

Traitement des signaux et acquisition de données

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



ÉDITEUR DE SAVOIRS

Francis Cottet

Traitement des signaux et acquisition de données

Cours et exercices corrigés

4^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © pianoman – istock.com

<p>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.</p> <p>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</p>	 <p>DANGER LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>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).</p>
--	--	---

© Dunod, 2009, 2015

5 rue Laromiguière, 75005 Paris

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-072754-4

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

INTRODUCTION	1
PARTIE 1 • LE TRAITEMENT DES SIGNAUX ANALOGIQUES	9
CHAPITRE 1 • REPRÉSENTATION DES SIGNAUX	11
1.1 Modélisation des signaux	11
1.2 Classification des signaux	12
1.2.1 Représentation temporelle des signaux	12
1.2.2 Classification énergétique	13
1.2.3 Classification spectrale	15
1.2.4 Les signaux numériques	16
CHAPITRE 2 • TRANSFORMATION DE FOURIER	19
2.1 Transformation de Fourier des fonctions périodiques. Série de Fourier	19
2.1.1 Définition. Théorème de Fourier	19
2.1.2 Distribution ou pic de Dirac	20
2.1.3 Représentations unilatérale et bilatérale	21
2.1.4 Exemples de signaux élémentaires	23
2.1.5 Propriétés du développement en série de Fourier	25
2.2 Transformée de Fourier des fonctions non périodiques	26
2.2.1 Définition	26
2.2.2 Conditions d'existence de la transformée de Fourier	27
2.2.3 Propriétés de la transformée de Fourier	27
2.2.4 Quelques signaux supplémentaires	31
Exercices d'application	34
CHAPITRE 3 • SYSTÈMES DE TRANSMISSION	45
3.1 Définition. Unité de comparaison. Bande passante	45
3.1.1 Définition et unité de comparaison	45
3.1.2 Bande passante	46

3.2	Propriétés des systèmes de transmission	47
3.2.1	Systèmes linéaires	47
3.2.2	Systèmes continus	48
3.2.3	Systèmes stationnaires	49
3.3	Filtres et convolution	49
3.3.1	Définition	49
3.3.2	Propriétés de la convolution	51
3.3.3	Calcul pratique de la convolution	51
3.3.4	Théorème de Plancherel	51
3.3.5	Convolution des signaux périodiques	54
3.4	Introduction à la notion de corrélation	54
3.4.1	Puissance et énergie des signaux	54
3.4.2	Corrélation et densité spectrale	55
3.4.3	Théorème de Parseval	60
	Exercices d'application	60
	CHAPITRE 4 • FILTRAGE DES SIGNAUX ANALOGIQUES	63
4.1	Transformée de Laplace	63
4.1.1	Définition	63
4.1.2	Transformée de Fourier et transformée de Laplace	64
4.1.3	Propriétés de la transformée de Laplace	64
4.2	Filtrage ou fenêtrage temporel	66
4.2.1	Principes généraux	66
4.2.2	Le fenêtrage temporel	66
4.3	Filtrage fréquentiel	70
4.3.1	Théorème fondamental des filtres	70
4.3.2	Filtres réalisables	72
4.3.3	Les différents types de filtres	74
	Exercices d'application	77
	CHAPITRE 5 • LA MODULATION	85
5.1	Introduction	85
5.1.1	Spectre d'un signal et bande passante d'un support	85
5.1.2	Types de transmission	87
5.1.3	Les différentes formes de modulation	87
5.2	Modulation d'amplitude	88
5.2.1	Principe de la modulation d'amplitude	88
5.2.2	Systèmes dérivés de la modulation d'amplitude	92
5.2.3	Procédés de modulation, l'émetteur	94
5.2.4	Procédés de démodulation, le récepteur	96
5.3	Modulation exponentielle	98
5.3.1	Principe de la modulation exponentielle	98
5.3.2	La modulation de fréquence	99
5.3.3	La modulation de phase	114
	Exercices d'application	117

CHAPITRE 6 • SIGNAUX ALÉATOIRES. BRUIT	125
6.1 Signaux aléatoires	125
6.1.1 Définitions	125
6.1.2 Caractérisations statistiques	126
6.2 Sources de bruit	128
6.2.1 Bruit externe et bruit interne	128
6.2.2 Bruit thermique	129
6.2.3 Bruit de grenaille et autres modèles	129
6.3 Rapport signal/bruit	130
6.4 Détection d'un signal noyé dans le bruit	131
6.4.1 Détection par corrélation d'un signal périodique noyé dans un bruit blanc	131
6.4.2 Détection synchrone par corrélation d'un signal périodique noyé dans du bruit	134
Exercices d'application	136
PARTIE 2 • LE TRAITEMENT DES SIGNAUX NUMÉRIQUES	141
CHAPITRE 7 • NUMÉRISATION DES SIGNAUX	143
7.1 Échantillonnage	143
7.1.1 Échantillonnage idéal	145
7.1.2 Effet de repliement du spectre	149
7.1.3 Échantillonnage naturel et autres procédés	152
7.2 Quantification du signal échantillonné	156
7.2.1 Quantification	156
7.2.2 Lois de compression-expansion du signal	158
7.3 Restitution du signal	159
7.3.1 Problématique	159
7.3.2 Interpolation idéale	160
7.3.3 Interpolation linéaire	161
7.3.4 Restitution par bloqueur	163
7.3.5 Filtre de restitution	164
Exercices d'application	165
CHAPITRE 8 • ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX DISCRETS	175
8.1 Les différentes représentations fréquentielles	175
8.2 Transformée de Fourier discrète	176
8.2.1 Définition	176
8.2.2 Transformée de Fourier et TFD	178
8.3 Transformée de Fourier rapide	180
8.4 Convolution et corrélation numériques	188
8.4.1 Convolution discrète	188
8.4.2 Corrélation discrète	189
8.5 Effet du fenêtrage temporel	190
Exercice d'application	196

