

Automatique

**Systèmes linaires, non linéaires,
à temps continu, à temps discret,
représentation d'état**

Yves Granjon

4^e ÉDITION

DUNOD

Illustration de couverture : © Phonlamai Photo/shutterstock.com

© Dunod, 2001, 2010, 2015, 2021

21 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083267-5

Table des matières

AVANT-PROPOS

XV

PREMIÈRE PARTIE MODÉLISATION DES SIGNAUX ET DES SYSTÈMES LINÉAIRES CONTINUS

CHAPITRE 1 • MODÉLISATION DES SYSTÈMES LINÉAIRES. NOTION DE FONCTION DE TRANSFERT	3
1.1 Introduction	3
1.2 Notion de signal	4
1.2.1 Signaux temporels	4
1.2.2 Principe de causalité	4
1.2.3 Signaux non temporels	4
1.3 Le cas des systèmes linéaires	5
1.4 La transformation de Laplace	5
1.4.1 Définition	5
1.4.2 Propriétés fondamentales de la transformation de Laplace	5
1.4.3 Transformée de Laplace inverse	8
1.5 Transformées de Laplace de quelques signaux usuels	9
1.5.1 Échelon unité	9
1.5.2 Rampe ou échelon de vitesse	9
1.5.3 Impulsion unitaire	10
1.5.4 Signal sinusoïdal	10
1.5.5 Signaux quelconques	11
1.6 Fonction de transfert d'un système	11
1.6.1 Définition	11
1.6.2 Mise en cascade de deux systèmes	12
1.6.3 Original d'une fonction de transfert	12
1.7 Résolution d'un problème à l'aide de la fonction de transfert	12
1.7.1 Principe	12
1.7.2 Exemples	13
EXERCICES	15
SOLUTIONS	18

CHAPITRE 2 • MODÉLISATION FRÉQUENTIELLE DES SIGNAUX TEMPORELS. NOTION DE SPECTRE	25
2.1 Description des signaux	25
2.1.1 L'exemple du signal sinusoïdal	25
2.1.2 Représentation d'un signal composé	26
2.1.3 Notion de spectre	26
2.2 Cas des signaux périodiques	27
2.2.1 Décomposition en série de Fourier	27
2.2.2 Exemple de calcul d'un spectre : signal en dents de scie	28
2.2.3 Décomposition en série de Fourier à l'aide de Mathematica	29
2.3 Cas des signaux non périodiques à énergie finie	30
2.3.1 Définition	30
2.3.2 Transformée de Fourier et spectre des signaux non périodiques à énergie finie	30
2.3.3 Exemple de calcul du spectre d'un signal non périodique à énergie finie	31
2.3.4 Relation entre la transformée de Fourier et la transformée de Laplace	31
2.3.5 Égalité de Parseval	32
2.3.6 Calcul d'une transformée de Fourier à l'aide de Mathematica	33
EXERCICES	33
SOLUTIONS	38
CHAPITRE 3 • MODÉLISATION FRÉQUENTIELLE DES SYSTÈMES LINÉAIRES CONTINUS	51
3.1 Définitions	51
3.2 Diagrammes de Bode	52
3.2.1 Définition	52
3.2.2 Exemple : diagramme de Bode d'un système du premier ordre	52
3.3 Approche méthodique du tracé des diagrammes de Bode	54
3.3.1 Objectif	54
3.3.2 Construction d'un diagramme de gain asymptotique	54
3.3.3 Méthode rapide	56
3.3.4 Cas particuliers	57
3.4 Diagramme de Nyquist	60
3.4.1 Définition	60
3.4.2 Méthode de tracé rapide	60
EXERCICES	61
SOLUTIONS	65
CHAPITRE 4 • ÉTUDE SYSTÉMATIQUE DES SYSTÈMES DU PREMIER ET DU SECOND ORDRE	78
4.1 Méthodes d'étude et définitions	78
4.2 Étude des systèmes du premier ordre	78
4.2.1 Mise en équation	78
4.2.2 Réponse à une impulsion de Dirac	79
4.2.3 Réponse indicielle	79
4.2.4 Réponse à une entrée en rampe	80
4.2.5 Étude fréquentielle d'un système d'ordre 1	81

4.3	Étude des systèmes du second ordre	84
4.3.1	Mise en équation	84
4.3.2	Réponse indicielle	84
4.3.3	Diagramme de Bode	86
4.3.4	Diagramme de Nyquist	93
EXERCICES		94
SOLUTIONS		98

