

Mécatronique

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



ÉDITEUR DE SAVOIRS

Lionel Birglen

Mécatronique

Cours avec
exercices corrigés

DUNOD

Illustration de couverture : © Jim, robot android men in competition concept

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>		<p>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

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-072850-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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 tout¹. 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

¹*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 :

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

<http://www.dunod.com/contenus-complementaires/9782100728503>

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

Présentation de l'auteur



Lionel Birglen a obtenu un diplôme d'ingénieur en mécatronique 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), et de l'Ordre des ingénieurs du Québec.

Table des matières

Avant-propos	i
1 Introduction	1
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
1.4 Conclusion	25
2 Éléments d'électronique	29
2.1 Introduction	29
2.2 Électronique analogique	31
2.2.1 Rappels	31
2.2.2 Lois de Kirchhoff	33
2.2.3 Composants classiques	34
2.2.4 Transistor	55
2.2.5 Notes	65
2.3 Traitement du signal	72
2.3.1 Introduction	72
2.3.2 Amplificateur opérationnel	73
2.3.3 Filtrage analogique	92
2.3.4 Notes	107
2.3.5 Amélioration des performances en régime dynamique	109
2.3.6 Conversion numérique \Leftrightarrow analogique	113

2.3.7	Conversion numérique \Rightarrow analogique pratique	116
2.3.8	Conversion analogique \Rightarrow numérique pratique	118
2.3.9	Multiplexage	134
2.4	Électronique numérique	136
2.4.1	Rappels et compléments sur les nombres binaires	136
2.4.2	Logique combinatoire	139
2.4.3	Algèbre de Boole	146
2.4.4	Logique séquentielle	149
2.4.5	Applications	158
2.5	Conclusion	169
2.6	Lexique franco-anglais	171
2.7	Liens	172
	Exercices	176
3	Capteurs	187
3.1	Introduction	187
3.2	Capteurs de température	193
3.2.1	Rappels - unités	193
3.2.2	Thermocouple	193
3.2.3	Thermistance	197
3.2.4	Thermomètre à résistance de platine	200
3.2.5	Capteur de température intégré	201
3.2.6	Comparaison	202
3.3	Capteurs de lumière	204
3.3.1	Rappels - unités	204
3.3.2	Photorésistance	205
3.3.3	Photodiode	205
3.3.4	Phototransistor	206
3.3.5	Cellule photovoltaïque	207
3.3.6	Circuits de conditionnement	209
3.4	Capteurs de présence/proximité	209
3.4.1	Introduction	209
3.4.2	Capteur optique de proximité	210
3.4.3	Capteur à effet Hall	212
3.5	Capteurs de position	215
3.5.1	Rappels - unités	215
3.5.2	Potentiomètre	216
3.5.3	Encodeur optique	218
3.6	Conclusion	224
3.7	Lexique franco-anglais	225
3.8	Liens	226

Exercices	227
4 Actionneurs	233
4.1 Introduction	233
4.2 Actionneurs électriques	235
4.2.1 Moteurs à courant continu	237
4.2.2 Moteurs sans balais	259
4.2.3 Moteurs pas à pas	262
4.2.4 Servomoteurs	271
4.3 Transmission des mouvements	274
4.3.1 Engrenages	274
4.3.2 Poulies-courroies	284
4.3.3 Vis sans fin	286
4.3.4 Mécanismes	287
4.4 Conclusion	289
4.5 Lexique franco-anglais	290
4.6 Liens	291
Exercices	293
5 Microprocesseurs	299
5.1 Introduction	299
5.2 Architectures	300
5.2.1 Unité arithmétique et logique, périphériques	301
5.2.2 Assembleur	306
5.2.3 Opérations binaires	311
5.2.4 Autres langages	312
5.3 Applications	313
5.3.1 Transformée en Z	313
5.3.2 Synthèse de correcteurs	327
5.3.3 Filtrage numérique	331
5.4 Conclusion	339
5.5 Lexique franco-anglais	341
5.6 Liens	342
Exercices	343
A Compléments	349
A.1 Norme AWG	349
A.2 Types d'interrupteurs	351
B Solutions des exercices	353

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.

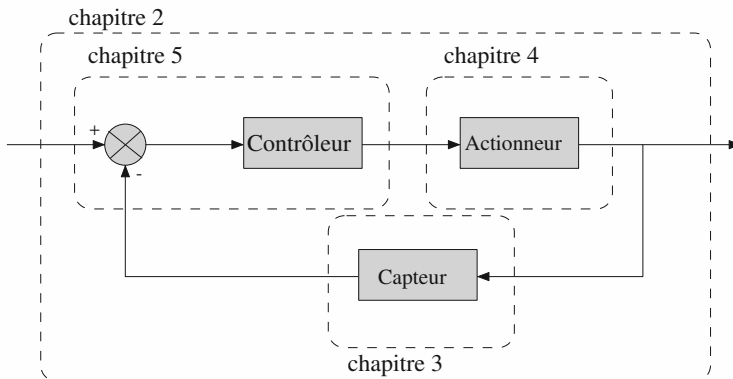


FIGURE 1.1 – Chaîne de commande en boucle fermée.

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 μP et μC) 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 μP et μC : 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. »

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 erronécommutativité 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 électronicien. 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 électronicien 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^e 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 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.