

**Signaux aléatoires :  
Modélisation, Estimation, Détection**

*sous la direction de :*  
Michel GUGLIELMI

Mai 2004

## Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	11
Michel GUGLIELMI	
<b>PREMIÈRE PARTIE. THÉORIE DE L'INFORMATION</b> . . . . .	15
<b>Chapitre 1. Théorie de l'information</b> . . . . .	17
Geneviève JOURDAIN	
1.1. Préambule . . . . .	17
1.2. Quantité d'information, entropie, et codage (entropique) de sources . .	20
1.2.1. Définitions de base pour une source discrète . . . . .	20
1.2.1.1. Définition de la quantité d'information . . . . .	20
1.2.1.2. Sources discrètes et entropie . . . . .	20
1.2.2. Quelques éléments sur le codage (entropique) de source. Premier théorème de Shannon . . . . .	23
1.2.2.1. Propriétés et qualités des codeurs (entropiques) . . . . .	23
1.2.2.2. Théorème de codage de source et premier théorème de Shan- non . . . . .	24
1.3. Mesure de l'information pour les sources continues. Entropie différen- tielle . . . . .	25
1.3.1. Entropie de lois continues . . . . .	25
1.3.2. Lois à deux variables et transinformation. Lois à $n$ dimensions . .	26
1.4. Transmission sur un canal bruité . . . . .	27
1.4.1. Les différents modèles de canaux . . . . .	27
1.4.2. Capacité d'un canal discret sans mémoire. Codage canal. Second théorème de Shannon . . . . .	29
1.4.2.1. Capacité d'un canal discret et sans mémoire et exemples . .	29
1.4.2.2. Réception en sortie de canal bruité. Performance et règles du maximum <i>a posteriori</i> et du maximum de vraisemblance	31
1.4.2.3. Nécessité du codage canal . . . . .	32

1.4.2.4. Second théorème de Shannon ou théorème fondamental . . .	34
1.4.3. Capacité du canal continu à bruit additif. Formule de Hartley-Tuller-Shannon . . . . .	35
1.4.3.1. Capacité du canal avec bruit additif gaussien (BAG) . . . . .	35
1.4.3.2. Extension à $n$ dimensions . . . . .	36
1.4.3.3. Applications . . . . .	37
1.4.3.4. Efficacité spectrale et efficacité de puissance . . . . .	38
1.4.3.5. Théorème fondamental dans le cas continu . . . . .	38
1.5. Extensions . . . . .	40
1.6. Conclusion . . . . .	42
1.7. Bibliographie . . . . .	42
<b>DEUXIÈME PARTIE. MODÉLISATION</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>Chapitre 2. Transformation linéaire</b> . . . . .	<b>47</b>
Michel GUGLIELMI	
2.1. Introduction . . . . .	47
2.2. Définitions . . . . .	48
2.3. Représentation entrée/sortie $\Leftrightarrow$ modèle d'état . . . . .	52
2.4. Autocorrélation et densité spectrale du processus de sortie . . . . .	53
2.4.1. Représentation entrée-sortie . . . . .	53
2.4.2. Représentation d'état . . . . .	54
2.4.3. Exemple . . . . .	56
2.5. Densité spectrale de la sortie et système à phase minimale . . . . .	57
2.6. Factorisation spectrale d'une densité . . . . .	58
2.6.1. Détermination du filtre formeur . . . . .	59
2.7. Filtrage adapté . . . . .	62
2.8. Conclusion . . . . .	65
2.9. Bibliographie . . . . .	65
<b>Chapitre 3. Modèles monovariés linéaires et non linéaires</b> . . . . .	<b>67</b>
Michel GUGLIELMI et Gérard FAVIER	
3.1. Introduction . . . . .	67
3.2. Modèle à moyenne ajustée (MA) . . . . .	68
3.2.1. Propriétés du processus de sortie . . . . .	68
3.2.1.1. Espérance mathématique . . . . .	68
3.2.1.2. Moments d'ordre deux . . . . .	69
3.2.1.3. Densité spectrale . . . . .	70
3.2.2. Exemple . . . . .	70
3.3. Modèle autorégressif (AR) . . . . .	71
3.3.1. Propriétés du processus de sortie . . . . .	72
3.3.1.1. Espérance mathématique . . . . .	72
3.3.1.2. Moments d'ordre deux : autocorrélation et variance . . . . .	72