CHAPITRE 9 • NOTIONS DE FILTRAGE NUMÉRIQUE	203
9.1 Introduction	203
9.1.1 Définition du filtrage numérique	203
9.1.2 Transformée en z	206
9.1.3 Filtrage numérique simple : lissage temporel	207
9.2 Synthèse des filtres numériques à réponse impulsionnelle infinie	210
9.2.1 Équation aux différences	210
9.2.2 Synthèse des filtres numériques par transformation de $H(p)$ en $H(z)$	211
9.3 Synthèse des filtres numériques à réponse impulsionnelle finie	216
9.4 Réalisation des filtres numériques	216
9.4.1 Filtres numériques synthétisés par $H(z)$	217
9.4.2 Filtres numériques basés sur la convolution	220
9.5 Filtres numériques avancés	221
9.5.1 Filtres numériques de la valeur médiane	221
9.5.2 Filtres numériques multiscadence	222
Exercices d'application	223
PARTIE 3 • LES BASES DE L'ACQUISITION DE DONNÉES	233
CHAPITRE 10 • LES CHAÎNES D'ACQUISITION DE DONNÉES	235
10.1 Généralités	235
10.1.1 Introduction	235
10.1.2 Les types de signaux d'entrées/sorties	237
10.1.3 Codage de l'information au niveau d'un calculateur	238
10.2 Capteurs et actionneurs	241
10.2.1 Introduction	241
10.2.2 Les caractéristiques des capteurs	241
10.2.3 Les principaux types de capteurs	243
10.2.4 Les principaux types d'actionneurs	253
10.3 Le câblage	254
10.3.1 La nature du câble	255
10.3.2 Les différentes configurations du câblage	260
10.4 Le conditionnement de signaux	263
10.5 Exemple d'une chaîne industrielle	265
CHAPITRE 11 • LES ENTRÉES/SORTIES NUMÉRIQUES	269
11.1 Structure d'une chaîne d'E/S numériques	269
11.1.1 Cas simples : signaux compatibles TTL	269
11.1.2 Cas général	270
11.2 Composants d'une chaîne d'E/S numériques	271
11.2.1 Adaptation	271
11.2.2 Isolement et filtrage	274
11.2.3 Étage tampon	277
11.3 Exemple d'une interface d'E/S numériques	277

CHAPITRE 12 • LES ENTRÉES/SORTIES ANALOGIQUES	281
12.1 Introduction	281
12.2 La conversion numérique/analogique	282
12.2.1 Introduction	282
12.2.2 Convertisseur à résistances pondérées	283
12.2.3 Convertisseur à réseau en échelle $R-2R$	285
12.2.4 Caractéristiques principales des CNA	286
12.2.5 Erreurs sur la courbe de transfert d'un CNA	287
12.2.6 Quelques applications des convertisseurs N/A	290
12.3 La conversion analogique/numérique	292
12.3.1 Introduction	292
12.3.2 CAN à intégration simple rampe	294
12.3.3 CAN à intégration double rampe	295
12.3.4 Convertisseur à comptage ou incrémental	297
12.3.5 Convertisseur à approximations successives	298
12.3.6 Convertisseur parallèle (<i>flash converter</i>)	299
12.3.7 Convertisseur SIGMA-DELTA	301
12.3.8 Convertisseur A/N logarithmique	302
12.3.9 Caractéristiques et erreurs des convertisseurs A/N	303
12.3.10 Applications des convertisseurs A/N	303
12.4 Caractéristiques techniques des convertisseurs	305
12.4.1 Caractéristiques techniques des CNA	305
12.4.2 Caractéristiques techniques des CAN	305
12.4.3 Réalisation technologique des convertisseurs	305
12.5 Échantillonneur/bloqueur	306
12.5.1 Définition d'un échantillonneur/bloqueur	306
12.5.2 Caractéristiques d'un échantillonneur/bloqueur	307
12.5.3 Structure interne d'un échantillonneur/bloqueur	309
CHAPITRE 13 • LA MISE EN ŒUVRE D'UNE CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNÉES	311
13.1 Introduction	311
13.2 Fonctions supplémentaires	312
13.2.1 Multiplexage	312
13.2.2 Amplification programmable	314
13.2.3 Temporisation ou comptage	315
13.2.4 Bus	316
13.3 Caractéristiques générales des cartes d'entrées/sorties	317
13.3.1 Architectures matérielles des cartes d'acquisition de données analogiques	317
13.3.2 Caractéristiques des cartes d'entrées/sorties	319
13.4 Méthodologie de mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition de données	323
13.4.1 Introduction	323
13.4.2 Caractérisation des signaux d'entrées/sorties	324
13.4.3 Méthodologie d'analyse	328
13.4.4 Les modes d'acquisition de données	329
Exercice d'application	331

CHAPITRE 14 • EXEMPLE D'APPLICATIONS	335
14.1 Pilotage d'une machine à compression rapide pour des essais de combustion	335
14.1.1 Présentation générale de l'application	335
14.1.2 Description de la partie mécanique	336
14.1.3 Description de la partie mesure et contrôle	337
14.1.4 Conclusion	339
14.2 Étude d'écoulements turbulents réactifs par vélocimétrie laser	340
14.2.1 Présentation générale de l'application	340
14.2.2 Cahier des charges et méthodologie expérimentale	340
14.2.3 Conclusion	342
14.3 Étude de la réponse vibratoire des cloches	343
14.3.1 Présentation générale de l'application	343
14.3.2 Application d'analyse vibratoire des cloches	343
14.3.3 Conclusion	345
14.4 Étude des interfaces dans les multimatériaux	345
14.4.1 Présentation générale de l'application	345
14.4.2 Banc expérimental de l'application	346
14.4.3 Acquisition et traitement de données des expériences	347
14.4.4 Conclusion	348
CHAPITRE 15 • LES IMAGES ET LEURS TRAITEMENTS	351
15.1 Introduction	351
15.2 Acquisition d'un signal « image »	353
15.2.1 Le contexte de l'acquisition	353
15.2.2 Le capteur de l'image	353
15.2.3 La numérisation de l'image	355
15.3 Traitement d'un signal « image »	357
15.3.1 Les méthodes d'élimination du bruit	357
15.3.2 Les transformations géométriques des images	360
15.4 Analyse d'un signal « image »	363
15.4.1 Les opérations sur les images	364
15.4.2 L'utilisation des histogrammes pour le traitement des images	364
15.4.3 La détection de contour	366
15.4.4 La détection d'éléments (la reconnaissance des formes)	369
15.5 Conclusion	372
PARTIE 4 • ANNEXES	373
ANNEXE A • DISTRIBUTION DE DIRAC	375
ANNEXE B • DÉVELOPPEMENTS EN SÉRIE DE FOURIER	378
ANNEXE C • TRANSFORMÉES DE FOURIER	381
ANNEXE D • TRANSFORMÉES DE LAPLACE	384
ANNEXE E • FONCTIONS DE TRANSFERT	386

