

---

# Numérisation de signaux analogiques

GUIDE DE L'ÉTUDIANT  
S2 – APP7GE

*Hiver 2023 – Semaines 13 et 14*

---

Auteurs: Audrey Corbeil Therrien, Maude Blondin  
Version: 1.3 (2 avril 2023)

Ce document est réalisé avec l'aide de  $\text{\LaTeX}$  et de la classe `gegi-app-guide`.

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

# TABLE DES MATIÈRES

1	ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES	1
2	SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION	2
3	QUALITÉS DE L'INGÉNIEUR	3
4	ÉNONCÉ DE LA PROBLÉMATIQUE	4
5	CONNAISSANCES NOUVELLES	6
6	GUIDE DE LECTURE	8
7	LOGICIELS ET MATÉRIEL	9
8	SANTÉ ET SÉCURITÉ	10
9	SOMMAIRE DES ACTIVITÉS	11
10	PRODUCTIONS À REMETTRE	12
11	ÉVALUATIONS	15
12	POLITIQUES ET RÈGLEMENTS	17
13	INTÉGRITÉ, PLAGIAT ET AUTRES DÉLITS	18
14	PRATIQUE PROCÉDURALE 1	19
15	PRATIQUE EN LABORATOIRE	24
16	PRATIQUE PROCÉDURALE 2	27
17	VALIDATION AU LABORATOIRE	29
A	ANNEXE : Composants disponibles pour l'APP7GE	30
B	ANNEXE B : Gabarits	31

# LISTE DES FIGURES

14.1	Onde sinusoïdale, $y_1(t) = 2 \sin(4\pi t)$ . . . . .	19
14.2	Onde sinusoïdale, $y_2(t) = 2 \sin(2\pi t)$ . . . . .	20
14.3	Onde sinusoïdale déphasée, $y_1(t) = 2 \sin(4\pi t - \frac{\pi}{4})$ . . . . .	21
14.4	Onde triangulaire . . . . .	22
16.1	Filtre actif avec ampli-op idéal . . . . .	27
B.1	Onde sinusoïdale de fréquence 0.9 Hz et d'amplitude de 1. . . . .	32
B.2	Grille pour tracer le gabarit de spécification du filtre passe-bas . . . . .	33
B.3	Grille pour tracer le gabarit de spécification du filtre passe-bas normalisé . . . . .	34

# LISTE DES TABLEAUX

2.1 Synthèse de l'évaluation de l'unité . . . . .	2
11.1 Sommaire de l'évaluation du rapport . . . . .	15
11.2 Sommaire de l'évaluation de la validation . . . . .	15
A.1 Condensateurs disponibles . . . . .	30
A.2 Tableau des tolérance des condensateurs . . . . .	30

# 1 ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES ET COMPÉTENCES

## GEL265 – Numérisation de signaux analogiques

1. Réaliser des systèmes de numérisation de signaux analogiques à partir de spécifications et comprendre l'impact de la numérisation sur l'information contenue dans les signaux.

Description officielle : Numérisation de signaux analogiques. Théorème d'échantillonnage. Conversion analogique-numérique et numérique-analogique. Impact de la numérisation sur le contenu fréquentiel. Conception de filtres antirepliement. Fonction de transfert de filtres actifs. Structure des filtres. Sensibilité des filtres actifs. Conception et simulation avec un logiciel spécialisé.

<https://www.usherbrooke.ca/admission/fiches-cours/GEL265>

## 2 SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION

Évaluation	GEL265
Rapport d'APP et validation	45
Évaluation formative	0
Évaluation sommative	135
Évaluation finale	120
Total	300

TABLEAU 2.1 Synthèse de l'évaluation de l'unité

Voici ci-dessous la grille de correspondances des notes avec les cotes et le niveau d'atteinte global d'une qualité.

Note(%)	<50	50	53	57	60	64	68	71	75	78	81	85
Cote	E	D	D+	C-	C	C+	B-	B	B+	A-	A	A+
Niveau	N0	N1	N1	N1	N2	N2	N2	N3	N3	N3	N4	N4
Libellé	Insuffisant	Passable (seuil)			Bien			Très bien (cible)			Excellent	

### 3 QUALITÉS DE L'INGÉNIEUR

Les qualités de l'ingénieur visées et évaluées par cette unité d'APP sont données dans le tableau un peu plus bas. D'autres qualités peuvent être présentes sans être visées ou évaluées dans cette unité. Pour une description détaillée des qualités et leur provenance, consultez le lien suivant :

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

Qualité	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

### Un monde numérique

Votre projet de session comporte plusieurs capteurs dont certains génèrent des signaux analogiques qui doivent être numérisés, c'est-à-dire converti en information binaire, afin de pouvoir être traités par un microcontrôleur (Arduino) ou le processeur d'un ordinateur. L'accéléromètre et le détecteur de muons sont des exemples de capteurs produisant des signaux analogiques, mais il en existe bien d'autres.

Le processus de numérisation d'un signal analogique limite la quantité d'information convertie en binaire. En effet, le nombre d'échantillons pris dans le temps et les valeurs limitées que peuvent prendre chacun de ces échantillons ne permet pas de convertir parfaitement toute l'information d'un signal dans un format numérique et certaines informations peuvent être perdues, déformées, ou même ajoutées !

Afin de bien configurer votre système de numérisation, il faudra bien évaluer vos besoins et les outils technologiques à votre disposition. Il faut d'abord déterminer votre fréquence d'échantillonnage en vous basant sur le théorème d'échantillonnage pour justifier la valeur sélectionnée. De même, il faudra considérer l'erreur de quantification selon le nombre de bits utilisé pour l'encodage binaire.

Si le contenu fréquentiel du signal dépasse la fréquence d'échantillonnage, il peut se produire un repliement du signal. Afin d'éviter cette situation, vous devez concevoir un filtre antirepliement avec une fréquence de coupure choisie avec soin selon votre système de numérisation. Ce filtre sera de la famille de filtre présentant la phase la plus linéaire possible entre Butterworth, Chebyshev et Bessel. La bande coupée devra avoir au moins 25 dB d'atténuation à  $2 * f_c$ , soit deux fois la fréquence de coupure du filtre. De plus, afin de profiter de toutes la plage dynamique du convertisseur analogique-numérique (CAN), il faudra ajuster la plage de tension générée par le détecteur de muons à une plage de tension de 5 V cohérente avec le CAN de l'Arduino.

Si votre filtre est d'un ordre supérieur à 2, il vous faudra plusieurs étages de filtres actifs avec amplificateurs opérationnels. Il existe plusieurs configurations électroniques pour réaliser des filtres actifs d'ordre 2, dont la configuration à rétroactions multiples (*Multiple Feedback* que nous retenons pour l'application du projet. Notez que le filtre sera alimenté par une source unipolaire - il faudra donc modifier le circuit pour permettre aux amplificateurs opérationnels d'opérer sur toute la plage disponible.

Vous devrez démontrer le fonctionnement de votre système de numérisation avec, entre autres, une mesure du lieu de Bode d'amplitude de votre filtre antirepliement et une acquisition numérique de signaux sinusoïdaux à des fréquences clés. Vos choix de conception devront être justifiés et appuyés par des calculs et vous devrez discuter des performances atteintes et des limitations du système dans votre rapport de conception.

