

SIGNAUX & SYSTEMES

COURS

M. TOMCZAK

Ecole Supérieure d'Informatique
et Applications de Lorraine

1ère Année

Université Henri Poincaré, Nancy 1

CONTENU

INTRODUCTION GENERALE

◆ Plan du cours	1
◆ Généralités, objectifs	2 à 10
◆ Aperçu historique	11 à 12
◆ Synthèse	13
◆ Bibliographie	14 à 15

1. PREMIERE PARTIE : SIGNAUX

◆ Introduction	1
• Généralités	1 à 3
• Classification	4 à 6
• Classification énergétique	7
• Signaux de référence	8 à 13
• Compléments / distributions	14 à 16
◆ 1. Transformée de Fourier, spectre, corrélation	17
• Développement en série de Fourier	18 à 22
• Justification heuristique de la TF	23
• Transf. de Fourier d'un signal réel - Exemple	24
• Transf. de Fourier - Propriétés	25 à 29
• Cas des signaux continus à énergie finie	30
• Cas des signaux continus à puissance finie	31 à 32
• Cas des signaux à temps discret	33 à 35
• Largeur de bande d'un signal	36 à 37
• Exemples d'applications	38 à 39
□ Sonar, radar à corrélation	38 à 40
□ Spectroscopie RMN 13C	40 à 43
◆ 2. Transformée de Laplace, équations diff.	44
• Introduction	44
• Définitions	45 à 46
• Propriétés de la transformée de Laplace	47 à 51
• Exemples	52
• Inversion de la Transformée de Laplace	53 à 54
• Equations différentielles	54
◆ 3. Transformée en z, équat. aux différences	55
• Introduction	55

• Exemples	56
• Propriétés	57 à 59
• Transformée en z inverse	60 à 62
• Equations aux différences	63
◆ 4. Signaux échantillonnés	64
• Introduction	64
• Numérisation de signaux	65 à 66
• Convertisseurs A/N	67
• Convertisseurs N/A	68
• Types d'échantillonnage	69 à 70
• Transformées des signaux échantillonnés	71 à 72
• Systèmes échantillonnés	73

2. DEUXIEME PARTIE : SYSTEMES

◆ Introduction	1
• Généralités et exemples	1 à 4
• Classification	5
• Définitions	6 à 9
• Conclusion	10
◆ 1. Systèmes Invariants Linéaires continus	11
• Réponse Impulsionnelle et convolution	11
• Réponse fréquentielle d'un S.I.L.	12
• Fonction de transfert d'un S.I.L.	13 à 14
• Classification spectrale	14
• S.I.L. physiques	15
• Fonctions de transfert rationnelles	16
• Réponse libre	17
• Modes	17 à 18
• Stabilité	18
• Réponse forcée et autres réponses	19
• Critère de stabilité de Routh	20 à 22
• Autres définitions et généralités	23
• Représentations fréquentielles	24
• Représentations fréquentielles : Black	24
• Représentations fréquentielles : Bode	25 à 28
• Représentations fréquentielles : Nyquist	28 à 30
• Systèmes intégrateurs	31 à 32
• Systèmes d'ordre 1	33 à 34
• Systèmes d'ordre 2	35 à 39
• Systèmes d'ordre n	40
• Fonctions de transfert des systèmes bouclés	41 à 44
◆ 2. S.I.L. à temps discret	45
• Réponse impulsionnelle et convolution	45

• Réponse fréquentielle, fonction de transfert	46 à 47
• Equations aux différences	47
• Définitions, propriétés	48 à 49
• Critères de stabilité	49 à 51
◆ 3. Systèmes échantillonnés	52
• Définition	52
• Fonction de transfert échantillonnée	53 à 54
• Cas du bloqueur d'ordre 0 en amont	55
• FT des systèmes échantillonnés en cascade	56 à 57
• FT des systèmes échantillonnés bouclés	57 à 58
• Stabilité des systèmes échantillonnés	59

3. TROISIEME PARTIE : APPLICATIONS

◆ 1. Commande analogique	1
• Introduction, définitions	1
• Commande en boucle fermée : généralités	2 à 5
• Avantages de la commande en boucle fermée	5 à 6
• Formulation du problème	7 à 9
• Notion de correction	10 à 12
• Stabilité : critère de Nyquist	13 à 15
• Marges de stabilité	16
• Précision	17 à 20
• Rapidité	21
• Situation générale	22 à 24
• Correction PID	
◆ 2. Echantillonnage et reconstruction	25
• Signal échantillonné (rappels)	25
• Spectre d'un train d'impulsions modulées	25 à 27
• Théorème de Shannon	28 à 29
• Reconstruction de signaux : généralités	30
• Interpolateur idéal, reconstructeur de Shannon	30 à 32
• Reconstruction par approximation polynomiale	32
• Cas du bloqueur d'ordre 0	33 à 34
• Pré-filtrage analogique	35 à 38
• Choix de la fréquence d'échantillonnage	38 à 40
◆ 3. Transposition analogique / numérique	41
• Introduction	41
• Formulation du problème	42 à 43
• Cas de la commande numérique	43 à 45
• Cas du filtrage numérique	46
• Méthodes à entrée imposée	47 à 49
□ Invariance impulsionnelle	48
□ Invariance indicielle	48
□ Invariance de la rampe	49
• Correspondance pôles / zéros	49 à 50

• Méthodes de quadrature	51 à 54
□ Approximation rectangulaire	51 à 52
□ Approximation d'Euler	52 à 53
□ Approximation trapézoïdale	53
□ Pré-compensation de distorsion	54
◆ 4. Transformée de Fourier Discrète (TFD)	55
• Motivations - Définition	55 à 57
□ Ecriture matricielle	57
• Propriétés de la TFD	58 à 62
• Transformée de Fourier Rapide (TFR ou FFT)	63 à 68
□ Principe de l'algorithme	64 à 68
◆ 5. Filtrage analogique	69
◆ 6. Filtrage numérique	
◆ 7. Commande échantillonnée	
◆ 8. Analyse spectrale	

Notations et symboles

b : bruit
B : largeur de bande, bande passante
C, R : correcteur, régulateur
 $C_n (c_n)$: coefficient de Fourier en continu (discret)
 C_∞ : ensemble des fonctions continues à dérivées continues
 $D_1\%$: taux de 1er dépassement
e : erreur
E : énergie
f : fréquence
 f_c : fréquence de coupure
 f_e : fréquence d'échantillonnage
 f_{max} : fréquence maximale
F, G, H, ... : fonctions de transfert de systèmes
F(s) : sensibilité complémentaire
F[] : transformée de Fourier
F_D[] : transformée de Fourier discrète
I : intervalle principal
I : matrice identité
j : $\sqrt{-1}$
k : variable d'indiciage en temps discret, gain d'un système continu
K : période d'un signal discret, gain proportionnel
 K_p : gain proportionnel
 K_s : gain statique
L[] : transformée de Laplace monolatère
L[] : transformée de Laplace bilatère
log, log₁₀ : logarithme de base 10
Log, Ln : logarithme naturel
m : facteur de résonance ou de surtension
max (u) : valeur maximale de u
min (u) : valeur minimale de u
mod : modulo
M(ω) : module d'une fonction de transfert
 M_ϕ : marge de phase
 M_g : marge de gain
N : nombre d'échantillons

