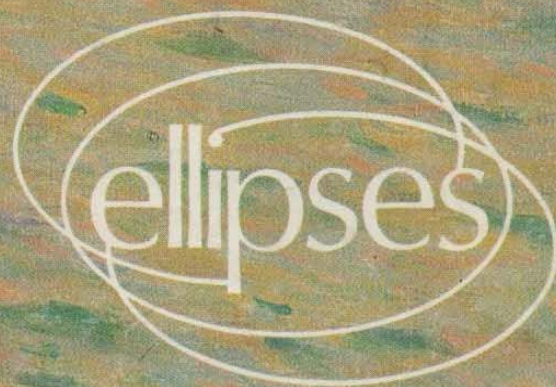


Monique et Francis BIQUARD

SIGNAUX
SYSTÈMES LINÉAIRES
ET BRUIT
EN ÉLECTRONIQUE



SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE : LES SIGNAUX DETERMINISTES

1. Les signaux à énergie finie 1
2. Les signaux à puissance moyenne finie 16

DEUXIEME PARTIE : SYSTEMES LINEAIRES ET SIGNAUX DETERMINISTES

3. Les systèmes linéaires 29

TROISIEME PARTIE : PRESENTATION DE LA THEORIE DES PROBABILITES

4. Notion de probabilité 41
5. Une variable aléatoire 57
6. Une fonction d'une variable aléatoire 98
7. Deux variables aléatoires 109
8. Une fonction de deux variables aléatoires 125
9. Deux fonctions de deux variables aléatoires 152

QUATRIEME PARTIE : LES SIGNAUX ALEATOIRES

10. Caractérisation des signaux aléatoires 160
11. Codage binaire des signaux 179
12. Les processus de Poisson 199
13. La marche aléatoire, le processus de Wiener-Lévy 210

CINQUIEME PARTIE : SYSTEMES LINEAIRES ET SIGNAUX ALEATOIRES

14. Processus stationnaires et systèmes linéaires 223
15. Processus non stationnaires et systèmes linéaires 238
16. Dérivation et intégration stochastiques d'un processus 269

SIXIEME PARTIE : LES SYSTEMES NON LINEAIRES

17. Relation entrée-sortie dans un système non linéaire 288

SEPTIEME PARTIE : LE BRUIT EN ELECTRONIQUE

18. Bruit blanc et systèmes linéaires 298
19. Les différents types de bruit 316
20. Le bruit des amplificateurs 337
21. Le bruit des transistors et des composants passifs 440

ANNEXES

22. Annexes 459

- TABLE DES MATIERES 481

TABLE DES MATIERES

PREMIERE PARTIE : LES SIGNAUX DETERMINISTES

1. Les signaux à énergie finie	
● 1.1. Définition	1
● 1.2. Transformée de Fourier	1
● 1.2.1. Spectre d'amplitude et spectre de phase	2
● 1.2.2. Transformée de Fourier inverse	2
● 1.2.3. Principales propriétés de la Transformée de Fourier	3
● 1.2.4. Exemple de calcul d'une Transformée de Fourier	5
● 1.2.5. Transformée de Fourier et Série de Fourier	6
● 1.3. Autocorrélation et intercorrélation.....	7
● 1.3.1. Définition de la fonction d'autocorrélation dans le temps	7
● 1.3.2. Propriété de l'autocorrélation temporelle	8
● 1.3.3. Autocorrélation d'une fonction Porte	8
● 1.3.4. Intercorrélation de deux signaux	9
● 1.3.5. Intercorrélation de deux impulsions retardées	9
● 1.4. Densité spectrale d'un signal à énergie finie	10
● 1.4.1. Densité spectrale d'énergie	10
● 1.4.2. Autocorrélation et densité spectrale	11
● 1.4.3. Intercorrélation et densité spectrale conjointe	12
● 1.5. Produit de convolution	12
● 1.5.1. Définition	12
● 1.5.2. Convolution et Corrélation	13
● 1.6. Résumé des propriétés des signaux à énergie finie	14
Exercices.....	14
2. Les signaux à puissance moyenne finie	
● 2.1. Définition	16
● 2.2. Distribution de Dirac.....	16
● 2.2.1. Notion de Distribution de Dirac	16
● 2.2.2. Propriétés de la distribution de Dirac	17
● 2.2.2.1. Echantillonnage. Produit scalaire	17
● 2.2.2.2. Changement de variables	18
● 2.2.2.3. Primitive	18
● 2.2.2.5. Convolution d'une fonction et d'un Dirac	19
● 2.3. Transformée de Fourier de signaux de puissance finie	19
● 2.3.1. Signaux à valeur moyenne non nulle	19
● 2.3.2. Quelques transformées de Fourier	19
● 2.3.2.1. Distribution de Dirac	19
● 2.3.2.2. Fonction Signe	20
● 2.3.2.3. Fonction Echelon-Unité	20
● 2.3.2.4. Fonctions sinusoïdales	21
● 2.3.2.5. Peigne de Dirac	21
● 2.4. Corrélation des signaux de puissance moyenne finie.....	22
● 2.4.1. Définition	22
● 2.4.2. Propriétés	22
● 2.4.3. Autocorrélation des signaux périodiques	22
● 2.4.4. Densité spectrale de puissance	24
● 2.5. Convolution des signaux de puissance moyenne fini.....	25
● 2.5.1. Définition	25
● 2.5.2. Densité spectrale et Transformée de Fourier	25
● 2.6. Résumé des propriétés des signaux à puissance moyenne finie.....	26
Exercices.....	26

