

---

# Conception d'asservissement

## GUIDE DE L'ÉTUDIANT S5 – APP 5

Automne 2019 – Semaines 1 et 2

---

Département de génie électrique et de génie informatique  
Faculté de génie  
Université de Sherbrooke

Auteurs: Jean de Lafontaine, Karina Lebel  
Version: 6.2 (03 novembre 2019 à 11 :15)

Ce document est réalisé avec l'aide de Microsoft Word.

©2019 Tous droits réservés. Département de génie électrique et de génie informatique,  
Université de Sherbrooke.

# TABLE DES MATIÈRES

1	ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES	1
2	SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION	2
3	QUALITÉS DE L'INGÉNIEUR	3
4	CONNAISSANCES NOUVELLES	4
5	SANTÉ ET SÉCURITÉ : DISPOSITIONS GÉNÉRALES	5
6	POLITIQUES ET RÈGLEMENTS	5
7	ÉNONCÉ DE LA PROBLÉMATIQUE	6
8	GUIDE DE LECTURE	9
8.1	Références essentielles	9
8.2	Documents complémentaires	9
9	LOGICIELS ET MATÉRIEL	9
10	PRODUCTIONS À REMETTRE	10
11	ÉVALUATIONS	11
11.1	Productions à remettre	11
11.2	Évaluation sommative de l'unité	11
12	PRATIQUE PROCÉDURALE 1	12
12.1	Lectures préparatoires	12
12.2	Exercices	12
13	PRATIQUE LABORATOIRE 1	14
13.1	Lectures préparatoires	14
13.2	Informations utiles en lien avec MATLAB	14
13.3	Exercices préparatoires	1
13.4	Exercices	1
14	PRATIQUE PROCÉDURAL 2 (EN LABORATOIRE)	5
14.1	Exercices	5
14.2	Exercices supplémentaires	5
15	VALIDATION AU LABORATOIRE	6
16	SECONDE RENCONTRE DE TUTORAT : VALIDATION DES CONNAISSANCES	6
17	ÉVALUATION FORMATIVE	6
	LISTE DES RÉFÉRENCES	7

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Synthèse de l'évaluation de l'unité.....	2
Tableau 3.1 Synthèse de l'évaluation des qualités.....	3
Tableau 11.1 Sommaire de l'évaluation du rapport.....	11

# 1 ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES

## GEL433 – Asservissements analogiques

### *Compétences*

1. Formuler, interpréter et utiliser les critères de performance d'un asservissement dans le but de concevoir un asservissement.
2. Concevoir un asservissement linéaire à partir de spécifications descriptives en utilisant des outils analytiques et numériques dans les domaines temporel et fréquentiel.
3. Analyser la performance d'un asservissement aux fins de vérification et de validation.
4. Utiliser un logiciel de CAO pour supporter la conception, la simulation et la validation d'un système asservi.

### *Contenu*

- Représentation schématique et mathématique d'un système asservi linéaire et continu.
- Critères de performance d'un asservissement: stabilité, régime transitoire, régime permanent.
- Analyse des réponses fréquentielle et temporelle d'un système asservi linéaire et continue
- Analyse de la stabilité et la performance d'un système asservi linéaire continu.
- Action proportionnelle, dérivée et intégrale; compensateurs avance et retard de phase.
- Analyse et conception par méthodes analytiques, le lieu des racines et réponse en fréquence.
- Conception d'un asservissement linéaire continu à partir de spécifications descriptives.
- Logiciel CAO pour conception, simulation, vérification et validation d'un système asservi continu linéaire.

Description officielle : <http://www.usherbrooke.ca/fiches-cours/GEL433>

## 2 SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION

Le cours GEL433 est un cours de 4 crédits divisés sur 3 APP (APP4, APP5 et APP6). Le tableau suivant démontre la répartition des différentes compétences à travers les modalités d'évaluation de chacun des APP. Il est à noter que l'examen sommatif final est un examen récapitulatif qui portera sur les compétences de l'activité GEL433, lesquelles ont été vues à travers les 3 APP détaillés.

*Tableau 2.1 Synthèse de l'évaluation de l'unité*

Évaluation	GEL433-1	GEL433-2	GEL433-3	GEL433-4
<b>APP 4</b>				
Rapport d'APP et livrables associés	10	10	25	25
Évaluation sommative	30	30	105	95
<b>TOTAL</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>130</b>	<b>120</b>
<b>APP 5</b>				
Rapport d'APP et livrables associés	20	30	0	15
Évaluation sommative	70	130	0	65
<b>TOTAL</b>	<b>90</b>	<b>160</b>	<b>0</b>	<b>80</b>
<b>APP 6</b>				
Rapport d'APP et livrables associés	10	10	10	10
Évaluation sommative	20	30	20	30
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>EXAMEN FINAL</b>	<b>80</b>	<b>120</b>	<b>80</b>	<b>120</b>
Examen récapitulatif				
<b>GRAND TOTAL</b>	<b>240</b>	<b>360</b>	<b>240</b>	<b>360</b>

### 3 QUALITÉS DE L'INGÉNIEUR

Les qualités de l'ingénieur visées par cette unité d'APP sont les suivantes :

**Q01 – Connaissances en génie** : connaissance, à un niveau universitaire, des mathématiques, des sciences naturelles et des notions fondamentales de l'ingénierie, ainsi qu'une spécialisation en génie propre au programme.

**Q02 – Analyse de problèmes** : capacité d'utiliser les connaissances et les principes appropriés pour identifier, formuler, analyser et résoudre des problèmes d'ingénierie complexes et en arriver à des conclusions étayées.

**Q04 – Conception** : capacité de concevoir des solutions à des problèmes d'ingénierie complexes et évolutifs et de concevoir des systèmes, des composants ou des processus qui répondent aux besoins spécifiés, tout en tenant compte des risques pour la santé et la sécurité publiques, des aspects législatifs et réglementaires, ainsi que des incidences économiques, environnementales, culturelles et sociales.

**Q05 – Utilisation d'outils d'ingénierie** : capacité de créer et de sélectionner des techniques, des ressources et des outils d'ingénierie modernes et de les appliquer, de les adapter et de les étendre à un éventail d'activités simples ou complexes, tout en comprenant les contraintes connexes.

