

J. Max

et collaborateurs

**Méthodes et
techniques de
traitement du signal
et applications
aux mesures
physiques**

3^e édition

1

Préfaces de L. NÉEL et M. CORDELLE

MASSON 

TN911.7
M2
T.1
E3
T.1

8261481

MÉTHODES ET TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU SIGNAL ET APPLICATIONS AUX MESURES PHYSIQUES

TOME I

PRINCIPES GÉNÉRAUX
ET MÉTHODES CLASSIQUES

par

J. MAX

Licencié ès Sciences
Ingénieur E.S.E.



avec la collaboration de

L. AUDAIRE, D. BERTHIER, R. BIGRET
J.-C. CARRÉ, H. CHEVALIER, B. ESCUDIÉ
A. HELLION, J.-L. LACOUME, M. MARTIN, R. MIQUEL
Ph. PELTIÉ, M. TROTTOT, R. VERGNE

Préfaces de I. NÉE et M. CORDELL



E8261481

TROISIÈME ÉDITION

revue et augmentée

MASSON

Paris New York Barcelone Milan Mexico Rio de Janeiro
1981

ONT COLLABORÉ A CET OUVRAGE

Jacques MAX

Adjoint Scientifique au Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique —
Commissariat à l'Energie Atomique — Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE.

Luc AUDAIRE,	Ingénieur au C.E.A. — C.E.N.G. — L.E.T.I.
Daniel BERTHIER,	Ingénieur à la Société HEWLETT-PACKARD.
Roland BIGRET,	Ingénieur à la Société ALSTHOM-ATLANTIQUE.
Jean-Claude CARRÉ,	Ingénieur au C.E.A. CEN/Saclay — D.E.M.T.
Henri CHEVALIER,	Ingénieur au C.E.A. — C.E.N.G. — L.E.T.I.
Bernard ESCUDIÉ,	Professeur à l'Institut de Chimie et de Physique Industrielles de Lyon.
Alain HELLION,	Ingénieur à la Société METRAVIB.
Jean-Louis LACOUME,	Professeur à l'Université de Grenoble.
Michel MARTIN,	Ingénieur au C.E.A. — C.E.N.G. — L.E.T.I.
Robert MIQUEL,	Ingénieur à la Société TEKELEC.
Philippe PELTIÉ,	Ingénieur au C.E.A. — C.E.N.G. — L.E.T.I.
Michel TROTTOT,	Technicien principal au C.E.A. — C.E.N.G. — L.E.T.I.
Robert VERGNE,	Maître de recherche au C.N.R.S.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés
réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que se soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© Masson, Paris, 1972, 1981

ISBN : 2-225-65670-3

MASSON S.A.	120, bd Saint-Germain, 75280 Paris Cedex 06
MASSON PUBLISHING U.S.A. Inc.	14 East 60th Street, New York, N.Y. 10022
TORAY-MASSON S.A.	Balmes 151, Barcelona 8
MASSON ITALIA EDITORI S.p.A.	Via Giovanni Pascoli 55, 20133 Milano
MASSON EDITORES	Dakota 383 Colonia Napoles, Mexico 18DF
EDITORIA MASSON DO BRASIL L.T.D.A.	Rua da Quitanda, 20/S. 301, Rio de Janeiro, R.J.

MÉTHODES ET TECHNIQUES DE
TRAITEMENT DU SIGNAL
ET APPLICATIONS AUX MESURES PHYSIQUES

TOME I



CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Dans la Collection Technique et Scientifique des Télécommunications :

- FONCTIONS ALÉATOIRES, par A. BLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO. 1980, 444 pages, 10 figures.
- TRAITEMENT NUMÉRIQUE DU SIGNAL. Théorie et pratique, par M. BELLANGER. 1980, 304 pages, 197 figures.
- LES FILTRES NUMÉRIQUES. Analyse et synthèse des filtres unidimensionnels, par R. BOITE et H. LEICH. 1980, 432 pages, nombreuses figures.
- DÉCISIONS EN TRAITEMENT DU SIGNAL, par P.-Y. ARQUES. 1979, 272 pages, 73 figures.
- LES RÉSEAUX PENSANTS. Télécommunications et société, sous la dir. de A. GIRAUD, J.-L. MISSIKA, D. WOLTON. 1978, 296 pages, 5 figures.

