

2CC1000 - Commande des systèmes dynamiques

Responsables : **Maria MAKAROVA , Pedro RODRIGUEZ-AYERBE**

Type de cours : **Cours commun**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **31**

Année académique : **2024-2025**

Présentation, objectifs généraux du cours :

La majorité des systèmes physiques fait apparaître le concept fondamental de boucle de rétroaction, permettant de les piloter et de leur conférer un comportement le plus insensible possible aux perturbations de l'environnement. L'objectif général de ce cours est de fournir aux étudiants les concepts et compétences leur permettant de comprendre la structure et les interactions au sein de systèmes dynamiques existants ou en phase de conception, de traiter l'information, de déterminer une loi de commande en vue de satisfaire un cahier des charges et d'analyser son niveau de performance et de robustesse. Pour y parvenir, les étudiants devront être à même de définir un modèle (ou un ensemble de modèles), de façon à mettre en évidence les grandeurs influant sur l'état de ce système (entrées), les mesures permettant d'accéder à cet état et les grandeurs sur lesquelles portent des exigences (sorties), ainsi que les relations liant ces variables. A partir de l'analyse des entrées pilotables (commandes) ou subies (perturbations), l'étudiant devra déterminer une loi de commande en vue d'assurer les performances attendues. La dernière étape abordée dans ce cours consistera en l'analyse de la robustesse de la loi de commande déterminée.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence) :

ST5

Prérequis :

Cours en promotion complète "Modélisation" en ST2, Cours en promotion complète hors séquence "Convergence, intégration, probabilités" et "équations aux dérivées partielles", Cours en promotion complète « Traitement du signal » en ST4

Plan détaillé du cours (contenu) :

Découpage du cours en chapitres :

1. Introduction
 - a. Intérêt de la boucle fermée, notions clés du contrôle, rejet de perturbation
 - b. Approche fréquentielle classique vs approche temporelle plus actuelle et générique
 - c. Exemples d'application
 - d. Théorèmes généraux : limitations intrinsèques à la boucle idéale (nécessité de formaliser, de compromis à faire)
2. Représentation d'état
 - a. Rappels
 - b. Propriétés (commandabilité, observabilité)

- c. Rapport entre modèle linéarisé et non linéaire - implémentation de la loi de commande sur le modèle non linéaire.
- 3. Commande des systèmes par approche d'état
 - a. Commande par placement de pôles dans le cas monovariable, précision et suivi de trajectoire de référence
 - b. Commande Linéaire Quadratique (LQ)
 - c. Cas des perturbations mesurables et leurs rejets
 - d. Commande LQ avec action intégrale
- 4. Commande par retour d'état avec observateur
 - a. Observateur par placement de pôles
 - b. Filtre de Kalman (dualité avec la commande LQ)
 - c. Commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) - Théorème de séparation
- 5. Analyse des performances et de robustesse d'une loi de commande
 - a. Rappels : liens avec la fonction de transfert
 - b. Correcteur équivalent pour les commandes LQ et LQG
 - c. Théorème du petit gain
 - d. Définition des marges de stabilité dans le cas multivariable.
 - e. Cas particulier des marges de stabilité dans le cas monovariable
 - f. Cas particulier des lois LQ et LQG - Loop Transfer Recovery (effet LTR)
 - g. Cas particulier des marges de stabilité pour des lois de commande fréquentielles classiques (par exemple correction par avance de phase, régulateur PI et PID)
- 6. Conférence industrielle : les enjeux et les problématiques ouvertes et actuelles de la commande des systèmes dans l'industrie

Déroulement, organisation du cours :

- 12h de cours, 9h de travaux dirigés, 6h de travaux de laboratoire, 1,5h de conférences industrielles
- Sur le campus de Saclay : le cours est dispensé en 8 voies d'environ 100 élèves, 7 voies en Français et une voie en Anglais.
 - Sur le campus de Rennes : le cours est dispensé en Français avec des modalités spécifiques pour permettre l'adaptation des étudiants à faible niveau en français. Des séances de soutien en anglais sont également programmées.
 - Sur le campus de Metz : le cours est dispensé en Français.

