

Automatique I

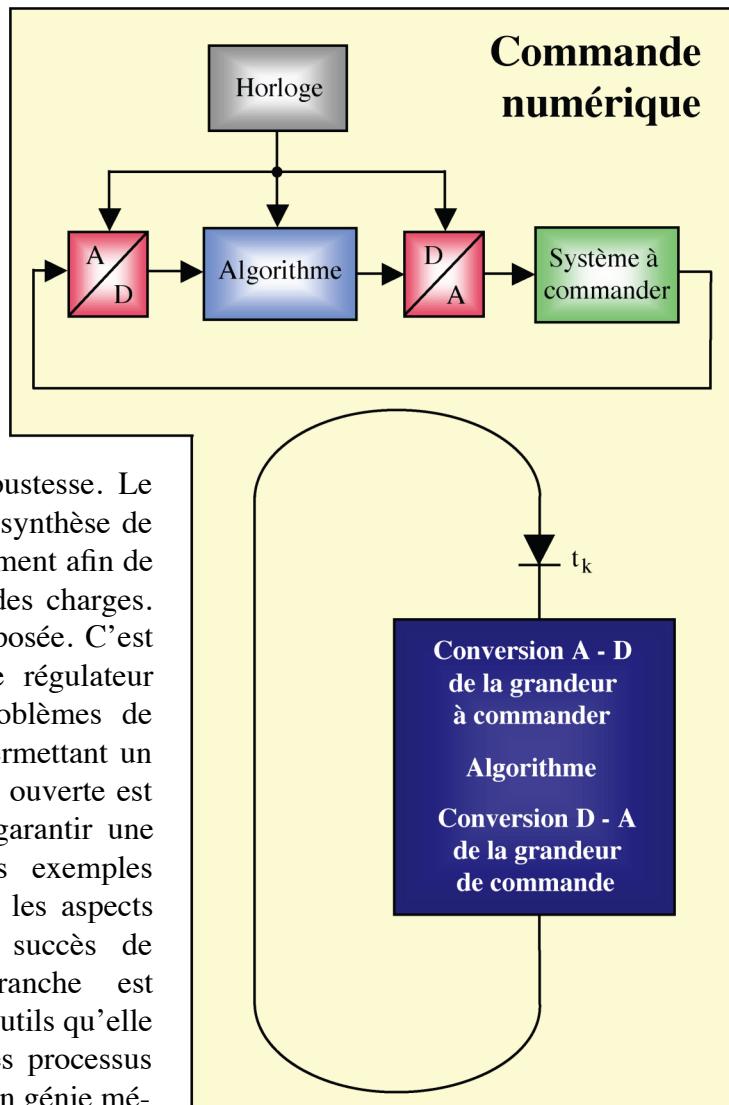
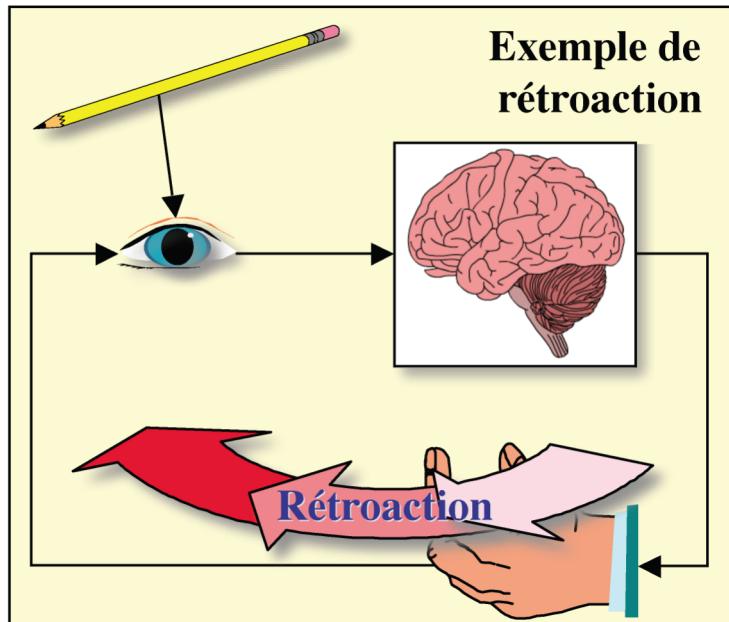
Prof. Roland Longchamp
Laboratoire d'Automatique
Station 9, EPFL
1015 Lausanne