Autres ouvrages :

- LES MÉTHODES RAPIDES DE TRANSFORMATION DU SIGNAL : Fourier, Walsh, Hadamard, Haar, par J. LIFERMANN. 1979, 2^e édition de l'ouvrage « *Théorie et applications de la transformation de Fourier rapide* », 208 pages, 73 figures.
- SYSTÈMES LINÉAIRES. Variables d'état, par J. LIFERMANN. *Collection de mathématiques pour physiciens et ingénieurs : méthodes et applications*. 1972, 228 pages, 183 figures.
- INTRODUCTION A LA THÉORIE DE LA COMMUNICATION, par E. ROUBINE. *Mono-graphies d'électronique*.
- Tome I. — *Signaux non aléatoires*. 1979, 2^e édition, 238 pages, 63 figures.
- Tome II. — *Signaux aléatoires*. 1979, 2^e édition, 160 pages, 31 figures.
- Tome III. — *Théorie de l'information*. 1970, 160 pages, 33 figures.
- THÉORIE ET TECHNIQUE DE LA TRANSMISSION DES DONNÉES, par J. CLAVIER, M. NIQUIL, G. COFFINET, F. BEHR. *Collection de l'ENSTA*.
- Tome 1. — *Notions fondamentales*. 1979, 2^e édition revue (2^e tirage), 320 pages, 76 figures.
- Tome 2. — *Systèmes de télé-informatique*. 1979, 2^e édition revue (2^e tirage), 216 pages, 168 figures.
- BASES ÉLÉMENTAIRES DU TRAITEMENT DU SIGNAL A L'USAGE DES BIOLOGISTES ET DES MÉDECINS, par J. PERRIN, J. BROCAS et J. FONROGET. 1976, 112 pages, 52 figures.
- STRUCTURES ÉLÉMENTAIRES DES FILTRES ACTIFS, par J.-C. MARCHAIS. 1979, 132 pages, 112 figures.
- THÉORIE DE LA TRANSMISSION DE L'INFORMATION, par A.I. SPATARU.
- Volume 1. — *Signaux et bruits*. Traduit du roumain par G. BATTAIL. 1970, 686 pages, 416 figures, 9 tableaux.
- Volume 2. — *Codes et décisions statistiques*. Traduit du roumain par F. JUSTER. 1973, 564 pages, 198 figures, 39 tableaux.
- COURS DE MATHÉMATIQUES, par J. BASS.
- Tome I. Fascicule 1. — *Algèbre linéaire. Intégrales simples. Fonctions définies par des séries et des intégrales*. 1978, 5^e édition revue et augmentée, 448 pages, 97 figures.
- Tome I. Fascicule 2. — *Calcul différentiel. Intégrales multiples. Fonctions de variable complexe*. 1978, 5^e édition revue et augmentée, 384 pages, 199 figures.
- Tome II. — *Équations différentielles et aux dérivées partielles. Optimisation. Groupes de transformations. Méthodes numériques*. 1978, 5^e édition revue et augmentée, 480 pages, 104 figures.
- CALCULATRICES DE POCHE ET INFORMATIQUE. Fonctionnement et application, par P. VITRANT. 1980, 240 pages, nombreuses figures.

PRÉFACE DE LA 1^{re} ET DE LA 2^e ÉDITION

J'AI BEAUCOUP DE PLAISIR à présenter l'ouvrage de Jacques MAX sur Les principales méthodes et techniques de traitement du signal et leurs applications aux mesures physiques. L'auteur, Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité, est Chef de la Division « Traitement du Signal » du Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Informatique, dans le cadre du Centre d'Études Nucléaires de Grenoble : c'est dire sa parfaite compétence dans les sujets abordés.

Le domaine est à l'ordre du jour. Chercheurs et techniciens sont de plus en plus préoccupés de tirer de leurs mesures les plus nombreuses informations possibles. Mais les signaux qui les intéressent sont toujours plus ou moins noyés dans des bruits perturbateurs, de caractère aléatoire, et il importe de trouver des méthodes appropriées pour les distinguer. Et c'est ainsi que ces problèmes qui, à l'origine, concernaient exclusivement les spécialistes du repérage dans les Armées, puis les géophysiciens, tendent maintenant à intéresser l'ensemble des physiciens.

D'un autre côté, un certain nombre de phénomènes, comme la déformation plastique des matériaux ou l'hystérésis des corps ferromagnétiques, et spécialement l'effet Barkhausen, peuvent, souvent avec succès, être considérés comme des phénomènes aléatoires : l'intérêt des fonctions aléatoires est donc très grand.

La substance de cet ouvrage est le fruit de plusieurs années de travail d'une équipe du CEN-G, travail qui a abouti à de nombreuses réalisations industrielles mettant ainsi à la disposition des chercheurs et ingénieurs appartenant à de multiples domaines de nouveaux appareillages de mesure.

Cet ouvrage, largement inspiré des cours donnés par l'auteur dans plusieurs écoles d'ingénieurs, bénéficie en outre de l'apport des échanges qui ont lieu deux fois l'an à Grenoble, lors des séminaires du Groupe des Utilisateurs du Traitement du Signal.

