée | 178 |
| 6.1.5. Discussion | 179 |
| 6.1.6. Corollaire : fonction d'ambiguïté d'un signal discret | 181 |
| 6.2. Support temporel des RTF | 182 |
| 6.2.1. Les supports temporels caractéristiques | 182 |
| 6.2.2. Commentaires | 183 |
| 6.3. Discrétisation de la RTF | 184 |
| 6.3.1. Signification de la discrétisation fréquentielle de la RTF | 184 |
| 6.3.2. Signification de la discrétisation temporelle de la RTF | 185 |
| 6.3.3. Discrétisation avec recouvrements | 186 |
| 6.3.4. Discrétisation «sans recouvrement» | 188 |
| 6.4. Propriétés des RTF à temps discret | 189 |
| 6.4.1. Les RTF à temps discret | 190 |
| 6.4.2. Effet de la discrétisation du noyau | 191 |
| 6.4.3. Inversion temporelle | 191 |
| 6.4.4. Conjugaison complexe | 191 |

| | |
|---|------------|
| 6.4.5. RTF à valeurs réelles | 192 |
| 6.4.6. Moment temporel | 192 |
| 6.4.7. Moment fréquentiel | 193 |
| 6.5. Intérêt de la discrétisation pour l'analyse spectrale | 194 |
| 6.5.1. Formulation du problème | 194 |
| 6.5.2. Cas trivial d'une sinusoïde | 195 |
| 6.5.3. Signal à modulation de fréquence linéaire | 196 |
| 6.5.4. Analyse spectrale avec les RTF discrétisées | 197 |
| 6.6. Conclusion | 198 |
| 6.7. Bibliographie | 198 |
| Chapitre 7. Analyse temps-fréquence quadratique III : la classe affine et autres classes covariantes | 201 |
| Jean-Philippe OVARLEZ, Paulo GONÇALVÈS et Richard BARANIUK | |
| 7.1. Introduction générale | 201 |
| 7.2. Construction générale de la classe affine | 202 |
| 7.2.1. Bilinéarité des distributions | 202 |
| 7.2.2. Principe de covariance | 203 |
| 7.2.3. Classe affine des représentations temps-fréquence | 206 |
| 7.3. Propriétés de la classe affine | 209 |
| 7.3.1. Énergie | 210 |
| 7.3.2. Marginales | 210 |
| 7.3.3. Unitarité | 211 |
| 7.3.4. Localisation | 212 |
| 7.4. Distributions de Wigner affines | 214 |
| 7.4.1. Forme diagonale des noyaux | 214 |
| 7.4.2. Covariance par le groupe affine à trois paramètres | 217 |
| 7.4.3. Distributions pseudo-Wigner affines lissées | 220 |
| 7.5. Considérations avancées | 223 |
| 7.5.1. Principe de tomographie | 223 |
| 7.5.2. Opérateurs et groupes | 226 |
| 7.6. Conclusions | 231 |
| 7.7. Bibliographie | 232 |
| DEUXIÈME PARTIE. CONCEPTS ET OUTILS AVANCÉS | 237 |
| Chapitre 8. Représentations temps-fréquence d'ordres supérieurs | 239 |
| Pierre-Olivier AMBLARD | |
| 8.1. Motivations | 239 |
| 8.2. Construction des représentations temps-multifréquence | 240 |
| 8.2.1. Forme générale et propriétés souhaitables | 240 |
| 8.2.2. Classes générales dans le cas pair symétrique | 241 |
| 8.2.3. Exemples et interprétation | 246 |