3.3.1.3. Densité spectrale . . . . .	73
3.3.2. Exemple . . . . .	73
3.4. Modèle autorégressif à moyenne ajustée (ARMA) . . . . .	76
3.4.1. Propriétés du processus de sortie . . . . .	77
3.4.1.1. Espérance mathématique . . . . .	77
3.4.1.2. Moments d'ordre deux : autocorrélation et variance . . . . .	77
3.4.1.3. Densité spectrale . . . . .	78
3.4.2. Exemple . . . . .	78
3.5. Modélisation d'état . . . . .	80
3.5.1. Propriétés de l'état et de la sortie . . . . .	80
3.5.1.1. Espérance mathématique . . . . .	80
3.5.2. Moments d'ordre deux . . . . .	81
3.6. Modélisation du signal harmonique . . . . .	82
3.7. Modèles de signaux non linéaires . . . . .	84
3.7.1. Propriétés . . . . .	86
3.7.2. Représentation opératoirelle . . . . .	87
3.7.3. Réduction de la complexité . . . . .	88
3.7.4. Modèles de Wiener et de Hammerstein . . . . .	88
3.7.5. Représentation vectorielle . . . . .	90
3.7.6. Exemple . . . . .	91
3.8. Conclusion . . . . .	92
3.9. Bibliographie . . . . .	92
<b>Chapitre 4. Modèles de signaux à longue dépendance statistique . . . . .</b>	<b>95</b>
François CHAPEAU-BLONDEAU et Michel GUGLIELMI	
4.1. Introduction . . . . .	95
4.2. Les modèles standard de la longue dépendance . . . . .	97
4.2.1. Mouvement brownien fractionnaire, bruit gaussien fractionnaire . . . . .	97
4.2.2. Intégration fractionnaire, dérivation fractionnaire . . . . .	99
4.3. Dynamique (max, +) pour la longue dépendance . . . . .	101
4.3.1. Le modèle de base . . . . .	101
4.3.2. Analyse théorique . . . . .	103
4.3.3. Simulation numérique . . . . .	105
4.3.4. Evolution du modèle . . . . .	107
4.3.5. D'autres évolutions . . . . .	111
4.4. Systèmes d'ordre non entier . . . . .	114
4.4.1. Intégrateur d'ordre non entier . . . . .	114
4.4.2. Processus stochastique défini par un intégrateur d'ordre $d$ . . . . .	115
4.4.2.1. Définition . . . . .	115
4.4.2.2. Propriétés . . . . .	116
4.4.3. Synthèse . . . . .	120
4.4.3.1. Troncature . . . . .	121

4.4.4. Processus fractionnel autoregressive integrative moving average (FARIMA) . . . . .	123
4.4.4.1. Définition . . . . .	123
4.4.4.2. Propriétés . . . . .	123
4.5. Conclusion . . . . .	125
4.6. Bibliographie . . . . .	125
<b>Chapitre 5. Systèmes linéaires multivariables</b> . . . . .	129
François DESBOUVRIES	
5.1. Introduction . . . . .	129
5.2. Matrices polynomiales et rationnelles . . . . .	131
5.2.1. Motivation et difficultés . . . . .	131
5.2.2. Matrices polynomiales . . . . .	133
5.2.3. Matrices rationnelles . . . . .	137
5.2.3.1. Factorisation de Smith-McMillan . . . . .	137
5.2.3.2. Factorisations polynomiales . . . . .	139
5.2.3.3. Autres résultats polynomiaux . . . . .	143
5.2.4. Structure des sous-espaces vectoriels rationnels . . . . .	144
5.2.4.1. Sous-espaces vectoriels rationnels (ser) . . . . .	144
5.2.4.2. Bases polynomiales minimales . . . . .	145
5.3. Identification aveugle de fonctions de transferts . . . . .	147
5.3.1. Introduction . . . . .	147
5.3.2. La méthode sous-espace . . . . .	148
5.3.2.1. Le cas SIMO . . . . .	148
5.3.2.2. Méthode sous-espace et sous-espaces vectoriels rationnels . . . . .	151
5.3.2.3. Extension au cas MIMO . . . . .	152
5.4. Bibliographie commentée . . . . .	154
5.5. Bibliographie . . . . .	154
<b>Chapitre 6. Introduction à la théorie de l'estimation</b> . . . . .	159
Gérard ALENGRIN et André FERRARI	
6.1. Introduction au problème de l'estimation de paramètres . . . . .	159
6.1.1. Exemples d'estimateurs . . . . .	160
6.2. Estimation de paramètres déterministes . . . . .	161
6.2.1. Propriétés des estimateurs . . . . .	161
6.2.1.1. Biais d'un estimateur . . . . .	161
6.2.1.2. Critère du minimum variance . . . . .	162
6.2.2. Borne inférieure de Cramèr-Rao . . . . .	164
6.2.3. Statistique suffisante . . . . .	171
6.2.4. Estimation par la méthode du maximum de vraisemblance . . . . .	183
6.2.4.1. Propriétés de l'estimateur du maximum de vraisemblance . . . . .	184
6.2.4.2. Détermination numérique du maximum de vraisemblance . . . . .	190
6.2.4.3. Méthode de Newton Raphson . . . . .	190