# 5 CONNAISSANCES NOUVELLES

## 5.1 SYSTÈMES ET SIGNAUX

*(Pour le premier procédural et le laboratoire)*

### Connaissances déclaratives (quoi)

Conversion analogique-numérique et numérique-analogique

- Théorème d'échantillonnage
- Bruit de quantification
- Caractéristiques électriques et temporelles des signaux analogiques et impact de la numérisation

Fonction de transfert d'un filtre anti-repliement

- Filtre passe-bas idéal
- Familles de filtres Butterworth, Chebyshev et Bessel.
- Décomposition (factorisation) en ordre 2
- Dénormalisation d'une fonction de transfert
- Conception et simulation avec logiciel spécialisé

Structures des filtres

- Paramètres  $\omega_0$ ,  $Q$  et  $k$  d'un filtre d'ordre 2
- Sensibilité des structures de filtre
- Conception et simulation avec logiciel spécialisé

### Connaissances procédurales (comment)

- Déterminer la fréquence d'échantillonnage de systèmes de numérisation à partir du théorème d'échantillonnage.
- Réaliser un filtre anti-repliement répondant à des spécifications.
- Calculer la fonction de transfert d'un filtre dans le domaine de Laplace à partir de spécifications.
- Calculer et interpréter les coefficients de sensibilité d'un filtre donné.

### Connaissances conditionnelles (quand)

- Choisir la fréquence d'échantillonnage et la plage dynamique de quantification pour une application spécifique.
- Choisir la fréquence, l'ordre et la famille d'un filtre anti-repliement pour un système de numérisation.

## 5.2 ÉLECTRONIQUE

*(Pour le deuxième procédural et la validation)*

### Connaissances déclaratives (quoi)

- Principes de fonctionnement de dispositifs de conversion analogique-à-numérique (CAN) et de conversion numérique-à-analogique (CNA)
- Les structures RAM, STCT et Variables d'état de filtre actif d'ordre 2
  - schémas électroniques
  - fonctions de transfert
  - cas spéciaux
  - critères de sélection
- Sensibilité des structures RAM, STCT et Variables d'état
- Dénormalisation d'impédance et de fréquence
- Réalisation d'un filtre actif
  - sélection d'un ampli-op
  - tolérance des composants
  - agencement en cascade des sections d'ordre 2
  - syntonisation du filtre final

### Connaissances procédurales (comment)

- Procédure pour obtenir les valeurs des composants d'un filtre d'ordre 2 donné, à partir de la valeur de ses paramètres  $\omega_0$ ,  $K$  et  $Q$ .
- Procédure pour déterminer et interpréter les coefficients de sensibilité  $S_x^y$  d'un filtre donné.
- Procédure pour dénormaliser un filtre en impédance et en fréquence.
- Procédure pour identifier les spécifications critiques d'un ampli-op dans une application donnée.
- Procédure de syntonisation d'un filtre.

### Connaissances conditionnelles (quand)

- Sélectionner un convertisseur analogique numérique approprié.
- Sélectionner la structure de filtre approprié

## 6 GUIDE DE LECTURE

### 6.1 Références essentielles

#### Pour le premier procédural et le laboratoire

1. Vous devez lire les sections suivantes du document *La conception des filtres actifs à temps continu* disponible sur le site Web de l'unité :
  - 0-Introduction
  - 1-Le filtre passe-bas idéal et ses approximations
  - 2-Transformations fréquentielles
  - 3-Sélection de la fonction de transfert normalisée
2. Vous devez lire la section 6.10-Conversion of Signals from Analog to Digital Form du livre de Hambley, *Electrical Engineering - Principles and applications*, 7<sup>ième</sup> édition.
3. Vous devez lire l'article *What you think you know about bit-depth is probably wrong* disponible au lien suivant : <https://www.soundguys.com/audio-bit-depth-explained-23706/>

#### Pour le deuxième procédural

1. Vous devez lire les sections suivantes du document *La conception des filtres actifs à temps continu* disponible sur le site Web de l'unité :
  - 4-Filtres actifs

Vous devez également lire les section suivante du livre de Hambley, *Electrical Engineering - Principles and applications*, 7<sup>ième</sup> édition.

- 13.1 *Ideal Operational Amplifiers*
- 13.10 *Active Filters*

### 6.2 Documents complémentaires

- Document « Dénormalisation vers passe-bande », site web
- Document « Digital-Analog Conversions », site web

## 7 LOGICIELS ET MATÉRIEL

### Logiciels

La phase de conception mathématique se réalise avec **Python** et les librairies *numpy* et *scipy*, qui facilitera la réalisation de vos calculs.

Le logiciel de conception électronique **Altium** permettra de simuler et valider l'implémentation électronique de votre solution avant la réalisation sur circuit physique.

### Matériel

La réalisation physique de votre filtre se fera sur le **Arduino** de votre projet de session.

Les résistances 1 % sont disponibles dans le local C1-3018 en libre service. Limitez votre utilisation de résistance 1% aux résistances formant vos filtres (excluant les résistance servant à contrer les imperfections des ampli-op).

Les condensateurs 2 % sont disponibles au local des techniciens en quantité limitées. Les valeurs disponibles seront indiquées sur le site Web et en annexe.

**IMPORTANT - Vous devez vous présenter au local des techniciens sur les heures d'ouverture avec vos calculs complété en main. Vu les quantités limitées de condensateurs, vous ne devrez prendre que ceux nécessaires à votre circuit.**

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

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

### 8.2 Dispositions particulières

Merci de bien respecter les consignes sanitaires en vigueur, incluant le port du masque couvrant le nez et la bouche en tout temps.

## 9 SOMMAIRE DES ACTIVITÉS

### Semaine 1

- Première rencontre de tutorat
- Étude personnelle et exercices
- Formation à la pratique procédurale 1
- Formation à la pratique en laboratoire
- Consultation facultative
- Formation à la pratique procédurale 2

### Semaine 2

- Étude personnelle et exercices
- Validation pratique de la solution
- Rédaction du rapport d'APP
- Remise des livrables d'APP : Rapport, scripts Python et fichiers de simulations de circuit
- Deuxième rencontre de tutorat
- Évaluation formative théorique écrite et pratique
- Consultation facultative
- Évaluation sommative théorique écrite et pratique



## 10 PRODUCTIONS À REMETTRE

- Les productions se font par équipe de projet.
- L'identification des membres des équipes doit être faite sur la page web de l'unité avant 16h30, le mercredi de la première semaine.
- La date limite pour le dépôt électronique est 9h00 AM (pas 20h30 !), le jour de votre deuxième tutorat. Les retards seront pénalisés.
- Les productions soumises à l'évaluation doivent être **originales pour chaque équipe de l'APP**, sinon l'évaluation sera pénalisée.

### 10.1 Schéma de concept

Le schéma de concept est une production individuelle optionnelle en vue de la deuxième rencontre de tutorat. Le schéma de concepts à faire lors de l'étude personnelle cible la question suivante :

*Quelle est la procédure de conception d'un système de numérisation, incluant la conception de filtre anti-repliement actif ?*

Nous vous invitons à faire autant de schémas de concepts et de procédure que vous en sentez le besoin. Vous devriez les apporter aux pratiques procédurales et aux laboratoires afin de les valider.

