

AUTOMATIQUE

*pour les classes préparatoires
cours et exercices corrigés*



Claude Foulard
Jean-Marie Flaus
Mireille Jacomino

HERMES

Automatique
pour les classes préparatoires

© Editions HERMES, Paris, 1997

Editions HERMES

14, rue Lantiez

75017 Paris

ISBN 2-86601-608-4

Catalogage Electre-Bibliographie

Foulard, Claude*Flaus, Jean-Marie*Jacomino, Mireille

Automatique pour les classes préparatoires. – Paris : Hermès, 1997.

ISBN 2-86601-608-4

RAMEAU : Commande automatique : manuels d'enseignement supérieur

DEWEY : 629.5 : Autres branches de l'art de l'ingénieur.

Commande automatique. Robotique

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 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 » (article 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.

AUTOMATIQUE

*pour les classes préparatoires
cours et exercices corrigés*

Claude Foulard
Jean-Marie Flaus
Mireille Jacomino

HERMES

EXTRAIT DU CATALOGUE GÉNÉRAL

Les machines à enseigner, Eric BRUILLARD, 1997.

Machines à commande numérique, Bernard MÉRY, 1997.

Le micro-contrôleur 68HC11, Bernard BEGHYN, 1997.

Les réseaux – Principes fondamentaux, Pierre ROLIN, Gilbert MARTINEAU,
Laurent TOUTAIN, Alain LEROY, 1997.

Matériaux composites, 4^e édition revue et augmentée, Daniel GAY, 1997.

Mécanique – Eléments de mécanique rationnelle, Roger BOUDET,
Alain CHAUVIN, 1997.

Automatique – Commande des systèmes linéaires, Philippe DE LARMINAT, 1996.

Introduction au traitement du signal – Exercices, corrigés et rappels de cours,
Patrick DUVAUT, François MICHAUT, Michel CHUC, 1996.

*Signaux et systèmes en questions : Le signal déterministe – Le signal aléatoire –
Détection et estimation des signaux – Le filtrage des signaux*, David DECLERCO,
André QUINQUIS 1996.

Réseaux locaux et Internet – Des protocoles à l'interconnexion,
Laurent TOUTAIN, 1996.

Eléments de logique formelle, Gérard CHAZAL, 1996.

La régulation industrielle – Régulateurs PID, prédictifs et flous,
Jean-Marie FLAUS, 1994.

Eléments de génie électrique – Connaissances de base et machines statiques,
Marcel IVANES, Robert PERRET, 1994.

Du Grafcet aux réseaux de Petri, 2^e édition revue et augmentée, René DAVID,
Hassane ALLA 1992.

La robotique – Principes et applications, 3^e édition revue et augmentée,
Philippe COIFFET, 1992.

Serveur Web : <http://www.editions-hermes.fr>

ILLUSTRATION DE COUVERTURE : Boris Lyubner

Table des matières

Préface	11
Introduction (MPSI.1 - PCSI.1 - PTSI.1)	13
0.1. Un peu d'histoire.....	13
0.2. Un exemple	18
0.3. Automatiser - un problème complexe	19
0.3.1. Première orientation - un asservissement	20
0.3.2. Deuxième orientation - une commande tout ou rien	21
0.3.3. Démarche d'automatisation	22
0.4. Un vaste champ d'applications	23
0.5. Un domaine pluridisciplinaire.....	24
0.6. Le rôle de l'informatique	25
0.7. Automatique pour les prépas ?.....	26
Chapitre 1. Systèmes asservis - Notions de base (MPSI.1 - PCSI.1 - PTSI.1)	27
1.1. Introduction.....	27
1.2. Définitions des notions de base.....	28
1.3. Structure d'un système asservi	31
1.4. Les problèmes de stabilité d'une boucle de commande	32
1.5. Régulation et asservissement	34
1.6. Les différents types de système et de commande.....	34
1.6.1. Systèmes linéaires et non linéaires	34
1.6.2. Systèmes continus et systèmes échantillonnés.....	37
1.7. Nécessité et intérêt de la boucle fermée	38
Chapitre 2. Représentation des systèmes dynamiques linéaires continus et invariants (MPSI.1 - PCSI.1 - PTSI.1 - MPSI.2 - PCSI.2 - PT)	41
2.1. Système dynamique, continu, linéaire et invariant	41
2.2. Modèle de connaissance et modèle de comportement	42
2.3. Modèle de connaissance	43
2.3.1. Méthode	43
2.3.2. Modélisation de systèmes électriques.....	45

