

TABLE DES MATIÈRES

1 QUELQUES ÉLÉMENTS MATHÉMATIQUES	15
1.1 Introduction.....	15
1.2 Notions sur l'intégrale de Riemann	15
1.3 Notions sur l'intégrale de Lebesgue	16
1.4 Intégrale en partie principale de Cauchy	17
1.5 Espace fonctionnel	18
1.6 Les distributions au sens de Laurent Schwartz	18
1.6.1 Distributions associées aux fonctions localement intégrables.....	18
1.6.2 La distribution de Dirac	19
1.6.3 Opérations sur les distributions	19
2 CLASSIFICATION DES SIGNAUX	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Classification déterministe-aléatoire.....	21
2.2.1 Déterministes	21
2.2.2 Aléatoires.....	21
2.3 Classification énergétique.....	21
2.4 Autres types de signaux	22
2.4.1 La distribution de Dirac	22
2.4.2 Le peigne de Dirac.....	23
2.4.3 Les signaux nuls à gauche	23
2.5 Classification continu/discret.....	24
2.6 Représentation vectorielle des signaux.....	24
2.6.1 L'intérêt d'une représentation vectorielle.....	24
2.6.2 Espace vectoriel des signaux	25
2.6.3 Développement en série de fonctions orthogonales	25
2.6.4 Théorème de Parseval.....	27
3 SÉRIES DE FOURIER	29
3.1 Introduction.....	29
3.2 Décomposition dans une base vectorielle de fonctions orthogonales.....	29
3.3 Énergie du signal.....	32
3.4 Conditions de convergence	32
3.5 Simplifications	34
3.6 Phénomène de Gibbs.....	34
4 TRANSFORMATION DE FOURIER.....	39
4.1 Introduction.....	39
4.2 Des séries de Fourier à la transformée de Fourier	39
4.3 Les fonctions Rect et Tri.....	40
4.4 La distribution de Dirac	45
4.5 Échantillonnage par une fonction rectangulaire	45
4.6 L'intégrale de convolution.....	46
4.7 Le peigne de Dirac	51

4.8 L'échelon unité de Heaviside.....	52
4.9 La symétrie.....	52
4.10 Quelques transformées de Fourier de base	52
4.11 Le théorème de Parseval	57
4.12 Cas des signaux périodiques	58
4.13 Cas des fonctions qui n'appartiennent pas à L^2	64
5 LE FILTRAGE LINÉAIRE.....	67
5.1 Introduction.....	67
5.2 Le filtre linéaire.....	67
5.2.1 La transformation est linéaire	67
5.2.2 La transformation est homogène dans le temps.....	67
5.2.3 Les caractéristiques d'un filtre linéaire.....	68
5.2.4 Filtre sans distorsion à phase linéaire	70
5.2.5 Filtre passe-bas idéal.....	71
5.2.6 Filtre passe-haut idéal	71
5.2.7 Filtre passe-bande idéal	72
5.2.8 Réponse d'un filtre à une impulsion rectangulaire	72
5.2.9 Effet de la suppression de composantes basses fréquences sur un signal rectangulaire	73
6 THÉORÈME DE L'ÉCHANTILLONNAGE	79
6.1 Introduction.....	79
6.2 L'échantillonnage	79
6.3 Conséquences de l'échantillonnage	82
6.4 Filtre anti-repliement	85
7 LES SIGNAUX ALÉATOIRES (RAPPELS DE STATISTIQUE).....	89
7.1 Introduction.....	89
7.2 Notions de base	89
7.3 Introduction aux moments temporels et statistiques	91
7.4 Les moments temporels, les relations de base	91
7.4.1 Moyenne temporelle	91
7.4.2 Auto-corrélation temporelle.....	91
7.5 Les moments statistiques, les relations de base	91
7.5.1 Moyenne statistique	91
7.5.2 Moment d'ordre 2	92
7.6 Variance	92
7.7 Fonction d'auto-corrélation	93
7.8 Fonction d'inter-corrélation	93
7.9 Stationnarité au sens strict	93
7.10 Suite aléatoire stationnaire au second ordre.....	93
7.11 Processus aléatoire stationnaire au second ordre	94
7.12 Relation entre convolution et corrélation.....	95
7.13 Relations entre fonctions de corrélation et d'inter-corrélation	95
7.14 Ergodicité.....	97