* Le premier niveau de lecture est signalé par le symbole ●

DEUXIEME PARTIE SYSTEMES LINEAIRES ET SIGNAUX DETERMINISTES

3. Les systèmes linéaires	29
● 3.1. Définition d'un système linéaire.....	29
● 3.2. Réponse impulsionnelle d'un système linéaire	29
● 3.3. Réponse d'un système linéaire à un signal quelconque	30
● 3.4. Réponse harmonique d'un système linéaire	31
● 3.5. Utilisation de la réponse harmonique pour calculer la réponse d'un système....	31
● 3.5.1. Principe	31
● 3.5.2. Réponse indicielle d'un filtre passe-bas du premier ordre	32
● 3.6. Quelques propriétés des systèmes linéaires.....	33
3.6.1. Existe-t-il un système linéaire ne déformant pas un signal?	33
3.6.2. Un signal sinusoïdal est-il déformé par un système linéaire réel?	33
3.6.3. Existe-t-il des systèmes linéaires retardant un signal sans déformation?	34
3.6.4. Système physiquement réalisable	35
● 3.6.5. Retard de phase, retard de groupe	35
Exercices.....	39

TROISIEME PARTIE PRESENTATION DE LA THEORIE DES PROBABILITES

4. Notion de probabilité	41
● 4.1. Expérience aléatoire et événements	41
● 4.1.1. Définitions	41
● 4.1.2. Représentation des événements	42
● 4.1.3. Somme ou réunion de deux événements	42
● 4.1.4. Produit ou intersection de deux événements	43
● 4.2. Probabilité	43
● 4.2.1. Probabilité d'un événement	43
● 4.2.2. Probabilité statistique d'un événement	44
● 4.2.3. Somme de deux événements incompatibles. Théorème des probabilités totales	45
Exemple n° 1. Le problème de la loterie	45
Exemple n° 2. Le contrôle périodique d'un appareil	46
● 4.2.4. Probabilité de la somme d'événements compatibles	47
● 4.2.5. Probabilité d'un produit d'événements	47
● 4.3. Probabilités conditionnelles.....	48
● 4.3.1. Événements indépendants	48
Exemple n° 3. Jet de deux pièces	48
Exemple n° 4. Tirage de deux boules dans une urne	49
● 4.3.2. Définition de la probabilité conditionnelle	49
● 4.3.3. Théorème des probabilités composées	50
Exemple n° 5. Tirage de quatre boules dans une urne	51
Exemple n° 6. Un dé est lancé dix fois	51
Exemple n° 7. Le problème de l'alcootest	51
● 4.4. Formule des probabilités totales.....	52
● 4.4.1. Système complet d'événements	52
Exemple n° 8. Le contrôle d'un appareil	53
4.4.2. Théorème des hypothèses (Formule de Bayes)	53
Exemple n° 8. Retour au contrôle d'un appareil	54
Exemple n° 9. Un autre exemple d'urnes	54
Exercices	54

