

Un enrichissement par l'histoire de la boucle fermée

Ce livre d'automatique ou, plus précisément, sur la commande en dynamique des systèmes, est un ouvrage pédagogique dont le caractère théorique et applicatif est renforcé par de nombreux problèmes résolus.

La personnalisation du contenu résulte d'un passé bien connu qui nourrit au mieux le présent, d'une volonté à la fois d'innovation et de simplification, et d'une profonde réflexion de longue date fondée sur l'expérience. Il est vrai que cette réflexion a toujours été menée à partir de l'expérience acquise, en électronique et en automatique, à travers des activités d'enseignement, de recherche et de transfert technologique dans le cadre de relations partenariales avec le secteur industriel : assurées avec un souci d'équilibre, ces activités ont d'ailleurs eu le mérite de ponctuer favorablement mon parcours professionnel, d'abord, en tant qu'assistant en électronique et automatique à l'Université de Bordeaux de 1978 à 1990, ensuite, comme professeur d'automatique en école d'ingénieurs, l'ENSEIRB puis l'Institut polytechnique de Bordeaux, de 1991 à 2018.

Ayant eu le privilège de présenter les fondements de la boucle de commande à la prestigieuse école d'été de physique de Houches (en France), j'ai eu très tôt l'occasion de prendre conscience de la perception favorable de notre discipline par les physiciens, ceux-ci ayant en effet conclu ma présentation en interprétant l'automatique comme une véritable science, même si mon discours se limitait à la boucle de commande.

Mais l'automatique vue à travers la boucle de commande n'est-elle pas conforme à la construction de l'automatique à partir de la fameuse *boucle fermée*, plus connue par les électroniciens pour sa contre-réaction (ou réaction négative) et dont la *boucle ouverte* détermine fréquemment à la fois la stabilité et les performances ?

L'histoire de la boucle fermée répond à cette interrogation en apportant un témoignage par des travaux fondateurs, leur contexte et leur enchaînement assorti des principales dates, en fait, quelques éléments tirés en grande partie d'un document de synthèse élaboré par Jean-Claude Trigeassou à partir d'une contribution de S. Bennett, historien des sciences (S. Bennett, *A History of Control Engineering*, volume 1 (1800-1930) et volume 2 (1930-1955), IEE Control Engineering Series, Peter Peregrinus, 1979 et 1993).

Dans son acception la plus large, la boucle fermée peut prendre différentes formes et notamment celle de la boucle de commande (avec correcteur) telle qu'étudiée en asservissement et en régulation dans le domaine de la commande en automatique. Le concept de boucle fermée semble remonter au XVIII^e siècle à travers le dispositif mécanique, appelé régulateur de Watt, introduit par Boulton et Watt en 1788. Il a été régulièrement perfectionné, notamment par Siemens, et analysé par des physiciens intéressés par son fonctionnement : Young en 1807, Airy en 1840 et 1851, jusqu'à Maxwell en 1868 dans son article célèbre « On governors » qui fut le premier article d'automatique.

Comme le téléphone transcontinental entre les côtes est et ouest des États-Unis nécessitait la réamplification du signal par des *répéteurs* (relais amplificateurs pour ligne téléphonique), les « Bell laboratories » ont travaillé pour remplacer les premiers amplificateurs (magnétiques) par des amplificateurs électroniques basse fréquence rendus possibles par l'invention de la triode. C'est ainsi que Black a été recruté chez Bell en 1925, pour améliorer les répéteurs à tubes électroniques, dont le principal défaut était leur étroite bande passante associée à une importante distorsion. Son idée d'introduire une réaction négative pour élargir la bande passante et réduire la distorsion, a été brevetée en 1927 et publiée en 1934 dans le *Bell System Technical Journal*. Même si le concept de boucle fermée semble remonter à plus d'un siècle auparavant, on doit donc précisément à Black l'introduction de la boucle fermée dans le domaine de l'électronique, à travers la mise en forme de la contre-réaction telle qu'elle est encore utilisée.

