

Lionel Birglen

# Mécatronique

3<sup>e</sup> ÉDITION

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel  
Graphisme de couverture : Élisabeth Riba

Illustration de couverture : Willyam Bradberry/shutterstock.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>		<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--	--

© Dunod, 2016, 2018, 2021  
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)  
ISBN 978-2-10-082845-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

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

---

## Avant-propos

---

*I can visualize a time in the future when we will be to robots as dogs are to humans.*

Claude Elwood Shannon, Entrevue avec *Omni Magazine*, p. 65, août 1987.

Cet ouvrage propose de rassembler en un seul livre facile à utiliser toutes les notions nécessaires au développement d'une expertise de base en mécatronique. Cette discipline dont nous verrons la définition, ou plus exactement tenterons d'en proposer une, bien que moderne, possède des racines anciennes et sa popularité ne cesse de croître. Sa caractéristique principale est une interdisciplinarité intrinsèque qui demande un champ de compétences élargi. Pour cela, il est nécessaire de comprendre les relations entre les différents éléments d'un système mécatronique pour en tirer le plein avantage. Ainsi un expert en électronique peut concevoir un circuit très complexe et performant mais inadapté au mécanisme qu'il commande. À l'inverse, un mécanicien aura tendance à s'imaginer que toute imperfection peut être compensée par un circuit suffisamment intelligent, ce qui est clairement faux ou tout du moins extrêmement difficile (les frottements ou les jeux dans les articulations en sont de bons exemples). De fait, pour créer un système de haute performance, les aspects mécaniques, électroniques ainsi que la commande doivent être conçus en toute connaissance de cause concernant leur interdépendance.

Ce livre est basé sur le matériel pédagogique du cours Mécatronique I que j'enseigne depuis maintenant près de dix ans à l'École Polytechnique de Montréal (Canada) et

---

a bénéficié de nombreuses relectures par les étudiant(e)s de ce cours. Je souhaite remercier ces étudiant(e)s pour de nombreuses heures d'échanges et d'innombrables commentaires et suggestions qui sont en grande partie réalisés ici. Cet ouvrage ne serait pas au niveau qu'il possède sans eux.

La première question qu'un lecteur est en droit de se poser est la raison pour laquelle un nouvel ouvrage dans le domaine de la mécatronique serait nécessaire et en quoi celui-ci se démarquerait des autres. Il y a plusieurs réponses à ces interrogations. La première et la raison principale pour laquelle j'ai décidé d'entreprendre la rédaction de ce livre est que l'offre des ouvrages en français sur la mécatronique est extrêmement pauvre, contrairement à la pléthore qui existe sur ce sujet en anglais. Il n'y a au moment de la rédaction de ces lignes qu'une poignée de livres en français sur la mécatronique. De plus, ces livres ont souvent tendance à se focaliser sur des aspects bien spécifiques comme la fiabilité ou un domaine d'application particulier comme l'automobile. Sans rien enlever à la pertinence de ces aspects, il m'a semblé qu'il manquait une référence générale mettant l'accent sur l'enseignement de la mécatronique au sens large. Cet ouvrage essaie de relever ce défi en proposant une démarche logique et cohérente, commençant par poser les bases de l'électronique, puis son utilisation dans les principaux éléments d'une boucle de commande mécatronique : capteurs, actionneurs et microprocesseurs.

Un effort particulier a été réalisé pour que les données présentées dans cet ouvrage reflètent des cas pratiques réalistes et idéalement des données expérimentales. J'ai malheureusement été incapable pour des raisons de temps et de moyens techniques de ne présenter que des résultats expérimentaux dans toutes les figures de l'ouvrage, comme je l'aurais voulu, mais je souhaite encourager vivement le lecteur à ne pas prendre ce qui est écrit dans ce livre comme parole sacrée et à vérifier par lui-même comment tel ou tel élément fonctionne. Comme l'écrivait Jules César il y a plus de deux mille ans : c'est l'expérience qui est le maître en tout<sup>1</sup>. Nous avons la chance d'avoir vu ces dernières années un effondrement du prix requis pour la construction des systèmes mécatroniques grâce à l'introduction à grande échelle des technologies de prototypage rapide (impression 3D), des microsystèmes électroniques (accéléromètres, unités de mesures inertielles, etc.) et des microcontrôleurs (par exemple tout l'écosystème Arduino). Il est maintenant à la portée de la plupart des bourses de fabriquer un petit robot ou mécanisme asservi et il faut en profiter !

Pour finir, en plus des nombreux étudiant(e)s de l'École Polytechnique, je souhaite remercier Mme Josée Dugas pour avoir relu et corrigé une version préliminaire de

---

<sup>1</sup>*Ut est rerum omnium magister usus*, « Commentarii de Bello Civili » livre 2 paragraphe 8, approx. 40 av. J.-C.

---

cet ouvrage ainsi que M. Clément Hély pour ses judicieuses remarques notamment à propos des unités de température. Ce livre a été écrit à l'aide du logiciel de mise en page LaTeX, les figures sont pour la plupart vectorielles et ont été créées avec XFig, IPE, ou Inkscape. Les rares illustrations qui ne sont pas vectorielles (essentiellement les photographies) ont été éditées avec Gimp. Tous ces logiciels sont gratuits et fonctionnent sous Linux et Windows. Quelques figures 3D au chapitre 4 ont été réalisées avec Catia et la plupart des figures montrant des résultats numériques ont été obtenues avec Matlab qui sont eux des logiciels commerciaux.

Le lecteur est invité à consulter les pages web suivantes :

<https://www.dunod.com/EAN/9782100828456>

<http://www.mecatronique-livre.com/>

pour des compléments d'informations, des mises à jour, des liens supplémentaires ainsi qu'un errata de cet ouvrage.