6.2.4.4. Algorithme EM . . . . .	191
6.2.5. Méthode des moments . . . . .	192
6.2.6. Meilleur estimateur linéaire non biaisé (MELNB) . . . . .	194
6.2.7. Méthode des moindres carrés . . . . .	198
6.3. Estimation de paramètres aléatoires . . . . .	200
6.3.1. Estimation bayésienne . . . . .	200
6.3.1.1. Estimateur au minimum de variance . . . . .	201
6.3.2. Estimateurs bayésiens en général . . . . .	206
6.4. Estimateurs bayésiens à erreur quadratique minimum linéaires . . . . .	209
6.5. Filtre de Kalman . . . . .	211
6.5.1. Modélisation . . . . .	211
6.5.2. Equations du filtre . . . . .	214
6.5.3. Filtre de Kalman appliqué au suivi d'une trajectoire rectiligne bruitée . . . . .	216
6.6. Bibliographie . . . . .	217
<b>Chapitre 7. Estimation paramétrique de modèles entrée-sortie</b> . . . . .	219
Gérard FAVIER	
7.1. Introduction . . . . .	219
7.2. Estimation au sens de l'erreur quadratique moyenne minimale . . . . .	221
7.2.1. Présentation de l'estimateur EQM . . . . .	221
7.2.2. Principe d'orthogonalité . . . . .	224
7.2.3. Valeur minimale du critère $J_{EQM}$ . . . . .	225
7.2.4. Condition d'inversibilité de la matrice d'autocorrélation du vec- teur de régression . . . . .	225
7.2.5. Identification de systèmes non linéaires . . . . .	226
7.2.6. Cas d'un modèle de Volterra linéaire-quadratique . . . . .	227
7.2.6.1. Equations de l'estimateur EQM . . . . .	227
7.2.6.2. Conditions de découplage et équations découplées . . . . .	230
7.2.6.3. Etude de quelques entrées types . . . . .	233
7.2.7. Exemples d'application . . . . .	238
7.2.7.1. Modélisation et identification de systèmes linéaires-quadra- tiques . . . . .	238
7.2.7.2. Prédiction linéaire-quadratique à $p$ pas d'un signal . . . . .	242
7.2.7.3. Annulation de bruit . . . . .	245
7.2.8. Exemple numérique . . . . .	247
7.2.8.1. Cas d'un signal d'entrée gaussien . . . . .	247
7.2.8.2. Cas d'un signal d'entrée de type <i>PAM</i> à deux niveaux ( $\pm 1$ ) . . . . .	249
7.2.8.3. Cas d'un signal d'entrée de type <i>PAM</i> à quatre niveaux ( $\pm 1$ et $\pm 2$ ) . . . . .	250
7.2.9. Versions simplifiées de la solution de Wiener . . . . .	250
7.2.9.1. Méthode orthogonale d'identification . . . . .	251