ANNEXE F • TRANSFORMÉE EN z	387
ANNEXE G • PRINCIPAUX MONTAGES DE L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL	389
ANNEXE H • LE LOGICIEL D'INSTRUMENTATION LABVIEW™	393
ANNEXE I • RAPPELS MATHÉMATIQUES POUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL	402
LEXIQUE	405
NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS	407
BIBLIOGRAPHIE	409
INDEX	410

Introduction

Avant de présenter le contenu des différents chapitres de cet ouvrage, il convient de donner quelques définitions précises et de situer la place de ce livre dans le vaste domaine que recouvrent le traitement des signaux et l'acquisition de données.

QUELQUES DÉFINITIONS

Un *signal* est la représentation physique de l'information qu'il transporte de sa source à son destinataire. Il sert de vecteur à une information. Il constitue la manifestation physique d'une grandeur mesurable (courant, tension, force, température, pression, etc.). Les signaux, considérés dans ce livre, sont des grandeurs électriques variant en fonction du temps $s(t)$ obtenues à l'aide de capteurs. Mais le traitement du signal s'applique à tous les signaux physiques (onde acoustique, signal optique, signal magnétique, signal radioélectrique, etc.), comme cela est illustré sur la figure 1, page suivante. Le traitement d'images peut être considéré comme une extension du traitement du signal aux signaux bidimensionnels (images).

Le *bruit* est défini comme tout phénomène perturbateur gênant la perception ou l'interprétation d'un signal, par analogie avec les nuisances acoustiques (interférence, bruit de fond, etc.). La différenciation entre le signal et le bruit est artificielle et dépend de l'intérêt de l'utilisateur : les ondes électromagnétiques d'origine galactique sont du bruit pour un ingénieur des télécommunications par satellites et un signal pour les radioastronomes.

La *théorie du signal* a pour objectif fondamental la « description mathématique » des signaux. Cette représentation commode du signal permet de mettre en évidence ses principales caractéristiques (distribution fréquentielle, énergie, etc.) et d'analyser les modifications subies lors de la transmission ou du traitement de ces signaux.

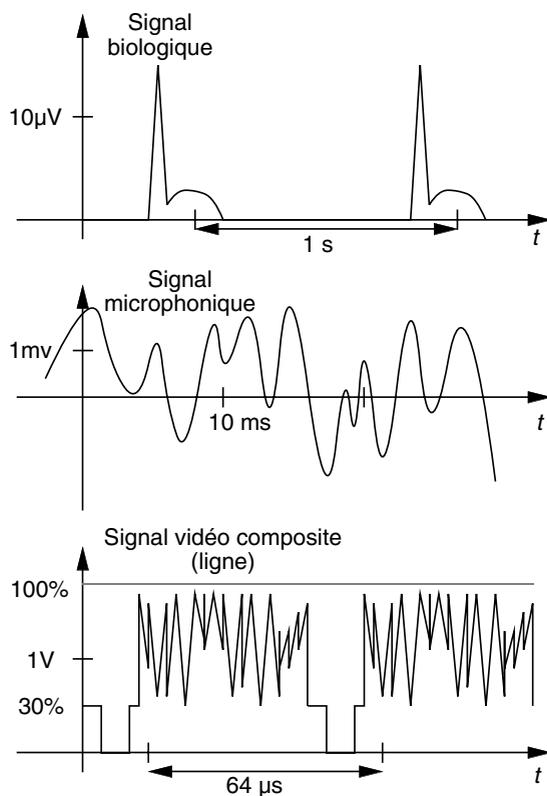


Figure 1. Exemples des différents types de signaux physiques obtenus à l'aide de divers capteurs.

Le *traitement du signal* est la discipline technique qui, s'appuyant sur les ressources de l'électronique, de l'informatique et de la physique appliquée, a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux. Son champ d'application se situe donc dans tous les domaines concernés par la perception, la transmission ou l'exploitation des informations véhiculées par ces signaux.

Le *traitement de l'information* fournit un ensemble de concepts permettant d'évaluer les performances des systèmes de transfert d'informations, en particulier lorsque le signal porteur de message est bruité. Cela inclut les méthodes de « codage de l'information » dans le but de la réduction de redondance, de la correction des erreurs, de la confidentialité (cryptage). L'ensemble des concepts et méthodes développés dans le traitement de l'information et du signal forme la théorie de la communication.

LA CHAÎNE DE COMMUNICATION

Le schéma d'une chaîne de communication, représenté sur la figure 2, page ci-contre, met donc en relation un système physique en évolution qui délivre un message et un système physique qui doit recevoir et exploiter cette information.

