

BASES ET TECHNIQUES AVANÇÉES EN TRAITEMENT DU SIGNAL

Du capteur à la mesure

2^e éd.

Patrick Nayman



TABLE DES MATIÈRES

1 CLASSIFICATION DES SIGNAUX	17
1.1 Introduction.....	17
1.2 Classification déterministe-aléatoire.....	17
1.2.1 Déterministes	17
1.2.2 Aléatoires	17
1.3 Classification énergétique.....	17
1.4 Autres types de signaux	18
1.4.1 La distribution de Dirac	18
1.4.2 Le peigne de Dirac.....	19
1.4.3 Les signaux nuls à gauche	19
1.5 Classification continu/discret.....	20
1.6 Représentation vectorielle des signaux.....	20
1.6.1 L'intérêt d'une représentation vectorielle.....	20
1.6.2 Espace vectoriel des signaux	21
1.6.3 Développement en série de fonctions orthogonales	21
1.6.4 Théorème de Parseval.....	23
2 SÉRIES DE FOURIER	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Décomposition dans une base vectorielle de fonctions orthogonales.....	26
2.3 Énergie du signal.....	29
2.4 Conditions de convergence	29
2.5 Simplifications	30
2.6 Phénomène de Gibbs.....	33
3 TRANSFORMATION DE FOURIER.....	37
3.1 Introduction.....	37
3.2 Des séries de Fourier à la transformée de Fourier	37
3.3 Les fonctions Rect et Tri.....	38
3.4 La distribution de Dirac	43
3.5 Échantillonnage par une fonction rectangulaire	43
3.6 L'intégrale de convolution	44
3.7 Le peigne de Dirac	48
3.8 L'échelon unité de Heaviside.....	49
3.9 La symétrie.....	49
3.10 Quelques transformées de Fourier de base	50
3.11 Le théorème de Parseval	55
3.12 Cas des signaux périodiques	56
3.13 Cas des fonctions qui n'appartiennent pas à L^2	61
4 LE FILTRAGE LINÉAIRE.....	63
4.1 Introduction.....	63
4.2 Le filtre linéaire.....	63
4.2.1 La transformation est linéaire	63

4.2.2	La transformation est homogène dans le temps.....	63
4.2.3	Les caractéristiques d'un filtre linéaire.....	64
4.2.4	Filtre sans distorsion à phase linéaire	66
4.2.5	Filtre passe-bas idéal.....	67
4.2.6	Filtre passe-haut idéal	67
4.2.7	Filtre passe-bande idéal	68
4.2.8	Réponse d'un filtre à une impulsion rectangulaire	68
4.2.9	Effet de la suppression de composantes basses fréquences sur un signal rectangulaire.....	69
5	THÉORÈME DE L'ÉCHANTILLONNAGE	73
5.1	Introduction.....	73
5.2	L'échantillonnage	73
5.3	Conséquences de l'échantillonnage	76
5.4	Filtre anti-repliement	79
6	LES SIGNAUX ALÉATOIRES (RAPPELS DE STATISTIQUE).....	83
6.1	Introduction.....	83
6.2	Notions de base	83
6.3	Introduction aux moments temporels et statistiques.....	84
6.4	Les moments temporels, les relations de base	85
6.4.1	Moyenne temporelle	85
6.4.2	Auto-corrélation temporelle.....	85
6.5	Les moments statistiques, les relations de base	85
6.5.1	Moyenne statistique	85
6.5.2	Moment d'ordre 2	85
6.6	Variance	86
6.7	Fonction d'auto-corrélation	86
6.8	Fonction d'inter-corrélation	87
6.9	Stationnarité au sens strict	87
6.10	Suite aléatoire stationnaire au second ordre.....	87
6.11	Processus aléatoire stationnaire au second ordre	87
6.12	Relation entre convolution et corrélation.....	88
6.13	Relations entre fonctions de corrélation et d'inter-corrélation	89
6.14	Ergodicité.....	91
6.15	Le principe d'incertitude.....	92
6.16	Fonction génératrice d'une variable aléatoire.....	94
6.17	Fonction caractéristique d'une variable aléatoire	96
6.18	La deuxième fonction caractéristique	97
6.19	La deuxième fonction caractéristique modifiée	98
6.20	La distribution de Poisson.....	98
6.20.1	Calcul des moments de la loi de Poisson (méthode classique).....	100
6.20.2	Calcul des moments de la loi de Poisson (par la fonction génératrice).....	101
6.20.3	Calcul de la fonction de corrélation du processus de Poisson	102

