

Session S2

Unité 6

Guide étudiant

Mathématiques des signaux (GEN211)
et
Électronique I (GEN230)

Département de génie électrique et de génie informatique

Faculté de génie

Université de Sherbrooke

Hiver 2023

Tous droits réservés © 2023 Département de génie électrique et de génie informatique,
Université de Sherbrooke

Note : En vue d'alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les femmes et les hommes.

Document S2_APP6_2023_Guide_etudiant.doc

Version mars 2023

Mise à jour 2023 par Jean-Baptiste Michaud, Sylvain Nicolay et Jean-Philippe Gouin

Rédigé par André Clavet, Roch Lefebvre et Jean-François Pratte

Tous droits réservés © 2023 Département de génie électrique et de génie informatique,
Université de Sherbrooke.

Table des matières

1	Éléments de compétence de la session S2 visés par l'unité	3
2	Synthèse de l'évaluation	3
3	Qualités de l'ingénieur	4
4	Énoncé de la problématique	5
4.1	ANNEXE A : ÉGALISEUR DE FRÉQUENCES STÉRÉO À 3 BANDES : SPÉCIFICATIONS DU CLIENT	6
5	Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique	9
6	Références essentielles à consulter	11
7	Logiciels et matériel	13
8	Santé et sécurité.....	13
8.1	Dispositions générales	13
9	Activités liées à la problématique	13
10	Productions attendues	14
10.1	Validation formative des valeurs dans Moodle	14
10.2	Archive de la solution à la problématique dans Moodle	14
10.3	Défense de la problématique.....	16
10.4	Grille d'évaluation de la solution à la problématique.....	18
10.5	Évaluation sommative et examen final.....	20
11	Politiques et règlements	20
12	Formation à la pratique procédurale 1	21
13	Formation à la pratique en laboratoire.....	24
14	Formation à la pratique procédurale 2	31

Liste des figures

Figure 1 : Schéma bloc du système (un canal).....	6
Figure 2 : Circuit du canal gauche	8

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des qualités de l'ingénieur.....	4
Tableau 2 : Caractéristiques de la réponse en fréquences de l'égaliseur en fonction de la position des trois potentiomètres des amplificateurs à gain variable (mesurées avec une charge $R_L = 32 \Omega$)	7
Tableau 3 : Caractéristiques théoriques de chacun des quatre filtres	7
TABLEAU 4 : GRILLE D'ÉVALUATION DE LA DÉFENSE (GEN211).....	18
Tableau 5 : Grille d'évaluation de la défense (GEN230)	19

1 Éléments de compétence de la session S2 visés par l'unité

GEN230 : Électronique analogique I

1. Obtenir et représenter la réponse fréquentielle d'un circuit linéaire par une approche analytique ou par simulation et obtenir, par simulation, la réponse temporelle d'un circuit linéaire ou non linéaire.
2. Analyser et concevoir des circuits électroniques simples comprenant des dispositifs actifs comme des transistors et des amplificateurs opérationnels.

Description officielle : <https://www.usherbrooke.ca/admission/fiches-cours/gen230/>

GEN211 : Mathématiques des signaux à temps continu

1. Déterminer la réponse d'un système à temps continu à une excitation périodique ou apériodique ; analyser les signaux d'entrée et de sortie d'un système dans les domaines temporel et fréquentiel.
2. Faire la simulation, en utilisant un logiciel approprié, de systèmes à temps continu dans les domaines temporel et fréquentiel.

Description officielle : <https://www.usherbrooke.ca/admission/fiches-cours/gen211/>

2 Synthèse de l'évaluation

Tableau 1 : Synthèse de l'évaluation de l'unité

Évaluation	GEN211-1	GEN211-2	GEN230-1	GEN230-2	Total
Rapport	38	30	24	28	120
Sommatif théorique	109		66	66	241
Sommatif pratique		37	24		61
Examens finaux GEN211-GEN230	150	33	75	105	363
Total	297	100	189	199	785

3 Qualités de l'ingénieur

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

Tableau 1 : Tableau des qualités de l'ingénieur

Numéro	Libellé	Touchée	Évaluée
Q01	Connaissances en génie	✓	✓
Q02	Analyse de problèmes	✓	✓
Q03	Investigation		
Q04	Conception		
Q05	Utilisation d'outils d'ingénierie	✓	✓
Q06	Travail individuel et en équipe		
Q07	Communication	✓	
Q08	Professionnalisme		
Q09	Impact du génie sur la société et l'environnement		
Q10	Déontologie et équité		
Q11	Économie et gestion de projets		
Q12	Apprentissage continu		

4 Énoncé de la problématique

Des fréquences plus égales que les autres !

Vous faites partie d'une équipe d'ingénieurs à l'emploi d'une compagnie qui vend des produits audios. Le département de marketing a identifié, auprès de clients souffrant de problèmes auditifs, un besoin pour un égaliseur audio à brancher entre une sortie audio d'un PC et un casque d'écoute.

Votre équipe a conçu l'égaliseur sous forme d'un schéma-bloc (figure 1 de l'annexe A) et a établi que les spécifications techniques devaient être les suivantes :

1. Les spécifications prévalent pour un signal audio de sortie n'excédant pas 1 V_{pointe} et dont le contenu fréquentiel peut s'étaler de 20 Hz à 20 kHz.
2. L'égaliseur sépare le contenu fréquentiel du signal audio en trois bandes à l'aide d'un filtre passe-bas, d'un passe-bande (un passe-haut en cascade avec un passe-bas) et d'un passe-haut. Les trois filtres présentent un gain¹ de 0 dB dans leur bande passante respective. Les filtres passe-bas et passe-haut requis sont des filtres d'ordre 2 dont les fréquences de coupure à -3 dB sont données dans le tableau 3 de l'annexe A. Leurs fonctions de transfert appartiennent à la famille des filtres de Butterworth.
3. La sortie de chacun des filtres est appliquée sur un amplificateur de gain ajustable de -12 dB à +12 dB à l'aide d'un potentiomètre, tel que présenté dans le tableau 2 de l'annexe A. Les trois signaux de sortie de ces amplificateurs à gain ajustable sont ensuite sommés pour passer finalement dans un amplificateur de puissance de gain 0 dB à la sortie duquel est branché un casque d'écoute de 32 Ω .
4. Lorsque les potentiomètres sont ajustés au centre de leur course, la réponse en fréquences d'amplitude² de l'égaliseur doit être de 0 dB, avec une tolérance admissible de ± 1 dB, et le délai de groupe ne doit pas s'écarter d'une valeur constante de plus de ± 2 msec, tel que présenté dans le tableau 2 de l'annexe A.

Le schéma-bloc et les spécifications (annexe A) ont été transmis à un manufacturier afin qu'il se charge de la conception ainsi que de la fabrication de l'égaliseur. Celui-ci vient de terminer la phase de conception et vous a livré un prototype pré-production, avec le schéma électronique du canal gauche (figure 2 de l'annexe A), pour approbation avant de lancer la production.

Quelques essais avec le prototype démontrent que les spécifications techniques ne sont pas respectées. Il vous faut donc identifier où se situent les erreurs. Toute correction exigée du manufacturier doit lui être justifiée à l'aide de preuves documentées obtenues dans le cadre d'une procédure d'investigation rigoureuse.

Vous serez amenés, entre autres, à comparer les réponses en fréquences et la position des pôles et des zéros dans le plan complexe, soit celui de la transformée de Laplace, des différents filtres décrits dans les spécifications fournies au manufacturier avec celles obtenues par le manufacturier à la suite de son travail de conception et de réalisation. Ces comparaisons seront crédibles dans la mesure où votre démarche sera systématique et reposera sur une bonne étude analytique du schéma-bloc, des spécifications et du circuit électronique, sur des simulations Python et Altium.

Une fois calculées les corrections à apporter à l'égaliseur, il vous faut également déterminer, à l'aide d'une simulation de type « Monte-Carlo », à distribution uniforme et worst-case, si le circuit corrigé respecte

¹ Les gains et les fonctions de transfert dont il est question dans ce texte, correspondent toujours au rapport de la tension de sortie d'un circuit sur sa tension d'entrée.

² En anglais on parle de « amplitude spectrum » et de « magnitude of the transfer function ».

toutes les spécifications, considérant les tolérances de $\pm 1\%$ (résistances) et $\pm 2\%$ (capacités) imposées par le fabricant pour chacun des composants critiques du circuit.

