

Francis **Cottet**

AIDE-MÉMOIRE

Traitement du signal

3^e édition

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Illustration de couverture : © Eray-stock.adobe.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2011, 2017
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-077222-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), 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 » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	IX
---------------------	-----------

Notations et abréviations	XI
----------------------------------	-----------

PARTIE 1

LE TRAITEMENT DES SIGNAUX ANALOGIQUES

Chapitre 1. Définitions et représentation des signaux	3
--	----------

1.1 Définitions	3
1.1.1 Définitions de base	3
1.1.2 Principales fonctions du traitement du signal	4
1.1.3 Les systèmes numériques	5
1.2 Représentation des signaux	6
1.2.1 Modélisation des signaux	6
1.2.2 Classification des signaux	8

Chapitre 2. Transformations de Fourier	13
---	-----------

2.1 Analyse spectrale des fonctions périodiques	13
2.1.1 Développement en série de Fourier	13
2.1.2 Représentations fréquentielles	15
2.1.3 Quelques propriétés	17
2.1.4 Exemples de développements en série de Fourier	18
2.2 Analyse spectrale des fonctions non périodiques	24
2.2.1 Transformée de Fourier	24
2.2.2 Propriétés de la transformée de Fourier	24
2.2.3 Exemples de transformées de Fourier	27

Aide-mémoire de traitement du signal

Chapitre 3. Systèmes de transmission. Filtrage	31
3.1 Systèmes de transmission	31
3.1.1 Définitions et propriétés	31
3.1.2 La convolution	34
3.2 Filtrage	36
3.2.1 Fenêtrage temporel	36
3.2.2 Filtrage fréquentiel	39
3.3 Corrélation	50
3.3.1 Puissance et énergie des signaux	50
3.3.2 Corrélation et densité spectrale	52
3.3.3 Théorème de Parseval	56
Chapitre 4. Modulation des signaux	57
4.1 Introduction	57
4.1.1 Spectre d'un signal et bande passante d'un support	57
4.1.2 Types de transmission	58
4.1.3 Les différentes formes de modulation	59
4.2 Modulation d'amplitude	60
4.2.1 Principe de la modulation d'amplitude	60
4.2.2 Étude spectrale d'un signal modulé en amplitude	61
4.2.3 Puissance en modulation d'amplitude	63
4.2.4 Systèmes dérivés de la modulation d'amplitude	65
4.2.5 Procédés de la modulation d'amplitude	68
4.3 Modulation exponentielle	69
4.3.1 Principe	69
4.3.2 Modulation de fréquence	72
4.3.3 Modulation de phase	84
4.3.4 Modulation primaire/secondaire	87
Chapitre 5. Signaux aléatoires Bruit	91
5.1 Signaux aléatoires	91
5.1.1 Définitions	91
5.1.2 Caractérisations statistiques (<i>cf.</i> annexes)	92
5.2 Le bruit	100
5.2.1 Définitions	100

5.2.2 Rapport signal sur bruit	103
5.2.3 Traitement des signaux noyés dans le bruit	104

PARTIE 2

LE TRAITEMENT DES SIGNAUX NUMÉRIQUES

Chapitre 6. Numérisation des signaux	111
6.1 Échantillonnage	111
6.1.1 Échantillonnage idéal : définition	111
6.1.2 Théorème de l'échantillonnage	113
6.1.3 Effet du repliement de spectre	119
6.1.4 Échantillonnage naturel et autres procédés	126
6.2 Quantification du signal échantillonné	131
6.2.1 Effet de la quantification	131
6.2.2 Lois de compression et expansion du signal	134
6.3 Restitution du signal	135
6.3.1 Problématique	135
6.3.2 Interpolation idéale	137
6.3.3 Interpolation linéaire	138
6.3.4 Restitution par bloqueur	140
6.3.5 Filtre de restitution	141
6.3.6 Restitution par sur-échantillonnage	143

Chapitre 7. Analyse spectrale des signaux discrets	149
7.1 Les différentes représentations fréquentielles	149
7.2 Transformée de Fourier discrète	150
7.2.1 Définition	150
7.2.2 Transformée de Fourier et TFD	153
7.3 Transformée de Fourier rapide	156
7.4 Convolution et corrélation numériques	163
7.4.1 Convolution discrète	163
7.4.2 Corrélation discrète	165
7.5 Les fenêtres de pondération	166
7.5.1 Effet du fenêtrage temporel	166
7.5.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante	172