7.15 Le principe d'incertitude.....	98
7.16 Fonction génératrice d'une variable aléatoire.....	101
7.17 Fonction caractéristique d'une variable aléatoire	103
7.18 La deuxième fonction caractéristique	104
7.19 La deuxième fonction caractéristique modifiée	105
7.20 La distribution de Poisson.....	106
7.20.1 Calcul des moments de la loi de Poisson (méthode classique).....	107
7.20.2 Calcul des moments de la loi de Poisson (par la fonction génératrice).....	108
7.20.3 Calcul de la fonction de corrélation du processus de Poisson	109
8 PROPRIÉTÉS SPECTRALES.....	111
8.1 Introduction.....	111
8.2 Approche de la puissance, de l'énergie et de la densité spectrale d'une réalisation particulière.....	111
8.3 Théorème de Wiener-Kinchine.....	112
8.4 Formules de filtrage et formule des interférences (inter-spectres)	115
8.5 La densité spectrale de puissance	117
8.6 Propriétés de la fonction de corrélation	118
8.7 Exemples.....	118
8.8 Fonction d'auto-corrélation d'un processus dérivé.....	123
8.9 Le bruit blanc	124
8.9.1 Filtrage adapté	126
8.9.2 Filtre adapté physiquement réalisable	128
8.10 La transformée de Laplace.....	129
8.10.1 Quelques transformées de Laplace	129
8.10.2 Fonction de transfert opérationnelle	130
8.10.3 Stabilité du système	133
8.10.4 Équation différentielle correspondant à la fonction de transfert.....	134
9 LA TRANSFORMATION DE HILBERT	135
9.1 Introduction.....	135
9.2 Signal analytique.....	135
9.3 La transformée de Hilbert	136
9.4 Quelques propriétés	140
9.4.1 La double transformation de Hilbert.....	140
9.4.2 Le produit de convolution.....	141
9.4.3 L'inter-corrélation.....	141
9.4.4 L'auto-corrélation	141
9.5 Propriétés du signal analytique	142
9.5.1 Fonction d'auto-corrélation	142
9.5.2 Densité spectrale.....	142
9.6 Enveloppe complexe d'un signal de type passe-bande.....	143
9.6.1 Densité spectrale de l'enveloppe complexe.....	145

9.6.2 Propriétés des composantes de Rice	146
10 NOTIONS DE MODULATION ET DÉTECTION SYNCHRONE	151
10.1 Introduction : intérêt de la modulation.....	151
10.2 Principe	151
10.3 La modulation d'amplitude.....	152
10.4 Densité spectrale du signal modulé en amplitude.....	154
10.5 La démodulation synchrone.....	156
10.6 La détection synchrone	160
11 LES SYSTÈMES NUMÉRIQUES	165
11.1 Introduction.....	165
11.2 Les systèmes à réponse invariante et variante dans le temps.....	166
11.2.1 Linéarité.....	166
11.2.2 Causalité	167
11.3 Réponse d'un système numérique (LIT) à des impulsions de Dirac	167
11.3.1 Réponse impulsionnelle d'un système numérique (LIT).....	168
11.3.2 Les systèmes à réponse impulsionnelle de durée finie (RIF) et à réponse impulsionnelle de durée infinie (RII)	169
11.4 Les systèmes numériques récurrents et non-récurrents.....	169
11.5 Corrélation des signaux discrets	170
11.6 Auto-corrélation de signaux discrets	171
11.7 La transformée en z	171
11.7.1 La transformée en z directe.....	172
11.7.2 La transformée en z inverse	173
11.7.3 Propriétés de la transformée en z	175
11.7.4 Quelques transformées en z	177
11.7.5 Fonction de transfert d'un système numérique (LIT).....	178
11.7.6 Relation entre la transformée en z et la transformée de Fourier	179
11.8 Analyse fréquentielle des systèmes discrets	181
11.8.1 Puissance moyenne et égalité de Parseval	181
11.8.2 Énergie de la séquence.....	182
11.9 Synthèse d'un filtre numérique	182
11.9.1 Synthèse d'un filtre numérique par la méthode des dérivées	183
11.9.2 Synthèse d'un filtre numérique par la transformation bilinéaire	185
11.10 Méthode de l'invariance de la réponse impulsionnelle.....	193
11.10.1 Validité de la transformation	194
11.11 Conception des filtres RIF	196
11.11.1 Cas où $h(n)$ est symétrique	199
11.11.2 Cas où $h(n)$ est antisymétrique	199
11.11.3 Choix d'une réponse $h(n)$ symétrique ou antisymétrique.....	200
11.12 Utilisation du fenêtrage.....	200
11.12.1 Effet du fenêtrage sur un signal	200
11.12.2 Effet du fenêtrage avec un filtre RIF	204