L'auteur a rassemblé ici les connaissances nécessaires à ceux — et ils sont de plus en plus nombreux — qui ont à utiliser les moyens puissants offerts par les méthodes et techniques du Traitement du Signal. La présentation claire et simple de notions qui, bien que très importantes sont encore trop peu familières à beaucoup, rend cet ouvrage facile et agréable à lire : l'aspect physique pratique et l'aspect théorique sont toujours liés.

Les notions fondamentales sont introduites avec les seuls éléments mathématiques indispensables, le niveau mathématique élémentaire de l'ouvrage le met donc à la portée de chacun, étudiant, ingénieur, technicien, chercheur, quel que soit son domaine d'activité.

Trois chapitres ont été consacrés au filtrage adapté, à la fonction d'ambiguïté et au spectre instantané. Ce sont là, en effet, des méthodes plus élaborées qui verront leurs applications se développer très rapidement au fur et à

mesure des progrès technologiques, notamment des circuits intégrés à grande échelle, qui permettront dans un avenir proche la réalisation simple d'appareillages aux fonctions complexes.

Je suis donc persuadé que cet ouvrage rendra les plus grands services aux étudiants en informatique, aux chercheurs, aux ingénieurs, et leur ouvrira les portes d'un domaine où les chercheurs français se distinguent actuellement d'une manière particulière.

Remercions Jacques MAX d'avoir enrichi la littérature spécialisée, d'un ouvrage excellent et original.

LOUIS NÉEL

*Prix Nobel de Physique,
Membre de l'institut*

PRÉFACE DE LA 3^e ÉDITION

L'ouvrage de Jacques MAX sur Les principales méthodes et techniques de traitement du signal et leurs applications aux mesures physiques paru en 1971 est devenu un classique, sa réédition constitue un événement dans un domaine dont l'importance n'a fait que croître depuis huit ans. L'auteur a profondément remanié et surtout complété son œuvre afin de la mettre à jour des récents progrès des connaissances et des techniques. Dans ce but, il a élargi l'équipe qui a participé à sa rédaction en faisant appel à d'excellents spécialistes exerçant leur activité tant dans les entreprises privées que dans les laboratoires de recherche publics et parapublics.

Maintenant que le traitement du signal passe rapidement du stade qualitatif au stade quantitatif, il faut se réjouir des développements apportés par l'auteur, chaque fois que cela est nécessaire, au calcul des précisions même lorsque cela aboutit à des résultats inattendus et pourtant vérifiés par l'expérience. Notons en particulier le chapitre XIV consacré aux fenêtres de pondérations qui permet au lecteur de se faire des idées nettes sur un sujet important et peu traité jusqu'ici.

La dualité temps-fréquence qui est à la base du traitement du signal a été mise en relief et doit tout naturellement amener le lecteur à penser en temps et en fréquence.

Cette nouvelle édition fait une part non négligeable aux méthodes optiques de traitement du signal qui bénéficient des techniques nouvelles et en particulier des imageurs à cristaux liquides.

Il est heureux de voir apparaître un chapitre consacré aux analyseurs de spectres, très répandus actuellement, et qui sont différents des corrélateurs qui étaient seuls traités dans les précédentes éditions. Dans le même ordre d'idées, l'étude des vibrations qui constitue le principal domaine d'applications industrielles du traitement du signal, fait l'objet d'un nouveau chapitre.

Tous les remaniements apportés par cette nouvelle édition sont utiles et il faut remercier Jacques MAX de nous faire ainsi bénéficier des plus récentes données dans un secteur scientifique en rapide évolution.

MICHEL CORDELLE

Directeur du LETI
(Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Informatique
du Commissariat à l'Énergie Atomique)

AVANT-PROPOS

Cette troisième édition a presque doublé de volume par rapport à la première édition parue en 1972. Ceci traduit la place croissante du traitement du signal dans tous les domaines de la recherche comme de l'industrie.

Ces deux volumes veulent être avant tout un outil pour les ingénieurs et les chercheurs de toutes les disciplines scientifiques.

Pour cela nous avons adapté les apports théoriques à ce qui est nécessaire pour la compréhension de l'ouvrage et également pour permettre au lecteur de dépasser le cadre de ce modeste ouvrage, car en traitement du signal il faut sans cesse aller de l'avant, créer, inventer, à condition de pouvoir, à chaque pas, connaître les limites du nouvel outil.

Chaque fois que le développement d'un sujet n'est pas directement nécessaire au traitement du signal et peut être puisé dans d'autres ouvrages, nous n'avons fait qu'un bref rappel, orienté sur l'aspect physique du sujet. Ceci est le cas des chapitres 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11.

Le chapitre 7 a été développé car ce problème de l'échantillonnage est tout à fait fondamental, puisque si l'échantillonnage n'est pas réalisé correctement, le signal est irrémédiablement détérioré.