Lionel Birglen, Saigon, 20 juillet 2015

### **Seconde édition :**

Cette deuxième édition bénéficie de nombreuses améliorations, corrections et compléments. Pour cela, je tiens à remercier mes lecteurs pour leurs nombreuses remarques, qu'ils aient été des étudiants, des collègues ou autres et m'ont fait part de leurs suggestions. En particulier, l'aspect mécanique de la mécatronique a été significativement développé dans cette nouvelle version par la présentation de nouveaux mécanismes parmi ceux qui sont les plus utilisés en mécatronique. Les accéléromètres, au cœur d'innombrables applications de nos jours, font aussi leur entrée dans cette nouvelle édition. D'un point de vue plus fondamental, des rappels sur la transformée de Laplace et l'identification des systèmes, à la fois dans le domaine continu et discret, sont aussi maintenant présentés. Finalement, toutes les erreurs notées dans l'errata de la première édition ont été corrigées. Je souhaite ardemment continuer à améliorer ce livre et invite tout lecteur à me contacter pour me rapporter suggestions ou remarques. Votre aide est grandement appréciée !

Lionel Birglen, Brossard, 15 novembre 2017

---

### **Troisième édition :**

Nous voici maintenant à la troisième édition de cet ouvrage. Cette dernière version est une mise à jour significative avec 80 pages supplémentaires. Parmi le contenu ajouté dans cette nouvelle édition, le lecteur trouvera une nouvelle technique de conversion numérique-analogique, l'introduction des sorties numériques à trois états, une révision du chapitre 3 suite à la réforme du Système international d'unités, une présentation des encodeurs magnétiques, une technique de modélisation dynamique des chaînes d'actionnement, la commande vectorielle des moteurs sans balais, de nouveaux mécanismes à base de poulies ainsi que de transformation de mouvement, une section sur la topologie et les méthodes de communication entre systèmes numériques, ainsi qu'une multitude de nouvelles figures présentant des résultats expérimentaux obtenus par l'auteur. En plus de cela, cette troisième édition bénéficie à nouveau de nombreuses améliorations et corrections suite aux commentaires de lecteurs attentifs. Parmi ceux-ci, l'auteur tient à remercier en ordre alphabétique : Dominic Boisvert, Martin Crape, William Dumberry, Dmitri Fedorov, Alexandre Ferreira Benevides, Joshua Glazer, Guillaume Normandeau, Tristan Pomerantz, Eric St-Amant, et Grégoire Wisdorff.

Le site compagnon du livre [www.mecatronique-livre.com](http://www.mecatronique-livre.com) dispose aussi maintenant d'un lien vers un sondage anonyme permettant de suggérer facilement à l'auteur quelles parties de l'ouvrage devraient être ajoutées ou améliorées dans de futures éditions. Tout lecteur est encouragé à partager avec l'auteur la direction vers laquelle il souhaite voir l'ouvrage évoluer.

Lionel Birglen, Brossard, 30 mars 2021

---

## Présentation de l'auteur

---



Lionel Birglen a obtenu un diplôme d'ingénieur en mécanique de l'École nationale supérieure des arts et industries de Strasbourg (France) en 2000 (promotion triple zéro, les professeurs n'ont jamais manqué de le rappeler...), devenu Institut national des sciences appliquées de Strasbourg en 2003. Il a ensuite obtenu une maîtrise en sciences à l'Université Laval (Canada) puis un doctorat en robotique dans la même université en 2004 après un passage accéléré entre ces deux programmes. Après une année de postdoctorat, toujours à l'université Laval, il a été engagé comme professeur adjoint en 2005 par l'École polytechnique de Montréal où il fonde le laboratoire de robotique et de systèmes mécatroniques adaptatifs en 2006. Après une première promotion au rang de professeur agrégé en 2010, il atteint finalement le rang de professeur titulaire (équivalent au titre de professeur des universités en France) en 2015. Son expertise principale est la conception et commande des systèmes mécaniques articulés complexes, en particulier les mains artificielles et adaptatives, les manipulateurs parallèles, les mécanismes compliants, ainsi que le contrôle en force. Il est membre de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME), de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), du Canadian Committee for the Theory of Machines and Mechanisms (CCToMM), du Canadian Aeronautics and Space Institute (CASI), de la Société Canadienne de Génie Mécanique (SCGM), et de l'Ordre des ingénieurs du Québec.



---

## Table des matières

---

<b>Avant-propos</b>	<b>III</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction . . . . .	1
1.2 Mécatronique . . . . .	5
1.2.1 Définition . . . . .	5
1.2.2 Cybernétique et mécatronique . . . . .	12
1.3 Systèmes dynamiques . . . . .	17
1.3.1 Modélisation . . . . .	17
1.3.2 Identification . . . . .	30
1.4 Conclusion . . . . .	38
<b>2 Éléments d'électronique</b>	<b>41</b>
2.1 Introduction . . . . .	41
2.2 Électronique analogique . . . . .	43
2.2.1 Rappels . . . . .	43
2.2.2 Lois de Kirchhoff . . . . .	45
2.2.3 Composants classiques . . . . .	47
2.2.4 Transistor . . . . .	71
2.2.5 Notes . . . . .	81
2.3 Traitement du signal . . . . .	90
2.3.1 Introduction . . . . .	90
2.3.2 Amplificateur opérationnel . . . . .	90
2.3.3 Filtrage analogique . . . . .	109
2.3.4 Notes . . . . .	125