DEUXIÈME PARTIE AUTOMATIQUE DES SYSTÈMES LINÉAIRES

CHAPITRE 5 • PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DE L'AUTOMATIQUE. MISE EN ÉQUATION DES ASSERVISSEMENTS LINÉAIRES		109
5.1	Introduction	109
5.2	Inconvénients de la commande en boucle ouverte	109
5.3	Principe de la commande en boucle fermée	110
5.4	Modélisation d'une boucle de régulation	112
5.5	Le problème de la stabilité	113
5.6	Les performances d'un système régulé	113
EXERCICES		114
SOLUTIONS		118
CHAPITRE 6 • STABILITÉ DES SYSTÈMES LINÉAIRES ASSERVIS		125
6.1	Critère mathématique de stabilité	125
6.1.1	Énoncé du critère de stabilité	125
6.1.2	Inconvénients du critère mathématique	127
6.2	Critère algébrique de Routh	127
6.2.1	Principe	127
6.2.2	Exemple	128
6.3	Critère de Nyquist	129
6.4	Critère du revers	134
6.5	Marges de stabilité	134
6.5.1	Concept de marge de stabilité	134
6.5.2	Marge de gain	135
6.5.3	Marge de phase	137
6.6	Influence du gain sur la stabilité	139
EXERCICES		140
SOLUTIONS		142

CHAPITRE 7 • PERFORMANCES DES SYSTÈMES LINÉAIRES ASSERVIS	149
7.1 Problématique générale	149
7.2 Précision d'un système asservi	150
7.2.1 Erreur statique ou erreur de position	150
7.2.2 Erreur de vitesse ou erreur de traînage	152
7.3 Rapidité des systèmes régulés	153
7.3.1 Définitions	153
7.3.2 Temps de montée d'un système du second ordre	155
7.3.3 Généralisation	157
7.4 Limitation du dépassement	157
7.4.1 Dépassement pour un système du second ordre	157
7.4.2 Relation entre la marge de phase et le dépassement en boucle fermée pour un système du second ordre	158
7.4.3 Généralisation	159
7.5 Influence du gain statique en boucle ouverte sur les performances en boucle fermée	159
7.6 Étude de cas	160
7.6.1 Énoncé du problème. Cahier des charges	160
7.6.2 Étude de la stabilité	161
7.6.3 Réglage du gain	161
7.6.4 Prédiction du temps de montée en boucle fermée	162
7.6.5 Conclusion	162
EXERCICES	163
SOLUTIONS	165
CHAPITRE 8 • CORRECTION DES SYSTÈMES LINÉAIRES ASSERVIS	170
8.1 Cahier des charges d'un asservissement	170
8.2 Principe général de la correction d'un système	171
8.3 Actions correctives élémentaires	171
8.3.1 Correcteur proportionnel	171
8.3.2 Correcteur intégral	172
8.3.3 Correcteur à action dérivée	173
8.4 Inconvénient fondamental des actions correctives élémentaires	175
8.5 Action proportionnelle intégrale. Correcteur à retard de phase	176
8.6 Action proportionnelle dérivée. Correcteur à avance de phase	179
EXERCICES	182
SOLUTIONS	184

TROISIÈME PARTIE

AUTOMATIQUE DES SYSTÈMES CONTINUS NON LINÉAIRES

CHAPITRE 9 • ANALYSE DES ASSERVISSEMENTS CONTINUS NON LINÉAIRES	197
9.1 Introduction	197
9.1.1 Généralités	197
9.1.2 Différents types de non-linéarités	197
9.2 Étude du domaine de linéarité d'un système	198
9.2.1 Le phénomène de saturation	198
9.2.2 Détermination du domaine de linéarité d'un système asservi	199
9.3 Caractéristiques de certains organes non linéaires	201
9.3.1 Systèmes tout ou rien	201
9.3.2 Systèmes à hystérésis	202
9.3.3 Caractéristiques complexes	202
9.4 Asservissements non linéaires séparables	203
9.5 Étude d'un système séparable par la méthode du premier harmonique	205
9.5.1 Principe	205
9.5.2 Gain complexe équivalent	205
9.5.3 Notion de lieu critique	206
9.5.4 Exemple	206
9.5.5 Justification de la méthode du premier harmonique	207
9.5.6 Méthode de calcul approché du gain complexe équivalent	207
EXERCICES	207
SOLUTIONS	209
CHAPITRE 10 • MÉTHODES D'ÉTUDE DES ASSERVISSEMENTS CONTINUS NON LINÉAIRES	213
10.1 Stabilité des systèmes non linéaires	213
10.1.1 Fonction de transfert généralisée	213
10.1.2 Principe de l'étude	214
10.1.3 Exemple	214
10.2 Méthode d'étude par le lieu de Cypkin	216
10.2.1 Principe	216
10.2.2 Exemple	217
10.3 Méthode du plan de phase	219
10.3.1 Principe	219
10.3.2 Tracé des trajectoires	219
10.3.3 Analyse des trajectoires et diagnostic du système	221
EXERCICES	222
SOLUTIONS	223