2.3.3. Modélisation de systèmes mécaniques	47
2.3.4. Modélisation de systèmes électromécaniques	50
2.3.5. Modélisation de flux de matières	52
2.4. Représentation par équation différentielle	53
2.5. Fonction de transfert	54
2.5.1. Transformée de Laplace	54
2.5.2. Transformée de Laplace d'une équation différentielle	55
2.5.3. Définition de la fonction de transfert.....	56
2.6. Représentation d'un système par schéma bloc	57
2.6.1. Principe	57
2.6.2. Fonction de transfert de systèmes composés	58
2.6.3. Fonction de transfert d'un système bouclé	59
2.6.4. Fonction de transfert d'un système complexe	60
Chapitre 3. Identification d'un modèle linéaire	
(MPSI.1 - PCSI.1 - PTSI.1 - PT)	63
3.1. Introduction.....	63
3.2. Identification et estimation de paramètres.....	65
3.3. Principe des méthodes graphiques	66
3.3.1. Choix de l'entrée	66
3.3.2. Choix du modèle	67
3.4. Systèmes apériodiques sans retard	68
3.4.1. Recherche d'un modèle du premier ordre	68
3.4.2. Recherche d'un modèle du deuxième ordre apériodique	70
3.4.3. Recherche d'un modèle d'ordre supérieur.....	72
3.5. Systèmes apériodiques avec retard.....	72
3.5.1. Recherche d'un modèle du premier ordre : méthode de Broïda.....	72
3.5.2. Recherche d'un modèle d'ordre supérieur : méthode de Strejc	73
3.6. Systèmes oscillants.....	75
3.7. Systèmes intégrateurs.....	76
3.7.1. Système intégrateur pur	76
3.7.2. Système intégrateur d'ordre supérieur à 1.....	77
Chapitre 4. Analyse temporelle d'un système dynamique linéaire	
(MPSI.1 - PCSI.1 - MP - PSI - PT)	79
4.1. Réponse temporelle d'un système dynamique	79
4.2. Stabilité d'un système	82
4.3. Signaux d'entrée fondamentaux	85
4.3.1. Impulsion de Dirac	85
4.3.2. Echelon.....	87
4.3.3. Rampe	89
4.4. Systèmes du premier ordre.....	89
4.5. Systèmes du deuxième ordre.....	92
4.6. Autres systèmes.....	97