p : perturbation
P : puissance
Q : facteur de qualité
r : rampe unitaire
rect : impulsion rectangulaire
s : variable complexe de Laplace
 $s_i (z_i)$: pôles, racines en s (z)
S[x] : sortie du système S correspondant à l'entrée x
sinc : sinus cardinal
t : variable temps continu
 t_{D1} : temps de 1er dépassement
 t_m : temps de montée
 t_r : temps de réponse
T : période ou durée d'un signal continu, constante de temps d'un système, retard pur
 T_d : temps d'action dérivée
 T_e : période d'échantillonnage
 T_i : temps d'action intégrale
 T_p : pseudopériode
VP : valeur principale de Cauchy
 w_N : facteur de phase
x, y, ... : signal scalaire continu ou discret
 x_T : signal T-périodique (de période T)
 x' : signal échantillonné
 x^* : conjugué complexe de x
 \dot{x}, \ddot{x}, \dots : dérivées successives de x
 $x^{(n)}$: dérivée n-ième
 \tilde{x} : signal x reconstruit
 \hat{x} : version "déformée", approximative ou périodisée de x
 $x(n-m)_N : x([n - m] \text{ mod } N)$
X, Y, ... : transformée (Fourier, Laplace monolatère, z monolatère)
H, V, ... : transformée de Laplace ou en z bilatère
 $\bar{X}(z) : X(z)|_{z=e^{sT_e}}$
 x°, X° : signal numérique et sa transformée
 $\underline{X}, \underline{X}$: vecteurs colonne, ou matrices
 \underline{X}^T : vecteur colonne ou matrice transposé

y_L, y_F : réponses libre, forcée
z : variable complexe de la transformée en z
Z[] : transformée en z monolatère
Z[] : transformée en z bilatère
1 : échelon
 α : abscisse de convergence
 Γ : lieu de Nyquist
 $\delta(t)$: impulsion de Dirac
 $\delta(k)$: impulsion discrète
 $\delta_T(t)$: peigne de Dirac de période T
 Δ : durée d'une impulsion, discriminant
 Δf : pas d'échantillonnage fréquentiel
 $\Delta(f), \Delta(s)$ ou $\Delta(z)$: transformées de δ
 $\Delta G(s)$: petite variation sur G(s)
 Δx_k : différence $x_k - x_{k-1}$
 ϵ : erreur
 ζ : coefficient d'amortissement (syst. du 2^{ème} ordre)
 Λ : intervalle de convergence (T. en z)
 σ : partie réelle de la variable s, écart-type
 σ^2 : variance
 Σ : intervalle de convergence (T. de Laplace)
 $\Sigma(s)$: fonction de sensibilité
 τ : retard
 $\varphi, \phi(\omega)$: phase ou déphasage
 ϕ_x : fonction d'autocorrélation de x
 ϕ_{xy} : fonction d'intercorrélacion des signaux x et y
 Φ_x : densité spectrale d'énergie ou de puissance
 ω : pulsation
 ω_c : pulsation de coupure
 ω_{cr} : pulsation critique (phase de la réponse fréquentielle = -180°)
 ω_e : pulsation d'échantillonnage
 ω_N : pulsation de Nyquist (= $\omega_e/2$)

ω_r : pulsation de résonance
 ω_0 : pulsation propre (syst. du 2^{ème} ordre)
 ω_1 : pulsation à laquelle le module de la réponse fréquentielle = 1
 $|x|$: module de x
 $\|x\|$: norme de x
 $x \leftrightarrow X$: paire de transformées
 $\angle X$ ou $\arg(X)$: argument de X
 ∇x_k : différence avancée $x_{k+1} - x_k$
 $\dim(x)$: dimension de x
 $\Im\{x\}$: partie imaginaire de x
 $\Re\{x\}$: partie réelle de x
 (f, g) : produit scalaire de f et g
 $\ll (>)$: très inférieur (supérieur)
 $\#$: peu différent, voisin de
 \approx : à peu près égal
 \equiv : à identifier à
 Δ
 \triangleq : égal par définition
 \rightarrow : correspond à, a pour conséquence
 \xrightarrow{r}
 $\xrightarrow{r} =$: correspond à, est égal, d'après r ou en posant r
 \Leftrightarrow : équivalence, condition nécessaire et suffisante
 \Rightarrow : implication
 \in : appartient à
 \forall : quelque soit
 \exists : il existe, abréviation de "existe(nt)"
 $*$: produit de convolution
 \otimes_N : convolution circulaire, d'ordre N
 $\prod_{n=1}^p a_n : a_1 \cdot a_2 \dots a_p$
 $\sum_{n=1}^p a_n : a_1 + a_2 + \dots + a_p$

B_0 : Bloqueur d'ordre zéro
BIBO : *Bounded Input - Bounded Output* (stabilité)
BF : Basse Fréquence, Boucle Fermée
BO : Boucle Ouverte
BP : Bande Proportionnelle
CAN : Convertisseur Analogique/Numérique
CC : Courant Continu
CNA : Convertisseur Numérique/Analogique
dB : décibel
D : action Dérivée
E/S : Entrée / Sortie
FFT : *Fast Fourier Transform* (voir TFR)
FIR : *Finite Impulse Response* (voir RIF)
FT : Fonction de Transfert
FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
Hz : hertz
I : action Intégrale
IIR : *Infinite Impulse Response* (voir RII)
LTI : *Linear Time Invariant* (voir SIL)
MIMO : *Multiple Input - Multiple Output* (multivariable)
NL : Non-Linéaire
P : action Proportionnelle
PID : Proportionnelle Intégrale Dérivée (actions)
RIF : Réponse Impulsionnelle Finie
RII : Réponse Impulsionnelle Infinie
RMN : Résonance Magnétique Nucléaire
RSB : Rapport Signal sur Bruit
SAR : Système à Réguler
SED : Système à Evénements Discrets
SIL : Système Invariant Linéaire
SISO : *Single Input - Single Output* (monovariable)
SNR : *Signal to Noise Ratio* (voir RSB)
TF : Transformée de Fourier
TFD : Transformée de Fourier Discrète
TFR : Transformée de Fourier Rapide
TL : Transformée de Laplace
TOR : Tout Ou Rien
Tz : Transformée en z

