



Plan de cours



ELE3201 - Asservissements

Département de génie électrique
Automne 2009

3 crédits
Triplet horaire : 3 – 1.5 – 4.5

<http://www.cours.polymtl.ca/ele3201>

Professeur

Nom	Omar Messas – École Polytechnique de Montréal
Courriel	omar.messas@polymtl.ca
Disponibilité	Sur rendez-vous

Professeur responsable

Nom	Richard Hurteau
------------	------------------------

Chargé de laboratoire

Nom	Richard Hurteau
Courriel	richard.hurteau@polymtl.ca



Description de l'annuaire

Systèmes asservis: notions et concepts fondamentaux. Évaluation des performances. Techniques fréquentielles. Techniques de la transformée de Laplace. Lieu des racines. Régulation et observation d'état pour des systèmes dynamiques analogiques et numériques. Analyse et conception assistée par ordinateur des systèmes asservis. Introduction à la commande tout ou rien. Méthode du premier harmonique. Plan de phase.

Cours préalables	Cours corequis	Cours subséquents
ELE2200	MTH2120	ELE4200, ELE4202, ELE4203, ELE4451, ELE4452, ELE4455, ELE4459, ELE4458, ELE4460, ELE4498, ELE4499

Objectifs de l'enseignement

- 1) Connaître les définitions, concepts et formalismes propres à l'automatique.
- 2) Se familiariser avec la structure des systèmes de commande et le rôle de chacun des composants dans ces systèmes.
- 3) Être en mesure de déterminer les performances statiques et dynamiques d'un système à partir de son modèle entrée-sortie ou de son modèle d'état.
- 4) Se familiariser avec différents contrôleurs (PID, rétroaction par retour d'état, commande de type tout ou rien, etc.).
- 5) Être en mesure d'analyser la stabilité d'un système asservi.
- 6) Savoir analyser et concevoir un compensateur en utilisant la technique du lieu des racines.
- 7) Savoir analyser et concevoir un compensateur en utilisant des techniques basées sur la réponse en fréquence.
- 8) Savoir analyser et concevoir un compensateur par retour d'état pouvant comprendre un observateur d'état.
- 9) Connaître les techniques classiques d'étude des systèmes non linéaires : plan de phase et méthode du premier harmonique.



Objectifs des laboratoires

- 1) Se familiariser avec la réalisation d'une boucle de commande numérique au niveau technologique (matériel et logiciel).
- 2) Se familiariser avec la problématique d'identification des paramètres du modèle linéaire d'un système physique.
- 3) Apprendre à évaluer et à caractériser le comportement expérimental d'un asservissement de position et de vitesse.
- 4) Apprendre à concevoir et à régler expérimentalement un compensateur PID.
- 5) Savoir utiliser des logiciels pour la conception, la simulation, l'implantation en temps réel de boucles de commande, et l'acquisition de données (Matlab, Simulink, et LabVIEW).

Critères d'évaluation : examens

Il y aura un contrôle périodique de deux heures et un examen final de deux heures et demie. Un aide-mémoire de deux feuilles 8 ½ x 11 recto verso est permis lors du contrôle périodique et à l'examen final. Le contrôle périodique portera sur les chapitres 1, 2 et 4 et l'examen final sur les chapitres 3 et 5. Les questions d'examen porteront également sur les laboratoires.

Tout(e) étudiant(e) dont l'absence au contrôle périodique ou à l'examen final est motivée devra se soumettre à un examen différé écrit ou oral. L'examen oral aura lieu en présence d'un tiers.

Critères d'évaluation : laboratoires

Il y aura trois thèmes de travaux pratiques divisés en cinq séances de laboratoire. Les étudiants (tes) travailleront en équipe de deux et présenteront un rapport à la fois concis et complet pour chacun des thèmes de travaux pratiques.

Une partie du travail de laboratoire est évaluée durant les séances (préparation, déroulement, et validation des résultats). La préparation des séances et la présence au laboratoire sont donc obligatoires.



Les étudiants (tes) qui reprennent le cours doivent obligatoirement refaire les séances de laboratoire. Aucun laboratoire des sessions précédentes ne sera crédité.


Évaluation

<i>Nature</i>	<i>Nombre</i>	<i>Pondération</i>	<i>Date</i>
Laboratoires	3	30%	Voir l'horaire sur le site web
Contrôle périodique	1	35%	À venir par courriel
Examen final	1	35%	À venir
Devoirs libres	-	-	-

Documentation

Le recueil de transparents du cours et le recueil de transparents des laboratoires sont en vente à la Coopoly. Le guide de laboratoire est disponible sur le site web du cours. La référence (5) sera utilisée systématiquement et est recommandée. Au besoin, des compléments d'information seront mis à la disposition des étudiants (tes) sur le site web du cours.