**Q06 – Travail individuel et en équipe** : capacité de fonctionner efficacement en tant que membre ou chef d'équipe, de préférence dans un contexte de travail multidisciplinaire.

**Q07 – Communication** : habileté à communiquer efficacement des concepts d'ingénierie complexes, au sein de la profession et au public en général, notamment lire, rédiger, parler et écouter, comprendre et rédiger de façon efficace des rapports et de la documentation pour la conception, ainsi qu'énoncer des directives claires et y donner suite.

Les qualités répertoriées dans le tableau ci-dessous seront spécifiquement évaluées au cours de cet APP via les moyens listés.

*Tableau 3.1 Synthèse de l'évaluation des qualités*

Évaluation	Qualités évaluées
Rapport d'APP et livrables associés	-
Évaluation sommative	Q01, Q02, Q05
Évaluation finale	Q01, Q02

D'autres qualités peuvent être présentes sans être visées ou évaluées dans cette unité d'APP. Pour une description détaillée des qualités et leur provenance, consultez le lien suivant :

<https://www.usherbrooke.ca/genie/etudiants-actuels/au-baccalaureat/bcapg/>

## 4 CONNAISSANCES NOUVELLES

### Connaissances déclaratives (quoi)

- Types de boucles d'asservissement
- Réponse temporelle en régime transitoire : stabilité, temps de stabilisation, dépassement
- Réponse temporelle en régime permanent : erreur en régime permanent
- Effet des compensateurs de type PI, PD, PID, avance de phase et retard de phase sur la réponse temporelle et sur la réponse fréquentielle d'un système

### Connaissances procédurales (comment)

- Déterminer les réponses temporelles et fréquentielles d'un système
- Interpréter les spécifications de conception
- Choisir la structure d'asservissement pour satisfaire les spécifications de conception
- Choisir le type de compensateur requis pour satisfaire les spécifications de conception
- Calculer les paramètres d'un compensateur P, PI, PD, PID, avance de phase et retard de phase pour satisfaire les spécifications de conception dans les domaines temporels et fréquentsiels
- Utiliser MATLAB pour analyser, concevoir et valider un système asservi

### Connaissances conditionnelles (quand)

- Selon les critères de performance, utiliser le domaine temporel ou le domaine fréquentiel pour concevoir un asservissement.
- Selon les critères de performance, utiliser un compensateur en cascade de type P, PI, PD, PID, avance de phase et retard de phase.



## 5 SANTÉ ET SÉCURITÉ : DISPOSITIONS GÉNÉRALES

Dans le cadre de la présente activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance des politiques et directives concernant la santé et la sécurité. Ces documents sont disponibles sur les sites web de l'Université de Sherbrooke, de la Faculté de génie et du département. Les principaux sont mentionnés ici et sont disponibles dans la section *Santé et sécurité* du site web du département:

<https://www.gel.usherbrooke.ca/santesecurite/>.

- Politique 2500-004: Politique de santé et sécurité en milieu de travail et d'études
- Directive 2600-042: Directive relative à la santé et à la sécurité en milieu de travail et d'études
- Sécurité en laboratoire et atelier au département de génie électrique et de génie informatique

## 6 POLITIQUES ET RÈGLEMENTS

Dans le cadre de la présente activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance des politiques, règlements et normes d'agrément suivants.

### Règlements de l'Université de Sherbrooke

- Règlement des études: <https://www.usherbrooke.ca/registraire/>

### Règlements facultaires

- Règlement facultaire d'évaluation des apprentissages / Programmes de baccalauréat
- Règlement facultaire sur la reconnaissance des acquis

### Normes d'agrément

- Informations pour les étudiants au premier cycle: <https://www.usherbrooke.ca/genie/etudiants-actuels/au-baccalaureat/bcapg>
- Informations sur l'agrément: <https://engineerscanada.ca/fr/agrement/a-propos-de-l-agrement>

Si vous êtes en situation de handicap, assurez-vous d'avoir communiqué avec le *Programme d'intégration des étudiantes et étudiants en situation de handicap* à l'adresse de courriel [prog.integration@usherbrooke.ca](mailto:prog.integration@usherbrooke.ca).

## INTÉGRITÉ, PLAGIAT ET AUTRES DÉLITS

Dans le cadre de la présente activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance de la déclaration d'intégrité relative au plagiat: <https://www.usherbrooke.ca/ssf/antiplagiat/jenseigne/declaration-dintegrite/>

## 7 ÉNONCÉ DE LA PROBLÉMATIQUE

### Les télescopes pour détecter, suivre et identifier des objets volants

Votre cousin propriétaire de EstampBeauce Inc. (voir APP3 GE) a gagné le lucratif contrat d'antennes avec la NASA. Ayant ainsi développé une expertise reconnue dans la fourniture de système de positionnement haute précision, il suscite à nouveau votre collaboration pour concevoir les lois de commande en azimut et en élévation de systèmes de positionnement de télescopes destinés à faire la détection, le suivi et l'identification d'objets volants (satellites, avions) à partir de stations au sol. Son client désire acheter deux systèmes de positionnement de télescopes, **Télescope A** et **Télescope B**, ayant chacun des critères de performance différents autant dans le domaine temporel que dans le domaine des fréquences. Pour minimiser les coûts, votre cousin insiste à utiliser le même matériel électromécanique pour les deux télescopes; seul le logiciel de commande sera adapté à chaque cas. Vu la complexité de ces demandes, vous faites appel à un mentor et ami à la société Dom Barbier, le Dr. Lindberg, qui accepte de vous y assister.

Le Dr. Lindberg vous explique que la conception d'asservissements doit être perçue comme une série de techniques reposant sur des bases scientifiques solides et sur une bonne maîtrise des techniques analytiques et des outils de simulation. Il souligne que la difficulté principale provient surtout du grand nombre de contraintes et de spécifications, parfois contradictoires, auquel le concepteur doit faire face, et du grand nombre de choix dans les solutions.