5. Une variable aléatoire	
● 5.1. Les variables aléatoires discrètes.....	57
● Exemple n° 10. Le jeu de pile ou face	57
● 5.1.1. Définitions générales	58
● 5.1.1.1. Fonction de répartition	58
● 5.1.1.2. Valeur moyenne. Espérance mathématique	59
● 5.1.1.3. Carré moyen et variance	59
● 5.1.1.4. Moment d'ordre n	59
● 5.1.1.5. Fonction caractéristique	60
● 5.1.1.6. Le jeu de dés	60
● 5.1.2. Les expériences répétées. La loi binomiale	61
● 5.1.2.1. Loi de probabilité	61
● 5.1.2.2. Espérance mathématique	61
● 5.1.2.3. Carré moyen	62
● 5.1.2.4. Variance	62
● 5.1.2.5. Ecart-type	62
● 5.1.2.6. Fonction caractéristique	63
● 5.1.3. Formes asymptotiques de la Loi binomiale	63
● 5.1.3.1. Théorème de Moivre - Laplace	63
● Exemple n° 11. Une pièce est lancée 10 000 fois	65
● Exemple n° 12. Fluctuation du nombre de molécule dans un mm ³ de gaz	66
● 5.1.3.2. Théorème de Poisson	67
● Exemple n° 13. Un système de 1000 composants	68
● 5.1.4. Loi de Poisson	68
● 5.1.4.1. Loi de probabilité	68
● 5.1.4.2. Espérance mathématique	71
● 5.1.4.3. Carré moyen	71
● 5.1.4.4. Variance et écart-type	71
● 5.1.4.5. Fonction caractéristique	72
● 5.1.4.6. Généralisation de la loi de Poisson	72
● Exemple n° 14. La désintégration radioactive	72
● Exemple n° 15. Les microbes dans l'air	73
● Exemple n° 16. La cour suprême des Etats-Unis	74
● 5.2. Les variables aléatoires continues.....	75
● 5.2.1. Définitions générales	75
● 5.2.1.1. Fonction de répartition	75
● 5.2.1.2. Densité de probabilité	75
● 5.2.1.3. Valeur moyenne. Espérance mathématique	76
● 5.2.1.4. Carré moyen. Variance	76
● 5.2.1.5. Moment d'ordre n	77
● 5.2.1.6. Fonction caractéristique	77
● 5.2.1.7. Retour aux variables aléatoires discrètes	77
● 5.2.1.8. Espérance mathématique d'une fonction	78
● 5.2.2. Variable aléatoire uniforme	78
● 5.2.3. Variable aléatoire gaussienne centrée	79
● 5.2.3.1. Densité de probabilité et fonction de répartition	79
● 5.2.3.2. Fonction caractéristique	80
● 5.2.3.3. Moments d'ordre n	80
● 5.2.4. Variable aléatoire gaussienne non centrée	81
● 5.2.4.1. Lois de probabilité	81
● 5.2.4.2. Fonction caractéristique	82
● 5.2.4.3. Moments	82
● 5.2.4.4. Remarque	82
● Exemple n° 17. Probabilité d'erreur en transmission NRZ	83
● 5.3. Probabilités conditionnelles.....	85
● 5.3.1. Lois de probabilités conditionnelles	85
● 5.3.2. Probabilité sur l'axe des temps	87
● Exemple n° 18. Le problème de l'assurance-vie	88
● Exemple n° 19. L'émission électronique	90
● Exercices.....	92