| | |
|--|-----|
| 8.2.4. Propriétés souhaitées et contraintes sur le noyau | 248 |
| 8.2.5. Discussion | 249 |
| 8.3. Temps-fréquence multilinéaire | 250 |
| 8.3.1. Phases polynomiales et concentration idéale | 250 |
| 8.3.2. Temps-fréquence multilinéaire : classe générale | 252 |
| 8.4. Vers des représentations affines multilinéaires | 253 |
| 8.5. Conclusion | 257 |
| 8.6. Bibliographie | 257 |
| Chapitre 9. La Réallocation | 259 |
| Éric CHASSANDE-MOTTIN, François AUGER et Patrick FLANDRIN | |
| 9.1. Introduction | 259 |
| 9.2. Le principe de réallocation | 260 |
| 9.2.1. Les compromis traditionnels de l'analyse temps-fréquence et temps- échelle | 261 |
| 9.2.2. Les spectrogrammes et les scalogrammes revus et corrigés par la mécanique | 262 |
| 9.2.3. Généralisation à d'autres représentations | 264 |
| 9.2.4. Lien avec des approches similaires | 267 |
| 9.3. La réallocation à l'œuvre | 268 |
| 9.3.1. Algorithmes rapides | 268 |
| 9.3.2. Analyse de quelques signaux simples | 269 |
| 9.4. Caractérisation des champs de vecteurs | 275 |
| 9.4.1. Statistiques des vecteurs de réallocation du spectrogramme | 275 |
| 9.4.2. Phase géométrique et champ de gradient | 277 |
| 9.5. Deux variantes | 279 |
| 9.5.1. La réallocation supervisée | 279 |
| 9.5.2. Réallocation différentielle | 281 |
| 9.6. Une application : la partition du plan temps-fréquence | 281 |
| 9.7. Conclusion | 284 |
| 9.8. Bibliographie | 285 |
| Chapitre 10. Temps-fréquence et traitement statistique | 289 |
| Franz HLAWATSCH et Gerald MATZ | |
| 10.1. Introduction | 289 |
| 10.2. Systèmes non stationnaires | 291 |
| 10.3. Processus non stationnaires | 293 |
| 10.4. Analyse TF des processus non stationnaires – spectres de type I | 295 |
| 10.4.1. Spectre de Wigner-Ville généralisé | 295 |
| 10.4.2. Corrélations TF et termes croisés statistiques | 296 |
| 10.4.3. Lissage TF et spectres de type I | 298 |
| 10.4.4. Propriétés des spectres de type I | 299 |
| 10.5. Analyse TF des processus non stationnaires – spectres de type II | 300 |

| | |
|--|------------|
| 10.5.1.Spectre évolutif généralisé | 300 |
| 10.5.2.Lissage TF et spectres de type II | 301 |
| 10.6.Propriétés des spectres pour les processus underspread | 302 |
| 10.6.1.Equivalences approximatives | 302 |
| 10.6.2.Propriétés approximatives | 304 |
| 10.7.Estimation des spectres non stationnaires | 306 |
| 10.7.1.Une classe d'estimateurs | 307 |
| 10.7.2.Analyse biais-variance | 307 |
| 10.7.3.Conception d'un estimateur | 309 |
| 10.7.4.Résultats | 310 |
| 10.8.Estimation des processus non stationnaires | 312 |
| 10.8.1.Formulation TF du filtre optimal | 313 |
| 10.8.2.Conception TF d'un filtre quasi-optimal | 314 |
| 10.8.3.Résultats | 315 |
| 10.9.Détection des processus non stationnaires | 316 |
| 10.9.1.Formulation TF du détecteur optimal | 319 |
| 10.9.2.Conception TF d'un détecteur quasi-optimal | 320 |
| 10.9.3.Résultats | 321 |
| 10.10.Conclusion | 323 |
| 10.11.Remerciements | 325 |
| 10.12.Bibliographie | 325 |
| Chapitre 11. Modélisation paramétrique non stationnaire | 331 |
| Corinne MAILHES et Francis CASTANIÉ | |
| 11.1.Introduction | 331 |
| 11.2.Spectres évolutifs | 332 |
| 11.2.1.Définition du «spectre évolutif» | 333 |
| 11.2.2.Propriétés du spectre évolutif | 334 |
| 11.3.Postulat de stationnarité locale | 335 |
| 11.3.1.Méthodes glissantes | 335 |
| 11.3.2.Méthodes adaptatives et récursives | 336 |
| 11.3.3.Application à l'analyse temps-fréquence | 339 |
| 11.4.Suppression d'une condition de stationnarité | 340 |
| 11.4.1.Modèles instables | 340 |
| 11.4.2.Modèles à paramètres variables | 343 |
| 11.4.3.Modèles à entrées non-stationnaires | 351 |
| 11.4.4.Application à l'analyse temps-fréquence | 357 |
| 11.5.Conclusion | 358 |
| 11.6.Bibliographie | 360 |
| Chapitre 12. Représentations temps-fréquence en traitement de signaux biomédicaux | 363 |
| Lotfi SENHADJI et Mohammad Bagher SHAMSOLLAHI | |

