

MATHÉMATIQUE DES SIGNAUX À TEMPS CONTINU
et
ÉLECTRONIQUE ANALOGIQUE 1

GUIDE DE L'ÉTUDIANT
S2- APP2

Hiver 2025 – Semaine 3 et 4

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

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

Version originale par André Clavet et Roch Lefebvre

Mise à jour par Claudette Légaré, Abdelaziz Ramzi et Alexandre Tessier, janvier 2020

Mise à jour par Roch Lefebvre, Abdelaziz Ramzi et Jean-Philippe Gouin, janvier 2021

Mise à jour par Roch Lefebvre, Haithem Bouziri et Jean-Philippe Gouin, janvier 2022

Mise à jour par Roch Lefebvre, Serge Apedovi Kodjo et Abdelaziz Ramzi, janvier 2023

Mise à jour par Roch Lefebvre, Serge Apedovi Kodjo, Abdelaziz Ramzi et JBM, janvier 2024 et 2025

©2025 Tous droits réservés. Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Sherbrooke.

TABLE DES MATIERES

1	ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES	1
2	SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION.....	1
3	QUALITÉS DE L'INGÉNIEUR.....	2
4	ÉNONCÉ DE LA PROBLÉMATIQUE	3
4.1	Consignes importantes :	10
5	CONNAISSANCES NOUVELLES.....	11
5.1	SYSTÈMES ET SIGNAUX (Pour le procédural 1 et le laboratoire).....	11
5.2	ÉLECTRONIQUE (Pour le procédural 2 et la validation en laboratoire).....	12
6	GUIDE DE LECTURE	13
6.1	Pour les exercices de mathématiques.....	13
6.2	Pour le Procédural 1	13
6.3	Pour le Laboratoire et le Procédural 2	14
6.4	Pour le Procédural 2	14
6.5	Pour la problématique.....	15
6.6	Notes de lecture	15
7	LOGICIELS ET MATÉRIEL	17
8	SANTÉ ET SÉCURITÉ.....	17
8.1	Dispositions générales.....	17
9	SOMMAIRE DES ACTIVITÉS.....	17
9.1	Semaine 1 :	17
9.2	Semaine 2 :	18
10	PRODUCTIONS À REMETTRE.....	19
10.1	Schéma de concept	19
10.2	Validation pratique de la solution en laboratoire	19
10.3	Contenu du rapport sur Teams	21
10.4	Livrables.....	22
11	ÉVALUATIONS.....	22
11.1	Évaluation de la validation	22
11.2	Évaluation du rapport.....	22
11.3	Évaluation sommative de l'unité	25
11.4	Évaluation sommative finale	25
11.5	Utilisation responsable de l'IAG	25
12	POLITIQUES ET RÈGLEMENTS	26
13	INTÉGRITÉ, PLAGIAT ET AUTRES DÉLITS	26
14	PRATIQUE PROCÉDURALE 1.....	27
14.1	Exercices préparatoires	27
14.2	Exercices du procédural 1.....	27
15	LABORATOIRE.....	30
15.1	Exercices du laboratoire	31
16	PROCÉDURALE 2	35
16.1	Exercices préparatoires	35
16.2	Exercices du procédural 2.....	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma-bloc du circuit	5
---	---

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse de l'évaluation de l'unité.....	1
Tableau 2 : Tableau des qualités de l'ingénieur	2
Tableau 3 : Grille d'évaluation de la validation	23
Tableau 4 : Grille d'évaluation du rapport	24

1 ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES

GEN211 – Mathématique des signaux à temps continu

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

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

GEN230 – Électronique analogique

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/>

2 SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION

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

Évaluation	GEN211-1	GEN211-2	GEN230-1	GEN230-2
Rapport d'APP et livrables associé	25		15	19
Validation de l'APP		12	5	28
Évaluation sommative théorique	128		55	66
Évaluation sommative pratique		38	24	
Évaluation finale théorique	150	33	75	105

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 :

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

Tableau 2 : 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

Contact ?

C'est enfin arrivé ! Après plusieurs années d'existence, le SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence) a finalement identifié un signal ne s'apparentant pas à un bruit aléatoire. Les premières analyses révèlent qu'il s'agit d'une sinusoïde à **5 kHz** accompagnée de bruit. Cependant, en l'analysant plus en détail, on y a également détecté d'infimes fluctuations de fréquence, pratiquement inaudibles, de l'ordre de **$\Delta f = 15$ Hz**.

Vous venez de recevoir du SETI le mandat de développer un circuit électronique rendant audibles ces fluctuations de fréquence afin d'analyser ce signal pour déterminer son contenu et son origine. Dans ce but, des fichiers audios en format WAV contenant des échantillons de ce signal ont été placés sur le site de la session.

Vous ne partez pas de zéro. Certains de vos collègues seniors ont réfléchi au problème et vous proposent le schéma-bloc de la figure 1, avec les explications suivantes :

Le circuit réalisé sera tel que, en lui soumettant le signal du SETI en entrée, on aura en sortie : soit rien du tout si l'entrée est une sinusoïde à **5 kHz**, soit une tonalité audible si l'entrée est une sinusoïde à **$(5k + \Delta f)$ Hz**.

Si on multiplie le signal utile capté **X**, c'est-à-dire la sinusoïde à **5 kHz** ou celle à **$(5k + \Delta f)$ Hz** par une sinusoïde **Y** générée localement de fréquence égale à **$(5k \pm \epsilon)$ Hz**, où $\pm \epsilon$ représente l'erreur sur le réglage de la fréquence, on obtient les signaux suivants à la sortie du multiplicateur de gain égal à 3 (le gain est propre au circuit donné) :

Lorsque $X = A \cdot \sin[2\pi \cdot 5000 \cdot t]$ et $Y = B \cdot \sin[2\pi \cdot (5000 \pm \epsilon) \cdot t]$,

Alors, $3 \cdot X \cdot Y = 3(AB/2) \cdot \cos[2\pi \cdot \mp \epsilon \cdot t] - 3(AB/2) \cdot \cos[2\pi \cdot (10000 \pm \epsilon) \cdot t]$

Sinon, lorsque $X = A \cdot \sin[2\pi \cdot (5000 + \Delta f) \cdot t]$ et $Y = B \cdot \sin[2\pi \cdot (5000 \pm \epsilon) \cdot t]$,

Alors, $3 \cdot X \cdot Y = 3(AB/2) \cdot \cos[2\pi \cdot (\Delta f \mp \epsilon) \cdot t] - 3(AB/2) \cdot \cos[2\pi \cdot (10000 + \Delta f \pm \epsilon) \cdot t]$

En réduisant d'au moins un facteur 100 l'amplitude de la sinusoïde de fréquence élevée (**10 kHz**) dans le signal **$3 \cdot X \cdot Y$** , à l'aide d'un filtre passe-bas branché à la sortie du multiplicateur, le signal à la sortie de ce filtre sera essentiellement soit une sinusoïde non désirée de très basse fréquence (**ϵ Hz**), soit la sinusoïde désirée de fréquence **$(\Delta f \pm \epsilon)$ Hz** dont on veut identifier la présence par une tonalité de **1 kHz** en sortie du circuit.

Si on n'atténue pas fortement la sinusoïde non désirée de très basse fréquence (**ϵ Hz**), celle-ci, qui est due à l'erreur de réglage, va éventuellement entraîner une fausse détection comme s'il s'agissait de la sinusoïde de fréquence **$(\Delta f \pm \epsilon)$ Hz** que l'on veut détecter. On utilise donc un filtre passe-haut pour l'atténuer le plus possible, tout en affectant de façon minimale (**10%** ou moins) la sinusoïde désirée de fréquence, **$(\Delta f \pm \epsilon)$ Hz**, lorsqu'elle est présente. Ce filtre passe-haut doit être isolé du filtre passe-bas afin de pouvoir ajuster facilement de façon indépendante les fréquences de coupure à **-3 dB** de chacun de ces deux filtres. Pour réaliser cette isolation, il convient d'utiliser un amplificateur opérationnel dont la configuration optimale pour cette application reste à être déterminée.

Dans le but de faire entendre une tonalité de **1 kHz** lorsqu'il y a une sinusoïde de fréquence **$(\Delta f \pm \epsilon)$ Hz** à la sortie du filtre passe-haut, ce signal est d'abord redressé en double alternance pour donner, lorsqu'il est présent, un signal périodique unipolaire de fréquence **$2(\Delta f \pm \epsilon)$ Hz**.

En faisant passer ce signal dans un réseau **RC** passe-bas passif d'ordre 1, avec une constante de temps judicieusement choisie à l'aide d'une opération de convolution, on obtient en sortie un signal unipolaire qui évolue entre une tension maximale et une tension minimale, cette dernière valant environ la moitié de la valeur de la tension maximale. Ceci permet à un comparateur de détecter de façon continue la présence de la sinusoïde de fréquence $(\Delta f \pm \epsilon)$ Hz et de commander la fermeture d'un interrupteur analogique, laissant ainsi passer une sinusoïde facilement audible de **1 kHz** générée localement. Cette dernière est ensuite amplifiée linéairement par un transistor bipolaire monté en collecteur commun et chargé, à sa sortie, par un canal d'un casque d'écoute stéréo d'impédance de 32 Ω .

En accord avec la théorie des séries de Fourier portant sur les signaux périodiques, les sinusoïdes requises pour faire fonctionner ce circuit sont extraites d'une onde carrée périodique de fréquence réglée avec précision à **1 kHz**. Cette onde carrée, riche en harmoniques, est générée par un circuit oscillateur 555 monté en astable. Pour extraire les sinusoïdes à **1 kHz** et à **5 kHz** requises, on utilise des filtres passe-bande actifs d'ordre 2 dont les fréquences centrales f_0 , les facteurs de qualité **Q** et les gains **K** doivent être judicieusement choisis. Un régulateur de tension à diode Zener, branché à la sortie de l'oscillateur, permet de fixer l'amplitude de l'onde carrée, donc l'amplitude des harmoniques à la sortie des filtres passe-bande.

La conception du circuit électronique est assez avancée (voir **Annexe A**). Il reste cependant à déterminer la valeur de certains composants dans chacun des blocs non gris de la **figure 1**. Pour vous assister dans ce travail, vos collègues vous ont laissé, à l'**annexe B**, des instructions sur les développements encore à faire avant d'obtenir un circuit fonctionnel. Pour l'amplificateur collecteur commun qui amplifiera la puissance du signal pour le délivrer au casque d'écoute, vos collègues ont déjà déterminé qu'il fallait utiliser les valeurs suivantes pour les résistances **R₃** et **R₄** dans le circuit de l'**annexe A** : **R₃ = 1.8 k Ω** et **R₄ = 820 Ω** en utilisant des résistances à **5%**.