Dans les chapitres 9, 10, 12, on traite avec tout le détail nécessaire des erreurs qui interviennent en traitement du signal, et partant, de la précision que l'on peut escompter de l'emploi de telle ou telle méthode, et notamment de l'amélioration du rapport signal sur bruit qui est le but du traitement du signal.

Au chapitre 13 qui traite des différentes méthodes d'analyse spectrale, fait suite un chapitre consacré à l'étude des fenêtres de pondérations. Ce chapitre s'est avéré indispensable car la plupart des systèmes de traitement du signal comportent différentes fenêtres de pondération, au choix de l'utilisateur, il faut donc que l'utilisateur dispose de critères pour guider ce choix.

Le 2^e tome traite des dispositifs les plus usités du traitement du signal : les analyseurs multicanaux (chapitre 15), les détecteurs synchrones (chapitre 16), les filtres adaptés (chapitre 17), dont la réalisation est rendue aisée par les progrès technologiques. Les chapitres 18 et 19 traitent respectivement des différents types de corrélateur et d'analyseur de spectres. Il nous a paru indispensable d'introduire (chapitre 20) un bref exposé des méthodes optiques d'analyse spectrale.

Le chapitre 21 donne quelques exemples d'applications destinées à éveiller l'imagination du lecteur ! Car nous devons reconnaître que les exemples les plus couronnés de succès ne peuvent apparaître dans ce chapitre : ils sont hélas couverts par le secret militaire ou industriel ! (Par exemple : détections sous-marine ou aérienne, pilotage de chaînes de productions chimiques.)

Le chapitre 22 veut montrer l'importance du traitement du signal appliqué à l'étude des vibrations. Enfin, les trois derniers chapitres sont consacrés à des méthodes qui, bien que connues déjà depuis longtemps, n'ont pu voir le jour que récemment, grâce aux immenses progrès de la technologie et surtout des circuits intégrés LSI et VLSI.

La fonction d'ambiguïté, riche d'applications, le spectre instantané qui est pratiquement ce que l'on utilise le plus couramment en analyse spectrale et enfin les nouvelles méthodes d'analyse spectrale développées pour les cas, très fréquents, où la durée d'observation du signal est très brève (on parle alors de signaux oligoparadigmés ou de séries courtes).

Mais au moment où cet ouvrage va sortir de presse, nous regrettons déjà de n'avoir pu développer tel ou tel point, de ne pouvoir parler de telle ou telle méthode qui vient d'être découverte... ce sera pour un volume ultérieur.

TABLE DES MATIÈRES

(Contents : see p. XII)

Préface de la 1^{re} et de la 2^e édition par L. NÉEL	V
Préface de la 3^e édition par M. CORDELLE	VII
Avant-propos	XIII
Introduction	1
CHAPITRE PREMIER. — Notions physiques de phénomènes aléatoires — Bruits	5
CHAPITRE II. — Transformation de Fourier	9
II. 1. — Transformation de Fourier des fonctions périodiques	9
II. 2. — Transformation de Fourier des fonctions non périodiques	10
II. 3. — Cas des fonctions physiques	11
II. 4. — Signification physique de la transformation de Fourier	12
II. 5. — Conditions d'existence de la transformation de Fourier	13
II. 6. — Quelques propriétés de la transformée de Fourier	14
II. 7. — Quelques fonctions et leurs transformées de Fourier	21
II. 8. — Cas particulier des signaux réels	23
II. 9. — Fréquences négatives	24
II. 10. — Signal analytique	25
II. 11. — Pourquoi la transformation de Fourier	26
II. 12. — Réalité physique de la transformée de Fourier. Transformation de Fourier optique	26
II. 13. — Propriétés de la fonction $\frac{\sin x}{x}$	30
II. 14. — Fonction lambda (Λ)	31
CHAPITRE III. — Puissance, énergie des signaux	33
III. 1. — Puissance temporelle	33
III. 2. — Puissance fréquentielle, densité spectrale de puissance, spectre de puissance	36
III. 3. — Définition générale de la densité spectrale	38
III. 4. — Théorème de Parseval	39
III. 5. — Notation « produit scalaire », « norme »	39
CHAPITRE IV. — Transformation de Laplace	40
IV. 1. — Définition	40
IV. 2. — Relation entre transformée de Fourier et transformée de Laplace ..	41
CHAPITRE V. — Convolution	44
V. 1. — Définition	44
V. 2. — Équation de convolution	45
V. 3. — Remarques sur l'équation de convolution	46
V. 4. — Représentation physique de la convolution	47
V. 5. — Convolution et déconvolution	47
V. 6. — Convolution et transformation de Fourier. Théorème de Plancherel ..	49
V. 7. — Fonctions propres de l'opérateur convolution	49