Enfin, le fabricant songe à mettre au point un test automatique permettant d'identifier rapidement les unités défectueuses. Pour cela, il a besoin des données suivantes qu'il vous demande de lui fournir :

- S'il applique un signal sinusoïdal de 2.5 kHz, 0.25 V_{pointe} et de phase nulle³ à l'entrée d'un égaliseur dont les valeurs des composants sont exactes, quelle sera, en régime permanent, la formulation mathématique du signal temporel à la sortie du filtre passe-bande (point ① du schéma-bloc)? Sans être un expert, il sait qu'il faut interpréter les réponses en fréquences des filtres constituant le passe-bande pour arriver au résultat.
- S'il applique un échelon unitaire à l'entrée de cet égaliseur, déterminez à la main, c'est-à-dire, en faisant le développement mathématique au long sans l'assistance d'aucun outil logiciel de résolution d'équation, la formulation mathématique de la réponse complète du signal temporel à la sortie du filtre passe-haut (point ② du schéma-bloc)? En vous basant sur ce dernier résultat, il vous demande d'illustrer la première milliseconde du signal à la sortie du filtre passe-haut si on applique à son entrée un signal qui vaut 1 Volt de 0 à 0.5 msec et 0 Volt autrement.

4.1 ANNEXE A : ÉGALISEUR DE FRÉQUENCES STÉRÉO À 3 BANDES : SPÉCIFICATIONS DU CLIENT

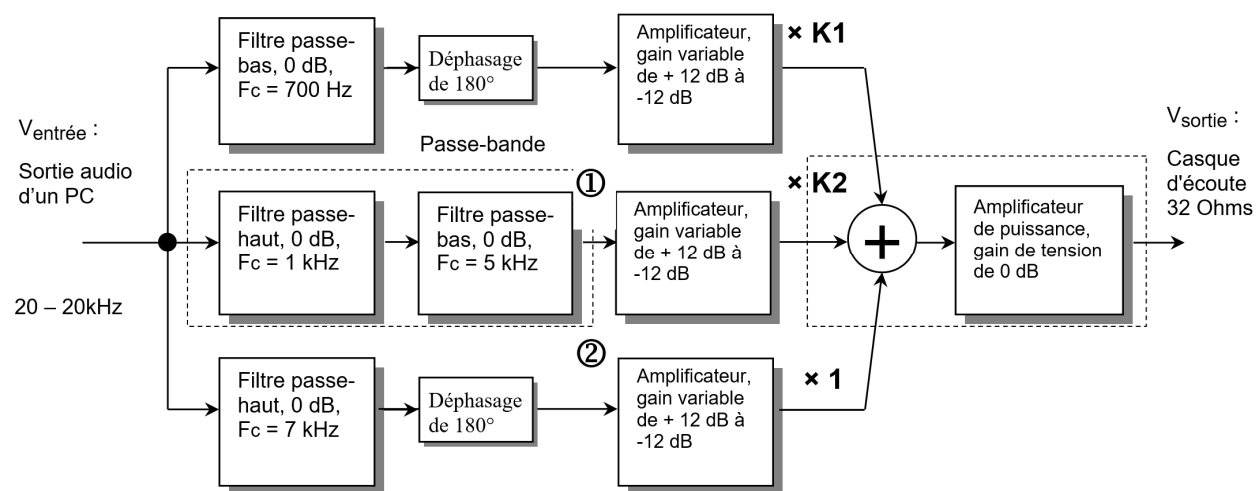


Figure 1 : Schéma bloc du système (un canal)

Présentation générale :

Cet égaliseur de fréquences permettra d'ajuster indépendamment, au goût de l'utilisateur, les niveaux d'amplitude des basses, moyennes et hautes fréquences d'une pièce musicale. D'utilisation simple, il sera conçu pour être branché entre une sortie audio d'un PC, dont l'impédance de sortie est de l'ordre de 25 Ω , et un casque d'écoute stéréo offrant une impédance de charge de 32 Ω par canal. L'utilisateur ne devra pas percevoir de différences notables au niveau de la puissance sonore, ni de la qualité du signal musical, entre l'écoute directe du signal provenant de la sortie audio du PC et l'écoute du signal à la sortie d'un égaliseur dont les trois curseurs seraient ajustés en position médiane.

³ En fait la phase de cette sinusoïde est considérée comme la référence de phase, c'est-à-dire qu'elle correspond à un déphasage nul. Une autre sinusoïde, qui présenterait une phase de ϕ° inférieure à la phase de la sinusoïde de référence, sera dite « déphasée de $-\phi^\circ$ » par rapport à la sinusoïde de référence.

Quoique l'amplitude maximale du signal disponible à une sortie audio d'un PC soit assez élevée, soit de l'ordre de $2 V_{\text{pointe}}$, et que l'égaliseur peut, par la suite, amplifier ce signal par un facteur compris entre $\frac{1}{4}$ et 4, les spécifications qui suivent n'ont à être respectées que pour un signal qui aurait une valeur inférieure ou égale à $1 V_{\text{pointe}}$ à la sortie de l'égaliseur. À ce niveau de tension, la pression acoustique dans les écouteurs est telle qu'au-delà de ça, les spécifications de taux de distorsion et de précision de la réponse en fréquences n'auraient plus aucune signification.

Tableau 2 : Caractéristiques de la réponse en fréquences de l'égaliseur en fonction de la position des trois potentiomètres des amplificateurs à gain variable (mesurées avec une charge $R_L = 32 \Omega$)

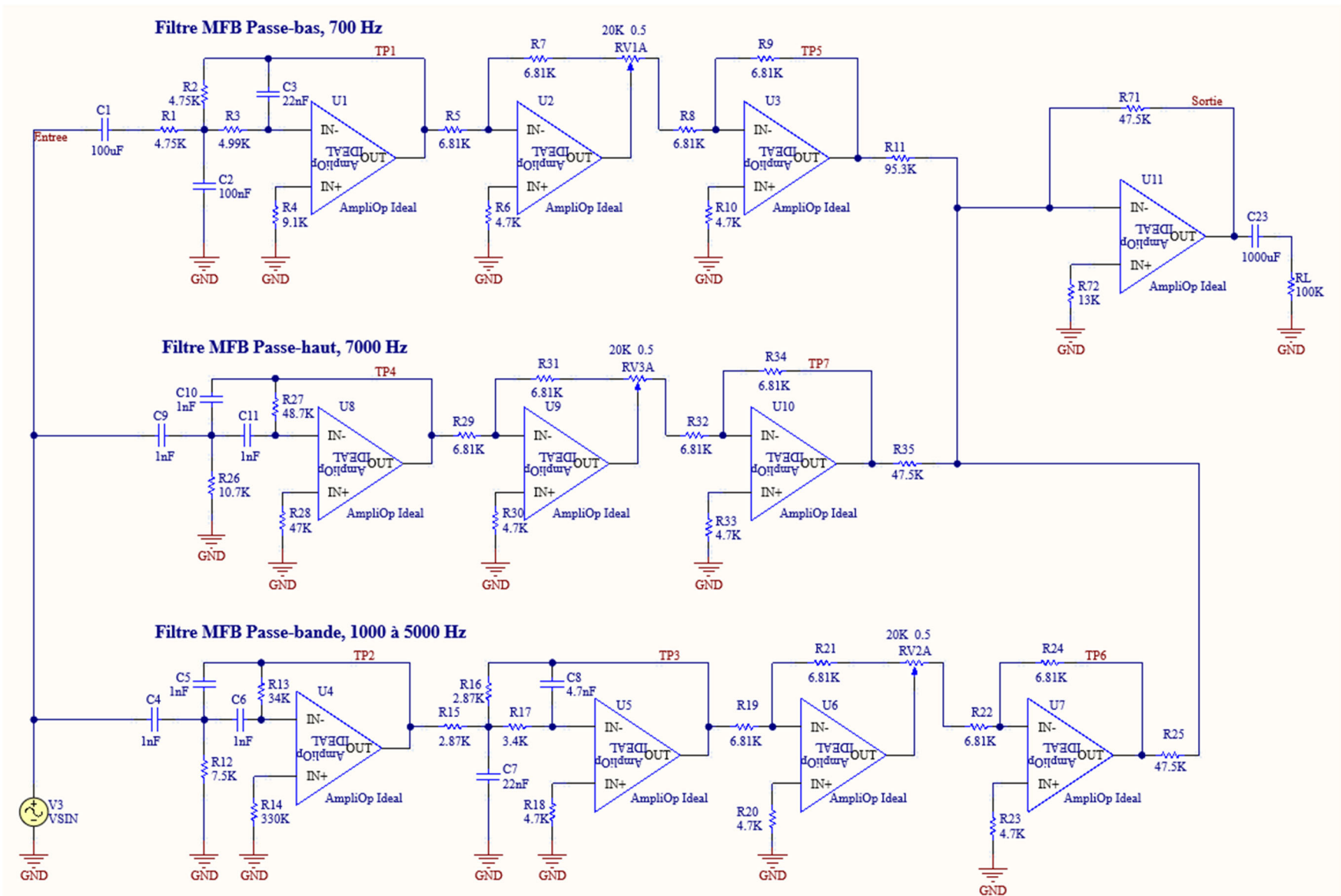
<i>Position des trois potentiomètres</i>	<i>Gain⁴ dans la bande 20 Hz à 20 kHz</i>	<i>Délai de groupe dans la bande 20 Hz à 20 kHz</i>
En haut	12.0 db, ± 1 dB	Constant, ± 2 ms
Au centre	0 db, ± 1 dB	
En bas	-12.0 db, ± 1 dB	

Tableau 3 : Caractéristiques théoriques de chacun des quatre filtres

<i>Type de filtre</i>	<i>Fréquence de coupure à -3 dB</i>	<i>Gain dans la bande passante</i>
Passe-bas, Butterworth d'ordre 2	700 Hz	0 dB
Passe-bas, Butterworth d'ordre 2	5 kHz	
Passe-haut, Butterworth d'ordre 2	1 kHz	
Passe-haut, Butterworth d'ordre 2	7 kHz	

⁴ Les gains et les fonctions de transfert dont il est question dans ce texte, correspondent toujours au rapport de la tension de sortie d'un circuit sur sa tension d'entrée.