7.2.9.2. Méthode d'optimisation approchée basée sur l'algorithme du gradient . . . . .	254
7.3. Estimation au sens des moindres carrés (MC) . . . . .	258
7.3.1. Présentation de l'estimateur des moindres carrés . . . . .	258
7.3.2. Comparaison des solutions EQMM et MC . . . . .	259
7.3.3. Conditions d'unicité et de convergence de la solution MC . . . . .	260
7.3.4. Interprétation de la solution MC et principe d'orthogonalité . . . . .	261
7.3.5. Valeur minimale du critère $J_{MC}$ . . . . .	262
7.3.6. Versions améliorées de la solution des moindres carrés . . . . .	263
7.3.6.1. Méthode des moindres carrés orthogonaux . . . . .	263
7.3.6.2. Méthode des moindres carrés récursive vis-à-vis du temps . . . . .	266
7.3.6.3. Méthode des moindres carrés récursive vis-à-vis de la mémoire du modèle . . . . .	270
7.4. Estimation adaptative . . . . .	273
7.4.1. Algorithme <b>least mean square</b> (LMS) . . . . .	273
7.4.1.1. Cas linéaire-quadratique . . . . .	275
7.4.1.2. Analyse du comportement en moyenne des coefficients estimés du filtre adaptatif et condition de convergence . . . . .	277
7.4.2. Algorithmes <b>least mean square</b> (LMS) simplifiés . . . . .	279
7.4.2.1. Algorithme du signe . . . . .	279
7.4.2.2. Algorithme avec signe du vecteur d'entrée . . . . .	279
7.4.2.3. Algorithme avec double signe . . . . .	279
7.4.3. Algorithme <b>least mean square</b> (LMS) normalisé . . . . .	280
7.4.4. Algorithme des moindres carrés récursifs avec facteur d'oubli . . . . .	282
7.4.4.1. Comportement asymptotique de l'algorithme MCRFO . . . . .	284
7.5. Estimation paramétrique par ajustement de cumulants . . . . .	285
7.5.1. Cas supervisé . . . . .	286
7.5.1.1. Cas d'une entrée gaussienne . . . . .	290
7.5.1.2. Estimation paramétrique dans le domaine fréquentiel pour une entrée gaussienne . . . . .	292
7.5.2. Cas aveugle . . . . .	294
7.5.2.1. Relations fondamentales . . . . .	296
7.5.2.2. Cas d'une entrée DII non gaussienne . . . . .	300
7.5.2.3. Cas des processus à moyenne ajustée (MA) . . . . .	301
7.5.2.4. Relations fondamentales liant deux cumulants d'ordres différents . . . . .	301
7.5.2.5. Estimation des paramètres d'un modèle autorégressif (AR) . . . . .	304
7.5.2.6. Estimation des paramètres AR d'un modèle ARMA . . . . .	306
7.5.2.7. Estimation des paramètres MA . . . . .	308
7.5.2.8. Estimation des paramètres d'un modèle autorégressif à moyenne ajustée . . . . .	314
7.6. Conclusion . . . . .	316
7.7. <i>Annexe</i> . . . . .	316

7.7.1. Méthode de Newton-Raphson . . . . .	318
7.7.2. Méthode du gradient (ou méthode de descente avec la plus grande pente) . . . . .	319
7.8. Bibliographie . . . . .	319
<b>TROISIÈME PARTIE. DÉTECTION-DÉCISION</b> . . . . .	<b>325</b>
<b>Chapitre 8. Introduction à la théorie de la détection</b> . . . . .	<b>327</b>
Olivier MICHEL, Alfred O. HERO et André FERRARI	
8.1. Contexte, définitions . . . . .	327
8.2. Formulation générale du problème de test d'hypothèse binaire . . . . .	328
8.3. Approches bayésiennes, hypothèses simples . . . . .	331
8.3.1. Règle de Bayes et règle du maximum <b>a posteriori</b> (MAP) . . . . .	331
8.3.2. Stratégie de Bayes, notion de coût . . . . .	333
8.3.3. Le détecteur minimax de Bayes . . . . .	336
8.3.4. Test à hypothèses multiples . . . . .	338
8.4. L'approche de Neyman Pearson (NP) . . . . .	341
8.5. Tests de rapport de vraisemblance (LRT) . . . . .	342
8.5.1. Observations multiples : interprétation du LRT . . . . .	343
8.5.2. Courbes CORE . . . . .	344
8.5.3. Evaluation de la possibilité de détection d'un signal . . . . .	348
8.6. Test d'hypothèses composées . . . . .	351
8.6.1. Stratégie bayésienne pour le test d'hypothèses composées . . . . .	352
8.6.2. Test uniformément plus puissant (UMP) : définition et existence . . . . .	354
8.6.3. Stratégie de détection dans le cas d'hypothèses composées . . . . .	358
8.6.3.1. Test unilatéral, localement le plus puissant . . . . .	358
8.6.3.2. Test bilatéral, localement le plus puissant . . . . .	359
8.6.3.3. Test minimax-Neyman Pearson . . . . .	361
8.6.4. Méthode du rapport de vraisemblance généralisé (GLRT) . . . . .	362
8.6.4.1. Comportement asymptotique du GLRT quand $N \rightarrow \infty$ . . . . .	363
8.7. Annexe . . . . .	364
8.8. Bibliographie . . . . .	365
<b>Index</b> . . . . .	<b>367</b>