2.3.5	Amélioration des performances en régime dynamique . . .	127
2.3.6	Conversion numérique $\Leftrightarrow$ analogique . . . . .	132
2.3.7	Conversion numérique $\Rightarrow$ analogique pratique . . . . .	134
2.3.8	Conversion analogique $\Rightarrow$ numérique pratique . . . . .	140
2.3.9	Multiplexage . . . . .	158
2.4	Électronique numérique . . . . .	160
2.4.1	Rappels et compléments sur les nombres binaires . . . . .	160
2.4.2	Logique combinatoire . . . . .	163
2.4.3	Algèbre de Boole . . . . .	172
2.4.4	Logique séquentielle . . . . .	175
2.4.5	Applications . . . . .	184
2.5	Conclusion . . . . .	197
2.6	Lexique franco-anglais . . . . .	199
2.7	Liens . . . . .	200
	Exercices . . . . .	201
<b>3</b>	<b>Capteurs</b>	<b>211</b>
3.1	Introduction . . . . .	211
3.2	Capteurs de température . . . . .	217
3.2.1	Rappels - unités . . . . .	217
3.2.2	Thermocouple . . . . .	218
3.2.3	Thermistance . . . . .	220
3.2.4	Thermomètre à résistance de platine . . . . .	223
3.2.5	Capteur de température intégré . . . . .	226
3.2.6	Comparaison . . . . .	226
3.3	Capteurs de lumière . . . . .	228
3.3.1	Rappels - unités . . . . .	228
3.3.2	Photorésistance . . . . .	229
3.3.3	Photodiode . . . . .	229
3.3.4	Phototransistor . . . . .	230
3.3.5	Cellule photovoltaïque . . . . .	231
3.3.6	Circuits de conditionnement . . . . .	233
3.4	Capteurs de présence/proximité . . . . .	234
3.4.1	Introduction . . . . .	234
3.4.2	Capteur optique de proximité . . . . .	234
3.4.3	Capteur à effet Hall . . . . .	237
3.5	Capteurs de position . . . . .	238
3.5.1	Rappels - unités . . . . .	238
3.5.2	Potentiomètre . . . . .	240
3.5.3	Encodeur optique . . . . .	241
3.5.4	Encodeur magnétique . . . . .	248

3.5.5	Filtrage des signaux numériques . . . . .	250
3.6	Capteurs d'accélération . . . . .	252
3.6.1	Rappels - unités . . . . .	252
3.6.2	Modélisation . . . . .	252
3.6.3	Accéléromètre capacitif . . . . .	254
3.6.4	Accéléromètre piézoélectrique . . . . .	256
3.6.5	Remarque sur l'intégration des mesures . . . . .	258
3.6.6	Comparaison des différents capteurs d'accélération . . . . .	259
3.7	Conclusion . . . . .	260
3.8	Lexique franco-anglais . . . . .	261
3.9	Liens . . . . .	262
	Exercices . . . . .	263
<b>4</b>	<b>Actionneurs</b>	<b>269</b>
4.1	Introduction . . . . .	269
4.2	Modélisation des chaînes d'actionnement . . . . .	271
4.3	Actionneurs électriques . . . . .	277
4.3.1	Moteurs à courant continu . . . . .	279
4.3.2	Moteurs sans balais . . . . .	309
4.3.3	Moteurs pas à pas . . . . .	321
4.3.4	Servomoteurs . . . . .	330
4.4	Transmission des mouvements . . . . .	333
4.4.1	Engrenages . . . . .	333
4.4.2	Poulies . . . . .	342
4.4.3	Vis sans fin . . . . .	348
4.4.4	Mécanismes . . . . .	349
4.5	Conclusion . . . . .	360
4.6	Lexique franco-anglais . . . . .	360
4.7	Liens . . . . .	362
	Exercices . . . . .	363
<b>5</b>	<b>Microprocesseurs</b>	<b>369</b>
5.1	Introduction . . . . .	369
5.2	Architectures . . . . .	370
5.2.1	Unité arithmétique et logique, périphériques . . . . .	371
5.2.2	Communications . . . . .	376
5.2.3	Assembleur . . . . .	407
5.2.4	Opérations binaires . . . . .	411
5.2.5	Autres langages . . . . .	414
5.3	Applications . . . . .	415
5.3.1	Transformée en Z . . . . .	415

5.3.2	Synthèse de correcteurs . . . . .	429
5.3.3	Filtrage numérique . . . . .	433
5.3.4	Identification par modèle numérique . . . . .	445
5.4	Conclusion . . . . .	448
5.5	Lexique franco-anglais . . . . .	449
5.6	Liens . . . . .	450
	Exercices . . . . .	451
<b>A</b>	<b>Compléments</b>	<b>457</b>
A.1	Norme AWG . . . . .	457
A.2	Types d'interrupteurs . . . . .	459
A.3	Codes ASCII de contrôle . . . . .	460
<b>B</b>	<b>Tables de primitives</b>	<b>461</b>
B.1	Fonctions trigonométriques . . . . .	461
B.2	Fonctions polynomiales . . . . .	462
<b>C</b>	<b>Solutions des exercices</b>	<b>463</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>499</b>

# CHAPITRE 1

---

## Introduction

---

*No, the future offers very little hope for those who expect that our new mechanical slaves will offer us a world in which we may rest from thinking. Help us they may, but at the cost of supreme demands upon our honesty and our intelligence. The world of the future will be an ever more demanding struggle against the limitations of our intelligence, not a comfortable hammock in which we can lie down to be waited upon by our robot slaves.*

Norbert Wiener, *God and Golem Inc*, MIT Press, 1964.

### 1.1 Introduction

Cet ouvrage a pour objectif de familiariser l'étudiant de niveau ingénieur ou technicien supérieur avec des systèmes intégrant intimement électronique, commande et informatique. Il suppose une base minimale en calculs surtout mécaniques et met l'accent sur l'aspect électronique de la mécatronique. Cependant, les autres éléments qui entrent dans la formation en mécatronique tels que l'analyse statique et dynamique, la conception, la résistance des matériaux, les éléments de machines, etc. sont eux aussi importants et nécessaires ! Simplement, les informations pertinentes sur ces sujets peuvent se trouver aisément dans de nombreux autres ouvrages disponibles. À la différence, l'intégration de l'électronique dans la commande des systèmes mécatroniques, en lien avec la mesure, l'actionnement et le contrôle reste un aspect peu

couvert. Dans le présent ouvrage on se penchera plus particulièrement sur l'intégration de ces connaissances afin de pouvoir concevoir des systèmes mécatroniques performants et modernes. Ce livre est divisé en cinq grandes parties :

- introduction ;
- électronique et traitement du signal ;
- capteurs ;
- actionneurs ;
- microprocesseurs, microcontrôleurs et DSP.