4.6.1. Systèmes à retard.....	97
4.6.2. Systèmes à réponse inverse	98
4.6.3. Systèmes avec des zéros	100
Chapitre 5. Analyse fréquentielle d'un système dynamique linéaire (MPSI.2 - PCSI.2 -PT)	103
5.1. Réponse fréquentielle d'un système dynamique	103
5.2. Diagramme de Bode	107
5.2.1. Introduction	107
5.2.2. Terme constant	108
5.2.3. Termes 'intégrale' et 'dérivée'	109
5.2.4. Termes du premier ordre	110
5.2.5. Termes du deuxième ordre	113
5.2.6. Exemple de réponse fréquentielle	117
5.2.7. Termes 'retard'	118
5.3. Diagramme de Nyquist (PT uniquement).....	119
5.3.1. Introduction	119
5.3.2. Système du premier ordre.....	119
5.3.3. Système du deuxième ordre.....	120
5.3.4. Système intégrateur	121
5.3.5. Retard pur.....	121
5.3.6. Système du premier ordre avec retard	121
5.4. Diagramme de Black (PT uniquement).....	122
5.5. Relations entre la réponse temporelle et la réponse fréquentielle	123
Chapitre 6. Analyse des systèmes asservis linéaires (MP - PSI - PT)	125
6.1. Structure générale	125
6.2. Relations et propriétés fondamentales des systèmes asservis.....	126
6.2.1. Réponse à un changement de consigne.....	127
6.2.2. Relation entre la fonction de transfert en boucle fermée et la fonction de transfert en boucle ouverte.....	127
6.2.3. Intérêt d'un système asservi pour les changements de consigne..	128
6.2.4. Réponse à des perturbations	129
6.2.5. Intérêt d'un système asservi pour la réponse à des perturbations	129
6.2.6. Intérêt de la notion de fonction de transfert en boucle ouverte....	129
6.3. Réponse temporelle et réponse fréquentielle d'un système asservi	130
6.3.1. Premier exemple	130
6.3.2. Deuxième exemple	138
6.4. Stabilité d'un système asservi	138
6.4.1. Equation caractéristique	138
6.4.2. Critère du revers	139
6.5. Degré de stabilité d'un système asservi	140
6.5.1. Marge de phase	142
6.5.2. Marge de gain.....	142

6.6. Précision d'un système asservi	143
6.6.1. Précision statique	144
6.6.2. Effet d'une action intégrale dans la chaîne directe.....	145
6.7. Correction par régulateur PI.....	146
6.7.1. Structure	146
6.7.2. Effet sur la précision et la stabilité	147
Chapitre 7. Systèmes logiques combinatoires	
(MPSI.2 - PCSI.2 - PTSI.2)	149
7.1. Introduction.....	149
7.2. Définitions	149
7.2.1. Variables et mots binaires	149
7.2.2. Notion de codage binaire.....	151
7.2.3. Codage binaire des chiffres décimaux	151
7.2.4. Fonction binaire combinatoire	153
Chapitre 8. Algèbre binaire ou algèbre de Boole	155
8.1. Introduction.....	155
8.2. Les opérateurs de base	156
8.3. Propriétés de base de l'algèbre binaire	157
8.4. Autres propriétés remarquables de l'algèbre binaire.....	159
8.5. Notion de dualité.....	163
8.6. Redondance.....	164
Chapitre 9. Spécification d'une fonction logique combinatoire	
(MPSI.2 - PCSI.2 - PTSI.2)	165
9.1. Table de vérité	165
9.2. Fonctions d'une ou deux variables.....	166
9.2.1. Fonctions d'une variable	166
9.2.2. Fonctions de deux variables	167
9.3. Spécification décimale d'une fonction logique	168
9.4. Expressions canoniques	170
9.4.1. Somme de produits canonique d'une fonction	170
9.4.2. Produit de sommes canonique d'une fonction.....	170
9.5. Fonctions incomplètement spécifiées.....	172
Chapitre 10. Minimisation d'une expression logique	
(MPSI.2 - PCSI.2 - PTSI.2)	177
10.1. Introduction.....	177
10.2. Tableaux de Karnaugh	179
10.2.1. Introduction	179
10.2.2. Tableau de trois variables.....	180
10.2.3. Tableau de quatre variables.....	181
10.2.4. Tableau de cinq variables.....	182
10.3. Tableau de Karnaugh et expression algébrique irréductible	184

10.3.1. Tableaux de trois et quatre variables	184
10.3.2. Tableau de cinq variables	189
10.4. Expression algébrique minimale	190
10.5. Cas d'un développement en produit de sommes	192
10.6. Cas des fonctions incomplètement spécifiées	194