Mais le « feedback » qui pouvait être à l'origine d'une oscillation, voire d'une instabilité, a amené Nyquist, aussi chez Bell, à mettre au point son fameux critère établi à partir de la théorie de Cauchy et publié en 1932 sous l'intitulé « Regeneration Theory ». Dans le cas d'une boucle de commande stable en boucle ouverte où le critère de Nyquist exigeait de ne pas entourer le point critique (-1) pour la stabilité en boucle fermée, une forte décroissance de gain accompagnée d'une (illusoire) faible rotation de phase était alors recherchée.

Le problème fut soumis en 1934 à Bode qui, pour les systèmes à déphasage minimal (ou à minimum de phase), démontra qu'à une courbe de gain correspondait une seule courbe de phase, ce lien entre gain et phase constituant dès lors une contrainte naturellement admise en matière de synthèse et donc de performances : complémentaire aux

diagrammes de Bode qui remontent à 1938, cette contribution, associée à celle de Nyquist, a été publiée en 1940 et dans un ouvrage en 1945. Par ailleurs, une première proposition de réglage systématique des actions P, I et D du régulateur PID, est due à Ziegler et Nichols qui ont publié leur méthode bien connue dans un article de 1942.

Enfin, la boucle de commande était aussi utilisée pour les régulations de température et de pression, ainsi que pour les servomécanismes (notamment de vitesse et de position) selon des principes énoncés par Hazen en 1934, et très proches de ceux de Black sans pour autant être inspirés par ceux-ci. La recherche sur les servomécanismes, qui a été fortement développée pour accompagner l'effort d'armement pour la Seconde Guerre mondiale, a été particulièrement dopée dans les domaines prioritaires de l'armement, dont le domaine de la commande et du guidage des canons de défense anti-aérienne. En 1940, Brown a spécifié les performances des asservissements et plus particulièrement en régime transitoire à travers le coefficient d'amortissement et la fréquence propre. Un chercheur de Brown, nommé Hall (thèse en 1943) a construit un abaque, dit de Hall, tracé dans le plan complexe (dit aussi de Nyquist) pour passer de la réponse fréquentielle en boucle ouverte à la réponse fréquentielle en boucle fermée. Pour passer directement à la boucle fermée à partir des diagrammes de Bode en boucle ouverte, Nichols a eu l'idée de transposer l'abaque de Hall dans un nouveau plan, dit de Nichols, dont le gain en décibels est porté en ordonnée et dont la phase en degrés est portée en abscisse (*Theory of Servomechanisms*, Mc Graw Hill, 1947) : le plan et l'abaque de Nichols trouvent une origine plus ancienne dans le plan et l'abaque de Black datant de 1934, en ce sens que le plan de Nichols résulte de la permutation des axes de gain et de phase de Black, assortie de l'expression du gain en décibels (conforme à la représentation de Bode). Mais ces travaux qui contribuaient à la précision (en position et en vitesse) des servomécanismes n'étaient pas suffisants pour répondre à la problématique plus générale de la *poursuite de cible* qui exigeait aussi d'anticiper les mouvements de la cible et de prédire son comportement futur. C'est ainsi que Wiener a mis au point son célèbre filtre, dit de Wiener, qui a été utilisé pour guider les canons de DCA à partir des informations radar (1942) et remplacer ainsi le guidage manuel. Sous l'intitulé « Un peu d'histoire », la section 1.10.4 apporte des précisions complémentaires de nature plus technique.

Après avoir parcouru ces morceaux d'histoire, il convient de remettre la boucle de commande dans le contexte de cet ouvrage, en précisant que l'étude de la boucle de commande et de toutes ses facettes permet d'introduire, clairement et de manière structurée, toutes les fonctions, propriétés et performances de nature à caractériser toutes les autres commandes.

Par ailleurs, un exercice d'unification, qui consiste à établir la boucle de commande équivalente à toute autre commande parmi un ensemble de commandes considéré au chapitre 4, permet alors de montrer l'absence d'apport spécifique en termes de performances, même si la méthode de synthèse est différente selon la commande.

