

Session S5

Unité APP 5e

Conception d'asservissements

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

Automne 2024

Note : En vue d'alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les deux genres.

Document Guide_Etudiant_APP5e_ETE2013_ver2.docx (2013)

Renouvellement de la problématique (elle n'est plus basée sur la grue)

Rédigée par Jean de Lafontaine 25 juin 2013 (ver 3)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 20 juin 2014 Guide_Etudiant_APP5e_ETE2014.docx (ver 4)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 09 mars 2016 Guide_Etudiant_APP5e_HIV2016.docx (ver 5)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 04 mars 2017 Guide_Etudiant_APP5e_HIV2017.docx (ver 6)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 03 mars 2020 Guide_Etudiant_APP5e_HIV2020.docx (ver 7)

avec contributions de Karina Lebel version AUT2019 (améliorations et ajout de l'évaluation des qualités)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 12 mars 2021 Guide_Etudiant_APP5e_HIV2021.docx (ver 8)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 05 novembre 2021 Guide_Etudiant_APP5e_AUT2021.docx (ver 9)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 10 mars 2022 Guide_Etudiant_APP5e_AUT2021.docx (ver 10)

Mis à jour par Jean de Lafontaine 02 octobre 2022 Guide_Etudiant_APP5e_AUT2021.docx (ver 11) et légèrement modifié par Maude Blondin le 3 novembre 2022, le 11 octobre 2023 et 28 octobre 2024.

1. ÉNONCÉ DU PROBLÈME : Détecter, suivre et identifier des objets volants

Votre cousin propriétaire de EstampBeauce Inc. (voir APP3) a gagné un lucratif contrat de télescopes avec la NASA. Ayant ainsi développé une expertise reconnue dans la fourniture de systèmes 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. Le client de votre cousin 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 fréquentiel. Pour minimiser les coûts, votre cousin insiste à utiliser le même matériel structural et électromécanique pour les deux télescopes; seul le logiciel de commande sera adapté à chaque télescope selon les spécifications de performance. Vu la complexité de ces demandes, vous faites appel à un mentor-devenu-collègue à la société Dom Barbier (voir APP4), 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, d'erreur en régime permanent, de performance en régime transitoire, de réponse fréquentielle 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, anticipation – *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) si les spécifications ne sont pas satisfaites, retourner au point (d) et itérer sur les paramètres (ou bien retourner à (c) et choisir une autre architecture);
- (h) éventuellement, discuter avec le client d'une relaxation des spécifications impossibles ou coûteuses 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 des spécifications, une procédure de conception systématique dans le domaine temporel et fréquentiel des compensateurs avance de phase et retard de phase. 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 conception mécanique qui font que l'arbre de transmission entre le moteur et le télescope est plus long et 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 correspondance entre la trajectoire réelle obtenue et les spécifications exigées.

Télescope A

Critères de conception

A-1 Minimiser l'amplification du bruit à hautes fréquences.

A-2 Réponse à un échelon unitaire :

• dépassement maximum :	25%	azimut et élévation
• temps de stabilisation (2%) :	1.00 s	azimut et élévation
• temps de montée (10% à 90%) :	≤ 0.18 s	azimut et élévation
• erreur en régime permanent :	0.00	azimut et élévation

A-3 Réponse à une rampe unitaire :

• erreur en régime permanent :	0.03 deg. en azimut	0.00 deg. en élévation
--------------------------------	---------------------	------------------------

A-4 Réponse à une parabole unitaire :

• erreur en régime permanent :	S/O en azimut	0.08 deg. en élévation
--------------------------------	---------------	------------------------

Critères de sécurité

A-5 Marges de stabilité :

• marge de gain :	≥ 10 dB en azimut	≥ 15 dB en élévation
• marge de retard :	≥ 0.09 s en azimut	≥ 0.10 s en élévation

A-6 Atténuation de vibration en boucle fermée : ≤ -15 dB azimut et élévation

Critères d'acceptation finale

Note : Les critères de conception mentionnés ci-dessus s'appliquent pour l'acceptation finale, sauf pour ceux mentionnés ci-dessous qui sont relâchés ou rajoutés pour l'acceptation finale.