Chapitre 11. Éléments de réalisation d'une fonction logique

(MPSI.2 - PCSI.2 - PTSI.2)	197
11.1. Les réseaux à contacts	197
11.1.1. Le relais électromagnétique	197
11.1.2. Opérateurs à base de relais et contacts	200
11.1.3. Analyse d'un réseau à contacts	201
11.1.4. Synthèse d'un réseau à contacts	205
11.2. Les réseaux de portes NON, ET et OU	206
11.2.1. Représentations symboliques	207
11.2.2. Analyse et synthèse d'un réseau de portes NON, ET et OU	207
11.3. Les portes NAND et NOR	209
11.3.1. Définitions	209
11.3.2. Représentations symboliques des portes NAND et NOR	210
11.3.3. Analyse par inspection d'un réseau de portes NAND ou de portes NOR	211
11.3.4. Analyse d'un réseau de portes par transformations	212
11.3.5. Synthèse d'un réseau de portes NAND ou de portes NOR	215
11.4. La logique programmée	219
11.4.1. Principes généraux	219
11.4.2. Le langage à contacts ladder	221

Chapitre 12. Introduction aux systèmes séquentiels

(MPSI.2 - PCSI.2 - PTSI.2)	223
12.1. Nature des systèmes séquentiels	223
12.1.1. Définitions et concepts de base	223
12.1.2. Structure d'un système séquentiel	225
12.1.3. Exemple de l'ascenseur	227
12.2. Éléments de mémorisation	232
12.2.1. Réalisation électronique câblée	232
12.2.2. Réalisation électrique câblée à relais	233
12.2.3. Les mémoires bistables : bascules	234
12.2.4. Synthèse d'un système séquentiel avec des bascules RS	236
12.3. Éléments de conclusion	239

Chapitre 13. Le GRAFCET - Éléments de modélisation

(MPSI.2 - PCSI.2 - PTSI.2)	241
13.1. Introduction	241
13.2. Le GRAFCET : notions de base	242
13.2.1. Les étapes	243
13.2.2. Les transitions	244

13.2.3. Les règles d'évolution	246
13.2.4. Stabilité des situations	249
13.2.5. Exemple de l'ascenseur	250
13.3. Le GRAFCET : structures de base	252
13.3.1. Séquence unique	252
13.3.2. Sélection de séquences	255
13.3.3. Parallélisme	258
13.3.4. Synchronisation de séquences	262
13.3.5. Partage de ressources	264
13.3.6. Résumé des différentes structures	267
Chapitre 14. Le GRAFCET - Compléments sur les réceptivités et les actions (MP5I.2 - PC5I.2 - PT5I.2 - PSI - PT)	269
14.1. Les réceptivités	269
14.1.1. Introduction	269
14.1.2. Réceptivité : expression générale	270
14.1.3. Variables de temporisation	273
14.2. Les actions	275
14.2.1. Introduction	275
14.2.2. Les actions non mémorisées ou à niveau	276
14.2.3. Les actions mémorisées	277
14.2.4. Les actions impulsives	278
14.2.5. Influence des choix technologiques sur les actions	280
Chapitre 15. Le GRAFCET - Eléments de structuration (MP5I.2 - PC5I.2 - PT5I.2 - PSI - PT)	283
15.1. GRAFCET fonctionnel et GRAFCET technologique	283
15.2. Macro-étapes et tâches	285
15.2.1. Représentation détaillée d'une étape : macro-étapes	286
15.2.2. Réutilisation d'une séquence : tâche	288
15.3. Macro-actions : forçage (PSI et PT uniquement)	290
Exercices	293
Corrigés	321
Annexes	369
Bibliographie	375
Index	377

Préface

Ce livre s'adresse aux élèves des classes préparatoires aux grandes écoles dont il suit le programme officiel. Mais bien entendu, il peut être étudié avec profit par tous ceux qui sont en premier cycle universitaire (DEUG, IUT...) ou en deuxième cycle (licences, maîtrises, IUP, premières années d'écoles d'ingénieurs...).