7 PROPRIÉTÉS SPECTRALES	103
7.1 Introduction.....	103
7.2 Approche de la puissance, de l'énergie et de la densité spectrale d'une réalisation particulière	103
7.3 Théorème de Wiener-Kinchine.....	104
7.4 Formules de filtrage et formules des interférences (inter-spectres).....	107
7.5 La densité spectrale de puissance	109
7.6 Propriétés de la fonction de corrélation	110
7.7 Exemples.....	110
7.8 Fonction d'auto-corrélation d'un processus dérivé.....	114
7.9 Le bruit blanc	116
7.9.1 Filtrage adapté	117
7.9.2 Filtre adapté physiquement réalisable	119
7.10 La transformée de Laplace.....	120
7.10.1 Quelques transformées de Laplace	121
7.10.2 Fonction de transfert opérationnelle	121
7.10.3 Stabilité du système	124
7.10.4 Équation différentielle correspondant à la fonction de transfert.....	124
8 LA TRANSFORMATION DE HILBERT	125
8.1 Introduction.....	125
8.2 Signal analytique.....	125
8.3 La transformée de Hilbert	126
8.4 Quelques propriétés	130
8.4.1 La double transformation de Hilbert.....	130
8.4.2 Le produit de convolution.....	130
8.4.3 L'inter-corrélation.....	130
8.4.4 L'auto-corrélation	131
8.5 Propriétés du signal analytique	131
8.5.1 Fonction d'auto-corrélation	131
8.5.2 Densité spectrale	132
8.6 Enveloppe complexe d'un signal de type passe-bande.....	132
8.6.1 Densité spectrale de l'enveloppe complexe.....	135
8.6.2 Propriétés des composantes de Rice	135
9 NOTIONS DE MODULATION ET DÉTECTION SYNCHRONE	139
9.1 Introduction : intérêt de la modulation.....	139
9.2 Principe	139
9.3 La modulation d'amplitude.....	140
9.4 Densité spectrale du signal modulé en amplitude.....	141
9.5 La démodulation synchrone.....	144
9.6 La détection synchrone	148

10 LES SYSTÈMES NUMÉRIQUES	151
10.1 Introduction.....	151
10.2 Les systèmes à réponse invariante et variante dans le temps.....	152
10.2.1 Linéarité	152
10.2.2 Causalité	153
10.3 Réponse d'un système numérique (LIT) à des impulsions de Dirac	153
10.3.1 Réponse impulsionnelle d'un système numérique (LIT).....	154
10.3.2 Les systèmes à réponse impulsionnelle de durée finie (RIF) et à réponse impulsionnelle de durée infinie (RII).....	155
10.4 Les systèmes numériques récurrents et non-récurrents.....	155
10.5 Corrélation des signaux discrets	156
10.6 Auto-corrélation de signaux discrets	157
10.7 La transformée en z.....	157
10.7.1 La transformée en z directe.....	157
10.7.2 La transformée en z inverse.....	158
10.7.3 Propriétés de la transformée en z.....	160
10.7.4 Quelques transformées en z.....	162
10.7.5 Fonction de transfert d'un système numérique (LIT).....	163
10.7.6 Relation entre la transformée en z et la transformée de Fourier	164
10.8 Analyse fréquentielle des systèmes discrets	166
10.8.1 Puissance moyenne et égalité de Parseval	166
10.8.2 Énergie de la séquence.....	167
10.9 Synthèse d'un filtre numérique	167
10.9.1 Synthèse d'un filtre numérique par la méthode des dérivées	168
10.9.2 Synthèse d'un filtre numérique par la transformation bilinéaire	170
10.10 Méthode de l'invariance de la réponse impulsionnelle.....	178
10.10.1 Validité de la transformation	179
10.11 Conception des filtres RIF	180
10.11.1 Cas où $h(n)$ est symétrique	183
10.11.2 Cas où $h(n)$ est antisymétrique	184
10.11.3 Choix d'une réponse $h(n)$ symétrique ou antisymétrique.....	184
10.12 Utilisation du fenêtrage.....	185
10.12.1 Effet du fenêtrage sur un signal	185
10.12.2 Effet du fenêtrage avec un filtre RIF	188
11 TRANSFORMATION EN ONDELETTES.....	197
11.1 Introduction.....	197
11.2 La transformée de Fourier à fenêtre.....	197
11.2.1 Localisation temps-fréquence	199
11.2.2 Influence du fenêtrage sur la résolution et la dynamique	200
11.3 La transformée continue par ondelettes	201
11.3.1 Principe comparé des analyses temps-fréquence.....	202
11.3.2 Admissibilité.....	203
11.3.3 Filtre inverse	205
11.3.4 Démonstration de la formule de reconstruction et de la condition d'admissibilité	207