6. Une fonction d'une variable aléatoire	
● 6.1. Définitions.....	98
● 6.2. Calcul de la densité de probabilité.....	98
6.3. Exemples de fonctions aléatoires.....	99
6.3.1. La translation	99
6.3.2. L'amplification	100
6.3.3. La détection quadratique	100
6.3.4. La détection linéaire	102
6.3.5. Fonction périodique d'une phase aléatoire uniforme	104
6.3.5.1. Calcul de la densité de probabilité	104
6.3.5.2. Calcul des moments	105
6.3.5.3. Calcul de la fonction caractéristique	105
Exercices.....	106
7. Deux variables aléatoires	
7.1. Fonctions de répartition conjointe et marginales.....	109
7.1.1. Définitions	109
7.1.2. Propriétés de la fonction de répartition conjointe	109
7.2. Probabilités conjointes et marginales.....	110
7.2.1. Densité de probabilité conjointe	110
7.2.2. Probabilité de l'événement $(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in D$	111
7.2.3. Probabilités marginales	111
7.3. Cas particulier de variables aléatoires indépendantes.....	111
7.4. Exemples de lois de probabilité conjointe.....	112
7.4.1. Le jeu de dés	112
7.4.2. Deux variables aléatoires gaussiennes	112
Exemple n° 20. Deux variables aléatoires indépendantes	113
Exemple n° 21. L'aiguille de Buffon	114
7.5. Probabilités conditionnelles	114
7.5.1. La condition est la réalisation de l'événement $M = (\mathbf{x} \leq u)$	115
7.5.2. La condition est la réalisation de l'événement $M = (u_1 < \mathbf{x} \leq u_2)$	115
7.5.3. La condition est la réalisation de l'événement $M = (\mathbf{x} = u)$	116
7.5.4. Espérance mathématique conditionnelle	117
7.5.5. Illustration avec des gaussiennes centrées	118
7.5.5.1. La condition est la réalisation de l'événement $M = (-k\sigma_x < \mathbf{x} \leq k\sigma_x)$	118
7.5.5.2. La condition est la réalisation de l'événement $M = (\mathbf{x} = u)$	119
Exemple n° 22. Deux gaussiennes indépendantes de signes opposés	120
Exemple n° 23. Points sur l'axe des temps	121
8. Une fonction de deux variables aléatoires	
● 8.1. Lois de probabilité.....	125
● 8.1.1. Fonction de répartition	125
● 8.1.2. Densité de probabilité	125
● 8.2. Somme de deux variables aléatoires.....	126
8.2.1. Somme de deux gaussiennes indépendantes	127
8.2.2. Somme de deux variables uniformes indépendantes	128
Exemple n° 24. Mise en série de deux résistances	128
8.2.3. Somme de deux lois de Poisson indépendantes	128
8.3. Exemples de fonctions de deux variables aléatoires.....	129
8.3.1. $Z = \mathbf{x}^2 + \mathbf{y}^2$	129
8.3.2. $Z = \min(\mathbf{x}, \mathbf{y})$	129
8.3.3. $Z = \max(\mathbf{x}, \mathbf{y})$	130
Exemple n° 25. Durée de vie de deux systèmes	131
● 8.4. Somme de N variables aléatoires indépendantes.....	134
8.4.1. Somme de N gaussiennes indépendantes	134
8.4.2. Somme de N variables uniformes indépendantes	135
8.4.3. Somme de N variables indépendantes de phases aléatoires	137
● 8.4.4. Théorème central limite	138
Exemple n° 26. Le jeu de six dés	139

8.5.	Espérance mathématique d'une fonction de deux variables aléatoires	140
8.5.1.	Espérance mathématique conditionnelle	141
8.5.1.1.	L'événement est $M = (u_1 < \mathbf{x} \leq u_2)$	141
8.5.1.2.	L'événement est $M = (\mathbf{x} = u)$	142
8.5.2.	Etude de la variable aléatoire $E[g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{x}]$	143
8.5.3.	Illustration avec des gaussiennes centrées	143
8.5.3.1.	Calcul de $E[\mathbf{y} \mathbf{x}]$	144
8.5.3.2.	Calcul de $E[\mathbf{y}^2 \mathbf{x}]$	144
8.5.3.3.	Calcul de $E[\mathbf{x}\mathbf{y}]$	145
8.5.3.4.	Calcul de $E[\mathbf{x}^2\mathbf{y}^2]$	145
8.6.	Moments de deux variables aléatoires	145
8.6.1.	Moments d'ordre n	145
8.6.2.	Moments du premier ordre	145
8.6.3.	Moments du deuxième ordre et coefficient de corrélation	145
8.7.	Variables aléatoires non corrélées, orthogonales et indépendantes.....	146
8.7.1.	Variables non corrélées	146
8.7.2.	Variables orthogonales	147
8.7.3.	Variables indépendantes	147
	Exercices.....	147
9.	Deux fonctions de deux variables aléatoires	
9.1.	Fonction de répartition conjointe.....	152
	Exemple n° 27. Transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires (ou cylindriques du plan)	152
9.2.	Densité de probabilité conjointe	155
	Exemple n° 28. Transformation linéaire	156
9.3.	Utilisation d'une variable auxiliaire pour la détermination de la densité de probabilité d'une fonction de deux variables	157
9.3.1.	Produit de deux variables aléatoires	158
9.3.2.	Autre exemple intéressant en modulation	158
9.4.	Cas particulier des variables aléatoires indépendantes.....	159
QUATRIEME PARTIE : LES SIGNAUX ALEATOIRES		
10.	Caractérisation des signaux aléatoires	
● 10.1.	Définition d'un processus.....	160
● 10.2.	Exemples de processus.....	160
● 10.2.1.	Le bruit thermique	160
● 10.2.2.	Le signal de phase aléatoire	161
● 10.3.	Lois de probabilité d'un processus	162
● 10.3.1.	Statistiques du premier ordre	162
● 10.3.2.	Statistiques du deuxième ordre	163
● 10.3.3.	Autocorrélation d'un processus	164
● 10.3.4.	Autocovariance d'un processus	164
	Exemple n°29. Le phaseur d'amplitude aléatoire	165
	Exemple n°30. Dérivation d'un processus	165
	Exemple n°31. Le bruit à bande étroite	166
● 10.4.	Processus stationnaire.....	167
● 10.4.1.	Stationnarité au sens strict	167
● 10.4.2.	Stationnarité au sens large	168
● 10.4.3.	Propriétés de la fonction d'autocorrélation d'un processus stationnaire	168
● 10.5.	Processus ergodique.....	169
● 10.6.	Densité spectrale d'un processus stationnaire	171
	Exemple n°32. Le processus à fréquence et phase aléatoires indépendantes	174
	Exercices.....	177