Les élèves des classes préparatoires sont placés entre plusieurs mondes : celui du lycée, scolaire par nature, et celui de l'ingénieur qui doit prendre en compte les réalités technique, technologique et humaine telles qu'elles sont ; le monde de l'analyse et celui de la conception ; le monde des problèmes simples, bien posés, où toutes les données sont utiles, et celui de la complexité, de la réalité aux facettes multiples et souvent contradictoires...

L'Automatique appartient aux sciences de l'ingénieur qui sont à la fois des sciences de l'analyse, de l'observation, de la description du monde qui nous entoure, et des sciences de la conception, de la création, de la synthèse d'objets artificiels.

Pour enseigner l'Automatique, on peut donc être tenté de présenter simplement des outils, des recettes, des formules... C'est l'aspect analytique qui domine. Il se prête bien à la formulation d'exercices qui peuvent laisser penser que l'Automatique a un caractère essentiellement mathématique. De ce point de vue, les taupins peuvent trouver leur compte ! Mais une telle présentation ne permet pas de répondre aux questions essentielles qui marquent la différence entre le scolaire et l'ingénieur : pourquoi fait-on tel choix, pourquoi telle méthode... ? Pourquoi utilise-t-on la fonction de transfert ? Pourquoi parler de réponse fréquentielle ? Pourquoi un modèle linéaire ? Qu'apporte une structure d'asservissement ? Pourquoi s'intéresse-t-on au facteur de résonance ou à la marge de phase ? Pourquoi le GRAFCET ? Pourquoi un Automate Programmable Industriel ? Les programmes officiels sont accompagnés de commentaires qui appellent une réponse à ce type de questions.

Nous avons donc fait le choix pédagogique, dans la partie cours proprement dite, de prendre le temps de justifier les choix d'un concept, d'une formule, d'une méthode..., de présenter les motivations, de montrer les limites de telle ou telle approche..., dans une démarche d'ingénieur, en restant dans le cadre du programme. Nous avons voulu permettre au lecteur de dépasser le stade de la résolution d'exercices types, pour lui proposer une compréhension plus approfondie de l'Automatique. Voilà pourquoi ce livre devrait accompagner les élèves au moins jusqu'à l'obtention de leur diplôme d'ingénieur et, pour certains, bien au-delà.

Mais, bien entendu, partant du principe qu'un livre destiné à des élèves de classes préparatoires aux grandes écoles doit aussi les aider à réussir un concours, nous avons apporté beaucoup de soin à présenter un nombre important d'exemples et d'exercices avec leur correction, qui sont parfois l'occasion de compléter le cours. Des impératifs d'édition nous ont contraints de donner à ces exercices et à leurs solutions une présentation plus dense que celle du cours. Nous nous en excusons auprès du lecteur, mais ce choix nous a semblé préférable à une réduction du nombre d'exercices proposés.

Enfin, l'existence de plusieurs filières n'a pas facilité notre tâche. Nous avons pris le parti de couvrir le programme le plus vaste. Chacun pourra déterminer ce qui ne le concerne pas. Pour l'aider dans cette tâche, nous avons indiqué dans la table des matières, pour chaque chapitre, quelles sont les filières concernées (pour la première année, les chiffres 1 et 2 permettent de distinguer la première et la deuxième période).

Enfin, nous tenons à remercier Jean Manuel Grousseau et Damien Paulet pour leurs remarques pertinentes et constructives.

LES AUTEURS

Introduction

Ce manuel s'adresse en priorité aux élèves des classes préparatoires aux grandes écoles d'ingénieurs, car il a été rédigé en suivant les programmes officiels des deux années de préparation aux concours d'admission dans ces écoles. Il traite d'une discipline, l'Automatique, qui relève des sciences de l'ingénieur. Elle est peu connue du grand public qui en voit pourtant tous les jours des applications. Il est donc utile d'en préciser les contours.