QUATRIÈME PARTIE AUTOMATIQUE DES SYSTÈMES ÉCHANTILLONNÉS

CHAPITRE 11 • MODÉLISATION DES SIGNAUX ET DES SYSTÈMES ÉCHANTILLONNÉS	229
11.1 Introduction	229
11.2 Principes fondamentaux de l'échantillonnage des signaux	230
11.2.1 Définition	230
11.2.2 Spectre d'un signal échantillonné	231
11.2.3 Théorème de Shannon	232
11.3 Exemples de signaux échantillonnés simples	232
11.3.1 Impulsion unité	232
11.3.2 Échelon unité	233
11.4 Transformée en z des signaux échantillonnés	234
11.4.1 Définition	234
11.4.2 Intérêt de la transformée en z	235
11.4.3 Propriétés de la transformée en z	235
11.4.4 Transformée en z de signaux usuels	236
11.4.5 Calculs de transformées en z à l'aide de Mathematica	237
11.5 Fonction de transfert en z	237
11.5.1 Relations entre échantillons de sortie et échantillons d'entrée	237
11.5.2 Définition de la fonction de transfert en z	239
11.5.3 Exemples de fonctions de transfert en z	240
11.6 Transformée de Fourier à temps discret	241
11.6.1 Définition	241
11.6.2 Exemple	241
11.7 Comportement fréquentiel des systèmes échantillonnés	243
11.7.1 Principes généraux	243
11.7.2 Exemple	243
11.8 Relations entre les modèles à temps continu et à temps discret	244
11.8.1 Problématique	244
11.8.2 Équivalence à la dérivation	245
11.8.3 Équivalence à l'intégration	247
11.8.4 Équivalence à la réponse impulsionnelle. Équivalence modale	247
11.8.5 Équivalence d'une association de plusieurs systèmes	248
EXERCICES	249
SOLUTIONS	252
CHAPITRE 12 • STABILITÉ ET PERFORMANCES DES SYSTÈMES ÉCHANTILLONNÉS ASSERVIS	264
12.1 Mise en équation des asservissements échantillonnés	264
12.1.1 Fonction de transfert en boucle fermée	264
12.1.2 Relation temps continu – temps discret en boucle fermée	265

12.2	Stabilité des asservissements échantillonnés	266
12.2.1	Critère mathématique de stabilité	266
12.2.2	Critère algébrique de Jury	268
12.2.3	Utilisation du critère de Routh	270
12.2.4	Influence de la fréquence d'échantillonnage sur la stabilité	270
12.3	Asservissements continus commandés ou corrigés en temps discret	272
12.3.1	Définition	272
12.3.2	Interfaçage entre un système discret et un système continu	272
12.3.3	Première méthode d'étude simple : recherche d'un système à temps continu équivalent	273
12.3.4	Deuxième méthode d'étude simple : recherche d'un système à temps discret équivalent	274
12.4	Précision des asservissements échantillonnés	274
12.4.1	Erreurs de position et de vitesse	274
12.4.2	Précision d'un système échantillonné du premier ordre	275
12.5	Performances dynamiques d'un système échantillonné	277
12.5.1	Fonction de transfert échantillonnée équivalente à un système du second ordre	277
12.5.2	Prévision des performances dynamiques	278
EXERCICES		281
SOLUTIONS		283
CHAPITRE 13 • CORRECTION DES SYSTÈMES ÉCHANTILLONNÉS ASSERVIS		299
13.1	Principes généraux	299
13.1.1	Rappel du cahier des charges d'un asservissement	299
13.1.2	Rôle du correcteur	299
13.1.3	Correction numérique d'un système à temps continu	300
13.1.4	Problèmes spécifiques liés aux correcteurs numériques	300
13.2	Tentatives d'actions correctives simples	301
13.2.1	Amélioration de la précision	301
13.2.2	Compensation de la perte de stabilité par placement des pôles	304
13.2.3	Action dérivée	305
13.3	Synthèse d'un correcteur numérique par discrétisation d'un correcteur continu	308
13.3.1	Principe	308
13.3.2	Exemple	309
13.4	Synthèse d'un correcteur numérique par méthode polynomiale	312
13.4.1	Principe	312
13.4.2	Exemple	313
EXERCICES		314
SOLUTIONS		315