Aide-mémoire de traitement du signal

7.5.3	La transformée en ondelettes	173
Chapitre 8. Filtrage numérique		179
8.1	Introduction	179
8.1.1	Filtrage numérique : définition	179
8.1.2	Transformée en z	183
8.1.3	Filtrage numérique simple : lissage temporel	184
8.2	Synthèse des filtres numériques à réponse impulsionnelle infinie	186
8.2.1	Équation aux différences	187
8.2.2	Synthèse des filtres numériques par transformation de $H(p)$ en $H(z)$	188
8.3	Synthèse des filtres numériques à réponse impulsionnelle finie	201
8.4	Réalisation des filtres numériques	203
8.4.1	Filtres numériques synthétisés par $H(z)$	204
8.4.2	Filtres numériques basés sur la convolution	208
8.5	Techniques avancées de filtrage numérique	209
8.5.1	« Filtres » numériques non linéaires : valeur médiane	209
8.5.2	Filtres numériques multiscadence	211
Chapitre 9. Les chaînes d'acquisition de données		213
9.1	Généralités	213
9.1.1	Introduction	213
9.1.2	Les types de signaux d'entrées/sorties	214
9.1.3	Codage de l'information au niveau d'un ordinateur	217
9.2	Capteurs et actionneurs	218
9.2.1	Introduction	218
9.2.2	Les caractéristiques des capteurs	219
9.2.3	Les principaux types de capteurs	222
9.2.4	Les principaux types d'actionneurs	226
9.3	Le câblage	228
9.3.1	La nature du câble	229
9.3.2	Les différentes configurations du câblage	230
9.4	Le conditionnement de signaux	230

9.5	Les entrées/sorties numériques	231
9.6	Les entrées/sorties analogiques	233
9.6.1	La conversion numérique analogique	234
9.6.2	La conversion analogique numérique	235
9.6.3	Échantillonneur/bloqueur	236
9.7	La mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition de données	236
9.7.1	Introduction	236
9.7.2	Architecture des cartes d'entrées/sorties analogiques	237
9.7.3	Caractéristiques des cartes d'entrées/sorties	238
9.7.4	Méthodologie de mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition de données	240
Chapitre 10.	Les bases du traitement des images	243
10.1	Introduction	243
10.2	Acquisition d'un signal « image »	245
10.2.1	Le contexte de l'acquisition	245
10.2.2	Le capteur de l'image	246
10.2.3	La numérisation de l'image	248
10.3	Traitement d'un signal « image »	251
10.3.1	Les méthodes d'élimination du bruit	251
10.3.2	Les transformations géométriques des images	254
10.4	Analyse d'un signal « image »	256
10.4.1	Les opérations sur les images	257
10.4.2	L'utilisation des histogrammes pour le traitement des images	258
10.4.3	La détection de contour	259
10.4.4	La détection d'éléments (la reconnaissance des formes)	262
10.5	Conclusion	265
Annexe A.	Annexes	267
A.1	Impulsion de Dirac	267
A.1.1	Définitions	267

Aide-mémoire de traitement du signal

A.1.2	Principales propriétés	268
A.2	Fonctions mathématiques utilisées en traitement du signal	270
A.2.1	Notations complexes	270
A.2.2	Formules trigonométriques	271
A.2.3	Fonctions sinus cardinal	271
A.2.4	Fonctions de Bessel	272
A.2.5	Probabilités et statistiques	272
A.3	Transformée de Laplace	278
A.3.1	Définitions	278
A.3.2	Propriétés	279
A.3.3	Exemples de transformées de Laplace	279
	Bibliographie	281
	Lexique anglais-français	283
	Index	285

AVANT-PROPOS

Le contenu et l'organisation de ce livre ont été développés à partir de l'idée directrice selon laquelle, dans une application de mesures, de tests ou de contrôle d'un procédé physique, le concepteur se trouve confronté à des choix de traitements des signaux à mettre en œuvre afin de répondre à ces besoins. L'efficacité, l'effet produit, la nécessité, la validité du résultat sont autant de questions auxquelles il est difficile de répondre sans une connaissance et une pratique minimum de la discipline que constitue le **traitement du signal**.

Ce livre est composé de trois grandes parties dont le traitement des signaux analogiques (**partie 1**) et le traitement des signaux numériques (**partie 2**). Les cinq premiers chapitres sont consacrés aux bases du traitement des signaux analogiques et les trois suivants traitent des signaux numériques. La partie 3 est composée de deux chapitres d'ouverture : mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition et traitement d'image.

Le chapitre 1 présente les définitions nécessaires à la compréhension de l'ouvrage. Il permet de plus de préciser les différentes représentations des signaux et de fixer les notations utilisées par la suite. Le chapitre 2 est consacré aux transformations de Fourier des signaux analogiques périodiques et non périodiques qui constituent la base du traitement des signaux. Cette analyse spectrale des signaux analogiques permet de bien décrire la représentation duale de tous signaux : temps et fréquence. Le chapitre 3 présente la théorie générale des systèmes de transmission et traite du filtrage analogique. Cette présentation permet ainsi une extension à tous les types de filtres et de sollicitations de ces filtres. Le chapitre 4 étudie un des aspects importants du traitement des signaux : la modulation. Les méthodes les plus utilisées y sont présentées. Le

Aide-mémoire de traitement du signal

chapitre 5 aborde le traitement des signaux aléatoires en particulierisant l'étude au signal de « bruit ».