Les spécifications du client sont exprimées en termes de stabilité relative, d'erreur en régime permanent, de réponse transitoire, de réponse fréquentielle, de sensibilité aux perturbations et de robustesse aux variations de paramètres. À partir de ces spécifications et du modèle du système à asservir, l'ingénieur doit :

- (a) analyser le modèle dynamique du système à asservir;
- (b) traduire les spécifications du client en critères de conception
- (c) choisir l'architecture de contrôle (cascade, boucle interne, *feedforward*, ou une combinaison);
- (d) choisir le type de compensateur (P, PD, PI, PID, avance de phase, retard de phase, avance et retard de phase) selon les spécifications du client;
- (e) calculer les paramètres du compensateur;
- (f) vérifier les performances du système asservi en simulation;
- (g) retourner au point (d) si les spécifications ne sont pas toutes satisfaites;
- (h) éventuellement, discuter avec le client une relaxation des spécifications impossibles à rencontrer.

Dans le cas présent, Dr. Lindberg recommande des compensateurs en cascade (PD, PI, avance de phase, retard de phase,) dans une boucle externe. Avant d'aller plus loin dans la conception des compensateurs, il vous conseille de décrire, sous forme d'un diagramme et à partir de spécifications, une procédure de conception systématique dans le domaine temporel et fréquentiel des compensateurs avance de phase et retard de phase, avec leur cas particulier le PD et le PI. Par la suite, vous serez en mesure d'appliquer cette procédure pour paramétrer les compensateurs des boucles externes selon les spécifications ci-dessous.

Chaque système de positionnement de télescope possède deux asservissements indépendants : une commande de l'angle d'azimut (rotation dans le plan horizontal) et une commande de l'angle d'élévation (rotation dans le plan vertical). Le modèle dynamique pour chaque axe de commande est fourni à l'Annexe A. Votre cousin mentionne que les modèles dynamiques en azimut et en élévation sont différents; cela est dû à des contraintes de design mécanique qui font que l'arbre de transmission entre le moteur et le télescope est plus flexible en azimut qu'en élévation. Cela préoccupe le Dr. Lindberg qui y voit une possibilité d'excitation du mode flexible menant à de possibles vibrations non désirées du télescope. Les critères de performance du client pour chaque télescope sont fournis ci-dessous.

Le client a aussi fourni (séparément) une *trajectoire de référence* à utiliser dans la démonstration de la performance finale des deux télescopes, en azimut et en élévation. Le client s'attend à recevoir vos explications quant à la corrélation entre la trajectoire obtenue et les spécifications exigées.

### TÉLESCOPE A

#### Critères de design

- A-1 Minimiser l'amplification du bruit à hautes fréquences.
- A-2 Réponse à un échelon unitaire :
- dépassement maximum : 25%
  - temps de stabilisation (2%) : 1.00 s
  - temps de montée (10% à 90%) :  $\leq 0.15$  s
  - temps de montée (10% à 90%) :  $\leq 0.25$  s
  - erreur en régime permanent : 0.00
- A-3 Réponse à une rampe unitaire :
- erreur en régime permanent : 0.05 deg. en azimut, 0.00 deg. en élévation
- A-4 Réponse à une parabole unitaire :
- erreur en régime permanent : S/O en azimut, 0.10 deg. en élévation

#### Critères de sécurité

- A-5 Marges de stabilité (azimut et élévation):
- marge de gain:  $\geq 10$  dB
  - marge de retard:  $\geq 0.10$  s en azimut,  $\geq 0.08$  s en élévation
- A-6 Atténuation de vibration :  $\leq -15$  dB en azimut,  $\leq -15$  dB en élévation

#### Critères d'acceptation finale\*

- FA-1 Dépassement maximum acceptable :  $\leq 30\%$  en azimut,  $\leq 35\%$  en élévation
- FA-2 Temps de stabilisation acceptable (2%) :  $\leq 1.25$  s en azimut  $\leq 1.50$  s en élévation
- FA-3 Temps pour atteindre une erreur de 2%
- Entrée rampe unitaire:  $\leq 1.25$  s en azimut,  $\leq 1.50$  s en élévation
  - Entrée parabole unitaire : S/O en azimut,  $\leq 3$  s en élévation

### TÉLESCOPE B

#### Critères de design

- B-1 Bande passante (BW) :  $\geq 10$  rad/s
- B-2 Marge de phase (PM) : 50 deg  $\pm$  5 deg
- B-3 Réponse à une rampe unitaire :
- erreur en régime permanent :  $\leq 0.005$  deg.

#### Critères de sécurité

- B-5 Marge de gain :  $\geq 15$  dB
- B-6 Atténuation de vibration :  $\leq -12$  dB
- B-7 Pour une augmentation de gain d'un facteur 5 (14 dB), calculer la marge de retard positive restante.

#### Critère d'acceptation finale\*

- FB-1 Temps pour atteindre erreur de 2% (rampe uni.)  $\leq 14$  s

\*N.B. Les critères de design et de sécurité sont aussi à considérer lors de l'évaluation finale du design.

#### CONSIGNES SPÉCIFIQUES POUR LE DESIGN DES TÉLESCOPES A ET B

- C-1 Utiliser des compensateurs simples, sans éléments non essentiels (max 2 compensateurs par axe).
- C-2 Fournir et expliquer la performance sur la trajectoire de référence.

Le Dr Lindberg vous explique que les **critères de design** doivent être utilisés dans la conception initiale des compensateurs, laquelle est basée sur les équations. Ce design initial est ensuite **modifié par itération** pour atteindre les **critères de sécurité**. Ce faisant, la performance de la conception initiale peut parfois être altérée de façon négative. Dans ce cas, la conception finale doit au minimum satisfaire les **critères d'acceptation finale** fournis par le client. À ce stade, le concepteur effectue des itérations en modifiant le gain du compensateur et/ou la position des pôles désirés dans le sens qui permet d'atteindre ces critères. Dr. Lindberg affirme qu'il est normal d'effectuer ces ajustements itératifs dont il faut présenter et expliquer la stratégie. Il vous rappelle qu'il est parfois difficile de rencontrer toutes les spécifications du client. Dans ce cas, il est nécessaire d'expliquer au client pourquoi et de lui proposer un compromis acceptable.

Le Dr Lindberg prévoit que l'ajout d'un **filtre coupe-bande** sera peut-être requis pour satisfaire le critère d'atténuation des vibrations de l'arbre flexible, surtout en **azimut**. Il porte votre attention au fait que le client désire **minimiser l'amplification du bruit des capteurs pour le Télescope A** et que le client désire connaître le **retard maximal que le Télescope B pourrait tolérer avant l'instabilité** si une variation de gain de boucle d'un **facteur 5 (14 dB)** était ajoutée au système.