A-7 Critères de sécurité maintenus

A-8 Réponse à un échelon unitaire :

• dépassement maximum acceptable :	$\leq 30\%$ en azimut	$\leq 35\%$ en élévation
• temps de stabilisation acceptable (2%) :	≤ 1.20 s	azimut et élévation
• temps de montée acceptable (0% à 100%) :	≤ 0.25 s	azimut et élévation

A-9 Réponse à une rampe unitaire :

• temps pour atteindre 2% de l'erreur :	≤ 8 s en azimut	S/O en élévation
---	----------------------	------------------

A-10 Réponse à une parabole unitaire :

• temps pour atteindre 2% de l'erreur :	S/O en azimut	≤ 3 s en élévation
---	---------------	-------------------------

Télescope B

Critères de conception

B-1 Bande passante (BW) :	≥ 10 rad/s	azimut et élévation
B-2 Marge de phase (PM) :	$50 \text{ deg} \pm 1 \text{ deg}$	azimut et élévation
B-3 Réponse à une rampe unitaire :		
• erreur en régime permanent :	$\leq 0.005 \text{ deg.}$	azimut et élévation
• temps pour atteindre 2% de l'erreur :	$\leq 8 \text{ s}$	azimut et élévation

Critères de sécurité

B-4 Marge de gain :	$\geq +15 \text{ dB}$	azimut et élévation
B-5 Atténuation de vibration en boucle fermée :	$\leq -15 \text{ dB}$	azimut et élévation
B-6 Pour une augmentation de gain d'un facteur 5 (14 dB), calculer la marge de retard positive restante.		

Télescopes A et B

- C-1 Utiliser des compensateurs simples, sans éléments ou filtres 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 conception** sont utilisés en premier, à partir d'équations de conception, pour arriver à **compensateurs de départ**. La performance de ces compensateurs de départ sera présentée et comparée aux critères de conception. Ces compensateurs de départ seront ensuite modifiés par itérations 'intelligentes' pour atteindre les **critères de sécurité**. Ce faisant, la performance de la conception de départ peut parfois être altérée de façon négative. Dans ce cas, la conception des **compensateurs finaux** doit rencontrer les **critères d'acceptation finale** fournis par le client. À ce stade, le concepteur effectue des itérations en modifiant les différents gains, facteurs et marges disponibles dans le sens qui permet d'atteindre ces critères. Dr. Lindberg demande d'effectuer ces ajustements itératifs et d'expliquer les étapes de la stratégie adoptée. 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 en cascade au système en boucle ouverte sera peut-être requis pour atténuer les vibrations de l'arbre flexible en boucle fermée. 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 devrez remplir le gabarit disponible sur le site de session.

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)

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

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

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

2. Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de ce problème

Connaissances déclaratives : QUOI

Conception et validation de compensateurs avec le lieu des racines

- Techniques de conception de compensateurs avec le lieu des racines
- Conception de compensateurs à action proportionnelle, dérivée, intégrale, avance de phase et retard de phase avec le lieu des racines à partir de spécifications descriptives
- Compensateurs en cascade et double compensation
- Vérification et validation de la performance du compensateur à l'aide d'un logiciel de CAO (MATLAB)

Conception et validation de compensateurs avec le diagramme de Bode

- Techniques de conception de compensateurs avec le diagramme de Bode
- Conception de compensateurs à action proportionnelle, dérivée, intégrale, avance de phase et retard de phase avec le diagramme de Bode à partir de spécifications descriptives
- Compensateurs en cascade et double compensation
- Vérification et validation de la performance du compensateur à l'aide d'un logiciel de CAO (MATLAB)

Connaissances procédurales : COMMENT

- Formuler, interpréter et utiliser les critères de performance d'un asservissement dans le régime transitoire, dans le régime permanent et en termes de marge de stabilité
- Déterminer la structure d'un asservissement pour satisfaire les spécifications de conception
- Déterminer le type de compensateur requis pour satisfaire les spécifications de conception
- Concevoir des compensateurs à action proportionnelle, dérivée, intégrale, avance de phase et retard de phase à partir de spécifications dans le régime transitoire, dans le régime permanent et en termes de marges de stabilité
- Utiliser un logiciel CAO (MATLAB) pour la conception, la simulation, la vérification et la validation d'un système asservi linéaire continu

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.