INDEX	
A	
abscisse de convergence	1.46
action	
dérivée	3.11,22
intégrale	3.11-12
proportionnelle v. gain	3.10,22
actionneur	3.2-4,9-10,21,39
additif (effet) v. conditions initiales	2.7
additivité	2.40; 3.4-5,11,16
amortissement	2.35; 3.23
coefficient d'	1.17,36-37,40-43; 3.55
analyse spectrale ou harmonique	1.17,36-37,40-43; 3.55
apériodique v. système du 2 ^{ème} ordre	
approximation	
d'Euler v. Euler	
de Padé v. Padé	
impulsionnelle	3.46
polynômiale v. reconstruction	3.51
rectangulaire	
trapézoïdale v. Tustin	3.5,13,17,19,21
asservissement	1.30,32,34,38-39
autocorrélation (fonction d')	
B	
bande	
de transition	3.35
largeur de	1.36-37,42; 3.35
passante v. largeur de bande	2.14; 3.21,35-36,46-47
proportionnelle	3.10
Bessel (filtre de)	3.36
bilinéaire (transformation)	2.49
v. Tustin	
Black	
diagramme de	2.24
lieu de	2.24
Blackman (fenêtre de)	3.46
blocage	1.65
bloqueur	
d'ordre 0	1.68,73; 2.55
3.30,32,33-34,37,39,42-45,47-48	
C	
impulsionnel	1.65,73; 2.55; 3.42
Bode (diagramme de)	2.24,25-28
d'un dérivateur	2.26
d'un intégrateur	2.26
d'un 1 ^{er} ordre	2.27
d'un 2 ^{ème} ordre	2.27,39
boucle; bouclage	
v. système bouclé et contre-réaction	
Bromwich (contour de)	3.14-15
bruit	1.3,5,38-39,42
2.7; 3.2,4,7-9,17,19,35	
blanc	1.2,39
de quantification	1.66
Butterworth	
approximation de	3.36
filtre de	3.36-37
C	
CAN	1.64,67; 3.42
CNA	1.64,68; 2.55; 3.32,34,42
CAO de l'automatique	2.25
capteur	3.2-4,35,39
cascade v. système	
Cauchy (théorème de)	3.13
Cauer (filtre de)	3.36
causal v. signal et système	
chaîne (directe et de retour) v. ligne	
changement d'échelle de temps	1.26,37,48
codage	1.65-66
commande v. régulation	2.2; 3.1-4
analogique	3.1-24
échantillonnée	3.32,36,41-45
en boucle fermée	3.2-24
avantages de la	3.5-6
objectifs de la	3.4,8
en boucle ouverte	3.1,5-6
feedforward	3.3
formulation du probl.	3.7-9
par anticipation	3.3
signal de v. signal de commande	
situation générale	3.22-24
synthèse de la loi de	3.8-9
comparateur	3.2
compensation v. correction	3.5

composante harmonique	1.20,23	complexe	1.49,59
conditions auxiliaires v. cond. initiales		déroulement rétrograde	1.26,59
conditions initiales	1.63; 2.15,17-19	diagramme	
effet additif des	2.15	asymptotique v. Bode	2.25
conjugaison complexe	1.26	de Black v. Black	
consigne v. signal de consigne		de Bode v. Bode	
constante de temps	2.18,33,40; 3.4-6,11,21,23	de Nyquist v. Nyquist	
différence	1.58	fonctionnel v. schéma fonctionnel	
contre-réaction	2.1,41	différence de retour	3.7
convertisseur v. CAN et CNA		Dirichlet (conditions de)	1.25
convolution (produit de)	3.60	discrétisation	1.28; 3.55
circulaire	1.59	v. échantillonn. idéal et transposition A/N	
complexe	1.14; 2.11,15,19; 3.30	distorsion	1.72; 3.54
continu	1.14; 2.45,49,53	distribution	1.9-10,15-16; 3.25-26
discret	1.15	de Dirac v. impulsion	
par un Dirac	1.35	TF des	1.31
périodique	1.27,28-29	dualité temps - fréquence	1.17,22,28-29
TF d'un	1.47,51		
TL d'un			
Tz d'un	1.57		
E			
correcteur v. régulateur		écart de réglage v. erreur	1.2
à avance de phase	3.50	écart-type	1.2
à retard de phase	3.50	échantillonnage	
correction (notion de) v. régulation	2.30; 3.10-12	1.41-42,64-67,69-70; 2.59; 3.25-40,49,55	
1.30,32,34,38-39,51,59; 3.55		avec maintien	1.69; 3.25,27,31
circulaire	3.62	avec moyennage	1.70
correspondance pôles-zéros	3.49-50	choix de la fréq. d'éch.	3.39-40
coupe-bande v. système et filtre		en fréquence	3.46
couplage	2.1	idéal ou de Dirac	1.14,28,70; 3.25
critère		par multiplication	1.69; 3.25
de Jury v. Jury		réel	1.69; 3.25,27
de Nyquist v. Nyquist		régulier ou périodique	1.64
de Routh v. Routh		théorème d' v. Shannon	3.25
de Routh modifié v. Routh modifié		transformées d'un signal échant.	
du revers v. Nyquist simplifié		1.71-73	
critique v. système du 2 ^{ème} ordre		échantillonneur	1.69; 2.52,55-58
croisillon	3.68	fictif	2.52
cycle limite	2.59	échantillonneur-bloqueur	3.37
		fictif	3.47
D			
deglitch	1.73	échelle de temps (changement d')	1.26,37,48
densité spectrale		échelon	1.8-10,13,31,52,56
d'énergie	1.30		3.17-18,20,34,47
de puissance	1.32	éléments simples (décomp. en)	
dépassement v. taux de 1 ^{er}	3.23	1.46,53-54,60,62; 2.59	
déphasage	1.72; 2.12,24-27	énergie (d'un signal)	1.7,30; 3.26
3.27,31,36,46		entrée v. signal d'entrée	
dérivateur pur	2.26	entrée imposée (méth. à)	3.48-49
dérivation	1.27,47; 2.30		