Figure 2 : Circuit du canal gauche



5 Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique

SYSTÈMES ET SIGNAUX (Pour le procédural 1 et le laboratoire)

Connaissances déclaratives : Quoi

- Transformée de Fourier, définition et propriétés.
- Transformée de Laplace, définition et propriétés.
- Transformée de Laplace inverse par inspection de tables, méthode de la décomposition en fractions partielles.
- Fonction de transfert $H(s)$ d'un système, définition et interprétation physique.
- Fonction de transfert harmonique $H(jw)$ d'un système, définition, interprétation physique et lien avec la transformée de Laplace.
- Carte des pôles et des zéros d'une fonction de transfert.
- Stabilité d'un système décrit par la carte de ses pôles et de ses zéros.
- Réponse en fréquences d'un filtre, lieu de Bode d'amplitude et de phase.
- Délai de groupe d'un filtre.
- Fonctions de transfert des filtres Butterworth pour filtres passe-bas et passe-haut d'ordre 2.

Connaissances procédurales : Comment

- Procédure pour obtenir la fonction de transfert $H(s)$ d'un système linéaire à temps continu décrit par son équation différentielle.
- Procédure pour obtenir la fonction de transfert $H(s)$ d'un circuit analogique passif d'ordre 1 ou 2 en utilisant la notion des impédances complexes, et pour en déduire sa fonction de transfert harmonique $H(jw)$.
- Procédure pour obtenir la réponse temporelle complète d'un système par la méthode de la transformée de Laplace.
- Procédure pour obtenir, à partir de sa fonction de transfert harmonique $H(jw)$, la réponse en régime permanent d'un circuit linéaire d'ordre 1 ou 2 à une entrée formée d'une sinusoïde pure de fréquence, d'amplitude et de phase connues.
- Procédure pour obtenir la fonction de transfert globale d'un système formé de sous-systèmes en parallèle et en série dont les fonctions de transfert sont connues.
- Procédure pour obtenir, par simulation Python, les lieux de Bode d'amplitude et de phase et la caractéristique de délai de groupe d'une fonction de transfert $H(s)$.
- Procédure pour obtenir, par simulation Python, la carte des pôles et des zéros d'une fonction de transfert $H(s)$.
- Procédure pour obtenir, par simulation Python, la réponse temporelle d'une fonction de transfert $H(s)$ à une entrée donnée.
- Procédure pour obtenir, par la méthode géométrique, le module et la phase de la fonction de transfert harmonique $H(jw)$ d'un système décrit par ses pôles et ses zéros.

Connaissances conditionnelles : Quand

- Choix d'un logiciel de simulation approprié (Python).

ÉLECTRONIQUE (Pour le procédural 2 et le laboratoire)

Connaissances déclaratives : Quoi

- Décibels, échelle de fréquences logarithmique et lieux de Bode.
- Analyse de circuits linéaires comprenant des ampli-op idéals (amplificateurs différentiels, intégrateurs, dérivateurs et filtres actifs).
- Efficacité des amplificateurs.
- Interprétation des lieux de Bode (réponse forcée d'un circuit soumis à une excitation sinusoïdale).
- Quelques dispositifs électroniques nouveaux : régulateur de tension série, convertisseur DC à DC, amplificateur de puissance intégré.

Connaissances procédurales : Comment

- Procédure pour transformer des courbes de réponses en fréquences (axes gradués de façon linéaire) en lieux de Bode (axe des fréquences gradué de façon logarithmique et amplitudes en décibels).
- Procédure pour obtenir, par simulation Altium, les lieux de Bode d'amplitude et de phase, et la caractéristique de délai de groupe d'un circuit électronique.
- Procédure pour obtenir, à la main, la fonction de transfert d'un circuit comprenant des ampli-op considérés comme idéals.

6 Références essentielles à consulter

Pour l'atelier de mathématiques

- Annexe C des notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu » du professeur Roch Lefebvre.
- Révision de vos connaissances de base sur les intégrales. Par exemple, si vous en sentez le besoin, vous pouvez consulter le document « Démystifier la dérivée et l'intégrale » du professeur Roch Lefebvre, ou tout autre ouvrage de référence sur la définition de l'intégrale d'une fonction.
- Révision de vos connaissances de base sur les nombres complexes. Revoyez au besoin l'annexe A des notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu » du professeur Roch Lefebvre.

Pour le procédural 1 et le laboratoire

- Notes de cours refondues du Pr Roch Lefebvre
 - Ch. 6, La Transformée de Fourier (23 pages)
 - Ch. 7, La Transformée de Laplace (34 pages)
 - Tables et propriétés des Transformées, Tableau 7.2, 4.2, 7.1 et 4.1 pages 227 et suivantes de l'Annexe B

Note : Assurez-vous que vous comprenez bien, et que vous pouvez utiliser, les propriétés de ces tables, en particulier celles de la Table 7.2 que nous allons étudier et démontrer plus en détails durant cette unité.

- Document « Introduction aux filtres Butterworth analogiques ».
- Document « Fractions partielles ».

Exercices préparatoires (procédural 1)

- « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu » du professeur Roch Lefebvre :
 - Annexe F : 7.1-1, 7.1-4, 7.1-5, 7.1-6, 7.3-4, 7.4-4, 7.4-7.
 - Annexe G (266-270) : 4.1-1 (a) et (b), 4.1-2 (a) et (b), 4.1-3 (a) à (d), 4.2-1 (a) à (d), 4.3-5, 4.3-6, 4.3-1 (a), 4.3-3 (a), 4.3-7 (a) avec le signal (i), 4.7-6.

Les réponses de ces exercices seront publiées sur la page Web.

Pour le procédural 2

Volume « Electrical Engineering – Principles and Applications », 7^e édition, de A. R. Hambley (41 pages de révision, 69 pages de connaissances nouvelles) :

- Sec. 6.2, pa. 296 à 301 (6 pages)
- Sec. 6.3 et 6.4, pa. 301 à 309 (9 pages)
- Sec. 6.5, pa. 309 à 313 (5 pages)
- Sec. 6.8, pa. 321 à 328 (8 pages)
- Sec. 13.1 à 13.3, pa. 647 à 658 (12 pages)
- Sec. 13.4, pa. 661 à 663 (après « Close-Tolerance ... ») (3 pages)
- Sec. 13.8 à 13.10, pa. 676 à 685 (voir note 1 ci-dessous) (10 pages)
- Sec. 13.5, pa. 663 à 667 (voir note de lecture 2) (5 pages)
- Sec. 5.1, pa. 216 à 222 (7 pages)
- Sec. 10.1, pa. 504 à 511 (6 pages)
- Sec. 10.3, pa. 512 à 515 (4 pages)
- Sec. 6.1, pa. 291 à 294 (après « Transfer Functions ... ») (4 pages)
- Document « Conception de filtres actifs à temps continu », pages 79 à 83 (voir note 2) (5 pages)

Exercices préparatoires (procédural 2)

Solutionner quelques-uns des problèmes présentés à la fin de chacun des chapitres à lire.

Notes de lecture

- note 1.* Perfectionnez ici cette aptitude essentielle qui consiste à être capable d'analyser des circuits dans lesquels on retrouve des ampli-op pouvant être considérés comme idéals, tout en vous familiarisant avec les circuits amplificateurs d'instrumentation, intégrateurs, dérivateurs et filtres actifs qu'il est important de bien connaître.
- note 2.* Quoique les équations mathématiques des fonctions de transfert pour les différents types de filtre y sont présentées, vous devez être en mesure d'obtenir par l'analyse d'un circuit électronique la fonction de transfert d'un filtre selon la forme canonique.

Autres documents, pour le laboratoire

- Tutoriels et recommandations du logiciel Altium (voir site web).

7 Logiciels et matériel

Vous devez utiliser les logiciels Altium et Python pour résoudre cette problématique afin d'identifier les erreurs de conception, valider les corrections et effectuer des calculs.

8 Santé et sécurité

8.1 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 : <http://www.gel.usherbrooke.ca/santesecurite/>

- Politique 2500-004 : Politique de santé et sécurité en milieu de travail et d'études
- Directive 2600-04 : 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

9 Activités liées à la problématique

Semaine 1 :

- 1^{re} rencontre de tutorat.
- Atelier de mathématiques.
- Étude personnelle et exercices.
- Formation à la pratique procédurale 1.
- Formation à la pratique en laboratoire. Travail avec Python et Altium.
- Début de l'inscription dans votre logbook de la démarche détaillée suivie pour résoudre la problématique.
- Formation à la pratique procédurale 2.