3. Références

La référence essentielle à consulter est :

- Chapitre 7, sections 7.1 à 7.10.3 dans les Notes JdeL (les PD et PI ne sont pas couverts dans Ogata)

La référence complémentaire à consulter est :

- Modern Control Engineering (5th edition) K. Ogata, 6-5 à 6-7, 7-10 à 7-12

4. Sommaire des activités

Dans le cadre de cette unité d'APP, afin d'assurer un apprentissage réussi des compétences visées, incluant la recherche documentaire, l'analyse, la synthèse et la rédaction, **l'usage des IAG n'est pas permis pour toutes les activités de formation et d'évaluation. L'utilisation des IAG lors des évaluations sommatives et finales n'est pas permise.**

Lectures dans Notes JdeL

- Sections 7.1 à 7.4 (rappel de concepts déjà vus)
- Sections 7.5 à 7.7 (AvPh, RePh avec lieu des racines et diagrammes de Bode)
- Sections 7.8 à 7.10.3 (PD, PI et PID avec lieu des racines et diagrammes de Bode)

Lectures dans Ogata

- Sections 6-5 à 6-7 inclusivement sur la conception avec le lieu des racines
- Sections 7-10 à 7-12 inclusivement sur la conception avec la méthode fréquentielle

Tableau 1 : Parallèles entre les deux références

Théorie	Sections	
	Ogata	JdeL
Traduction des spécifications (Rappel)	5-2, 5-3 et 5-8	7.1
Configuration et type de compensateurs	6-5 et 7-10	7.2, 7.3, 7.4
Avance de phase	6-6 et 7-11	7.5
Retard de phase	6-7 et 7-12	7.6
Avance retard de phase	6-8 et 7-13	7.7
PD	-	7.8
PI	-	7.9
PID	-	7.10.1 à 7.10.3

Cette unité est une introduction aux techniques de conception des asservissements. Il y a relativement peu de nouvelles connaissances à acquérir. L'accent sera plutôt mis sur les procédures de conception. Les laboratoires feront appel au logiciel MATLAB.

Pour le **Procédural**, il faut avoir lu sur la conception de l'AvPh, PD, RePh et PI avec le **lieu des racines**. Pour le **Laboratoire**, il faut aussi avoir lu sur la conception de l'AvPh, PD, RePh et PI avec **Bode**.

Activités de la semaine 1 :

- 1^{re} rencontre de tutorat
- Étude personnelle et exercices : étude des sujets issus des objectifs d'étude du tutorat
- Formation à la pratique procédurale : conception avec le **lieu des racines** et méthode analytique
- Formation à la pratique en laboratoire 1 : exercices MATLAB avec **lieu des racines** et **Bode**
- Formation à la pratique en laboratoire 2 : conception d'asservissements sur MATLAB.

Activités de la semaine 2 :

- Étude personnelle et exercices : sujets issus des objectifs d'étude du tutorat
- Période de validation pratique (non évaluée) est une période de travail libre pour répondre aux questions sur la problématique

- 2ième rencontre de tutorat : validation des connaissances acquises
- Remise de la solution et des fichiers MATLAB de la solution
- Évaluation formative
- Évaluation sommative.

5. Compréhension des concepts

Pour le deuxième tutorat, 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.

6. Formation à la pratique procédurale

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.

Problème 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 :

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

NOTES :

- On utilise la convention qu'un astérisque adjoint à une variable indique une valeur désirée.
- Quand il y a plusieurs spécifications sur la performance en régime transitoire, on calcule en premier le facteur d'amortissement et ensuite la fréquence naturelle qui rencontre tous les autres critères.

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.

Problème 2 : Compensateurs AvPh et PD avec 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 % :

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

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

Pour les deux compensateurs :

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

Conception d'un RePh et d'un PI dans le domaine temporel.

Le RePh et le PI améliorent l'erreur en régime permanent et sont habituellement conçus après avoir réglé le régime transitoire avec un PD, un AvPh ou un P. 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.

Problème 3 : Compensateurs RePh et PI avec lieu des racines (Sections 7.6.2, 7.9.2)

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.

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

On considère que le compensateur P a réglé le régime transitoire. Cependant l'erreur à une entrée échelon unitaire est trop grande. En cascade au compensateur de type P, calculer :

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

Problème 4 : Conception analytique

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

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

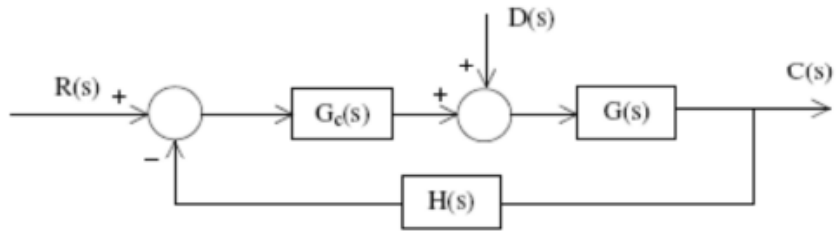


Fig. 1 : Schéma de principe d'une compensation cascade

où $G_c(s)$ est le compensateur et $D(s)$ est une perturbation. 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.