entrelacement fréquentiel temporel	3.63 3.63-64	3.63-64	3.63-64
équation aux différences	1.63; 2,4,6,8,47,49,55	1.63; 2,4,6,8,47,49,55	1.63; 2,4,6,8,47,49,55
équation caractéristique	2.16-18,20,41,48; 3.14	2.16-18,20,41,48; 3.14	2.16-18,20,41,48; 3.14
équation d'état v. état			
équation différentielle	1.54; 2,4,6-8,15-17,32,33,35,55	1.54; 2,4,6-8,15-17,32,33,35,55	1.54; 2,4,6-8,15-17,32,33,35,55
erreur			
d'accélération	3.17-18	3.17-18	3.17-18
de position ou statique	3.17-18,20	3.17-18,20	3.17-18,20
de reconstruction	3.34,40	3.34,40	3.34,40
de traînage ou de vitesse	3.17-18	3.17-18	3.17-18
quadrique moyenne	1.18	1.18	1.18
relative de quantification	1.66	1.66	1.66
signal d'erreur ou d'écart	3.2-3,4,7,9-12,17-20,22	3.2-3,4,7,9-12,17-20,22	3.2-3,4,7,9-12,17-20,22
stationnaire	3.17-18	3.17-18	3.17-18
état v. représentation d'état			
Euler (approximation d')	3.52	3.52	3.52
extrapolateur; extrapolation	1.65; 3.30	1.65; 3.30	1.65; 3.30
d'ordre 0 v. bloqueur d'ordre 0			
F			
facteur			
d'échelle	3.54	3.54	3.54
de phase	3.57,63	3.57,63	3.57,63
de qualité	2.39	2.39	2.39
de résonance	2.39	2.39	2.39
fenêtre(s)	3.46	3.46	3.46
de Blackman	v. Blackman		
de Hamming	v. Hamming		
méthode des			
v. approximation impulsionnelle			
rectangulaire	3.31,46	3.31,46	3.31,46
triangulaire	3.46	3.46	3.46
filtre			
v. système			
analogique	3.35-38,41,46	3.35-38,41,46	3.35-38,41,46
anti-repliement	1.64,68,73; 2.59; 3.28,35,44-45	1.64,68,73; 2.59; 3.28,35,44-45	1.64,68,73; 2.59; 3.28,35,44-45
anti-recouvrement			
v. anti-repliement			
de garde			
v. anti-repliement			
de lissage	1.65,68; 3.32,34	1.65,68; 3.32,34	1.65,68; 3.32,34
de reconstruction	3.30	3.30	3.30
numérique	3.38,41,46-47,55	3.38,41,46-47,55	3.38,41,46-47,55
rapport signal sur bruit (ou à bruit)			
v. RSB			
réalisable (fonction de transfert)	2.47-48	2.47-48	2.47-48
reconstitution			
v. reconstruction			
reconstituer de Shannon			
v. interpolateur idéal			
reconstruction	1.64,73; 3.25-40,42	1.64,73; 3.25-40,42	1.64,73; 3.25-40,42
généralités	3.30	3.30	3.30
par approx. polynom.	3.32-33	3.32-33	3.32-33
recouvrement			
v. repliement			
rect (fonction)	v. signal rectangulaire		
récurrence (relation de)	1.61	1.61	1.61
référence (signal de)	v. consigne		
régime			
établi ou permanent	2.12,19,48; 3.5,12,17-20	2.12,19,48; 3.5,12,17-20	2.12,19,48; 3.5,12,17-20
forcé ou libre	v. réponse		
transitoire	1.44; 2.19,48	1.44; 2.19,48	1.44; 2.19,48
régulateur; régulation			
v. correcteur (-tion) et commande			
de tendance	3.23	3.23	3.23
numérique	3.41,43-44	3.41,43-44	3.41,43-44
P	3.10,21	3.10,21	3.10,21
PD	3.11	3.11	3.11
PI	3.11-12	3.11-12	3.11-12
PID	3.1,12,44	3.1,12,44	3.1,12,44
PID numérique	3.1	3.1	3.1
RST	3.3	3.3	3.3
tout ou rien (TOR)	2.3; 3.10	2.3; 3.10	2.3; 3.10
relaxation	1.41	1.41	1.41
Remez (algorithme de)	3.46	3.46	3.46
repliement (spectral)	1.71; 2.59	1.71; 2.59	1.71; 2.59
répliques spectrales	3.28; 35,47-48,50	3.28; 35,47-48,50	3.28; 35,47-48,50
réponse			
forcée	2.16,19,48; 3.49	2.16,19,48; 3.49	2.16,19,48; 3.49
fréquentielle	2.10; 3.48	2.10; 3.48	2.10; 3.48
d'un SIL continu	2.12	2.12	2.12
intégrateur	3.33-36,50	3.33-36,50	3.33-36,50
d'un SIL discret	2.32	2.32	2.32
module et argument	2.24	2.24	2.24
harmonique	v. fréquentielle		
impulsionnelle	2.10	2.10	2.10
d'un SIL continu			
2.11-13,53,55; 3.31-33,46			

image	1.45	1.45	1.45
impulsion	3.25,47	3.25,47	3.25,47
de Dirac			
discrète	1.9-10,15-16,31,45,52; 3.17	1.9-10,15-16,31,45,52; 3.17	1.9-10,15-16,31,45,52; 3.17
rectangulaire	1.11,56; 2.45	1.11,56; 2.45	1.11,56; 2.45
sinusoïdale	1.13	1.13	1.13
1.39,42			
incertitude (principe d')	1.37	1.37	1.37
installation	v. système		
instant d'échantillonnage	3.2	3.2	3.2
1.14,66; 2.52; 3.25,29,47			
intégrateur pur	2.26,31-32	2.26,31-32	2.26,31-32
intégration	1.48; 2.23,30	1.48; 2.23,30	1.48; 2.23,30
3.18-20,23,51			
intercorrélation (fonction d')	v. corrélation		
1.30,32,34,38-39,51			
interpolateur; interpolation			
idéal	1.65; 3.30-32	1.65; 3.30-32	1.65; 3.30-32
linéaire	3.30-31,39	3.30-31,39	3.30-31,39
quasi-idéal	3.33	3.33	3.33
3.31-32			
intervalle principal	1.33	1.33	1.33
invariance			
impulsionnelle	3.48	3.48	3.48
indicielle	3.48	3.48	3.48
de la rampe	3.40	3.40	3.40
invariant (système)	v. système		
inversion chronologique	v. déroulement rétrograde		
Jury (critère de)	2.50-51	2.50-51	2.50-51
L			
Lagrange (polynômes de)	3.32	3.32	3.32
largeur de bande	v. bande		
Larmor (oscillat. ou fréq. de)	1.40,42	1.40,42	1.40,42
Legendre (filtre de)	3.36	3.36	3.36
ligne de retour	2.41	2.41	2.41
ligne directe	2.41	2.41	2.41
linéarité	1.26,47,57; 3.58	1.26,47,57; 3.58	1.26,47,57; 3.58
v. système linéaire			
loi de commande			
v. commande et signal de commande			
M			
maintien	v. blocage		
marge de gain	3.16	3.16	3.16
marge de module	3.16	3.16	3.16
marge de phase	3.16	3.16	3.16
marge de retard	3.16	3.16	3.16
matrice de transfert	2.23	2.23	2.23
mémorisation	1.65-66,68	1.65-66,68	1.65-66,68
Mellin-Fourier (formule de)	1.45	1.45	1.45
mesure v. signal de mesure			
2.17-18,48; 3.23			
modèles			
dominants v. pôles dominants			
oscillants ou oscillatoires	2.17	2.17	2.17
modulation	1.27-28,49	1.27-28,49	1.27-28,49
N			
Newton-Gregory (formule de)	3.33	3.33	3.33
numérisation	1.65-67	1.65-67	1.65-67
Nyquist	2.28-30	2.28-30	2.28-30
critère de	3.13-15	3.13-15	3.13-15
critère simplifié ou du revers	3.15	3.15	3.15
diagramme de	2.24,28-30	2.24,28-30	2.24,28-30
3.15			
construction du	2.30	2.30	2.30
d'un dérivateur	2.28	2.28	2.28
d'un intégrateur	2.28	2.28	2.28
d'un 1er ordre	2.28-29	2.28-29	2.28-29
d'un 2ème ordre	2.28-29	2.28-29	2.28-29
fréquence de			
v. pulsation de Nyquist			
lieu de	2.28; 3.14	2.28; 3.14	2.28; 3.14
O			
opérateur retard v. retard			
ordre (d'un système)	2.15,47	2.15,47	2.15,47
original	1.45	1.45	1.45
orthogonalité de signaux	1.19,30	1.19,30	1.19,30
P			
Padé (approximations de)	3.45	3.45	3.45
Paley-Wiener (théorème de)	1.37; 3.28	1.37; 3.28	1.37; 3.28
papillon (algorithme)	3.64-68	3.64-68	3.64-68
Parseval (relation de)	1.21,26,30; 3.61	1.21,26,30; 3.61	1.21,26,30; 3.61
partie impaire d'un signal	1.24	1.24	1.24
partie paire d'un signal	1.24	1.24	1.24
passerelle	v. système et filtre		
passerelle	v. système et filtre		
passerelle	v. système et filtre		
pas d'échantillonnage	v. période d'échantillonnage		
pas de quantification	1.66	1.66	1.66
peigne de Dirac	1.13-15,28-29,31,70	1.13-15,28-29,31,70	1.13-15,28-29,31,70
3.27			
période	1.6,12,20	1.6,12,20	1.6,12,20
d'échantillonnage			
1.14,64; 2.59; 3.34,45,49			