11.4 Exemples d'ondelettes	208
11.5 Exemple d'application	210
11.6 La décimation et le sous-échantillonnage	211
11.7 Les filtres miroirs en quadrature	215
11.7.1 Synthèse des filtres à reconstruction parfaite	218
11.7.2 Synthèse des filtres miroirs conjugués	219
11.8 La multirésolution	220
11.8.1 Construire une multirésolution	222
11.8.2 L'équation d'échelle	223
11.8.3 Conditions de quadrature sur la fonction d'échelle	224
11.8.4 L'ondelette associée.....	226
11.8.5 Ondelettes et filtres à reconstruction parfaits	226
11.8.6 Détails et approximations	228
11.8.7 Conditions nécessaires sur les ondelettes	229
11.8.8 Les ondelettes à support compact de Daubechies [15]	234
12 LE BRUIT :	
APPROCHE GÉNÉRALE.....	245
12.1 Introduction.....	245
12.2 Le bruit de quantification.....	245
12.3 Le rapport signal à bruit du codeur	247
12.3.1 Cas d'un signal sinusoïdal	247
12.3.2 Amélioration du rapport signal à bruit.....	247
12.3.3 Cas d'un signal gaussien.....	249
12.4 Formule de Hartley	249
12.5 Le bruit thermique (ou bruit Johnson)	251
12.6 Fluctuations de tension et de courant dans une résistance	252
12.7 Bande équivalente de bruit.....	255
12.7.1 Filtre passe-bas du premier ordre.....	256
12.7.2 Circuit du deuxième ordre	257
12.7.3 Filtre de Butterworth.....	257
12.8 Bruit de grenaille (Bruit Schottky ou shot noise)	258
12.8.1 Les théorèmes de Campbell	259
12.8.2 Généralisation du théorème de Campbell.....	261
12.8.3 Expression du bruit de grenaille	261
12.9 Autres sources de bruits (exemple : le bruit en 1/f ou flicker noise)	262
12.10 Le facteur de bruit	263
12.10.1 Cas d'un quadripôle isolé	264
12.10.2 Cas de quadripôles en cascade.....	265
13 LE BRUIT DANS LES TRANSISTORS BIPOLAIRE	
ET À EFFET DE CHAMP.....	267
13.1 Introduction.....	267
13.2 Le transistor bipolaire	267