Finalement, Dr. Lindberg vous explique qu'il faudra démontrer au client que les compensateurs proposés rencontrent les spécifications. Pour ce faire, vous devez fournir :

- un tableau de conformité avec les spécifications;
- une liste des non-conformités avec une discussion des raisons et propositions de compromis;
- les réponses temporelles, lieux des racines et diagrammes de Bode pertinents, à l'appui du design;
- les résultats de simulation sur la trajectoire de référence et une explication de la corrélation entre les spécifications du client et les résultats obtenus avec la trajectoire de référence.

## ANNEXE A

### Modèle dynamique des deux télescopes en azimut (AZ)

$$\frac{1.59e09}{s^6 + 1020.51s^5 + 25082.705s^4 + 3102480.725s^3 + 64155612.5s^2 + 8.27e7s}$$

$$\text{numAZ} = [1.59e09]$$

$$\text{denAZ} = [1 \quad 1020.51 \quad 25082.705 \quad 3102480.725 \quad 64155612.5 \quad 82700000 \quad 0]$$

### Modèle dynamique des deux télescopes en élévation (EL)

$$\frac{7.95e09}{s^6 + 1020.51s^5 + 37082.705s^4 + 15346520.725s^3 + 320776412.5s^2 + 4.135e8s}$$

$$\text{numEL} = [7.95e09]$$

$$\text{denEL} = [1 \quad 1020.51 \quad 37082.705 \quad 15346520.725 \quad 320776412.5 \quad 413500000 \quad 0]$$

## 8 GUIDE DE LECTURE

### 8.1 Références essentielles

#### Traduction des spécifications (Rappel)

- Modern Control Engineering (5th edition) K. Ogata: sections 5-2, 5-3, 5-8
- Notes JdeL : Chapitre 7, section 7.1

#### Configuration et type de compensateurs (Rappel)

- Modern Control Engineering (5th edition) K. Ogata: sections 6-5 et 7-10
- Notes JdeL : Chapitre 7, sections 7.2, 7.3, 7.4

#### Compensateurs AvPh (et son cas particulier, le PD)

- Modern Control Engineering (5th edition) K. Ogata: sections 6-6 et 7-11
- Notes JdeL : Chapitre 7, section 7.8

#### Compensateurs RePh (et son cas particulier, le PI)

- Modern Control Engineering (5th edition) K. Ogata: sections 6-7 et 7-12
- Notes JdeL : Chapitre 7, section 7.9

#### Compensateurs AvRePh (et son cas particulier, le PID)

- Modern Control Engineering (5th edition) K. Ogata: sections 6-8 et 7-13
- Notes JdeL : Chapitre 7, section 7.10.1 à 7.10.3

### 8.2 Documents complémentaires

#### Compensateurs AvPh, RePh, AvRePh

- Notes JdeL : Chapitre 7, sections 7.5, 7.6, 7.7

#### Révision analyse de systèmes dynamiques linéaires

- Notes JdeL : Chapitres 1 à 6

## 9 LOGICIELS ET MATÉRIEL

Le laboratoire, le procédural 2 ainsi que la problématique requerront l'utilisation du logiciel MATLAB. Les graphiques à remettre dans le rapport seront tous générés directement à partir de MATLAB.

# 10 PRODUCTIONS À REMETTRE

## 10.1 Solution à la problématique

La solution à la problématique proposée dans cet APP fera l'objet d'une production composée d'un rapport et des scripts MATLAB associés, réalisés en équipe de deux étudiants. **Les documents (rapport et scripts) doivent être remis au plus tard le vendredi de la deuxième semaine à 8h30.** Les retards dans la livraison des documents seront pénalisés de 10%.

### Procédure de dépôt

Le rapport, en format PDF, et les scripts MATLAB doivent être regroupés dans un fichier zip, lequel sera nommé des CIP des deux signataires du rapport, séparés d'un trait d'union (p.ex., abcd1234-efgh5678.zip). Ce fichier sera déposé, selon la procédure en vigueur, dans le répertoire APP5-Ge associé à la session en cours (voir la section « dépôt des travaux » sur usherbrooke.ca/gelecinfo, section intranet).

### Contenu du rapport

Le rapport doit contenir au minimum les éléments suivants :

- o la procédure de conception systématique sous forme de diagramme pour concevoir n'importe quel type de compensateur classique dans le domaine temporel et fréquentiel à partir de spécifications dans le domaine temporel (transitoire et permanent) et dans le domaine fréquentiel (marges de stabilité)
- o le choix des compensateurs et une description de leur conception pour chacun des axes (azimut et élévation) du **Télescope A** : donner les designs initial et final seulement; indiquer quels paramètres ont été modifiés dans les itérations pour atteindre les performances finales
- o le choix des compensateurs et une description de leur conception pour chacun des axes (azimut et élévation) du **Télescope B** : donner les designs initial et final seulement; indiquer quels paramètres ont été modifiés dans les itérations pour atteindre les performances finales
- o les simulations temporelles, les lieux des racines, les diagrammes de Bode pertinents en support aux designs; les zooms de figures et l'utilisation de flèches pour pointer des éléments spécifiques peuvent être utilisés au besoin
- o pour les deux télescopes, un tableau de conformité avec les spécifications incluant les requis, les résultats obtenus et une liste des non-conformités avec explications et proposition de compromis
- o pour les deux télescopes, les résultats de simulation avec la trajectoire de référence et une explication de la corrélation entre les spécifications du client et les résultats obtenus avec la trajectoire.

De plus, il est important de :

- o Inscrire vos noms et vos matricules sur chaque document remis;
- o Bien indiquer à quel télescope chacun des développements est associé.

### Contenu des scripts MATLAB

Les scripts MATLAB seront également remis. Les noms et matricules des auteurs doivent également figurer dans chaque script. Afin d'en faciliter la lecture, il est fortement conseillé de diviser le script en sections bien identifiées (conseil : utilisation de %% pour diviser les sections) et d'ajouter des commentaires. Chaque section devrait débiter par un entête expliquant brièvement le but visé par cette section.