Une fois le design finalisé, vous serez en mesure de compléter le circuit imprimé qui vous aura été remis et vous pourrez ensuite vous en servir pour étudier le signal reçu afin d'en tirer vos propres conclusions.

Les initiateurs du projet ont tiré le schéma du redresseur actif double alternance d'un recueil de circuits dans lequel son principe d'opération n'était pas expliqué. Ils vous lancent donc le défi de rédiger, en moins d'une page, une explication concise du mode de fonctionnement de ce circuit. (Indice : considérez séparément les alternances positive et négative du signal d'entrée).

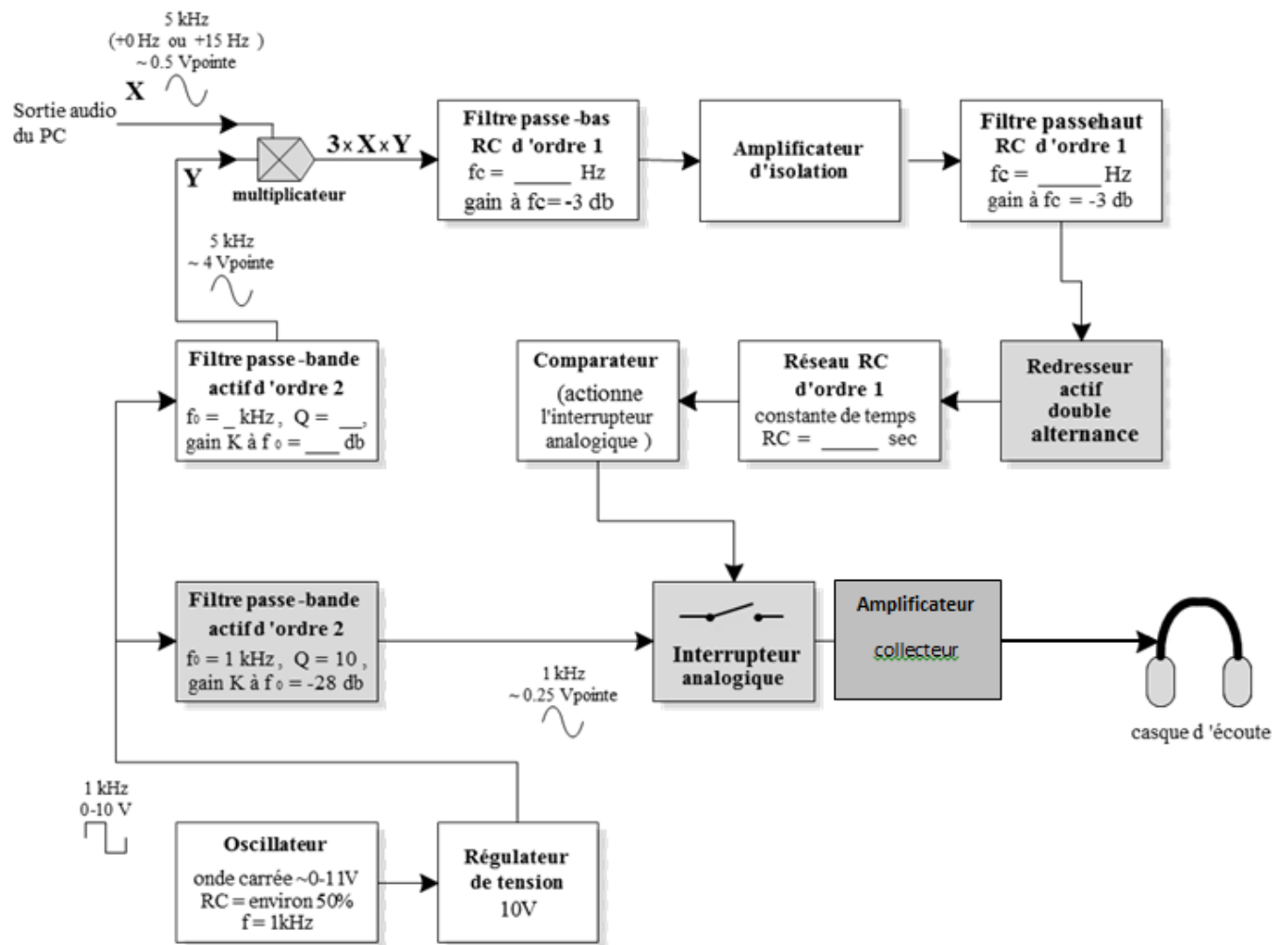
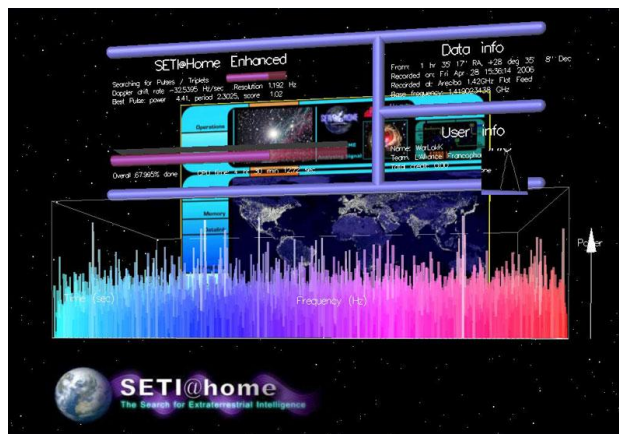


Figure 1 : Schéma-bloc du circuit

L'Institut SETI :

Founded in November 1984, the SETI Institute (www.seti.org) began operations on February 1, 1985. Today it employs over 150 scientists, educators and support staff. The mission of the SETI Institute is to explore, understand and explain the origin, nature and prevalence of life in the universe.

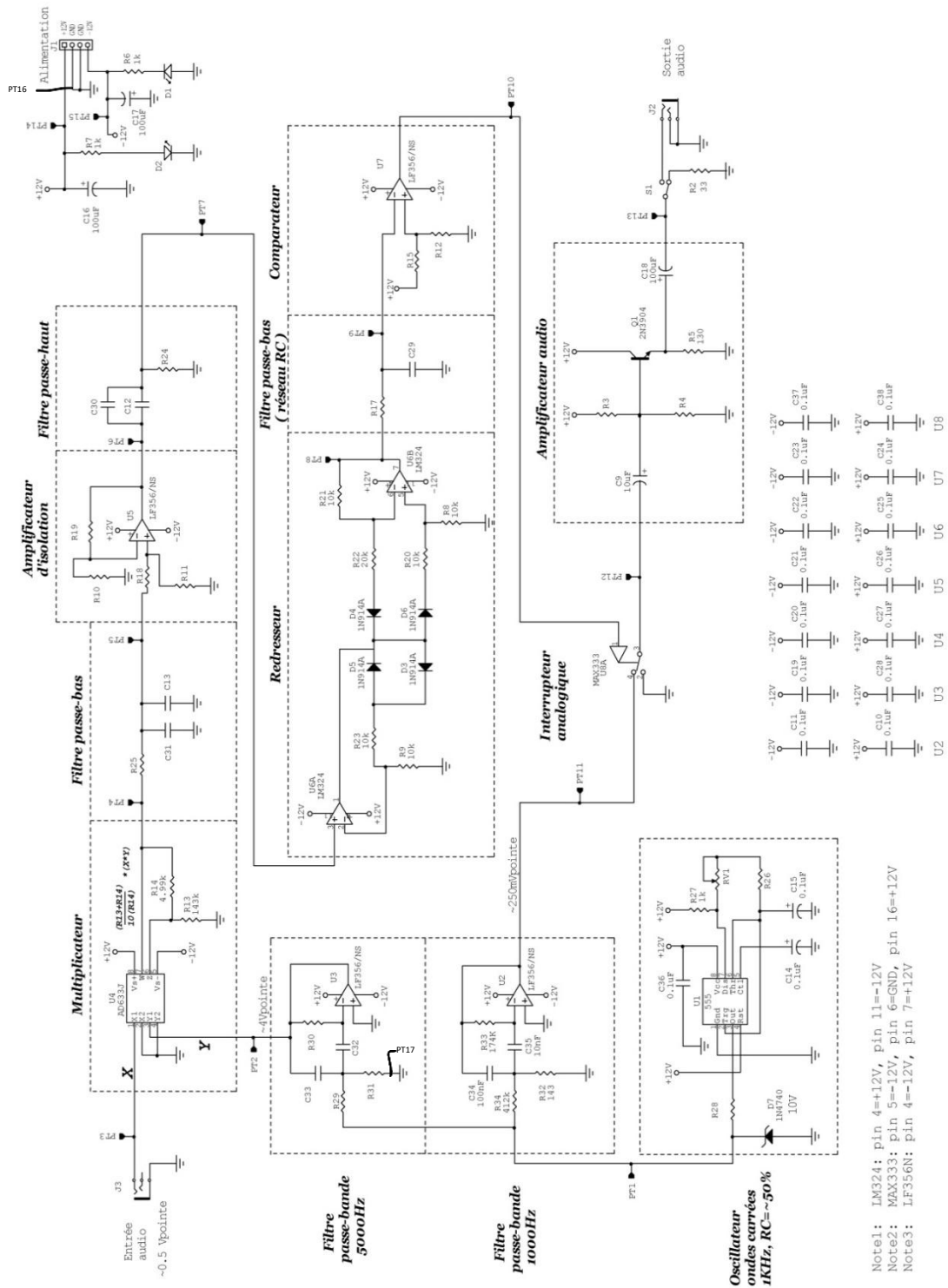
- Logiciel de fond d'écran qui vous permet de contribuer à l'analyse des données SETI (pas obligatoire pour l'APP) :
SETI@home (setiathome.berkeley.edu) is a scientific experiment that uses Internet-connected computers in the Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI). You can participate by running a free program that downloads and analyzes radio telescope data.



- Contact* (1997), un bon film sur la problématique de l'APP2...



ANNEXE A : SCHÉMA ÉLECTRONIQUE DU CIRCUIT



Note : Les condensateurs C10, C11, C14, C16, C17, C19 à C28, C37 et C38 sont des condensateurs de filtrage. Ils servent à éliminer le bruit à basses fréquences (100µF) et hautes fréquences (0.1µF) des bus d'alimentation. On positionne ces derniers (0.1µF) à proximité de chacun des circuits intégrés. Lors du design d'un nouveau circuit, n'oubliez pas d'inclure ces composants essentiels à un bon fonctionnement de votre circuit.