13.2.1	Modèle de base du transistor bipolaire	268
13.2.2	Modèle plus complet du transistor bipolaire	270
13.2.3	Modèles du transistor bipolaire avec les sources de bruit	272
13.2.4	Calcul du bruit après filtrage	279
13.3	Le transistor à effet de champ	280
13.3.1	Schéma équivalent du transistor à effet de champ	280
13.3.2	Comparaison bipolaire-FET	283
13.3.3	Calcul du bruit après filtrage	283
13.3.4	FET et bruit en $1/f$	284
14	APPLICATION DU BRUIT IMPULSIONNEL EN PHYSIQUE	285
14.1	Introduction	285
14.2	La fonction de pondération	285
14.3	Traitement statistique des impulsions de bruit	286
14.3.1	Application du théorème de Campbell	287
14.3.2	Le filtre optimum qui minimise	290
14.4	Le signal équivalent au bruit	292
14.4.1	La charge équivalente au bruit (ENC)	295
14.5	Prise en compte de l'empilement en tant que bruit	295
14.6	Exemples de filtrage	296
14.6.1	Exemple d'une réponse impulsionnelle triangulaire	297
14.6.2	Réponse impulsionnelle définie par des morceaux de paraboles	297
14.6.3	Approche fréquentielle du filtre gaussien	303
14.7	Densité spectrale et bruit	305
15	PROBLÈMES LIÉS À LA CAPACITÉ DU DÉTECTEUR	309
15.1	Introduction	309
15.2	Calcul de la répartition des charges	309
15.3	Cas d'une capacité détecteur importante	310
15.4	La suppression du pôle zéro	312
16	MESURES TEMPORELLES	315
16.1	Introduction	315
16.2	Exemple de la technique du temps de vol (TOF)	315
16.3	Technique de la discrimination	319
16.4	Pente du signal et l'instant de basculement d'un comparateur	320
16.5	Influence de la dispersion (Jitter) sur l'instant de basculement	321
16.6	Inconvénient du comparateur classique	322
16.7	Utilisation d'un discriminateur à fraction constante	322
16.7.1	Réalisation pratique	324
16.7.2	Schéma complet	325
16.8	Différents modes de fonctionnement	326
16.8.1	Fonctionnement en mode ARC	326
16.8.2	Fonctionnement en mode TCF (True Constant Fraction)	327
16.8.3	Estimation de la pente au point de passage par zéro	328
16.8.4	Influence de la dispersion (Jitter) dans les modes ARC et TCF	329

16.9 Outils pour les mesures temporelles [17].....	330
16.9.1 Les paramètres principaux	330
16.9.2 Les convertisseurs à compteurs	330
16.9.3 Les convertisseurs à lignes à retard	332
16.9.4 Les convertisseurs verniers à oscillateurs.....	332
16.9.5 Les convertisseurs verniers à lignes à retard	333
16.9.6 Les métastabilités [20]	335
17 NOTION DE TEMPS MORT	337
17.1 Introduction.....	337
17.2 La logique de déclenchement.....	337
17.3 Les 2 types de temps morts.....	338
17.3.1 Le temps mort cumulatif.....	338
17.3.2 Le temps mort non-cumulatif	339
17.4 Traitement statistique du temps mort.....	340
17.5 Notion de temps mort généralisé	341
17.6 Notion de file d'attente	343
17.6.1 File d'attente de longueur 1	343
17.6.2 File d'attente de longueur n	344
17.7 Quel taux de temps mort est acceptable ?.....	346
17.8 Évaluation du temps mort	347
17.8.1 Cas d'une source radioactive	348
17.8.2 Cas d'une source de photons	349
17.8.3 Étude de la répartition temporelle des événements	350
17.9 Méthode pour éviter le temps mort.....	351
18 ÉLECTRONIQUE ASSOCIÉE AUX CALORIMÈTRES	353
18.1 Introduction.....	353
18.2 Les contraintes	354
18.3 Le pré-amplificateur de charges.....	354
18.4 Le pré-amplificateur de courant (transimpédance)	355
18.5 L'amplificateur de courant - charges : étude détaillée.....	356
18.5.1 En boucle ouverte (sans contre réaction).....	356
18.5.2 En boucle fermée	357
18.5.3 L'amplificateur de charges à transistors à effet de champ en entrée	358
18.5.4 Cas de l'amplificateur de courant	360
19 RÉOLUTION DANS LES PHOTO-MULTIPLICATEURS	363
19.1 Introduction.....	363
19.2 Les paramètres fondamentaux d'un photo-multiplicateur	363
19.3 Cas de deux événements en cascade	365
19.4 Le photo-multiplicateur d'un point de vue statistique	366
19.4.1 Le bruit de la photo-émission	366
19.4.2 Influence de l'ensemble des dynodes	368