CINQUIÈME PARTIE
REPRÉSENTATION D'ÉTAT DES SYSTÈMES

CHAPITRE 14 • REPRÉSENTATION D'ÉTAT DES SYSTÈMES À TEMPS CONTINU	323
14.1 Définitions	323
14.1.1 État d'un système et variables d'état	323
14.1.2 Modélisation du fonctionnement du système	324
14.1.3 Cas général	325
14.2 Résolution des équations d'état	326
14.2.1 Étude préalable	326
14.2.2 Généralisation au système vectoriel	326
14.2.3 Calcul de la matrice de transition	326
14.2.4 Calcul de l'état d'un système en fonction d'un signal de commande	332
14.3 Commandabilité d'un système	333
14.3.1 Définitions	333
14.3.2 Critère de Kalman	334
14.3.3 Exemple	334
14.3.4 Calcul de la commande d'un système	335
14.3.5 Cas des systèmes non commandables	337
14.4 Observabilité de l'état d'un système	337
14.4.1 Définition	338
14.4.2 Critère d'observabilité	338
14.4.3 Cas des systèmes non observables	338
14.5 Relation entre la représentation d'état et la fonction de transfert d'un système	339
14.5.1 Représentation d'état à partir de la fonction de transfert	339
14.5.2 Calcul de la fonction de transfert à partir de la représentation d'état	345
EXERCICES	346
SOLUTIONS	348
CHAPITRE 15 • REPRÉSENTATION D'ÉTAT DES SYSTÈMES À TEMPS DISCRET	358
15.1 Principe général	358
15.1.1 Variables d'état en temps discret	358
15.1.2 Modélisation du fonctionnement du système	359
15.2 Résolution des équations d'état	360
15.2.1 Prédiction de l'état du système à un instant quelconque	360
15.2.2 Exemple	360
15.3 Commandabilité d'un système à temps discret	361
15.3.1 Accessibilité	361
15.3.2 Critère de commandabilité	361
15.4 Observabilité de l'état d'un système	362
15.4.1 Définition	362
15.4.2 Critère d'observabilité	362
15.4.3 Exemple	362

15.5	Relation entre la représentation d'état et la fonction de transfert d'un système	363
15.5.1	Représentation d'état à partir de la fonction de transfert	363
15.5.2	Calcul de la fonction de transfert à partir de la représentation d'état	366
15.6	Commande échantillonnée d'un système à temps continu	367
15.6.1	Comportement du système	367
15.6.2	Influence de la période d'échantillonnage sur l'observabilité et la commandabilité	368
EXERCICES		368
SOLUTIONS		370

CHAPITRE 16 • COMMANDE PAR RETOUR D'ÉTAT. ESTIMATEURS, OBSERVATEURS ET PRÉDICTEURS		373
16.1	Principe général de la commande par retour d'état	373
16.1.1	Vecteur de gain	373
16.1.2	Fonction de transfert en boucle fermée	374
16.1.3	Détermination du vecteur d'état	375
16.2	Commandabilité en modes en temps continu	375
16.2.1	Définition	375
16.2.2	Critère de commandabilité en modes	375
16.2.3	Cas des systèmes non commandables	376
16.2.4	Exemple de placement des pôles pour un système commandable	376
16.2.5	Exemple pour un système non commandable	377
16.3	Commandabilité en temps discret : réponse pile	378
16.3.1	Problématique	378
16.3.2	Résolution du problème	379
16.4	Observateurs et estimateurs d'état	380
16.4.1	Observateur asymptotique en temps continu	380
16.4.2	Prédicteur en temps discret	382
EXERCICES		383
SOLUTIONS		385

ANNEXES

ANNEXE A • TABLE DES TRANSFORMÉES DE LAPLACE	395
ANNEXE B • ABAQUE DES RÉPONSES INDICIELLES D'UN SYSTÈME DU SECOND ORDRE	397
ANNEXE C • TABLE DES TRANSFORMÉES EN z	399
ANNEXE D • ÉQUIVALENCE ENTRE FONCTIONS DE TRANSFERT EN TEMPS CONTINU ET EN TEMPS DISCRET	401
ANNEXE E • FORMULAIRE	403
ANNEXE F • MEMENTO DE CALCUL MATRICIEL	407
INDEX	411

Avant-propos

L'automatique est la discipline qui, d'une manière générale, traite de la commande des systèmes. Elle revêt donc un caractère très important dans le domaine industriel auquel elle apporte à la fois des solutions, des méthodes d'étude ainsi que des démarches systématiques d'analyse.

Cet ouvrage couvre l'étendue de ces méthodes et correspond globalement aux programmes en vigueur dans la plupart des licences et maîtrises EEA et des écoles d'ingénieurs. Le lecteur y trouvera donc, séparés en plusieurs parties, tous les aspects de l'automatique : systèmes linéaires ou non linéaires, systèmes à temps continu et à temps discret, représentation d'état. Par une approche pédagogique progressive, il intéressera également tous les étudiants qui abordent l'automatique en premier cycle : Licence, IUT, etc.

La présentation de cet ouvrage respecte l'ordre logique dans lequel la discipline est en général abordée et se compose de cinq parties correspondant aux thèmes essentiels couverts par l'automatique.