| | |
|---|------------|
| 12.1.Introduction | 363 |
| 12.2.Signaux physiologiques liés à l'activité cérébrale | 366 |
| 12.2.1.Signaux électroencéphalographiques (EEG) | 366 |
| 12.2.2.Signaux électrocorticographiques (ECoG) | 369 |
| 12.2.3.Signaux stéréoélectroencéphalographiques (SEEG) | 370 |
| 12.2.4.Potentiels évoqués (PE) | 372 |
| 12.3.Signaux physiologiques liés au système cardiaque | 374 |
| 12.3.1.Signaux électrocardiographiques (ECG) | 374 |
| 12.3.2.Suites R-R | 376 |
| 12.3.3.Potentiels ventriculaires tardifs (PVT) | 378 |
| 12.3.4.Signaux phonocardiographiques (PCG) | 379 |
| 12.3.5.Signaux Doppler | 382 |
| 12.4.Autres signaux physiologiques | 383 |
| 12.4.1.Signaux électrogastrographiques (EGG) | 383 |
| 12.4.2.Signaux électromyographiques (EMG) | 384 |
| 12.4.3.Signaux liés aux sons respiratoires (SR) | 385 |
| 12.4.4.Signaux liés aux vibrations des muscles | 385 |
| 12.5.Conclusion | 386 |
| 12.6.Bibliographie | 386 |
| Chapitre 13. Application de techniques temps-fréquence aux signaux so- | |
| nores | 395 |
| Manuel DAVY | |
| 13.1.Introduction | 395 |
| 13.1.1.Décision | 396 |
| 13.1.2.Les signaux sonores | 396 |
| 13.1.3.L'analyse temps-fréquence : outil privilégié de décision | 397 |
| 13.2.Diagnostiquer les enceintes acoustiques | 398 |
| 13.2.1.Tests existants | 398 |
| 13.2.2.Un signal test | 399 |
| 13.2.3.Une procédure de traitement | 401 |
| 13.2.4.Application et résultats | 403 |
| 13.2.5.Utilisation de noyaux optimisés | 407 |
| 13.2.6.En conclusion | 411 |
| 13.3.Vérifier un locuteur | 411 |
| 13.3.1.Identification de locuteurs : l'approche standard | 412 |
| 13.3.2.Vérification de locuteurs : une approche temps-fréquence | 415 |
| 13.4.Conclusion | 418 |
| 13.5.Bibliographie | 418 |
| Index | 421 |

Avant-propos

Le temps-fréquence serait-il une utopie mathématique ou, au contraire, un concept que l'observation des phénomènes physiques impose comme une évidence ? Des situations «archétypiques» témoignent de la validité de ce concept : des notes de musique, un chirp linéaire, un signal *frequency-shift keying*, ou encore l'analyse effectuée par notre appareil auditif. Ces exemples montrent que «les fréquences» peuvent bien avoir une localisation temporelle, même si cela semble contradictoire avec la transformée de Fourier. En effet, très souvent les phénomènes étudiés se manifestent par des signaux oscillants *évoluant dans le temps* : aux exemples évoqués ci-dessus, ajoutons encore les signaux physiologiques, radar ou sonar, acoustiques, astrophysiques... Dans de telles situations, la représentation temporelle du signal ne donne pas une bonne perception des composantes oscillantes multiples, tandis que la représentation fréquentielle (transformée de Fourier) ne montre pas clairement la localisation temporelle de ces composantes. Il semble donc naturel de penser que ces limitations pourraient être surmontées par une *analyse temps-fréquence* où le signal est représenté comme une fonction conjointe du temps *et* de la fréquence – c'est-à-dire dans un «plan temps-fréquence» – plutôt qu'une fonction du temps *ou* de la fréquence. Une telle analyse devrait constituer un outil majeur pour la compréhension de nombreux processus et phénomènes, dans des problèmes d'estimation, de détection ou de classification.

Il faut alors trouver la transformation mathématique qui permet de passer du signal analysé à sa représentation temps-fréquence. Quelle est la «transformée de Fourier généralisée» qui établit ce passage-là ? C'est à ce point-ci qu'on se trouve confronté à une limitation fondamentale, connue sous le nom de *principe d'incertitude*, qui exclut toute localisation temporelle *précise* d'une fréquence. Ce résultat négatif jette un voile brumeux d'approximation, voire d'arbitraire sur le concept d'analyse temps-fréquence. Il a pour conséquence qu'on ne pourra jamais considérer une transformation comme *la seule* transformation temps-fréquence correcte, parce que la localisation temps-fréquence ne peut pas être vérifiée de manière exacte.

Le temps-fréquence serait-il alors un problème mal posé ? Peut-être, puisqu'il n'y a pas de solution unique. Mais cette ambiguïté et ce laisser-aller mathématique ont

donné lieu à la définition d'une grande diversité de transformations temps-fréquence. Le concept chimérique d'analyse temps-fréquence se matérialise ainsi donc aujourd'hui par une multitude de transformations (ou représentations) différentes qui sont basées sur des principes encore plus divers que les domaines dont ils sont issus (traitement du signal, mathématiques, mécanique quantique, ...). Ces principes et ces outils d'analyse ou de traitement du signal sont aussi intéressants au niveau théorique qu'ils sont utiles et performants dans des applications réelles.