Semaine 2 :

- Consultation facultative.
- Étude personnelle et exercices.
- Poursuite de l'inscription dans votre logbook de la démarche détaillée suivie pour résoudre la problématique.
- Travail avec Python et Altium.
- Remise du questionnaire sur la problématique sur Moodle.
- Défense de la problématique.
- Remise de l'archive de la solution.
- 2^{ème} rencontre de tutorat.
- Évaluation formative.
- Étude personnelle et exercices.
- Évaluations sommatives.

10 Productions attendues

Toutes les productions se feront en équipe de 3.

Dans les livrables de cet APP, la qualité de la communication technique (orthographe, etc.) ne sera pas évaluée de façon sommative mais si le matériel soumis n'atteint pas un standard minimum sur le plan de la qualité de la communication et de la présentation, **on vous demandera de reprendre le travail avant d'être noté, avec pénalité de retard.**

10.1 Validation formative des valeurs dans Moodle

Vous pouvez remplir un questionnaire sur Moodle qui vous indique si vous êtes sur la bonne piste pendant votre solution de la problématique. Il s'agit d'un questionnaire interactif permettant de valider vos calculs et composants. Entre autres :

Validation des erreurs trouvées et des fonctions de transfert

- Validation des composants en erreur et des nouvelles valeurs proposées.
- Validation des fonctions de transfert en s théoriques de chacun des 4 filtres :
filtre passe-bas, filtre passe-haut, filtre passe-bas (passe-bande) et filtre passe-haut (passe-bande).
- Validation des gain K1 et K2.

Validation de la fonctionnalité du circuit

- À l'aide d'Altium, lorsque vous appliquez à l'entrée de l'égaliseur une sinusoïde, d'amplitude $0.25 V_{\text{pointe}}$ et de fréquence 2.5 kHz, le signal temporel à la sortie du filtre passe-bande (point ① du schéma-bloc) correspond-il à ce que vous avez déduit mathématiquement?
- À l'aide d'Altium, lorsque vous appliquez, à l'entrée de l'égaliseur, une onde carrée périodique de fréquence 1 kHz, de rapport cyclique 50% et dont l'amplitude vaut soit 0 Volt, soit 1 Volt, le signal temporel à la sortie du filtre passe-haut (point 2 du schéma-bloc) correspond-il à ce que vous avez déduit mathématiquement?

Vous pouvez itérer votre solution selon la rétroaction de Moodle.

10.2 Archive de la solution à la problématique dans Moodle

Vous devez remplir un questionnaire sur Moodle qui permet à l'équipe professorale de référer à votre solution de la problématique après la défense, si nécessaire. Cette archive est indispensable, même si elle contient des éléments présentés dans la défense. Une absence de dépôt conduit à la note 0 pour la défense, peu importe la qualité et le contenu de celle-ci. Le barème indiqué dans Moodle donne une indication de la pondération accordée à ces éléments ou questions lors de la défense.

Date limite : 8h30 le matin de la défense. Tout retard aura une pénalité de 20 % le premier jour et 10 % par jour supplémentaire, appliquée sur la note de la défense.

Contenu

- Vous devez d'abord fournir la présentation (support visuel) utilisée pour la défense.
- Vous devez ensuite remplir le même questionnaire de validation formative des valeurs avec les résultats définitifs présentés à la défense.
- Le reste du contenu est similaire à ce qu'il est nécessaire de présenter lors de la défense. Lorsqu'un PDF est requis, il n'est pas nécessaire de produire un document sous forme de rapport, mais le document doit contenir tout le travail effectué, le développement des calculs, etc. Par exemple, le Onenote de la résolution ou une photo claire du développement à la main sont acceptables.

La première partie porte sur les aspects plus théoriques de la solution.

GEN211

- Discussion PDF : Confirmation que le schéma-bloc fourni au fabricant permet de rencontrer les spécifications de réponse en fréquences portant sur le gain et le délai de groupe pour les positions centrales des potentiomètres des amplificateurs à gain variable. Démontrez que les fonctions de transfert de cette architecture, obtenues dans Python, permettent de respecter les spécifications fréquentielles nécessaires au fonctionnement de l'égaliseur.
- Dans un PDF, simulations Python du lieu de Bode *du circuit corrigé complet* et discussion de l'atteinte des spécifications.
- Un document PDF : Formulations mathématiques des signaux aux points ① et ② du schéma-bloc sous les conditions précisées dans l'énoncé. Au point ②, il faut d'abord déterminer la formulation mathématique de la sortie du filtre lorsqu'on applique un échelon à l'entrée. Ensuite, il faut expliquer de façon intuitive ou par une approche analytique la sortie du filtre lorsqu'on applique un pulse carré de 1 V et de durée de 0.5 msec.

GEN230

- Un document PDF : Identification, sur les schémas électroniques, des erreurs responsables du non-respect des spécifications du client et des corrections nécessaires. Il y a typiquement un filtre de sous-bande en erreur et le sommateur à corriger. Justifiez les erreurs et les corrections à l'aide de fonction(s) de transfert obtenues à partir du circuit, de carte(s) des pôles et des zéros, de réponse(s) en fréquence d'amplitude (lieu de Bode) et d'analyses Monte Carlo. Les fonctions de transfert des parties du circuit électronique requises doivent être déterminées à la main, c'est-à-dire en faisant le développement mathématique au long, sans l'assistance d'aucun logiciel de résolution d'équation.

La deuxième partie porte principalement sur la partie pratique de la solution.

GEN211

- Dépôt du code Python.
- Images de vos simulations Python : réponse en fréquences d'amplitude (lieu de Bode) et de phase ainsi que carte des pôles et des zéros attendues pour le filtre erroné corrigé.
- Images de vos simulations Python : réponses en fréquences d'amplitude (lieu de Bode) et graphique du délai de groupe de l'égaliseur au complet pour les valeurs optimales de K1 et K2 et pour les positions des potentiomètres des amplificateurs à gain variable indiquées dans la fiche technique (0 dB).

GEN230

- Dépôt du projet Altium complet.
- Images de vos simulations Altium :
 - 1 - Lieu de Bode lieu Altium du filtre corrigé selon les spécifications demandées.
 - 2 - Simulation Monte-Carlo de 20 courbes avec une distribution de type « worst case » lieu de Bode Altium pour le filtre corrigé.
- Images de vos simulations Altium : Résultats des mesures des signaux aux points ① et ② du schéma-bloc. Quelles sont vos conclusions?
- Images de vos simulations Altium : Résultats des tests avec les sinusoïdes à 300 Hz, 2.5 kHz et 15 kHz : amplitudes vs positions des potentiomètres des signaux de sortie ainsi que vos conclusions.

10.3 Défense de la problématique

La défense est une présentation orale sommative de la solution à la problématique, avec un support visuel approprié.

La défense de la problématique se fera via une présentation de type Powerpoint en deux parties, portant sur ses aspects pratiques et théoriques. Les points à traiter lors de ces présentations sont les suivants et correspondent point pour point à l'archive demandée. Vous devez les synthétiser, produire une présentation adéquate et discuter de vos conclusions lors de la présentation. Veillez à respecter le temps imparti, sinon l'évaluation de certains éléments pourrait être tronquée.

10.3.1 Partie théorique (15 minutes)

Conseils pour la présentation des calculs : Afin de respecter la limite de temps impartie, ne présentez pas l'entièreté des développements mathématiques mais uniquement le point de départ et une ou deux étapes intermédiaires cruciales à la compréhension du développement, ainsi que la réponse finale.

GEN211

- (A- 18 points) Présentation et discussion du concept général du circuit **sur la base du schéma bloc**. Quel est le rôle de chacun des filtres le composant? Remplit-il les spécifications du client en termes de déphasage, ronflement (oui/non pourquoi?) Sur base de vos réponses précédentes est-ce que le schéma bloc permet de rencontrer les spécifications demandées? Justifiez en montrant que les fonctions de transfert obtenues dans Python permettent d'atteindre les spécifications.
- (C- 7.5 points) Présentation et discussion du lieu de Bode du **circuit complet, corrigé**, tel que calculé par **Python**. Démontrer au moins empiriquement comment vous avez déterminé les valeurs de K1 et K2 et démontrer que les valeurs choisies remplissent les critères demandés.
- (D- 20 points) Présenter et discuter les résultats de vos calculs des signaux aux points 1 et 2. Expliciter les étapes principales du raisonnement.

GEN230

- (F- 13 points) Présenter et discuter en quoi la partie (a) **du filtre en erreur** et (b) du sommateur ne correspondent pas aux spécifications demandées. Présenter les étapes importantes du calcul à partir du circuit et les fonctions de transfert obtenues.
- (E- 13 points) Justifiez les modifications. Supportez vos justifications par des résultats de simulation Python et Altium au besoin, comparez par exemple des cartes de pôles et de zéros et des lieux de Bode avant/après et voulus/obtenus.