Automne 11-12 Jeudi 8h15-11h00 Auditoire CO2

Tél.: 021 693 38 42 Fax: 021 693 25 74
roland.longchamp@epfl.ch <http://la.epfl.ch>

Description générale et objectifs du cours

L'automatique est l'ensemble des disciplines scientifiques et techniques exploitant la rétroaction pour la conduite, par des moyens artificiels, sans intervention humaine, des systèmes construits par l'homme. L'automatique analyse aussi les processus naturels, par exemple biologiques, ou autres, notamment économiques, contenant des rétroactions. Ce cours débute par une large introduction explorant qualitativement les principes de base de l'automatique. Quelques méthodes classiques d'analyse et de synthèse de régulateurs automatiques sont ensuite présentées. Actuellement, pratiquement tous les projets d'automatisation tirent profit des vastes ressources informatiques disponibles. C'est la raison pour laquelle le cours se poursuit par la description de performants outils pour modéliser les systèmes discrets en vue de leur commande par ordinateur. Un danger potentiel guettant toute architecture avec rétroaction est le phénomène d'instabilité. La stabilité en boucle fermée est une condition nécessaire, rarement suffisante, que doit satisfaire un système automatique. D'efficaces critères de stabilité sont développés. Un accent particulier est mis ici sur le critère de Nyquist, d'essence géométrique. Ce critère permet de déceler si un processus bouclé est stable ou non et fournit des informations supplémentaires très riches sur la qualité, le degré de la stabilité. Ces résultats conduisent de façon naturelle au concept moderne de robustesse. Le cours continue en approfondissant le problème de la synthèse de l'algorithme de commande, à savoir son dimensionnement afin de remplir les spécifications contenues dans un cahier des charges. Une approche par numérisation est tout d'abord proposée. C'est l'occasion de présenter de manière approfondie le régulateur proportionnel intégral dérivé numérique et ses problèmes de réalisation. Une approche, de nature fréquentielle, permettant un calibrage soigné de la fonction de transfert en boucle ouverte est ensuite détaillée. Elle s'impose lorsqu'il s'agit de garantir une bonne robustesse en présence d'incertitudes. Des exemples d'application, issus de plusieurs domaines, illustrent les aspects pratiques et la portée des résultats. Un grand succès de l'automatique provient du fait que cette branche est intrinsèquement systémique et interdisciplinaire. Les outils qu'elle met à disposition peuvent ainsi être utilisés pour des processus extrêmement variés, par exemple en microtechnique, en génie mé-



canique, en génie électrique et électronique, et en génie chimique. Les préalables requis pour cet enseignement sont les cours de base en mathématiques et en physique, ainsi qu'en signaux et systèmes.

Contenu

■ **Introduction à la commande automatique.** Qu'est-ce l'automatique ? Approche systémique. Définitions. Propriétés d'une architecture à rétroaction. Régulateur proportionnel intégral dérivé. Rôles de l'ordinateur en automatique. Principes de la commande numérique. Nécessité d'une théorie des systèmes échantillonnés.

■ **Echantillonnage et reconstruction.** Echantillonnage. Théorème de l'échantillonnage. Filtre de garde. Reconstruction. Choix de la période d'échantillonnage.

■ **Systèmes discrets.** Systèmes discrets au repos, linéaires, causals et stationnaires. Systèmes représentés par des équations aux différences.

■ **Transformée en z.** Définitions. Propriétés de la transformée en z. Calcul de la transformée en z inverse. Fonction de transfert.

■ **Fonction de transfert du système bouclé.** Echantillonnage du système à commander. Algorithme de commande. Fonctions de transfert du système bouclé.