Des exercices sont proposés à la fin de chaque chapitre et il est **très fortement** conseillé à l'étudiant(e) de les faire afin de vérifier sa compréhension de la matière. Ils sont considérés comme partie intégrante du livre et le chapitre subséquent à une série d'exercices suppose que ceux-ci ont été réalisés. On y retrouve des applications des notions de base vues dans le chapitre et en propose souvent une extension. En particulier, un effort a été fait pour que ces exercices traitent de cas pratiques réels ou tout du moins réalistes et ainsi prolongent de façon appliquée les notions du chapitre auquel ils succèdent.

Cet ouvrage est au moment de sa rédaction le premier qui présente en français une approche cohérente et globale de l'ensemble de la mécatronique. Il existe par contre de nombreux ouvrages en langue anglaise qui ont une qualité variable. Certaines de ces références sont cependant très bonnes et méritent la peine de s'y attarder parmi lesquelles on peut citer l'ouvrage de S. Cetinkunt [1] et en particulier l'excellent livre de C. Kilian [2] dont cet ouvrage s'est largement inspiré à bien des moments. La structure adoptée dans ce livre reflète celle d'une chaîne de commande en boucle fermée telle qu'illustrée à la figure 1.1. Un point important à noter est que cet ouvrage n'est pas un livre d'automatique comme il en existe déjà une multitude sur le marché. On suppose que le lecteur possède une formation de base en automatique et est familier avec les notions de transformée de Laplace, stabilité, schémas-blocs, etc. Quelques rappels très succincts d'automatique sont toutefois présentés à la section 1.3 afin de rafraîchir ces notions mais on ne rentrera pas dans les fondements théoriques de cette discipline. Encore une fois, le but de cet ouvrage n'est pas de donner un cours d'automatique, terme qui est souvent malheureusement considéré comme un synonyme de mécatronique, mais de donner une formation beaucoup plus pratique et appliquée sur la conception réelle d'un produit mécatronique. Chaque élément de la chaîne en boucle fermée illustrée à la figure 1.1 va être analysé et détaillé. On va voir quels sont les éléments employés, comment les choisir et surtout comment ils sont interfacés les uns avec les autres. Ainsi, on va constater qu'il existe un fil directeur entre tous ces éléments, **l'électronique**, qui sera employée à toutes les étapes.

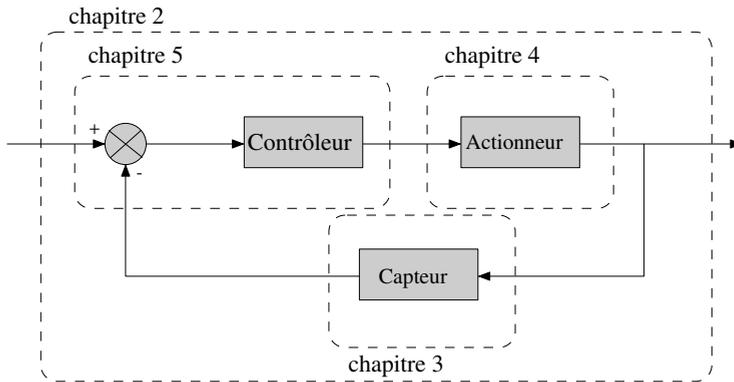


FIGURE 1.1 – Chaîne de commande en boucle fermée.

Le chapitre 2 concerne justement cet aspect, c'est-à-dire l'électronique et le traitement du signal. Il s'agit du chapitre le plus imposant de tous car les notions que l'on va y présenter seront utilisées tout au long de ce livre. Il s'agit des bases de la mécatronique et il est important que celles-ci soient bien assimilées afin de comprendre les parties subséquentes. Le chapitre 2 est subdivisé en trois grandes parties. Dans la première, on va effectuer quelques rappels d'électronique classique : caractéristiques des composants standard, lois de Kirchhoff, etc. Suivant ces rappels, on va présenter les deux principales technologies de transistor, un composant électronique non linéaire extrêmement important et utilisé partout dans les systèmes mécatroniques. À la suite de ces généralités sur les composants de base, on trouvera une discussion sur les notions d'impédance et de puissance en électronique. Dans la seconde partie de ce chapitre, un autre composant très employé dans les systèmes mécatroniques et nommé l'amplificateur opérationnel (AOP) sera présenté. Il s'agit d'un circuit intégré principalement constitué de transistors, qui a une multitude de fonctions et dont on va rappeler les montages usuels dans un premier temps pour ensuite voir son application dans les opérations de conversion numérique-analogique (CNA), analogique-numérique (CAN) et de filtrage. Enfin, la dernière partie du chapitre 2 sera consacrée à une branche particulière de l'électronique : l'électronique numérique. On y verra les différents éléments qui la composent et la façon dont cette branche de l'électronique est analysée au moyen d'une **logique** (au sens mathématique du terme). Cette logique peut être soit combinatoire, soit séquentielle, selon qu'il est nécessaire ou non de tenir compte du temps. Les règles d'études de l'électronique numérique diffèrent fondamentalement de celles utilisées pour l'électronique analogique et sont basées sur une algèbre dite de Boole, d'après le nom de son inventeur, dont on verra l'utilisation.

Le chapitre suivant est consacré aux capteurs. On verra comment fonctionne une sélection de technologies usuelles de mesure, comment en choisir les éléments et comment les utiliser. Ce chapitre insiste sur l'intégration des capteurs d'un point de vue plus global et pratique dans la chaîne de commande. Nous allons y voir principalement des capteurs de température, de lumière, de proximité, et de position, mais les notions présentées sont applicables à tout type de mesure.

Après les capteurs, nous nous pencherons sur quelques actionneurs usuels en mécatronique qui constitueront le sujet d'étude du chapitre 4. À nouveau, nous verrons quels sont les principaux types d'actionneurs utilisés en mécatronique et principalement les différentes technologies de moteurs électriques de basse et moyenne puissance. Nous verrons comment fonctionnent ces moteurs et quelles sont leurs caractéristiques, permettant ainsi de choisir la meilleure solution technologique pour une fonctionnalité désirée. Les circuits de commande les plus courants de ces moteurs seront aussi présentés et analysés afin de comprendre leurs modes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients. Suite à la présentation de ces différentes technologies d'actionnement, une partie subséquente du chapitre 4 sera consacrée aux mécanismes de transmission en tout genre, depuis les engrenages jusqu'aux mécanismes à base de corps rigides. Ces éléments de transmission sont quasiment indispensables à l'actionneur car celui-ci entraîne rarement une charge directement. Notez que le lecteur est renvoyé aux ouvrages d'électrotechnique pour l'analyse des actionneurs de grandes puissances. Bien que les principes de fonctionnement et d'opération soient similaires, nous n'aborderons pas ces systèmes.