## Chapitre 4

# Modèles de signaux à longue dépendance statistique

### 4.1. Introduction

L'analyse structurelle de la corrélation des signaux aléatoires peut servir à faire une typologie de ces signaux. Pour un processus stochastique  $X(t) \in \mathfrak{R}$ , stationnaire (au moins au deuxième ordre), la fonction d'autocorrélation  $\phi_{XX}(\tau) = E\{X(t)X(t + \tau)\}$  ne dépend que du décalage temporel  $\tau$  et tend aux longs décalages  $|\tau|$  vers l'espérance carrée  $E\{X(t)\}^2$ . Qualitativement, le comportement asymptotique de cette fonction d'autocorrélation quand  $|\tau| \rightarrow \infty$  permet de regrouper les processus en trois classes selon les divers types de convergence :

– signaux à corrélation finie : la fonction d'autocorrélation est nulle pour  $|\tau| \geq m$ . Dans le cas où  $m = 1$ , ce qui correspond à  $\phi_{XX}(\tau)$  égale à un dirac, le processus aléatoire  $X(t)$  ne contient pas de corrélation. Ce type de structure, qui est celle du bruit blanc, est un bon modèle pour de nombreux signaux pour lesquels les phénomènes générateurs possèdent des temps de relaxation, ou d'évolution, ou d'agitation, très brefs (et donc non résolus par la modélisation) devant les constantes de temps des systèmes avec lesquels interagit le signal  $X(t)$  modélisé. C'est souvent le cas des bruits générés par des phénomènes d'agitation thermique, en interaction avec les systèmes électroniques usuels. Lorsque  $m > 1$ , le processus  $X(t)$  admet une corrélation limitée : c'est le cas des processus stochastiques engendrés par des modèles  $MA(m)$  (voir chapitre précédent) ;

---

Chapitre rédigé par François CHAPEAU-BLONDEAU et Michel GUGLIELMI.

#### 4.5. Conclusion

Ce chapitre étend le cadre de l'approche système délibérément choisie dans cet ouvrage. Les modèles présentés font partie de ceux utiles pour caractériser des signaux dont les propriétés sortent du cadre classique. Ils appartiennent à la classe des systèmes linéaires et de faible complexité apparente. Cependant, celle-ci est en fait *cachée* et l'analyse des performances de ces modèles ne peut être menée qu'à l'aide de nouveaux outils mathématiques. Enfin, la synthèse des signaux qui en sont issus nécessite quelquefois des procédures de troncatures aboutissant alors à une perte de l'exactitude des propriétés théoriques. Dès lors, la validation de ces synthèses reste encore une question posée pour chacune des modélisations proposées [GUG 01a, GUG 02].