La première partie est consacrée aux **méthodes de base de la modélisation des systèmes linéaires** continus. Elle contient l'ensemble des notions essentielles à l'étude générale de l'automatique, concepts qui restent valables dans toute la suite de l'étude, y compris pour les systèmes non linéaires ou à temps discret. Il est conseillé au lecteur de n'aborder la suite de l'étude qu'une fois ces notions maîtrisées : transformation de Laplace, spectre, comportement fréquentiel, etc.

L'étude de l'automatique proprement dite, à savoir les **systèmes bouclés**, débute véritablement avec la deuxième partie ; toutes les notions essentielles (mises en équation, stabilité, performances et correction) y sont abordées à propos des systèmes linéaires à temps continu. Ces principes restant valables pour les systèmes non linéaires ou à temps discret, il est recommandé au lecteur de s'assurer que ces bases sont bien acquises avant d'aborder les autres parties de ce livre.

La troisième partie concerne l'étude des **systèmes non linéaires**. Deux chapitres sont consacrés à cette partie de l'automatique qui apparaît souvent comme l'une des plus délicates, compte tenu de l'absence de méthodologie générale applicable à l'ensemble des systèmes non linéaires. Pour cette raison, les systèmes non linéaires sont abordés différemment des systèmes linéaires : les méthodes les plus couramment utilisées sont présentées et détaillées en explicitant les cas pour lesquels elles s'appliquent. Cette présentation n'a pas l'ambition d'être exhaustive mais a pour vocation de sensibiliser le lecteur aux difficultés liées à la mise en œuvre de tels systèmes.

La quatrième partie est consacrée à une branche essentielle de l'automatique : les **systèmes à temps discret**. Toutes les notions présentées (modélisation, stabilité, performances et correction) permettront à l'étudiant d'acquérir la maîtrise d'une discipline qui joue un rôle croissant dans le développement industriel de l'automatique.

La cinquième partie aborde la **représentation d'état des systèmes**, partie beaucoup plus moderne de l'automatique qui permet, grâce à des modélisations différentes de celles abordées jusqu'alors, d'appréhender des systèmes plus complexes et de fournir des méthodes d'études et des réponses scientifiques et technologiques plus précises aux problèmes généraux liés à l'automatique des systèmes réels.

Dans l'ensemble de l'ouvrage, nous avons volontairement choisi de détailler tous les développements théoriques permettant au lecteur d'accéder rapidement à une meilleure compréhension de la discipline. En revanche, certaines parties calculatoires ont été réduites, préférant renvoyer le lecteur à l'utilisation de logiciels de calcul formel dont l'usage est aujourd'hui courant en automatique.

Cette quatrième édition a été enrichie de nouveaux exercices et problèmes permettant au lecteur d'aborder des cas plus sophistiqués et des techniques de résolution innovantes.

Ce livre, qui est un ouvrage de référence dans le domaine de l'automatique, a été conçu avec le souci de la pédagogie. Je formule donc le souhait que tout étudiant en ayant fait l'acquisition puisse y trouver les clés de sa réussite.

À propos de Mathematica

Nous avons fait le choix, d'illustrer un certain nombre d'éléments théoriques avec un logiciel de calcul formel : Mathematica. À l'instar d'autres produits comme Matlab ou Maple, ce logiciel peut être d'une grande utilité puisqu'il permet de s'affranchir d'un certain nombre de calculs fastidieux. Il peut aussi fournir une aide précieuse pour la vérification des résultats obtenus. Néanmoins, cet ouvrage ne constitue en aucune manière un ouvrage de référence sur Mathematica. Notre propos se limite, à cet égard, à montrer comment certains résultats peuvent être obtenus facilement et rapidement. Nous n'utiliserons pas ce logiciel systématiquement et le lecteur qui ne disposerait pas de cet outil ne sera pas pénalisé.

Il nous paraît important de mettre en garde le lecteur qui voudrait utiliser fréquemment Mathematica contre un certain nombre d'erreurs souvent commises ; les quelques conseils qui suivent devraient lui être utiles :

- ne pas chercher à utiliser systématiquement un logiciel de calcul lorsqu'une approche simple est possible ;
- les logiciels comme Mathematica offrent en général des possibilités phénoménales et il n'est pas toujours aisé de s'y retrouver facilement : ne pas hésiter à utiliser l'aide en ligne du logiciel qui regorge d'exemples simples ;
- Mathematica est un logiciel très exigeant en termes de syntaxe. Certaines erreurs sont détectées par le logiciel, d'autres pas. Cela signifie qu'en cas d'erreur de saisie, l'outil peut très bien calculer malgré tout un résultat qui sera pourtant erroné. Il convient par conséquent de rester vigilant et de ne pas hésiter à tester les commandes sur des cas simples pour lesquels on peut facilement vérifier le résultat manuellement.

