

# AVANT-PROPOS

■ L'Automatique est la discipline qui développe les méthodes et les moyens relatifs à la commande des systèmes. Elle concerne une grande majorité de métiers aujourd'hui et tout ingénieur se doit d'en posséder une culture minimale. Ses développements sont relativement récents et la fin du XX<sup>ième</sup> siècle a vu l'accélération de ses champs d'application, à une vitesse telle que le monde technologique et industriel s'est trouvé créateur de savoirs, qui jusqu'ici étaient élaborés exclusivement dans les laboratoires de recherche des universités et des grandes écoles.

Une synergie entre les développements des industriels et la formalisation qui caractérise le monde universitaire s'est alors mise en place, aboutissant à une refonte dans la manière d'aborder l'Automatique dans les différents cycles de formation. Celle-ci ne pouvait plus n'être abordée qu'en deuxième cycle, voire en troisième cycle, mais se devait de l'être au plus tôt dans la formation des ingénieurs, afin qu'ils en possèdent les bases, quels que soient leurs futurs parcours.

Dans ce contexte, l'Automatique a été introduite dans l'enseignement de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques à la fin des années 90, ainsi que dans la majorité des licences et premiers cycles universitaires préparant aux carrières de l'industrie.

La difficulté pédagogique immédiate fut d'introduire une discipline, jusqu'ici de synthèse et enseignée en fin de formation, à de jeunes bacheliers ayant encore peu de bagages scientifiques et, pour la grande majorité d'entre eux, aucune culture technologique. L'Automatique se devait donc de se transformer en discipline initiale, conjuguant la rigueur mathématique maximale accessible aux étudiants de premier cycle à une approche intuitive, nécessaire à ce niveau, et permise à l'aide du puissant outil pédagogique que sont les travaux pratiques.

Ces travaux pratiques sont réalisés sur des systèmes issus du monde industriel. Il s'agit de diverses chaînes asservies, dont la partie opérative est de nature mécanique, afin d'être en adéquation avec le deuxième volet des Sciences Industrielles pour l'Ingénieur que constitue la Mécanique. Ces travaux pratiques permettent de combiner des activités de découverte et des activités de synthèse, dans la perspective du métier d'ingénieur. Ils permettent, en outre, de mettre en œuvre la démarche de modélisation et de confrontation des résultats à la réalité, dont la profonde compréhension est un élément essentiel à la formation des futurs ingénieurs, mais aussi très généralement de tout scientifique.



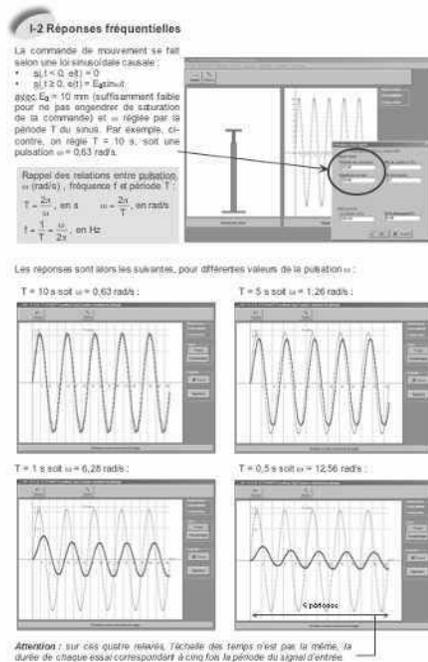
Cet ouvrage s'intéresse donc à l'**Automatique des Systèmes Mécaniques** dans cet état d'esprit.

Le cours est un cours d'Automatique au sens large, transposable à tous les systèmes commandés. Toutefois, les illustrations, ainsi que les exercices et travaux proposés, se font très majoritairement sur des systèmes mécaniques, afin de constituer un ensemble cohérent et de forger, au fil des pages, une culture des solutions aujourd'hui mises en œuvre dans ce domaine.

Dès les premières pages, le lecteur débutant sera donc sans doute confronté à des difficultés liées au vocabulaire technique. Bien évidemment, le vocabulaire de l'Automatique est entièrement défini. En revanche, certains éléments de vocabulaire liés à l'environnement technologique devront certainement faire l'objet de recherches personnelles de la part du lecteur. C'est une des difficultés d'un enseignement par nature pluridisciplinaire et non linéaire. Les sources d'informations pourront être les notices techniques des différents matériels du laboratoire, mais aussi toutes les sources multimédias modernes auxquelles ont aisément accès aujourd'hui les étudiants.

Une des volontés de cet ouvrage est de traduire, sous la forme usuelle d'un livre de cours, les indispensables apports des travaux pratiques. Tous les matériels utilisés sont parmi les plus classiquement présents dans les laboratoires de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques. Avoir ces mêmes systèmes à disposition est sans nul doute favorable à la lecture et à un travail personnel approfondi. Toutefois, la description complète des matériels et des activités conduites doit permettre à tout étudiant de tirer entièrement parti de l'ouvrage malgré tout.