### 10.2 Productions à remettre

#### Rapport

Il est important de noter qu'il est de la **responsabilité de chaque étudiant signataire** du rapport d'une équipe de **s'assurer de l'exactitude, de la qualité et de l'uniformité de l'ensemble du contenu du rapport**. L'évaluation du rapport portera sur les compétences figurant dans la description de l'activité pédagogique GEL265. Cependant si votre rapport est fautif sur le plan de la qualité de la communication et de la présentation, il vous sera retourné et vous devrez le reprendre pour recevoir votre note, avec la pénalité pour la qualité de la communication appliquée sur celle-ci.

Format du fichier	PDF généré à partir d'un logiciel de traitement de texte
Mise en page	feuilles 8 ½ x 11 pouces
Police	Times New Roman, Arial ou Calibri 12 pts
Page titre	Gabarit fournit sur la page Web
Graphique et schémas de circuits	Obtenus a partir d'un logiciel (Ne pas utiliser de capture d'écran ou de photos)
Équations	Écrites à l'aide d'un logiciel

Le rapport de l'APP7GE ne doit pas dépasser **8 pages** excluant les pages préliminaires et la table des matières. Toutes les pages excédentaires ne seront pas considérées. Mettez l'emphase sur les figures, les schémas et les graphiques pour expliquer ce que vous avancez. Assurez-vous que les graphiques soient **bien identifiés et lisibles**. Faites attention de bien synthétiser l'information que vous allez présenter et, encore une fois, soyez vigilants en ce qui concerne la qualité de la langue écrite.

**Sommaire du système de numérisation** (1 pages) Présentez clairement et succinctement l'objectif du système de numérisation : la fréquence d'échantillonnage, le nombre de bits, le filtre anti-repliement auquel vous êtes arrivés (famille, ordre, fonctions de transfert d'ordre 2, schéma(s) électronique(s), tolérance des composants, autres caractéristiques). Utiliser des tableaux résumant les caractéristiques au besoin. Cette page donne la vue d'ensemble de votre système de numérisation incluant toute les valeurs clés du système.

**Introduction** (0.5-1 page) Description de votre application et des caractéristique principale de votre signal. Cette information servira à justifier vos choix de conception - expliquez pourquoi ces spécifications du système de numérisation sont importantes

**Convertisseur analogique-numérique** (0.5-1 page) Présentez et justifiez la configuration du convertisseur analogique numérique sur le Arduino, incluant le type de convertisseur, la fréquence d'échantillonnage et le nombre de bits, ainsi que la fréquence de communication.

**Conception mathématique du filtre anti-repliement** (2-3 pages) Présentez les étapes 1 à 4 (voir notes de cours) de la méthode de conception d'un filtre analogique. Cette section devrait contenir les justifications et commentaires pertinents, et au minimum :

- Normalisation des spécifications du filtre et justification de la famille et l'ordre choisi ;
- Les étapes clés de la factorisation et de la dénormalisation (ne pas faire les développements complets)

- Lieux de Bode du passe-bas final obtenus à partir de sa fonction de transfert globale (Python) ;
- Paramètres du filtre conçu.

**Votre objectif est de démontrer le respect des spécifications** : présentez des agrandissements et incluez des curseurs aux endroits clés pour comparer vos résultats aux spécifications.

**Réalisation du circuit** (2-3 pages) Présentez les étapes 5 et 6 (voir notes de cours) de la méthode de conception d'un filtre analogique. Cette section devrait contenir les justifications et les commentaires pertinents, et au minimum :

- Calculs de la valeur des composants et de leurs tolérances ;
- Lieux de Bode simulés (Altium) et mesurés (en laboratoire) ;
- Les résultats d'une acquisition numérique de 2-5 périodes d'une onde sinusoïdale ayant une fréquence dans la bande passante sous forme de graphique.

**Votre objectif est de démontrer le respect des spécifications** : présentez des agrandissements et incluez des curseurs aux endroits clés pour comparer vos résultats aux spécifications. Commentez les performances obtenues versus les spécifications de départ.

**Coefficient de sensibilité** (1 page) Détermination et interprétation des coefficients de sensibilité du facteur de qualité (Q) de la structure de filtre passe-bas RAM (*Multiple Feedback*) pour les composants R1, R2, R3, C1 et C2. Explication de la signification de la sensibilité et de son impact sur la performance du filtre.

## Fichiers

Vous devez déposer votre solution à la problématique sur le site de dépôt habituel du département.

Déposez votre rapport en format pdf nommée avec le format *cip1111-cip2222.pdf*, avec les CIPs de tous les membres de l'équipe.

Déposez une archive *cip1111-cip2222.zip*, avec les CIPs de tous les membres de l'équipe contenant les éléments suivants :

- Scripts Pythons utilisés pour la solution
- Projet Altium <sup>1</sup>

---

1. Attention à la taille du projet - Des simulations trop détaillés (beaucoup de points à simuler) peuvent faire exploser la taille du projet. En cas de doute, ne pas inclure les simulations dans le projet.

# 11 ÉVALUATIONS

## 11.1 Rapport et livrables associés

L'évaluation du rapport portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. Ces compétences ainsi que la pondération de chacune d'entre elles dans l'évaluation du rapport sont indiquées au tableau 11.1. L'évaluation est directement liée au livrables demandés à la section 10.2 et le tableau 11.1 y réfère à l'aide d'une courte description.

Élément	GEL265-1
Sommaire	3
Convertisseur analogique numérique	5
Conception mathématique du filtre	8
Réalisation du circuit	8
Coefficient de sensibilité	6
Total	30

TABEAU 11.1 Sommaire de l'évaluation du rapport

La qualité de la communication technique sera évaluée et si votre rapport est fautif sur le plan de la qualité de la communication et de la présentation, incluant la qualité des graphiques présentés une pénalité atteignant jusqu'à 15% pourrait être appliquée. Si la qualité de votre rapport est jugée insuffisante, il vous sera retourné et vous devrez le reprendre pour être noté.

## 11.2 Validation

Lors de la validation nous évaluerons la méthodologie et les techniques utilisées pour effectuer les mesures demandées pour le rapport. Les valeurs mesurées ne seront pas évaluées à cette étape, seulement les manipulations effectuées sur vos montages et avec les instruments de mesure.

Élément	GEL265-1
Qualité du montage et explications du système	5
Mesure d'un lieu de Bode (amplitude)	5
Acquisition d'un signal numérisé	5
Total	15

TABEAU 11.2 Sommaire de l'évaluation de la validation

Les détails de l'évaluation à la validation sont donnée à la section 17.

### 11.3 Évaluation sommative

L'évaluation sommative comportera des questions théoriques et pratiques. Cet examen écrit porte sur tous les éléments de compétences de l'unité. C'est un examen qui se fait sans documentation mais avec accès à Python et les librairies *numpy*, *scipy* et *matplotlib*. Les problèmes théoriques se répondent sur papier et les problèmes pratiques demanderont un dépôt électronique.