periodisation	1.15,20,28-29,51,71	1.15,20,28-29,51,71	1.15,20,28-29,51,71
3.55			
perturbation	2.1,7,42	2.1,7,42	2.1,7,42
3.1,2-3,5-7,10,12,17,19-20,23,39			
PID v. régulateur			
Plancherel (théorème de)	1.17	1.17	1.17
pôles	1.53,62; 2.16,18,20-22,40,48,59	1.53,62; 2.16,18,20-22,40,48,59	1.53,62; 2.16,18,20-22,40,48,59
3.13-15,17-18,23,49,50			
dominants	2.40	2.40	2.40
polynôme auxiliaire	2.22	2.22	2.22
point critique	2.30; 3.14-16	2.30; 3.14-16	2.30; 3.14-16
pompage	3.9	3.9	3.9
précision	1.40,42	1.40,42	1.40,42
pré-compensation (de distorsion)	3.54	3.54	3.54
précision	3.4-5,8-9,12,17-20,23	3.4-5,8-9,12,17-20,23	3.4-5,8-9,12,17-20,23
préfiltrage analogique	1.72; 3.35-38	1.72; 3.35-38	1.72; 3.35-38
prewarping	v. pré-compensation		
procédé	v. système		
processus	v. système		
produit scalaire	1.18; 3.61	1.18; 3.61	1.18; 3.61
proportionnalité	2.7	2.7	2.7
proportionnelle (P)	3.10	3.10	3.10
(commande; correction; régulation)			
proportionnelle dérivée (PD)	3.11	3.11	3.11
(commande; correction; régulation)			
proportionnelle intégrale (PI)	3.11	3.11	3.11
(commande; correction; régulation)			
pseudopériode	2.38	2.38	2.38
pseudopériodique			
v. système du 2ème ordre			
puissance (d'un signal)	1.7,32	1.7,32	1.7,32
pulsation	1.12; 2.24-30	1.12; 2.24-30	1.12; 2.24-30
d'échantillonnage	3.26-27,29	3.26-27,29	3.26-27,29
de coupure	2.14,39; 3.30,54	2.14,39; 3.30,54	2.14,39; 3.30,54
de Nyquist	3.28,35,47-48,50	3.28,35,47-48,50	3.28,35,47-48,50
de résonance	2.39	2.39	2.39
propre	2.35; 3.23	2.35; 3.23	2.35; 3.23
Q			
quadrature (méthodes de)	3.51-54	3.51-54	3.51-54
quantification	1.65-66; 2.59; 3.41	1.65-66; 2.59; 3.41	1.65-66; 2.59; 3.41
R			
radar	1.38-39	1.38-39	1.38-39
Radix 2 (algorithme)	3.63,64-68	3.63,64-68	3.63,64-68
Radix 4 (algorithme)	3.63	3.63	3.63
raie v. composante harmonique			
rampe	1.8,52,56; 3.18,47	1.8,52,56; 3.18,47	1.8,52,56; 3.18,47
rapidité	3.4-6,11,21,23-24	3.4-6,11,21,23-24	3.4-6,11,21,23-24
rapport signal sur bruit (ou à bruit)			
v. RSB			
réalisable (fonction de transfert)	2.47-48	2.47-48	2.47-48
reconstitution			
v. reconstruction			
reconstituer de Shannon			
v. interpolateur idéal			
reconstruction	1.64,73; 3.25-40,42	1.64,73; 3.25-40,42	1.64,73; 3.25-40,42
généralités	3.30	3.30	3.30
par approx. polynom.	3.32-33	3.32-33	3.32-33
recouvrement			
v. repliement			
rect (fonction)	v. signal rectangulaire		
récurrence (relation de)	1.61	1.61	1.61
référence (signal de)	v. consigne		
régime			
établi ou permanent	2.12,19,48; 3.5,12,17-20	2.12,19	

sinusoïdal	1.2-4,12,27,31,39,52,56 2.12; 3.29,37,39-40	à réponse impulsionnelle finie (RIF)	2.49; 3.46
amorti	1.41-43	à réponse impulsionnelle infinie (RII)	2.49; 3.41,46
spatial	1.1	à représentation discrète v. <i>discrét</i>	
stationnaire	1.4,5	à retard pur	2.23,48; 3.1
temporel	1.1	à retour unitaire	2.41,44; 3.7
transitoire	1.4,6	à zéros "instables"	2.23
sinus cardinal	1.24; 3.31,33	au repos	2.15,47
somme	1.58	analogique	2.3; 3.41-42
théorème de la	1.50	batch	2.5-6
sonar	1.38-39	bouclé	2.1,3,41-44,48,57-58 3.2-24
sortie v. <i>signal de sortie</i>		causal	2.8,11,15,45,46,53; 3.30
spectre	1.17,20,22-24,28-37,43 3.25-30,32,34-35	classification	2.5
d'amplitude	1.24	classification spectrale	2.14
d'énergie	1.34	continu	2.2,5,8,52,55 3.1-24,41; 3.45,49,54
de phase	1.24	coupe-bande	2.14
de raies	1.20,22,41-43	d'ordonnement	
spectroscopie RMN	1.40-43	v. <i>organisationnel</i>	
Split Radix (algorithme)	3.63	d'ordre n	2.40
stabilité	2.8	de traitement numérique	1.65,73; 2.2,45
BIBO	3.4-5,9-10,13-16,18,30,49-53	de type 0	2.30
critères de v. <i>critères</i>		déterministe	2.5,7,10
d'un SIL continu	2.11,18,20-22 3.13-16	discrét	2.2,5,8,52,55
d'un SIL discrét	2.46,48-51	du 1er ordre	2.27,29,33-34,40 3.4,21,24
d'un système échantillonné	2.59	du 2ème ordre	2.27,29,33,35-40 3.4,23-24,35-36
limite de	2.8,18,32	apériodique	2.36
marges de	2.22; 3.16,45	critique	2.37
relative	2.22	dominant (méth. du)	3.23
superposition (principe de)	2.7; 3.7	pseudopériodique	2.37-39
suréchantillonnage	1.68; 3.32,38	dynamique	2.4-6
symétrique (matrice)	3.57	en boucle fermée v. <i>bouclé</i>	
synthèses directe et indirecte	3.44	en cascade ou en série	2.1,12-13,25,46,56-57; 3.36
système	2.1-59	échantillonné	1.73
à comportement différentiel	2.48	généralités	2.1-4
à comportement intégral	2.48	hybride	2.4
à événements discrets (SED) v. <i>séquentiel</i>	2.5-6	installation ou procédé	
à bande étroite	2.14	ou processus	
à charges successives v. <i>batch</i>		ou système à réguler	2.1; 3.3,43
à déphasage non-minimal	2.23; 3.1	intégrateur	2.31-32; 3.53
à inertie	2.32	invariant	2.5,7,10,11,45,53,59
à intégration	2.48	lien entre FT et rép. fréquentielle	2.14,46
à large bande	2.14; 3.35		
à paramètres concentrés	2.5-6		
à paramètres distribués	2.5-6		
à réguler (SAR) v. <i>installation</i>	3.43-44		