CHAPITRE VI. — Filtrage	51
VI. 1. — Introduction	51
VI. 2. — Filtrage temporel	51
VI. 3. — Filtrage fréquentiel (« filtrage linéaire » au sens de Blanc-Lapierre)	53
VI. 4. — Relation filtrage-convolution	54
VI. 5. — Filtres de fréquences (ou filtres linéaires) physiquement réalisables	55
VI. 6. — Filtres parfaits	56
VI. 7. — Filtres analogiques continus réalisables	56
VI. 8. — Filtres à déphasage linéaire	56
VI. 9. — Filtre de fréquence (ou filtre à bande étroite)	57
VI. 10. — Extension de la notion de filtrage	58
CHAPITRE VII. — Echantillonnage	59
VII. 1. — Généralités	59
VII. 2. — Théorèmes d'échantillonnage	59
VII. 3. — Échantillonnage de signaux à durée limitée	66
VII. 4. — Échantillonnage des transformées de Fourier	68
VII. 5. — Cadence pratique d'échantillonnage	69
VII. 6. — Filtre antirepliement	75
VII. 7. — Échantillonnage physique, échantillonnage multiple	76
VII. 8. — Sous-échantillonnage, extension du théorème de Shannon	79
VII. 9. — Conclusions	83
CHAPITRE VIII. — Introduction physique à la notion de corrélation et à quelques autres notions de statistique	84
VIII. 1. — Recherche d'une « relation » entre deux processus (phénomènes physiques), connus par une grandeur physique traduisant un de leurs paramètres. Cas où l'on a accès à la mesure de ce paramètre simultanément sur un grand nombre de réalisations du processus. Moyennes d'ensemble	84
VIII. 2. — Recherche d'une relation entre deux processus physiques connus par le moyen d'une grandeur physique traduisant un de leurs paramètres. Cas où l'on a accès à une seule réalisation pour chaque processus que l'on peut observer sur un long intervalle de temps	91
VIII. 3. — Ergodisme	95
VIII. 4. — Coefficient de corrélation et théorie de l'information	96
VIII. 5. — Remarques d'ordre pratique	97
VIII. 6. — Fonctions caractéristiques	98
VIII. 7. — Densité spectrale d'un signal aléatoire	98
VIII. 8. — Relation entre les signaux temporels et les densités spectrales, théorème de Wiener-Kinchine	99
VIII. 9. — Fonction de cohérence	103
VIII. 10. — Loi de Gauss ou loi normale	103
VIII. 11. — Densité spectrale et centrage des signaux	105
CHAPITRE IX. — Estimation des mesures de fonctions de corrélation et de densités spectrales	106
IX. 1. — Estimation de moyennes	106
IX. 2. — Estimation des fonctions de corrélation	112
IX. 3. — Estimation des densités spectrales	116
IX. 4. — Estimation des densités de probabilité du 1 ^{er} ordre	119
IX. 5. — Calcul en ligne de la moyenne et de la variance	120
IX. 6. — Signification physique de la variance	125
IX. 7. — Intégrateur pur et filtre passe-bas	126
IX. 8. — Cas des signaux échantillonnés	129

CHAPITRE X. — Erreurs dues à la quantification des signaux dans les mesures des fonctions de corrélations	130
X.1. — Étude statistique des effets de la quantification	130
X.2. — Corrélateurs à adjonction de bruits auxiliaires	137
X.3. — Conditions imposées aux bruits auxiliaires pour une estimation sans biais de la fonction de corrélation	138
X.4. — Étude de la variance, convergence	139
X.5. — Applications pratiques	143
X.6. — Remarque très importante	147
X.7. — Remarque sur les générateurs des bruits auxiliaires	148
X.8. — Calcul stochastique	150
CHAPITRE XI. — Principales propriétés des fonctions de corrélation et des densités spectrales	151
Introduction	151
XI.1. — Fonctions aléatoires stationnaires, ergodiques et centrées	151
XI.2. — Fonctions périodiques	156
XI.3. — Fonctions transitoires	161
XI.4. — Distributivité des opérateurs corrélation et densité spectrale	165
XI.5. — Relation entre les signaux d'entrée et de sortie d'un système linéaire et homogène dans le temps lorsque le signal d'entrée est un signal aléatoire et stationnaire au 2 ^e ordre	166
CHAPITRE XII. — Applications fondamentales des fonctions de corrélation et des densités spectrales	174
XII.1. — Détection par autocorrélation d'un signal périodique noyé dans du bruit	174
XII.2. — Détection d'un signal périodique de période connue noyé dans du bruit	182
XII.3. — Extraction d'un signal périodique noyé dans du bruit. Moyennage ..	187
XII.4. — Détection de périodicités cachées	195
XII.5. — Obtention des densités spectrales à partir des fonctions de corrélation et des fonctions de corrélation à partir des densités spectrales	197
XII.6. — Mesure des caractéristiques dynamiques (fonctions de transfert, réponses impulsionnelles) des systèmes linéaires. Identification de processus	198
XII.7. — Mesure de cohérence	209
XII.8. — Application de la cohérence à la mesure des fonctions de transfert de systèmes linéaires et homogènes dans le temps. Loupe spectrale (effet zoom)	210
XII.9. — Mesure du décalage temporel de deux signaux	218
CHAPITRE XIII. — Analyse spectrale. Mesure des densités spectrales	220
XIII. 1. — Approche intuitive de la densité spectrale	220
XIII. 2. — Influence du filtrage résultant de « l'échantillonnage » de la densité spectrale	222
XIII. 3. — Échantillonnage pratique des densités spectrales	223
XIII. 4. — Erreur de biais sur la mesure des densités spectrales	224
XIII. 5. — Mesure de la densité spectrale	226
XIII. 6. — Analyse spectrale par filtrage	227
XIII. 7. — Procédés de mesure de la densité spectrale par filtrage	233
XIII. 8. — Mesure des densités spectrales par transformation de Fourier discrète	235
XIII. 9. — Calcul des fonctions de corrélation (auto- ou inter-) à partir de la densité spectrale	245
XIII.10. — Phénomène de Gibbs	246
XIII.11. — Analyse spectrale par corrélation	246