Exprimant certes un changement par rapport à la boucle de commande, cet apport méthodologique qui, *a priori*, laisse supposer un plus au niveau des performances et qui, *a posteriori*, les conserve dans le meilleur des cas, fait pour le moins penser au principe selon lequel il convient de changer la forme (ici la méthodologie) pour préserver le fond (ici les performances) : il est vrai que l'évolution étant de rigueur, si un changement est inévitable alors qu'il n'est pas nécessaire, n'est-il pas préférable d'opter pour un changement de forme qui soit le moins préjudiciable au fond ?

La boucle de commande sortant ainsi renforcée, comme le confirme d'ailleurs son utilisation dans toutes les approches de robustesse, elle est largement développée dans cet ouvrage par les deux premiers chapitres qui lui accordent bien ce qui lui revient. Ce choix didactique devrait aider le lecteur à mesurer l'intérêt majeur de la boucle de commande, au sens de son intérêt propre et de son intérêt pour les autres commandes à travers la place souvent implicite qu'elle y occupe et qui est mise en évidence par l'établissement de la boucle de commande équivalente ; cette même boucle qui, à travers la nature de son régulateur, permet d'apprécier objectivement la richesse de la stratégie de commande, la boucle de commande apparaissant ainsi comme une référence absolue. C'est dire que la boucle de commande, qui est le substrat avéré de l'automatique, doit être très bien connue de tous y compris des spécialistes d'autres commandes, au risque de redécouvrir l'eau tiède, voire d'en faire de l'eau froide en faisant moins bien que la boucle de commande.

L'apport novateur en termes de performances se situe incontestablement dans les commandes dites robustes, dont la commande CRONE (abréviation française de « commande robuste d'ordre non entier ») qui combine trois avantages importants en matière de robustesse : le choix de la performance dynamique à robustifier ; la prise en compte des véritables domaines d'incertitude (contrairement à l'approche H_∞) ; une paramétrisation minimale de la transmittance à optimiser (contrairement à l'approche QFT). Fondée sur la structure de la boucle de commande, elle doit sa spécificité à un régulateur enrichi par un ordre non entier, réel ou complexe. Cet ordre assure la robustesse du degré de stabilité de la commande vis-à-vis des incertitudes (paramétriques) du procédé.

Représenté dans le plan de Nichols par un segment de droite dont la transmittance de description est fondée sur l'intégration non entière complexe, le gabarit généralisé de la commande CRONE de troisième génération est utilisé dans la technique des enveloppes pour construire des contours d'isodépassement et d'iso-amortissement. Les contours d'isodépassement se révèlent être les contours d'amplitude de Nichols qui se trouvent ainsi validés comme contours d'isodépassement. La symétrie, par rapport à l'axe des abscisses du plan de Nichols, des contours d'iso-amortissement (d'Oustaloup), est une propriété remarquable qui renforce la pertinence de ce plan de travail en matière d'analyse et de synthèse.

De tels contours, appelés contours de performance, enrichissent notablement l'arsenal bien connu des outils et méthodes de synthèse fréquentielle du régulateur (quel

qu'il soit) de la boucle de commande. Ces contours de performance sont en effet des outils d'un grand intérêt, en ce sens qu'ils permettent de répondre, de manière déterministe, aux spécifications de performance sur le dépassement et l'amortissement de la dynamique de la boucle de commande : la présentation de ce nouveau plus en faveur de la boucle de commande, et de nature à lui conférer un argument de choix incontestable, n'est-elle pas la meilleure façon de terminer cet avant-propos ou, en l'occurrence et avec plus de légèreté, de boucler la boucle ?

Organisation et contenu de l'ouvrage

En dehors de trois annexes qui traitent respectivement de contrôle actif de bruit, de commande non entière et de contours de performance, la progression de l'ouvrage est ponctuée par cinq chapitres et treize problèmes résolus, dont le contenu est présenté ici de manière introductive.