11. Codage binaire des signaux	
11.1. Le codage NRZ semi-aléatoire	179
11.2. Le codage NRZ aléatoire (Non Retour à Zéro).....	180
11.3. Le signal binaire cadencé en mode biphasé	182
● 11.4. Densité spectrale d'un signal numérique, formule de BENNETT	189
● 11.4.1. Densité spectrale d'un signal binaire	189
● 11.4.2. Généralisation à un signal quelconque	190
Exemple n°33. Le codage RZ polaire	190
● 11.5. Générateurs de signaux pseudo-aléatoires	191
● 11.5.1. Constitution des générateurs pseudo aléatoires	191
● 11.5.2. Autocorrélation et densité spectrale	193
Exercices.....	196
12. Les processus de Poisson	
12.1. Présentation générale	199
12.2. Les nombres de Poisson	200
12.3. Les incréments de Poisson.....	201
12.4. Les impulsions de Poisson	203
12.5. Le bruit grenaille (shot noise)	204
12.5.1. Le bruit des diodes	204
12.5.2. Le bruit des tubes à vide	205
12.5.3. Le bruit du photomultiplicateur	206
Exemple n° 34. Le signal télégraphique semi-aléatoire	207
Exemple n° 35. Le signal télégraphique aléatoire	209
13. La marche aléatoire, le processus de Wiener-Lévy	
13.1. Marche aléatoire à une dimension.....	210
13.1.1. Position de la particule après N déplacements	210
13.1.2. Lois asymptotiques	211
13.1.3. Distribution dans le temps	211
13.1.4. Profil de concentration d'une population se déplaçant de manière aléatoire sur un axe	213
13.1.5. Autocorrélation du processus de Wiener-Lévy à une dimension	214
13.1.6. Equation de diffusion à une dimension. Deuxième loi de Fick	214
13.1.7. Equation de continuité. Première loi de Fick	216
13.2. Marche aléatoire à trois dimensions.....	217
13.2.1. Position de la particule après N déplacements	217
13.2.2. Equation de diffusion et équation de continuité à trois dimensions	219
13.3. Mouvements des molécules dans les gaz et les liquides.....	219
13.3.1. Rappels sur les gaz parfaits.	219
13.3.2. Libre parcours moyen des molécules d'un gaz. Constante de diffusion.	220
13.3.3. Constantes de diffusion dans les liquides.	221

CINQUIEME PARTIE SYSTEMES LINEAIRES ET SIGNAUX ALEATOIRES

14. Processus stationnaires et systèmes linéaires	
● 14.1. Théorème de la moyenne.....	223
● 14.2. Intercorrélations entrée-sortie.....	224
● 14.2.1. Calcul de l'intercorrélation entre l'entrée et la sortie	224
● 14.2.2. Calcul de l'intercorrélation entre la sortie et l'entrée	225
● 14.3. Autocorrélation du signal de sortie.....	225
● 14.4. Densité spectrale du signal de sortie	227
● 14.5. Réponse d'un système linéaire à un bruit blanc	228
● 14.5.1. Caractérisation d'un système linéaire par sa réponse harmonique	228
● 14.5.2. Caractérisation d'un système linéaire par sa réponse impulsionnelle	229
● 14.5.3. Identification d'un système linéaire en fonctionnement	229

