

## Avant-propos

L'automatique analogique est une science multidisciplinaire, qui étudie les techniques, les outils ainsi que les technologies de conception et de mise en œuvre des régulateurs analogiques de processus dynamiques, le régulateur étant l'organe de correction automatique d'écart éventuels observés entre la grandeur de consigne et la réponse correspondante.

Ainsi, dans un environnement opératoire incertain, infesté de perturbations inconnues ou de bruits imprévisibles, un processus dynamique équipé d'un régulateur approprié peut offrir de bonnes performances dynamiques (stabilité, dépassement, rapidité) et statiques (précision, robustesse).

L'histoire de l'automatique révèle que le premier système de régulation mécanique, connu sous le nom de « clepsydre » (horloge à eau), fut inventé en Grèce par Ktesibios vers l'an 270 avant Jésus-Christ (Stuart Bennett, 1996). Vingt-trois siècles plus tard, vers 1956, les régulateurs d'électronique analogique apparurent (Frindel, 1982, Thompson, 2005-2007). Les premiers procédés à commande et régulation numérique par ordinateur dans les grandes industries furent ensuite mis en œuvre aux États-Unis à partir de 1950 (Baker, 2012). Par ailleurs, à partir des années 1970, les automatismes numériques assistés par microprocesseur et par API (automate programmable industriel) envahirent progressivement le vaste secteur des PMI (petites et moyennes industries), pour qui ces ordinateurs étaient quasiment inaccessibles à l'époque. En effet, ils étaient encombrants, coûteux, difficiles à programmer, onéreux à entretenir et sensibles aux environnements industriels.

Cependant, depuis l'apparition des premières générations de PC (*Personal Computer*) à partir des années 1980, suivie du développement des modèles de micro-ordinateurs de plus en plus performants et de moins en moins coûteux (PC industriel, PC multimédia, PC/Tablette et PC/Panel), le champ d'application de la technologie de commande et

de régulation numérique par ordinateur s'est étendu rapidement aux PMI (petites et moyennes industries) à vocation manufacturière, textile, agro-alimentaire, chimique, énergétique, robotique, télescopique, avionique, biomécatronique, domotique, etc.

Face au manque de manuels de référence conçus pour servir de pont didactique entre les systèmes de régulation analogique et numérique, cet ouvrage permettra aux lecteurs de maîtriser aisément les recettes de l'automatique analogique, puis de s'initier rapidement aux techniques de conception et simulation des systèmes de régulation numérique assistée par PC moderne. L'ouvrage s'adresse principalement aux acteurs (apprenants et enseignants) d'écoles d'ingénieurs, d'écoles de formation de formateurs à l'enseignement technique et de centres de formation professionnelle en sciences appliquées.

En effet, les lecteurs découvriront dans cet ouvrage les principaux éléments saillants suivants :

- les enjeux de la commande et régulation assistée par ordinateur, au sein de l'ensemble des technologies de réglage de processus dynamiques ;
- une revue de la théorie des systèmes de régulation analogique ;
- un exposé clair sur la modélisation expérimentale des processus dynamiques, avec ou sans retard d'entrée ;
- les outils modernes de conception rapide de régulateurs optimaux PID ;
- les techniques de synthèse et de simulation par ordinateur, des boucles de régulation numérique, avec une étude de cas détaillée des servomécanismes de vitesse et de position ;
- les méthodes de discrétisation des modèles d'état de processus dynamiques ;
- les programmes Matlab didactiques permettant de reproduire aisément, en cas de besoin, les résultats numériques et graphiques présentés ;
- des exercices corrigés variés à la fin de chaque chapitre.

Les systèmes de régulation analogique et numérique traités dans cet ouvrage résultent des enseignements sans cesse améliorés du cours de « commande par ordinateur des automatismes asservis », enseigné par l'auteur depuis les années 2000 au département « génie électrique » de l'ENSET (École normale supérieure d'enseignement technique) de l'université de Douala, et dans la filière « génie informatique » d'ESSET (Écoles supérieures des sciences et techniques) de Douala et de Nkongsamba.

L'auteur tient à louer les effets bénéfiques de la prime de recherche scientifique du MINESUP (ministère de l'Enseignement supérieur) du Cameroun. Elle a facilité

l'accès aux supports et aux moyens de recherche scientifique et technique utilisés dans le cadre des activités de rédaction de ce projet d'ouvrage.

Par ailleurs, l'auteur adresse ses sincères remerciements à ses proches collaborateurs scientifiques en automatique et informatique industrielle qui lui ont fait des suggestions techniques et didactiques constructives. Il s'agit de :

- Pr Womonou Robert, directeur et promoteur d'ESSET de Douala et de Nkongsamba ;
- Pr Nneme Nneme Léandre, directeur de l'ENSET de l'université de Douala ;
- Dr Pauné Félix, chargé de cours au département « génie informatique » de l'ENSET de l'université de Douala ;
- Dr Moffo Lonla Bertrand, chargé de cours à l'ENSET de l'université de Buea.