0.1. Un peu d'histoire¹

Depuis plus de 2 000 ans, l'homme a cherché à réaliser des *systèmes*² *automatiques*, c'est-à-dire capable de fonctionner de façon autonome. Les premières réalisations datent des Grecs, pour automatiser l'irrigation ou le comptage du temps. Au début de notre ère, Héron d'Alexandrie proposa des automates et des mécanismes basés sur la notion de *contre-réaction*. Les acquis de la période hellénistique ont été préservés par la culture islamique, et redécouverts en Europe à la fin de la Renaissance.

¹ Un numéro spécial de la revue « IEEE Control Systems » daté de juin 1996 présente l'histoire de la commande automatique, en ignorant malheureusement les automatismes logiques, qui font l'objet des chapitres 7 à 15 de ce manuel, et sont pourtant très répandus. Nous empruntons de nombreux détails qui suivent à l'article de Stuart Bennett « A Brief History of Automatic Control ».

Nous ne prétendons pas présenter ici une histoire complète de l'automatique. Nous limitons essentiellement nos propos aux concepts et notions qui font l'objet des autres chapitres de ce manuel.

² On appelle *système* un dispositif formé d'éléments agencés et assurant une fonction déterminée (Le Petit Larousse).

C'est au 18^{ème} siècle que des inventions et des applications nouvelles de ces principes anciens virent le jour. René-Antoine Ferchault de Réaumur, par exemple, proposa plusieurs dispositifs de régulation de la température de couveuses : la température était mesurée par la dilatation de mercure qui provoquait le déplacement d'un bras commandant le tirage et donc le niveau de combustion du fourneau utilisé pour produire la vapeur de chauffe.

A la même époque, la machine à vapeur a permis de remplacer la force animale, mais sa maîtrise a vraiment commencé avec le *régulateur à boules* proposé en 1789 par l'ingénieur anglais James Watt. Ce mécanisme a permis d'adapter la vitesse de l'arbre de la machine aux variations de la charge. Les premiers régulateurs avaient beaucoup de défauts car ils ne fonctionnaient correctement que pour une plage très étroite de variations de vitesse et réclamaient une maintenance importante. Aussi, au cours du 19^{ème} siècle, des milliers de brevets de régulateurs ont été proposés. Par exemple, au milieu du siècle, une véritable action intégrale a été introduite par William Siemens.

Bien entendu, les *risques d'instabilité* ont été immédiatement observés, et, durant toute cette période, des efforts d'analyse ont été faits pour tenter de déterminer les conditions de stabilité. Les concepts de système dynamique, leur modélisation par des équations différentielles, le rôle des racines de l'équation caractéristique, la recherche des conditions de stabilité sans avoir besoin de calculer ces racines, ont été développés aussi au 19^{ème} siècle. James Clerk Maxwell (1831-1879), Edward J. Routh (1831-1907), Augustin-Louis Cauchy (1789-1857), Charles Sturm (1803-1855), Adolf Hurwitz (1859-1919) ont étudié ces problèmes (cf. chapitres 4 et 6).

Durant cette période, les applications des régulateurs ont été très variées pour la commande de températures, pressions, niveaux de liquides, vitesse d'arbres mécaniques... C'est en 1868 que l'ingénieur français Joseph Charcot introduisit pour la première fois les termes de *servo-moteur* ou de *moteur asservi*.

A la fin du 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle, le développement des applications de l'électricité exigea la mise en œuvre de régulations simples de tension, de courant, de fréquence... Des problèmes plus complexes ont également été abordés : en 1911, Elmer Sperry introduisit un *régulateur PID* (Proportionnel, Intégral et Différentiel) et un ajustement automatique du gain pour la conduite d'un navire, mais c'est seulement en 1922 qu'une analyse claire du fonctionnement d'un PID a été proposée par Nicholas Minorsky.

Il faut noter que l'ensemble de ces travaux a été l'œuvre de mécaniciens et de mathématiciens.