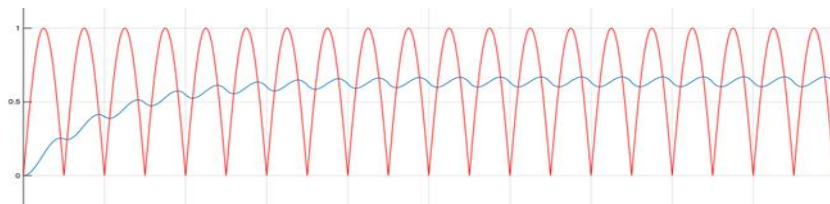
ANNEXE B : INSTRUCTIONS POUR LA SUITE DU DÉVELOPPEMENT

1. Déterminez, pour les trois blocs RC (filtres) passifs d'ordre 1, les paramètres f_c (fréquence de coupure) ou τ (constante de temps). Travaillez dans le domaine fréquentiel pour les deux premiers et dans le domaine temporel (convolution) pour le 3ième en amont du comparateur.

Notes :

- L'expérimentation a démontré que l'on arrivait à régler l'oscillateur 555 de façon à obtenir une précision à court-terme ϵ de l'ordre de 1 Hz ou mieux.
- Pour le filtre RC en amont du comparateur, le rôle du circuit est de transformer un signal de sinus redressé (courbe rouge dans la figure ici-bas) en une « pseudo-DC » (courbe bleue dans la figure ici-bas) qui fera déclencher le comparateur seulement en présence du signal Δf et qui sera suffisamment réactif pour revenir rapidement à une sortie nulle une fois le signal Δf disparu.
 - Si la constante de temps du filtre est trop faible, le filtre sera trop réactif et aura peu d'effet.
 - Si la constante de temps est trop importante, la réponse du filtre sera trop lente et le décodage du message sera incorrect lors de changements rapides dans le signal binaire (bits manquées).

Concevez un script Python pour calculer, avec la convolution et la réponse impulsionnelle d'un circuit RC, la constante de temps optimale pour un signal d'entrée normalisé comme dans la figure ici-bas. Au besoin, ajustez vos résultats selon l'amplitude réelle du signal d'entrée mesurée dans le circuit. Cependant, comme on s'intéresse ici à la réponse temporelle du circuit dans sa plage linéaire, la constante de temps optimale devrait être indépendante de l'amplitude du signal d'entrée.



Indice : la durée d'un « bit » d'information dans le signal SETI étant de 120 ms, le signal en sortie du filtre RC devra s'être stabilisé dans un intervalle de temps inférieur.

2. Sachant que la fonction de transfert harmonique des filtres passe-bande actifs d'ordre 2 qui se trouvent sur le schéma est :

$$H(f) = \frac{-K}{1 + jQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$$

déterminez les paramètres f_0 , Q et K du filtre chargé d'extraire la 5ième harmonique de l'onde carrée pour que l'amplitude de la sinusoïde à la sortie soit de $4 V_{\text{pointe}}$ et que l'amplitude des autres harmoniques soit inférieure d'au moins 15 dB à celle de la 5ième harmonique. Séquence suggérée : connaissant f_0 , déterminez avec une analyse de Fourier de l'onde carrée le gain K requis pour rencontrer la contrainte de $4 V_{\text{pointe}}$, où $K = |H(f_0)|$. Ensuite, déterminez Q pour rencontrer la contrainte de 15 dB. NB : la valeur minimale calculée de Q pour rencontrer la contrainte est normalement inférieure à 10. Cependant, nous vous recommandons d'utiliser une valeur plus élevée, entre 10 et 14, afin de ne pas atteindre les limites de l'ampli-op.

3. Si on fait l'hypothèse que l'ampli-op se comporte de façon idéale et que l'on analyse ce filtre passe-bande actif d'ordre 2 pour obtenir sa fonction de transfert en fonction des composants du filtre, on en déduit, par

comparaison avec la fonction de transfert précédente, les expressions suivantes de K, Q et f_0 en fonction de C_{32} , C_{33} , R_{29} , R_{30} et R_{31} .

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_{30}C_{32}C_{33}} \left(\frac{1}{R_{29}} + \frac{1}{R_{31}} \right) \quad \frac{\omega_0}{Q} = \frac{(C_{32} + C_{33})}{R_{30}C_{32}C_{33}} \quad K = \frac{R_{30}C_{32}}{R_{29}(C_{32} + C_{33})}$$

4. Donner une valeur à chacune des trois résistances R_{29} , R_{30} et R_{31} en fixant d'abord à 1 nF la valeur de chacun des deux condensateurs C_{32} et C_{33} .
5. Déterminer, pour chacun des trois filtres passifs RC d'ordre 1, les valeurs de la résistance et du condensateur. On vous recommande des résistances autour de 10 k Ω afin d'arriver à des valeurs raisonnables des condensateurs. Les arrangements parallèle C_{13}/C_{31} et C_{12}/C_{30} ne sont là que pour faciliter le branchement, au besoin seulement, de deux condensateurs en parallèle pour obtenir un condensateur de capacité égale à la somme des capacités.
6. Déterminer la valeur de la résistance R_{26} et du potentiomètre R_{V1} afin que l'oscillateur génère un train d'ondes carrées à 1 kHz, avec un rapport cyclique ¹ d'environ 50%, et que sa fréquence soit ajustable d'environ $\pm 5\%$ autour de 1 kHz. Un ajustement précis de la fréquence de sortie de l'oscillateur est crucial pour le bon fonctionnement du circuit.
7. ATTENTION : LA FRÉQUENCE DE L'ONDE CARRÉE DOIT ÊTRE PRÉCISE À MOINS DE 1 Hz, SINON LE CIRCUIT NE FONCTIONNERA PAS ! VÉRIFIEZ LA FRÉQUENCE RÉELLE DE L'ONDE CARRÉE À L'OSCILLOSCOPE (1.000xx kHz) EN AJUSTANT LE POTENTIOMÈTRE AU BESOIN.
8. Régulateur de tension à base de diode Zener : mettez une résistance de 360 ohms pour R_{28} ce qui vous donnera entre 3 à 4 mA dans la diode pour une régulation de tension adéquate. Une valeur plus basse de résistance risque de poser problème avec les filtres passe-bande en aval.
9. Réaliser l'amplificateur d'isolation situé entre le filtre passe-haut et le filtre passe-bas. Vérifier, par simulation, que cet amplificateur rend bien les deux filtres indépendants l'un de l'autre. Par exemple, pour le filtre passe-bas, comparer ses réponses en fréquences lorsque le filtre passe-haut y est branché, sans et avec l'amplificateur d'isolation. Les résistances R_{10} , R_{11} , R_{18} et R_{19} peuvent être un court-circuit, une résistance de valeur fixe, ou un circuit ouvert.
10. Déterminer la tension de déclenchement du comparateur et spécifier la valeur des résistances R_{12} et R_{15} requises pour l'obtenir.
11. Vous devrez installer vous-même les résistances R_3 et R_4 calculées par vos collègues pour l'étage d'amplification à transistor (voir l'énoncé de la problématique pour leur valeur).

¹ En anglais on parle de « duty cycle » ; c'est le rapport entre la durée, au cours d'une période du train d'ondes carrées, d'un niveau élevé du signal et la durée totale d'une période. Attention, c'est quelquefois la durée d'un niveau bas qui est ainsi spécifiée (ex. fiche technique du LM555 de *National Semiconductor*).

4.1 Consignes importantes :

Assurez-vous, sous peine de pénalités, de bien respecter les consignes suivantes :

Nous vous demandons de vous regrouper vous-mêmes en groupes collaboratifs de **deux personnes**. Inscrivez votre équipe sur le site de la session faute de quoi on ne peut vous distribuer de matériel.

Un étudiant de chaque groupe collaboratif doit ensuite aller chercher le matériel de l'APP2, soit un circuit imprimé, un câble et quelques composants, au local des techniciens du département de génie électrique et de génie informatique. Consultez Horarius pour la date et l'heure de distribution.

Vous devez insérer les composants suivants dans les connecteurs prévus à cet effet sur le circuit imprimé :

- R_5 (130 Ω)
- R_{13} (143 k Ω)
- R_{14} (4.99 k Ω)
- R_{27} (1 k Ω)
- C_{15} (0.1 μ F)
- C_{32} (1 nF)
- C_{33} (1 nF)

Quant aux autres composants manquants, vous avez d'abord à déterminer leurs valeurs dans le cadre de la solution de la problématique.

Vous disposez de résistances 5% dans les laboratoires C1-3018 et C1-3024 (toutes les valeurs), et de résistances 1% dans le laboratoire C1-3018 (toutes les valeurs comprises entre 1 k Ω et 1 M Ω , ainsi que quelques valeurs en dehors de cette plage).

Vous disposez aussi, dans un sac remis avec le circuit imprimé, de deux condensateurs de précision (2%) de 1nF (C_{32} , C_{33}) ainsi que de dix condensateurs 5%, soit un de 0.1 μ F (C_{15}), cinq de 1 μ F, et un de chacune des valeurs suivantes : 0.68 μ F, 0.47 μ F, 0.33 μ F et 0.22 μ F.

Également dans ce sac, vous disposez finalement de trois potentiomètres multi-tours de 500 Ω , 1 k Ω et 2 k Ω .

Ces pièces et le circuit imprimé doivent être retournés au groupe technique (la date sera affichée sur Horarius). Vous êtes priés de retirer les composants que vous avez ajoutés. Remettez les condensateurs et les potentiomètres dans le sac de composants et gardez les résistances pour vous.

Les blocs d'alimentation ± 12 V requis pour faire fonctionner vos circuits seront disponibles dans les laboratoires C1-3014, C1-3016, C1-3018 et C1-3024.

5 CONNAISSANCES NOUVELLES

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

Connaissances déclaratives (QUOI ?) :

- Nombres complexes, théorème d'Euler et exponentielles complexes.
- Propriétés des sinusoïdes.
- Manipulation des signaux.
- Convolution.
- Séries de Fourier, définition et propriétés.
- Analyse fréquentielle de signaux périodiques.
- Les fonctions de transfert (harmoniques).
- Modulation d'amplitude vue dans les domaines du temps et des fréquences.

Connaissances procédurales (COMMENT?) :

- Procédure pour obtenir graphiquement le résultat de la convolution de deux signaux simples à temps continu.
- Procédure pour obtenir, par simulation PYTHON, le résultat de la convolution de deux signaux à temps continu.
- Procédure pour obtenir, par simulation PYTHON, la réponse impulsionnelle d'un système à temps continu.
- Procédure pour obtenir les coefficients de la série de Fourier d'une onde carrée périodique.
- Procédure pour obtenir la réponse en régime permanent d'un circuit linéaire soumis à une excitation périodique en décomposant le signal périodique en série de Fourier.
- Procédure pour obtenir, par simulation PYTHON, les coefficients de la série de Fourier d'un signal périodique à temps continu.
- Procédure pour obtenir, par simulation PYTHON pour un circuit linéaire décrit par sa fonction de transfert harmonique, son gain et son déphasage en fonction de la fréquence.