Le chapitre 1 commence par montrer que la perturbation de sortie du procédé n'est autre que l'effet sur sa sortie de l'ensemble des perturbations dites originelles. Étant donné cette perturbation, il développe ensuite, dans les domaines opérationnel et fréquentiel, la *dualité asservissement-régulation* à travers une approche la plus duale possible afin de structurer au mieux la présentation de la boucle de commande. Après une définition très rigoureuse et très générale de la transmittance en boucle ouverte qui répond à tous les systèmes linéaires relevant des sciences pour l'ingénieur, la boucle ouverte est utilisée pour présenter physiquement le caractère stable, instable ou juste oscillant de la boucle de commande ainsi que le critère du revers qui régit ce caractère pour une boucle ouverte stable et à déphasage minimal. Les transmittances en boucle fermée que sont les transmittances en asservissement et en régulation, ainsi que les fonctions asservissement et régulation qui en découlent et qui introduisent respectivement le *suivi de consigne* et le *rejet de perturbation*, constituent le substrat de la dualité asservissement-régulation. Le caractère structurant que dicte une telle dualité est ensuite utilisé pour étudier successivement la sensibilité de l'entrée (du procédé) qui conduit à remplacer le PID académique par le PID non académique, le comportement et les performances de la boucle de commande, ainsi que sa dynamique, avant de terminer par les abaques en asservissement et en régulation dont la dualité parle d'elle-même.

Le chapitre 2 commence par définir la stabilité et présenter la condition fondamentale de stabilité que des critères algébriques ou graphiques permettent de vérifier. Ensuite,

les marges de stabilité fréquentielles que sont les marges de gain et de phase sont définies et la marge de phase fait, quant à elle, l'objet d'une étude particulière à travers la détermination d'une marge de phase optimale au sens de la minimisation d'un critère quadratique fondé sur le temps de raideur et le premier dépassement de la réponse indicielle en asservissement ou en régulation. Le degré de stabilité, qui est un concept essentiel en dynamique des systèmes et qui prend toute sa quintessence dans la boucle de commande en raison du couplage entre boucle ouverte et boucle fermée, est présenté dans l'espace des temps, puis dans l'espace des fréquences où ledit couplage est particulièrement exploité à travers les contours d'amplitude présentés dans le chapitre 1. Cette approche montre, entre autres, que si le cercle centré en (-1) dans le plan complexe constitue (au sens mathématique) une véritable mesure de la distance au point critique, il n'est pas pour autant significatif d'une performance dynamique temporelle de nature à chiffrer le degré de stabilité dans l'espace des temps. Dans le cadre d'une comparaison avec la commande par placement de pôles, l'approche fréquentielle se distingue favorablement en permettant de répondre à la fois à une spécification du premier dépassement réduit et à une spécification du facteur d'amortissement. Après avoir défini la précision par la différence entre les valeurs désirée et réelle de la sortie de la boucle de commande, la précision est présentée conformément à la dualité asservissement-régulation et aux régimes établis correspondant à des essais en échelon et de rampe. Le dilemme degré de stabilité-précision ayant été défini, il est mis en évidence dans le plan de Nichols, puis tranché par un gain en boucle ouverte qui réalise un compromis entre le degré de stabilité et la précision. Ensuite, ce compromis est amélioré et le dilemme est mis en défaut par un ordre non entier. Après une définition pragmatique de la dynamique, un volet « Détermination de la dynamique » recense les performances dynamiques fréquentielles qui sont significatives des performances dynamiques temporelles et qui déterminent ainsi la dynamique. La synthèse du correcteur s'inscrit alors dans une approche méthodologique simple et systématique qui offre à l'utilisateur des méthodes efficaces du type mode d'emploi.