14.6. Deux systèmes linéaires.....	231
14.6.1. Processus mutuellement stationnaires	231
14.6.2. Intercorrélations des sorties de deux systèmes linéaires dont les entrées sont des processus mutuellement stationnaires	231
14.6.2.1. Calcul de l'intercorrélation entrée-sortie	231
14.6.2.2. Calcul de l'intercorrélation des sorties	232
14.6.2.3. Densités spectrales conjointes	232
Exemple n°36. Densité spectrale conjointe de deux bruits	233
14.7. Génération de processus orthogonaux.....	234
Exercices.....	235
15. Processus non stationnaires et systèmes linéaires	
15.1. Caractéristiques d'un processus non stationnaire.....	238
15.1.1. Espérance mathématique	238
15.1.2. Autocorrélation d'un processus non stationnaire	238
15.1.3. Le cas particulier du processus non stationnaire réel	238
15.1.4. Exemples de processus non stationnaire	239
15.1.4.1. Espérance mathématique	239
15.1.4.2. Autocorrélation	239
15.1.4.3. Illustration par le bruit thermique d'une résistance	239
15.1.5. Densité spectrale moyenne d'énergie dans le temps	240
Exemple n° 37. L'impulsion de bruit thermique	241
15.1.6. Densité spectrale moyenne de puissance dans le temps	243
Exemple n° 38. Modulation d'amplitude à porteuse supprimée d'un processus stationnaire	243
Exemple n° 39. Echantillonnage d'un processus stationnaire	246
Exemple n° 40. Changement de la fréquence d'un processus stationnaire par mélangeur équilibré	250
15.2. Systèmes linéaires et processus non stationnaires.....	254
15.2.1. Théorème de la moyenne	254
15.2.2. Intercorrélation entrée-sortie	254
15.2.3. Autocorrélation du processus de sortie	255
15.2.4. Moyennes dans le temps des corrélations entrée-sortie	256
15.2.4.1. Intercorrélation entrée-sortie	256
15.2.4.2. Autocorrélation sortie-sortie	257
15.2.5. Moyennes dans le temps des densités spectrales	258
15.2.6. Intégration dans le temps des corrélations entrée-sortie	258
Exemple n° 41. Bruit thermique du circuit RC	259
Exemple n° 42. Transitoire dans un circuit RC	261
15.3. Deux systèmes linéaires.....	264
Exercices.....	265
16. Dérivation et intégration stochastiques d'un processus	
16.1. Continuité et Dérivabilité d'un processus en moyenne quadratique.....	269
16.1.1. Continuité en moyenne quadratique d'un processus	269
16.1.1.1. Définition	269
16.1.1.2. Continuité de la moyenne	269
16.1.1.3. Critère de continuité pour un processus réel stationnaire	270
16.1.2. Dérivabilité en moyenne quadratique d'un processus	270
16.1.2.1. Définition	270
16.1.2.2. Critère de dérivabilité pour les processus stationnaires	270
16.1.2.3. Critère de dérivabilité pour les processus non stationnaires	271
16.1.2.4. Espérance mathématique du processus dérivée	271
16.1.3. Exemples de processus réels stationnaires	271
16.1.3.1. Le signal de phase aléatoire uniforme	271
16.1.3.2. Le bruit à bande étroite	272
16.1.3.3. Le signal NRZ aléatoire	272
16.1.3.4. Le signal binaire cadencé en mode biphase	272
16.1.3.5. Les incréments de Poisson	272
16.1.3.6. Les impulsions de Poisson	273

16.1.4.	Exemples de processus réels non stationnaires	273
16.1.4.1.	Les nombres de Poisson	273
16.1.4.2.	Le processus de Wiener-Lévy	273
16.1.4.3.	Modulation d'amplitude par un processus	274
16.1.5.	Autocorrélation de la dérivée d'un processus non stationnaire	274
16.1.6.	Réponse impulsionnelle et réponse harmonique d'un dérivateur	275
16.1.7.	Exemple de processus dérivé. La démodulation de fréquence	277
16.1.7.1.	Rappels sur le signal modulé en fréquence	277
16.1.7.2.	Signal à l'entrée du récepteur	277
16.1.7.3.	Filtrage du signal incident	277
16.1.7.4.	La démodulation de fréquence	279
16.1.7.5.	Propriétés de $f'(t)$	279
16.2.	Intégration stochastique	280
16.2.1.	Moments de l'intégrale d'un processus	280
16.2.1.1.	Espérance mathématique de l'intégrale d'un processus	280
16.2.1.2.	Carré moyen et variance de l'intégrale d'un processus	281
16.2.2.	Moyenne dans le temps d'un processus stationnaire	281
Exemple n° 43.	Extraction d'un signal du bruit par moyennage dans le temps	282
16.2.3.	Modélisation d'un intégrateur	285
Exemple n° 44.	Intégration d'un bruit blanc	285