12 TRANSFORMATION EN ONDELETTES	215
12.1 Introduction.....	215
12.2 La transformée de Fourier à fenêtre.....	215
12.2.1 Localisation temps-fréquence.....	218
12.2.2 Influence du fenêtrage sur la résolution et la dynamique.....	219
12.3 La transformée continue par ondelettes.....	219
12.3.1 Principe comparé des analyses temps-fréquence.....	220
12.3.2 Admissibilité.....	222
12.3.3 Filtre inverse.....	224
12.3.4 Démonstration de la formule de reconstruction et de la condition d'admissibilité.....	226
12.4 Exemples d'ondelettes.....	227
12.5 Exemple d'application.....	230
12.6 La décimation et le sous-échantillonnage.....	232
12.7 Les filtres miroirs en quadrature.....	236
12.7.1 Synthèse des filtres à reconstruction parfaite.....	239
12.7.2 Synthèse des filtres miroirs conjugués.....	240
12.8 La multirésolution.....	241
12.8.1 Construire une multirésolution.....	244
12.8.2 L'équation d'échelle.....	244
12.8.3 Conditions de quadrature sur la fonction d'échelle.....	246
12.8.4 L'ondelette associée.....	247
12.8.5 Ondelettes et filtres à reconstruction parfaits.....	248
12.8.6 Détails et approximations.....	250
12.8.7 Conditions nécessaires sur les ondelettes.....	251
12.8.8 Les ondelettes à support compact de Daubechies [14].....	255
13 LE BRUIT : APPROCHE GÉNÉRALE	271
13.1 Introduction.....	271
13.2 Le bruit de quantification.....	271
13.3 Le rapport signal à bruit du codeur.....	273
13.3.1 Cas d'un signal sinusoïdal.....	273
13.3.2 Amélioration du rapport signal à bruit.....	273
13.3.3 Cas d'un signal gaussien.....	275
13.4 Formule de Hartley.....	276
13.5 Le bruit thermique (ou bruit Johnson).....	277
13.6 Fluctuations de tension et de courant dans une résistance.....	278
13.7 Bande équivalente de bruit.....	282
13.7.1 Filtre passe-bas du premier ordre.....	283
13.7.2 Circuit du deuxième ordre.....	283
13.7.3 Filtre de Butterworth.....	284
13.8 Bruit de grenaille (Bruit Schottky ou shot noise).....	285
13.8.1 Les théorèmes de Campbell.....	285
13.8.2 Généralisation du théorème de Campbell.....	288

13.8.3 Expression du bruit de grenaille	288
13.9 Autres sources de bruits (exemple : le bruit en 1/f ou flicker noise)	289
13.10 Le facteur de bruit	290
13.10.1 Cas d'un quadripôle isolé	290
13.10.2 Cas de quadripôles en cascade	291
14 LE BRUIT DANS LES TRANSISTORS BIPOLAIRE ET À EFFET DE CHAMP	293
14.1 Introduction	293
14.2 Le transistor bipolaire	293
14.2.1 Modèle de base du transistor bipolaire	294
14.2.2 Modèle plus complet du transistor bipolaire	296
14.2.3 Modèles du transistor bipolaire avec les sources de bruit	299
14.2.4 Calcul du bruit après filtrage	306
14.3 Le transistor à effet de champ	307
14.3.1 Schéma équivalent du transistor à effet de champ	307
14.3.2 Comparaison bipolaire-FET	310
14.3.3 Calcul du bruit après filtrage	310
14.3.4 FET et bruit en 1/f	311
15 APPLICATION DU BRUIT IMPULSIONNEL EN PHYSIQUE	313
15.1 Introduction	313
15.2 La fonction de pondération	313
15.3 Traitement statistique des impulsions de bruit	314
15.3.1 Application du théorème de Campbell	315
15.3.2 Le filtre optimum qui minimise	318
15.4 Le signal équivalent au bruit	320
15.5 Prise en compte de l'empilement en tant que bruit	323
15.6 Exemples de filtrage	325
15.6.1 Exemple d'une réponse impulsionnelle triangulaire	325
15.6.2 Réponse impulsionnelle définie par des morceaux de paraboles	325
15.6.3 Approche fréquentielle du filtre gaussien	332
15.7 Densité spectrale et bruit	334
16 PROBLÈMES LIÉS À LA CAPACITÉ DU DÉTECTEUR	339
16.1 Introduction	339
16.2 Calcul de la répartition des charges	339
16.3 Cas d'une capacité détecteur importante	340
16.4 La suppression du pôle zéro	342
17 MESURES TEMPORELLES	345
17.1 Introduction	345
17.2 Exemple de la technique du temps de vol (TOF)	345
17.3 Technique de la discrimination	349
17.4 Pente du signal et l'instant de basculement d'un comparateur	350
17.5 Influence de la dispersion (Jitter) sur l'instant de basculement	351