### Modalités d'évaluation de la production

L'évaluation de la solution à la problématique contribue à l'appréciation des éléments de compétence de l'unité. On évalue l'exactitude, la précision, la complétude, la valeur de chaque élément de solution. Il est de la responsabilité de chaque signataire de s'assurer de la qualité de l'ensemble de la production remise, incluant la compréhension de chaque élément de solution. Ces mêmes compétences seront évaluées de façon individuelle lors de l'évaluation sommative.

# 11 ÉVALUATIONS

## 11.1 Productions à remettre

L'évaluation des productions à remettre portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. La pondération des différents éléments est indiquée au tableau ci-dessous. L'évaluation est directement liée aux livrables demandés à la section 10 et le tableau ci-dessous y réfère à l'aide d'une courte description.

*Tableau 11.1 Sommaire de l'évaluation du rapport*

Évaluation	GEL433-1	GEL433-2	GEL433-3	GEL433-4
Procédure de conception systématique	6	8	-	-
Conception Télescope A	7	12	-	6
Conception Télescope B	7	10	-	6
Validation et analyse de conformité	-	-	-	3
<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>15</b>

Quant à la qualité de la communication technique, elle ne sera pas évaluée de façon sommative, mais si votre rapport est fautif sur le plan de la qualité de la communication et de la présentation, il vous sera retourné et vous devrez le reprendre pour être noté.

## 11.2 Évaluation sommative de l'unité

L'évaluation sommative porte sur tous les objectifs d'apprentissage de l'unité. Il s'agit d'un examen théorique avec utilisation permise de MATLAB. Une version électronique des documents suivants sera accessible :

- Modern Control Engineering (5th edition) K. Ogata
- Notes de cours JdeL chapitre 7.

## 11.3 Évaluation finale

L'évaluation finale de l'activité GEL433 portera sur l'ensemble des compétences, lesquelles ont été adressées à travers les 3 APP en lien avec l'asservissement analogique (APP4, APP5, APP6). Cette évaluation individuelle se tiendra à la fin de la session.



## 12 PRATIQUE PROCÉDURALE 1

### But de l'activité

Le but de cette activité est de mettre en pratique les procédures requises pour concevoir des compensateurs selon des contraintes données. Spécifiquement, cette activité traitera de la conception de compensateur par la méthode du lieu des racines et la méthode analytique.

### 12.1 Lectures préparatoires

Les lectures suivantes doivent être complétées préalablement à cette activité:

- Conception de l'AvPh (analytique et lieu des racines) : Ogata, section 6-6
- Conception d'un PD (analytique et lieu des racines): Notes JdeL, section 7.8
- Conception d'un RePh (analytique et lieu des racines): Ogata, section 6-7
- Conception d'un PI (analytique et lieu des racines) : Notes JdeL, section 7.9

### 12.2 Exercices

#### E.1 Traduction des spécifications

À partir des spécifications suivantes :

- erreur à l'échelon de 0.1 ;
- dépassement maximum de 20% ;
- temps de stabilisation à 2% de 4 secondes ;
- temps de montée (10% à 90%) de 1.0 seconde ;
- temps de montée (0% à 100%) de 1.2 seconde ;
- temps du premier pic de 1.5 seconde.

et en supposant un système d'ordre 2 standard, calculer :

- la valeur désirée du coefficient d'erreur statique  $K_{pos}$  ( $K_{pos}^*$ ) ;
- les pôles désirés en boucle fermée ( $p^*$ ) ;
- la marge de phase désirée ( $PM^*$ ) ;
- la fréquence de traverse en gain désirée ( $\omega_g^*$ ) ;
- la bande passante en boucle fermée désirée ( $BW^*$ ) ;

**NOTE** : Quand il y a plusieurs spécifications sur la performance en régime transitoire, on calcule d'abord le facteur d'amortissement et ensuite la fréquence naturelle qui satisfait tous les autres critères.

#### E.2 Compensateurs AvPh et PD avec le lieu des racines

Pour le système  $G(s)$  ci-dessous, on veut obtenir un temps de stabilisation (2%) égal ou inférieur à 5 secondes et un dépassement maximum égal ou inférieur à 20 % :

$$G(s) = \frac{10}{s^2}$$

- Concevoir un compensateur de type AvPh pour rencontrer ces spécifications.
- Concevoir aussi un compensateur de type PD qui obtient la même performance.

Pour les deux compensateurs :

- calculer l'erreur en régime permanent pour une entrée rampe unitaire,
- calculer l'erreur en régime permanent pour une entrée parabole unitaire,
- calculer la marge de phase et la bande passante du système asservi (avec les équations analytiques).

#### **NOTE** : Conception d'un AvPh et d'un PD dans le domaine temporel

Dans ce type de conception, il faut se rappeler que la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO), incluant le compensateur, doit rencontrer les conditions de phase et d'amplitude aux pôles désirés.



### E.3 Compensateurs RePh et PI avec lieu des racines

**Préambule :** Le RePh et le PI améliorent l'erreur en régime permanent et sont habituellement conçus après avoir fait un PD, un AvPh ou un P qui ont réglé le régime transitoire. Quand les spécifications imposent le changement de classe, il y a au moins 3 façons de concevoir le PI (Section 7.9.2). Le problème 3 en traite deux; le problème 4 traite le troisième. Dans ce dernier cas, le PI permet de traiter le régime transitoire et le régime permanent à la fois.

Lorsqu'une commande de type proportionnel  $K_p = 1$  avec retour unitaire est appliquée au système  $G(s)$  ci-dessous, les pôles en boucle fermée donnent une réponse temporelle transitoire satisfaisante. Cependant l'erreur à une entrée échelon unitaire est trop grande. En cascade au compensateur de type P, calculer :

- un compensateur retard de phase (version simple) pour réduire l'erreur en RP à 0.2
- un compensateur PI (version simple) pour en changer la classe et avoir une erreur à l'échelon nulle
- un compensateur PI pour avoir une erreur à une rampe unitaire de 2.0.

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)}$$

### E.4 Compensateur PI sous forme d'un PD avec lieu des racines

Pour le système ci-dessous, on conçoit un compensateur PI dans un asservissement à retour unitaire pour obtenir les performances suivantes :

- dépassement maximum de 10.0 %
- temps de stabilisation (2%) de 4.0 s
- erreur en régime permanent nulle pour une entrée échelon unitaire.

$$G(s) = \frac{2}{2s^2 + 5s + 2} = \frac{1}{(s+2)(s+0.5)}$$

- Placer le zéro du PI pour satisfaire ces critères en régime transitoire.
- Calculer l'erreur en régime permanent du système asservi à une entrée rampe unitaire.