## 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 de l'Université de Sherbrooke

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

### Règlements facultaires

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

### Normes d'agrément

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

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

## 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:

<https://www.usherbrooke.ca/enseigner/passeurs-dintegrite/ressources/antiplagiat>

# 14 PRATIQUE PROCÉDURALE 1

## But de l'activité

Mettre en pratique les procédures requises pour :

- Sélectionner une fréquence d'échantillonnage en fonction du signal analogique et du théorème d'échantillonnage Nyquist-Shannon ;
- Concevoir un filtre anti-repliement ;
- Factoriser une fonction de transfert ;
- Sélectionner un filtre parmi les familles Butterworth, Chebyshev et Bessel qui rencontre les spécifications demandées d'un filtre passe-bas normalisé ;

## E.1 Théorème d'échantillonnage Nyquist-Shannon

- (a) La Figure 14.1 montre une onde sinusoïdale d'amplitude de 2 unités avec une fréquence angulaire de  $\omega_0 = 4\pi$ , soit  $y_1(t) = 2 \sin(4\pi t)$ . Ce signal est échantillonné avec une fréquence  $f_e = 1$  Hz. Inscrivez les points représentant les échantillons obtenus directement sur la Figure 14.1, si le premier échantillon est pris au temps  $t = 0$ .

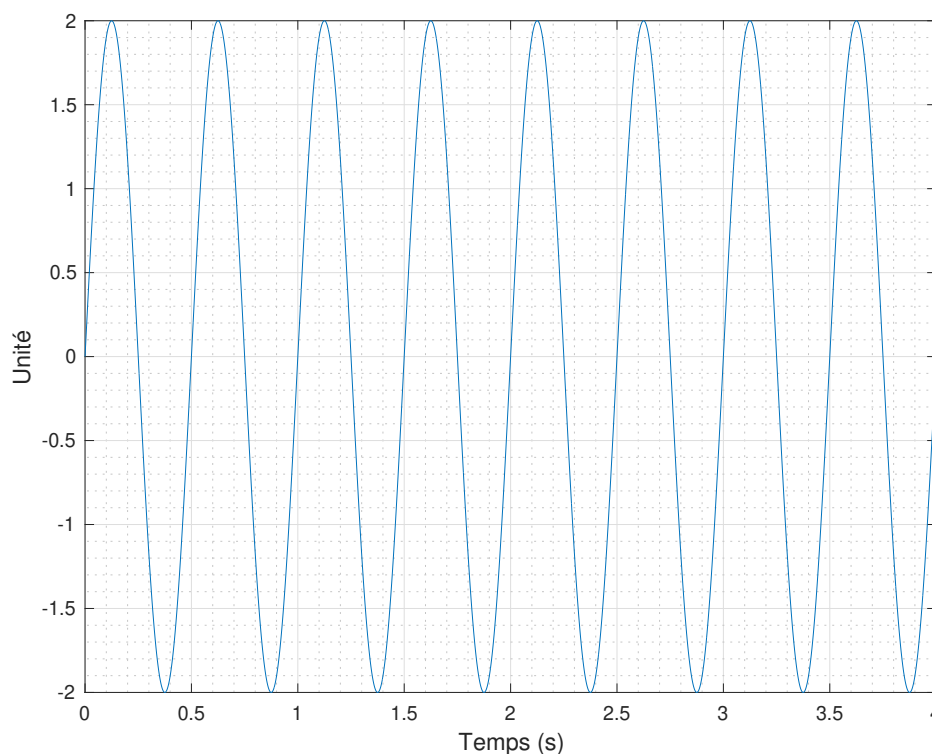


FIGURE 14.1 Onde sinusoïdale,  $y_1(t) = 2 \sin(4\pi t)$



- (b) La Figure 14.2 présente une onde sinusoïdale d'amplitude de 2 unités avec une fréquence angulaire de  $\omega_0 = 2\pi$ , soit  $y_2(t) = 2 \sin(2\pi t)$ . Ce signal est échantillonné avec une fréquence  $f_e = 1$  Hz. Inscrivez les points représentant les échantillons obtenus directement sur la Figure 14.2, si le premier échantillon est pris au temps  $t = 0$ .

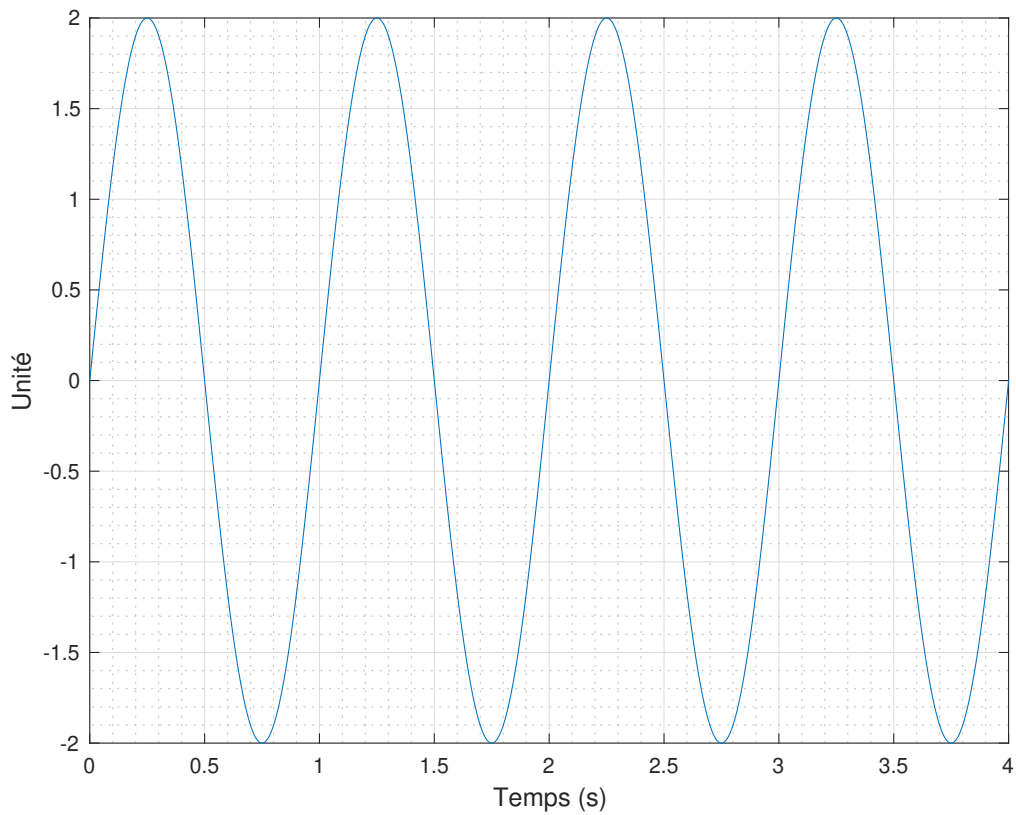


FIGURE 14.2 Onde sinusoïdale,  $y_2(t) = 2 \sin(2\pi t)$

- (c) En comparant, les Figures 14.1 et 14.2, que remarquez-vous ?
- (d) Que devrions-nous faire pour améliorer l'échantillonnage ?