17.6 Inconvénient du comparateur classique	352
17.7 Utilisation d'un discriminateur à fraction constante.....	353
17.7.1 Réalisation pratique	354
17.7.2 Schéma complet.....	356
17.8 Différents modes de fonctionnement	356
17.8.1 Fonctionnement en mode ARC (Amplitude and Rise time Compensated).....	357
17.8.2 Fonctionnement en mode TCF (True Constant Fraction).....	358
17.8.3 Estimation de la pente au point de passage par zéro.....	359
17.8.4 Influence de la dispersion (Jitter) dans les modes ARC et TCF.....	360
18 NOTION DE TEMPS MORT.....	363
18.1 Introduction.....	363
18.2 La logique de déclenchement.....	363
18.3 Les 2 types de temps morts.....	364
18.3.1 Le temps mort cumulatif.....	364
18.3.2 Le temps mort non-cumulatif	365
18.4 Traitement statistique du temps mort.....	366
18.5 Notion de temps mort généralisé	367
18.6 Notion de file d'attente	369
18.6.1 File d'attente de longueur 1	369
18.6.2 File d'attente de longueur n	370
18.7 Quel taux de temps mort est acceptable ?.....	373
18.8 Évaluation du temps mort	373
18.8.1 Cas d'une source radioactive	375
18.8.2 Cas d'une source de photons	376
18.8.3 Étude de la répartition temporelle des événements	377
18.9 Méthode pour éviter le temps mort.....	377
19 ÉLECTRONIQUE ASSOCIÉE AUX CALORIMÈTRES	381
19.1 Introduction.....	381
19.2 Les contraintes	382
19.3 Le pré-amplificateur de charges.....	382
19.4 Le pré-amplificateur de courant (transimpédance).....	383
19.5 L'amplificateur de courant - charges : étude détaillée.....	384
19.5.1 En boucle ouverte (sans contre réaction).....	384
19.5.2 En boucle fermée	385
19.5.3 L'amplificateur de charges à transistors à effet de champ en entrée	387
19.5.4 Cas de l'amplificateur de courant	389
20 RÉOLUTION DANS LES PHOTO-MULTIPLICATEURS	391
20.1 Introduction.....	391
20.2 Les paramètres fondamentaux d'un photo-multiplicateur	391

20.3 Cas de deux événements en cascade	394
20.4 Le photo-multiplicateur d'un point de vue statistique	395
20.4.1 Le bruit de la photo-émission	395
20.4.2 Influence de l'ensemble des dynodes	397
20.5 Résolution en énergie et le spectre du photoélectron.....	398
20.6 Le facteur de bruit.....	402
20.6.1 Principe d'évaluation de certains paramètres	403
20.6.2 Mesure du gain global	403
20.6.3 Mesure du gain du multiplicateur	404
20.6.4 Mesure du rendement quantique effectif	404
20.6.5 Mesure du rendement quantique.....	404
20.7 Fluctuations temporelles dans un photo-multiplicateur.....	404
20.8 Démonstrations	406
20.8.1 Variance de la différence des temps de transit entre deux dynodes du photo-multiplicateur	406
20.8.2 Variance de la différence des temps de transit après l'amplification par une dynode.....	407
20.8.3 Variance de la largeur de l'impulsion après plusieurs multiplications en cascade	409
20.8.4 Variance de la position du centre de gravité du signal	410
20.8.5 Variance de la position du centre de gravité du signal pour le photo-multiplicateur complet	411
20.9 Utilisation des signaux d'anode et de dynode.....	412