19.5	Résolution en énergie et spectre du photoélectron	369
19.6	Le facteur de bruit.....	373
19.6.1	Principe d'évaluation de certains paramètres	373
19.6.2	Mesure du gain global	374
19.6.3	Mesure du gain du multiplicateur	374
19.6.4	Mesure du rendement quantique effectif.....	374
19.6.5	Mesure du rendement quantique.....	375
19.7	Fluctuations temporelles dans un photo-multiplicateur.....	375
19.8	Démonstrations	376
19.8.1	Variance de la différence des temps de transit entre deux dynodes du photo-multiplicateur	376
19.8.2	Variance de la différence des temps de transit après l'amplification par une dynode	377
19.8.3	Variance de la largeur de l'impulsion après plusieurs multiplications en cascade.....	379
19.8.4	Variance de la position du centre de gravité du signal	380
19.8.5	Variance de la position du centre de gravité du signal pour le photo- multiplicateur complet.....	381
19.9	Utilisation des signaux d'anode et de dynode.....	382
20	DÉTECTEURS DE LUMIÈRE APD ET SIPM	383
20.1	Introduction.....	383
20.2	Les photodiodes à avalanche	383
20.2.1	La résistance anti-emballement	384
20.2.2	Le bruit dans les APD.....	384
20.2.3	Circuit de lecture.....	385
20.3	Les SiPM.....	386
20.3.1	Signal de sortie d'un SiPM	388
20.3.2	Courant d'obscurité	390
20.3.3	Diaphonie.....	390
20.3.4	Post-impulsions.....	391
20.3.5	Effet de la température.....	391
20.3.6	Comparaison des principales caractéristiques d'un photo- multiplicateur et d'un SiPM	392
21	LES BOLOMÈTRES.....	393
21.1	Introduction.....	393
21.2	Principe de base [7] [53] [52]	393
21.3	Domaine spectral des bolomètres	394
21.4	Transmission d'énergie thermique.....	394
21.4.1	Loi de Fourier pour la conduction	395
21.5	Résistance thermique	395
21.6	Le thermomètre	396
21.7	Sensibilité d'un détecteur thermique	396
21.7.1	Équations de base	397
21.8	Bruit dans les bolomètres.....	400

21.8.1	Le signal équivalent au bruit.....	400
21.8.2	Le bruit thermique ou bruit Johnson (voir 12.5.).....	401
21.8.3	Le bruit en $1/f$ (voir 12.9.)	401
21.8.4	Le bruit de grenaille (voir 12.8.).....	401
21.8.5	Le bruit de phonon.....	402
21.8.6	Contribution de l'ensemble des bruits	402
21.9	La polarisation du bolomètre	402
21.9.1	Les techniques de lecture [56]	403
21.10	La contre-réaction électro-thermique [55]	404
22	INTRODUCTION AUX PHOTODÉTECTEURS À	
	TRANSFERT DE CHARGES	407
22.1	Introduction.....	407
22.2	L'effet photo-électrique	407
22.3	La capacité MOS (Metal Oxyde Semiconductor).....	408
22.4	Le transfert de charges	409
22.4.1	Principe général	409
22.4.2	Le transfert de charges entre deux cellules.....	410
22.4.3	Le transfert de charges dans le CCD	410
22.5	L'étage de sortie.....	411
22.6	Les sources de bruit	413
22.6.1	Le bruit de Reset.....	414
22.6.2	Le bruit blanc	415
22.6.3	Le bruit en $1/f$ (le modèle standard).....	415
22.6.4	Le bruit en $1/f$ (le modèle non-stationnaire)	416
22.7	Les techniques de lecture	417
22.7.1	Le double échantillonnage corrélé.....	418
22.7.2	Puissance du bruit en sortie du corrélateur	421
22.7.3	Le circuit clamp and sample	422
22.7.4	Le circuit de clamping (verrouillage sur un potentiel continu)	423
22.7.5	Comparaison des méthodes	428
23	LES LIGNES DE TRANSMISSION.....	429
23.1	Introduction.....	429
23.2	La ligne de transmission idéale (sans perte)	429
23.3	L'impédance caractéristique de la ligne de transmission	430
23.4	équations générales d'une ligne de transmission	430
23.5	Ligne sans perte	431
23.6	L'impédance caractéristique (équation générale)	432
23.7	Les réflexions.....	433
23.8	Pertes dans les lignes de transmission	435
23.9	L'effet de peau.....	435
23.9.1	Réponse d'un câble avec pertes à un échelon de tension	436
23.9.2	Expression de $T_{0.5}$ comme une fonction des pertes.....	438