SIXIEME PARTIE : LES SYSTEMES NON LINEAIRES

17.	Relation entrée sortie dans un système non linéaire	
17.1	Le système non linéaire amnésique	288
17.2	Lois de probabilité du signal de sortie	288
17.3.	Calcul de l'autocorrélation du signal de sortie	289
17.4.	Propriétés de la fonction caractéristique conjointe	290
17.5.	Cas des signaux gaussiens	290
17.5.1.	Calcul de la fonction caractéristique $F_{xx}(\omega_1, \omega_2; t)$	290
17.5.2.	Théorème de PRICE	291
Exemple n°45.	La détection linéaire (redressement monoalternance)	292
Exemple n° 46.	Le détecteur de signe	294
17.6.	La non linéarité en x^n	295
Exemple n° 47.	La détection quadratique	296

SEPTIEME PARTIE : LE BRUIT EN ELECTRONIQUE

18.	Bruit blanc et systèmes linéaires	
● 18.1.	Densité spectrale d'un bruit blanc filtré	298
● 18.2.	Bande passante de bruit d'un système linéaire	299
● 18.3.	Densité spectrale bilatérale et unilatérale	299
● 18.4.	Autocorrélation d'un bruit blanc filtré	300
● 18.5.	Le passe-bas du premier ordre	300
18.6.	Le passe-bas du second ordre	302
18.7.	Le bruit à bande étroite	306
18.7.1.	Le filtre sélectif LC	306
● 18.7.2.	Caractéristiques du bruit à bande étroite	309
● 18.8.	Signal et bruit à bande étroite. Le rapport porteuse sur bruit	311
Exercices.		312
19.	Les différents types de bruit	
● 19.1.	Le bruit thermique	316
● 19.1.1.	Puissance de bruit disponible	316
● 19.1.2.	Schéma équivalent de bruit d'une résistance	317
● 19.1.3.	Statistique du bruit thermique	319

●	19.1.4. Association de deux résistances	320
	19.1.5. Bruit du circuit RC	321
	19.1.6. Bruit du circuit RLC	323
●	19.2. Le bruit grenaille (shot noise)	324
●	19.2.1. Le bruit d'une diode passante	324
●	19.2.2. Fluctuation de la tension aux bornes d'une diode passante	325
●	19.2.3. Le bruit des diodes Zener	327
●	19.2.4. Réduction du bruit d'une diode Zener. Le bruit de l'alimentation stabilisée	329
●	19.2.5. Générateur de bruit à diode Zener	332
●	19.3. Le bruit flicker ou bruit basse fréquence	333
●	19.3.1. Densité spectrale	333
●	19.3.2. Puissance moyenne de bruit flicker dans une décade de fréquence	333
●	19.3.3. Puissance moyenne de bruit flicker. Fréquence physiquement réalisable	334
	Exercices	335
20.	Le bruit des amplificateurs	
●	20.1. Représentation générale du bruit d'un quadripôle.....	337
●	20.2. Schéma équivalent de bruit d'un montage	338
●	20.2.1. Tension équivalente de bruit ramenée à l'entrée	338
●	20.2.2. Densité spectrale de la tension équivalente de bruit	339
●	20.2.3. Densité spectrale du bruit en sortie	340
●	20.2.4. Puissance moyenne (sur 1 Ω) du bruit filtré	342
●	20.2.5. Puissance moyenne (sur 1 Ω) de la tension équivalente de bruit	342
●	20.2.6. Cas particulier où le bruit incident peut être considéré comme blanc	343
●	20.2.7. Caractérisation des générateurs équivalents de bruit par la mesure de leur densité spectrale	344
	Exemple n° 48. Polarisation faible bruit d'un transistor	345
●	20.3. Le bruit des amplificateurs opérationnels.	348
●	20.3.1. Schéma équivalent de bruit de la configuration inverseuse	348
●	20.3.2. Schéma équivalent de bruit de la configuration non inverseuse	350
●	20.3.3. Schéma équivalent de bruit de l'amplificateur opérationnel monté en résistance	353
	Exemple n° 49. Bruit d'un amplificateur à haute impédance d'entrée	355
	Exemple n° 50. Bruit d'un amplificateur d'instrumentation	359
●	20.4. Le facteur de bruit d'un amplificateur	364
●	20.4.1. Définition du facteur de bruit d'un montage	364
●	20.4.2. Influence de la résistance de source sur le facteur de bruit du montage	365
●	20.4.3. Amplification faible-bruit d'un signal de source	366
●	20.4.4. Température de bruit de la source	367
●	20.4.5. Température de bruit d'un amplificateur	367
●	20.4.6. Température de bruit d'un montage	368
●	20.4.7. Résistance de bruit d'un amplificateur	368
●	20.5. Le rapport Signal sur Bruit	368
●	20.5.1. Puissance disponible de signal d'une source	368
●	20.5.2. Puissance disponible de bruit d'une source	369
●	20.5.3. Le rapport Signal sur Bruit d'une source	371
●	20.5.4. Rapport Signal sur Bruit à la sortie d'un montage	371
●	20.5.5. Gain en puissance disponible d'un montage	372
●	20.5.6. Facteur de bruit d'un montage à plusieurs étages	374
●	20.5.7. Mesure du facteur de bruit	376
	Exemple n° 51. Bruit d'un cascode	377
●	20.6. Facteur de bruit d'un changeur de fréquence	382
●	20.6.1. Définition	382
●	20.6.2. Le changement de fréquence par multiplication	383
●	20.6.3. Changement de fréquence par mélangeur équilibré	384
●	20.6.4. Changement de fréquence par échantillonnage	386
	Exemple n° 52. Echantillonnage d'un photo-courant	389
●	20.7. Facteur de bruit d'une ligne adaptée	403