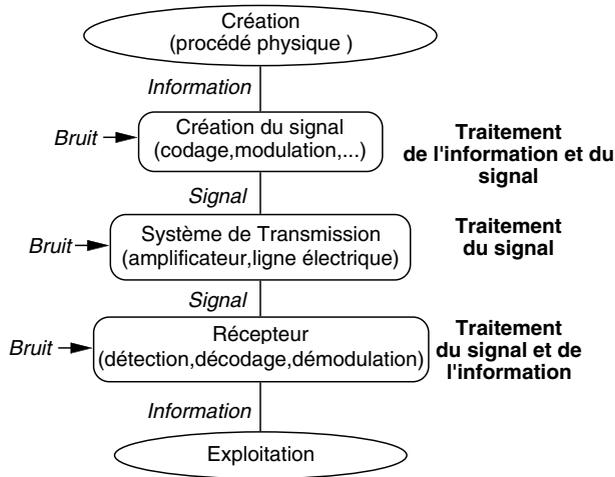


Figure 2. Schéma d'une chaîne de communication.

L'information fournie va être transformée en signal, qui sera acheminé ensuite par le canal de transmission. Celui-ci est ensuite détecté par le récepteur qui doit fournir l'information contenue dans le signal. Au niveau de l'élaboration du signal, du système de transmission et du récepteur, interviennent des éléments perturbateurs qui vont détériorer le signal en lui ajoutant du bruit. Le traitement de l'information et le traitement du signal auront donc pour tâche de réaliser la meilleure chaîne de communication possible : c'est-à-dire la transmission de l'information initiale la plus complète. Cette chaîne de communication se retrouve dans toutes les applications qui traitent du contrôle de procédés physiques par un ou plusieurs systèmes informatiques.

La figure 3, page suivante, illustre une chaîne de communication complète avec ou sans perturbation au niveau du canal de transmission : un robot à commande vocal.

Au niveau des différents systèmes (émission, transmission et réception), les fonctions, définies par le traitement de l'information et le traitement du signal, seront réalisées à partir des techniques électroniques, informatiques ou physiques. Seuls certains aspects du traitement du signal et de ces techniques sont abordés dans cet ouvrage.

PRINCIPALES FONCTIONS DU TRAITEMENT DU SIGNAL

Les fonctions du traitement du signal peuvent se diviser en deux catégories : l'élaboration des signaux (incorporation des informations) et l'interprétation des signaux (extraction des informations). Les principales fonctions intégrées dans ces deux parties sont les suivantes :

► *Élaboration des signaux*

- synthèse : création de signaux de forme appropriée en procédant par exemple à une combinaison de signaux élémentaires ;

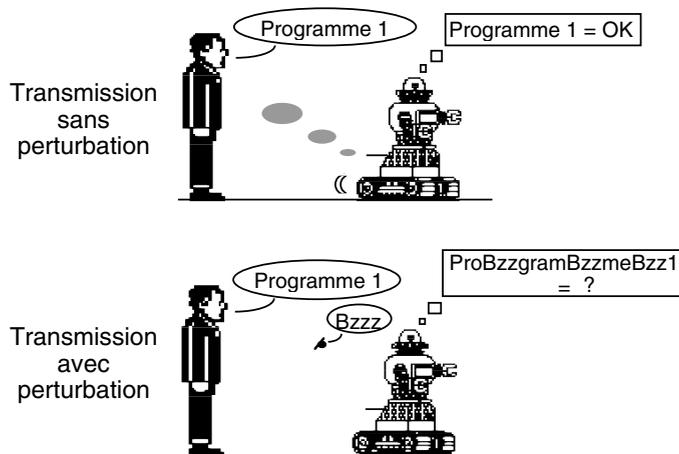


Figure 3. Exemple d'une chaîne de communication. L'information « Programme 1 », fournie par l'utilisateur, est à transmettre au robot. Ce message est transformé en signal sous la forme de vibrations acoustiques se propageant dans l'air qui sera, dans ce cas, le canal de transmission. Le signal arrive au destinataire (robot) avec ou sans modifications (bruit au niveau de la transmission). Le signal doit être détecté et analysé et ensuite l'information qu'il contient interprétée. Cet ensemble forme ce que l'on appelle la « chaîne de communication ».

- modulation, changement de fréquence : moyen permettant d'adapter un signal aux caractéristiques fréquentielles d'une voie de transmission ;
- codage : traduction en code binaire (quantification), etc.

► *Interprétation des signaux*

- filtrage : élimination de certaines composantes fréquentielles indésirables ;
- détection : extraction du signal d'un bruit de fond (corrélation) ;
- identification : classement d'un signal dans des catégories préalablement définies ;
- analyse : isolement des composantes essentielles ou utiles d'un signal de forme complexe (transformée de Fourier) ;
- mesure : estimation d'une grandeur caractéristique d'un signal avec un certain degré de confiance (valeur moyenne, etc.).

LES SYSTÈMES NUMÉRIQUES

Les qualités actuelles du traitement numérique de l'information conduisent à son développement pour résoudre les problèmes de contrôle/commande de procédés industriels. Le système de traitement numérique, schématisé sur la figure 4, page ci-contre, va réaliser la saisie de l'information, traiter ces informations suivant un programme de contrôle (régulation, filtrage numérique, etc.) et d'après des valeurs de consignes entrées par l'utilisateur, envoyer des signaux de commande au processus industriel pour atteindre le comportement cherché. Le numérique présente, en effet,

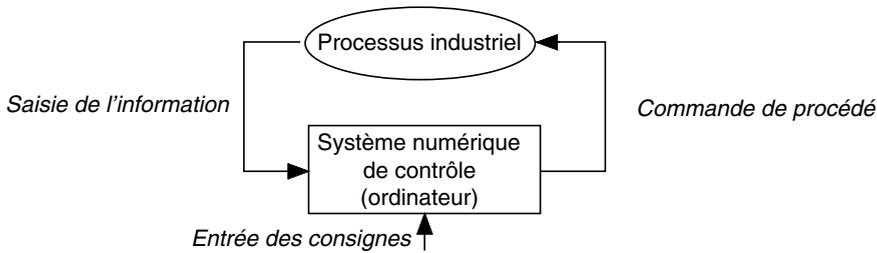


Figure 4. Contrôle/commande d'un processus industriel par un système de traitement numérique.

un grand nombre d'avantages par rapport à un contrôle de processus par un système analogique :

- reproductibilité des systèmes (circuits logiques) ;
- stabilité : pas de dérive en temps ou en température ;
- adaptabilité et souplesse d'emploi (modification du programme) ;
- fiabilité : circuits à très grande intégration ;
- rapidité : jusqu'à 10 MHz environ en temps réel.