Connaissances conditionnelles (QUAND?) :

- Quand utiliser les outils de simulation numérique comme PYTHON dans l'analyse des systèmes et des signaux à temps continu.

5.2 ÉLECTRONIQUE (Pour le procédural 2 et la validation en laboratoire)

Connaissances déclaratives (QUOI ?) :

- La sinusoïde.
- Les phaseurs.
- Les impédances complexes.
- Notions de séries de Fourier et de filtres.
- Les fonctions de transfert (harmoniques).
- Filtres d'ordre 1, RC et RL, passe-bas et passe-haut.
- Réponse en fréquences des filtres d'ordre 2.
- La diode et ses modèles.
- La diode Zener.
- Les circuits redresseurs.
- Analyse d'un circuit avec ampli-op idéal.
- Familiarisation avec les dispositifs électroniques suivants : oscillateur de type 555, multiplicateur, comparateur, interrupteur analogique, régulateur de tension, amplificateur d'isolation.

Connaissances procédurales (COMMENT?) :

- Procédure pour faire la conception d'un circuit de régulation de tension à diode Zener.
- Procédure pour faire la conception d'un réseau passif RC d'ordre 1 à partir de spécifications dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel.
- Procédure pour obtenir la fonction de transfert harmonique d'un circuit comprenant des amplificateurs opérationnels considérés comme idéals.
- Procédure pour obtenir, par simulation Altium, les réponses en fréquences d'amplitude et de phase d'un circuit linéaire.

Connaissances conditionnelles (QUAND?) :

- Quand écrire les spécifications d'un circuit dans le domaine temporel plutôt que dans le domaine fréquentiel.
- Quand remplacer un condensateur de valeur C par une impédance de valeur $1/j\omega C$ et une inductance de valeur L par une impédance de valeur $j\omega L$.

6 GUIDE DE LECTURE

6.1 Pour les exercices de mathématiques

Dans les notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu », du professeur Lefebvre. Ces notes de cours sont disponibles en format PDF et interactive sur le site de la session :

Section « Nombres complexes » (8 pages)

Section « Notions de Systèmes et Signaux » (21 pages)

On vous invite également à consulter l'annexe A des mêmes notes de cours ainsi que le document complémentaire sur les nombres complexes du professeur Bérubé Lauzière sur les nombres complexes.

Tentez ensuite de résoudre, les exercices dont l'énoncé sera donné sur le site de la session.

6.2 Pour le Procédural 1

- Sections dans les notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu », du professeur Roch Lefebvre.

Section « Les séries de Fourier » (34 pages)

Section « Fonctions de transfert harmoniques » (11 Pages)

- Volume « *Electrical Engineering – Principles and Applications* », 6 ou 7^{ème} édition, de Hambley

- Chap. 4

- 4.1 Circuits RC d'ordre 1 (**Révision**)

- Chap. 5

- 5.1 Courants et tensions sinusoïdaux

- 5.2 Phaseurs (**voir note de lecture 1**)

- 5.3 Impédances complexes (**voir note de lecture 2**)

- Chap. 6

- 6.1 Analyse de Fourier, filtres et fonctions de transfert

- 6.2 Filtres passe-bas d'ordre 1

- 6.5 Filtres passe-haut d'ordre 1 (sans la section sur les lieux de Bode)

- 6.7 Résonance parallèle (**voir note de lecture 3**)

- Afin de bien maîtriser ces nouveaux concepts et afin de bien vous préparer pour le premier procédural, il est fortement suggéré de résoudre au minimum :

- Annexes E des notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu » sur les séries de Fourier à la page 246: 6.1-3 (a), (b) et (c), 6.2-3, 6.2-2 (a), (b) et (c), 6-2.9.

- Hambley:
 - 7^{ème} édition : exercices E5.4, P5.46, P6.8, P6.15, P6.25, P6.65, P6.79.
 - 6^{ème} édition : exercices P5.4, P5.40, P6.8, P6.17, P6.26, P6.65, P6.79.
- Notez que vous trouverez dans l'annexe B des notes de cours (Pages 222 à 231) des tables de formules mathématiques qui vous serviront tout au long de la session. Apprenez à les utiliser lors de vos résolutions d'exercices car ces tables vous seront fournies lors des examens sommatifs couvrant cette matière.

6.3 Pour le Laboratoire et le Procédural 2

- Sections dans les notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu », du professeur Roch Lefebvre.
 - Section « La convolution » (**voir note de lecture 6**) (41 Pages)
- Afin de bien maîtriser ces nouveaux concepts, et afin de bien vous préparer au laboratoire, il est fortement suggéré de résoudre au minimum les problèmes suivants :
 - Annexe D sur la convolution dans les notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu » à la page 242: 2.4-13 (c), 2.4-13 (d), 2.4-4 (a) et (b).
- Notez que vous pouvez vérifier vos réponses avec PYTHON, en comparant la forme du signal obtenu par convolution mathématique (expression analytique) et la forme du signal obtenu en approximant la convolution numériquement dans PYTHON (voir notes de cours sur PYTHON). Vous pouvez aussi utiliser la table de convolution à la page 231 des notes de cours (Annexe B).

6.4 Pour le Procédural 2

Volume « *Electrical Engineering – Principles and Applications* », 7^{ème} édition, de Hambley

- Chapitre 9
 - 9.1 Concepts de base sur les diodes (**Révision**)
 - 9.2 Analyse de la ligne de charge (**Révision**)
 - 9.3 Régulateurs de tension à diode Zener (**Révision**)
 - 9.4 Modèle idéal de diode (**Révision**)
 - 9.5 Modèles linéarisés par morceaux (« *piecewise linear* ») des diodes
 - 9.6 Circuits de redressement

- Chapitre 13
 - 13.1 Amplificateurs opérationnels idéaux (**voir notes de lecture 4-5**) (**Révision**)
 - 13.2 Amplificateur inverseur (**Révision**)
 - 13.3 Amplificateur non-inverseur (**Révision**)

Volume « *Electrical Engineering – Principles and Applications* », 6^{ème} édition, de Hambley

- Chapitre 10
 - 10.1 Concepts de base sur les diodes (Révision)
 - 10.2 Analyse de la ligne de charge (Révision)
 - 10.3 Régulateurs de tension à diode Zener (Révision)
 - 10.4 Modèle idéal de diode (Révision)
 - 10.5 Modèles linéarisés par morceaux (« piecewise linear ») des diodes
 - 10.6 Circuits de redressement
- Chapitre 14
 - 14.1 Amplificateurs opérationnels idéaux (**voir notes de lecture 4-5**) (Révision)
 - 14.2 Amplificateur inverseur (**Révision**)
 - 14.3 Amplificateur non-inverseur (**Révision**)
- Pour maîtriser les concepts introduits dans ces sections du volume de Hambley, il est essentiel de les mettre en pratique en solutionnant les exercices préparatoires 3 et 4 dans ce Guide (Section exercices préparatoires) et quelques-uns des problèmes présentés à la fin de chacun des chapitres. Il est important de solutionner au minimum les exercices P9.33, P9.37, P9.54 et P13.10 de la 7^{ème} édition, ou les exercices P10.30, P10.36, P10.55 et P14.9 de la 6^e édition. Les réponses des problèmes précédés d'un astérisque ainsi que les solutions complètes des exercices proposés à l'intérieur de chaque chapitre sont disponibles sur le site de Hambley avec le code qui accompagne le volume.

6.5 Pour la problématique

- Fiches techniques de l'amplificateur opérationnel LM324, de l'amplificateur opérationnel LF356, du multiplieur AD633, de la diode 1N4148, de la diode Zener 1N4740, de l'interrupteur analogique MAX333, de l'oscillateur LM555, des condensateurs de précision (polypropylène) KP460-464 et des condensateurs 5% (polyester) BC-36X. Ces fiches sont disponibles sur le site web de la session.

6.6 Notes de lecture

note 1. L'essentiel de cette section est que, dans le contexte des circuits linéaires, il est possible de représenter une sinusoïde, de fréquence connue, uniquement par son amplitude et par sa phase puisque ce sont les seuls paramètres qui seront différents, en régime permanent, entre la sortie d'un système, soumis à une excitation sinusoïdale, et son entrée. On y voit aussi comment cette notation particulière conduit à une représentation vectorielle dans le plan complexe. Attention, toutes les sinusoïdes représentées sur le même diagramme des phaseurs sont de même fréquence.

note 2. L'essentiel de cette section, d'une **importance capitale**, est que, en régime permanent, vu par une sinusoïde de fréquence angulaire ω (**attention**, on fait souvent l'erreur d'oublier que $\omega = 2\pi f$), un

condensateur de valeur C apparaît comme « une résistance » (on dit « une impédance ») de valeur $1/j\omega C$ et une inductance de valeur L apparaît comme « une impédance » de valeur $j\omega L$.

note 3. S'intéresser surtout à l'influence du facteur de qualité Q sur l'allure de la courbe de réponse en fréquences d'un passe-bande d'ordre 2 ainsi qu'à la relation entre la bande passante B , la fréquence centrale f_0 et le facteur de qualité Q .

note 4. Il est important de bien connaître les caractéristiques d'un amplificateur opérationnel (ampli-op) idéal parce que lorsque le design d'un circuit avec ampli-op est bien fait, le circuit se comporte exactement comme si l'ampli-op était idéal.

Bien entendu un ampli-op réel n'offre pas des caractéristiques idéales, et ce même si les versions de dernières générations présentent des gains de l'ordre de 10^6 et des résistances d'entrée et de sortie de l'ordre respectivement de plus de $10^{12} \Omega$ et de moins de 100Ω . Le défi du design d'un circuit avec ampli-op, pour une application donnée, consiste donc à sélectionner un ampli-op et à donner aux composants externes à celui-ci des valeurs telles que ses imperfections n'aient pas d'impact sur le fonctionnement du circuit. De cette façon, tous les exemplaires qui seront fabriqués de ce circuit, présenteront les mêmes caractéristiques et celles-ci varieront peu ou pas en présence de phénomènes qui pourraient affecter l'ampli-op comme les variations des caractéristiques d'un ampli à un autre, le vieillissement ou les fluctuations de température.