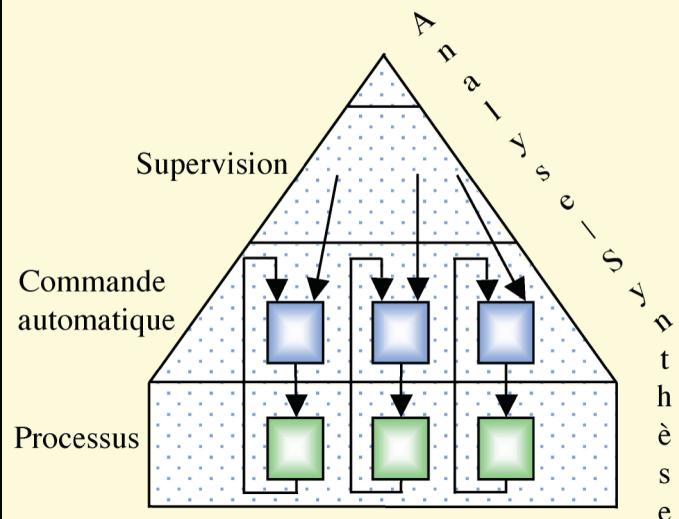
■ **Réponse harmonique.** Fonction de transfert harmonique.

■ **Stabilité.** Stabilité BIBO. Critères algébriques. Critère de Nyquist. Robustesse de la stabilité. Ecarts permanents. Principe des vases communicants.

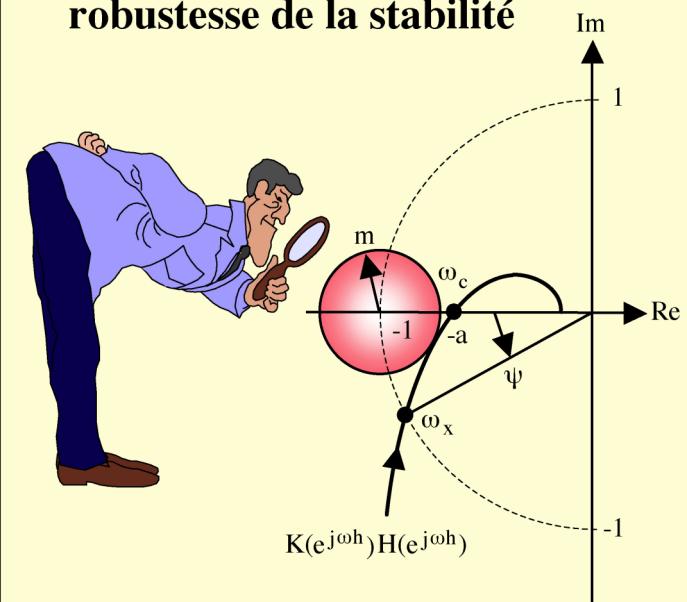
■ **Numérisation.** Numérisation d'un régulateur analogique. Régulateur proportionnel intégral dérivé numérique.

■ **Synthèse directe.** Performance en régime permanent. Robustesse de la stabilité. Amortissement du régime transitoire. Sensibilité. Fonction de transfert harmonique en boucle fermée. Synthèse du régulateur dans les diagrammes de Bode. Commande a priori.

Pyramide d'automatisation



Critère de Nyquist et robustesse de la stabilité



Document

Le cours se fonde sur les chapitres 1 à 9 de l'ouvrage *Commande numérique de systèmes dynamiques - Cours d'automatique*: Volume 1, *Méthodes de base*, R. Longchamp, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2010. Ce livre est en vente, avec le rabais étudiant, à la librairie La Fontaine.