Le temps-fréquence serait-il donc aujourd'hui une réalité? C'est ce que nous avons essayé de montrer par cet ouvrage, dans lequel nous présentons les principes et les outils qui font de ce domaine une réalité quotidienne dans l'industrie et la recherche. Élaborée à l'issue d'une période d'environ vingt-cinq années durant laquelle cette thématique a connu d'intenses développements, cette présentation synthétique s'adresse principalement aux chercheurs et aux ingénieurs intéressés par l'analyse et le traitement des signaux non stationnaires. L'ouvrage est organisé en deux parties et constitué de treize chapitres, rédigés par des experts reconnus des thèmes abordés. La première partie concerne les notions et les outils fondamentaux, tandis que la seconde traite d'extensions et d'applications plus récentes.

La diversité des points de vue dont l'analyse temps-fréquence peut être abordée est montrée par le chapitre 1, «*Temps-fréquence énergétique : quelques introductions*». Plusieurs de ces approches – qu'elles soient issues de la mécanique quantique, de la théorie des opérateurs pseudo-différentiels ou des statistiques – conduisent au même ensemble de solutions fondamentales, sur lequel elles apportent donc des éclairages complémentaires. La plupart des concepts et outils discutés dans ce premier chapitre introductif seront repris et élaborés dans les chapitres suivants.

Le chapitre 2, «*Fréquence instantanée d'un signal*», étudie le concept d'une «fréquence dépendant du temps» qui est une forme simplifiée et restreinte d'analyse temps-fréquence. Plusieurs définitions de fréquence instantanée sont comparées, et celle qui apparaît comme la plus rigoureuse et cohérente est discutée en détail. Une étude approfondie est finalement consacrée au cas particulier des signaux de phase.

Les deux chapitres suivants traitent des méthodes temps-fréquence *linéaires*. Le chapitre 3, «*Analyse temps fréquence linéaire I : représentations de type Fourier*», aborde les outils basés sur une hypothèse de stationnarité locale des signaux, centrés autour de la Transformée de Fourier à court-terme. Ce chapitre évoque également la décomposition des signaux en «atomes» temps-fréquence obtenus par translations temporelle et fréquentielle d'un atome élémentaire, comme les décompositions de Gabor et de Wilson. Des décompositions adaptatives faisant usage de dictionnaires redondants d'atomes temps-fréquence multi-échelle sont ensuite discutées.

Le chapitre 4, «*Analyse temps fréquence linéaire II : représentations de type ondelettes*», s'occupe des outils «multi-résolution» ou «multi-échelle» basés sur la notion d'échelle plutôt que de fréquence. Partant de la transformée en ondelettes continue, ce chapitre expose les décompositions sur des séries d'ondelettes orthogonales et les

analyses multi-résolution. Il étudie également des généralisations récentes comme les multi-ondelettes ou les paquets d'ondelettes, et présente quelques applications (compression et débruitage, mise en correspondance d'images, ...).

Les méthodes temps-fréquence *quadratiques* (ou bilinéaires) font l'objet des trois chapitres suivants. Le chapitre 5, «*Analyse temps-fréquence quadratique I : la classe de Cohen*», présente de manière unifiée les principaux éléments de cette classe avec leurs principales caractéristiques, afin de permettre le choix de l'élément le mieux adapté à une application donnée. Les caractéristiques étudiées concernent les propriétés théoriques ainsi que les termes d'interférence qui peuvent poser un problème pratique. Ce chapitre établit une base importante pour plusieurs des méthodes évoquées dans la suite de cet ouvrage.

Le chapitre 6, «*Analyse temps-fréquence quadratique II : discrétisation de la classe de Cohen*», aborde le problème de l'analyse des signaux échantillonnés, et présente des algorithmes qui permettent la mise en œuvre des représentations de la classe de Cohen. Une approche basée sur l'équation d'échantillonnage du signal est développée et comparée à d'autres méthodes de discrétisation qui ont été proposées. Les propriétés de la classe de Cohen discrétisée sont ensuite étudiées.