Les grandeurs physiques (mouvement mécanique, variation de température, etc.) liées aux procédés physiques contrôlés mis en jeu doivent être transformées en signaux analogiques électriques (courant ou tension) : cela est le rôle des *capteurs* ou transducteurs (quartz, thermocouple...) dans le cas de la mesure. Inversement, la commande au niveau du processus est faite à l'aide d'*actionneurs* ou récepteurs (moteur, vanne...) qui transforment le signal analogique électrique reçu en grandeurs physiques (énergie mécanique, chaleur, etc.).

Dans le cas des traitements par des systèmes numériques, ces signaux analogiques transmis ou reçus seront transformés en signaux numériques. Ce rôle est rempli par des interfaces électroniques spécialisées qui sont composées de différents éléments : les convertisseurs analogiques-numériques et numériques-analogiques, les échantillonneurs-bloqueurs, les multiplexeurs, les amplificateurs à gain programmable, etc. Ainsi le schéma complet de la chaîne de pilotage d'un processus physique

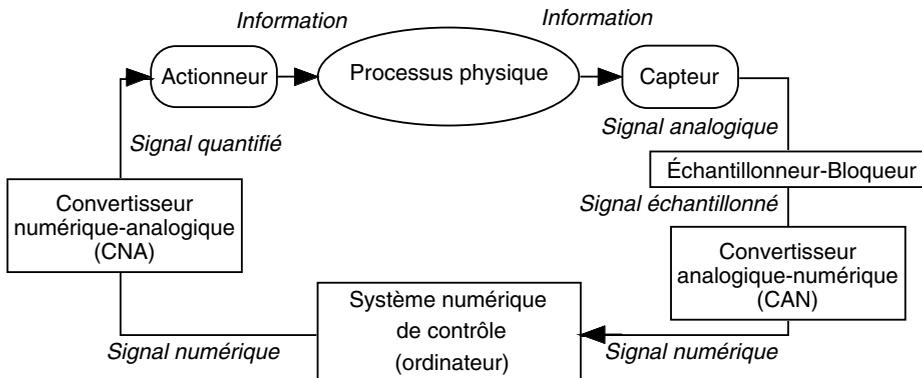


Figure 5. Pilotage d'un processus industriel par un système de traitement numérique.

par un système numérique peut être représenté par le schéma de la figure 5, page précédente. Les fonctions du traitement numérique sont très nombreuses : filtrage, analyse spectrale, modulation, détection, estimation, transcodage, génération de signaux, reconnaissance, correction...

ORGANISATION GÉNÉRALE DU LIVRE

Le contenu et l'organisation de ce livre ont été développés à partir de l'idée directrice suivante : « lors de la mise en œuvre d'une application de mesures ou de contrôle d'un procédé physique par un système informatique, le concepteur se trouve confronté à des problèmes liés aux nombreux domaines de ce qu'il est convenu d'appeler l'Informatique Industrielle. En premier lieu, nous trouvons la conception de l'application, c'est-à-dire le traitement du signal et l'automatisation ; puis la deuxième étape la réalisation matérielle (micro-ordinateur avec cartes d'interfaces) et logicielle. Si les domaines de l'automatique et de la programmation sont bien cernés pour ce type d'application, il est souvent difficile de trouver les éléments permettant la mise en œuvre du traitement des signaux et de l'acquisition de données ».

La figure 6 permet de situer les points traités dans ce livre par rapport à l'ensemble du domaine. Il est évident que cet ouvrage n'est pas un traité complet de traitement du signal, sujet très vaste et en constante évolution. Par contre il offre un outil de base à tous les techniciens et ingénieurs qui travaillent dans le domaine du test et mesures ou du contrôle de procédés.

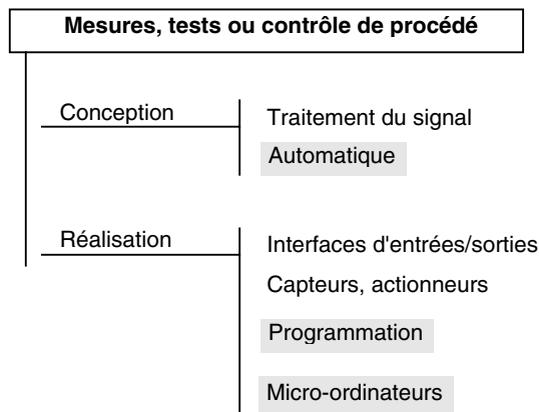


Figure 6. Visualisation de l'intégration des sujets traités dans cet ouvrage pour la réalisation d'applications de mesures ou de conduite de procédés. Les mots grisés correspondent aux sujets non traités dans cet ouvrage.

Ce livre est composé de trois grandes parties : le traitement des signaux analogiques (partie A), le traitement des signaux numériques (partie B) et l'acquisition de données (partie C). Les six premiers chapitres sont consacrés aux bases du traitement des signaux analogiques. Les suivants traitent des signaux numériques. Enfin les quatre

derniers chapitres sont entièrement dédiés aux composants des interfaces industrielles et aux chaînes d'acquisition et de restitution de données.

Le chapitre 1 présente les notions de théorie des signaux nécessaires à la compréhension de l'ouvrage. Il permet de plus de fixer les notations utilisées par la suite.

Le chapitre 2 est consacré à la transformation de Fourier des signaux analogiques périodiques et non périodiques qui constitue 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 avec une introduction à la notion de corrélation.

Le chapitre 4 traite du filtrage analogique en utilisant la formulation théorique développée dans le chapitre précédent. Cette présentation permet ainsi une extension à tous les types de filtres et de sollicitations de ces filtres.

Le chapitre 5 étudie un des aspects importants du traitement des signaux analogiques : la modulation. Les méthodes les plus utilisées et les divers moyens de mise en œuvre y sont présentés.