Ceci signifie donc qu'un circuit avec ampli-op dont le design aura été bien fait devra être analysé en considérant que l'ampli-op est idéal, d'où l'importance de bien connaître les caractéristiques d'un ampli-op idéal et la méthode d'analyse qui en découle.

note 5. Une méthode extrêmement rapide et efficace pour analyser un circuit avec ampli-op idéal avec contre-réaction négative consiste à appliquer deux contraintes qui découlent des caractéristiques d'un tel ampli-op. Il s'agit de ses courants d'entrée i_i , c.à.d. les courants qui circulent entre sa borne d'entrée +, sa borne d'entrée – et la masse, qui sont nuls à cause de son impédance d'entrée infinie. La deuxième contrainte est sa tension d'entrée différentielle v_i qui est nulle à cause de son gain différentiel infini, ce qui signifie que la tension à sa borne d'entrée + est la même que celle à sa borne d'entrée –. Hambley appelle ces contraintes « Summing point constraint ».

note 6. Pour effectuer la convolution requise par la problématique, vous aurez besoin de la réponse impulsionnelle d'un filtre RC passe-bas. On peut obtenir facilement cette dernière en effectuant, par exemple, une transformée de Laplace inverse sur la fonction de transfert en « s » du filtre en question. Mais comme la transformée de Laplace ne sera couverte qu'à l'APP6, utilisez directement la formulation de la réponse impulsionnelle $h(t)$ qui vous est donnée, sous forme symbolique, à la page 112 des notes de cours « Mathématiques des systèmes et signaux à temps continu » (Section sur la convolution).

Notez qu'il existe d'autres techniques que celle de la transformée de Laplace pour déterminer la réponse impulsionnelle d'un circuit. Vous pouvez, par exemple, recourir à vos compétences développées en S1 pour déterminer la réponse complète du circuit en question à une entrée unitaire DC appliquée en $t=0$, c'est ce que l'on appelle la « réponse à l'échelon » et ensuite, puisque la dérivée

d'un échelon unitaire est une impulsion de Dirac, dériver cette réponse pour obtenir la réponse impulsionnelle du circuit. Pourquoi ne pas essayer cette méthode ?

7 LOGICIELS ET MATÉRIEL

- Le langage PYTHON (version 3.11) avec IDE PyCharm (version Community Edition 2024.1.4)
- Le logiciel ALTIUM DESIGNER version 23.10.1

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.gegi.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 SOMMAIRE DES ACTIVITÉS

9.1 Semaine 1 :

- 1^{ère} rencontre de tutorat.
- Étude personnelle et exercices.
- Distribution des boîtes contenant le circuit imprimé, les condensateurs et les potentiomètres (une par équipe, voir les modalités de cette distribution sur le site web de session.
- Formation à la pratique procédurale 1
(vous devez vous préparer individuellement avant de vous présenter à cette activité et consigner dans votre logbook les apprentissages qui en résultent)
- Formation à la pratique en laboratoire (en équipe de deux).
(vous devez vous préparer individuellement avant de vous présenter à cette activité et consigner dans votre logbook les apprentissages qui en résultent)
- Formation à la pratique procédurale 2.
(vous devez vous préparer individuellement avant de vous présenter à cette activité et consigner dans votre *logbook* les apprentissages qui en résultent).
- Étude personnelle et exercices.

- Début de l'inscription dans votre *logbook* de la démarche détaillée suivie pour résoudre la problématique.
- Début de la rédaction du rapport d'APP (un par groupe collaboratif de l'APP2) : vous devriez, dès la fin de la première semaine de cette unité, être en mesure de rédiger certaines sections du rapport (voir le chapitre 10 « Productions à remettre) et l'on vous recommande de le faire.

9.2 Semaine 2 :

- Rencontre facultative de collaboration à la solution de la problématique.
- 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*.
- Validation pratique de la solution (en équipe de deux).
(vous devez avoir complété votre circuit imprimé avant de vous présenter en laboratoire et vous devez consigner dans votre *logbook* les résultats de vos tests et de vos mesures ainsi que les conclusions que vous en tirez)
- Rédaction finale du rapport d'APP (un par équipe de l'APP2).
- 2ième rencontre de tutorat et remise du rapport d'APP (un par équipe de l'APP2).
- Évaluation formative.
- Étude personnelle et exercices.
- Retour des boîtes contenant le circuit imprimé, les condensateurs et les potentiomètres
- Évaluations sommatives.

10 PRODUCTIONS À REMETTRE

10.1 Schéma de concept

Nous vous invitons à faire le schéma de concepts et de procédure répondant à la question « Quels sont les concepts associés à l'obtention de la réponse complète (régime transitoire + régime permanent) d'un circuit linéaire pour tout signal d'entrée ? ». Vous devriez apporter ce schéma avec vous, afin de le valider et de l'utiliser lors des pratiques procédurales, des laboratoires et de la 2^{ème} rencontre de tutorat.

10.2 Validation pratique de la solution en laboratoire

Prérequis pour la validation

En préparation pour la période de validation, vous devez au préalable **remplir le questionnaire Moodle un par équipe seulement** dans lequel vous devez indiquer les résultats de vos calculs de paramètres (ex : w_0 , Q et K) et valeurs de composantes (R ou C) requis pour la complétion du circuit. Si vous n'avez pas déposé le document avant la date et l'heure limite indiquée sur Moodle, votre solution ne sera pas validée par l'équipe professorale et vous perdrez automatiquement la totalité des points accordés à la validation.

Si les valeurs des paramètres ou composantes dans votre rapport ne correspondent pas aux valeurs de la validation Moodle, des points pourront vous être retirés lors de la correction du rapport. Il ne s'agit donc surtout pas de faire un dépôt de valeurs approximatives qui vous permettra de valider vos vraies valeurs lors de la période de validation. Le but de cet exercice d'enregistrement au préalable de vos données est de vous emmener à être bien prêts pour le processus de validation. Comme l'équipe professorale sera occupée à temps plein à valider les solutions durant la période de validation, vous devez vous y présenter avec un circuit complètement fonctionnel (l'équipe professorale ne pourra pas vous aider à compléter votre circuit durant la période de validation).

La validation de la solution en laboratoire

Le but de cette activité en laboratoire est de vérifier le bon fonctionnement du circuit que vous avez complété, de le corriger au besoin, et de vous en servir ensuite pour étudier le signal publié sur la page web.

Il vous est suggéré de vérifier votre circuit un bloc à la fois et de ne passer à un autre bloc qu'après avoir prouvé, par des tests et des mesures, le bon fonctionnement du bloc précédent. Pensez à consigner dans votre *logbook* tous les résultats de ces tests et mesures, ils vous serviront lors de la rédaction de votre rapport d'APP.

Lieux de Bode avec *Python* (validation et rapport)

Pour tracer les lieux de Bode avec Python, vous devez calculer explicitement le gain et la phase de la fonction de transfert harmonique complexe, $H(jf)$, avec les fonctions `abs()` et `angle()`, respectivement, puis afficher ces paramètres en fonction de la fréquence, f , en unités de Hz sur une échelle logarithmique en x avec `plt.semilogx()`. Le gain doit être en dB.

Notez qu'afin de vous permettre de bien maîtriser ces concepts, il n'est pas permis de calculer et d'afficher les lieux de Bode avec des fonctions Python de haut niveau comme `signal.bode()`.

Déroulement de la validation

Signal audio

Vous devez télécharger le fichier sonore et le faire jouer à partir de l'ordinateur. Le signal de sortie du PC doit être ajusté à environ 0.5 Volt pointe (1 Volt pointe à pointe). Assurez-vous que ceci soit fait avant votre heure de passage de validation indiquée dans l'horaire sur le site de la session.

Rappel : Vous devez en avoir un casque d'écoute pour tester la fonctionnalité de votre circuit.

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

Démonstration de simulations *Altium*

- 1) Filtre passe-bas RC d'ordre 1 avant le suiveur avec vos valeurs théoriques :
Lieu de Bode sur la plage de fréquences d'intérêt.
- 2) Filtre passe-haut RC d'ordre 1 après le suiveur avec vos valeurs théoriques :
Lieu de Bode sur la plage de fréquences d'intérêt.

Rappel : le lieu de Bode d'une fonction de transfert harmonique est constitué de 2 courbes : le gain (module) en dB en fonction de la fréquence et (2) la phase en degrés ou en radians en fonction de la fréquence. Les 2 graphiques sont tracés avec un axe des fréquences logarithmique.

Dans *Altium*, ceci s'obtient par une analyse *AC Small Signal*. Il est important de modifier le gain en amplitude et d'ajouter un graphique de phase.

Démonstration de simulations *Python*

- 1) Filtre passe-bas RC d'ordre 1 avant le suiveur avec vos valeurs théoriques :
 - a. Lieu de Bode sur une plage de fréquences suffisante pour montrer que les spécifications sont rencontrées.
 - b. Valeurs en dB de l'atténuation demandée à 15 Hz et 10 kHz.

- 2) Filtre passe-haut RC d'ordre 1 après le suiveur avec vos valeurs théoriques :
 - a. Lieu de Bode sur une plage de fréquences suffisante pour montrer que les spécifications sont rencontrées.
 - b. Valeurs en dB de l'atténuation demandée à ϵ et 15 Hz.
- 3) Filtre passe-bas RC d'ordre 1 devant le comparateur avec vos valeurs théoriques :
 Résultat de la convolution, soit les signaux en entrée et en sortie, sur un même graphique.

Démonstrations du circuit, points de test que vous devez nous présenter avec un oscilloscope:

- 1) Le signal d'onde carrée (PT1) ;
- 2) Le signal à la sortie du filtre 5 kHz (PT2) ;
- 3) La cascade passe-bas, suiveur, passe-haut (PT7) ;
- 4) La sortie du réseau RC d'ordre 1 et du comparateur (PT9 & PT10) ;

10.3 Contenu du rapport sur Teams

Filtre passe-bande 5 kHz :

- 1) Les explications, calculs et formulation mathématique du développement en série de Fourier du signal appliqué à l'entrée du filtre.
- 2) Les explications, calculs et la formulation mathématique pour le choix des paramètres du filtre (f_0 , K , Q , R_{29} , R_{30} et R_{31}).
- 3) Simulations *Python* :
 - a. Spectre (amplitude et phase) de Fourier de l'onde carrée en entrée du filtre;
 - b. Lieux de Bode (gain seulement) en fonction de différentes valeurs de Q . Tracez la courbe qui correspond au facteur de qualité choisi avec une couleur distincte.
- 4) Simulations *Altium* :
 - a. Un graphique présentant les 2 signaux temporels : Entrée (onde carrée) et sortie (sinus 5 kHz);
 - b. Lieu de Bode à la valeur de Q choisie sur une plage de fréquences allant de 100 Hz à 100 kHz.