La transformation des signaux analogiques en signaux numériques est étudiée en détail au chapitre 6. Ce chapitre, qui présente en particulier le théorème d'échantillonnage, est sans doute le plus important de cet ouvrage. Le chapitre 7 est consacré à l'analyse spectrale des signaux numériques. Le chapitre 8 présente les concepts de base du domaine très riche que constitue le filtrage numérique avec des applications simples de diverses méthodes.

Les chapitres 9 et 10 concernent l'aspect applicatif du traitement du signal en présentant dans le premier de ces deux chapitres les chaînes d'acquisition et leur mise en œuvre. Le chapitre 10 décrit les bases du traitement d'image.

L'aspect « théorie du signal » a volontairement été limité au strict nécessaire pour la compréhension des modèles utilisés. Les bases mathématiques indispensables et utiles sont rappelées avec un maximum de simplicité et de concision en annexe.

Ce livre n'a pas pour but d'être un ouvrage exhaustif. Dans cet ouvrage, nous nous contenterons d'une approche pragmatique. En effet, il existe de nombreux ouvrages qui décrivent de façon complète toutes les méthodes et techniques utilisées dans le domaine du traitement du signal, sujet très vaste et en constante évolution. Par contre, il est destiné aux étudiants qui désirent acquérir une formation de base dans les techniques du traitement du signal. De plus cet ouvrage offre un outil de base à tous les techniciens et ingénieurs qui travaillent dans le domaine du test, de la mesure ou du contrôle de procédés. Ainsi cet ouvrage permettra à son lecteur de s'initier rapidement aux bases du traitement des signaux afin de les mettre en œuvre de façon pertinente.

NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

$x * y$	Produit de convolution
$\text{Arctg}(x)$	Fonction arctangente
$b(t)$	Signal « bruit »
$\cos(x)$	Fonction cosinusoidale
CAN	Convertisseur analogique-numérique
CNA	Convertisseur numérique-analogique
$\text{Cov}_{xy}(\tau)$	Fonction de covariance
$C_{xx}(t)$	Fonction d'autocorrélation
$C_{xy}(t)$	Fonction d'intercorrélation
e^x	Fonction exponentielle
$E_{sp}[x^n]$	Espérance de x^n ou moment d'ordre n de la variable x
f	Fréquence
F	Transformée de Fourier
FFT	Transformée de Fourier rapide
$g_{\text{fen}}(t)$	Fonction de la fenêtre de pondération
$h(t)$	Réponse impulsionnelle ou percussionnelle d'un filtre
$H(f)$, $H(p)$ ou $H(z)$	Fonction de transfert d'un filtre
$J_n(x)$	Fonction de Bessel de première espèce d'ordre n
L	Transformée de Laplace
$\log(x)$	Fonction logarithme à base 10

Aide-mémoire de traitement du signal

$\text{Ln}(x)$	Fonction logarithme népérien
m	Moyenne temporelle
OMA	Onde modulée en amplitude
OMF	Onde modulée en fréquence
p	Fréquence complexe (opérateur de Laplace)
$\text{Pgn}_{T_0}(x)$	« Peigne » de Dirac (suite de pic de Dirac)
q	Quantum de conversion
r_{xy}	Coefficient de corrélation
$s(t)$	Signal temporel
$\bar{s}(t)$	Complexe conjugué de la variable $s(t)$
$\overline{s(t)}$	Moyenne temporelle du signal $s(t)$
$s_e(t)$	Signal temporel échantillonné
$s_{e,\Pi}(t)$	Signal temporel échantillonné tronqué ou limité temporellement
$S(f)$	Transformée de Fourier du signal $s(t)$
$S_e(f)$	Transformée de Fourier du signal échantillonné $s_e(t)$
$S_{e,\Pi}(f)$	Transformée de Fourier du signal échantillonné tronqué $s_{e,\Pi}(t)$
$\sin(x)$	Fonction sinusoïdale
$\text{sinc}(x)$	Fonction sinus cardinal $[\sin(\pi x)/(\pi x)]$
$s_{\text{ind}}(t)$	Réponse indicielle (réponse au signal $u(t)$)
$S_{xx}(f)$	Densité spectrale ou spectre en puissance
$S_{xy}(f)$	Densité spectrale d'interaction
t	Temps
T_z	Transformée en z
TFD	Transformée de Fourier discrète
$T_e(= 1/F_e)$	Période d'échantillonnage d'un signal
$T_0(= 1/F_0)$	Période d'un signal

Notations et abréviations

$u(t)$	Échelon unité ou fonction de Heaviside
V_e	Tension d'entrée
V_s	Tension de sortie
w_N^{mk}	Fonction $e^{-j2\pi km/N}$
$\delta(x)$	Pic de Dirac
$\Gamma_{xy}(\tau)$	Fonction de corrélation statistique
$\Lambda_\tau(t)$	Fonction triangle de base égale à τ
ω, Ω	Pulsation ($= 2\pi f$)
$\Pi_\tau(x)$	Fonction « porte » de largeur τ
σ_x	Écart type de la variable x

Seuls les esprits cultivé sont libres
Épiciète, 1er siècle

À mes parents.
À Françoise, Joseph et Méaza

Partie 1

Le traitement des signaux analogiques