Le chapitre 6 est consacré aux signaux aléatoires. En particulier il s'intéresse à la notion de bruit, ainsi qu'aux techniques de détection et d'extraction d'un signal noyé dans le bruit.

La transformation des signaux analogiques en signaux numériques est étudiée en détail au chapitre 7. Ce chapitre, qui présente en particulier le théorème d'échantillonnage, est sans doute le plus important de cet ouvrage.

Le chapitre 8 est consacré à l'analyse spectrale des signaux numériques.

Le chapitre 9 présente les concepts de base du domaine très riche que constitue le filtrage numérique avec des applications simples de diverses méthodes.

Finalement, le chapitre 10 introduit les chaînes industrielles de traitement des signaux avec en particulier une description succincte des capteurs et actionneurs, les chapitres 11 et 12 traitent des composants d'entrées/sorties numériques et analogiques. La lecture du chapitre 13 doit permettre une mise en œuvre plus complète et plus rationnelle des multiples composants et des cartes d'interfaces actuellement disponibles.

Neuf annexes complètent cet ouvrage. Les six premières sont des formulaires ou résumés sur les différentes transformées ou fonctions utilisées. L'annexe G développe les principaux montages de l'amplificateur opérationnel employés dans les différents points traités. L'annexe H présente succinctement le logiciel d'instrumentation LabVIEW™ utilisé pour illustrer les traitements des signaux présentés dans les différents chapitres. Enfin la dernière annexe donne quelques rappels mathématiques utiles en traitement du signal.

Ce livre s'adresse à tous les techniciens ou ingénieurs qui désirent développer une application de mesures ou de contrôle/commande de procédé avec un traitement des signaux. Cet ouvrage est aussi destiné aux étudiants désirant acquérir une formation de base dans les techniques du traitement du signal et de leur mise en œuvre. Les nombreux exemples traités permettent de comprendre aisément les différentes notions introduites.

Ce livre n'a pas pour but d'être un ouvrage exhaustif. En effet il existe de nombreux ouvrages qui décrivent de façon complète toutes les méthodes et techniques utilisées dans ces domaines de l'informatique industrielle et particulièrement dans le domaine du traitement du signal (bibliographie). L'aspect théorique du signal a volontairement été limité au strict nécessaire pour la compréhension des modèles utilisés. Mais cet ouvrage permettra à son lecteur de s'initier rapidement aux bases du traitement des signaux et de l'acquisition de données.

PARTIE 1

LE TRAITEMENT DES SIGNAUX ANALOGIQUES

Chapitre 1

Représentation des signaux

1.1 MODÉLISATION DES SIGNAUX

Un signal expérimental est une grandeur physique et doit donc être physiquement réalisable. Les mesures macroscopiques analogiques, réalisées à partir d'appareils de mesures comme un oscilloscope, fournissent des courbes « tension en fonction du temps » du type de celle représentée sur la figure 1.1. Ces signaux physiques sont représentés par des fonctions $s(t)$ à valeurs réelles d'une variable réelle t . Par conséquent, le signal possède les caractéristiques suivantes :

- énergie bornée ;
- amplitude bornée ;

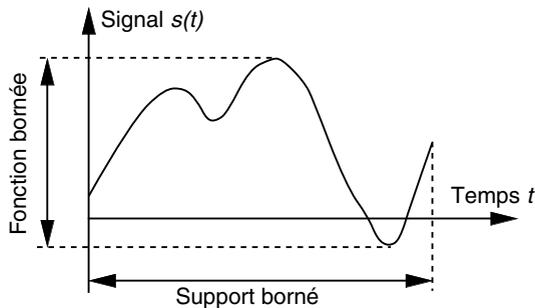


Figure 1.1. Enregistrement d'un signal physique.

- continu temporellement ;
- causal ($s(t) = 0$ pour $t < 0$) ;
- spectre du signal borné (tend vers 0 lorsque la fréquence tend vers l'infini).

Mais sur le plan théorique, pour la commodité du calcul et l'étude de certains phénomènes, les signaux sont représentés par des fonctions :

- à énergie théorique infinie ;
- avec des discontinuités (signal carré) ;
- définies sur l'ensemble des réels (signaux non causaux) ;
- à spectre du signal infini ;
- à valeurs complexes :

$$s(t) = A e^{j\omega t} = A(\cos(\omega t) + j \sin(\omega t))$$

Remarque : il est important de noter que l'introduction de tels modèles mathématiques de signaux réels conduit nécessairement à une simplification et nécessite donc une interprétation des résultats pour retrouver la réalité.

1.2 CLASSIFICATION DES SIGNAUX

Pour faciliter l'étude des signaux, différents modes de classification ou de modélisation peuvent être envisagés :

- représentation temporelle des signaux ;
- caractéristique énergétique ;
- représentation spectrale ;
- caractéristique morphologique (continu ou discret).

1.2.1 Représentation temporelle des signaux

La première classification, basée sur l'évolution du signal en fonction du temps, fait apparaître deux types fondamentaux (figure 1.2, page ci-contre) :

- les *signaux certains* (ou déterministes) dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat ;
- les *signaux aléatoires* (ou probabilistes) dont le comportement temporel est imprévisible et pour la description desquels il faut se contenter d'observations statistiques.