Dernier élément de la chaîne de commande des systèmes mécatroniques, une introduction aux microprocesseurs et microcontrôleurs (respectivement abrégés  $\mu P$  et  $\mu C$ ) sera vue au chapitre 5. Leurs caractéristiques principales ainsi que leur architecture interne la plus courante seront présentées. Nous verrons la façon dont ils communiquent avec le monde extérieur et leurs **périphériques** dont le plus important est probablement la **mémoire**. L'organisation de cette dernière nous amènera à l'introduction d'un langage de programmation quasi universel aux  $\mu P$  et  $\mu C$  : l'assembleur. Ce langage qui est le plus proche des signaux électriques circulant dans ces micro-systèmes permet d'accéder à toute leur puissance de calcul mais reste difficile à maîtriser. Il permet néanmoins d'implanter des programmes de contrôle et/ou de filtrage dans des systèmes mécatroniques et notamment les systèmes embarqués. Cependant, avant de pouvoir implanter un contrôleur ou un filtre dans un système mécatronique, il faut pouvoir traduire sa fonction de transfert en un algorithme utilisable. Cette conversion est réalisée à partir des propriétés de la **transformée en Z**. Celle-ci est similaire à la transformée de Laplace mais pour des signaux et des systèmes numé-

riques **discrets**. À la suite de la présentation de cette technique, des méthodes pratiques et courantes de réglage des gains de contrôleurs classiques seront présentées ainsi que des fonctions de transfert de filtres communément employés dans les systèmes mécatroniques.

## 1.2 Mécatronique

### 1.2.1 Définition

Qu'est-ce que la mécatronique ? La définition de la mécatronique est très variable selon les auteurs. En général, il est admis qu'elle représente la combinaison de la mécanique, de l'électronique et du contrôle en temps réel, tel qu'illustré à la figure 1.2. D'après *Compétences Canada*,

*« la mécatronique combine la technologie de la mécanique, de l'électronique, de l'informatique, de la pneumatique, de l'électricité et de l'hydraulique. Un emploi dans ce domaine peut comprendre l'assemblage, la fabrication, l'entretien ou la commande de produits ou de systèmes de production. Les travailleurs doivent réaliser l'assemblage des éléments mécaniques, électriques et pneumatiques de systèmes de transfert suivant la documentation et les schémas fournis. Le câblage électrique comprend les connexions d'entrée et de sortie, les capteurs et le câblage de moteur, les commutateurs, les boutons de commandes et les solénoïdes pneumatiques. »*

L'Association française de normalisation (AFNOR) a défini quand à elle la mécatronique dans la norme NF E01-010 comme la démarche visant :

*« l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité. »*

Un dictionnaire français bien connu définit quant à lui la mécatronique comme étant :

*« [la] technique industrielle consistant à utiliser simultanément et en symbiose la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique pour la conception et la fabrication de nouveaux produits. »*

On peut constater que le dénominateur commun de ces définitions est l'interdisciplinarité. La mécatronique consiste à combiner plusieurs compétences, principalement

la mécanique et l'électronique, simultanément. Dans le monde anglophone, le magazine *Mechanical Engineering* de l'American Society of Mechanical Engineering a publié dans son numéro de juin 2008 un dossier spécial sur la mécatronique, qu'il définissait comme mêlant la mécanique et l'électronique comme d'habitude. Plus intéressant, est la réponse dans le courrier des lecteurs du numéro du mois d'octobre, dans lequel une lettre de Haruo Kozono dénonçait dans un ton très vif cette définition. Le Dr. Kozono est un collaborateur de Tetsuro Mori qui est lui-même l'inventeur du mot *mechatronics* (qui était d'ailleurs à l'origine une marque déposée par Yaskawa Electric). Il précise que mécatronique ne vient pas de la contraction de **mécanique** et électronique mais de **mécanisme** et électronique et qualifie la définition erronée selon lui de la mécatronique de (nous citons) :

*« wrong and false information [...] spread over the world »*

et plus loin :

*« you cannot distort the meaning or philosophy of Mechatronics that had been previously described by Tetsuro Mori. »*

La différence étant que l'emphase est mis sur la théorie des mécanismes plutôt que la mécanique au sens large. Sans avoir la présomption de vouloir trancher le débat, constatons qu'il existe plusieurs définitions.

Une erreur commune est de penser qu'un ingénieur en mécatronique remplace à la fois un ingénieur mécanicien et un ingénieur électronique. C'est une erreur fondamentale car le domaine de compétence d'un professionnel de la mécatronique ne représente qu'une partie des compétences de chacun de ces experts. Par exemple, une personne avec une formation en mécatronique n'est en général absolument pas compétente dans le domaine du transport de l'énergie électrique (lignes haute tension) ou de la mécanique des fluides.