10.3.2 Partie pratique (15 minutes)

Incluez dans les diapositives des captures d'écrans correctement annotées (axes, titres, curseurs, etc.) qui montrent les résultats obtenus et qui permettent de constater l'atteinte des spécifications. Vous devez par ailleurs exécuter le code devant l'équipe professorale.

GEN211

- (B- 22.5 points) Présentation du code **Python** et de son exécution en temps réel permettant de trouver les pôles et zéros du **filtre corrigé**, ainsi que son lieu de Bode. Présentation du code **Python** et de son exécution en temps réel permettant de trouver le délai de groupe de **l'ensemble du circuit** (incluant les valeurs K1 et K2 appropriées et en mettant les gains des 3 filtres à 0 dB).

GEN230

- (H- 5 points) Présentation du circuit du **filtre corrigé** sur **Altium** et démonstration de l'exécution en temps réel conduisant à l'obtention du lieu de Bode et des simulations Monte Carlo de 20 courbes avec une distribution « worst case » du module du filtre corrigé.
- (H- 10 points) Présentation du circuit **complet corrigé** sur **Altium** et démonstration de l'exécution en temps réel conduisant à l'obtention du lieu de Bode et du délai de groupe à la sortie de l'amplificateur U11 (entre l'ampli et C23) (incluant les valeurs K1 et K2 appropriées et en mettant les gains des 3 filtres à 0 dB).
- (G- 5 points) Présentation en temps réel sur **Altium** des signaux aux points 1 et 2 du circuit pour les signaux d'entrées suivant. Préparer un projet Altium séparé pour chacun des signaux d'entrées et soyez prêt à discuter de la forme des signaux) :
 - Le signal en tension au point 1 pour le signal d'entrée $x(t) = 0.25 \sin(2\pi \cdot 2500 \cdot t)$
 - Le signal en tension au point 2 pour le signal d'entrée $x(t)$ = onde carrée entre 0 et 1 V et de durée de 0.5 msec.
- (G- 4 points) Présentation en temps réel sur **Altium** des signaux en tension à la sortie du circuit corrigé pour un signal composé de la **superposition** des 3 sinusoïdes suivantes : amplitude de 0.25 V, déphase nul, fréquences de 300, 2500 et 15000 Hz. Soyez aussi prêts à discuter de la forme des signaux à la sortie de chacun des filtres composant le circuit.

10.4 Grille d'évaluation de la solution à la problématique

TABLEAU 4 : GRILLE D'ÉVALUATION DE LA DÉFENSE (GEN211)

Grille d'évaluation GEN211		GEN211-1	GEN211-2	GEN230-1	GEN230-2
Défense/Dépôt complet et acceptable quant à la qualité de la communication		OUI/NON (à reprendre)			
A	Discussion de l'atteinte des spécifications à partir du schéma bloc et des fonctions de transfert des filtres en sous-bandes	Q2.3			
	Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie	0			
	Commets des erreurs majeures dans l'application de la procédure de résolution choisie	6			
	Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution	9			
	Applique correctement la procédure de résolution choisie	14.5			
	Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie	18			
B	Simulations Python (réponses en fréquences d'amplitude et de phase (lieux de Bode), cartes des pôles/zéros, délai de groupe)		Q5.2		
	N'utilise pas les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles		0		
	Utilise minimalement les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis		8		
	Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis en ne faisant que des erreurs mineures		11		
	Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis		18		
	Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis. Démontre la capacité à optimiser cette utilisation dans le contexte de la tâche à accomplir		22.5		
C	Interprétation des simulations Python pour valider le schéma-bloc		Q2.4		
	Est incapable d'analyser les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées		0		
	Est capable d'analyser partiellement les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées		2		
	Est capable d'analyser sommairement les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées		3.5		
	Est capable d'analyser correctement les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées		6		
	Est capable d'analyser correctement les résultats obtenus et témoigne d'une compréhension fine de leurs limites et de leur portée		7.5		
D	Formulations mathématiques des signaux aux points 1 et 2 du schéma-bloc sous les conditions précisées dans l'énoncé	Q2.3			
	Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie	0			
	Commets des erreurs majeures dans l'application de la procédure de résolution choisie	7			
	Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution	10			
	Applique correctement la procédure de résolution choisie	16			
	Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie	20			

Tableau 5 : Grille d'évaluation de la défense (GEN230)

	Grille d'évaluation (GEN230)	GEN211-1	GEN211-2	GEN230-1	GEN230-2
E	Simulation des sections en erreur et des modifications apportées				Q2.3
	Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie				0
	Commets des erreurs majeures dans l'application de la procédure de résolution choisie				4
	Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie				6.5
	Applique correctement la procédure de résolution choisie				10.5
	Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie				13
F	Interprétation des résultats de l'analyse du schéma-bloc et du circuit pour identifier les erreurs et les corriger			Q2.4	
	Est incapable d'analyser les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées			0	
	Est capable d'analyser partiellement les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées			4	
	Est capable d'analyser sommairement les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées			6.5	
	Est capable d'analyser correctement les résultats obtenus et d'en identifier les limites et les portées			10.5	
	Est capable d'analyser correctement les résultats obtenus et témoigne d'une compréhension fine de leurs limites et de leur portée			13	
G	Simulation Altium du circuit complet corrigé (réponses en fréquences d'amplitude et de phase, délai de groupe)			Q5.2	
	N'utilise pas les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis			0	
	Utilise minimalement les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis			2	
	Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis en ne faisant que des erreurs mineures			4.5	
	Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis			7	
	Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis. Démontre la capacité à optimiser cette utilisation dans le contexte de la tâche à accomplir			9	
H	Validation des modifications du circuit complet corrigé				Q2.3
	Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie				0
	Commets des erreurs majeures dans l'application de la procédure de résolution choisie				5
	Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie				7.5
	Applique correctement la procédure de résolution choisie				12
	Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie				15
	TOTAL:	/38	/30	/24	/28

10.5 Évaluation sommative et examen final

L'évaluation sommative théorique est un examen écrit qui porte sur les éléments de compétences suivants : GEN211-1, GEN230-1 et GEN230-2. La documentation permise est disponible sur le site web. L'évaluation sommative pratique, dans Moodle, porte sur GEN211-2 et GEN230-1 tels que couverts au laboratoire et dans la défense de la problématique.

L'examen final est un examen papier. Les parties mathématiques (GEN211) et électronique (GEN230) sont des examens distincts, contrairement à l'évaluation sommative.

11 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 et politiques 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

Norme 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.

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.gel.usherbrooke.ca/gegi/integrite_intellectuelle.pdf

12 Formation à la pratique procédurale 1

Buts de l'activité

On veut, ici, mettre en pratique les procédures requises pour :

- Déterminer la fonction de transfert $H(s)$ d'un système linéaire à temps continu décrit par son équation intégral-différentielle ;
- Déterminer la réponse temporelle d'un circuit à une entrée simple (ex. : un échelon) en appliquant la méthode de la transformée de Laplace inverse ;
- Déterminer la fonction de transfert $H(s)$ d'un circuit analogique passif d'ordre 1 ou 2 en utilisant la notion des impédances complexes, et en déduire sa fonction de transfert harmonique $H(j\omega)$;
- Déterminer les pôles et les zéros d'un système décrit par sa fonction de transfert $H(s)$;
- Calculer, à partir de sa fonction de transfert harmonique $H(j\omega)$, la réponse en régime permanent d'un circuit linéaire d'ordre 1 ou 2 à une entrée formée d'une sinusoïde pure de fréquence, d'amplitude et de phases connues ;
- Obtenir une bonne approximation de la réponse en amplitude et en phase d'un circuit à partir de sa carte des pôles et des zéros (méthode géométrique).

Problème no. 1 (concepts et exemples)

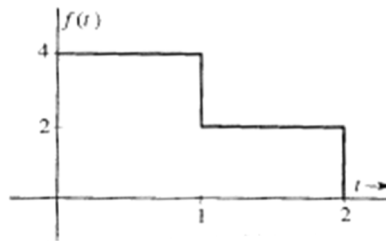
Dans ce premier problème, nous allons faire rapidement le tour des concepts mathématiques principaux de cette unité et les liens entre ces concepts. Gardons les calculs pour les problèmes 2, et 3.