21 INTRODUCTION AUX PHOTODÉTECTEURS À

TRANSFERT DE CHARGES	413
21.1 Introduction.....	413
21.2 L'effet photo-électrique	413
21.3 La capacité MOS (Metal Oxyde Semiconductor).....	414
21.4 Le transfert de charges	415
21.4.1 Principe général	415
21.4.2 Le transfert de charges entre deux cellules.....	416
21.4.3 Le transfert de charges dans le CCD	417
21.5 L'étage de sortie.....	419
21.6 Les sources de bruit	421
21.6.1 Le bruit de Reset.....	421
21.6.2 Le bruit blanc	422
21.6.3 Le bruit en 1/f (le modèle standard).....	422
21.6.4 Le bruit en 1/f (le modèle non-stationnaire)	423
21.7 Les techniques de lecture	425
21.7.1 Le double échantillonnage corrélé.....	425
21.7.2 Puissance du bruit en sortie du corrélateur	429
21.7.3 Le circuit clamp and sample	431
21.7.4 Le circuit de clamping (verrouillage sur un potentiel continu)	432
21.7.5 Comparaison des méthodes	436

22 LES LIGNES DE TRANSMISSION.....	437
22.1 Introduction.....	437
22.2 La ligne de transmission idéale (sans perte).....	437
22.3 L'impédance caractéristique de la ligne de transmission	438
22.4 Équations générales d'une ligne de transmission	439
22.5 Ligne sans perte	440
22.6 L'impédance caractéristique (équation générale).....	441
22.7 Les réflexions.....	441
22.8 Pertes dans les lignes de transmission	443
22.9 L'effet de peau	444
22.9.1 Réponse d'un câble avec pertes à un échelon de tension	445
22.9.2 Expression de $T_{0,5}$ comme une fonction des pertes.....	447
22.10 Les différentes lignes de transmission	448
22.10.1 Le câble coaxial	448
22.10.2 La paire torsadée.....	449
22.10.3 Fil sur un plan de masse.....	449
22.10.4 La ligne microstrip.....	449
22.10.5 La ligne stripline	451
22.10.6 Matériaux et constantes diélectriques	451
22.11 Effet de chargement d'une ligne de transmission	452
22.12 Condition nécessaire pour adapter une ligne de transmission	452
22.13 Réponse à un échelon de tension	454
23 LE FACTEUR DE FANO	457
23.1 Introduction.....	457
23.2 La statistique de Fano	457
24 APPROCHE DE LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE	461
24.1 Introduction.....	461
24.2 Rappels sur le champ électromagnétique.....	461
24.3 La protection par écrans ou blindages	463
24.3.1 L'impédance de l'onde	464
24.3.2 Les pertes par absorption	466
24.3.3 Les pertes par réflexion.....	466
24.3.4 Remarques générales	467
24.4 Les couplages.....	468
24.4.1 Le couplage par impédance commune sur une liaison symétrique et asymétrique.....	468
24.4.2 Le couplage entre conducteurs par couplage capacitif.....	470
24.4.3 Le couplage magnétique (couplage inductif).....	471
24.5 La foudre	477
24.5.1 Les conséquences de la foudre.....	478
24.5.2 Le risque en conduction.....	478
24.5.3 Le risque lié au rayonnement.....	479

25 TEST DES CONVERTISSEURS ANALOGIQUES-NUMÉRIQUES	481
25.1 Introduction.....	481
25.2 Les caractéristiques de base	481
25.2.1 La non-linéarité différentielle	483
25.2.2 La non-linéarité intégrale.....	484
25.2.3 L'erreur de décalage	485
25.2.4 L'erreur de gain	486
25.3 Les tests dynamiques	487
25.3.1 La distorsion harmonique	487
25.3.2 La distorsion d'inter-modulation	488
25.3.3 Le rapport signal à bruit.....	489
25.3.4 Méthode statistique	490
25.3.5 Méthode par ajustement d'une sinusoïde	494
26 SUR-ÉCHANTILLONNAGE DES CAN	497
26.1 Introduction.....	497
26.2 La quantification différentielle [46].....	497
26.3 La prédiction linéaire	498
26.3.1 Prédiction linéaire à l'ordre 1	498
26.3.2 Prédiction linéaire à l'ordre p	499
26.4 Les modulateurs sigma-delta	501
26.4.1 Principe du modulateur sigma-delta d'ordre 1	501
26.4.2 Principe du modulateur sigma-delta à l'ordre 2.....	505
26.4.3 Performances d'un système d'ordre n	507
26.5 Applications	509
26.5.1 Modulation d'un canal de transmission.....	509
26.5.2 Conversion Analogique-Numérique à grande dynamique.....	510
27 LA PRÉDICTION ET L'ESTIMATION	511
27.1 Introduction.....	511
27.2 Filtres d'innovation et de blanchiment	512
27.3 La matrice de corrélation	514
27.4 Cas discret.....	519
27.5 Les densités spectrales rationnelles	524
27.5.1 Processus AR	525
27.5.2 Processus MA	526
27.5.3 Processus ARMA.....	527
27.6 La prédiction linéaire	528
27.7 La prédiction avant	529
27.8 La prédiction arrière.....	532
27.9 Relations entre les prédicteurs avant et arrière	535
27.10 Structure de filtre en treillis	537
27.10.1 L'algorithme de Levinson-Durbin	540
27.10.2 L'algorithme de Levinson-Durbin inverse	547
27.10.3 Les équations de Yule-Walker.....	548
27.11 Introduction aux algorithmes de filtrage adaptatif.....	552