Tel que mentionné précédemment, le terme *mechatronics* a été introduit (et breveté) par la compagnie japonaise Yaskawa Electric en 1969 et est apparu en français dans le dictionnaire Larousse en 2005. Il s'agit d'un domaine interdisciplinaire par excellence qui a pour but de combiner en une seule personne ressource les besoins des produits modernes. En effet, ces derniers sont de façon quasi universelle commandés par des systèmes électroniques. Néanmoins, dès que ces produits comportent des parties mobiles, l'aspect mécanique devient important et les compétences d'un ingénieur électronique ne suffisent plus pour créer un produit de haute performance. La mécatronique est née de ce besoin en même temps que la révolution électronique du XX<sup>e</sup> siècle. Bien que son ancêtre, l'électromécanique, a ses racines dans la révolution industrielle. L'arrivée massive de l'électronique dans les produits de consommation

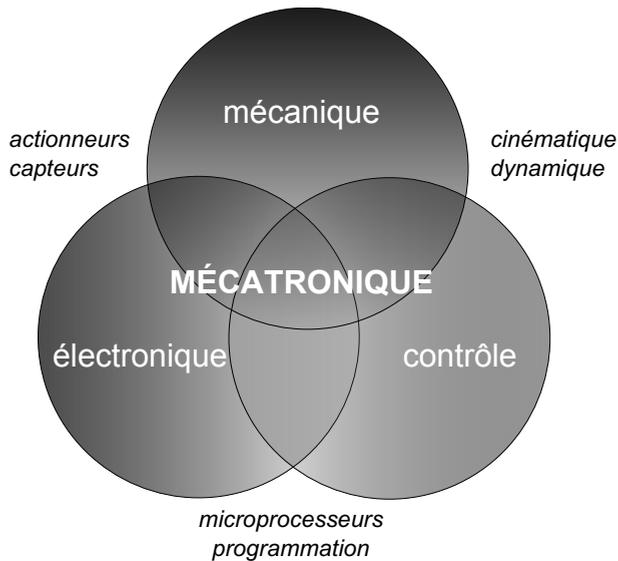


FIGURE 1.2 – Illustration de l'interdisciplinarité de la mécatronique.

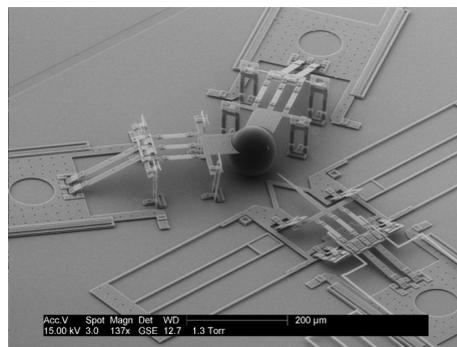
et industriels, rendue possible par la miniaturisation des composants et le transport efficace de l'énergie électrique sur de longues distances, a bouleversé nos sociétés modernes. Auparavant, les sources d'énergie éolienne (moulins à vent), hydraulique (rivières et barrages), ou minérale (charbon) étaient privilégiées mais leur transport, stockage ou production rendait leur utilisation difficile en dehors de zones bien délimitées.

La mécatronique est un domaine de plus en plus largement enseigné dans le monde francophone, que ce soit en France (INSA Strasbourg, ENSAM, Polytech'Orléans, ESTACA, UTC, etc.), au Canada (universités de Waterloo, Vancouver, Toronto, McMaster, Victoria, etc.), mais aussi internationalement (Rensselaer Polytechnic Institute aux États-Unis, DLR Institute of Robotics and Mechatronics en Allemagne, etc.). La raison de cette expansion est qu'elle répond à un besoin pressant de la part des industriels. En effet, les produits qui ne sont pas à la fine pointe de la technologie ne sont plus viables économiquement. Dans le monde moderne, les produits à faible valeur ajoutée sont fabriqués pour un coût dérisoire dans les pays en voie de développement. La seule solution pour les pays plus développés de conserver leur tissu industriel est de passer à une économie basée sur la production automatique et/ou les produits technologiques complexes. Le Japon, en concurrence directe avec la Chine et autres pays de l'Asie du Sud-Est depuis toujours, l'a compris depuis longtemps et dénommé cette stratégie par le poétique *vol des oies sauvages*. Sa réussite se lit

dans son économie qui affiche un des plus hauts PIB de la planète, sans quasiment la moindre ressource naturelle à sa disposition et une population limitée. Une autre raison de l'essor de la mécatronique est le besoin important d'augmentation de la productivité des entreprises. En effet, en raison du vieillissement de la population dans les pays occidentaux, un déséquilibre majeur entre la population active et la population passive est à prévoir. Ainsi, on peut citer l'exemple du Québec où un déficit du nombre de travailleurs s'élevant à 200 000 individus est prévu [3] en 2025. Cette diminution de la taille de la population active couplée à une augmentation de la population totale provoquera une diminution du produit intérieur brut et donc du budget du gouvernement pour financer les services. Plusieurs actions ont été proposées pour enrayer ce phénomène (hausse de l'immigration, hausse de la natalité, hausse des taxes et impôts, diminution des prestations sociales, l'âge de la retraite repoussé, etc.) mais certaines de celles-ci sont des choix de société difficiles et avec un lourd impact sur la qualité de vie des gens. Il est probable que le futur passe par un mélange de ces différentes voies et la hausse de la productivité par le biais de l'introduction de l'automatique et la robotique dans l'industrie fait partie de l'éventail des solutions dans ce contexte. Notons que si le domaine porte-étendard de la mécatronique est probablement la robotique, elle ne se limite pas à celle-ci et bien d'autres applications existent.



(a) Robot manipulateur FANUC



(b) Nano-injecteur

FIGURE 1.3 – Robot industriel et micromécanisme nano-injecteur (photographie de Quentin Aten, Brigham Young University, avec la permission du prof. Jensen [4]).

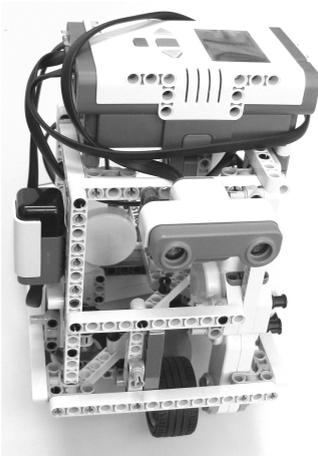


(a) Appareil photographique



(b) Disque dur

FIGURE 1.4 – Produits mécatroniques.