Organisation de l'évaluation :

Evaluation des connaissances :

- Les TP sont des activités obligatoires.
- Compte-rendu de travaux pratiques & contrôle final sous forme d'examen écrit (3h) avec calculatrice, photocopies et notes de cours de l'élève autorisés.
- Note TP : 25%, note contrôle final : 75%, présence contrôlée en TD et TP, pouvant donner lieu à pénalité.

Evaluation des compétences :

- Les compétences C1 et C2 seront évaluées dans le cadre des travaux pratiques et de l'examen final. Les textes de ces deux activités feront ressortir les paragraphes et questions clairement identifiés en lien avec chacune de ces compétences.
- La sous compétence C2.4 de la compétence C2 sera plus spécifiquement évaluée dans le cadre des travaux pratiques.
- Les modalités de validation de ces deux compétences seront indiquées au début du premier cours par l'équipe enseignante.

Moyens :

- Équipe enseignante :
 - Chargés et chargées de cours sur le campus de Saclay : Antoine Chaillet, Didier Dumur, Hugo Lhachemi, Maria Makarova, Cristina Maniu, Pedro Rodriguez-Ayerbe, Sihem Tebbani, Cristina Vlad

- Chargés et chargées de TD sur le campus de Saclay : Antoine Chaillet, Didier Dumur, Maria Makarova, Cristina Maniu, Cristina Vlad, Sorin Olaru, Pedro Rodriguez-Ayerbe, Guillaume Sandou, Hugo Lhachemi, Stéphane Font, Jacques Antoine, Jing Dai, Maxime Pouilly-Cathelain, Thiago Alves Lima, Antoine Girard, Jean Auriol
- Chargé de cours sur le campus de Rennes : Romain Bourdais
- Chargés et chargées de TD sur le campus de Rennes : Stanislav Aranovski, Hervé Guéguen, Marie-Anne Lefebvre, Nabil Sadou, Romain Boudais
- Chargé de cours sur le campus de Metz : Jean-Luc Colette
- Taille des TD sur le campus de Saclay : 35 élèves
- Travaux pratiques (TP) sur le campus de Saclay : 100 élèves par demi-journée, études réalisées sur des maquettes expérimentales
- Outils logiciels : Matlab (utilisé pendant les TP)

Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de :

1. Comprendre et analyser l'intérêt d'une structure de commande en boucle fermée.
2. Modéliser le comportement d'un système dynamique par une représentation temporelle (représentation d'état) ou éventuellement fréquentielle :
 - faire le choix d'un modèle (ou d'un ensemble de modèles) de comportement adapté au regard de l'objectif de commande et/ou d'analyse (linéarisation, réduction de modèle, ...).
 - valider la pertinence du modèle (ou de l'ensemble de modèles proposé)
3. Synthétiser des lois de commande sous forme de représentation d'état complétée si besoin par la synthèse d'un observateur.
 - analyser les caractéristiques du système initial et les comparer au cahier des charges.
 - choisir et synthétiser le correcteur adapté.
 - déterminer un observateur permettant d'estimer les grandeurs d'état non mesurées.
 - valider en simulation et expérimentalement la loi de commande et critiquer les résultats obtenus.
 - analyser la performance et la robustesse de la loi de commande
4. Utiliser un logiciel de simulation pour mettre en œuvre les développements théoriques et valider les lois de commande (en particulier par l'intermédiaire d'un travail expérimental).
5. Maîtriser la communication scientifique et technique (par l'intermédiaire du compte rendu de Travaux Pratiques).