Le chapitre 3 résulte d'un exercice pédagogique qui vise à dégager l'idée de différentes approches linéarisantes à travers des stratégies qui s'imposent par leur simplicité. S'inscrivant dans les sciences pour l'ingénieur, ces stratégies qui enrichissent l'automatique de base et qui sont applicables à la plupart des procédés, sont de nature à favoriser l'application des approches linéarisantes dans les secteurs les plus divers et notamment industriels. Plus précisément, la présentation de chaque approche est structurée par un principe réduit à sa plus simple expression et par l'application de ce principe à un ou plusieurs procédés non linéaires dont l'un est utilisé pour toutes les approches : ce procédé non linéaire, commun à toutes les applications en monovariable, est un arbre moteur qui entraîne en rotation une masselotte solidaire de l'arbre par l'intermédiaire d'un bras rectiligne. Dans la linéarisation par immersion étendue à un procédé multivariable, le principe consiste à linéariser le procédé par rapport à de nouvelles entrées. Dans la linéarisation par grand gain, le principe est fondé sur une commande à grand gain utilisée pour son rejet de perturbation. Si dans son principe de base, la linéarisation par grand gain

exprime l'idée d'une réjection totale de perturbation, la linéarisation par rejet de perturbation exprime l'idée d'une réjection partielle, plus réaliste quant à la sensibilité de l'entrée du procédé. Son principe est en effet fondé sur une boucle de commande élémentaire dont le gain en boucle ouverte reste compatible avec une bonne immunité de l'entrée du procédé. En fait, par son aptitude à rejeter la perturbation qui représente en l'occurrence la non-linéarité du procédé, la boucle de commande présente un caractère linéarisant qui s'avère largement exploité dans l'industrie pour s'affranchir des non-linéarités. Si la linéarisation du procédé autour d'une trajectoire nominale constitue une approche linéarisante bien connue et relativement utilisée, l'exploitation qui en est faite ici se démarque par l'introduction de domaines d'incertitude, la non-linéarité étant en effet représentée fréquemment sous la forme de domaines d'incertitude. En fait, cette stratégie par des domaines d'incertitude à déplacer de manière qu'ils pénètrent le moins possible les zones de faible degré de stabilité, précise la façon dont les non-linéarités sont prises en compte dans la commande CRONE de troisième génération (chapitre 5). Enfin, le chapitre se termine par un complément de rigueur apporté par Brigitte d'Andréa-Novel et de nature à compenser l'extrême simplicité des stratégies proposées.

Le chapitre 4 présente différents schémas de commande en mettant en évidence leur *point commun*, notamment en montrant qu'ils reposent implicitement sur une boucle de commande élémentaire (dont le régulateur est ensuite analysé). Étant donné que le domaine d'étude, fréquentiel ou temporel, s'avère différent selon la nature de la commande, il est difficile de mener une étude comparative des grands principes de commande. Plus généralement, cette difficulté est renforcée par la différence du *cadre d'étude* qui intègre à la fois le domaine d'étude (fréquentiel ou temporel) et la structure du schéma de commande. C'est ainsi que ce chapitre vise un *cadre d'étude commun* de nature à développer une approche unifiée en matière de commande. Telle que développée par les deux premiers chapitres, l'étude approfondie de la boucle de commande, notamment dans l'espace des fréquences, a permis d'élaborer une méthodologie de commande bien éprouvée depuis longtemps et susceptible de répondre à plusieurs spécifications de performances dynamiques temporelles (et ce, *via* des performances dynamiques fréquentielles significatives de ces performances). Aussi, une telle méthodologie doit être interprétée comme une *référence* parmi les principales méthodes de commande proposées dans ce chapitre, voire dans cet ouvrage. Il est vrai que l'idée vise à ramener chaque schéma de commande à une *boucle de commande équivalente* afin de se placer dans un même cadre d'étude (celui de la boucle de commande) et de mener ainsi une étude comparative objective des différentes stratégies de commande : la nature du régulateur de chaque boucle de commande équivalente permet en effet une appréciation objective de la richesse de chaque stratégie de commande. Une première conclusion est que *la sophistication du schéma de commande n'est pas synonyme de l'enrichissement de la stratégie de commande*.