Y. G.

PREMIÈRE PARTIE

Modélisation des signaux et des systèmes linéaires continus

Chapitre 1

Modélisation des systèmes linéaires

Notion de fonction de transfert

1.1 INTRODUCTION

La plupart des systèmes physiques peuvent être décrits comme étant des opérateurs faisant correspondre des réponses R à des sollicitations S (figure 1.1). Ainsi, un système électrique pourra être étudié et caractérisé en exprimant une tension de sortie (réponse) en fonction d'une tension d'entrée (sollicitation). Ou encore, la position d'un amortisseur de véhicule (réponse) pourra être étudiée en fonction de l'excitation produite par les irrégularités de la route. Un faisceau de lumière (sollicitation) dirigé vers une face d'un matériau et qui ressort au travers d'une autre face (réponse) peut par exemple renseigner sur l'état du dit matériau.

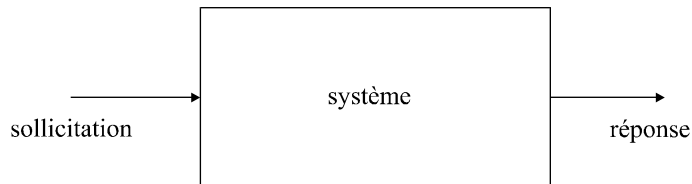


Figure 1.1 Modèle général d'un système.

Les exemples peuvent être multipliés à l'infini, car finalement, cette modélisation peut s'appliquer à la quasi totalité des objets physiques, et ce, que ce soit en électricité, en mécanique, en chimie, en optique, etc. Tout système peut donc s'apparenter au modèle proposé sur le schéma de la figure 1.1.

Dans la réalité, les systèmes peuvent posséder une ou plusieurs entrées, une ou plusieurs sorties, certaines sorties pouvant même éventuellement être considérées comme de nouvelles entrées (cas des systèmes bouclés que nous étudierons dans la partie 2 de cet ouvrage).

Nous étudierons dans ce cours, la manière dont le fonctionnement de tels systèmes peut être décrit, à partir de modèles mathématiques plus ou moins sophistiqués (en tout cas adaptés à la complexité du problème). Ceci nous permettra de répondre à différents types de question, par exemple :

- Quelle sera la réponse d'un système quelconque à telle ou telle sollicitation ? (Aspect prédictif.)
- De quoi se compose un système qui fournit telle réponse à telle sollicitation ? (Aspect caractérisation, identification, mais aussi diagnostic et détection de défauts.)
- Comment adapter ou régler un système pour qu'il fournisse une réponse donnée à une certaine sollicitation ?

D'autres questions se poseront tout au long de cet ouvrage. Il est d'ores et déjà évident qu'une meilleure connaissance de ces systèmes conditionne non seulement leur utilisation, mais également tous les concepts physiques qui y sont associés.

1.2 NOTION DE SIGNAL

Nous pouvons donc avoir une première approche des systèmes en considérant le couple (solicitation - réponse).

Imaginons un système optique réfléchissant vers lequel on dirige un faisceau de lumière. Le faisceau réfléchi constitue en quelque sorte une information, au sens où il est porteur d'une certaine signification. Nous le qualifierons de *signal*, tout comme le faisceau incident, puisqu'on ne saurait admettre que la réponse d'un système soit porteuse d'information si la sollicitation ne l'était pas.

D'une manière générale, toute sollicitation ou réponse d'un système sera considérée comme un *signal*. Les sollicitations ou excitations sont des signaux d'entrée et les réponses sont des signaux de sortie.

Pour le moment, nous ne considérerons que des systèmes mono-entrée, mono-sortie. Par convention, l'entrée sera notée e et la sortie sera notée s .

1.2.1 Signaux temporels

Le moyen qui *a priori* semble le plus naturel pour décrire un signal consiste à invoquer son évolution au cours du temps. Ainsi les formes $e(t)$ et $s(t)$ sont-elles des représentations temporelles des signaux e et s .

Nous verrons un peu plus tard que ce mode de représentation n'est pas toujours le plus intéressant. Toutefois, dans l'immédiat, nous nous limiterons à cette description temporelle de l'information.

Ainsi, on peut dire qu'un système quelconque est capable de prendre un signal $e(t)$ et de la transformer en un signal $s(t)$.

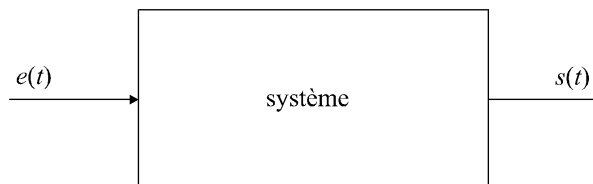


Figure 1.2 Modèle général d'un système.