Redresseur double-alternance et filtre passe-bas Réseau RC d'ordre 1 avec vos valeurs théoriques :

- 1) Explication du fonctionnement du redresseur.
- 2) Simulation *Altium* :
 - a. Un graphique présentant les 3 signaux temporels : Entrée (Δf Hz), sortie du redresseur et sortie du Réseau RC.

10.4 Livrables

1. Document de validation sur Moodle, résultats de vos calculs de paramètres avant la validation.
2. Avant la période de validation de la solution, lundi de la troisième semaine :
Compléter le circuit imprimé avec les composants qui manquent dont vous aurez déterminé théoriquement les valeurs et validé celles-ci par simulation.
3. Rapport Sur Teams : à remettre avant 8h30 le matin la journée du tutorat 2. Il y aura une pénalité de 20% par jour de retard de dépôt.

Note :

Nous vous demandons de retourner, aux techniciens, les boîtes contenant le circuit imprimé, les condensateurs et les potentiomètres. Consultez Horarius pour obtenir la date et l'heure du retour de pièces.

11 ÉVALUATIONS

11.1 Évaluation de la validation

L'évaluation des productions à remettre portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. La pondération des différents éléments est indiquée au tableau suivant. L'évaluation est directement liée aux livrables demandés à la section 10 et le tableau suivant y réfère à l'aide d'une courte description. Le tableau 3 montre les indicateurs d'évaluation selon les qualités ciblées.

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

11.2 Évaluation du rapport

Le tableau 4 montre aussi les indicateurs d'évaluation selon les qualités ciblées.

Tableau 3 : Grille d'évaluation de la validation

Grille d'évaluation de la validation	GEN211-1	GEN230-1	GEN230-2
Simulations PYTHON	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	3		
Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis en ne faisant que des erreurs mineures	6		
Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis	9		
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	12		
Simulations ALTIUM		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		1	
Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis en ne faisant que des erreurs mineures		2	
Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis		3	
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		5	
Bon fonctionnement du filtre actif (PT2)			Q2.3
Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie			0
Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			1
Commets peu d'erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			2
Applique correctement la procédure de résolution choisie			3
Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie			5
Bon fonctionnement des filtres d'ordre 1 passe-bas et passe-haut en cascade séparés par le suiveur (PT7)			Q2.3
Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie			0
Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			5
Commets peu d'erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			8
Applique correctement la procédure de résolution choisie			12
Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie			15
Bon fonctionnement du réseau RC d'ordre 1 suivi du comparateur(PT10)			Q2.3
Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie			0
Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			2
Commets peu d'erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			4
Applique correctement la procédure de résolution choisie			6
Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie			8
TOTAL:	/12	/5	/28

Tableau 4 : Grille d'évaluation du rapport

Grille d'évaluation du rapport	GEN211-1	GEN230-1	GEN230-2
Compréhension des fondements théoriques (Série de Fourier, convolution, fonction de transfert harmonique).	Q1.1		
Ne résout pas ou très peu de problèmes mathématiques en génie	0		
Résout correctement peu de problèmes mathématiques en génie	2		
Résout correctement certains des problèmes mathématiques en génie	5		
Résout aisément certains des problèmes mathématiques en génie	8		
Résout aisément et efficacement certains des problèmes mathématiques en génie	10		
Détermination des paramètres du filtre actif passe-bande : (f_0, Q, K, R_{29}, R_{30}, R_{31})	Q2.3		
N'arrive pas à cerner le problème d'ingénierie pour permettre la résolution	0		
Cerne suffisamment mais avec plusieurs lacunes mineures ou imprécisions le problème d'ingénierie pour permettre la résolution	4		
Identifie convenablement mais avec quelques lacunes mineures ou imprécisions le problème d'ingénierie	9		
Identifie clairement le problème d'ingénierie: reconnaît sa nature, identifie l'information connue et celle manquante	12		
Identifie clairement le problème d'ingénierie: reconnaît sa nature, identifie l'information connue et celle manquante, émet des hypothèses et énonce les résultats escomptés	15		
Détermination des paramètres du filtre actif passe-bande : (f_0, Q, K, R_{29}, R_{30}, R_{31})			Q2.3
Est incapable de mettre en œuvre la procédure de résolution choisie			0
Commets des erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			2
Commets peu d'erreurs mineures dans l'application de la procédure de résolution choisie			4
Applique correctement la procédure de résolution choisie			7
Applique efficacement et rigoureusement la procédure de résolution choisie			9
Explication du circuit redresseur à double alternance			Q2.1
N'arrive pas à cerner le problème d'ingénierie pour permettre la résolution			0
Cerne suffisamment mais avec plusieurs lacunes mineures ou imprécisions le problème d'ingénierie pour permettre la résolution			2
Identifie convenablement mais avec quelques lacunes mineures ou imprécisions le problème d'ingénierie			5
Identifie clairement le problème d'ingénierie: reconnaît sa nature, identifie l'information connue et celle manquante			8
Identifie clairement le problème d'ingénierie: reconnaît sa nature, identifie l'information connue et celle manquante, émet des hypothèses et énonce les résultats escomptés			10
Simulations PYTHON		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		1	
Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis en ne faisant que des erreurs mineures		3	
Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis		4	
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		5	
Simulations ALTIUM		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		5	
Utilise les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis		8	
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		10	
TOTAL:	/25	/15	/19

11.3 Évaluation sommative de l'unité

L'évaluation théorique est un examen écrit qui porte sur tous les éléments de compétences de l'unité 2. C'est un examen qui se fait sans documentation. L'évaluation pratique porte sur les compétences reliées à l'utilisation des logiciels de simulation vus pendant l'unité et elle se fait sans documentation.

11.4 Évaluation sommative finale

L'évaluation finale théorique est un examen écrit qui porte sur tous les éléments de compétences des unités 2 et 6, incluant l'utilisation des logiciels de simulation. Les évaluations de GEN211 et GEN230 seront séparées. C'est un examen qui se fait sans documentation.

11.5 Utilisation responsable de l'IAG

Dans le cadre de la présente activité, vous êtes réputés avoir pris connaissance de la page Intégrité intellectuelle des Services à la vie étudiante.

Utilisation de l'intelligence artificielle générative

L'intelligence artificielle générative (IAG) réfère à l'ensemble d'outils capable de générer de nouveaux contenus (texte, images, code informatique, musique, etc.) à partir de requêtes texte, incluant, mais pas limité à :

- ChatGPT (fin de l'apprentissage en 2021)
- CoPilot
- Dall-E
- Synthesia
- Scribe
- Duet
- Bard

L'écosystème des IAG est extrêmement énergivore et a un impact environnemental significatif. Avant d'avoir recours à ces outils, vérifier si la réponse à votre requête pourrait se trouver dans votre documentation, vos collègues, votre équipe professorale ou par l'utilisation d'un moteur de recherche (Ecosia, Google, etc.) afin de limiter votre empreinte énergétique.

Attention : il peut y avoir des erreurs de l'IAG

La responsabilité finale du contenu des productions appartient à la personne étudiante.

Dans le cadre de cette unité d'APP, afin d'assurer un apprentissage réussi des compétences visées, l'utilisation des IAG pour la résolution de la problématique n'est pas permise. Toutefois, l'usage des IAG est permis pour votre apprentissage (recherche, explication, exemples) et l'aide à la rédaction, conditionnellement à ce que tout élément produit par une IAG directement utilisé dans les productions remises à l'équipe professorale soit cité et documenté dans les règles de l'art.

L'utilisation des IAG lors des évaluations sommatives et finales n'est pas permise.

12 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/bcappg>
- 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.

13 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](#).

14 PRATIQUE PROCÉDURALE 1

Buts de l'activité

- Obtenir la description fréquentielle $X(k)$ d'un signal périodique à temps continu par l'analyse en série de Fourier ;
- Retrouver l'expression temporelle d'un signal périodique $x(t)$ à partir des coefficients de sa décomposition en série de Fourier ;
- Appliquer la définition des impédances complexes à un circuit RLC afin de déterminer sa fonction de transfert harmonique $H(j\omega)$;
- Obtenir la réponse temporelle en régime permanent d'un circuit linéaire soumis à une excitation périodique.

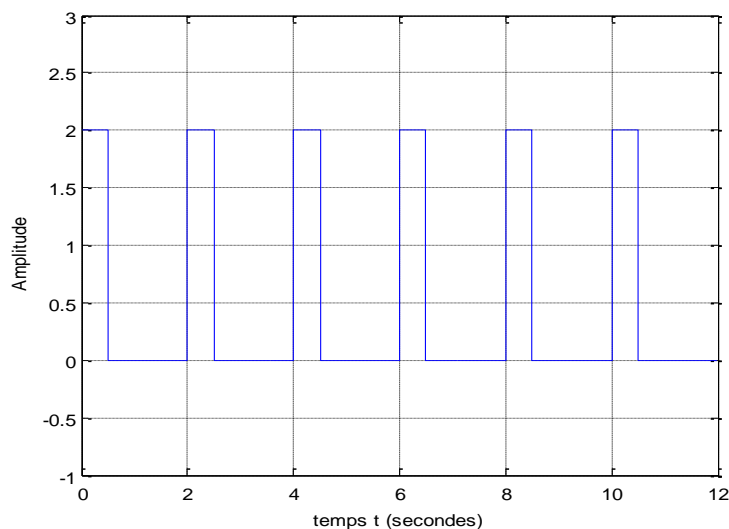
14.1 Exercices préparatoires

Voir le document sur le site de la session.

14.2 Exercices du procédural 1

1. Décomposition en séries de Fourier

Considérez le signal $x(t)$ périodique montré à la figure suivante. Le signal $x(t)$ a une amplitude égale à 2, une période égale à 2 secondes et un rapport cyclique de 25%. On montre ici seulement 6 périodes de $x(t)$.



- Calculez les coefficients de la série de Fourier, $X(k)$, pour ce signal $x(t)$.
- Calculez et dessinez le module et la phase de $X(k)$ en fonction de k , et en fonction de la fréquence f en Hz.
- Si on décalait $x(t)$ de 1 seconde « vers la gauche » (i.e. une avance du temps de 1 seconde), qu'est-ce que ça changerait dans les coefficients $X(k)$?
- Quels sont les coefficients de la série de Fourier du signal $x(t) - 1/2$? Quelle est la différence avec les coefficients de la série de Fourier de $x(t)$?