linéaire	2.5,7,10,11,15,45,53,59	définition	1.17
linéarisable	2.8,9	discrète v. <i>TFD</i>	
logique	2.3,6	distributions	1.31
MIMO v. <i>multivariable</i>		inverse	1.17
monovariante (SISO)	2.1-2,5-6	justification heuristique	1.23
non-linéaire	3.1	lien entre X et X'	1.71; 3.26-27
multivariable (MIMO)	2.2-3,5-6,23	lien entre X° et X'	1.71
non-récursif v. <i>système RIF</i>	2.5,8-9,59	propriétés	1.25-29
numérique	2.4; 3.41-42	rapide (TFR) v. <i>TFD</i>	
organisationnel	2.3	signal à temps discrét	1.35,43 1.33-35
numérique	2.3	signal continu à E finie	1.30
organismatique	2.14	signal continu à P finie	1.31-32
passé-bas	2.14; 3.48	signal périodique	1.31
passé-haut	2.14	signal réel	1.24
récursif v. <i>système RII</i>		transf. de Fourier discrète (TFD)	1.35
représentation d'état	2.4,6,8,23	d'ordre N (définition)	3.57-68
représentation entrées/sorties	3.1	écriture matricielle	3.57,65
résonant	2.4	périodicité de la	3.58-59
séquentiel	2.2,4-6	propriétés de la	3.58-62
SIL	2.10	rapide (TFR ou FFT)	2.2; 3.63-68
continu	2.11-44	transformée de Laplace (TL)	1.44-54
à temps discrét	2.45-51	bilatère	1.44
SISO v. <i>monovariante</i>		définitions	1.44-46
sous-système	2.1,3,40	inverse	1.45,53-54
stable v. <i>stabilité</i>		lien avec la TF	1.46
statique	2.4	lien entre X(s) et X'(s)	1.72
stochastique	2.5,7	lien entre X'(s) et X(z)	1.72
structure hiérarchisée des	2.10	monolatère	1.45,51
variant v. <i>syst. invariant</i>	2.5,7	propriétés	2.13,16,52,56-58; 3.7,17 1.47-51
T			
taux de 1er dépassement	2.38; 3.24	résolution d'équat. diff.	1.54
Tchebycheff (filtre de)	3.36	transformée en z (Tz)	1.55-63,73; 3.48
temps		bilatère	1.55
d'action dérivée	3.11	inverse	1.60-62
d'action intégrale	3.11	lien avec la TF	1.57; 3.26
de conversion	1.64	lien entre X; X° et X'	1.71
de montée	2.38; 3.21	lien entre X'(s) et X(z)	1.72
de pic ou 1er dépassement	2.38	modifiée	1.73
de réponse à n%	2.38; 3.24	monolatère	1.55; 2.46,52
train d'impulsions	1.73	propriétés	1.57-59
modulées	1.14,70; 2.52-54; 3.25	résolution d'équat. aux diff.	1.63
spectre d'un	3.25-27	translation	1.26,31,35,48-49,57
transducteur	3.3	fréquentielle circulaire	3.60
transfert de boucle v. <i>FTBO</i>	3.7	temporelle circulaire	3.58-59
transformée bilinéaire v. <i>Tustin</i>	2.49	transmittance v. <i>fonction de transfert</i>	
transformée de Fourier (TF)	1.17-43	transposition A / N	2.8,52; 3.41-54
	3.26,55	cas de la commande	3.43-45
convergence	1.17,25,30,31,33	cas du filtrage	3.46

formulation du probl. 3.42-43
Tustin (approximation de) 3.53-54

V

valeur finale (théorème de la) 1.50,58; 2.19,38
valeur initiale (théorème de la) 1.50,58
variance 1.2

Z

zéros 2.16,23,48; 3.13-14,49-50
d'échantillonnage 3.49

SIGNAUX & SYSTEMES

PLAN DU COURS :

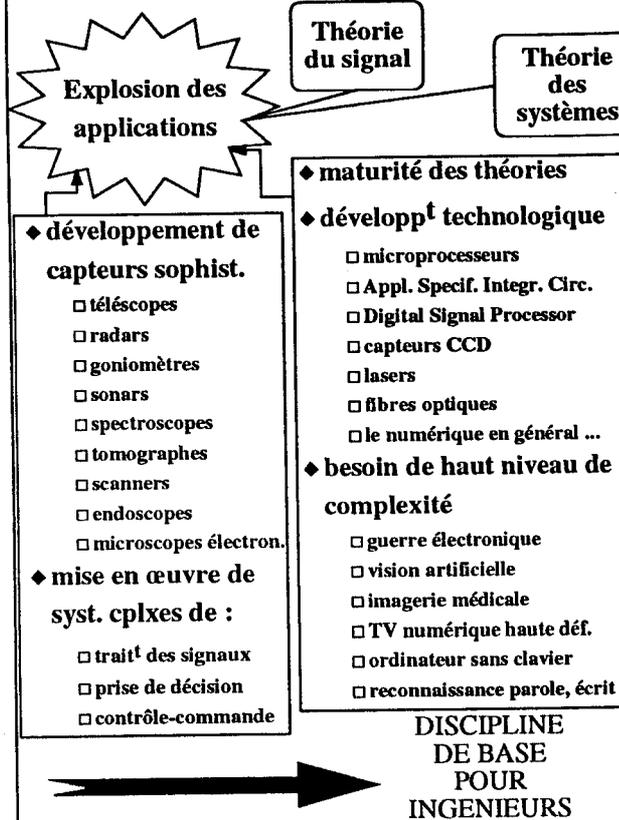
- ◆ INTRODUCTION
- ◆ I. SIGNAUX
- ◆ II. SYSTEMES
- ◆ III. APPLICATIONS
 - COMMANDE DE SYSTEMES
 - FILTRAGE DE SIGNAUX
 - AUTRES ...

OBJECTIFS :

Familiariser les étudiants avec les concepts et outils théoriques de base de l'analyse des signaux et systèmes, continus, échantillonnés et discrets