Description des compétences acquises à l'issue du cours :

Validated skills:

- Concerning the skill C1 "Analyze, design and build complex systems with scientific, technological, human and economic components", evaluated in this module:
 - * "Model the behaviour of a dynamic system by means of a time domain or frequency domain representation" is included in the skill C1.2 "Use and develop appropriate models, choose the right modelling scale and the relevant simplifying hypotheses to deal with a problem"
 - * "Analyse the time and/or frequency domain behaviour of a system and the effects of feedback" is included in the skill C1.1 "Study a problem as a whole and an overall situation. Identify, formulate and analyse a problem in its scientific, economic and human dimensions"

* "Determine a control law by state feedback (completed if necessary by the synthesis of an observer), in order to satisfy a temporal and/or frequential specification" is included in the skill C1.4 "Specify, design, implement and validate all or part of a complex system"

* "Validate a control law by means of simulation or experiments and criticize the obtained results" is included in the skills C1.3 "Solve a problem by means of approximation, simulation and experiments" - Concerning the skill C2 "Develop in-depth skills in an engineering field and in a family of professions", evaluated in this module:

* "Model the behaviour of a dynamic system" and Analyzing the characteristics of the initial system and comparing them to the specifications" requires an appropriation of the field of application considered together with its constraints, and is therefore part of C2.2 "Importing knowledge from other fields or disciplines" and C2.3 "Identify and independently acquire the required new knowledge and skills"

* "Analyze the performance and robustness of control laws" is part of C2.4 "Produce data and develop knowledge according to a scientific approach"

* "Use simulation software to implement theoretical developments and validate control laws (in particular through experimental work)" is part of C2.4 "Producing data and developing knowledge according to a scientific approach"

- "Master scientific and technical communication (through reports during lab works)" is included in the skill C7.1 "Render complex content intelligible. Structure one's ideas and arguments. Synthesize and see the bigger picture". This skill is not evaluated in this module.

Evaluation of the learning outcomes

Skills C1 and C2 will be evaluated in two different situations:

- Two lab work sessions will enable evaluating all these three learning outcomes, students having a real process to model, analyse and control. In particular, this pedagogical method allows students to experience experimental training and validation of the modelling and design approach

- A final exam will also confront students with a real problem of a process that should be modelled, analysed and controlled. The emphasis will be less on experimental aspects than on the ability to satisfy an industrial problem through its specifications.

The skill C2.4 will be more specifically assessed during the lab work sessions, as well as during personal work (requiring the implementation of the process via a simulation software) between the two lab work sessions.

The skill C7 will not be evaluated, but it will be more specifically handled through the report following the lab work sessions

Bibliographie :

Polycopiés :

- Polycopié « Commande des systèmes dynamiques » en Français
- Glossaire "Commande des systèmes dynamiques" Français-Anglais et Anglais-Français
- Recueil des transparents utilisés en cours

Bibliographie :

- J.J. D'Azzo & C.H. Houpis - "Linear Control System. Analysis and Design" - 3e éd., Mc Graw-Hill, 1988.
- P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis - "Analyse et régulation des processus industriels. Tome 1. Régulation continue, Tome 2. Régulation numérique" - Éditions Technip, 1993.
- J.B. Deluche - "Automatique. De la théorie aux applications industrielles. Tome 2 : Systèmes continus" - Edipol, 2000.
- J.M. Flaus - "La régulation industrielle" - Hermès, 1994.
- G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini - "Feedback Control of Dynamic Systems" - 7° ed., Ed. Pearson Publishing Company, 2014.

- B. Friedland - "Control system design" - Mc Graw-Hill, 1986.
- Ph. de Larminat - "Automatique. Commande des systèmes linéaires" - Hermès, 1996.
- L. Maret - " Régulation automatique" - Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- K. Ogata - "Modern Control Engineering" - 5e éd., Ed. Pearson Education International, 2009.
- A. Rachid - "Systèmes de régulation" - Masson 1996.
- M. Zelazny, F. Giri et T. Bennani - "Systèmes asservis : commande et régulation" - Eyrolles, 1993.