L'ouvrage est découpé en six chapitres, couvrant intégralement le programme d'Automatique des deux années de classes préparatoires scientifiques, qui diffère assez peu selon les filières. De temps en temps, quelques développements vont un peu plus loin, ouvrant des perspectives au lecteur. Ce contenu correspond également et globalement au programme de la majorité des IUT, licences et premières années de certaines écoles d'ingénieurs. Le lecteur qui souhaitera aller au-delà de ce contenu devra s'orienter vers des ouvrages abordant les aspects non linéaires, les systèmes échantillonnés et la représentation d'état.



Chaque chapitre est abondamment illustré d'exemples concrets, introductifs comme de synthèse. Des exercices entièrement corrigés concluent chaque chapitre. Ils sont très majoritairement issus de travaux pratiques ou de sujets de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des concours d'entrée aux grandes écoles d'ingénieurs, tels que le Concours Commun Mines-Ponts, le Concours Central-Supélec, etc. Cet aspect devrait donner satisfaction au lecteur étudiant en classes préparatoires, pour lequel l'entraînement aux concours passe par la maîtrise de certains exercices types. Le lecteur issu de l'université trouvera là des sujets de réflexion particulièrement formateurs.

Quelques annexes référencées sous la dénomination de « fiches ressources » viennent compléter cet ensemble en fin d'ouvrage. Des liens vers ces pages sont insérés aux moments adéquats dans le cours.

Fiche ressource "outils d'analyse fonctionnelle"

■ Cet ouvrage est le fruit de plusieurs années d'expériences d'enseignement en classe préparatoire PSI\* au lycée Clemenceau de Nantes et d'interventions à l'antenne de Rennes de l'ENS de Cachan. Il est difficile de lister toutes celles ou ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué aux réflexions qui ont permis sa réalisation. Mes pensées vont immédiatement à mes étudiants, dont la curiosité, l'intransigeance et la maturité intellectuelle sont le meilleur des ferments. Nombreuses ont été également les discussions pédagogiques avec mes collègues enseignants et les heures passées, ensemble, à mettre au point des travaux pratiques qui, de manière informelle, se retrouvent certainement dans ces pages.

Jean-Jacques Marchandeaude, professeur en classes préparatoires au lycée Camille Vernet de Valence, a accepté l'important travail de relecture de l'ensemble de l'ouvrage. Je le remercie avec beaucoup d'amitié pour le temps qu'il y a consacré et la pertinence de ses remarques et conseils, dont j'ai essayé de tenir compte.

Je remercie également les fabricants de matériels de travaux pratiques, qui m'ont autorisé à citer leurs marques et parfois à utiliser certains de leurs documents, sans que cela revête le moindre aspect commercial.

Enfin, le dernier mot sera pour Jacqueline et Nathalie, expertes ès virgules et accords des participes, pour leur correction implacable.

Olivier Le Gallo

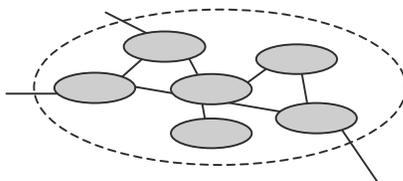
# NOTION DE SYSTÈME



## I - PREMIÈRES DÉFINITIONS

### I-1 Système et fonction

Système solaire en astrophysique, système scolaire en sciences de l'éducation, système capitaliste en économie, système d'exploitation en informatique : nombreux sont les exemples où la langue française utilise le terme générique de système. S'il peut être tenté d'en dégager un élément essentiel, l'idée de système est celle d'un ensemble d'éléments interagissant entre eux et avec l'extérieur. Toutefois, on perçoit bien la grande généralité de cette définition et la différence notable qu'il peut y avoir, pour choisir d'autres exemples, entre le système nerveux d'un animal, le système international d'unités bien connu des scientifiques et des ingénieurs, ou encore le système de positionnement par satellites GPS. Cet ouvrage s'intéresse à une classe particulière de systèmes : ceux qui sont artificiels (par opposition à naturels) c'est-à-dire conçus et fabriqués par l'Homme. Tel est le travail quotidien de l'ingénieur. Leur définition est la suivante :

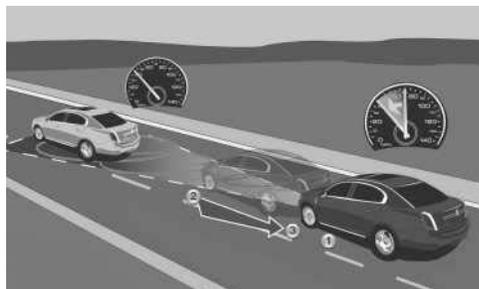
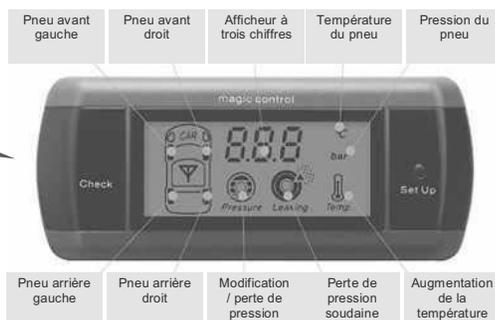


Un système est un ensemble **organisé** d'éléments interagissant entre eux et avec l'extérieur, dans le but de réaliser une **fonction**.