Références

- 1) BÉLANGER, P. R. (1995). Control Engineering : A Modern Approach, Saunders College Publishing.
- 2) BOUKAS, E.-K. (1995). Systèmes asservis, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- 3) D'AZZO, J. J., HOUPIS, C. H. (1995). Linear Control Systems : Analysis and Design, 4th edition, McGraw-Hill.
- 4) DE SANTIS, R. M. (1986). Systèmes asservis, Notes du cours 3.520, École Polytechnique de Montréal, Automne 1986.
- 5) DORF, R. C. (2007). Modern Control Systems, 11th edition, Addison-Wesley.
- 6) FRANKLIN, G. F., POWELL, D. J., ABBAS, E. N. (1994). Feedback Control of Dynamic Systems, 3rd edition, Addison-Wesley.
- 7) GILLE, J. C., DECAULNE, P., PÉLEGRIN, M. (1967). Dynamique de la commande linéaire, Dunod.
- 8) HURTEAU, R., DE SANTIS, R. M. (2005). Asservissement de position angulaire avec un 

lien de transmission élastique, Guide des travaux pratiques ELE 3201.

- 9) JAMAL, R., PICHLIK, H. (1999). LabVIEW Applications and Solutions, Prentice-Hall.
- 10) JOHNSON GARY, W. (1994). LabVIEW Graphical Programming : Practical Applications in Instrumentation and Control, McGraw-Hill.
- 11) KUO, B. C. (2003). Automatic Control Systems, Prentice-Hall, 8^e édition.
- 12) PHILLIPS, C., HARBOR, R. (1991). Feedback Control Systems, 2nd edition, Prentice-Hall.



Programme du cours

Chapitre 1 : Introduction	(4 heures)
<p>1.1 - Éléments de base d'un système de commande en boucle fermée : composants d'un système de commande, notions de base d'un système : entrée, sortie, état, perturbation.</p> <p>1.2 - Critère de performance d'un système de commande : stabilité, précision, rapidité, critère temporel, critère fréquentiel (rappel).</p> <p>1.3 - Rappel de notions mathématiques : fonction de transfert, évaluation de relations entrée-sortie, système de 1^{er} et 2^e ordre : analyse temporelle et fréquentielle. Erreur en régime permanent d'un système en boucle fermée.</p> <p>1.4 - Système de commande : structure des contrôleurs : boucle ouverte, anticipatif, avec rétroaction (à un et à deux degrés de liberté). Type de compensateurs : P, PD, PI, PID, avance et retard de phase.</p> <p>1.5 - Étude de cas : asservissement en position angulaire d'un système possédant un lien rigide avec une charge et d'un système relié à une charge par un lien élastique.</p> <p>1.6 - Étude de cas : boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop, PLL).</p> <p>1.7 - Aspects technologiques : caractérisation d'une boucle de commande numérique, acquisition de données et commande en utilisant le logiciel LabVIEW.</p>	
Chapitre 2 : Étude d'un système de commande dans le plan de Laplace (approche classique)	(4 heures)
<p>2.1 - Introduction : analyse de stabilité dans le plan complexe (s) : équation caractéristique, critère de Routh-Hurwitz (rappel), lieu des racines (rappel).</p> <p>2.2 - Conception de compensateurs (P, PD, PI, PID) en utilisant le lieu des racines (placement de pôles). Compensateur PIDDL (dual-loop).</p> <p>2.3 - Asservissement de position angulaire avec un lien élastique. Utilisation d'un filtre-cache.</p>	



Chapitre 3 : Étude d'un système de commande dans le domaine fréquentiel (approche classique)**(10 heures)**

- 3.1 - Introduction. Courbes de réponse en fréquence : diagrammes de Bode, de Nyquist et de Black.
- 3.2 - Critère de Nyquist : analyser de stabilité à partir des diagrammes de Nyquist et de Bode.
- 3.3 - Marge de gain, marge de phase.
- 3.4 - Relation entre les réponses fréquentielles en boucle ouverte et en boucle fermée : abaques de Hall et de Nichols.
- 3.5 - Conception d'un compensateur à partir de la réponse en fréquence : étude de cas.

Chapitre 4 : Étude d'un système de commande dans le domaine temporel (approche moderne)**(10 heures)**

- 4.1 - Introduction : modèle d'état, relation modèle d'état – fonction de transfert, transformation linéaire, commandabilité et observabilité, forme compagne commandable et observable.
- 4.2 - Régulateur par retour d'état et observateur d'état. Positionnement de pôles d'un régulateur et d'un observateur.
- 4.3 - Conception d'un contrôleur comprenant un régulateur par retour d'état et un observateur. Ajout d'un intégrateur pour améliorer la précision du système.

Chapitre 5 : Analyse des systèmes à relais**(9 heures)**

- 5.1 - Introduction : les non linéarités dans un système de commande.
- 5.2 - Analyse des systèmes à relais dans le plan de phase : relais tout ou rien, relais avec hystérésis et zone morte. Trajectoires du système. Courbes de commutation. Cycle limite. Détermination des performances.




5.3 - Analyse des systèmes à relais par la méthode du premier harmonique. Stabilité. Notion de gain équivalent et de lieu critique. Détermination de l'existence de cycles limites et de leurs caractéristiques (amplitude, fréquence, stabilité).