2. Synthèse à partir des coefficients de la série de Fourier

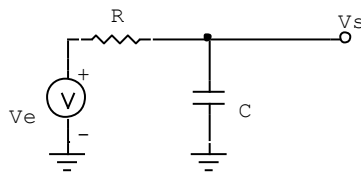
Un signal périodique, de période 1 ms, est défini comme suit par les coefficients de sa série de Fourier :

$$\begin{aligned} X(k) &= 10e^{-j\frac{\pi}{2}} && \text{pour } k = 1 \\ X(k) &= 10e^{j\frac{\pi}{2}} && \text{pour } k = -1 \\ X(k) &= 4 && \text{pour } k = 3 \\ X(k) &= 4 && \text{pour } k = -3 \\ X(k) &= 0 && \text{pour toutes les autres valeurs de } k \end{aligned}$$

- Quelle est la valeur DC de ce signal ?
- Dessinez le module et la phase de $X(k)$, en fonction de k et en fonction de la fréquence f en Hz.
- Obtenez l'expression analytique du signal périodique $x(t)$ correspondant.
- Comment seraient modifiés les coefficients de la série de Fourier ci-dessus si, au lieu de $x(t)$, on avait eu le signal $x(t - 0.002)$?

3. Fonctions de transfert harmoniques

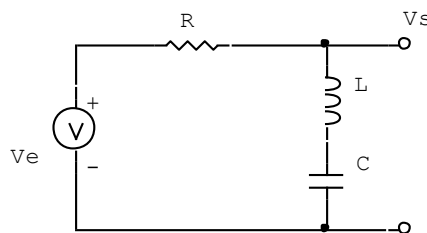
Soit le circuit RC suivant :



avec $R = 4.7 \text{ k}\Omega$ et $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$. Avec la méthode des impédances complexes, obtenez la fonction de transfert harmonique de ce filtre, $H(j\omega)$. Dessinez le plus fidèlement possible le lieu de Bode, soit le gain et la phase de $H(j\omega)$ en fonction de ω .

Quelle(s) information(s) nous donne cette fonction de transfert harmonique, $H(j\omega)$?

Refaites l'exercice avec le circuit RLC suivant :



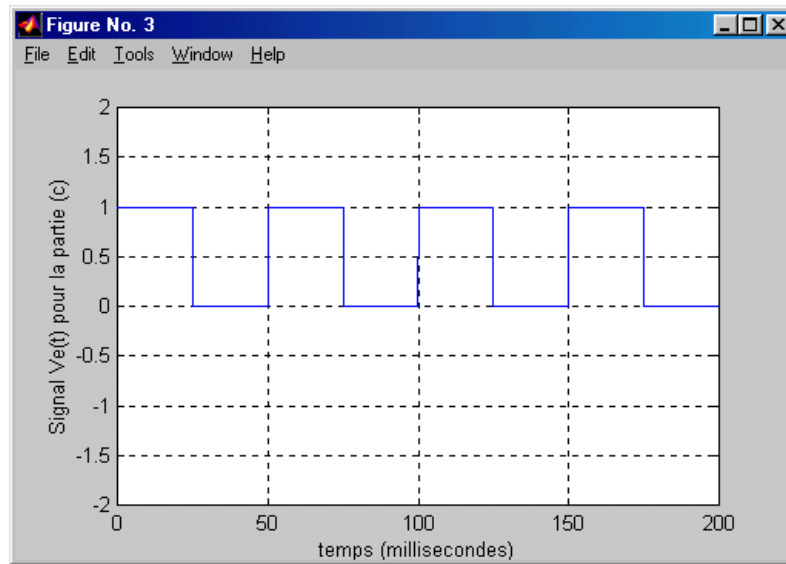
Avec $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ et $L = 10 \text{ mH}$.

Sans dessiner le gain et la phase pour ce filtre, déterminez à quelle fréquence ω , en rad/sec, la sortie du filtre sera-t-elle nulle pour une sinusoïde ayant cette fréquence en entrée.

4. Réponse d'un circuit en régime permanent

Pour le circuit RC du problème 3, donnez la réponse en régime permanent $V_s(t)$ si l'entrée est donnée par :

- (a) $V_e(t) = 10$ (une DC d'amplitude 10)
- (b) $V_e(t) = 10 \cos(2 \pi 20 t - \pi/8)$
- (c) $V_e(t)$ est le signal montré à la figure suivante



Pour le signal en (c), ne considérez que les harmoniques dont la fréquence est comprise entre 0 et 80 Hz inclusivement.

15 LABORATOIRE

Buts de l'activité

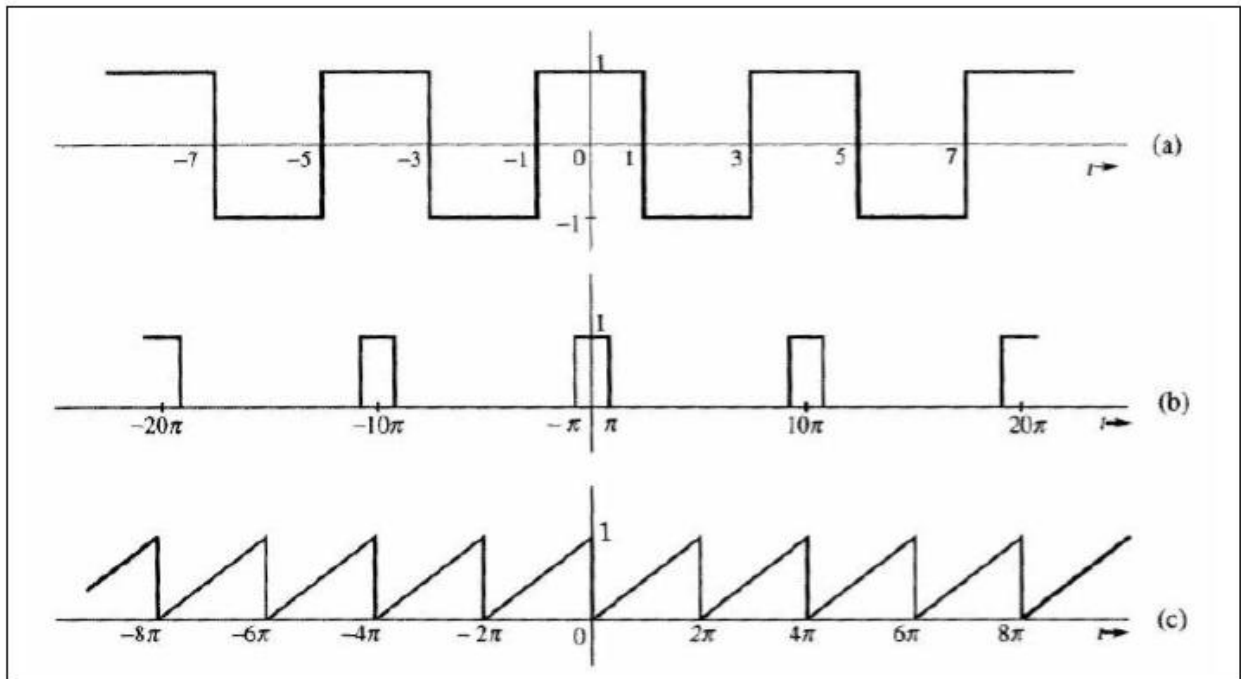
Le but de ce laboratoire est de se familiariser avec l'analyse des systèmes linéaires à temps continu à l'aide du logiciel PYTHON. On utilisera PYTHON surtout pour fins de calcul numérique et d'affichage afin d'étudier la convolution et les séries de Fourier, et pour se familiariser avec l'affichage de la fonction de transfert harmonique d'un filtre ou d'un circuit. **Le code Python de départ vous sera fourni, en format PDF, à l'avance sur le site de l'APP. Étudiez et essayez dans Pycharm ce code avant votre arrivée au laboratoire.**

On veut plus spécifiquement mettre en pratique les procédures pour :

- Calculer, avec PYTHON, les K premières harmoniques de la série de Fourier d'un signal périodique à temps continu ;
- Recombiner, avec le logiciel PYTHON, les K premières harmoniques de la série de Fourier d'un signal périodique à temps continu.
- Calculer, avec PYTHON, le module et la phase d'une fonction de transfert harmonique, et en afficher le résultat ;
- Réaliser, avec PYTHON, la convolution entre deux signaux analogiques décrits de façon numérique et en afficher le résultat ;
- Dans ce laboratoire, il y aura aussi une familiarisation avec le logiciel ALTIUM. Une simulation d'un circuit RLC (filtre passe-bande) permettra d'étudier le comportement de ce filtre dont l'entrée est une onde carrée. Ceci afin de se familiariser avec l'affichage de la réponse fréquentielle d'un filtre.

15.1 Exercices du laboratoire

Partie 1



- Calculez avec PYTHON les $K=20$ premières harmoniques de la série de Fourier des signaux périodiques de la figure ci-haut (a), (b) et (c). Vous devrez d'abord créer une version numérique de ces signaux dans PYTHON. Rappelez-vous que pour calculer les coefficients de la série de Fourier d'un signal périodique on n'a besoin que d'une période complète du signal. Notez bien la période de ces signaux.
- Affichez ensuite le module et la phase de coefficients de Fourier de chaque signal, en fonction de leur indice k puis en fonction de la fréquence (attention, l'échelle fréquentielle, ou plus précisément le lien entre l'indice k d'une harmonique et sa fréquence f_k dépend de la période fondamentale du signal).
- Pour vérifier que vous avez bien les bonnes valeurs des coefficients de Fourier, faites, dans PYTHON la somme des 2, 5, 10 et finalement 20 premières harmoniques de chaque signal.
- En comparant vos spectres de Fourier pour les signaux des figures (a) et (b), il devrait se dégager une propriété importante des séries de Fourier pour une onde carrée périodique dont le rapport cyclique varie. Plus spécifiquement, quel est l'effet, dans le domaine des fréquences, du rapport cyclique de l'onde carrée périodique? Est-ce que le spectre devient plus « étroit » ou plus « large » si le rapport cyclique diminue ? Quelle explication donner à ce phénomène ?

Note : Les notes de cours sur les séries de Fourier devraient vous donner de bonnes indications pour résoudre ce problème avec PYTHON.