2. (a) Avec différentes couleurs ou forme de points, inscrivez sur la Figure 14.1 les points représentant les échantillons obtenus avec les fréquences d'échantillonnage suivantes,  $f_e = 2$  Hz,  $f_e = 5$  Hz, et  $f_e = 10$  Hz, pour la fonction  $y_1(t)$ .
- (b) Avec différentes couleurs ou points, inscrivez sur la Figure 14.2 les points représentant les échantillons obtenus avec les fréquences d'échantillonnage suivantes,  $f_e = 2$  Hz,  $f_e = 5$  Hz, et  $f_e = 10$  Hz, pour la fonction  $y_2(t)$ .
- (c) Qu'observez-vous ? Quelle est la fréquence d'échantillonnage requise,  $f_e$ , pour que le signal échantillonné contienne toute l'information fréquentielle sans repliement ?
3. La Figure 14.3 présente la fonction  $y_1(t)$  avec un déphasage de  $-\frac{\pi}{4}$  s. Avec différentes couleurs ou forme de points, inscrivez sur la Figure 14.3 les points représentant les échantillons obtenus avec les fréquences d'échantillonnage suivantes,  $f_e = 2$  Hz,  $f_e = 5$  Hz, et  $f_e = 10$  Hz. Qu'observez-vous en comparant l'échantillonnage de  $y_1(t)$  déphasé avec les échantillons inscrits sur la Figure 14.1 ?

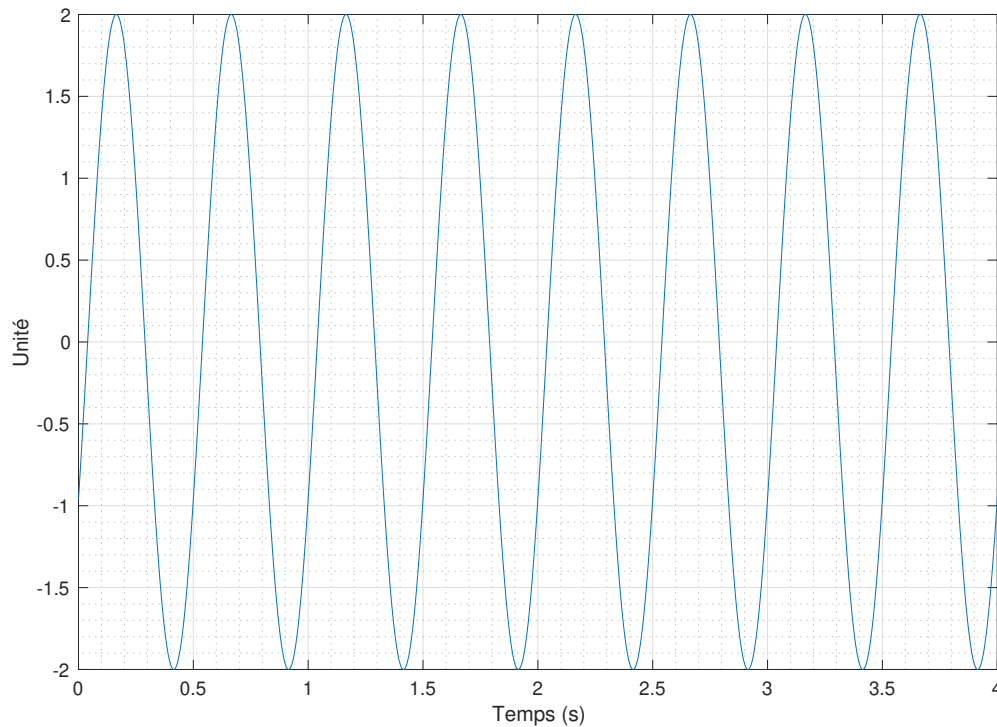


FIGURE 14.3 Onde sinusoïdale déphasée,  $y_1(t) = 2 \sin(4\pi t - \frac{\pi}{4})$

4. (a) La Figure 14.4 présente une onde triangulaire. Quelle est la fréquence fondamentale de ce signal ? Quel est son contenu fréquentiel ?

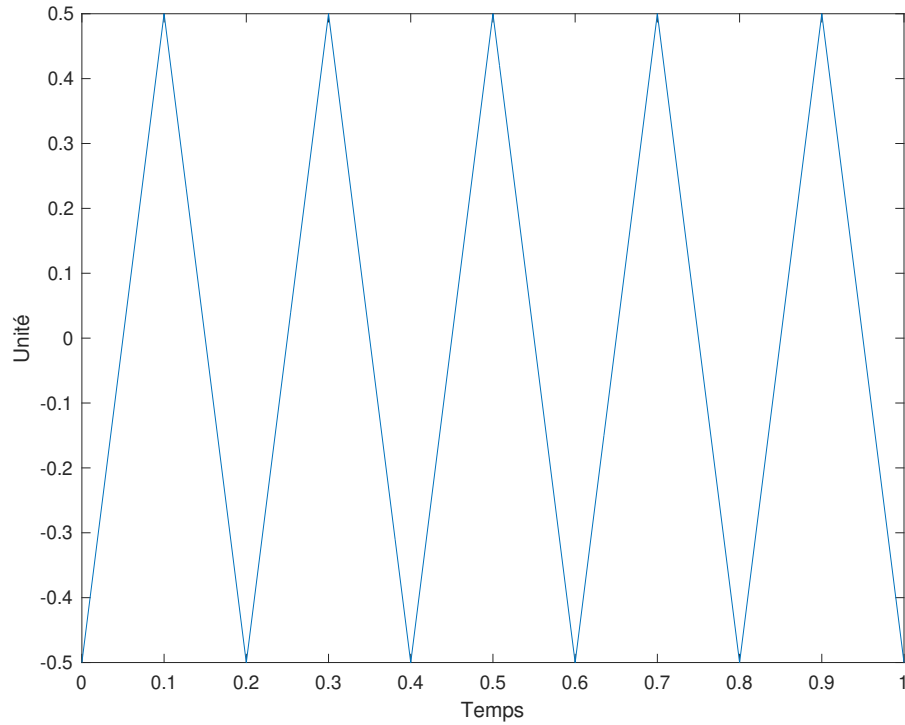


FIGURE 14.4 Onde triangulaire

- (b) Quel est la fréquence d'échantillonnage minimale de ce signal selon le théorème d'échantillonnage de Shannon-Nyquist ?

## E.2 Repliement

La Figure B.1 disponible en annexe de ce guide présente une onde sinusoïdale de fréquence 0.9 Hz.

Échantillonnez ce signal à une fréquence de 1 Hz. Qu’observez-vous ? Quelle est la période de l’onde échantillonnée ?

## E.3 Conception d’un filtre passe-bas selon les spécifications, factorisation et extraction des paramètres $K$ , $Q$ et $\omega_0$

1. Réalisez un filtre passe-bas dont les spécifications apparaissent ci-dessous :
  - Fréquence de coupure à 100 Hz ;
  - Gain centré à 0 dB dans la bande passante avec ouverture vers -10 dB à la bande de transition, à partir de  $f = 30$  Hz.
  - Atténuation minimale de 55 dB à  $f = 500$  Hz.

Des gabarits de graphes logarithmiques sont disponibles en annexe de ce guide. Tracez sur la Figure B.2 le gabarit de spécifications du filtre passe-bas. Ensuite, normalisez les spécifications de ce filtre et tracez le gabarit normalisé sur la Figure B.3.