- (a) Donnez les équations, et l'endroit où elles se trouvent dans les notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu » du professeur Roch Lefebvre, pour :
- calculer la transformée de Fourier $X(j\omega)$ d'un signal temporel $x(t)$
 - calculer la transformée de Fourier inverse d'un spectre $X(\omega)$
 - calculer la transformée de Laplace $X(s)$ d'un signal temporel $x(t)$
 - calculer la transformée de Laplace inverse d'une transformée $X(s)$
- (b) À quoi peuvent bien servir les tables de transformées, et les résumés des propriétés de ces transformées, comme dans l'annexe B des notes de cours?
- Expliquez chacune des propriétés de la transformée de Fourier données à la Table 7.2 de l'annexe B à la page 227 des notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu ».
- (c) Quel est le lien, et quelles sont les différences, entre la transformée de Fourier et la transformée de Laplace? Laquelle des deux est plus « générale » que l'autre?
- (d) Si je connais l'équation différentielle qui décrit un système faisant intervenir son entrée $x(t)$ et sa sortie $y(t)$, comment puis-je obtenir rapidement la fonction de transfert $H(s)$ de ce système? Donnez les étapes. Donnez aussi un exemple, i.e. une équation différentielle faisant intervenir les signaux $x(t)$ et $y(t)$ – prenez un ordre 2.
- (e) Quels sont les pôles et les zéros de la fonction de transfert $H(s)$ d'un système donné ? Où doivent être les pôles pour que le système soit stable ? Et les zéros?
- (f) Je connais l'expression mathématique d'un signal temporel $x(t)$ qui constitue l'entrée d'un système dont la fonction de transfert est $H(s)$. Donnez les étapes pour obtenir la réponse $y(t)$ de ce système, en passant par la transformée de Laplace.
- (g) Qu'est-ce que le lieu de Bode d'un système? Quelle information donne-t-il? À partir de quoi l'obtient-on?

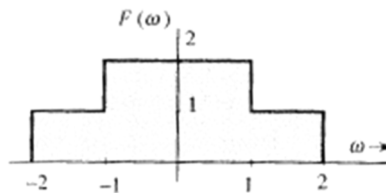
Problème no. 2

Faites les exercices suivants, choisissez parmi les exercices suggérés du présent guide étudiant.

- (a) Calculer la transformée de Fourier du signal $f(t)$ suivant



- (b) Calculer la transformée de Fourier inverse du spectre $F(\omega)$ suivant



- (c) Calculer la transformée de Laplace $X(s)$ du signal $x(t)$ suivant

$$x(t) = u(t) - u(t - 1)$$

où $u(t)$ est la fonction échelon.

- (d) Obtenir la transformée de Laplace inverse $x(t)$ de la fonction $X(s)$ suivante

$$X(s) = \frac{2s + 5}{s^2 + 5s + 6}$$

- (e) À l'aide de la transformée de Laplace, trouver la solution $y(t)$ de l'équation différentielle donnée suivante

$$(D^2 + 3D + 2)y(t) = Df(t) \text{ si } y(0^-) = \dot{y}(0^-) = 0 \text{ et } f(t) = u(t)$$

Notez que D est l'opérateur de dérivée. Spécifiquement, on a $Dy(t) = dy(t)/dt = \dot{y}(t)$

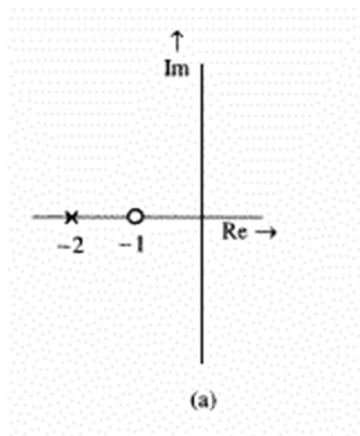
- (f) L'entrée d'un système LTI est $f(t)$ et sa sortie est $y(t)$. La relation entrée-sortie de ce système est donnée par l'équation différentielle suivante

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 11 \frac{dy(t)}{dt} + 24 y(t) = 5 \frac{df(t)}{dt} + 3 f(t)$$

que l'on peut aussi écrire en utilisant l'opérateur D , comme suit $(D^2 + 11D + 24)y(t) = (5D + 3)f(t)$

Obtenir la fonction de transfert en s de ce système LTI.

- (g) En appliquant la méthode géométrique, dessinez approximativement le gain en fonction de la fréquence ω du système dont les pôles et les zéros sont donnés à la figure suivante.



Problème no. 3

Pour chacun des filtres :

- Calculer la position de pôles et zéros.
- Commenter la stabilité et donner le type (passe-haut, passe-bas, passe-bande, coupe bande).
- Calculer le module et la phase pour 3 ou 4 points d'intérêts afin tracer l'allure générale du lieu de Bode.

a)

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + s + 0.5}$$

b)

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

c)

$$H(s) = \frac{s^2 + s + 4}{s(s - 3)}$$

13 Formation à la pratique en laboratoire

But de l'activité

Le but de ce laboratoire est de maîtriser l'analyse des systèmes linéaires à temps continu à l'aide du logiciel Python. Dans cet environnement, on manipule les fonctions de transfert $H(s)$ et $H(j\omega)$ plutôt que les composantes du système (par exemple, les résistances et les condensateurs d'un circuit). Il faut donc déjà être en mesure de calculer la fonction de transfert d'un circuit avant de le modéliser et de l'analyser avec Python.

On veut plus spécifiquement mettre en pratique les procédures pour :

- Calculer, avec Python, le lieu de Bode d'un filtre analogique linéaire et en afficher le module (en dB) et la phase ;
- Calculer, avec Python, la fonction de transfert harmonique $H(j\omega)$ d'un filtre analogique linéaire et en afficher le module et la phase pour un intervalle de fréquences donné ;
- Afficher la carte des pôles et des zéros d'une fonction de transfert $H(s)$;
- Simuler un système formé de fonctions de transfert en cascade et en parallèle, de sommateurs et de gains, et obtenir la réponse temporelle du système pour une source donnée ;
- Simuler et analyser la réponse en fréquence et la réponse à l'échelon d'un circuit avec le logiciel Altium.

Partie I : Python

Problème 1

On désire analyser le comportement en cascade et en parallèle de deux filtres analogiques dont on connaît les fonctions de transfert. Celles-ci sont données ci-dessous :

$$H_1(s) = \frac{s - 3}{s + 3}$$
$$H_2(s) = \frac{(s - 3 - 5j)(s - 3 + 5j)}{(s + 3 - 5j)(s + 3 + 5j)}$$

- (a) Dessinez d'abord la carte des pôles et des zéros de ces filtres et le module de la réponse en fréquence, puis montrer qu'il s'agit de deux filtres passe-tout (gain de 0 dB sur toute la bande de fréquences).
- (b) ObtenezPython, obtenez la réponse de chaque filtre à une sinusoïde pure, dont la fréquence prend différentes valeurs entre 0 et 50 radians par seconde, et confirmez le résultat obtenu en (a) par ces réponses temporelles (noter surtout le rapport amplitude en sortie sur amplitude en entrée).
- (c) Connectez maintenant ces deux filtres en cascade, puis en parallèle. Obtenez la fonction de transfert respective totale des deux combinaisons.

Pour chacune de ces configurations, obtenez la réponse à une sinusoïde pure en entrée, pour différentes fréquences comprises entre 0 et 50 radians par seconde. Qu'observez-vous? En particulier, mesurez la réponse à une valeur DC (sinusoïde de fréquence nulle) et à une sinusoïde de fréquence 4 radians par seconde. Comment expliquez-vous ce que vous observez?

Indice : Notamment pour la connexion en parallèle, observez la réponse temporelle individuelle de chacun des filtres.

- (d) Obtenez les valeurs numériques du module (linéaire, et non en dB) et de la phase de la réponse en fréquence de ces deux systèmes, i.e. avec les filtres en cascade ou en parallèle. Pouvez-vous mieux expliquer, avec cette information dans le domaine fréquentiel, ce que vous avez obtenu dans la partie (c)?

Problème 2

On vous demande de simulerPython le comportement d'un égaliseur audio simple à deux bandes de fréquences. La première bande couvre les fréquences 0 à 5 kHz et la deuxième bande couvre les fréquences à partir de 5 kHz.

Le système que vous devez simuler doit donc comprendre un filtre passe-bas et un filtre passe-haut en parallèle, où à la sortie de chacun on doit retrouver un gain dont la valeur peut être ajustée entre 0.1 et 10 (-20 dB à 20 dB). On recombine ensuite les sous-bandes ajustées en gain par une sommation, dont la sortie forme le signal égalisé.

- (a) Faire la conception avec Python de vos deux filtres sachant qu'ils sont de type Butterworth et d'ordre 2 (fonction `scipy.signal.butter`).
- (b) Réaliser ensuite la simulation de ce système, en paramétrant les fonctions de transfert des filtres passe-bas et passe-haut. Testez le fonctionnement du circuit avec en entrée une onde carrée périodique, de rapport cyclique 50%, et de période 1 ms.

Essayez d'abord en ajustant à 1 les gains des boîtes de gain, et observez la forme des signaux temporels à la sortie des filtres et à la sortie du sommateur (signal égalisé). Essayez ensuite avec différentes valeurs de gain et commentez la forme des signaux en sortie. Est-il possible d'obtenir en sortie le signal d'entrée (l'onde carrée) avec les gains à 1?