Partie 2

On demande ici de tracer le lieu de Bode, soit le module (gain) et la phase de la fonction de transfert harmonique suivante, pour différentes valeurs du facteur de qualité Q, en utilisant le logiciel PYTHON

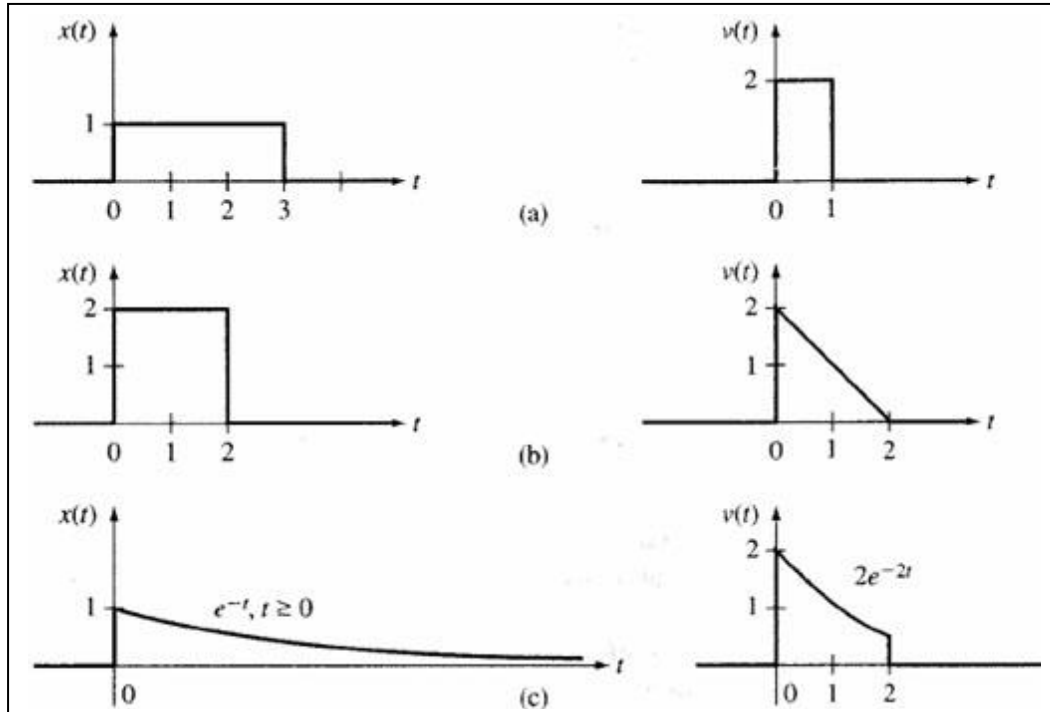
$$H(f) = \frac{-K}{1 + jQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$$

Tracez sur le même graphique les courbes du module normalisé de $H(f)$ pour Q compris entre 1 et 40. Par module normalisé, on entend ici le module divisé par le gain K du filtre (K est le gain du filtre à la fréquence f_0). Cela signifie que le gain maximum observé sur votre figure (à f_0) devrait être égal à 1 (i.e. 0 dB). Prenez au moins 6 valeurs de Q sur l'intervalle 1 à 40 pour obtenir au moins 6 courbes différentes que vous superposerez sur votre graphique. Définissez $f_n = f / f_0$ comme la fréquence normalisée, et tracez le module pour $0.5 \leq f_n \leq 2$ sur une échelle linéaire de fréquences. Utilisez au moins 1000 points sur l'axe des fréquences.

Tracez ensuite le gain en dB, pour toutes les valeurs de Q. Le gain en dB d'une valeur x se calcule en prenant 20 fois le logarithme en base 10 de x.

Note : Conservez bien ce code et la figure obtenue, qui pourrait vous servir à la résolution de la problématique.

Partie 3 (PYTHON)



- (a) Avec PYTHON, obtenez le résultat de la convolution des paires de signaux $x(t)$ et $v(t)$ des Figures (a) (b) et (c) ci-haut. Pour les signaux de la figure (a), vérifiez que vous obtenez le même résultat en calculant à la main la convolution (ici, la méthode graphique est facile à appliquer). Assurez-vous de prendre un intervalle dt suffisamment petit pour que la forme temporelle du résultat de votre convolution dans PYTHON soit une bonne approximation de la réponse analytique (que l'on calcule mathématiquement).

Vous aurez besoin ici de la fonction PYTHON `conv`. Allez voir les exemples PYTHON dans les notes de cours sur la convolution pour vous aider à écrire votre code. Il est possible que la plus grande difficulté que vous aurez sera de définir une version numérique des signaux $x(t)$ et $v(t)$.

- (b) Refaites l'exercice (a) en prenant avec cette fois-ci la paire de signaux suivants : $x(t)$ est une sinusoïde de fréquence 1 kHz que l'on a redressé (i.e. on a pris sa valeur absolue), et $v(t)$ est la réponse impulsionnelle $h(t)$ d'un circuit RC passe-bas d'ordre 1 dont la le produit RC vaut 1/1000. Obtenez le résultat de cette convolution pour t entre 0 et 10 ms. La forme de la réponse impulsionnelle est :

$$h(t) = 1000e^{-1000t}u(t)$$

Voyez-vous un lien entre cette convolution et un des éléments du circuit de la problématique ? (Pensez à l'élément dans le circuit où on redresse un signal avant de la passer dans un réseau RC.)

Partie 4 (ALTIUM)

Reprendre l'exercice avec le circuit RLC du Problème no.3 du Procédural 1. Créer le circuit dans ALTIUM ($R=1\text{ k}\Omega$, $C=1\text{ }\mu\text{F}$ et $L=10\text{ mH}$). Par la suite :

- (a) Utiliser une source V_{pulse} d'amplitude 1 V et de fréquence 15.9 Hz ($\omega= 100\text{ rad/sec}$)
- (b) Lire la tension de sortie V_s sur une gamme de fréquence de 1 à 10^6 rad/sec
- (c) Faire les courbes d'amplitude avec une échelle linéaire, puis en dB et faire la courbe de phase en radians.
- (d) Utiliser l'échelle logarithmique pour les fréquences (axe des x)

16 PROCÉDURALE 2

Buts de l'activité

On veut ici mettre en pratique les procédures requises pour :

- Obtenir la fonction de transfert d'un circuit comprenant des amplificateurs opérationnels pouvant être considérés comme idéals ;
- Éviter qu'une section d'un circuit ne modifie le fonctionnement d'une autre section à la sortie de laquelle elle est branchée ;
- Investiguer le mode de fonctionnement d'un circuit redresseur actif;
- Obtenir la réponse temporelle, à un signal de durée finie, d'un système linéaire (par exemple, un filtre) initialement au repos, en appliquant la méthode de la convolution.

16.1 Exercices préparatoires

Voir le document sur la page web.

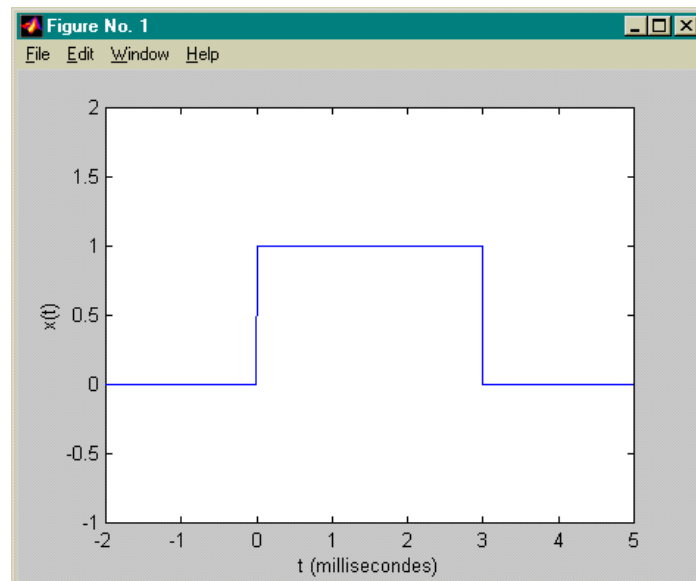
16.2 Exercices du procédural 2

1. Convolution

Un circuit d'ordre 1 a une réponse impulsionnelle $h(t)$ qui s'exprime mathématiquement comme suit :

$$h(t) = \frac{1}{RC} e^{-t/RC} u(t) = 1000 e^{-1000t} u(t)$$

Déterminez par convolution la réponse de ce circuit au signal $x(t)$ montré ci-dessous (signal nul pour $t < 0$ et pour $t > 3$ ms). Soyez précis sur les axes (amplitude et échelle du temps), et aussi précis que possible sur la forme de la réponse. On assume que le circuit est initialement au repos.

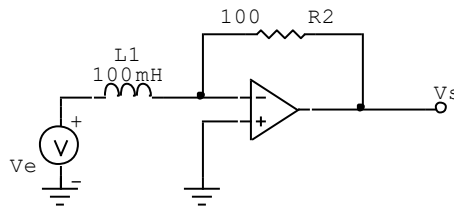


2. Circuits à amplificateurs opérationnels idéaux

- (a) Dessinez les trois configurations suivantes d'un circuit à ampli-op : suiveur, inverseur et non-inverseur (toutes les composantes de ce circuit seront des résistances)
- (b) Analysez ces circuits, en considérant les ampli-ops comme idéaux, pour en obtenir l'expression analytique de la relation entre la tension de sortie et la tension d'entrée.

3. Filtre analogique actif intégrant un amplificateur opérationnel

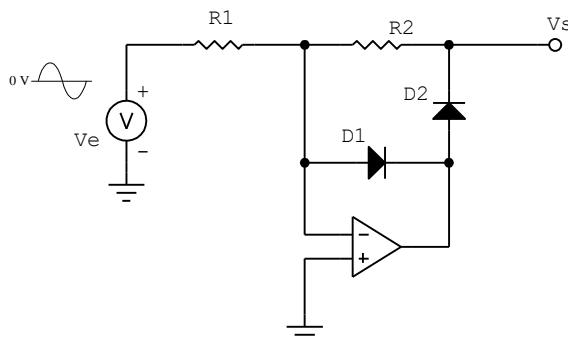
Déterminer la fonction de transfert harmonique $H(j\omega) = V_s(j\omega)/V_e(j\omega)$ du circuit suivant dans lequel l'ampli-op peut être considéré comme idéal :



- (a) Calculer l'amplitude et la phase de cette fonction de transfert pour $\omega = 10, 50$ et 100 rad/s.
- (b) Interpréter ce résultat en décrivant de quelle façon ce circuit va affecter une sinusoïde appliquée à son entrée.

4. Redresseur actif

Soit le circuit suivant dans lequel l'ampli-op et les diodes peuvent être considérés comme idéals et où l'impédance d'entrée de l'étage suivant est infinie (il n'y pas de courant qui circule à la borne V_s) :



- (a) Représenter l'allure du signal de sortie de ce circuit V_s lorsque son entrée V_e est, comme illustrée, une sinusoïde évoluant autour de 0 Volt.
- (b) Proposer une explication du mode de fonctionnement de ce circuit.

Indice : considérer séparément les alternances positive et négative du signal d'entrée.