Programme des laboratoires

Les objectifs généraux des laboratoires sont les suivants :

- 1) Comprendre les principes à la base du fonctionnement théorique et pratique d'un asservissement de position angulaire et avoir la capacité d'évaluer et de caractériser le comportement expérimental d'un tel asservissement.
- 2) Expérimenter les techniques d'identification d'un système physique modélisé avec des fonctions de transfert ainsi qu'avec un modèle d'état; évaluer les caractéristiques d'un modèle représentant un tel système;
- 3) Expliquer la nature et l'importance des phénomènes non linéaires qui se produisent sur le banc d'essai (et en général dans système mécatronique); apprécier la difficulté de modélisation et de simulation des effets non linéaires.
- 4) Comprendre et vérifier expérimentalement la raison d'être des divers éléments d'un compensateur PID classique (avec ou sans anticipation), d'un compensateur PID dual-loop (PIDDL) et d'un compensateur PID avec filtre-cache;
- 5) Comprendre et vérifier expérimentalement le compensateur par retour d'état;
- 6) Évaluer expérimentalement les possibilités et des limites qui caractérisent l'utilisation de ces différentes stratégies de commande.

Les étudiants (tes) auront l'occasion d'acquérir ou de démontrer les habiletés et les aptitudes suivantes :

- 1) Utiliser avec dextérité et confiance les instruments nécessaires à la mise en place du banc d'essai.
- 2) Mettre en marche d'une façon efficace et sécuritaire un système de commande à rétroaction.
- 3) Apprécier l'ordre de grandeur des quantités physiques en jeu : moments d'inertie, couples, résistances, gains, frottement sec, frottement de Coulomb, etc.
- 4) Expliquer la différence entre le comportement expérimental qui se produit sur le banc d'essai et le comportement attendu sur la base de considérations théoriques et d'

simulations.

- 5) Percevoir les anomalies en cours d'expérimentation et savoir les interpréter ainsi qu'en identifier la source.
- 6) Développer, valider, documenter et se servir de logiciels (avec support Matlab/Simulink, LabVIEW ou l'équivalent) afin de reproduire les phénomènes observés et le mode d'opération et de fonctionnement du système asservi, ainsi que de traiter les données recueillies.
- 7) Communiquer oralement ou par écrit des informations techniques d'une façon structurée, claire, rigoureuse, concise, et techniquement correcte sur des questions relatives aux expériences de laboratoire.
- 8) Faire preuve d'une attitude professionnelle en démontrant les qualités suivantes : initiative, curiosité, rigueur scientifique, sens critique, sens de l'observation, respect pour le matériel et ses collègues, probité intellectuelle, esprit d'équipe.

Les travaux pratiques comprennent cinq séances de laboratoire regroupées en 3 thèmes. Les objectifs spécifiques de chacun des laboratoires ainsi que la programmation de chacune des séances sont décrits dans les paragraphes suivants.

Laboratoire 1 – 2 séances de 3 heures (S1 et S2)

S1 – Introduction aux logiciels et au banc d'essai utilisés lors des laboratoires

Objectifs :

- 1) Se familiariser avec le banc d'essai (capteurs, actionneurs, interface, logiciel de commande LabVIEW, fonctionnement du banc d'essai et caractérisation du frottement).
- 2) Apprendre à utiliser LabVIEW et Matlab/Simulink.

S2 – Caractérisation de la boucle de commande numérique, identification des paramètres et développement d'un simulateur numérique pour un système asservi de position angulaire muni d'un lien de transmission rigide/élastique

Objectifs :

- 1) Analyser les caractéristiques technologiques du banc d'essai :
 - résolution des capteurs;



- caractéristiques non linéaires des composantes;
 - précision temporelle du logiciel de commande;
 - filtrage des mesures.
- 2) Identifier les paramètres du système de positionnement angulaire (avec lien rigide et lien élastique).
 - 3) Développer un simulateur numérique sous Matlab/Simulink et vérifier la validité du modèle.

Laboratoire 2 – 2 séances de 3 heures (S3et S4)

S3 – Réglage des gains de compensateurs PID+ K_4 pour un asservissement de position muni d'un lien de transmission rigide : méthode expérimentale et placement de pôles

Objectifs :

- 1) Effectuer le réglage des compensateurs P, PD, PI, et PID avec anticipation par essais et erreurs sur le banc d'essai.
- 2) Comprendre l'effet de chacun des gains du compensateur PID avec anticipation.
- 3) Effectuer le réglage d'un compensateur PID avec anticipation par le placement de pôles.

S4 – Réglage des gains d'un compensateur PIDDL pour un asservissement de position angulaire muni d'un lien de transmission rigide : méthode expérimentale

Objectifs :

- 1) Effectuer le réglage expérimental d'un compensateur PIDDL.
- 2) Comprendre l'effet de chacun des gains du compensateur PIDDL.

Laboratoire 3 – 1 séance de 3 heures (S5)

S5 – Conception et implantation d'un contrôleur par retour d'état pour l'asservissement de position muni d'un lien de transmission élastique

Objectifs :

- 1) Étudier la commande par retour d'état pour l'asservissement de position avec un lien de transmission élastique.
- 2) Simuler un contrôleur par retour d'état.



-
- 3) Développer et mettre au point un contrôleur par retour d'état en utilisant une méthode de placement de pôles.