### E.5 Conception analytique

Les fonctions de transfert du schéma d'asservissement de la figure sont :

$$G(s) = \frac{1}{s(10s+5)} \quad H(s) = 1$$

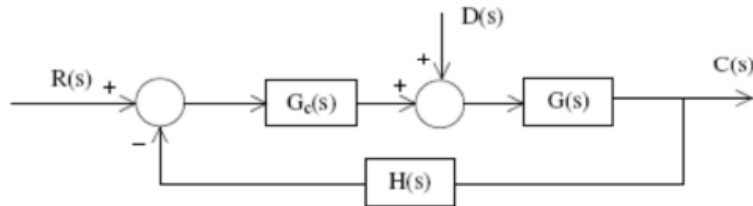


Fig. 1 : Schéma de principe d'une compensation cascade

où  $G_c(s)$  est le compensateur. On veut satisfaire les spécifications suivantes :

- erreur à une perturbation de type échelon inférieure à 0.1 ;
- facteur d'amortissement optimal de  $\sqrt{2}/2$ .

Déterminer si une commande à action proportionnelle  $G_c = K_p$  peut satisfaire ces spécifications. Sinon, calculer les paramètres d'un compensateur PD ( $G_c = K_p + K_D s$ ) pour les satisfaire.

## 13 PRATIQUE LABORATOIRE 1

Pour cette activité, on collabore en équipe de 2.

### But de l'activité

Le but de cette activité est d'utiliser le logiciel MATLAB pour calculer et optimiser les paramètres d'un asservissement. Veuillez préparer ces exercices avant d'arriver au laboratoire afin de bénéficier au maximum du support du professeur. De plus, développer votre code pour qu'il soit générique, flexible et réutilisable pour la problématique et dans le projet de session.

### 13.1 Lectures préparatoires

Les lectures suivantes doivent être complétées préalablement à cette activité:

- Conception de l'AvPh (lieu de Bode) : Ogata, section 7-11
- Conception d'un PD (lieu de Bode): Notes JdeL, section 7.8
- Conception d'un RePh (lieu de Bode): Ogata, section 7-12
- Conception d'un PI (lieu de Bode) : Notes JdeL, section 7.9

### 13.2 Informations utiles en lien avec MATLAB

#### 13.2.1 Fonctions MATLAB utiles pour le laboratoire

Voici la liste non exhaustive des fonctions qui vous seront utiles pour cette unité. Assurez-vous de connaître à quoi elles servent et comment s'en servir avant le laboratoire. Utiliser l'aide de MATLAB.

- |             |            |            |
|-------------|------------|------------|
| ▪ abs       | ▪ pade     | ▪ series   |
| ▪ angle     | ▪ pole     | ▪ sisotool |
| ▪ bandwidth | ▪ poly     | ▪ ss       |
| ▪ bode      | ▪ polyval  | ▪ step     |
| ▪ conv      | ▪ pzmap    | ▪ stepinfo |
| ▪ damp      | ▪ rlocfind | ▪ tf       |
| ▪ dcgain    | ▪ rlocus   | ▪ zero     |
| ▪ feedback  | ▪ residue  | ▪ zpk      |
| ▪ margin    | ▪ roots    |            |

### 13.2.2 Recommandation pour la présentation des résultats graphiques avec MATLAB :

- **Lieux des racines** : Il est fortement recommandé, quand cela est pertinent, de représenter des lieux de racines superposés sur le même graphique de la façon suivante :
  - **rlocus** avec la FTBO originale, non compensée
  - **plot** des pôles désirés **pdes** avec le symbole du pentagramme : `>> plot(pdes, 'p')`
  - **rlocus** avec la FTBO compensée
  - **plot** des pôles obtenus avec le symbole du carré : `>> plot(p, 's')`
  - s'il y a plusieurs compensateurs en cascade, utiliser un ou deux graphiques séparés, selon la complexité des lieux de racines et votre jugementCette approche permet de rapidement voir si les spécifications sont rencontrées (si le design est réussi, les carrés devraient normalement encadrer les pentagrammes).
- **Diagrammes de Bode**: Il est fortement recommandé, quand cela est pertinent, de représenter des diagrammes de Bode superposés sur le même graphique de la façon suivante :
  - **margin** avec la FTBO originale, non compensée
  - **margin** avec la FTBO multipliée par le gain requis pour rencontrer la spécification en gain
  - **margin** avec la FTBO compensée (incluant le gain) pour identifier les marges (GM et PM)
  - s'il y a plusieurs compensateurs en cascade, utiliser un ou deux graphiques séparés, selon la complexité des diagrammes de Bode et votre jugementCette approche permet de rapidement voir si les spécifications sont rencontrées.
- **Réponse temporelle**: Il est fortement recommandé, quand cela est pertinent, de représenter des réponses à des entrées échelon superposées selon les principes ci-dessus. Pour les entrées rampe et parabole, le graphique de l'erreur est plus utile que le graphique de la réponse elle-même.

## 13.3 Exercices préparatoires

### P.1 Validation des compensateurs AvPh et PD

Valider sur MATLAB l'atteinte des critères de performance de l'exercice E.2 (procédural 1).

### P.2 Validation des compensateurs RePh et PI

Valider sur MATLAB l'atteinte des critères de performance des exercices E.3 et E.4 (procédural 1).