Si un régulateur proportionnel de grand gain a le mérite de montrer rapidement l'intérêt de la commande à grand gain à travers son insensibilité (ou robustesse) assurée par un transfert imposé par celui de la chaîne de réaction, ce cas n'est pas pour autant réaliste

puisque'un grand gain se paie au prix d'une grande sensibilité de l'entrée, donc d'une faible immunité de l'entrée. Pour exploiter judicieusement un tel principe de grand gain, il convient alors de viser, non plus une insensibilisation de la commande, mais uniquement une désensibilisation en choisissant un gain acceptable. Quant au passage à la boucle de commande, une réécriture sous une forme adéquate du signal d'erreur de la commande à grand gain permet de transformer son schéma fonctionnel conformément à un transfert en cascade avec une boucle de commande élémentaire.

En assurant un transfert unitaire en asservissement, la commande par « feedforward » permet de différencier les dynamiques en asservissement et en régulation, comme le fait d'ailleurs un préfiltre de consigne. Il est vrai qu'une réécriture appropriée de l'entrée du procédé permet de transformer le schéma fonctionnel de la commande conformément à un préfiltre de consigne en cascade avec une boucle de commande élémentaire.

En l'absence de perturbation et dans le cas où le procédé est parfaitement modélisé, la commande à modèle interne s'effectue sans bouclage et la synthèse du correcteur est alors remarquable de simplicité. Une réécriture appropriée de l'entrée du procédé permet de restructurer le schéma à modèle interne sous la forme d'une boucle de commande élémentaire dont le régulateur est explicite. Dans le cas d'une « robustification » qui consiste à assurer à la commande un transfert consigne-sortie indépendant du procédé, la boucle de commande élémentaire (équivalente) ainsi obtenue a l'avantage de déceler le *caractère infini* sous-jacent à la commande, non seulement à travers le gain du régulateur, mais également à travers la sensibilité de l'entrée en asservissement et en régulation.

En préambule aux commandes à critère quadratique, et prédictive, qui sont fondées sur une optimisation par rapport à l'entrée $u(t)$ du procédé, une propriété indispensable à cette optimisation est établie, propriété selon laquelle la sortie $y(t)$ et ses dérivées dépendent du passé de l'entrée $u(t)$ et non de sa valeur instantanée (une telle propriété provenant de la convolution).

La commande à critère quadratique est présentée à partir d'un procédé d'étude du deuxième ordre dont l'entrée est $u(t)$ ou $u(k)$ selon que le modèle est continu ou discret. La synthèse du régulateur est effectuée à travers la minimisation d'un critère quadratique, continu puis discret, qui introduit un facteur de pondération δ de la commande. Une approche continue directe à partir de la commande continue et une approche discrète puis continue à partir de la commande discrète permettent d'aboutir à une même boucle de commande élémentaire. Un résultat pour le moins remarquable est que l'action du régulateur de cette boucle se réduit à une *action proportionnelle*, $1/\delta$, qui n'est autre que l'inverse du facteur de pondération de la commande.

La commande prédictive, dont le principe est présenté dans une approche en temps continu, fait l'objet d'une contribution significative à travers la mise en évidence, dans le

domaine opérationnel, d'une boucle de commande élémentaire dotée d'un régulateur à avance de phase. L'étude du placement en fréquence du régulateur par rapport à la fréquence au gain unité en boucle ouverte montre que le régulateur ne peut répondre au placement en fréquence optimal qui est assuré par la synthèse fréquentielle directe d'un régulateur à avance de phase (telle que développée dans le chapitre 2). La problématique du placement en fréquence du régulateur est à l'origine de deux problèmes dont les principes de résolution sont proposés.