#### 4.6. Bibliographie

- [ABR 98] ABRY P., VEITCH D., FLANDRIN P., « Long-range dependence : Revisiting aggregation with wavelets », *Journal of Time Series Analysis*, vol. 19, p. 253-266, 1998.
- [ABR 02a] ABRY P., BARANIUK R., FLANDRIN P., RIEDI R., VEITCH D., « Multiscale nature of network traffic », *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 19, n°3, p. 28-46, 2002.
- [ABR 02b] ABRY P., GONÇALVÈS P., LEVY-VÉHEL J., *Traité IC2, Lois d'échelles, fractales et ondelettes*, Hermès, Paris, 2002.
- [ADL 98] ADLER R. J., FELDMAN R. E., TAQQU M. S., *A Practical Guide to Heavy Tails : Statistical Techniques and Applications*, Birkhäuser, Boston, 1998.
- [AMI 94] AMIT M., SHMERLER Y., EISENBERG E., ABRAHAM M., SHNERB N., « Language and codification dependence of long-range correlation in texts », *Fractals*, vol. 2, p. 7-13, 1994.
- [BAR 66] BARNES J. A., ALLAN D. W., « A statistical model of flicker noise », *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, p. 176-178, 1966.
- [BER 92] BERAN J., « Statistical methods for data with long-range dependence », *Statistical Science*, vol. 7, p. 404-427, 1992.
- [BER 94] BERAN J., *Statistics for Long-Memory Processes*, Chapman & Hall, New York, 1994.
- [BER 95] BERAN J., SHERMAN R., TAQQU M. S., WILLINGER W., « Long-range dependence in variable-bit-rate video traffic », *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, p. 1566-1579, 1995.
- [BOX 70] BOX G. E. P., JENKINS G. M., *Time Series Analysis : Forecasting and Control*, Holden Day, San Francisco, 1970.
- [CAP 02] CAPPÉ O., MOULINES E., PESQUET J. C., PETROPULU A., YANG X., « Long-range dependence and heavy-tail modeling for teletraffic data », *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 19, n°3, p. 14-27, 2002.
- [CHA 98] CHAPEAU-BLONDEAU F., « (max, +) dynamic systems for modeling traffic with long-range dependence », *Fractals*, vol. 6, p. 305-311, 1998.

- [CHA 99] CHAPEAU-BLONDEAU F., GAZENGEL E., « Dynamique (max, +) pour la génération en ligne de bruit en  $1/f^\alpha$  », *Actes du 17<sup>me</sup> Colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images*, Vannes, France, p. 7-10, Septembre 1999.
- [CHA 01a] CHAPEAU-BLONDEAU F., MONIR A., « Generation of signals with long-range correlation », *Electronics Letters*, vol. 37, p. 599-600, 2001.
- [CHA 01b] CHAPEAU-BLONDEAU F., MONIR A., « A model of random signal with long-range correlations », *Proceedings 2nd International Symposium on Physics in Signal and Image Processing*, Marseille, France, p. 381-384, Janvier 2001.
- [CHA 02] CHAPEAU-BLONDEAU F., MONIR A., « Numerical evaluation of the Lambert W function and application to generation of generalized Gaussian noise with exponent 1/2 », *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, p. 2160-2165, 2002.
- [EBE 94] EBELING W., PÖSCHEL T., « Entropy and long-range correlations in literary English », *Europhysics Letters*, vol. 26, p. 241-245, 1994.
- [FEL 71] FELLER W., *An Introduction to Probability Theory and Its Applications : Vol I*, Wiley, New York, 1971.
- [FLA 92] FLANDRIN P., « Wavelet analysis and synthesis of fractional Brownian motion », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 38, p. 910-917, 1992.
- [GAU 95] GAUBERT S., « Performance evaluation of (max, +) automata », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, p. 2014-2025, 1995.
- [GRA 80] GRANGER C. W. J., JOYEUX R., « An introduction to long-memory time series models and fractional differencing », *Journal of Time Series Analysis*, vol. 1, p. 15-29, 1980.
- [GRA 94] GRADSTHEYN I. S., RYSHIK I., *Table of integrals, Series, and Products : Fifth Edition*, Academic Press, New York, 1994.
- [GRA 96] GRANGER C. W. J., DINGH Z., « Varieties of long memory models », *Journal of Econometrics*, vol. 73, p. 61-77, 1996.
- [GUG 01a] GUGLIELMI M., « Synthèse de signaux en  $1/f$  avec contrôle de la précision spectrale », *Actes du 18<sup>me</sup> Colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images*, Toulouse, France, septembre 2001.
- [GUG 01b] GUGLIELMI M., NORET E., « Une classe de systèmes auto-similaires et à mémoire longue », *Techniques et science Informatique*, vol. 9, p. 1153-1172, 2001.
- [GUG 02] GUGLIELMI M., « Approximation optimale d'un transfert non entier par un réseau de cellules », *CIFA*, Nantes, France, juillet 2002.
- [HEA 98] HEATH D., RESNICK S., SAMORODNITSKY G., « Heavy tails and long range dependence in on/off processes and associated fluid models », *Mathematics of Operations Research*, vol. 23, p. 145-165, 1998.
- [HOS 81] HOSKING J. R. M., « Fractional differencing », *Biometrika*, vol. 68, p. 165-176, 1981.
- [JEN 96] JENNANE R., HARBA R., JACQUET G., « Estimation de la qualité des méthodes de synthèse du mouvement brownien fractionnaire », *Tr. du Signal*, vol. 13, p. 289-302, 1996.