● 20.8. Structure d'un récepteur.....	405
● 20.8.1. Le récepteur élémentaire	405
● 20.8.2. Le récepteur avec amplificateur d'antenne	406
● 20.8.3. Le récepteur avec deux amplificateurs	407
Exemple n° 53. Le problème de Monsieur Portenseigne	408
Exemple n° 54. Le RADAR et la guerre électronique	418
Exercices.....	427
21. Le bruit des transistors et des composants passifs	
21.1. Le bruit du transistor à jonctions.....	440
21.1.1. Sources de bruit et schéma équivalent de bruit du transistor à jonctions	440
21.1.2. Tension équivalente de bruit ramenée à l'entrée	442
21.1.3. Etude du bruit limite du transistor. Choix de la meilleure polarisation	443
● 21.1.4. Caractéristiques de bruit des transistors	446
21.1.5. Le bruit du base commune et l'amplification haute fréquence	449
21.2. Le bruit du transistor à effet de champs.....	449
21.2.1. Sources de bruit et schéma équivalent de bruit du transistor à effet de champs	449
21.2.1.1. Le bruit thermique dans le canal	449
21.2.1.2. Le bruit Flicker	450
21.2.1.3. Le bruit de génération-recombinaison des porteurs dans un transistor JFET	450
21.2.1.4. Le bruit grenaille dans la grille	451
21.2.1.5. Le bruit induit dans la grille	451
● 21.2.2. Générateurs de bruit équivalents	452
● 21.3. Le bruit des composants passifs. Polarisation faible bruit des amplificateurs	453
● 21.3.1. Le bruit en excès des résistances (excess noise)	453
Exemple n° 55. Bruit en excès d'une résistance	454
● 21.3.2. Le bruit des condensateurs	455
● 21.3.3. Influence de l'avalanche sur le bruit des transistors et des circuits intégrés	456
● 21.3.4. Polarisation faible bruit des transistors	457
Exercices.....	457
22. Annexes	
22.1. Propriétés de la transformée de Fourier.....	459
22.1.1. Linéarité	459
22.1.2. Parité	459
22.1.3. Similitude	459
22.1.4. Théorèmes du retard	459
22.1.5. Dérivées	459
22.1.6. Table de transformées de Fourier	460
22.2. Loi Normale de Gauss.....	472
22.2.1. La loi normale réduite	472
22.2.2. La fonction de Gauss intégrale	472
22.2.3. La fonction de Gauss intégrale complémentaire	472
22.2.4. Table des fonctions de Gauss intégrales	473

19 777 / 778: الحد رقم القارئ