XIII. 12. — Analyseur de spectre par corrélation	248
XIII. 13. — Précision sur la densité spectrale obtenue par transformation de Fourier de la fonction de corrélation	249
XIII. 14. — Remarques sur l'utilisation des analyseurs de spectres. Détermina- tion de la fréquence d'échantillonnage optimale	253
CHAPITRE XIV. — Les fenêtres de pondération	256
XIV. 1. — Généralités	256
XIV. 2. — Fenêtres associées à la transformation de Fourier	257
XIV. 3. — Fenêtres associées à la méthode du corrélogramme	258
XIV. 4. — Fenêtres associées à la méthode du périodogramme	259
XIV. 5. — Fenêtres associées à la méthode du filtrage quadrature-intégration ..	261
XIV. 6. — Principales caractéristiques des fenêtres temporelles et spectrales ..	263
XIV. 7. — Première famille de fenêtres temporelles de pondération	269
XIV. 8. — Deuxième famille de fenêtres temporelles de pondération (périodo- gramme)	279
XIV. 9. — Examen d'un cas simple : densité spectrale	281
XIV. 10. — Choix d'une fonction de pondération	285
Index alphabétique des matières	287

CONTENTS

FORWORD	XIII
INTRODUCTION	1
CHAPTER I. — Physical concepts of random processes. Noises	5
CHAPTER II. — Fourier transform	9
CHAPTER III. — Power, energy of signals	33
CHAPTER IV. — Laplace transform	40
CHAPTER V. — Convolution	44
CHAPTER VI. — Filtering	51
CHAPTER VII. — Sampling	59
CHAPTER VIII. — Main statistical properties of random signals	84
CHAPTER IX. — Estimation of correlation functions and spectral density measurements	106
CHAPTER X. — Effects of signal quantization	130
CHAPTER XI. — Main properties of correlation functions and spectral densities ..	151
CHAPTER XII. — Basic applications of correlation functions and spectral densities	174
CHAPTER XIII. — Spectral analysis. Measurement of spectral densities	220
CHAPTER XIV. — Apodisation windowing	256
INDEX	287

La principale affaire des gens devrait être de retourner à l'école et de repenser à ce qu'ils pensaient avant que l'on soit venu leur dire de gagner leur vie.

BUCKMINSTER FULLER

INTRODUCTION

« En toute chose, il n'y a qu'une manière de commencer quand on veut discuter convenablement : il faut bien comprendre l'objet de la discussion. »

PLATON

Il est difficile, voire impossible, de donner du traitement du signal une définition concise, lapidaire. Cette expression, relativement récente condense en ses trois mots des méthodes et des techniques dont les finalités sont nombreuses, très différentes souvent et qui trouvent leurs applications dans des domaines de plus en plus nombreux.

On pourrait dire que le traitement du signal intervient chaque fois que l'on a besoin de séparer un message du bruit qui le dégrade. La figure 1 schématise ce qu'est le traitement du signal. Il intervient notamment chaque fois que l'on reçoit un message à travers une ligne de transmission qui entache ce message de bruits.