- [JUM 99] JUMARIE G., « A new approach to fractional Brownian motion of order  $n$  via random walk in the complex plane », *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 10, p. 1193-1212, 1999.
- [KOK 97] KOKOL P., BREST J., ZUMER V., « Long-range correlations in computer programs », *Cybernetics and Systems : An International Journal*, vol. 28, p. 43-57, 1997.
- [LEB 72] LEBEDEV N. N., *Special functions and their Applications*, Dover Publications, New-York, 1972.
- [LEL 77] LELONG-FERRAND J., ARNAUDIÈS J., *Cours de mathématiques : Analyse*, Dunod Université, Paris, 1977.
- [LEL 94] LELAND W. E., TAQQU M. S., WILLINGER W., WILSON D. V., « On the self-similar nature of Ethernet traffic », *IEEE ACM Transactions on Networking*, vol. 2, p. 1-15, 1994.
- [LEM 90] LE MÉHAUTÉ A., *Les Géométries Fractales*, Hermès, Paris, 1990.
- [LI 94] LI W., MARR T. G., KANEKO K., « Understanding long-range correlations in DNA sequences », *Physica D*, vol. 75, p. 392-416, 1994.
- [LOW 92] LOWEN S. B., TEICH M. C., « Auditory-nerve action potentials form a non-renewal point process over short as well as long time scales », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, p. 803-806, 1992.
- [MAG 96] MAGRÉ O., Mouvement brownien fractionnaire : Contribution à la modélisation, à la synthèse et à l'analyse, PhD thesis, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 1996.
- [MAG 97] MAGRÉ O., GUGLIELMI M., « Modelling and analysis of fractional Brownian motions », *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 8, p. 377-388, 1997.
- [MAN 68] MANDELBROT B. B., VAN NESS J., « Fractional Brownian motions, fractional noises and applications », *SIAM Review*, vol. 10, p. 422-437, 1968.
- [MEN 00] MENGUY E., BOIMOND J. L., HARDOUIN L., FERRIER J. L., « A first step towards adaptive control for linear systems in max algebra », *Journal of Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 10, p. 347-367, 2000.
- [NOV 98] NOVAK M. M., « Correlations in computer programs », *Fractals*, vol. 6, p. 131-138, 1998.
- [OLD 74] OLDHAM K. B., SPANIER J., *The fractional calculus*, Academic Press, Londres, 1974.
- [OUS 95] OUSTALOUP A., *La Dérivation Non Entière*, Hermès, Paris, 1995.
- [PEI 88] PEITGEN H. O., SAUPE D., *The Science of Fractal Images*, Springer, Berlin, 1988.
- [PER 01] PERRIN E., HARBA R., BERZIN-JOSEPH C., IRIBARREN I., BONAMI A., «  $n$ th-order fractional Brownian motion and fractional Gaussian noises », *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, p. 1049-1050, 2001.
- [SCH 93] SCHENKEL A., ZHANG J., ZHANG Y. C., « Long range correlation in human writings », *Fractals*, vol. 1, p. 47-57, 1993.
- [TEI 97] TEICH M. C., HENEGHAN C., LOWEN S. B., OZAKI T., KAPLAN E., « Fractal character of the neural spike train in the visual system of the cat », *Journal of the Optical*

*Society of America A*, vol. 14, p. 529-546, 1997.

[WIL 95] WILLINGER W., TAQQU M. S., LELAND W. E., WILSON D. V., « Self-similarity in high-speed packet traffic : Analysis and modeling of Ethernet traffic measurements », *Statistical Science*, vol. 10, p. 67-85, 1995.

[WOR 96] WORNELL G., *Signal Processing with Fractals*, Prentice Hall, New York, 1996.

[ZEB 98] ZEBENDE G. F., DE OLIVEIRA P. M. C., PENNA T. J. P., « Long-range correlations in computer diskettes », *Physical Review E*, vol. 57, p. 3311-3314, 1998.