7. Formation à la pratique en laboratoire

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.

Listes des 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. Voir aussi le Guide MATLAB.

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

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(real(pdes), imag(pdes), 'p')**
 - **rlocus** avec la FTBO compensée
 - **calcul des pôles obtenus** : **pol = rlocus(FTBOcompensée, 1)**
 - **plot** des pôles obtenus avec le symbole du carré : **>> plot(real(pol), imag(pol), 's')**
 - s'il y a plusieurs compensateurs en cascade, utiliser un ou deux graphiques séparés, selon la complexité des lieux de racines et votre jugement

Cette approche permet de voir rapidement 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 jugement
 Cette 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 illustrer la performance en régime permanent (surtout pour les entrées rampe et parabole), le graphique de l'erreur est fortement recommandé que le graphique de la réponse elle-même.

Problème 5 : Compensateur PI sous forme d'un PD avec lieu des racines (Section 7.9.2) – la démarche est à faire sur papier et Matlab pour calculer

Pour le système ci-dessous, on conçoit un compensateur PI dans un asservissement à retour unitaire pour atteindre des performances mixtes dans les régimes transitoire et permanent :

- 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 et déterminer le gain du PI pour rencontrer ces critères en régime transitoire.
- Calculer l'erreur en régime permanent du système asservi à une entrée rampe unitaire.
- Répéter (a) et (b) avec un double PD.

Problème 6 : Conception de AvPh, RePh, PD et PI avec le lieu des racines

On asservit avec une rétroaction 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.

FTBO

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

On peut rencontrer ces spécifications avec un **AvPh suivi d'un RePh** ou d'un **PD suivi d'un PI**.

- Traduire les 4 premières spécifications en termes de pôles désirés. (p. 7-4)

Conception AvPh + RePh avec lieu des racines

- (b) 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 (JdeL **section 7.5.2**)
- (c) 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. (**p. 7-48**)
- (d) 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. (**Optionnel**)

Conception PD + PI avec lieu des racines

- (e) 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. (**p. 7-71**)
- (f) 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. À noter qu'en pratique, on ne fait jamais un PI quand les spécifications ne requièrent pas un changement de classe. (**p.7-86**)

Problème 7 : Conception d'un PID avec le lieu des racines (Sections 7.9.2 et 7.10.3)

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. **NOTE :** Quand l'avance de phase requise d'un système dépasse 75 deg, on doit faire un double avance-de-phase (ou PD) en cascade avec la moitié de l'avance requise fournie par chacun.

- (a) Ajouter un intégrateur pur à la FTBO pour changer la classe suivie d'un double PD pour rencontrer les critères de performance en régime transitoire. (**p. 7-71**)
- (b) Faire un double PD pour rencontrer les critères de performance en régime transitoire suivi d'un PI qui change la classe et qui maintient la performance en régime transitoire. (**p. 7-69**)

8. Formation à la pratique procédurale 2 (en laboratoire)

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.

Problème 8 : Conception de AvPh et RePh avec le diagramme de Bode (Méthode 1) (7.5.3, 7.6.3)

Plusieurs types de compensateurs en cascade sont possibles en utilisant le diagramme de Bode. La méthode successive de faire un AvPh (PD) suivi d'un RePh (PI) est appelée **Méthode 1** dans les notes de cours. Dans le présent problème, on utilise cette approche avec les Méthodes 1 de l'AvPh et du RePh. 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).

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

FTBO

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

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

Faire la conception d'un AvPh qui rencontre les critères PM et BW (avec la Méthode 1, **section 7.5.3**) suivi d'un RePh en cascade (avec la Méthode 1, **section 7.6.3**), qui maintient la BW et donc ω_g , pour rencontrer le critère d'erreur en RP. On veut maintenir ω_g (qui dépend de ζ et ω_n) et PM (qui dépend de ζ) déjà obtenus avec l'AvPh tout comme, avec le lieu des racines, on voulait conserver ζ et ω_n .

Problème 9 : Compensateurs 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

- Calculer la marge de phase PM nécessaire pour obtenir un dépassement maximum M_p de 12%.
- Calculer avec Bode le gain K du correcteur P qui permet d'obtenir la marge de phase calculée en (a).
- 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 (Section 7.9.3 des notes de cours)

- 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 en cascade à $KG(s)$ qui rencontre cette exigence. Valider sur MATLAB. (p. 7-91)

- Cas B: On désire maintenir la même marge de phase à la même fréquence de traverse en gain obtenue en (a) pour $KG(s)$ mais en utilisant l'approche où on conçoit un double PD à la fonction de transfert $KG(s)/s$. Valider sur MATLAB. (p.7-74)
- 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. (p. 7-90 à 7-94)

- (e) 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 ω_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 ω_g .* (Optionnel)

Problème 10: 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 causée par le temps d'acquisition du capteur, les performances se sont dégradées. Utiliser l'approximation de Padé d'ordre approprié pour obtenir la fonction de transfert de $G_{cap}(s)$.