L'auteur tient aussi à remercier :

- les promotions d'étudiants de second cycle du département « génie électrique » de l'ENSET de l'université de Douala et de l'ESSET de Douala et Nkongsamba, qui ont suivi avec un grand intérêt son cours magistral de « commande par ordinateur des automatismes asservis ». Ils lui ont permis d'identifier, à travers leurs multiples questions pertinentes, certains points d'ombre didactiques de l'automatique de base qui ont été clarifiés dans cet ouvrage ;
- son épouse, Mme Mbihi née Tsafack Pélagie Marthe, et toute sa famille, qui ont tous déployé à son endroit un soutien permanent et réconfortant, ainsi qu'une mémorable assistance rapprochée ;
- la famille de M. Ajoumissi Jean et la famille Nkongli Teuhguia, qui l'ont motivé à initier et à mener jusqu'au bout ce projet d'ouvrage ;
- l'équipe éditoriale de ISTE Éditions, qui a mis à sa disposition les outils et moyens facilitateurs de restructuration et d'amélioration du contenu de son ouvrage.



## I.1. Contexte architectural et technologique

### I.1.1. Cas de l'automatique analogique

En automatique, les processus dynamiques font partie de la classe de systèmes analogiques de puissance, réglables en boucle ouverte ou fermée. De ce fait, les signaux caractéristiques d'entrée, d'état et de sortie d'un processus dynamique sont des fonctions du temps continu. Ainsi, l'architecture d'une boucle de commande et régulation analogique d'un processus dynamique est homogène du point de vue de la nature des signaux mis en jeu, auquel cas la liaison entre le régulateur et le processus dynamique ne nécessite pas de dispositifs de conversion A/N (analogique/numérique) et N/A (numérique/analogique) de signaux mis en jeu.

En pratique, l'étude des systèmes de commande et régulation analogique est basée sur les techniques de conception disponibles en automatique ainsi que sur les technologies de mise en œuvre rencontrées en électronique analogique. Cependant, la technologie de régulation analogique présente dans les domaines d'application exigeants des problèmes techniques, dont les plus importants sont (Mbihi, 2017) :

- le facteur d'encombrement (volume, poids) élevé, surtout lorsque le nombre de boucles de régulation est important ;
- le vieillissement des constituants du régulateur, ce qui peut engendrer à long terme des variations de paramètres au-delà des seuils admissibles ;
- la sensibilité élevée vis-à-vis des bruits et perturbations de l'environnement ;
- l'inflexibilité du point de vue de l'extension du dispositif de réglage ;

- la complexité de mise en œuvre des stratégies de régulation avancées ;
- le faible niveau de performance des dispositifs analogiques de monitoring, de confection du journal de bord, d’archivage des données, etc.

### **1.1.2. Cas de la régulation assistée par ordinateur**

Une boucle de régulation assistée par ordinateur est un système dynamique «hybride». En effet, elle met en jeu des signaux continus du côté du processus dynamique, alors que les signaux déployés du côté de l’ordinateur sont des grandeurs discrètes. Par conséquent, cette nature hybride engendre en ingénierie de procédés automatiques les nouveaux problèmes suivants :

- une exigence d’installation entre l’ordinateur et le processus analogique d’un dispositif combiné d’interface combinée de conversion A/N (analogique/numérique) et N/A (numérique/analogique) (Bolton, 2004 ; Mbihi, 2012) ;
- la nécessité de formation des automaticiens aux techniques et aux outils fondamentaux d’étude des signaux et des systèmes dynamiques échantillonnés ;
- le besoin d’adaptation des automaticiens à l’environnement informatique ;
- le recyclage sans cesse renouvelé des automaticiens face à l’évolution rapide des technologies d’ordinateurs ainsi que des outils de conception d’applications logicielles à vocation didactique et professionnelle.

Malgré les problèmes techniques listés ci-dessus, les régulateurs assistés par ordinateur (Fadali et Visioli, 2009) offrent de nouvelles perspectives. Au sein de la classe de calculateurs numériques, l’ordinateur occupe de plus en plus une place de choix en automatique industrielle (Mbihi, 2005). En effet, la technologie moderne de commande et régulation assistée par ordinateur offre les avantages spécifiques suivants :

- d’énormes possibilités d’exploitation en mode multitâche, offrant ainsi des services simultanés de traitement vidéo et d’instrumentation virtuelle avec monitoring de données (Mbihi, 2015a et 2015b). Par ailleurs, en automatique industrielle l’ordinateur peut aussi être dédié aux missions de supervision d’un RLI (réseau local industriel), de nano-systèmes (Duraffourg et Arcamone, 2015) et de biosystèmes embarqués (Salgues, 2016) qui sont équipés au niveau terrain de PIC (*Programmable Integrated Circuit*) (Sharma et Dahikar, 2013), FPGA (*Field Programmable Gate Array*) (Massimiliano *et al.*, 2010 ; Jasim, Mansoor et Khalil, 2011 ; Zaher, 2011 ; Gürsoy et Önder Efe, 2016), CPLD (*Complex Programmable Logic Device*) (Grout, 2008) et API (automate programmable industriel) (Bianciotto et Boye, 1985) ;