2. Choisissez la famille et l’ordre du filtre qui remplit les spécifications et écrivez sa fonction de transfert normalisée.
3. Dénormalisez la fonction de transfert du filtre normalisé.
4. Factorisez la fonction de transfert dénormalisée. Les gains DC de chaque fonction doivent être égaux.
5. Déterminer  $K$ ,  $Q$ , et  $\omega_0$  pour chacune des sous-fonctions de transfert.

## E.4 Famille de filtres

1. Parmi les familles de filtre Butterworth, Chebyshev et Bessel, laquelle se démarque par
  - (a) la qualité de sa réponse de phase qui se traduit par une faible distorsion temporelle du signal ?
  - (b) la qualité de sa bande de transition, c.-à-d., la bande de fréquences entre la bande passante et la bande de rejet, qui, à ordre égal, est la moins large des trois ?
  - (c) Quant au troisième type de filtre, c.-à-d., le filtre qui ne se démarque pas par la qualité de sa réponse de phase ni de sa bande transition, de quelle façon se distingue-t-il ?

# 15 PRATIQUE EN LABORATOIRE

## Buts de l'activité

Comprendre l'impact de la numérisation sur la qualité d'un signal analogique et concevoir des filtres anti-repliement avec des logiciels de conception.

- Observer le repliement et le bruit de quantification sur un signal audio.
- Mesurer le bruit de quantification.
- Générer la fonction de transfert d'un filtre passe-bas normalisé, à partir de d'informations portant notamment sur son ordre et sa famille ;
- Afficher les lieux de Bode d'amplitude et de phase d'une fonction de transfert ;
- Factoriser une fonction de transfert sous la forme d'un produit de fonctions de transfert d'ordre 2 et, au besoin, d'un ordre 1 (avec des coefficients réels) ;
- Effectuer une transformation passe-bas normalisé à passe-bas dénormalisé.
- Configurer un microcontrôleur pour numériser un signal à une fréquence donnée.

## Fonctions Python utiles

`scipy.signal.chirp`, `scipy.signal.bessel`, `numpy.arange`, `numpy.linspace`, `numpy.size`, `numpy.sum`, `numpy.sqrt`

### E.1 Fréquence d'échantillonnage et repliement

1. Avec la fonction `scipy.signal.chirp`, générer un signal d'une longueur de 10 secondes qui débute à une fréquence de 500 Hz et termine à une fréquence de 10 kHz avec un fréquence d'échantillonnage de 44.1 kHz.

Pour faire jouer le son, il faut la librairie `sounddevice`. Vous pouvez installer cette librairie avec la commande `pip install sounddevice` puis les fonctions `sounddevice.play` et `sounddevice.wait`.

2. Créer le même signal qu'au numéro précédent mais avec une fréquence d'échantillonnage de 11 kHz. Que remarquez-vous quand vous faites jouer le signal ? Comment expliquer cela ?
3. Générer deux signaux sinusoïdaux de fréquence 500 Hz sur une durée de 20 millisecondes. Le premier signal avec une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz et le deuxième avec avec une fréquence d'échantillonnage de 600 Hz. Afficher les deux signaux superposés avec la fonction `matplotlib.pyplot.plot`. Que remarquez vous ? Quelle est la fréquence du signal échantillonné à 600 Hz ? Comment peut-on éviter ce phénomène ?

## E.2 Partie 2 - Bruit de quantification

1. Reprenez le signal du numéro E.1.1. À l'aide de la fonction `digitize` du fichier `helpers.py`, quantifier le signal sur 8, 4 et 2 bits. Faites jouer chacun de ces signaux quantifiés avec `sounddevice.play` et affichez les avec `matplotlib.pyplot.plot`. Quel est l'impact sur la qualité du signal ?
2. Mesurer l'erreur moyenne de quantification pour les signaux sur 8, 4 et 2 bits à l'aide de la fonction suivante :

$$\epsilon_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \sum_i (x_i - y_i)^2 \right)} \quad (15.1)$$

## E.3 Filtre anti-repliement

1. Avec Python, écrivez la fonction de transfert d'un filtre passe-bas normalisé d'ordre 4 de la famille des filtres de Bessel.
2. Affichez les lieux de Bode d'amplitude et de phase de cette fonction de transfert (Utilisez la fonction `bodeplot` du fichiers `helpers.py`).
3. Factorisez cette fonction de transfert sous la forme d'un produit de fonctions de transfert d'ordre 2 (avec des coefficients réels).
4. Dénormalisez cette fonction de transfert normalisée et factorisée pour un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure  $F_c = 1500$  Hz.
5. Affichez les lieux de Bode d'amplitude et de phase de cette fonction de transfert.
6. Appliquer ce filtre sur le signal obtenu au numéro E1.1 avec la fonction `scipy.signal.lsim`, puis échantillonner ce signal à une fréquence de  $44100 / 4$ . Vous pouvez faire cet échantillonnage en prenant un seul échantillon sur 4 avec la nomenclature Python `y[0::4]`. Qu'arrive-t-il au repliement précédemment observé au numéros E1.2 ?

## E.4 Acquisition sur Arduino

Un code pour l'Arduino et un code pour le PC sont fournis sur la page web. Ce code est très similaire à celui fournit au début de la session pour démarrer votre projet. Cependant, il utilise un compteur matériel interne pour cadencer la numérisation et sauvegarde les données dans un tampon circulaire<sup>1</sup>. À chaque communication initiée par le PC, le Arduino envoie le contenu complet du tableau et le PC l'ajoute (`append`) à un fichier `.csv`.

1. Ouvrir le projet Arduino fourni sur la page Web. Compiler les codes pour le PC et le Arduino et exécutez-les. Le code devrait générer un fichier `.csv` dans le répertoire

---

1. Un tampon circulaire est instancié comme un tableau (`array`). Lorsque le tableau est plein, l'indice d'écriture retourne à 0 et continue à remplir le tableau en écrasant les valeurs antérieures.

d'exécution. Ce fichier représente les données acquisitionnées par le numériseur de l'ADC sur l'entrée analogique A0.

2. Configurer la fréquence d'échantillonnage à 1 kHz et programmer le Arduino. **Attention : il faut prendre en considération la fréquence de transmission et la dimension du tampon circulaire afin de ne pas perdre de données.** Sur l'entrée A0, injectez un signal sinusoïdal avec une tension variant entre 0 et 5 V. Faites une acquisition avec le signal d'entrée à une fréquence de 10 Hz. Ensuite, augmentez la fréquence du signal d'entrée et faites une acquisition à 100 Hz, puis, 1 kHz. Qu'observez-vous entre les différentes acquisitions ?
3. Vous êtes maintenant prêts à intégrer la fonctionnalité du numériseur à votre projet de session pour le canal de l'accéléromètre. Considérez les éléments suivants :
  - Quel est le contenu fréquentiel du signal à échantillonner ?
  - À quelle fréquence avez-vous besoin de l'information de l'accéléromètre pour votre application ?
  - À partir des deux éléments précédents, déterminez la fréquence d'échantillonnage et configurez l'Arduino afin de réaliser l'acquisition. N'oubliez pas d'ajuster le port d'entrée, si nécessaire, et la fréquence de transmission du tampon circulaire.
  - Afin d'éviter le repliement, il faut insérer un filtre passe-bas entre l'accéléromètre et l'entrée du numériseur. Quels seront les paramètres de ce filtre (famille, ordre, fréquence de coupure, etc.) ?