1.2.2 Principe de causalité

Les signaux temporels possèdent une propriété essentielle sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir à maintes reprises : un effet ne pouvant survenir qu'après la cause qui lui a donné naissance, la réponse temporelle d'un système ne peut en aucun cas précéder la sollicitation qui en est la cause. Il s'agit du principe de causalité qui n'est pas qu'une vérité de Lapalisse comme nous aurons l'occasion de nous en rendre compte.

1.2.3 Signaux non temporels

La théorie des signaux ne traite pas que des signaux temporels. Si par exemple on considère une image en noir et blanc, statique sur un écran, le signal que constitue cette image peut être considéré comme une luminosité dépendant de deux variables spatiales (x, y) . Dans ce cas, la variable temps n'a rien à voir avec le problème. D'autres cas pourraient être cités en exemple. Dans ces cas où t n'intervient pas, on peut s'attendre à ce que le principe de causalité ne soit pas respecté.

Il n'est pas question ici d'ébaucher une classification des différents types de signaux. Celle-ci sera abordée plus tard. Nous utiliserons dans la suite de ce chapitre, l'exemple de signaux temporels appliqués à des systèmes simples : les systèmes linéaires.

1.3 LE CAS DES SYSTÈMES LINÉAIRES

Considérons un système et un signal d'entrée $e(t)$ qui est une combinaison linéaire de n signaux :

$$e(t) = \lambda_1 e_1(t) + \lambda_2 e_2(t) + \cdots + \lambda_n e_n(t)$$

On définira comme système linéaire tout système qui conserve au niveau de sa sortie la combinaison linéaire d'entrée, chaque $s_i(t)$ étant la sortie correspondant à $e_i(t)$.

$$s(t) = \lambda_1 s_1(t) + \lambda_2 s_2(t) + \cdots + \lambda_n s_n(t)$$

La plupart du temps, ces systèmes sont régis par des équations différentielles à coefficients constants.

Soit $e(t)$ le signal d'entrée, $s(t)$ le signal de sortie. L'équation générale d'un système linéaire s'écrit de la manière suivante :

$$a_n \frac{d^n s}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} s}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{ds}{dt} + a_0 s(t) = b_m \frac{d^m e}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} e}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{de}{dt} + b_0 e(t)$$

Ces systèmes conservent toutes les opérations linéaires (dérivation, intégration, ...). Le plus grand des deux indices n et m est appelé ordre du système.

Lorsque le système est effectivement excité par un signal $e(t)$, cette équation différentielle possède effectivement un second membre. Si le système est libre et isolé, le second membre est nul.

Remarque : Nous ne nous intéresserons, dans les parties 1 et 2 de ce livre, qu'aux systèmes linéaires et aux signaux temporels continus ; les notions qui suivent ne s'appliquent donc qu'à de tels systèmes, dits linéaires à temps continu.

1.4 LA TRANSFORMATION DE LAPLACE

1.4.1 Définition

Considérant une fonction réelle d'une variable réelle $s(t)$ telle que $s(t) = 0$ pour $t < 0$, on définit sa transformée de Laplace $L(s)$ comme la fonction S de la variable complexe p telle que :

$$S(p) = \int_0^{+\infty} s(t) e^{-pt} dt$$

La fonction $S(p)$ est une fonction complexe d'une variable complexe p (avec $p = \tau + j\omega$).

La transformée de Laplace d'une fonction $s(t)$ n'existe pas dans tous les cas : il est nécessaire que l'intégrale ci-dessus converge. On démontre que cette convergence est vérifiée si la partie réelle τ de la variable p est supérieure à une valeur donnée α appelée seuil de convergence.

D'une manière plus générale, la transformation de Laplace est une application de l'espace des fonctions du temps (nulles pour $t < 0$) vers l'espace des fonctions complexes d'une variable complexe. La fonction $s(t)$ s'appelle l'original de $S(p)$, ou encore sa transformée inverse.

1.4.2 Propriétés fondamentales de la transformation de Laplace

Les propriétés qui suivent sont fondamentales car elles permettent de calculer facilement (sans utiliser la définition de la transformation de Laplace) les transformées de Laplace de certains signaux.