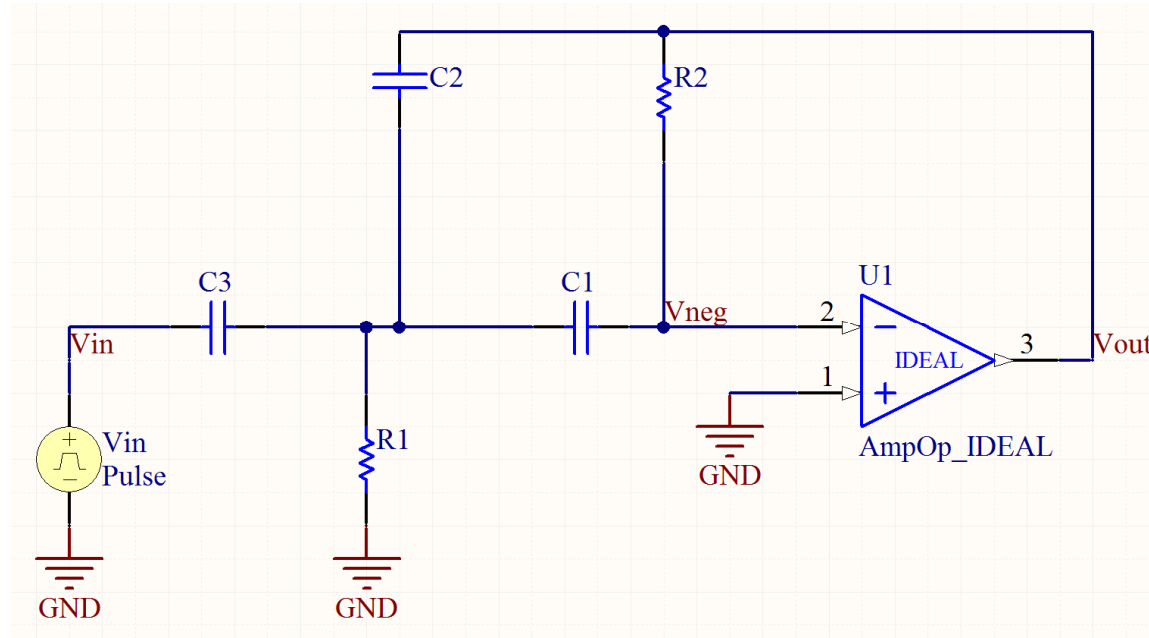
Essayez maintenant une sinusoïde pure en entrée, de même fréquence que l'onde carrée (la fréquence de la sinusoïde se trouve alors à $1/5^e$ de la fréquence de coupure de la bande basse). Si on met le gain de la bande basse à sa valeur minimale (0.1), et que l'on conserve le gain de la bande haute à 1, la sinusoïde en entrée se trouve-t-elle multipliée d'un facteur 0.1 en sortie? Expliquez.

- (c) Obtenez maintenant dans Python la réponse en fréquence globale du système pour les filtres d'ordre 2 calculés en (a), avec différentes valeurs de gains à la sortie des filtres. À quoi ressemble le module de la réponse en fréquence globale lorsque les gains sont à 1?

Partie II : Altium

Problème 3

Réaliser le schéma ci-dessous dans le logiciel Altium en utilisant les valeurs de composants ci-dessous, en utilisant l'amplificateur opérationnel idéal de la librairie « Librarie_S2_H12.IntLib », disponible sur la page web de l'APP6. Les composants ont les valeurs suivantes : $C=C1=C2=C3=10\text{ nF}$, $R1=3.74\text{ k}\Omega$ et $R2=16.9\text{ k}\Omega$



Problème 3a

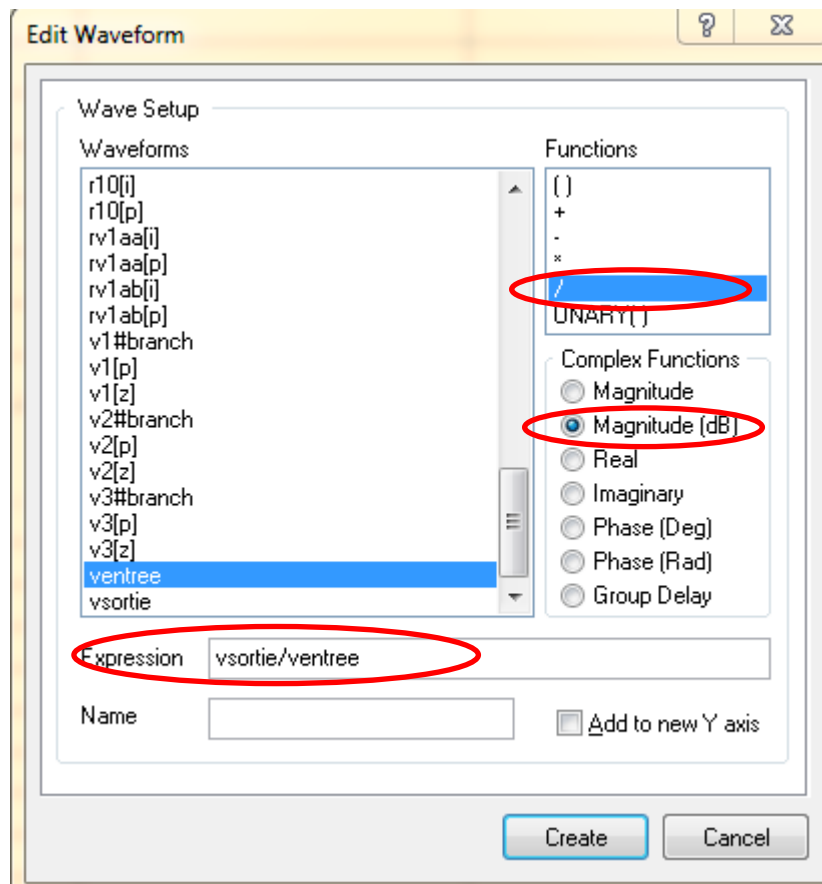
Vous devez obtenir par simulation la réponse en fréquence de ce filtre de la famille Butterworth.

Effectuez vos simulations fréquentielles (AC Analysis) de 1 Hz à 1 MHz en utilisant 30 points par décade. (Attention, pour Altium le suffixe « M » ou « m » pour les unités signifie « milli » et non « méga ». Vous devez donc indiquer 1 Meg pour la borne supérieure de votre simulation AC.)

Affichez les lieux de Bode d'amplitude (en dB) et de phase ainsi que le délai de groupe.

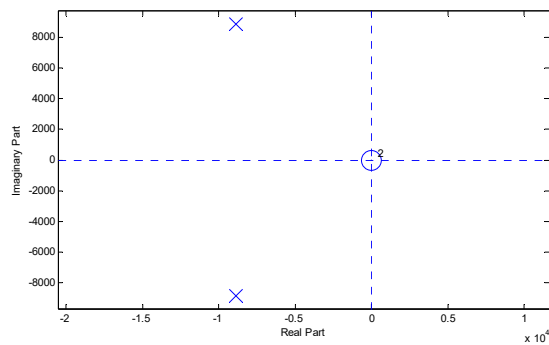
Note 1 : Lorsque l'on réalise une analyse fréquentielle (AC) avec Altium, la variable observée (ex. Vout) n'est pas divisée par le signal d'entrée du générateur (ex. Vin). Ceci signifie que si l'on veut obtenir la bonne réponse fréquentielle, soit le rapport V_{out}/V_{in} , il faudra spécifier une amplitude de 1 V et une phase de 0° pour les paramètres AC du générateur.

Note 2 : Dans le cas où l'on désire obtenir la réponse en fréquence d'un circuit se retrouvant en série avec d'autres circuits d'une chaîne électronique, utiliser la commande Place Net Label dans Altium pour nommer le nœud à l'entrée et à la sortie du circuit désiré. Il sera ainsi plus facile d'effectuer le rapport $V_{sortie}/V_{entrée}$ dans la fenêtre Edit Waveform, tel qu'illustré à la page suivante.



Lorsque vous aurez réalisé cette simulation, répondez aux questions suivantes :

- Est-ce un filtre passe-bas, passe-haut ou passe-bande?
- Quelle est la fréquence de coupure du filtre? Indice pour vous aider : puisqu'il s'agit d'un filtre de type Butterworth, utilisez un curseur sur le lieu de Bode de phase et trouvez la fréquence qui correspond à un déphasage de ...
- En analysant le lieu de Bode d'amplitude, quel est le gain dans la bande passante?
- En analysant le lieu de Bode d'amplitude, quel est le gain à la fréquence de coupure trouvée en b)?
- En analysant le lieu de Bode d'amplitude, quel est le gain une décade sous la fréquence de coupure?
- En analysant le lieu de Bode d'amplitude, quel est le gain à deux décades sous la fréquence de coupure?
- Suite aux réponses e) et f) ci-dessus, pouvez-vous déduire l'ordre du filtre? Expliquez.
- Quelle est la phase lorsque la fréquence tend vers l'infini? Comment l'expliquez-vous? Indice : Considérez la figure ci-dessous qui montre le lieu des pôles et des zéros de ce filtre et déterminez quelle est la contribution à la phase de chacun des pôles lorsque la fréquence tend vers l'infini.