Parmi les signaux déterministes, on distingue les signaux périodiques satisfaisant à la relation suivante :

$$s(t) = s(t + T) \quad \text{avec } T \text{ la période} \quad (1.1)$$

Les signaux sinusoïdaux sont un cas particulier de ces signaux :

$$s(t) = A \sin[(2\pi/T)t + \varphi] \quad (1.2)$$

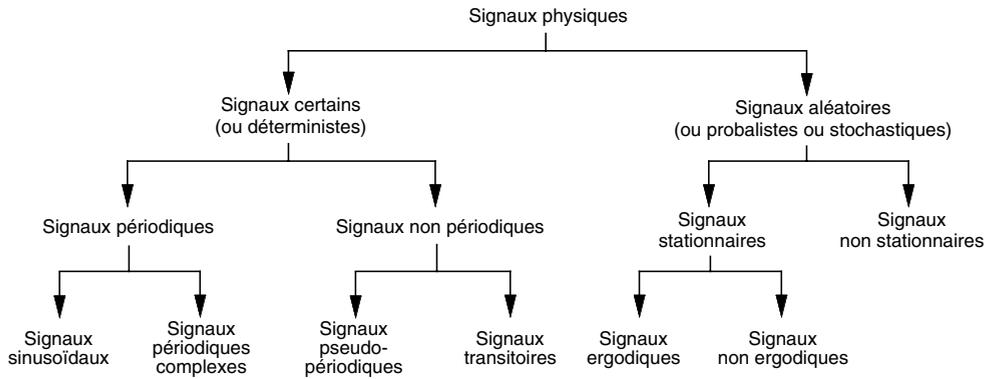


Figure 1.2. Classification des signaux observés dans le domaine temporel.

Les signaux non périodiques se composent d'une part des signaux pseudo-périodiques formés d'une somme de sinusoides de périodes différentes et d'autre part des signaux transitoires dont l'existence est limitée dans le temps. Ces signaux « certains » peuvent en principe être reproduits rigoureusement identiques à eux-mêmes.

En ce qui concerne les signaux aléatoires, ils sont dits *stationnaires* lorsque leur valeur moyenne est indépendante du temps, c'est-à-dire que les résultats de leur analyse statistique restent les mêmes quel que soit le moment où l'on commence l'observation d'une partie déterminée du signal.

De plus ces signaux aléatoires stationnaires sont *ergodiques* s'il est identique de faire une moyenne statistique à un instant donné sur différents essais ou de faire une moyenne temporelle suffisamment longue sur un seul de ces essais.

Dans cet ouvrage nous nous intéressons exclusivement au type des signaux certains, excepté dans le chapitre 6 où nous abordons les méthodes de traitements spécifiques des signaux aléatoires et en particulier du signal dit de bruit, qui fait partie de cette deuxième catégorie.

1.2.2 Classification énergétique

La puissance électrique instantanée fournie à une résistance R (ou conductance G) est définie comme le produit des valeurs instantanées de la tension $u(t)$ à ses bornes et du courant $i(t)$ qui la traverse :

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = Gu^2(t) \quad (1.3)$$

L'énergie dissipée sur un intervalle $[t_1, t_2]$, avec $t_1 < t_2$, est l'intégrale de cette puissance instantanée et se mesure en joules (J) :

$$W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = R \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) dt = G \int_{t_1}^{t_2} u^2(t) dt \quad (1.4)$$

Par conséquent la puissance moyenne $P(t_1, t_2)$, mesurée en watts (W), s'exprime sous la forme suivante :

$$P(t_1, t_2) = \frac{W(t_1, t_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (1.5)$$

Par extension on appelle énergie W_s et puissance moyenne P_s d'un signal $s(t)$, calculées sur un intervalle $[t_1, t_2]$, les valeurs quadratique et quadratique moyenne suivantes :

$$W_s(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} s^2(t) dt \quad (1.6)$$

et

$$P_s(t_1, t_2) = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} s^2(t) dt \quad (1.7)$$

Il est à remarquer que la valeur efficace du signal $s(t)$, calculée sur l'intervalle $[t_1, t_2]$, se définit à partir de l'expression 1.7 :

$$s_{\text{eff}}(t_1, t_2) = \sqrt{P_s(t_1, t_2)} \quad (1.8)$$

En considérant un intervalle s'étendant à tout l'axe réel, les relations 1.6 et 1.7 donnent l'énergie totale et la puissance moyenne totale :

$$W_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt \quad (1.9)$$

et

$$P_s = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} s^2(t) dt \quad (1.10)$$

Pour un signal périodique (période T_0), la puissance moyenne totale est calculée sur une période :

$$P_s = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} s^2(t) dt$$

Si le signal est représenté par une fonction complexe de la variable réelle t , les définitions sont équivalentes en remplaçant $s^2(t)$ par $|s(t)|^2$ ou $s(t) \cdot \bar{s}(t)$, où $\bar{s}(t)$ est la quantité complexe conjuguée de $s(t)$.

La plupart des signaux peuvent être classés à partir de ces deux grandeurs, énergie totale et puissance moyenne totale, suivant les deux ensembles :

– signaux à énergie finie qui satisfont à la condition suivante :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt < \infty \quad (1.11)$$

– signaux à puissance moyenne finie qui satisfont à :

$$0 < \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} s^2(t) dt < \infty \quad (1.12)$$

Les premiers signaux correspondent à tous les signaux de type transitoire et les seconds comprennent par exemple tous les signaux périodiques ou quasi périodiques. Deux remarques peuvent être faites à partir des deux expressions 1.11 et 1.12 :

- un signal à puissance moyenne finie non nulle a une énergie totale infinie ;
- un signal à énergie totale finie a une puissance moyenne nulle (cas des signaux physiques).

1.2.3 Classification spectrale

Un signal peut être classé suivant la distribution de son énergie ou de sa puissance en fonction de la fréquence (spectre du signal). Le domaine des fréquences occupé par son spectre ΔF est aussi appelé la largeur de bande du signal (figure 1.3) :

$$\Delta F = F_{\max} - F_{\min}$$

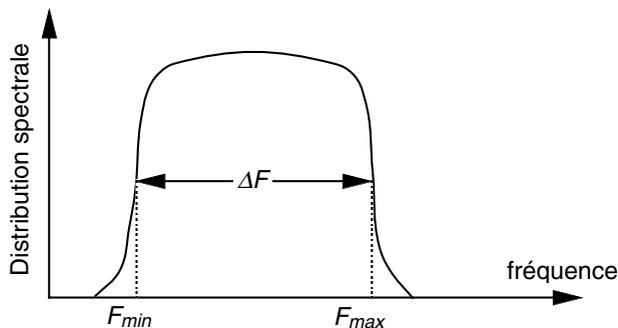


Figure 1.3. Distribution spectrale d'un signal avec la largeur de bande ΔF .