23.10 Les différentes lignes de transmission	439
23.10.1 Le câble coaxial	439
23.10.2 La paire torsadée	439
23.10.3 Fil sur un plan de masse	440
23.10.4 La ligne microstrip	440
23.10.5 La ligne stripline	441
23.10.6 Matériaux et constantes diélectriques	442
23.11 Effet de chargement d'une ligne de transmission	442
23.12 Condition nécessaire pour adapter une ligne de transmission	443
23.13 Réponse à un échelon de tension	444
24 LE FACTEUR DE FANO	447
24.1 Introduction	447
24.2 La statistique de Fano	447
25 APPROCHE DE LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE	449
25.1 Introduction	449
25.2 Rappels sur le champ électromagnétique	449
25.3 La protection par écrans ou blindages	451
25.3.1 L'impédance de l'onde	452
25.3.2 Les pertes par absorption	454
25.3.3 Les pertes par réflexion	454
25.3.4 Remarques générales	455
25.4 Les couplages	455
25.4.1 Le couplage par impédance commune sur une liaison symétrique et asymétrique	456
25.4.2 Le couplage entre conducteurs par couplage capacitif	457
25.4.3 Le couplage magnétique (couplage inductif)	458
25.4.4 Capteur et câble blindé	463
25.4.5 La foudre	464
25.4.6 Les conséquences de la foudre	465
25.4.7 Le risque en conduction	466
25.4.8 Le risque lié au rayonnement	466
26 TEST DES CONVERTISSEURS ANALOGIQUES-NUMÉRIQUES	467
26.1 Introduction	467
26.2 Les caractéristiques de base	467
26.2.1 La non-linéarité différentielle	469
26.2.2 La non-linéarité intégrale	469
26.2.3 L'erreur de décalage	470
26.2.4 L'erreur de gain	471
26.3 Les tests dynamiques	471
26.3.1 La distorsion harmonique	472
26.3.2 La distorsion d'inter-modulation	473
26.3.3 Le rapport signal à bruit	474
26.3.4 Méthode statistique	475

26.3.5	Méthode par ajustement d'une sinusoïde	478
27	SUR-ÉCHANTILLONNAGE DES CAN	479
27.1	Introduction	479
27.2	La quantification différentielle [57]	479
27.3	La prédiction linéaire	480
27.3.1	Prédiction linéaire à l'ordre 1	480
27.3.2	Prédiction linéaire à l'ordre p	481
27.4	Les modulateurs sigma-delta	483
27.4.1	Principe du modulateur sigma-delta d'ordre 1	483
27.4.2	Principe du modulateur sigma-delta à l'ordre 2	487
27.4.3	Performances d'un système d'ordre n	489
27.5	Applications	491
27.5.1	Modulation d'un canal de transmission	491
27.5.2	Conversion Analogique-Numérique à grande dynamique	492
28	LA PRÉDICTION ET L'ESTIMATION	493
28.1	Introduction	493
28.2	Filtres d'innovation et de blanchiment	494
28.3	La matrice de corrélation	496
28.4	Cas discret	501
28.5	Les densités spectrales rationnelles	506
28.5.1	Processus AR	507
28.5.2	Processus MA	508
28.5.3	Processus ARMA	509
28.6	La prédiction linéaire	509
28.7	La prédiction avant	511
28.8	La prédiction arrière	514
28.9	Relations entre les prédicteurs avant et arrière	516
28.10	Structure de filtre en treillis	518
28.10.1	L'algorithme de Levinson-Durbin	521
28.10.2	L'algorithme de Levinson-Durbin inverse	528
28.10.3	Les équations de Yule-Walker	528
28.11	Introduction aux algorithmes de filtrage adaptatif	533
28.11.1	Les méthodes d'optimisation les plus utilisées en filtrage adaptatif	534
28.12	Filtrage optimal au sens de Wiener	537
28.13	Filtre de Wiener à réponse impulsionnelle finie	537
28.14	Le principe d'orthogonalité	538
28.15	L'équation de Wiener-Hopf	540
28.15.1	Forme canonique de l'erreur quadratique moyenne	543
28.15.2	Inconvénients de la méthode	543
28.16	L'algorithme du gradient déterministe ou de la plus grande pente	544
28.16.1	Cas du filtrage de Wiener	544
28.16.2	Convergence de l'algorithme du gradient déterministe	545