Le chapitre 5 traite de la commande CRONE, abréviation de « commande robuste d'ordre non entier ». La robustesse dont il s'agit est celle du degré de stabilité vis-à-vis des incertitudes du procédé. Le degré de stabilité est mesuré par le facteur de résonance en asservissement ou le facteur d'amortissement en asservissement et en régulation : le premier facteur est en effet significatif du premier dépassement réduit de la réponse indicielle en asservissement ou en régulation ; le second est significatif de l'amortissement de son mode oscillatoire. Les incertitudes sont prises en compte à travers les *véritables domaines d'incertitude* qu'elles définissent, et ce, contrairement au cas de l'approche H_∞ où la *majoration* des domaines d'incertitude ne permet pas d'obtenir les meilleurs résultats. Quant à la performance dynamique temporelle indissociable du facteur d'amortissement, à savoir la fréquence propre, l'approche non entière ne recherche en aucun cas à assurer la robustesse de cette fréquence. Le fait de laisser varier librement la fréquence propre de la commande permet en effet de mieux « respecter » le procédé, notamment en évitant de forcer son entrée quand sa dynamique devient beaucoup plus lente que celle imposée à la commande. Conformément aux stratégies qu'utilisent les trois générations de la commande CRONE, pour la première génération, un *ordre non entier de dérivation*, réel, permet de paramétrer la *transmittance du régulateur* avec peu de paramètres. Pour la deuxième et la troisième génération, un *ordre non entier d'intégration*, réel ou complexe selon la génération (réel pour la deuxième et complexe pour la troisième), permet de paramétrer la *transmittance en boucle ouverte* avec peu de paramètres et de réduire ainsi son optimisation : *la synthèse du régulateur sous la forme d'une fraction rationnelle est alors effectuée uniquement pour la transmittance optimale en boucle ouverte*, évitant ainsi la synthèse itérative d'un régulateur à de nombreux paramètres (qu'exige notamment l'approche QFT). Dans le cas de la relaxation de l'eau sur une digue poreuse, où le caractère fractal de la porosité permet d'introduire la notion de *robustesse fractale*, la robustesse en question est celle de l'amortissement de la relaxation vis-à-vis de la masse d'eau en mouvement, mettant ainsi en défaut le *dilemme masse-amortissement* en mécanique. La transposition de ce type de robustesse au domaine de la commande peut être une façon de définir l'approche initiale de la commande CRONE. Ses premières générations résultent en effet de deux interprétations légitimes du modèle régissant la relaxation de l'eau sur une digue poreuse, ces deux interprétations définissant respectivement : la commande CRONE de première génération à travers un *blocage de phase du régulateur* (à un multiple non entier de $\pi/2$) autour de la fréquence au gain unité en boucle ouverte ω_u ; la commande CRONE de deuxième génération à travers un *blocage de phase en*

boucle ouverte (à un multiple non entier de $-\pi/2$, compris entre $-\pi/2$ et $-\pi$) autour de la fréquence ω_u et pour le procédé nominal et non nominal, ce blocage de phase définissant un *gabarit vertical* dans le plan de Nichols. Le passage de la deuxième à la troisième génération résulte de la généralisation du *gabarit vertical* conformément à deux niveaux de généralisation : dans le premier niveau de généralisation et pour le procédé nominal, le *gabarit vertical* est remplacé par un segment de droite de direction quelconque, appelé *gabarit généralisé* ; dans le deuxième niveau de généralisation et pour le procédé nominal, le *gabarit généralisé* est remplacé par un ensemble de gabarits généralisés, appelé *multigabarit*, qui conduit à un *gabarit curviligne*.

La partie « *Problèmes résolus* » renforce le caractère pédagogique de l'ouvrage par treize problèmes résolus. Chacun d'eux est présenté selon un énoncé qui traduit généralement une méthode de synthèse, et une solution qui détaille littéralement et numériquement les réponses aux questions formulées dans l'énoncé. Les problèmes 1 à 3 sont en relation avec les chapitres 1 et 2. Les problèmes 4 et 5 sont relatifs au chapitre 3. Les problèmes 6 à 9 concernent le chapitre 4. Enfin, les problèmes 10 à 13 concernent le chapitre 5.