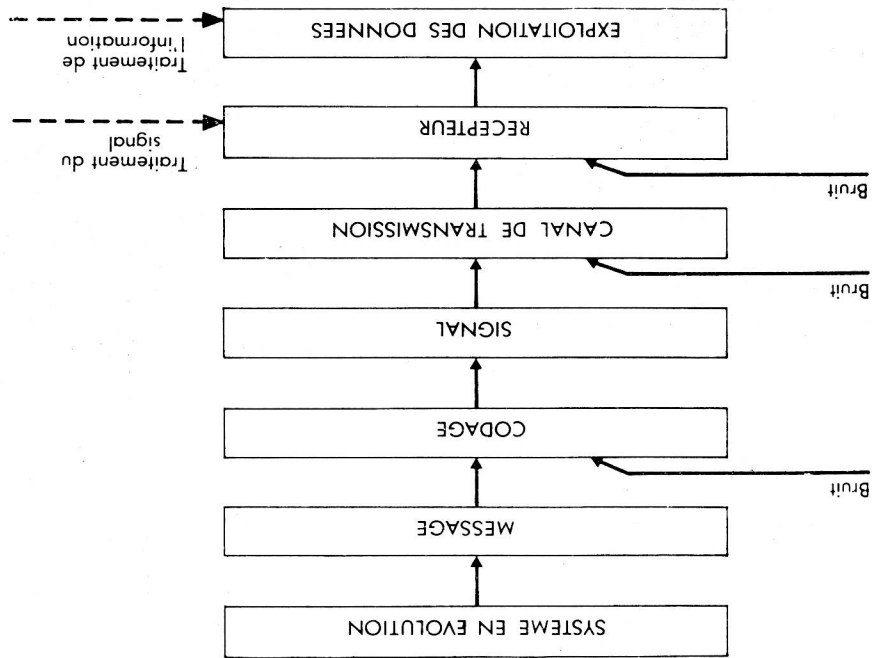


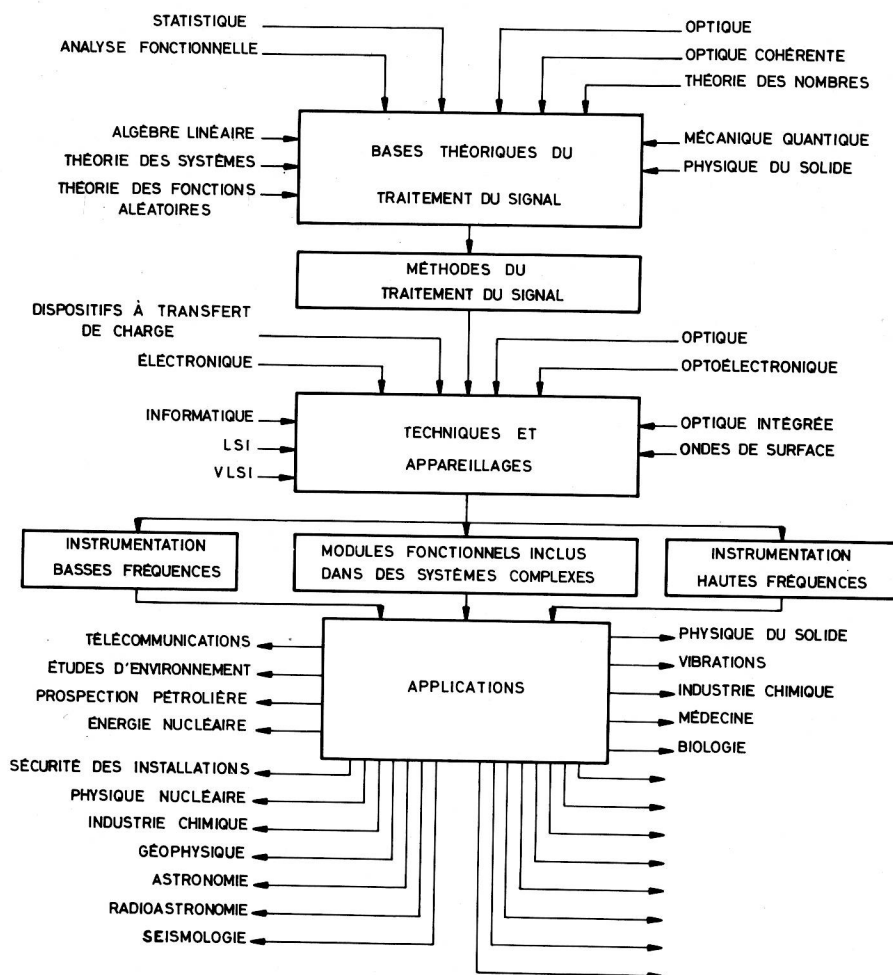
Fig. 1.

Le système physique en évolution émet un message ; ce message doit être codé pour pouvoir être transmis, et le dispositif de codage fournit le *signal* à transmettre ; ce signal est acheminé au moyen d'un canal de transmission, puis reçu par un récepteur qui décode le signal et fournit les données qui vont être exploitées ensuite.

Au niveau du codage, au niveau du canal de transmission, au niveau du récepteur, interviennent des éléments perturbateurs qui vont perturber, détériorer le signal, en lui ajoutant du bruit.