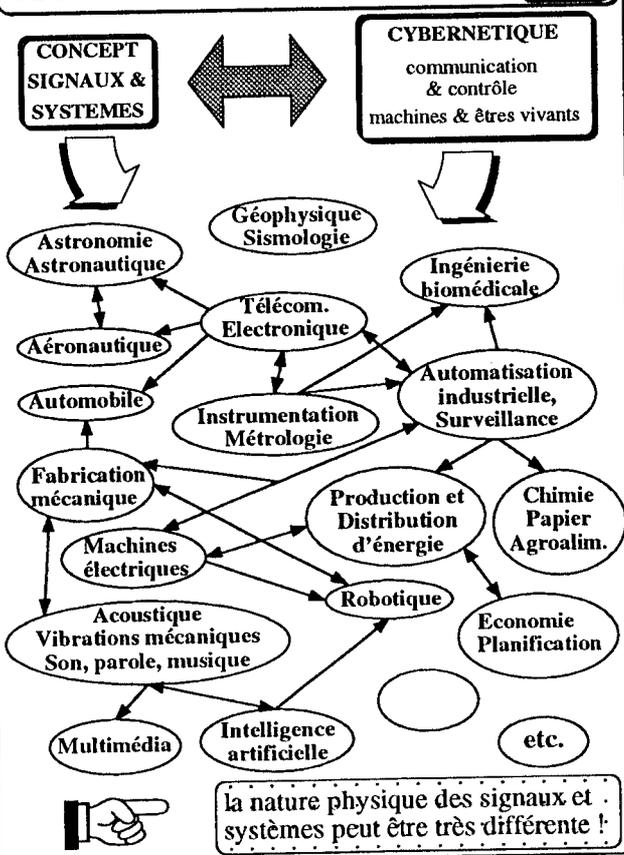
SIGNAUX & SYSTEMES

1



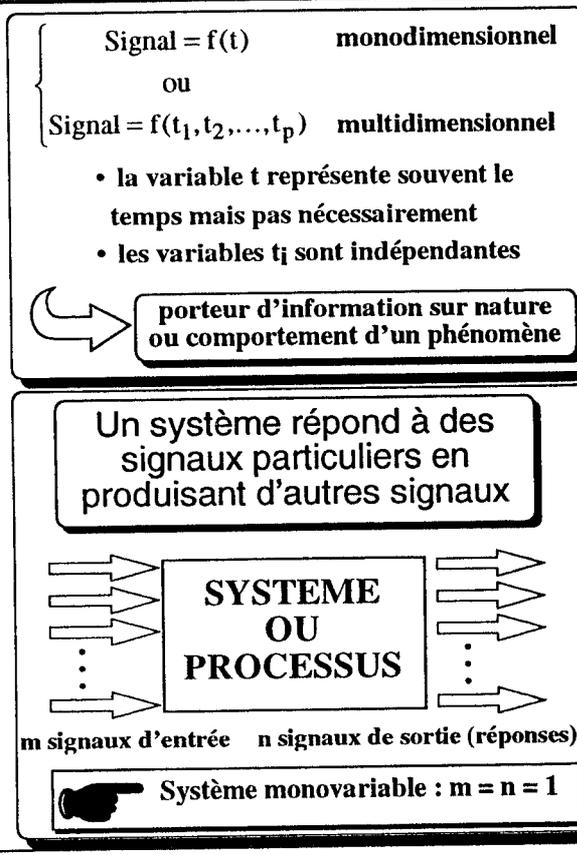
SIGNAUX & SYSTEMES

2



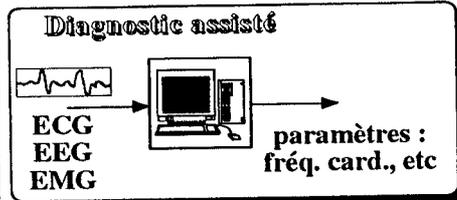
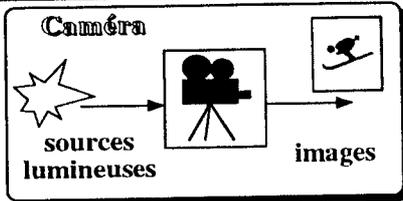
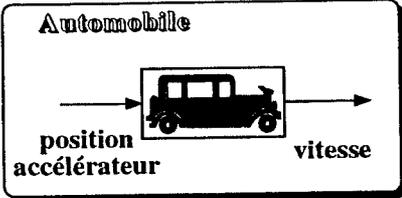
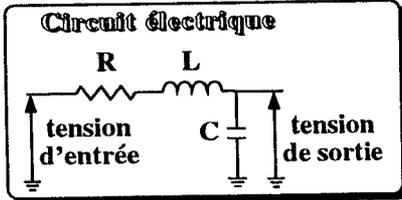
SIGNAUX & SYSTEMES

3



SIGNAUX & SYSTEMES 4

EXEMPLES



SIGNAUX & SYSTEMES 5

VARIETE DES SITUATIONS

CARACTERISATION D'UN SYSTEME SPECIFIQUE

↳ Comprendre comment il répond à diverses sollicitations

ex.: longues recherches menées pour comprendre le système auditif humain

ELABORATION D'UN SYSTEME SPECIFIQUE

↳ qui transforme (traite) des signaux d'une façon donnée

ex.: prédiction en économie, gestion de ressources
un algorithme utilise l'histoire d'une série chronologique pour prédire son comportement

RESTAURATION DE SIGNAUX DEGRADEES

ex.: communication à bord d'un avion,
restauration d'enregistrements musicaux anciens

SIGNAUX & SYSTEMES 6

TRAITEMENT D'IMAGES

↳ Corrections d'erreurs, mise en évidence de caractéristiques

ex.: Astronomie, correction des effets atmosphériques ou des erreurs de transmission, détection de relief

MODIFICATION (AMELIORATION) DES CARACTERISTIQUES D'UN SYSTEME

↳ en sélectionnant les entrées
 en le combinant avec d'autres

↳ Commande automatique de systèmes

ex.: pilotage des avions modernes (instables par nature)

L'importance du concept Signaux & Systèmes tient donc à la grande variété de champs d'application (avérés et potentiels)

mais aussi

↳ au grand nombre d'idées, de techniques analytiques et de méthodologies qui ont été et sont encore développées

SIGNAUX & SYSTEMES 7

Histoire de ce développement

↩ plusieurs siècles en arrière

Au départ, ces travaux concernaient des problèmes spécifiques, mais se sont souvent avérés d'une portée plus générale

EXEMPLE : ANALYSE DE FOURIER

↳ à la base de l'analyse fréquentielle des signaux & systèmes

↳ de l'astronomie des Babyloniens

↳ aux maths/physique des 18^e-19^e s.

↳ plus récemment, des dizaines d'applications :
- émet./récept. AM/FM
- sûreté de fonctionnement
- restauration d'images, etc.

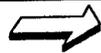
SIGNAUX & SYSTEMES 8

Dans certains exemples précédents :



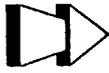
SIGNAUX CONTINUS

ex.: musique analogique = signal audio continu



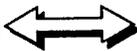
SIGNAUX DISCRETS

ex.: consommation journalière d'électricité, signaux traités ou délivrés par un ordinateur



Cette distinction existe également pour les systèmes (☐ aussi systèmes hybrides)

Concepts et méthodes très proches



Développement séparé

Les applications concernées étaient différentes :

Continu : physique puis électronique, télécomm.

Discret : analyse numérique, statistiques, séries chronologiques (économiques, démograph., ...)

Avec l'avènement des technologies numériques, la tendance est maintenant à l'unification

SIGNAUX & SYSTEMES 9

En effet, le numérique est avantageux :

Progrès de la μ électronique

circuits de calcul numérique toujours plus puissants et rapides

applications difficiles voire impossibles en analogique (filtres à phase linéaire, systèmes adaptatifs, ...)