Assistants

Alexandra Brella

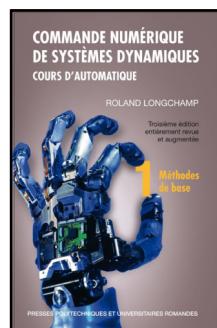
Tél.: 021 693 59 30

alexandra.brella@epfl.ch

Basile Graf

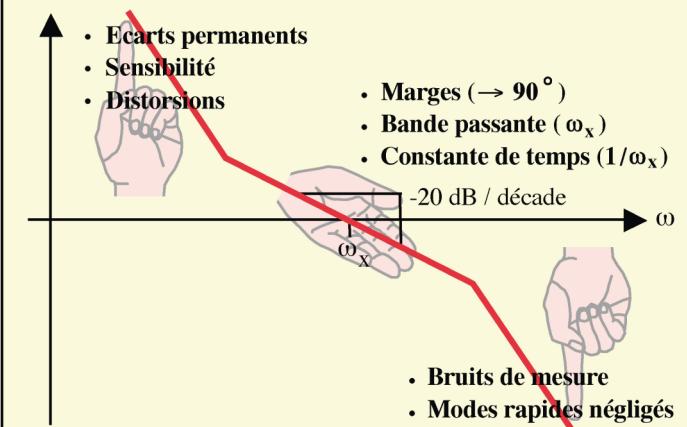
Tél.: 021 693 38 36

basile.graf@epfl.ch



Calibrage de la boucle

$$|K(e^{j\omega h}) H(e^{j\omega h})| \text{ [dB]}$$



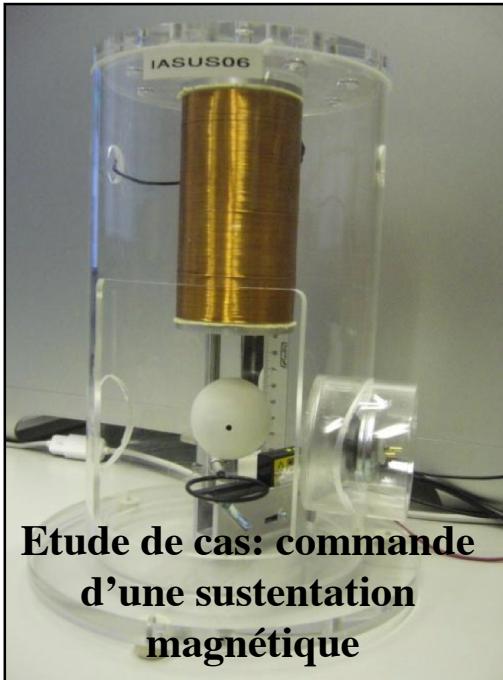
Déroulement du cours et des exercices

Des démonstrations, des études de cas et des exercices sont intégrés au cours. Un corrigé succinct des exercices et de problèmes supplémentaires recommandés est distribué en fin de séance. Ce matériel est aussi disponible, de même que divers supports, sur le Web à l'adresse <http://la.epfl.ch>, en choisissant « Teaching », « List of Courses » et ensuite « Automatique I ». Par ailleurs, il est possible de reproduire et d'approfondir de nombreux exemples présentés pendant le cours à l'aide d'applications interactives contenues dans le CD-ROM fourni avec le livre. Ces applications se révèlent en outre précieuses pour résoudre certains exercices ou pour en vérifier les solutions. Un guide d'utilisation succinct se trouve dans l'annexe III. Les sections, paragraphes et problèmes apparaissant dans le tableau ci-dessous sont inclus dans le volume constituant le support du cours. Les sections et paragraphes effleurés ou omis pendant les séances ex cathedra font partie intégrante du cours et forment des lectures personnelles. Au surplus, chaque séance débute par un résumé du cours précédent. Un ou plusieurs anciens problèmes d'examens sont discutés en classe. Des modules pratiques sont offerts à toutes les sections au 6^e semestre dans le cadre du cours Automatique II.

Etudes de cas

Les études de cas intégrées au cours traitent de la commande d'un robot mobile, d'une part, et d'une sustentation magnétique, d'autre part. Elles illustrent des aspects couverts lors de plusieurs séances: modélisation, commande a priori, analyse de la stabilité et de la robustesse, synthèse par numérisation et par calibrage de la boucle, etc. Quant à la programmation des algorithmes de commande, elle est détaillée dans un autre enseignement.