Le **Traitement du Signal** intervient au niveau du récepteur pour nous aider à retrouver au mieux le signal original malgré le bruit qui lui a été superposé (ou, dans certains cas, pour détecter sa présence).

Le traitement du signal s'appuie sur plusieurs branches des mathématiques comme de la physique pour ses fondements théoriques ; pour la réalisation de ses différentes fonctions (dont le nombre ne cesse de croître) il fait appel à de nombreuses branches de la Technologie (*) et ses domaines d'application sont de plus en plus nombreux (fig. 2) car la vie elle-même semble faite de traitement du signal... réfléchissons quelques instants sur le fait que la chauve-souris lorsqu'elle chasse les papillons qui vont assurer sa subsistance utilise (voir chap. XXIII) pour la localisation de ses proies, les meilleures méthodes de traitement du signal connues à ce jour !



(*) Notons, à titre de précisions historiques que les premiers analyseurs de Fourier étaient mécaniques ; que des corrélateurs hydrauliques ont existé il y a de nombreuses années !

Dans chaque circonstance de la vie, à tout instant pourrait-on dire nos sens fournissent à notre cerveau d'énormes quantités d'informations, et nous serions noyés sous les informations (*) si nous ne traitions le signal de manière à ne garder que les informations utiles, car comme l'a dit le Père du traitement du signal Norbert Wiener : « Vivre vraiment, c'est vivre en recevant les informations adéquates. »

Notre désir est que le lecteur trouve ici les notions qui, l'expérience aidant, nous sont apparues comme fondamentales pour tous ceux (et ils sont de plus en plus nombreux dans des domaines de plus en plus variés) qui ont à utiliser de manière pratique les méthodes et les techniques du **Traitement du Signal**.

Il reste, bien entendu, que la pratique n'exclue en aucun cas, bien au contraire, les connaissances théoriques indispensables pour le bon emploi des appareils et l'interprétation correcte des résultats.

Pour ces mêmes raisons, la plupart des rappels théoriques ne sont pas démontrés, nous renvoyons pour cela aux ouvrages fondamentaux dont nous donnons une liste ci-après.

Il va sans dire que cette bibliographie n'est pas exhaustive, c'est la liste des ouvrages desquels nous nous sommes le plus abondamment inspirés.

Par ailleurs, à la fin de chaque chapitre où cela nous a paru nécessaire nous donnons quelques autres références bibliographiques relatives à tel ou tel point particulier.

Mais, tout au long de cet ouvrage, nous avons voulu examiner les appareillages qui, aujourd'hui, sont industriellement disponibles et utilisables pour de multiples applications, tant dans les laboratoires de recherches que dans l'industrie, sans préjuger aucunement de ce que pourraient être les appareils de demain.

Enfin, je tiens à remercier tous mes camarades, collaborateurs et amis du Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble qui m'ont apporté une aide inestimable pour faire passer ces méthodes du plan de la théorie au plan de la pratique.

LISTE DES PRINCIPAUX OUVRAGES FONDAMENTAUX A CONSULTER

- OPPENHEIM Allan V. et Ronald W. SCHAFER. — *Digital Signal processing*. Prentice Hall, 1975.
- BLANC-LAPIERRE A. et PICINBONO B. — *Propriétés statistiques du bruit de fond*. Paris, Masson et Cie, 1961.
- BENDAT Julius. — *Principles and applications of random noise theory*. John Wiley and Sons, 1958.
- BENDAT J. et PERSOL A. — *Measurements and analysis of random data*. John Wiley and Sons, 1966.
- LEE Y. W. — *Statistical theory of communications*. John Wiley and Sons, 1960.
- BRACEWELL R. M. — *The Fourier Transform and its applications*. Mac Graw Hill, 1965.
- STERN J., DE BARBEYRAC J., POGGI R. — *Méthodes pratiques d'études des fonctions aléatoires*. Dunod, 1967.
- BLACKMAN R. B. et TUKEY J. W. — *The measurement of power spectra*. New York, Dover Publications, 1958.
- BLANC-LAPIERRE A. et FORTET R. — *Théorie des fonctions aléatoires*. Paris, Masson et Cie, 1953.
- ROUBINE E. — *Introduction à la théorie de la communication* (3 vol.). Paris, Masson et Cie, 1970.
- RODDIER F. — *Distributions et transformations de Fourier*, Édiscience, 1978.
- LIFERMANN J. — *Théorie et applications de la transformée de Fourier rapide*, Masson, 1977.

(*) Comme un récepteur radio qui n'aurait aucune sélectivité et dont le haut-parleur transmettrait simultanément plusieurs émissions différentes. Notons à ce sujet que le récepteur radio est un merveilleux (bien que humble) dispositif de traitement du signal.