## 13.4 Exercices

### E.1 Conception de AvPh, RePh, PD et PI avec le lieu des racines

On asservit avec une rétroaction de gain unitaire un système dont la fonction de transfert en boucle ouverte est donnée ci-dessous. Les critères de performance dans le domaine temporel sont les suivantes:

- dépassement maximum de 6 %
- temps de montée (10% à 90%) de 0.004 s
- temps du premier pic à 0.008 s
- temps de stabilisation à 2 % de 0.010 s
- erreur à la rampe plus petite que 0.00005.

$$G(s) = \frac{4500}{s(s + 361.2)}$$

Pour ce faire :

- Traduire les 4 premières spécifications en termes de pôles désirés.
- Concevoir un compensateur AvPh en cascade  $G_a(s) = K_a \frac{(s-z_a)}{(s-p_a)}$ ,  $|z_a| < |p_a|$  qui placent le lieu des racines à ces pôles désirés. Utiliser la méthode de la bissectrice (Ogata p.315, JdeL section 7.5.2).
- En partant de l'AvPh en (b), faire la conception cette fois d'un RePh  $G_r(s) = K_r \frac{(s-z_r)}{(s-p_r)}$ ,  $|z_r| > |p_r|$  en cascade à l'AvPh pour rencontrer la performance en régime permanent.
- Au lieu d'un RePh en (c), on aurait pu simplement augmenter le gain  $K_a$  de l'AvPh (augmentant ainsi le  $K_{vel}$ ) pour atteindre la performance en régime permanent. Expliquer l'impact de cette approche sur la performance du système et pourquoi ce n'est pas un choix judicieux.
- À la place de l'AvPh en (b) faire un PD cette fois,  $G_c(s) = K_p + K_D s$  qui rencontre les mêmes spécifications en régime transitoire. Commenter les différences.
- À la place du RePh en (c) faire un PI en cascade au PD ci-dessus (créant ainsi un PID) qui rencontre les mêmes spécifications en régime transitoire et permanent. Commenter les différences.

### E.2 Conception d'un PID avec le lieu des racines

Un asservissement à retour unitaire a la fonction de transfert en boucle ouverte ci-contre :

$$G(s) = \frac{s + 1}{(s^2 + 6s + 10)(s + 7)}$$

Les performances désirées sont une erreur en régime permanent nulle pour une entrée échelon, un temps de stabilisation (à 2%) inférieur à 0.10 seconde et un dépassement maximum inférieur à 5%.

Plusieurs designs sont possibles. **Faire les deux premiers** (les deux autres sont pour exercices personnels ... pas à faire en classe). **NOTE :** *Quand l'avance de phase requise d'un système dépasse 70-90 deg, on doit faire un double avance-de-phase (ou PD) en cascade avec la moitié de l'avance requise fournie par chacun.*

- Ajouter un intégrateur pur à la FTBO pour changer la classe suivi d'un double PD pour satisfaire les critères de performance en régime transitoire.
- Faire un double PD pour satisfaire les critères de performance en régime transitoire suivi d'un PI qui change la classe et qui maintient la performance en régime transitoire.

Pour exercice personnel (on reprend les 2 cas ci-dessus et on change le PD théorique pour un AvPh réalisable):

- Ajouter un intégrateur pur à la FTBO suivi d'un double AvPh.
- Faire un double AvPh suivi d'un PI.

### E.3 Conception de AvPh et RePh avec le diagramme de Bode

Le système en boucle ouverte ci-dessous est asservi avec une rétroaction de gain unitaire. Les critères de performance à atteindre sont :

- marge de phase PM = 50 deg.
- bande passante en boucle fermée BW = 5.2 rad/s
- erreur en régime permanent à une rampe  $e_{RP} = 0.005$

FTBO

$$G(s) = \frac{s + 4}{s(s^2 + 8s + 3)}$$

Plusieurs cas de designs de compensateurs en cascade sont possibles en utilisant le diagramme de Bode. Dans le problème (a) ci-dessous, on utilise un AvPh suivi d'un RePh avec les Méthodes 1. Cette

approche est identique à la conception dans le lieu des racines : on règle le régime transitoire en premier avec un AvPh (ou un PD) et ensuite on règle le régime permanent avec un RePh (ou un PI).

- (a) Faire la conception d'un AvPh qui satisfait les critères PM et BW (avec la Méthode 1, Notes JdeL section 7.5.3) suivi d'un RePh en cascade (avec la Méthode 1, Notes JdeL section 7.6.3) qui maintient la BW (donc  $\omega_g$ ) pour satisfaire le critère d'erreur en RP.

Dans les problèmes (b) et (c) ci-dessous, on utilise les Méthodes 2 pour régler avec un seul compensateur (AvPh ou RePh) le régime transitoire (PM) et le régime permanent ( $e_{RP}$ ) en même temps (comme on l'a fait au Problème 4 avec le lieu des racines). Dans ces cas, le critère de BW n'est pas applicable.

- (b) Faire la conception d'un AvPh qui satisfait les critères PM et erreur en RP (avec la Méthode 2, JdeL section 7.5.4) sans prendre en considération le critère de BW.  
 (c) Faire la conception d'un RePh qui satisfait les critères PM et erreur en RP (avec la Méthode 2, JdeL section 7.6.4) sans prendre en considération le critère de BW.  
 Comparer la BW de chacun des designs et conclure sur les caractéristiques de chacune des approches.

Une autre solution possible qui ne prend pas en considération le critère de BW est la suivante (**pour exercice personnel..., pas à faire en classe**). On fait un AvPh pur sans amplification initiale (les Méthodes 1 et 2 deviennent ainsi identiques) pour obtenir la PM en maintenant  $\omega_g$  et on ajoute un RePh pour atteindre  $e_{RP}$ .

- (d) **Optionnel** : conception d'un AvPh qui rencontre le critère PM en maintenant la même fréquence de traverse en gain originale  $\omega_g$  (avec la Méthode 1, JdeL section 7.5.3) suivie d'un RePh pour satisfaire le critère d'erreur en RP (sans satisfaire un critère de BW).

#### E.4 Conception P, PI et PD avec le diagramme de Bode

Le système en boucle ouverte suivant est asservi avec rétroaction unitaire et compensateur en cascade.

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+4)}$$

##### Correcteur P

- (a) Calculer la marge de phase PM nécessaire pour obtenir un dépassement maximum  $M_p$  de 12%.  
 (b) Calculer avec Bode le gain  $K$  du correcteur P qui permet d'obtenir la marge de phase calculée en (a).  
 (c) Calculer la nouvelle erreur en régime permanent en réponse à une rampe unitaire.

Utiliser cette fonction de transfert  $KG(s)$ , incluant le gain  $K$ , dans toutes les étapes suivantes.