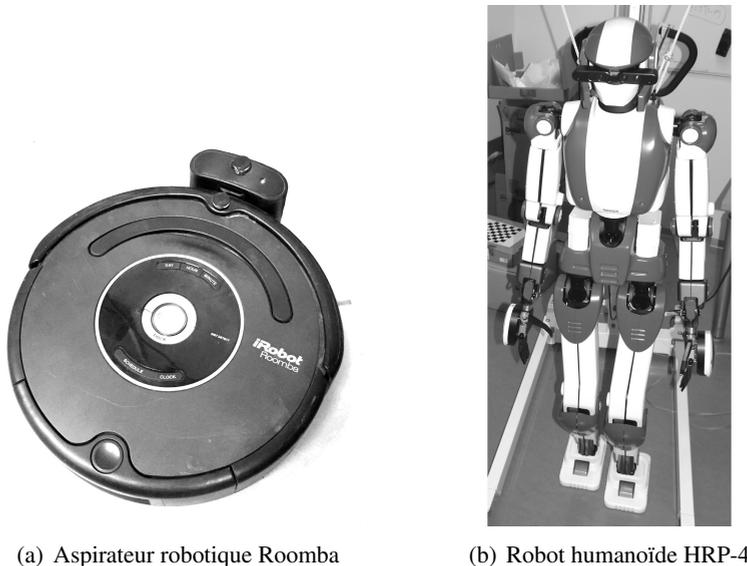
(a) Lego Mindstorms NXT



(b) DARwIn-OP et son petit frère

FIGURE 1.5 – « Jouets » mécatroniques.

Quelques exemples de systèmes mécatroniques modernes sont présentés sur les figures 1.3 à 1.8. On peut noter que progressivement, tel que discuté précédemment, la mécatronique envahit les produits modernes et même les activités humaines avec des résultats assez futuristes dans certains cas. Parmi ces produits et activités, on peut citer des domaines d'application étonnamment variés allant des aspirateurs ménagers jusqu'aux robots chirurgicaux. Même dans l'architecture, la mécatronique se développe et des bâtiments intelligents qui peuvent changer de forme, se réparer, s'adapter à la météo et réagir à la présence humaine sont en développement [5]. La robotique de service à domicile subit elle-aussi un essor fulgurant et son marché augmente de façon spectaculaire. Dans le domaine automobile, l'explosion du nombre de microcontrôleurs dans un véhicule moderne [6] atteste de son implantation (airbags, contrôle actif de suspension, etc.).



(a) Aspirateur robotique Roomba

(b) Robot humanoïde HRP-4

FIGURE 1.6 – Robots domestiques d'assistance à domicile.

De par son succès, la mécatronique n'est plus maintenant un domaine monolithique et de multiples variations sémantiques existent, par exemple :

- biomécatronique, application aux systèmes biologiques (souvent médicaux) ;
- micromécatronique, à l'échelle micrométrique ;
- nanomécatronique, à l'échelle nanométrique ;
- mécatronique, avec l'emploi de matériaux « intelligents » ;



(a) Kubota Arm-1



(b) Exoskelette Cyberdyne

FIGURE 1.7 – Systèmes mécatroniques d’assistance musculaire.



(a) Robot Jaco de Kinova



(b) Robot chirurgical Da Vinci

FIGURE 1.8 – Systèmes mécatroniques médicaux (merci à François Boucher et au Dr. Hugues Jeanmart respectivement pour ces deux photos).

- optomécatronique, incluant des systèmes optiques ;
- neuromécatronique, interface avec le système nerveux.

Il existe même des combinaisons de plusieurs préfixes : nanobiomécatronique, micro-optomécatronique [7], etc. L'auteur de cet ouvrage invite le lecteur à néanmoins être prudent avec ces termes et dénominations, la plupart étant selon lui simplement des effets de mode cherchant à inclure des mots-clés attrayants...

### 1.2.2 Cybernétique et mécatronique

Un système mécatronique est composé de différents sous-systèmes. Ceux-ci sont usuellement représentés sous la forme de schémas-blocs (figure 1.9). Un expert en mécatronique doit connaître les caractéristiques de ces sous-systèmes, savoir les utiliser et les assembler de façon à obtenir un système optimal.

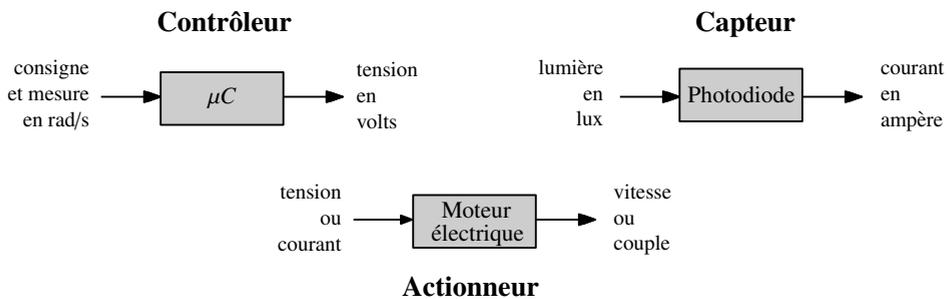


FIGURE 1.9 – Exemples de schémas-blocs dans un système mécatronique.

Tous ces blocs sont caractérisés par une relation d'entrée-sortie **causale** donc prédictible. Cette relation est complètement générale et ne présume pas du type de système considéré ou de la nature des entrées-sorties. Il est courant d'utiliser la transformée de Laplace dans l'écriture de ces relations mais cela reste un cas particulier aux systèmes linéaires en régime dynamique. L'élégance de la représentation sous forme de schémas-blocs vient du fait qu'elle rend évidente la nature similaire de tous les éléments de la chaîne de commande. On peut s'en servir pour représenter un capteur, un actionneur ou un contrôleur.

Si la quasi-totalité des systèmes mécatroniques utilise la théorie de la commande, ces systèmes ne sont pas tous forcément en boucle fermée tel qu'illustré à la figure 1.1, on retrouve aussi quelquefois une boucle de commande dite ouverte. La différence entre ces deux types de commande, illustrées à la figure 1.10, est basée sur la présence dans le cas de la boucle fermée d'un retour d'information sur l'état du système

que l'on souhaite commander. Ce retour permet à un contrôleur d'ajuster la commande envoyée aux actionneurs afin de satisfaire au mieux la consigne. L'élément fondamental de la commande en boucle fermée est le capteur, mais quelquefois, pour des raisons de coûts, il n'est pas employé et le système est alors laissé en boucle ouverte. Les systèmes en boucle ouverte ont généralement des performances inférieures à celles obtenues en boucle fermée mais cela n'est pas une règle absolue. Un contrôleur mal réglé dans une boucle fermée provoque un comportement souvent bien pire que si le système avait été laissé en boucle ouverte !