C'est aussi à cette époque que les électroniciens ont été confrontés aux problèmes de l'amplification (notamment pour la téléphonie longue distance). Harold Stephen Black et Harry Nyquist ont développé la théorie des amplificateurs à contre-réaction, mais ils ont publié leurs travaux seulement dans les années 30. Au lieu d'utiliser des équations différentielles, ils mesurent expérimentalement la *réponse fréquentielle*. C'est le début de l'élaboration d'une méthode d'étude théorique des *servomécanismes* basée sur l'analyse fréquentielle. A partir de 1940, en introduisant les notions de marge de gain et de marge de phase, Hendrik Bode a également contribué au développement de cette méthode qui fait l'objet des chapitres 5 et 6.

Durant la même période, les mécaniciens ont perfectionné les PID en technologie pneumatique. C'est en 1942 que J.G. Ziegler et N.B. Nichols ont publié leurs fameuses règles d'ajustement des paramètres d'un PID. En s'appuyant expérimentalement sur la réponse temporelle et le régime transitoire, les mécaniciens continuent à justifier théoriquement leurs travaux avec une représentation par équations différentielles et schémas blocs. Ceci correspond aux chapitres 2 et 3 de ce manuel.

La seconde guerre mondiale a été l'occasion d'un rapprochement de la démarche des électroniciens et de celle des mécaniciens, mais aussi d'efforts méthodologiques et expérimentaux intenses qui ont abouti à la *Théorie des servomécanismes* telle qu'elle est enseignée aujourd'hui. L'origine de ce véritable bond en avant a été la conception et la mise au point, par les Américains, de systèmes d'armes capables d'atteindre des avions en vol et les fameux V1. Le principe adopté était basé sur la poursuite des cibles à l'aide de radars et l'utilisation intensive d'asservissements pour orienter les canons. Les problèmes à résoudre se sont révélés très complexes. Les limites de chacune des approches sont apparues ainsi que la nécessité de prendre en compte d'autres aspects, comme le bruit pour la prédiction des trajectoires par exemple. Albert C. Hall, en particulier, a montré en 1943, avec la *Transformée de Laplace* et la notion de *fonction de transfert*, que les approches temporelle des mécaniciens et fréquentielle des électroniciens étaient très fortement liées. Parmi beaucoup d'autres, Claude Shannon et Norbert Wiener se sont illustrés à cette occasion (tout ingénieur automaticien connaît le théorème de Shannon et le filtre de Wiener).

Ainsi, dès 1950 l'ensemble des concepts qui sont présentés dans les chapitres 1, 2, 4, 5 et 6 de ce manuel étaient acquis. La formation des

ingénieurs a suivi de près ces évolutions et, en France, entre les années 50 et 60, tous ces concepts étaient introduits dans des cours de servomécanismes.

Depuis, l'Automatique s'est très fortement développée et est donc devenue une discipline scientifique. A partir des années 50, on a étudié la commande des systèmes non-linéaires, la programmation dynamique, la représentation d'état, la commande optimale, les systèmes échantillonnés. Ce fut ensuite une véritable explosion, facilitée par l'apparition puis le développement des calculateurs numériques et de l'informatique : la commande adaptative, l'identification, les systèmes stochastiques, le traitement du signal, les systèmes séquentiels, la commande prédictive, la robotique, la productique, le traitement d'images... Il existe aujourd'hui dans le monde de très nombreux laboratoires d'automatique et il y a une activité scientifique internationale intense.

Pour ce qui concerne les applications, le développement de l'électronique, de l'informatique, des capteurs et la diminution de leurs coûts de production ont permis que l'automatique envahisse la vie quotidienne des entreprises, des transports, des communications, des armées, du grand public...

Le lecteur aura sûrement remarqué que nous n'avons pas encore fait allusion au contenu des chapitres 7 à 15 qui concernent les automatismes logiques. Il s'agit de systèmes dans lesquels l'information est représentée par des variables qui ne peuvent prendre que deux valeurs. Les calculateurs numériques appartiennent à cette catégorie mais en constituent une classe particulière. Il existe par contre, aujourd'hui, de très nombreuses applications de cette catégorie de systèmes automatiques, par exemple les ascenseurs, les feux tricolores, les alarmes, et la plupart des machines qui participent à l'automatisation de la production dans les entreprises.