28.17 L'algorithme du gradient stochastique.....	553
28.17.1 Convergence de l'algorithme du gradient stochastique.....	554
28.18 Le filtrage de Kalman	563
28.18.1 Modélisation dans l'espace d'état.....	563
28.18.2 La conception de l'observation.....	564
28.19 Le filtre de Kalman discret	565
28.19.1 Le principe d'orthogonalité revisité.....	566
28.19.2 Le processus d'innovation	568
28.19.3 La matrice de corrélation du processus d'innovation	568
28.19.4 La matrice de corrélation de l'erreur d'estimation de l'équation d'état et l'équation de Riccati.....	569
28.19.5 Le prédicteur de Kalman.....	570
28.19.6 L'équation de Riccati.....	573
28.19.7 Le filtrage.....	575
28.19.8 Mise en œuvre de l'algorithme de Kalman.....	576
29 ESTIMATION SPECTRALE.....	579
29.1 Introduction.....	579
29.2 Choix d'un estimateur.....	579
29.3 Le périodogramme	582
29.3.1 Estimateur non-biaisé de la fonction d'auto-corrélation.....	584
29.3.2 Estimateur biaisé de la fonction d'auto-corrélation.....	585
29.3.3 Estimation de la densité spectrale.....	586
29.4 Les méthodes non-paramétriques d'estimation	591
29.4.1 La méthode de Bartlett.....	591
29.4.2 La méthode de Welch	593
29.4.3 La méthode de Blackman et Tukey	595
29.4.4 Performances comparées des estimateurs non-paramétriques de la densité spectrale	597
29.5 Les méthodes paramétriques d'estimation de la densité spectrale.....	598
29.5.1 Les relations entre la fonction d'auto-corrélation et les paramètres du modèle	599
29.5.2 La méthode de Yule-Walker pour le modèle AR	599
29.5.3 La méthode de Burg.....	601
29.6 La méthode du minimum de variance de Capon	607
29.7 Décomposition en éléments propres de la matrice de corrélation	611
29.7.1 Introduction au modèle harmonique	612
29.7.2 Sinusoïdes entachées d'un bruit blanc	613
29.7.3 Généralisation avec une exponentielle complexe.....	616
29.7.4 Résumé de la décomposition en éléments propres	618
29.7.5 Méthode de décomposition harmonique de Pisarenko	619
29.7.6 Résumé de l'estimation selon la méthode de Pisarenko	623
29.7.7 La méthode MUSIC.....	626
30 QUELQUES ÉLÉMENTS MATHÉMATIQUES	629
30.1 Introduction.....	629

30.2	Notions sur l'intégrale de Riemann	629
30.3	Notions sur l'intégrale de Lebesgue	629
30.4	Intégrale en partie principale de Cauchy	631
30.5	Espace fonctionnel	632
30.6	Espace de Hilbert	632
30.7	Les distributions au sens de Laurent Schwartz	632
30.7.1	Distributions associées aux fonctions localement intégrables	632
30.7.2	La distribution de Dirac	633
30.7.3	Opérations sur les distributions	633
30.8	Aide mémoire matriciel	635
30.8.1	Définition	635
30.8.2	Matrice unité	635
30.8.3	Matrice diagonale	635
30.8.4	Matrice triangulaire	635
30.8.5	Matrice de Toeplitz	636
30.8.6	Matrice singulière	636
30.8.7	Trace	636
30.8.8	Transposée d'une matrice	636
30.8.9	Déterminant d'une matrice	637
30.8.10	Valeurs propres et vecteur propre	638
30.8.11	Équation et polynôme caractéristique	638
30.8.12	Matrice inversible	638
31	ANNEXES.....	639
31.1	Glossaire	639
31.2	Les décibels.....	650
31.3	Spectre électromagnétique	652
31.4	Formulaire trigonométrique	654
	BIBLIOGRAPHIE.....	655
	INDEX	659