- une grande variété de modèles de machines à hautes performances : PC/Laptop standard, PC/Tablette, PC/Laptop industriel sont robustes, avec leur boîtier compact ou rackable, d'indice de protection de l'ordre de IP68 (Parisot, 2007) ;
- un large éventail de ports et de slots d'extension ;
- de nombreux dispositifs avancés de dialogue opérateur : écran tactile, écran géant et terminal mobile ;
- une grande échelle de disponibilité de pilotes logiciels gratuits, pour des outils de développement populaires tels que Visual C++, Visual Basic, Visual C#, Matlab et Labview. Ces pilotes permettent de réduire considérablement les efforts de mise en œuvre des fonctions d'instrumentation et de régulation ;
- une grande diversité de ressources avancées, de mises en œuvre de nouvelles structures de régulateurs numériques intelligents ;
- une impressionnante capacité de mémoire des supports de stockage des programmes et données octet : DVD de l'ordre du Go (Giga-octet), clé USB et carte mémoire de l'ordre du Go et disque dur interne ou externe de l'ordre du To (Téra-octet) ;
- d'énormes possibilités multitâches (superviseur de boucles de régulation, moniteur, processeur de régulation numérique, instrument virtuel, etc.) ;
- des moyens avancés de création facile de systèmes de régulation télé-opérables.

## I.2. Contexte scientifique et didactique

### I.2.1. Cas de l'automatique analogique

En commande et régulation analogique, les outils scientifiques utilisés pour la représentation mathématique de processus dynamiques et de régulateurs sont :

- la fonction de transfert (de la variable  $p$  de Laplace) définie dans le domaine fréquentiel ;
- le modèle d'état continu.

Les structures de réglage analogique synthétisables dans le domaine fréquentiel, en vue d'obtenir en boucle fermée de bons indicateurs de performances dynamiques et statiques, vont du simple régulateur à action proportionnelle au régulateur PID (proportionnel, intégral, différentiel), en passant par les régulateurs à avance ou retard de phase. Par ailleurs, les structures de régulation synthétisables dans l'espace d'état vont du simple régulateur par retour d'état au régulateur LQR (*Linear Quadratic*

*Regulator*) avec observateur partiel ou complet, en passant par le régulateur d'état avec rétroaction intégrale d'erreur de poursuite de la consigne.

### **I.2.2. Cas de la régulation assistée par ordinateur**

En régulation assistée par ordinateur, on manipule des constituants et des outils scientifiques similaires, créés à partir de ceux disponibles en automatique analogique. C'est le cas :

- des indicateurs de performances dynamiques et statiques ;
- de la fonction de transfert en  $z$  (où  $z = e^{T_p}$ ,  $T$  étant la période d'échantillonnage) ;
- du régulateur PID discret ;
- du modèle d'état discret ;
- du retour d'état discret ;
- du LQR discret, etc.

Ce constat de similarités débouche sur l'énoncé du but de cet ouvrage.

### **I.3. But de l'ouvrage**

Cet ouvrage est un manuel didactique original, permettant aux lecteurs de niveaux Master 1 et Master 2 de maîtriser en profondeur les recettes de l'automatique analogique, puis de découvrir et de comprendre rapidement les éléments de la technologie de commande et régulation assistée par ordinateur.

### **I.4. Organisation du contenu de l'ouvrage**

L'ouvrage est organisé en deux parties, chaque partie étant structurée en chapitres cohérents.

La première partie porte sur les systèmes de commande et régulation analogique. Il s'agit en effet d'un condensé de recettes et de résultats de la théorie des systèmes de commande et régulation analogique. Dans cette partie, les modèles de processus dynamiques sont détaillés au chapitre 1, suivis, au chapitre 2, par un exposé clair sur la technique de modélisation expérimentale. Enfin, le chapitre 3 présente une revue des systèmes de commande et régulation analogique.

La deuxième partie présente les techniques de synthèse et de simulation des systèmes de régulation numérique. Ainsi, les éléments de synthèse dans le domaine fréquentiel des systèmes de régulation numérique sont décrits dans le chapitre 4. Le chapitre 5 porte ensuite sur la simulation assistée par ordinateur des systèmes de régulation numérique. Le chapitre 6, quant à lui, est une introduction aux modèles d'état discrets de processus dynamiques. Les éléments constitutifs de cette deuxième partie sont généralisables au cas des systèmes de régulation numérique d'architecture plus complexe (Fouchard, Gentil et Sandraz, 1987 ; Kyriakos et Sarangapani, 2016).

Il est important de rappeler que dans cet ouvrage les exercices corrigés se trouvent à la fin de chaque chapitre en vue de consolider les connaissances acquises. L'annexe 1 contient une table des transformées en  $z$  des fonctions de transfert simples, couramment utilisées en pratique pour la discrétisation exacte des fonctions de transfert. Enfin, un tableau descriptif des commandes Matlab utilisées dans les programmes didactiques présentés dans l'ouvrage se trouve en annexe 2.