L'histoire de la conception et de la réalisation de ces systèmes est peu souvent présentée. Il faut dire que les chercheurs et les universitaires sont beaucoup moins concernés, bien qu'ils aient participé à l'évolution de méthodes dont le développement a été essentiellement guidé et réalisé par des industriels. Nous distinguerons quatre phases marquantes.

- Certains automates peuvent être présentés comme des automatismes logiques simples, notamment ceux qui font appel à une commande par programme chronométrique. C'est le cas d'orgues hydrauliques, du début de notre ère jusqu'à la Renaissance. Plus récemment, de nature comparable, on trouve des automates proposés au 18^{ème} siècle par Jacques de Vaucanson et de nombreux autres mécaniciens, les métiers à tisser de Joseph-Marie Jacquard mis au point entre 1801 et 1806, des machines-outils pour la

mécanique développées à l'occasion de la première guerre mondiale. La seconde guerre mondiale vit apparaître les machines-transferts. Tous ces mécanismes sont le fruit de l'imagination et de l'intelligence de mécaniciens, plutôt que le résultat d'une démarche méthodologique comparable à ce qu'est devenu un processus d'automatisation. Notons qu'aujourd'hui encore on trouve des automatismes réalisés sur la base de programmes chronométriques. C'est le cas, en particulier, de nombreux appareils ménagers produits en grande série (lave-linge, lave-vaisselle...).

- En 1847, un mathématicien anglais autodidacte, George Boole, publie un opuscule "Mathematical Analysis of Logic" dans lequel il soutient que la logique doit être rattachée aux mathématiques et non à la philosophie. Pour établir son discours, il introduit l'algèbre des variables qui ne prennent que deux valeurs numériques, 0 et 1 (il a notamment besoin des propriétés d'idempotence de cette algèbre). Notons que ses publications lui permirent d'être nommé Professeur en 1849 au Queen's College de Cork (Irlande) alors qu'il n'avait aucun titre universitaire. Ses travaux dans ce domaine se poursuivent, avec une autre publication importante en 1854, et son nom est resté attaché à cette algèbre (cf. chapitre 8). Mais ce n'est pratiquement qu'avec le développement des calculateurs numériques que l'algèbre de Boole a été utilisée d'une manière intensive par des scientifiques, c'est-à-dire presque un siècle plus tard !

- Les premiers calculateurs numériques ont été construits pendant la seconde guerre mondiale. Ils utilisaient des relais pour les opérations logiques et la mémoire. Le premier calculateur électronique, l'Eniac, fut mis en service en 1946 à l'Université de Pennsylvanie (Philadelphie), à une époque où le transistor n'était pas encore inventé (il date de 1948). Il comportait 18 000 tubes électroniques et disposait d'une mémoire de 20 mots de 10 digits ! Les instructions étaient câblées sur des panneaux de connexion et le temps d'exécution d'une multiplication était de 3 ms. Le premier calculateur Européen apparut à Cambridge, en 1949. On connaît aujourd'hui l'essor de l'informatique.

- Jusque dans les années 70, la conception des automatismes logiques était essentiellement empirique. Il y avait bien quelques méthodes de synthèse, mais elles s'écroulaient dès que le problème à résoudre réclamait plus de quelques variables. On concevait donc les armoires de commande des ascenseurs ou les systèmes de sécurité d'une centrale thermique sans l'aide de méthodes systématiques. C'est en 1975 qu'un groupe de travail de l'AFCET (Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique), sous l'impulsion de Michel Blanchard, décida de créer une commission "Normalisation de la représentation du cahier des charges d'un automatisme logique". En effet, c'était bien l'absence d'un outil de