Semaine	Exercices 10h à 11h	Thèmes	Sections et paragraphes traités
			Problèmes
1	Non	Introduction	1.2, 1.3, 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3
2	Oui	Définitions, propriétés	1.4.4, 1.5 1.11.1, 1.11.5, 1.11.7, 1.11.8
3	Non	Régulateur PID	1.7
4	Oui	Commande numérique	1.8, 1.9, 1.10 1.11.16, 1.11.18, 1.11.30, 1.11.34
5	Non	Echantillonnage, reconstruction, systèmes discrets	2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 3.2, 3.3
6	Oui	Transformée en z	4.2, 4.3, 4.4.1, 4.4.3, 4.4, 4.5 2.7.2, 3.5.5, 4.6.9, 4.6.11, 4.6.14, 4.6.19, 4.6.26, 4.6.33
7	Non	Fonction de transfert du système bouclé	5.2.1, 5.3, 5.4
8	Oui	Réponse harmonique	6.2 5.5.4, 5.5.8, 5.5.10, 5.5.11, 6.4.2, 6.4.3
9	Non	Stabilité, critères de stabilité	7.2, 7.3.2, 7.4.1, 7.4.3
10	Oui	Robustesse, écarts permanents	7.5, 7.6, 7.7 7.8.1, 7.8.5, 7.8.11, 7.8.13, 7.8.20, 7.8.27
11	Non	Numérisation	8.2.1, 8.2.3, 8.2.4, 8.3
12	Oui	Spécifications	9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6 8.4.5, 8.4.14, 8.4.18, 9.11.4
13	Non	Loopshaping	9.8.1, 9.8.2
14	Oui	Loopshaping, commande a priori	9.8.3, 9.8.4, 9.8.5, 9.10 9.11.38, 9.11.39



Etude de cas: commande d'une sustentation magnétique



Etude de cas: commande d'un robot mobile

Contrôle des études

Un examen écrit est organisé à la fin du semestre d'automne. S'agissant d'un cours au contenu dense et conséquent, il importe, en vue de l'examen, de l'assimiler continûment au fil de son déroulement.

Directives concernant l'examen

■Matière. L'examen Automatique I porte sur les chapitres 1 à 9 du livre exploité comme support du cours. La matière examinée comprend aussi les problèmes proposés lors des séances d'exercices, de même que les études de cas illustrant le cours.

■Forme. Examen écrit, cinq problèmes à un point chacun. Les problèmes à résoudre incluent des calculs (simples) et des points de compréhension.

■Date et salle. Selon l'horaire officiel.

■Durée. 3 heures dès que chaque candidat est installé à sa place assignée.

■Documents autorisés.

Livre *Commande numérique de systèmes dynamiques - Cours d'automatique*: Volume 1, *Méthodes de base*.

Corrigés des exercices et solutions des anciens examens.

Notes manuscrites du cours et résumés.

Formulaires et tables.

Par ailleurs, une calculatrice de poche personnelle est vivement recommandée. Elle ne doit pas être transmise à un autre candidat. Les ordinateurs, téléphones portables et autres appareils permettant une connexion sans fil ne sont pas autorisés.

■Aspects pratiques.

Les solutions des problèmes, en français ou en anglais, sont à reporter sur les feuilles de données. Seules ces feuilles sont reprises à la fin de l'examen. Ne pas utiliser la couleur rouge.

La première feuille de données doit être signée au début de l'examen.

Un seul candidat occupe une table, assis sur le siège de droite.

Chaque candidat place devant lui sa carte d'étudiant valable.

Aucune sortie de la salle d'examen n'est autorisée.

Un silence absolu est requis pendant toute la durée de l'examen.

Toute fraude ou tentative de fraude entraîne l'exclusion de l'examen (entre autres).

■Debriefing. Les épreuves de l'examen peuvent être consultées sur demande à roland.longchamp@epfl.ch. Une séance est organisée à cet effet le premier mardi du semestre de printemps à 9h15.