% L'approximation de Pade d'ordre cinq est appropriée

```
Pordre = 5;
[num_H, den_H] = pade(Tpur, Pordre);
```

% Pour obtenir le numérateur et dénominateur d'une fonction de transfert SYS, vous pouvez utiliser :

```
[NUM, DEN] = tfdata(SYS)
```

Concevoir un compensateur AvPh qui permet:

- d'obtenir la même performance initiale (mêmes pôles dominants) qu'avec le capteur idéal (utiliser la méthode de la bissectrice – **début p.7-21**)

Concevoir un compensateur RePh qui permet :

- d'obtenir une erreur égale ou plus petite que 0.02 en régime permanent lorsque l'entrée est un échelon. (Utiliser la méthode de conception du RePh par le lieu des racines – **début p. 7-48**)

9. Seconde rencontre de tutorat : validation des connaissances

Validation des connaissances, bilan de groupe, travail personnel de synthèse et d'études correctives.

10. Résolution de la problématique

La problématique se résout en équipe de deux.

11. Consignes pour les documents de la solution à la problématique

Remettre **un seul** fichier PDF contenant le gabarit et le script Matlab en Annexe dans le devoir créé dans l'équipe Teams de l'APP5GE qui est nommé FICHER PDF – Rapport de la problématique. Nommez votre fichier PDF : APP5-E00 où E00 est votre numéro d'équipe. Par exemple, si votre numéro d'équipe est 4, votre fichier se nommera : APP5-E04. Aussi, écrivez des commentaires dans votre code pour faciliter la compréhension des étapes.

Veuillez déposer votre script Matlab seulement dans le devoir créé dans l'équipe Teams de l'APP5GE qui est nommé SCRIPT Matlab – Problématique.

Les deux dépôts doivent être faits au plus tard à 8 :30am le 13 novembre 2024. Il y aura une pénalité de 10% des points totaux par jour de retard. Il y aura aussi 10% de pénalité si le format de dépôt n'est pas respecté.

L'évaluation de la solution contribue à l'évaluation des éléments de compétence de l'unité. L'exactitude, la précision, la complétude, et la valeur de chaque élément de solution sont évaluées.

12. Évaluation sommative

L'évaluation sommative porte sur tous les objectifs d'apprentissage de l'unité.

13. Évaluation de l'unité

La note attribuée aux activités pédagogiques de l'unité est individuelle. L'évaluation portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. Ces compétences, ainsi que la pondération de chacune d'entre elles dans l'évaluation de cette unité, sont définies ci-dessous.

Éléments de compétence	
GEL433 Asservissement analogique	
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.

GEL433 est un cours de 4 crédits répartis sur 3 APP (APP4, APP5 et APP6).

APP4	GEL433 Compétence 1	GEL433 Compétence 2	GEL433 Compétence 3	GEL433 Compétence 4	TOTAL
Rapport d'APP (en équipe)	10	10	25	25	70
Examen sommatif	30	30	105	95	260
TOTAL	40	40	130	120	330

APP5	GEL433 Compétence 1	GEL433 Compétence 2	GEL433 Compétence 3	GEL433 Compétence 4	TOTAL
Rapport d'APP (en équipe)	20	30	0	15	65
Examen sommatif	70	130	0	65	265
TOTAL	90	160	0	80	330

APP6	GEL433 Compétence 1	GEL433 Compétence 2	GEL433 Compétence 3	GEL433 Compétence 4	TOTAL
Rapport d'APP (en équipe)	10	10	10	10	40
Examen sommatif	20	30	20	30	100
TOTAL	30	40	30	40	140

EXAMEN FINAL	GEL433 Compétence 1	GEL433 Compétence 2	GEL433 Compétence 3	GEL433 Compétence 4	TOTAL
Examen final	80	120	80	120	400
GRAND TOTAL	240	360	240	360	1200

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.

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.

	Q01	Q02	Q03	Q04	Q05	Q06	Q07	Q08	Q09	Q10	Q11	Q12
Visées	X	X		X	X		X					
Évaluées	X	X		X	X							