27.11.1 Les méthodes d'optimisation les plus utilisées en filtrage adaptatif	553
27.12 Filtrage optimal au sens de Wiener.....	556
27.13 Filtre de Wiener à réponse impulsionnelle finie	557
27.14 Le principe d'orthogonalité.....	558
27.15 L'équation de Wiener-Hopf.....	559
27.15.1 Forme canonique de l'erreur quadratique moyenne	563
27.15.2 Inconvénients de la méthode	563
27.16 L'algorithme du gradient déterministe ou de la plus grande pente.....	563
27.16.1 Cas du filtrage de Wiener	564
27.16.2 Convergence de l'algorithme du gradient déterministe.....	565
27.17 L'algorithme du gradient stochastique.....	574
27.17.1 Convergence de l'algorithme du gradient stochastique.....	575
27.18 Le filtrage de Kalman	584
27.18.1 Modélisation dans l'espace d'état.....	584
27.18.2 La conception de l'observation.....	585
27.19 Le filtre de Kalman discret	586
27.19.1 Le principe d'orthogonalité revisité.....	587
27.19.2 Le processus d'innovation	589
27.19.3 La matrice de corrélation du processus d'innovation	590
27.19.4 La matrice de corrélation de l'erreur d'estimation de l'équation d'état et l'équation de Riccati	591
27.19.5 Le prédicteur de Kalman.....	591
27.19.6 L'équation de Riccati.....	595
27.19.7 Le filtrage.....	596
27.19.8 Mise en œuvre de l'algorithme de Kalman.....	597
28 ESTIMATION SPECTRALE.....	601
28.1 Introduction.....	601
28.2 Choix d'un estimateur.....	601
28.3 Le périodogramme	604
28.3.1 Estimateur non-biaisé de la fonction d'auto-corrélation.....	606
28.3.2 Estimateur biaisé de la fonction d'auto-corrélation	607
28.3.3 Estimation de la densité spectrale.....	609
28.4 Les méthodes non-paramétriques d'estimation	614
28.4.1 La méthode de Bartlett.....	614
28.4.2 La méthode de Welch	616
28.4.3 La méthode de Blackman et Tukey	619
28.4.4 Performances comparées des estimateurs non-paramétriques de la densité spectrale	620
28.5 Les méthodes paramétriques d'estimation de la densité spectrale.....	621
28.5.1 Les relations entre la fonction d'auto-corrélation et les paramètres du modèle.....	622
28.5.2 La méthode de Yule-Walker pour le modèle AR	623

28.5.3 La méthode de Burg.....	625
28.6 La méthode du minimum de variance de Capon	631
28.7 Décomposition en éléments propres de la matrice de corrélation	636
28.7.1 Introduction au modèle harmonique	636
28.7.2 Sinusoïdes entachées d'un bruit blanc	638
28.7.3 Généralisation avec une exponentielle complexe	641
28.7.4 Résumé de la décomposition en éléments propres	643
28.7.5 Méthode de décomposition harmonique de Pisarenko	644
28.7.6 Résumé de l'estimation selon la méthode de Pisarenko	647
28.7.7 La méthode MUSIC	651
29 ANNEXES.....	655
29.1 Les décibels.....	655
29.2 Spectre électromagnétique	657
29.3 Formulaire trigonométrique	659
BIBLIOGRAPHIE.....	661
INDEX	663