##### Compensateur PI

- (d) On désire changer la classe du système pour avoir une erreur nulle à une entrée rampe. Concevoir un compensateur PI de la forme  $G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} = K_p \left( \frac{s - z_i}{s} \right)$  de trois façons différentes.  
 Cas A: On désire maintenir la même marge de phase à la même fréquence de traverse en gain obtenue en (a) pour  $KG(s)$ . Calculer le PI classique en cascade à  $KG(s)$  qui rencontre cette exigence. Valider sur MATLAB.  
 Cas B: Refaire le design du Cas A mais en utilisant l'approche où on conçoit un double PD à la fonction de transfert  $KG(s)/s$ . Valider sur MATLAB.

Cas C: On désire une erreur en régime permanent de 30 en réponse à une entrée parabolique unitaire. Valider sur MATLAB. Le résultat ressemblera au Cas A.

- (e) **Optionnel**: En maintenant le  $K_p$  fixe du Cas A dans  $K_p \left( \frac{s-z_i}{s} \right)$ , déplacer le zéro du compensateur d'un facteur  $fac = [1 \ 2 \ 6 \ 10 \ 15]$  de la fréquence de traverse en gain  $\omega_g$  (zéro à  $z_i = -\omega_g/fac$ ) et noter les effets sur la marge de phase, la fréquence de traverse en gain et la réponse temporelle. *On voit ainsi la pertinence de la règle de mettre le zéro le plus loin possible de la fréquence de traverse en gain  $\omega_g$ .*

#### Compensateur PD

*On veut améliorer le régime transitoire de  $KG(s)$  en augmentant cette fois la bande passante  $BW$ .*

- (f) À partir de  $KG(s)$  obtenu en (b) ci-dessus, calculer la fréquence de traverse en gain  $\omega_g$  nécessaire à obtenir une bande passante **BW** de **2.3 rad/s** en conservant la même marge de phase (et donc  $\zeta$ ) qu'en (b). Cela devrait donner un temps du premier pic d'environ 2 secondes.
- (g) Concevoir un compensateur PD avec la fonction de transfert  $G_c(s) = K_p + K_d s$  pour satisfaire (f).
- (h) **Optionnel** (*pas à faire mais sera démontré en classe*) : En maintenant la fréquence de traverse en gain  $\omega_g$  fixée à la valeur en (f), déplacer le zéro du compensateur PD par un facteur  $fac = [0.6 \ 0.8 \ 1.0 \ 1.2 \ 1.4]$  autour de sa position et noter les effets sur la marge de phase, la fréquence de traverse en gain, le dépassement maximum.

## 14 PRATIQUE PROCÉDURAL 2 (en laboratoire)

### Buts de l'activité

Le but de cette activité est d'analyser le modèle du système et les spécifications fournis de manière à choisir adéquatement le compensateur requis et la technique de conception.

### 14.1 Exercices

#### E.1 Système avec retard

Pour le système dynamique  $G(s)$  ci-dessous, une rétroaction unitaire avec une commande proportionnelle de gain unitaire et un capteur parfait donnait les performances acceptables.

$$G(s) = \frac{5(s + 10)}{s^2 + 2s + 2} \quad G_{cap}(s) = e^{-Ts}$$

Avec l'ajout d'un capteur de fonction de transfert  $G_{cap}(s)$  en cascade au système dynamique  $G(s)$ , où  $G_{cap}(s)$  est un retard pur de  $T = 0.2$  seconde causé par le temps d'acquisition du capteur, les performances se sont dégradées. Concevoir un compensateur qui permet:

- d'obtenir la même performance initiale (mêmes pôles dominants) qu'avec le capteur idéal
  - obtenir une erreur égale ou plus petite que 0.02 en régime permanent lorsque l'entrée est un échelon.
- Utiliser l'approximation de Padé d'ordre approprié pour obtenir la fonction de transfert de  $G_{cap}(s)$ .

#### E.2 Conception avec Bode : AvPh ou RePh avec Méthode 2

Pour le système en boucle ouverte ci-contre :

$$G(s) = \frac{s + 2}{s(s^2 + 2s + 3)}$$

calculer deux types de compensateurs différents, un AvPh et un RePh, qui permettent d'obtenir une erreur en régime permanent pour une entrée rampe de 0.1 et une marge de phase d'au moins 40 degrés.

*Ce problème est identique aux problèmes E.3 (b) et (c) du laboratoire (section 14.4). C'est un exercice additionnel avec la Méthode 2.*

### 14.2 Exercices supplémentaires

#### S.1 Conception avec Bode

Un asservissement à retour unitaire a la fonction de transfert en boucle ouverte ci-contre:

$$G(s) = \frac{72}{(s + 1)(s + 3)^2}$$

Calculer un compensateur pour que la marge de phase soit d'au moins 40 degrés et l'erreur en régime permanent pour une entrée échelon soit de 0.1 en conservant la même fréquence de traverse en gain  $\omega_g$  que le système original (non compensé).

*N.B. Ce problème est identique au problème optionnel E.3 (d) du laboratoire (section 14.4).*

## 15 VALIDATION AU LABORATOIRE

### Buts de l'activité

Le but de cette activité est de valider la solution au problème de l'APP que vous avez développée et de renforcer les concepts fondamentaux sur la conception des systèmes asservis à l'aide de MATLAB. Vous devrez avoir préparé la solution à la problématique avant la séance.

## 16 SECONDE RENCONTRE DE TUTORAT : VALIDATION DES CONNAISSANCES

### Buts de l'activité

Cette activité vise la validation des connaissances, le bilan de groupe, le travail personnel de synthèse et d'études correctives.

Spécifiquement, ce tutorat vise à vous permettre de comprendre les relations existantes entre :

- le choix du type de compensateur et la configuration de compensation pour satisfaire les spécifications de conception
- les actions des compensateurs P, PD, PI, avance et retard de phase et les réponses temporelles et fréquentielles d'un système.

## 17 ÉVALUATION FORMATIVE

### Buts de l'activité

Cette activité donne l'occasion aux étudiants de valider et de compléter l'apprentissage des compétences visée par cet APP.

### Informations pratiques

L'examen formatif ainsi que son corrigé seront déposés sur la page web de l'APP, le mercredi de la deuxième semaine.



## LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Ogata, K. Modern Control Engineering. 5<sup>e</sup> ed. Prentice Hall, 2010. 894p.
- [2] de Lafontaine, J. Techniques de compensation. Université de Sherbrooke, 2019.