- i) Quel est la variation du délai de groupe de ce filtre dans sa bande passante?

Question 3b

De plus, vous devez obtenir la réponse à un échelon de 1 Volt de ce filtre. Ensuite, répondez aux questions ci-dessous.

Questions sur la réponse à l'échelon :

- j) On remarque que le pulse à la sortie du filtre est inversé par rapport au front incident du signal d'entrée. Pourquoi?
- k) Expliquez qualitativement la forme du signal à la sortie du filtre à la lumière de la réponse en a).

Note 3 : L'approche suivante permet d'obtenir la réponse à un échelon de 1 Volt. Dans la librairie *Simulation Sources.IntLib* que l'on retrouve dans *W:\Altium\Simulation*, instancier la source *VPULSE*. Faire un double clic sur la source *VPULSE* pour accéder à ses propriétés, le modèle de simulation sélectionné est *Pulse*. Sous l'onglet *Parameters*, spécifier les paramètres de l'échelon. Voir exemple de la page suivante:

Properties

Voltage

Components (and 11 more)

Search

General

Designator

V1

Stimulus Name

VPULSE

Stimulus Type

Pulse

Hide preview

Parameters

All

Source

Stimulus

	Name	Value
🔍 🔒	DC Magnitude	0
🔍 🔒	AC Magnitude	1
🔍 🔒	AC Phase	0
🔍 🔒	Initial Value	0
🔍 🔒	Pulsed Value	1
🔍 🔒	Time Delay	
🔍 🔒	Rise Time	1n
🔍 🔒	Fall Time	1n
🔍 🔒	Pulse Width	2m
🔍 🔒	Period	5m
🔍 🔒	Phase	

Guide S2-APP6

30

14 Formation à la pratique procédurale 2

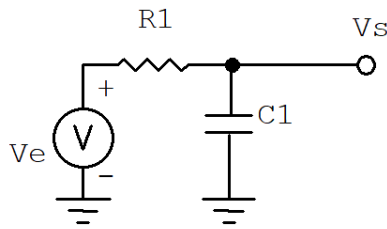
Buts de l'activité

On veut, ici, mettre en pratique les procédures requises pour :

- Déterminer la fonction de transfert d'un circuit formé de résistances, condensateurs et d'amplificateurs opérationnels pouvant être considérés comme idéals ;
- Tracer, à la main, les lieux de Bode d'un filtre d'ordre 1 ;
- À partir de ses lieux de Bode, déterminer la sortie en régime permanent d'un circuit à l'entrée duquel on applique une sinusoïde de fréquence, d'amplitude et de phase connues ;
- Établir, dans le plan complexe « s », la position des pôles et des zéros d'une fonction de transfert et, d'après leurs emplacements, en déduire les principales caractéristiques de la réponse en fréquence correspondante ;
- Simuler un circuit électronique avec Altium pour obtenir ses lieux de Bode d'amplitude et de phase, ainsi que son délai de groupe et sa réponse à un échelon ;

Problème préparatoire

Soit le circuit passif suivant :



- Avec $R1 = 4.7 \text{ k}\Omega$ et $C1 = 10 \mu\text{F}$, calculer la fonction de transfert $H(s)$ de ce circuit en sachant que $H(s) = V_s(s) / V_e(s)$. Donner aussi l'ordre de la fonction de transfert de ce circuit.
- En appliquant la transformée de Laplace inverse, calculer la réponse à l'échelon pour ce circuit ($V_e(t) = u(t)$), en supposant que le circuit est initialement au repos (courants et tensions initiaux nuls). Dessinez cette réponse temporelle.
- En posant $s = j\omega$ dans la fonction de transfert de ce circuit, obtenir sa fonction de transfert harmonique $H(j\omega)$. De quel type de filtre s'agit-il? Donner ensuite sa réponse $V_s(t)$, en régime permanent, si la tension d'entrée $V_e(t)$ a la forme :

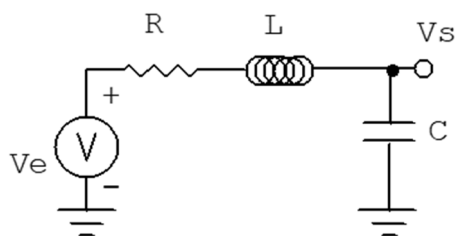
$$V_e(t) = 10 \cos(2\pi f t + \pi / 4)$$

La solution est sur le site web.

Énoncés des problèmes à résoudre

Problème no. 1

Soit le circuit RLC passif suivant :



où $R = 10\ \Omega$, $L = 10\text{ mH}$ et $C = 1\ \mu\text{F}$.

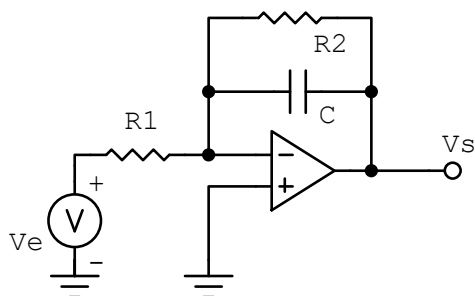
- (a) À l'aide de la méthode des impédances complexes, calculer la fonction de transfert $H(s) = V_s(s) / V_e(s)$ de ce circuit. Calculez et dessinez ensuite la carte des pôles et des zéros de ce circuit. Dire si le filtre est stable ou non.
- l) Appliquez la méthode géométrique pour obtenir, à partir de la carte des pôles et des zéros du filtre, le module et la phase de sa fonction de transfert harmonique $H(j\omega)$ pour ω variant entre 0 et 20 000 radians par seconde. Veillez à être le plus précis possible sur les axes (fréquence, amplitude et phase), en particulier lorsque ω est près d'un zéro ou d'un pôle et aux extrémités du graphique ($\omega = 0$ et $\omega = 20000$).
- m) Donner la réponse de ce circuit aux deux entrées suivantes (réponse en régime permanent) :

$$V_e(t) = 5 \text{ (DC d'amplitude 5 Volts)}$$

$$V_e(t) = 2 \cos(10\,000\,t - 0.3)$$

Problème no. 2

Soit le circuit suivant dans lequel l'ampli-op peut être considéré comme idéal :



- (a) Déterminer sa fonction de transfert harmonique

$$H(j\omega) = \frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}$$

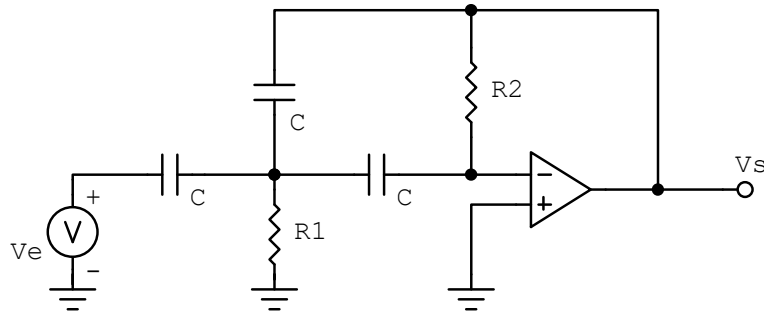
- n) Tracer, dans les grilles ci-dessous, les lieux de Bode d'amplitude et de phase approximatifs correspondant à cette fonction de transfert si $C = 33 \text{ nF}$, $R_1 = 976 \Omega$ et $R_2 = 9.76 \text{ k}\Omega$.



- o) De quel type de circuit s'agit-il? Donner la valeur des principaux paramètres qui servent normalement à décrire un tel type de circuit.
- p) Si $V_e(t) = 5 \sin(6000t + 30^\circ)$, donner la formulation mathématique de $V_s(t)$ en régime permanent.

Problème no. 3

Soit le circuit suivant dans lequel l'ampli-op peut être considéré comme idéal :



- (a) Déterminer sa fonction de transfert $H(s) = \frac{V_s(s)}{V_e(s)}$ en présentant son dénominateur sous la

forme standard $s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2$

Indice : Assumer que le nœud commun aux trois condensateurs et à R_1 est à la tension $V_x(s)$.

- q) Établir, dans le plan complexe « s », la position des pôles et des zéros de cette fonction de transfert. D'après leurs emplacements, à quel type de filtre avons-nous affaire ici?
- r) Obtenir, par simulation de 10 Hz à 100k Hz avec Altium, les lieux de Bode d'amplitude et de phase, ainsi que le délai de groupe, des trois filtres dont les valeurs des composants apparaissent en i), ii) et iii) ci-dessous. Observer aussi la réponse à un échelon de 1 Volt de chacun de ces filtres. Pour vos simulations, utiliser le modèle d'un ampli-op idéal de la librairie *Librairie_S2* disponible sur le site web de l'APP6.
- i) $C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = 3.74 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 16.9 \text{ k}\Omega$
 - ii) $C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = 5.9 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 17.4 \text{ k}\Omega$
 - iii) $C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = 2.94 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 23.7 \text{ k}\Omega$