Avantages des circuits intégrés : fiabilité, reproductibilité, tenue dans le temps, tolérances, consommation, coût

production de masse aisée

Nature algorithmique des traitements

flexibilité (un syst. num. est programmable)

on "numérise" de plus en plus tous les traitements (ex. archi-connu : disque laser)

les systèmes modernes font intervenir les deux types de signaux

les deux théories deviennent indissociables



Inconvénients : gamme de fréquence limitée, difficultés de reconstruction précise, précision limitée (nbre de bits de codage)

SIGNAUX & SYSTEMES 10

Exemples propres au numérique :

Son : CD, DAT, DAB (FM), reconnaissance et synthèse de la parole

Télécom : MIC (téléph. multiplexée), annulation d'écho, égalisation adaptative, GSM (téléph. cellulaire), Fax, RNIS

Automobile : ABS, allumage, injection, contrôle et sécurité, radioguidage, régulation de trafic

Image : reconnaissance de formes, images de synthèse, images satellites, TV numérique, vision robotique

Biomédical : EEG, ECG, EMG, radiographie, scanners

Automatique : vision artificielle, commande de robots, SNCC

Instrumentation : multimètre, oscilloscope, analyseur de spectres, réduction de bruit

Militaire : radar, sonar, cryptage, guidage



Globalement, les deux disciplines qui nous concernent sont :



l'Automatique

le Traitement du Signal

SIGNAUX & SYSTEMES 11

Aperçu historique

Antiquité :

étude des périodicités astrales, régulation de niveau d'eau pour assurer une régulation de débit (grecs), clepsydre, relation empirique entre la périodicité de vibrations musicales produite par une corde et sa longueur (Pythagore)

1620 : régulation de température d'un incubateur (Cornelis Drebbel)

1671 : analyse "spectrale" de la lumière (Isaac Newton)

1681 : régulation de pression pour chaudière à vapeur (Denis Papin)

1687 : 1ère étude mathématique du problème de Pythagore (Newton)

1738 : solution générale (Daniel Bernoulli)

1755 : détermination des coeff. de cette solution (coeff. de la série de Fourier) par Euler

1769 : régulation de vitesse (James Watt)

XVIII^e et XIX^e s. : contrib. des mathématiciens et physiciens : étude de la stabilité, propagation de la chaleur (Fourier 1822), étude math. des fluctuations du courant électrique (général. Fourier)

1830-40 : exploitation de signaux électriques, télégraphe (Morse, Wheatstone, ...)

1840 : 1ers travaux sur l'analyse (équ. diff.) et la stabilité des syst. bouclés (par l'astronome G.B. Airy)

1868 : stabilité (J.C. Maxwell : rôle des racines de l'équ. caract., syst. d'ordre 2 et 3)

1876 : téléphone (Bell)

1877 : généralisat. des travaux de Maxwell (Routh)

1893 : stabilité des systèmes non-linéaires (A.M. Lyapounov)

1895-96 : radio TSF (Marconi, Popov, ...)

1904-07 : naissance de l'électronique : détection et amplification de faibles signaux (Fleming)

1920 : débit d'information sur une voie télégraph. (Nyquist, Hartley)

1927 : amplificateurs électroniques bouclés (Black)

1930 : analyse harmonique généralisée (Wiener)

1932 : étude fréquentielle de la stabilité (Nyquist)

1933-34 : théorie des signaux et systèmes stochastiques (Wiener, Kolmogorov)

1936 : régulateur PID (Callender)

1938 : réponse fréquentielle des systèmes (Bode), théorème de décomposition des signaux aléatoires (Wold)

2ème guerre mondiale : optimisation des moyens de télécom., radar, réglage du PID (Ziegler et Nichols), amplificateurs bouclés (Bode), ...

1947 : réglage de correcteurs (Nichols), théorie des systèmes échantillonnés (Hurewicz)

1948 : cybernétique (Wiener), stabilité et correction (W.R. Evans), invention du transistor

1949 : filtrage optimal (Wiener), théorie mathématique de la communication (Shannon)

1956-57 : naissance de la commande optimale

1960 : filtrage de Kalman, 1ers circuits intégrés

Par la suite : filtrage et commande adaptatifs, commande prédictive, robuste, intelligente, analyse temps/fréq., maturation des théories, généralisation (systèmes non-linéaires, signaux non-stationnaires, ...), adaptation aux technologies nouvelles (numérique), etc.

Ressources scientifiques

Théorie des processus aléatoires

Physique générale

Algèbre linéaire et analyse fonctionnelle

Théorie du signal et de l'information
Théorie des systèmes

Ressources technologiques

Electronique
Electrotechnique

Informatique

Physique appliquée

Traitement du signal
Automatique continue

Fonctions	caractérisation	régulation
détection	estimation	asservissement
classification	optimisation	simulation
codage	modélisation	diagnostic
mise en forme	identification	etc.
Méthodes		méthodes fréq.
analyse t/f	analyse spectrale	commande robuste
analyse t/éch.	filtrage	commande optimale, adaptative
filtrage opt., adapt.		etc.
Moyens	instrumentation calculateurs / algorithmes	

BIBLIOGRAPHIE :

Aström K.J., Wittenmark B. : Computer-controlled systems, theory and design. Prentice-Hall 1984, 1997.
 Bellanger M. : Traitement numérique du signal, théorie et pratique. Masson 1996.
 Delmas J.P. : Eléments de théorie du signal : les signaux déterministes. Ellipses 1991.
 De Coulon F. : Théorie et traitement des signaux. Dunod 1984.
 De Larminat P. : Automatique, commande des systèmes linéaires. Hermès 1996.
 Dieulesaint E., Royer D. : Automatique appliquée, tome 1, Systèmes linéaires de commande à signaux analogiques. Masson 1987.
 Dieulesaint E., Royer D. : Automatique appliquée, tome 2, Systèmes linéaires de commande à signaux échantillonnés. Masson 1990.
 Flaus J.M. : La régulation industrielle. Hermès 1994.
 Franklin G.F., Powell J.D., Eimami Naeimi A. : Feedback control of dynamic systems. Prentice-Hall 1994.
 Ifeachor E.C., Jervis B.W. : Digital signal processing, a practical approach. Addison-Wesley 1996.
 Isermann R. : Digital control systems, volume I, Fundamentals, deterministic control. Springer-Verlag 1989.
 Kunt M. : Traitement numérique des signaux. Dunod 1981.
 Labarrère M., Krief J.P., Gimonet B. : Le filtrage et ses applications. Cepadues Edition 1978.
 Max J., Lacoume J.L. : Méthodes et techniques de traitement du signal. Dunod 2000 (5e édition).
 Ogata K. : Modern control engineering. Prentice-Hall 1990.
 Ogata K. : Discrete-time control systems. Prentice-Hall 1987.
 Oppenheim A.V., Schaffer R.W. : Discrete-time signal processing. Prentice-Hall 1989.
 Oppenheim A.V., Willsky A.S., Young I.T. : Signals and systems. Prentice-Hall 1983.

Proakis J.G., Manolakis D.G. : Digital signal processing, principles, algorithms, and applications. Mc Millan Publishing Company 1992.
 Reinhard H. : Cours de mathématiques du signal. Dunod Université 1986.
 Rivoire M., Ferrier J.L. : Cours d'automatique, tome 1, Signaux et systèmes. Eyrolles 1989.
 Rivoire M., Ferrier J.L. : Cours d'automatique, tome 2, Asservissement, régulation, commande analogique. Eyrolles 1990.
 Rivoire M., Ferrier J.L. : Cours d'automatique, tome 3, Commande par ordinateur, identification. Eyrolles 1990.
 Soize C. : Méthodes mathématiques en analyse du signal. Masson 1993.
 Thomas Y. : Signaux et systèmes linéaires. Masson 1992.
 Thomas Y. : Signaux et systèmes linéaires, Exercices corrigés. Masson 1992.