## 16 PRATIQUE PROCÉDURALE 2

### But de l'activité

Mettre en pratique les procédures requises pour :

- Établir la fonction de transfert d'un filtre formé de résistances, condensateurs et d'amplificateurs opérationnels pouvant être considérés comme idéaux ;
- Évaluer la possibilité d'établir une procédure de réglage permettant de fixer la valeur des paramètres  $\omega_0$ ,  $K$  et  $Q$  un à un sans que l'ajustement de l'un n'affecte la valeur des autres ;
- Connaissant la formulation symbolique de la fonction de transfert d'un filtre, donner aux composants de d'un filtre des valeurs qui permettent d'obtenir les valeurs souhaitées pour les paramètres  $\omega_0$ ,  $K$  et  $Q$  de ce filtre ;
- Déterminer et interpréter les coefficients de sensibilité  $S_\mu^Q$  d'un filtre donné ;
- Identifier les spécifications importantes que l'amplificateur opérationnel utilise dans un circuit d'un filtre donné ;
- Concevoir un filtre d'ordre supérieur à 2 ;

### 16.1 Exercices

#### E.1 Analyse de circuit

Le circuit de la figure 16.1 est un filtre actif où l'ampli-op peut être considéré comme idéal.

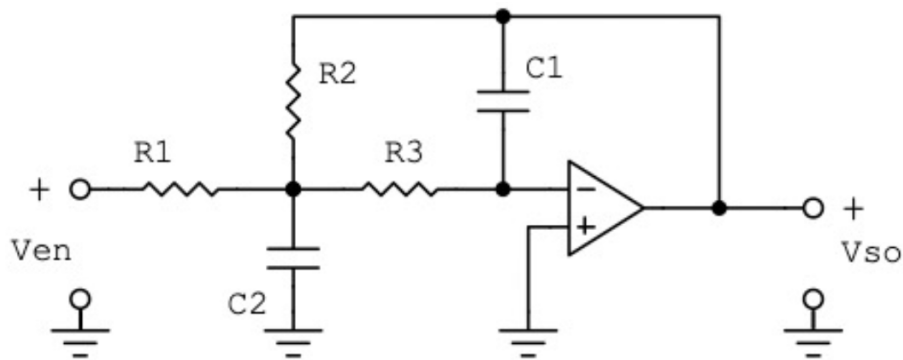


FIGURE 16.1 Filtre actif avec ampli-op idéal

Répondez aux question suivantes :

1. Quelle est la fonction de transfert du circuit, soit  $H(s) = V_{so}(s)/V_{en}(s)$  ? Présenter la fonction de transfert la forme standard, soit  $\frac{-K\omega_c^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2}$ .
2. Donner les valeurs des paramètres  $\omega_c$ ,  $Q$ , et  $K$ .



## E.2 Spécifications de filtre

1. Avec  $C_2 = 1 \text{ F}$  et  $R_2 = 2,2 \Omega$ , donnez les valeurs des résistances  $R_1$ ,  $R_2$ , et  $R_3$  et du condensateur  $C_1$  du circuit du problème précédent pour obtenir un filtre passe-bas Bessel normalisé.
2. Quelle spécification d'un filtre d'ordre 2,  $\omega_c$ ,  $K$ , et  $Q$ , peut être respectée avec moins de rigueur que les deux autres sans entraîner un mauvais fonctionnement du filtre ? Pourquoi ce choix ?
3. À partir des résultats obtenus précédemment, établissez une procédure de réglage permettant d'ajuster la valeur des paramètres  $\omega_c$ ,  $K$ , et  $Q$  un à un sans que l'ajustement de l'un n'affecte la valeur des autres.

Clarification : Vous avez obtenu au no. (1) les valeurs de  $R_1$ ,  $R_2$ , et  $R_3$ . Et ces valeurs ont été utilisées pour réaliser le circuit. Les valeurs obtenues pour  $\omega$ ,  $K$ , et  $Q$  sont donc très proches des valeurs souhaitées. Vous voulez maintenant les ajuster en laboratoire, une à une, de façon plus exacte, en remplaçant ces résistances avec des potentiomètres. Quelle procédure allez-vous suivre, c'est-à-dire, quel potentiomètre doit être ajusté en premier ?

## E.3 Facteur de qualité

La valeur du facteur de qualité  $Q$  d'un certain filtre passe-bande est donnée par l'équation suivante :

$$S_{\mu}^Q = \frac{\mu}{Q} \cdot \frac{dQ}{d\mu} = \frac{\mu}{\left(\frac{\sqrt{2}}{4-\mu}\right)} \cdot \frac{d\left(\frac{\sqrt{2}}{4-\mu}\right)}{d\mu} = \frac{(4-\mu)\mu}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d(4-\mu)^{-1}}{d\mu}$$

On a trouvé  $\sqrt{2}$  donc il s'annule  
car  $1/(4-\mu) = (4-\mu)^{-1}$   
on défine

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{4-\mu}$$

$$= \frac{\mu(4-\mu)}{\sqrt{2}} \cdot -1 \cdot (4-\mu)^{-2} \cdot -1 = \frac{\mu}{4-\mu}$$

où  $\mu$  est le ratio entre deux résistances du circuit réalisant le filtre actif d'ordre 2.

1. Déterminez le coefficient de sensibilité  $S_{\mu}^Q$  de ce filtre permettant de quantifier l'impact d'une variation du paramètre  $\mu$  sur son facteur de qualité  $Q$ .
2. D'après le résultat obtenu au no. (1), qu'arrive-t-il au facteur de qualité  $Q$  de ce filtre si  $\mu$  augmente de 0.1% lorsque  $Q=10$  ?
3. Vérifiez le résultat obtenu au no. (2) avec la formulation du facteur de qualité  $Q$  donnée au no. (1).
4. Répétez (2) et (3) pour le cas où  $\mu$  augmente de 1% lorsque  $Q=10$ . Qu'en concluez-vous ?

## E.4 Étapes de conception de filtre

Faire la liste des étapes de conception d'un filtre analogique.

## 17 VALIDATION AU LABORATOIRE

Lors de la validation nous évaluerons la méthodologie et les techniques utilisées pour effectuer les mesures demandées pour le rapport. Les valeurs mesurées ne seront pas évaluées à cette étape, seulement les manipulations effectuées sur vos montages et avec les instruments de mesure.

Les buts de cette activité conjointe sont de :

- Évaluer la méthodologie de mesure en laboratoire ;
- Recevoir immédiatement la rétroaction utile à la poursuite de vos apprentissages.

### Validation en laboratoire

Une courte validation de votre montage et de votre méthodologie de mesure sera effectuée pendant la période de validation. L'horaire de passage sera affichée sur le site Web. De plus, du soutien technique sera disponible de la part d'auxiliaire(s) d'enseignement.

Assemblez votre système de numérisation complet incluant le filtre anti-repliement. Consultez la documentation du projet concernant les détails techniques du montage tels que les différentes entrées et sorties de l'Arduino, la topologie de l'ampli-op, l'identification des composants, etc.