Cette caractéristique, exprimée en hertz (Hz), est absolue. Aussi il est nécessaire de la comparer au domaine de fréquences dans lequel se situe le signal. En considérant la fréquence moyenne $F_{\text{moy}} = (F_{\max} - F_{\min})/2$, on peut distinguer deux types de signaux :

- les signaux à bande étroite avec $\Delta F/F_{\text{moy}}$ petit (soit $F_{\max} \approx F_{\min}$) ;
- les signaux à large bande avec $\Delta F/F_{\text{moy}}$ grand (soit $F_{\max} \gg F_{\min}$).

Pour les signaux à bande étroite, il est possible de les classer par le domaine de variation de la fréquence moyenne F_{moy} :

- $F_{\text{moy}} < 250$ kHz signaux basses fréquences (BF)
- 250 kHz $< F_{\text{moy}} < 30$ MHz signaux hautes fréquences (HF)

- $30 \text{ MHz} < F_{\text{moy}} < 300 \text{ MHz}$ signaux très hautes fréquences (VHF)
- $300 \text{ MHz} < F_{\text{moy}} < 3 \text{ GHz}$ signaux ultra hautes fréquences (UHF)
- $F_{\text{moy}} > 3 \text{ GHz}$ signaux super hautes fréquences (SHF)

Lorsque la fréquence du signal devient très grande, pratiquement supérieure à quelques térahertz ($\text{THz} = 10^{12} \text{ Hz}$), la longueur d'onde est le paramètre de référence λ ($= c/F$ avec c vitesse de la lumière $300\,000 \text{ km/s}$) :

- $700 \text{ nm} < \lambda < 0,1 \text{ mm}$ signal lumineux infrarouge
- $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ signal lumineux visible
- $10 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$ signal lumineux ultraviolet

1.2.4 Les signaux numériques

Le temps est un paramètre important de classification. Comme nous venons de le voir, le traitement numérique des signaux conduit à faire la distinction entre les signaux dits à temps continus (signaux continus) et les signaux dits à temps discrets (signaux discrets ou échantillonnés). Un autre paramètre des signaux traités est à prendre en compte, c'est l'amplitude qui peut aussi être continue ou discrète (quantifiée).

Ainsi quatre formes de signaux, qui se retrouvent dans un système numérique de contrôle d'un processus physique, peuvent être distinguées (figure 1.4, page ci-contre) :

- signal à amplitude et temps continus (signal analogique) : $s(t)$;
- signal à amplitude discrète et temps continu (signal quantifié) : $s_q(t)$. Ce signal correspond à celui qui est fourni à la sortie d'un circuit convertisseur numérique-analogique pour la commande d'un actionneur (chapitre 12) ;
- signal à amplitude continue et temps discret (signal échantillonné) : $s(nT_e)$. Ce signal est obtenu à l'aide d'un circuit échantillonneur-bloqueur et est utilisé par un circuit convertisseur analogique numérique pour obtenir un signal logique utilisable par un ordinateur (chapitre 12) ;
- signal à amplitude discrète et temps discret (signal logique) : $s_q(nT_e)$. Ce dernier cas correspond en réalité à une suite de nombres codés en binaire. Ces nombres, utilisés au sein d'un ordinateur, se transmettent sous la forme de plusieurs signaux de type numérique 0 V (0 logique) ou 5 V (1 logique) se propageant en parallèle : 8 signaux pour un nombre codé sur 8 bits.

Définition. On appelle *numérisation* d'un signal l'opération qui consiste à faire passer un signal de la représentation dans le domaine des temps et des amplitudes continus au domaine des temps et des amplitudes discrets. Cette opération de numérisation d'un signal peut être décomposée en deux étapes principales :

- échantillonnage ;
- quantification.

La restitution (ou l'interpolation) constitue une autre phase qui intervient lors du passage du signal numérique au signal analogique : commande d'un actionneur.

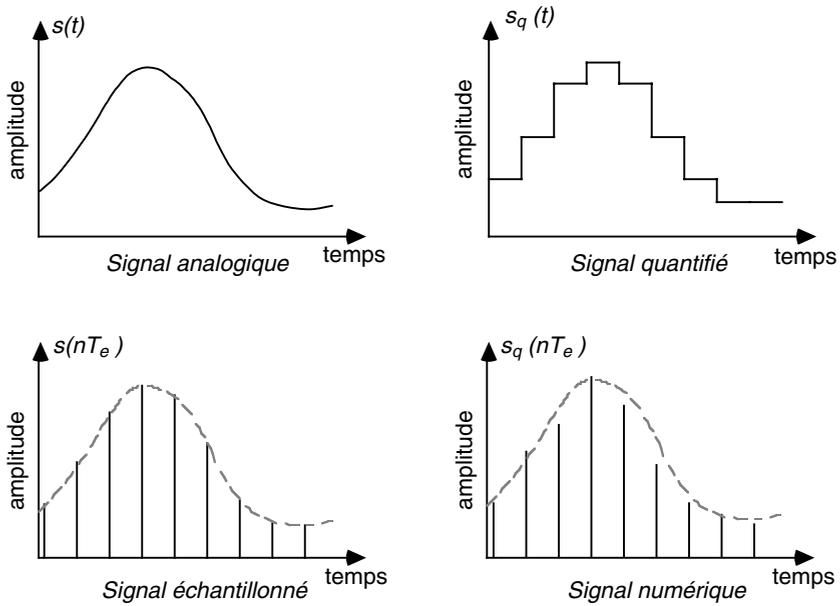


Figure 1.4. Classification morphologique des signaux.

Ces trois étapes sont indissociables. En effet, le signal, étant le support physique d'une information, doit conserver au cours de ces modifications tout le contenu informatif initial. Cette condition, ajoutée à la notion de coût limite d'un système, va être à la base de la numérisation des signaux et de l'étude du traitement numérique.