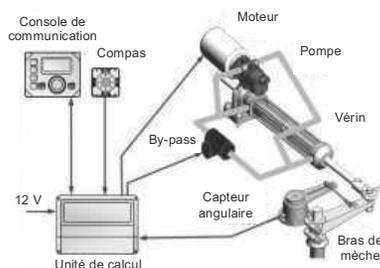
■ **Remarque** : Cette fonction répond à un besoin, exprimé ou latent. L'association d'une fonction à un besoin se fait par les méthodes de **l'analyse fonctionnelle**, non développées ici.



**Exemple 1** : Système de surveillance des pneumatiques (d'après des documents WAECO)



**Exemple 2** : Régulateur de vitesse à contrôle de distance (Image <http://commons.wikimedia.org>)



**Exemple 3** : Pilote automatique pour barre à roue de voiliers (d'après des documents Créa-Technologie)

- Les éléments peuvent être matériels (intervenants humains, machines, logiciels...) mais aussi immatériels (méthodes, services, ...). Ces éléments sont en nombre fini définissant la **frontière** du système qui le sépare de son **environnement**, ou milieu extérieur.
- L'environnement fournit au système des **entrées** qui lui permettent d'agir en générant des **sorties** vers l'environnement.
- Parmi les entrées, on distingue la **matière d'œuvre entrante**. La raison d'être (fonction à réaliser) du système est d'agir sur cette matière d'œuvre afin de lui ajouter de la valeur. La matière d'œuvre entrante augmentée de sa **valeur ajoutée** est la **matière d'œuvre sortante**. La notion de valeur **ajoutée** est ici à prendre au sens le plus large et non pas au sens purement arithmétique. Selon le point de vue (cf. plus loin), et en particulier celui de l'automaticien, elle peut être associée à un changement de nature de la matière d'œuvre qui, entrante, peut par exemple être un ordre, puis, sortante, une action. La valeur ajoutée est alors l'exécution de l'ordre.
- Des entrées et des sorties autres que la matière d'œuvre peuvent exister. Ce sont :
  - des éléments de l'environnement nécessaires à la transformation de la matière d'œuvre (présence d'énergie par exemple) ou dont la présence ou la variation modifie cette transformation (réglages, actions extérieures diverses, etc.) : on les appelle **données de contrôle** ;
  - des apports supplémentaires à l'environnement, comme par exemple des informations apportées à un utilisateur, ou encore des déchets.

Ces définitions peuvent être illustrées sur les trois exemples précédents :

Système	Fonction	Matière d'œuvre entrante	Matière d'œuvre sortante	Données de contrôle	Sorties secondaires
<b>Système de surveillance de la pression et de la température des pneus</b>	Apporter au conducteur des informations concernant l'état des pneus	Pression et température de l'air dans les quatre pneus	Informations affichées au tableau de bord	Énergie électrique et réglages divers	
<b>Régulateur de vitesse à contrôle de distance</b>	Fournir une consigne à l'ordinateur de bord lui permettant d'adapter la distance du véhicule au véhicule qui précède	Position relative du véhicule qui précède	Consigne de vitesse à l'ordinateur de bord	Énergie électrique et réglages divers Vitesse du véhicule	Informations affichées au tableau de bord
<b>Pilote automatique pour barre à roue de voilier</b>	Établir le cap d'un voilier	Cap courant	Nouveau cap	Cap à suivre Champ magnétique terrestre Énergie électrique et réglages divers Actions de la mer et du vent	Informations affichées au tableau de bord

**Important** : une fonction s'indique toujours par un verbe à l'infinitif, suivi d'un complément d'objet direct et éventuellement de compléments circonstanciels.

## I-2 Notion de point de vue

La frontière d'un système dépend du **point de vue** de celui qui l'étudie. Par exemple, ci-dessus, si on reprend le système régulateur de vitesse à contrôle de distance, le point de vue qui a été retenu exclut l'ordinateur de bord du système. Celui-ci fait alors partie de l'environnement du système et le système génère des sorties vers cet élément de son environnement. L'ordinateur de bord est alors un système extérieur, qui, parmi ses nombreuses entrées reçoit la consigne du régulateur de vitesse pour construire une sortie, à son tour, vers le moteur de la voiture pour la faire accélérer ou décélérer.