Remarque : Nous verrons plus loin que la connaissance de ces quelques propriétés d'une part et d'une dizaine de transformées de Laplace usuelles, d'autre part, permet de déduire pratiquement n'importe quelle transformée de Laplace.

a) Linéarité

La linéarité de la transformation de Laplace résulte naturellement de la linéarité de l'intégration. Il s'agit là, malgré des apparences de simplicité, d'une des propriétés les plus importantes :

$$L[\alpha f + \beta g] = \alpha L[f] + \beta L[g]$$

En particulier :

$$L[f + g] = L[f] + L[g]$$

et :

$$L[kf] = kL[f]$$

b) Transformée de Laplace d'une dérivée

Soit $f(t)$ une fonction du temps. Soit $F(p)$ sa transformée de Laplace. On montre que la transformée de Laplace de sa dérivée première se calcule simplement en fonction de $F(p)$:

$$\frac{df}{dt} \rightarrow pF(p) - f(0)$$

De même, la transformée de Laplace de sa dérivée n -ième est :

$$\frac{d^n f}{dt^n} \rightarrow p^n F(p) - \sum_{k=n+1}^{2n} \left(p^{2n-k} \frac{d^{k-n-1} f}{dt^{k-n-1}}(0) \right)$$

Par exemple :

$$\frac{d^2 f}{dt^2} \rightarrow p^2 F(p) - pf(0) - f'(0)$$

Une première constatation s'impose en observant ces expressions : la transformation de Laplace transforme l'opérateur *dérivation* en un opérateur arithmétique. Il faut noter que l'on retrouve dans ces expressions les conditions initiales, c'est-à-dire les valeurs en $t = 0$ des dérivées successives d'ordres inférieurs à l'ordre de dérivation considéré.

Remarque : Dans le cas où ces conditions initiales sont nulles, ce qui est *a priori* très souvent le cas, on peut retenir simplement les relations suivantes :

$$\frac{df}{dt} \rightarrow pF(p) \quad ; \quad \frac{d^n f}{dt^n} \rightarrow p^n F(p)$$

c) Transformée de Laplace d'une primitive

Soit $P(t)$ une primitive d'une fonction $f(t)$ et $F(p)$ la transformée de Laplace de cette fonction. On a :

$$P(t) = \int f(t) dt \rightarrow \frac{F(p)}{p} + \frac{P(0)}{p}$$

Là encore, l'opérateur *intégration* se trouve changé en un opérateur arithmétique dans l'espace des transformées de Laplace.

Remarque : Dans le cas où la condition initiale $P(0)$ est nulle, ce qui est *a priori* très souvent le cas, on peut retenir simplement la relation suivante :

$$P(t) = \int f(t) dt \rightarrow \frac{F(p)}{p}$$

d) Propriétés de changement d'échelle

$$f(kt) \rightarrow \frac{1}{k} F\left(\frac{p}{k}\right) ; \quad f\left(\frac{t}{k}\right) \rightarrow k F(p)$$

Remarque : On veillera à ne pas confondre ces deux propriétés avec la linéarité de la transformation de Laplace.

e) Théorème du retard

Considérons la fonction $f(t - \tau)$, autrement dit la fonction $f(t)$ à laquelle on a fait subir un changement d'origine des temps (figure 1.3), autrement dit un retard d'un temps τ .

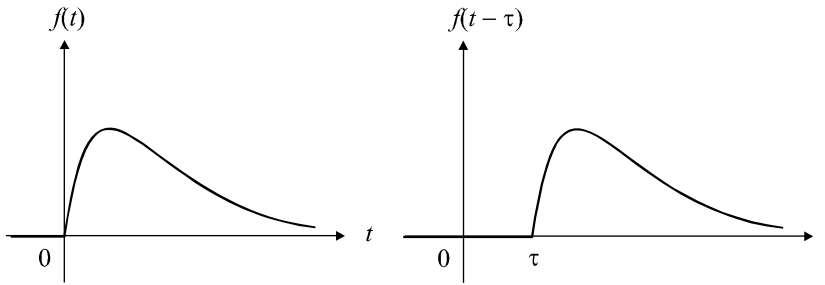


Figure 1.3 Représentation temporelle d'un signal retardé.

Calculons la transformée de Laplace de cette fonction.

On a :

$$f(t) \rightarrow F(p) = \int_0^{+\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

Effectuons dans cette intégrale le changement de variable $u = t + \tau$:

$$F(p) = \int_{\tau}^{+\infty} f(u - \tau) e^{-p(u-\tau)} du$$

En remarquant que la fonction $f(u - \tau)$ est nulle pour $t < \tau$, on peut, sans changer la valeur de l'intégrale, lui choisir une borne d'intégration inférieure plus faible que τ :

$$F(p) = \int_0^{+\infty} f(u - \tau) e^{-p(u-\tau)} du$$

$$F(p) = \int_0^{+\infty} e^{p\tau} f(u - \tau) e^{-pu} du$$

$$F(p) = e^{p\tau} \int_0^{+\infty} f(u - \tau) e^{-pu} du$$

Par définition, $\int_0^{+\infty} f(u - \tau) e^{-pu} du$ est la transformée de Laplace de $f(t - \tau)$.