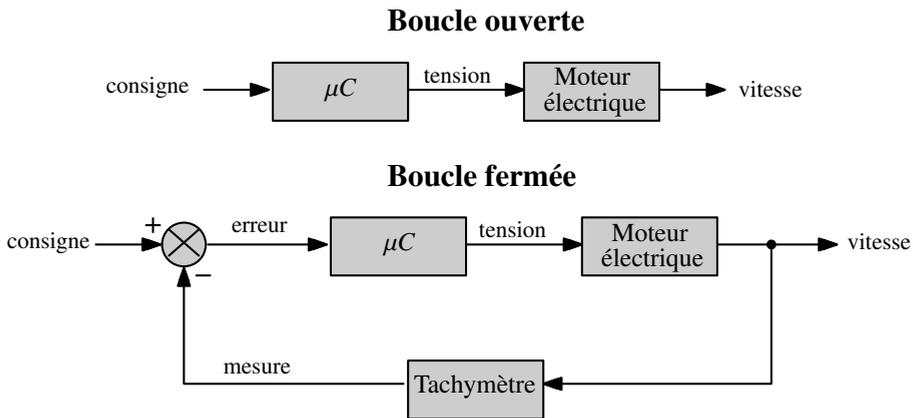


FIGURE 1.10 – Exemples de commande en boucle ouverte et boucle fermée.

La théorie associée aux systèmes en boucle fermée est la **cybernétique** du grec *kubernêtikê* qui désigne le gouvernail/pilote d'un navire. Il s'agit de la science des systèmes autorégulés, c'est-à-dire des systèmes qui s'équilibrent par eux-mêmes dans un état stable. Les fondements mathématiques de cette science ont été établis après la seconde guerre mondiale notamment par Norbert Wiener, Warren Sturgis McCulloch et William Grey Walter qui s'intéressèrent au fonctionnement des neurones humains et cherchèrent à le répliquer.

Bien que souvent associée à la mécatronique, la notion de système en boucle fermée est bien plus ancienne et n'est d'ailleurs pas contemporaine de l'électronique mais bien antérieure. Illustré à la figure 1.11(a), le régulateur (ou gouverneur) de Watt (1736-1819) est considéré comme le premier système en boucle fermée industriel. Cet ingénieux mécanisme était utilisé pour réguler la vitesse des machines à vapeur, notamment pour les métiers à tisser. L'alimentation en vapeur de ces machines passait par un tuyau muni d'une valve pivotante. Plus cette valve était ouverte et plus le débit de vapeur qui alimentait la machine était important. L'idée du gouverneur de

Watt est de relier mécaniquement le levier commandant cette valve à un mécanisme rotatif. Ce mécanisme rotatif était directement couplé à l'axe de sortie de la machine à vapeur et comportait deux masses excentrées situées de part et d'autre. Plus la machine à vapeur était alimentée par un débit important de vapeur et plus l'axe de sortie tournait vite, cette rotation provoquait l'éloignement des masses à cause de la force centrifuge. Le régulateur de Watt reliait mécaniquement cet éloignement des masses au levier de commande de la valve et donc l'augmentation de la vitesse provoquait la fermeture de la valve. Cette fermeture provoquait une baisse du débit de la vapeur qui en retour faisait se rapprocher les masses. Ce rapprochement provoquait à son tour l'ouverture de la valve et ainsi de suite, **un équilibre était atteint**. On obtenait de cette façon un comportement (auto-)régulé, si la machine tournait trop vite, la vanne d'admission diminuait le débit de vapeur et inversement, si la machine tournait trop lentement, le débit de vapeur augmentait. Notez qu'une augmentation de la vitesse (mesurée par l'éloignement des masses) provoque une diminution de la commande (débit de vapeur), on parle de **rétroaction négative**. Ce principe est similaire à celui des thermostats utilisés pour réguler la température des fours depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. La théorie de la rétroaction négative, concept fondamental à la stabilité, a été popularisée au XX<sup>e</sup> siècle par Norbert Wiener et Harold Stephen Black. On retrouve encore de nos jours cette boucle de retour mécanique dans la plupart des pompes automatiques (figure 1.11(b) adapté de [8]) sous la forme d'un robinet à flotteur. On considère que les améliorations à la machine à vapeur effectuées par Watt, notamment par l'introduction de son régulateur, furent une étape clé dans la révolution industrielle et la domination politique de l'Angleterre au XIX<sup>e</sup> siècle. Les conséquences de cette invention ont donc été majeures.

La différence entre ces boucles de retour « historiques » et celles des systèmes mécatroniques modernes tient dans l'utilisation de l'électronique et plus particulièrement de l'électronique numérique. Il faut néanmoins mentionner que l'introduction massive de l'électronique n'a été qu'un changement de technologie de calcul. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, des machines programmables effectuant des calculs existent depuis très longtemps et l'on crédite la machine à différences de Charles Babbage (1791-1871) comme étant le premier ordinateur. Bien que ce dernier n'ait jamais réussi à la construire, Babbage conçut plusieurs calculateurs mécaniques. Dans le même ordre d'idée, citons la *Pascaline* de Blaise Pascal (1623-1662) qui fut une des premières calculatrices mécaniques et utilisait des engrenages pour effectuer des opérations arithmétiques. Ce type de machine fut employé jusque dans les années 60 (1960!) par IBM. La machine d'Anticythère datée d'environ 100 av. J.-C. et découverte dans une épave de la mer Égée en 1900 est semble-t-il le plus ancien calculateur mécanique à ce jour. On pense que cette machine permettait de calculer la position de certains astres dont le Soleil et la Lune. Les calculateurs mécaniques ont constam-