La première partie de cet ouvrage se termine au chapitre 7, «*Analyse temps-fréquence quadratique III : la classe affine et autres classes covariantes*». Ce chapitre s'occupe des représentations temps-fréquence quadratiques ayant des propriétés de covariance différentes de celles de la classe de Cohen. L'accent est mis sur la classe affine qui est covariante par les contractions-dilatations, comme la transformée en ondelettes dans le champ linéaire. D'autres classes covariantes (classe hyperbolique, classes de puissance) sont ensuite abordées, et le rôle de certains concepts mathématiques (groupes, opérateurs, équivalence unitaire) est mis en évidence.

La deuxième partie de l'ouvrage est amorcée par le chapitre 8, «*Représentations temps-fréquence d'ordres supérieurs*», qui traite de l'analyse temps-fréquence multilinéaire. La classe des représentations temps-*multifréquence* qui sont covariantes par translations temporelle et fréquentielle est présentée. Les représentations temps-(mono)fréquence qui se concentrent idéalement sur les lois de modulation polynomiales sont ensuite étudiées et la classe covariante correspondante est présentée. Finalement, une ouverture vers les représentations affines multilinéaires est donnée.

Le chapitre 9, «*La Réallocation*», présente une technique visant à améliorer la localisation des représentations temps-fréquence, pour permettre une meilleure interprétation par un opérateur humain ou une meilleure utilisation dans un traitement automatisé. La technique de réallocation est formulée pour la classe de Cohen et la classe affine et ses propriétés et résultats sont étudiés. Deux extensions récentes, la réallocation supervisée et la réallocation différentielle, sont ensuite présentées et appliquées à des problèmes de débruitage et d'extraction de composantes.

Les deux chapitres suivants apportent une approche *statistique* aux problèmes de non-stationnarité et de l'analyse temps-fréquence. Pour les processus aléatoires

non stationnaires, différentes définitions d'un «spectre temps-fréquence» non paramétrique sont présentées dans le chapitre 10, «*Temps-fréquence et traitement statistique*». Il est montré que ces différents spectres sont quasiment équivalents pour une sous-classe de processus dite «underspread». Une méthode pour l'estimation des spectres temps-fréquence est ensuite proposée, et finalement l'emploi de ces spectres pour l'estimation et la détection des processus underspread est présenté.

Le chapitre 11, «*Modélisation paramétrique non stationnaire*», aborde les processus non stationnaires du côté paramétrique. Un éventail de différentes méthodes de modélisation paramétrique non stationnaire est présenté et une classification de ces méthodes est proposée. Le développement d'une telle méthode s'appuie normalement sur la modélisation paramétrique des signaux stationnaires, dont des extensions au cas non stationnaire sont obtenues par fenêtre glissante, par adaptativité, par évolutivité des paramètres, ou encore par non-stationnarité de l'entrée d'un filtre linéaire.

Les deux chapitres qui concluent cet ouvrage sont consacrés à des applications pratiques de l'analyse temps-fréquence à des fins de mesure, de détection ou de classification. Le chapitre 12, «*Représentations temps-fréquence en traitement de signaux biomédicaux*», donne une revue synthétique et très bien documentée sur l'apport des outils temps-fréquence à l'analyse des signaux d'origine neurologique, cardiovasculaire ou musculaire. Cette revue montre les vastes possibilités de l'analyse temps-fréquence dans ce domaine, grâce au fait que les non-stationnarités des signaux biomédicaux sont souvent porteuses d'informations utiles au diagnostic.

Enfin le chapitre 13, «*Application de techniques temps-fréquence aux signaux sonores : reconnaissance et diagnostic*», propose une technique temps-fréquence de décision non-paramétrique supervisée pour deux applications différentes, la classification d'enceintes acoustiques et la vérification de locuteurs. La décision s'obtient par minimisation d'une distance entre une représentation temps-fréquence du signal observé et une fonction temps-fréquence de référence. Le noyau de la représentation temps-fréquence et la distance sont optimisés pendant la phase d'apprentissage.

Cet ouvrage effectue comme on le voit un tour d'horizon assez extensif des divers aspects théoriques et pratiques de l'analyse temps-fréquence. Nous serions contents qu'il puisse contribuer à une compréhension et une appréciation approfondies de ce sujet passionnant, qui connaît encore aujourd'hui des développements importants.

Les auteurs tiennent à remercier J.-P. Ovarlez pour les contributions importantes qu'il a apportées durant la première phase de ce travail (en 1998-1999), G. Matz pour son assistance et ses multiples conseils utiles au cours de ce projet et surtout P. Flan-drin pour son rôle éminent d'animation de la communauté française et internationale des chercheurs en analyse temps-fréquence.

Vienne (Autriche) et Saint Nazaire, novembre 2004.