Lors de l'évaluation, vous devrez très brièvement (moins de 2 minutes) expliquer votre montage en portant une attention particulière sur les éléments importants aux mesures demandée. Expliquer la configuration des systèmes impliqués et le chemin du signal qui est numérisé de sa création à son enregistrement.

Faire la démonstration d'une mesure pour un point du lieu de Bode en amplitude expérimental. Indiquer la configuration des sources et des instruments de mesures. Expliquez chaque étape de la mesure. Remarquez qu'en laboratoire, la précision des instruments de mesure et le bruit limitent la mesure des petites amplitudes et il pourrait être difficile de mesurer une atténuation en deçà de 30 dB.

Enfin vous devrez montrer la procédure pour effectuer une acquisition du signal analogique avec enregistrement des données sur l'ordinateur. Expliquez la configuration des sources et des instruments de mesure. Afficher le résultat de l'acquisition sous forme de graphique montrant l'évolution du signal dans le temps.

La grille d'évaluation sommaire pour la validation est disponible à la section [11.2](#).

## A ANNEXE : Composants disponibles pour l'APP7GE

### Condensateurs

Vous trouverez des condensateurs  $\pm 2\%$  au local C1-3019 aux heures d'ouverture des techniciens. **Assurez de commencer votre conception tôt afin d'avoir le temps d'aller chercher vos composants!** Nous vous suggérons de choisir les valeurs en gras qui apparaissent dans le tableau suivant puisque nous disposons d'une bonne quantité de ces condensateurs.

TABLEAU A.1 Condensateurs disponibles

Valeurs des condensateurs 2 % disponibles en nF																			
<b>1.0</b>	<b>1.2</b>	1.5	<b>1.8</b>	2.2	2.7	3.3	<b>3.9</b>	<b>4.7</b>	5.6	<b>6.8</b>	8.2	<b>10</b>	15	<b>22</b>	<b>33</b>	<b>39</b>	<b>47</b>	<b>68</b>	<b>82</b>

TABLEAU A.2 Tableau des tolérances des condensateurs

Code	Tolérance
B	$\pm 0.1\%$
C	$\pm 0.25\%$
F	$\pm 1\%$
G	$\pm 2\%$
J	$\pm 5\%$
K	$\pm 10\%$
M	$\pm 20\%$
Z	$+80\%, -20\%$

Ces codes sont surtout employés pour les condensateurs, mais peuvent aussi se retrouver sur d'autres types de pièces. Dans le doute, prenez l'habitude de consulter la fiche du fabricant de la pièce concernée.

### Résistances

Vous trouverez dans les laboratoires C1-3018 et C1-3024 toutes les valeurs 5 %. Dans le laboratoire C1-3018, vous trouverez également la quasi-totalité des valeurs 1 % comprises entre 1 k $\Omega$  et 1 M $\Omega$  ainsi que quelques valeurs en dehors de cette plage. Si vous avez besoin d'une valeur 1 % qui n'est pas disponible, il vous faudra l'obtenir en mesurant des résistances 5% et en les combinant au besoin pour obtenir la valeur 1% souhaitée. Pour ce faire favorisez des combinaisons en parallèle qui résultent en un montage de meilleure qualité que des combinaisons en série.

## B ANNEXE B : Gabarits

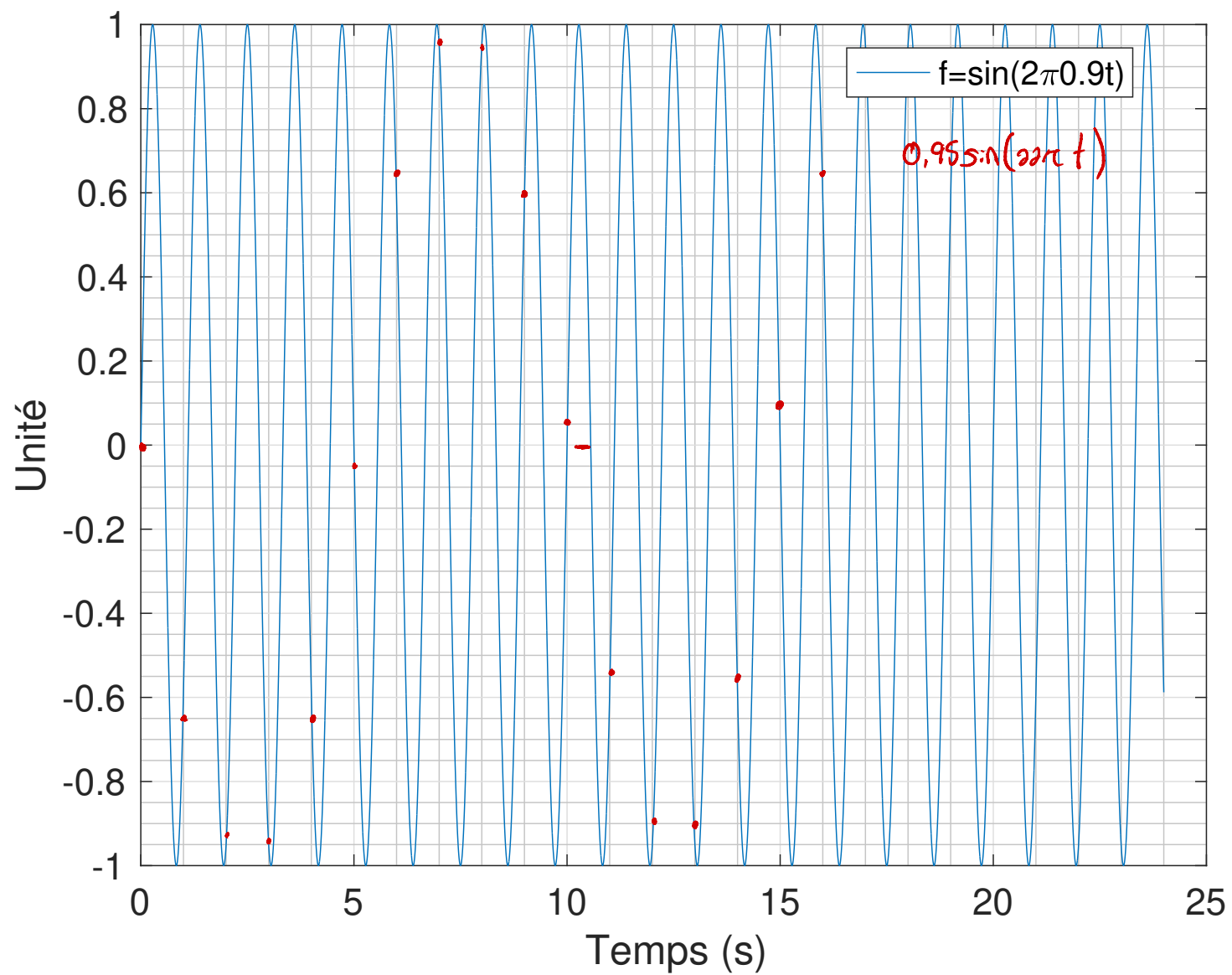


FIGURE B.1 Onde sinusoïdale de fréquence 0.9 Hz et d'amplitude de 1.

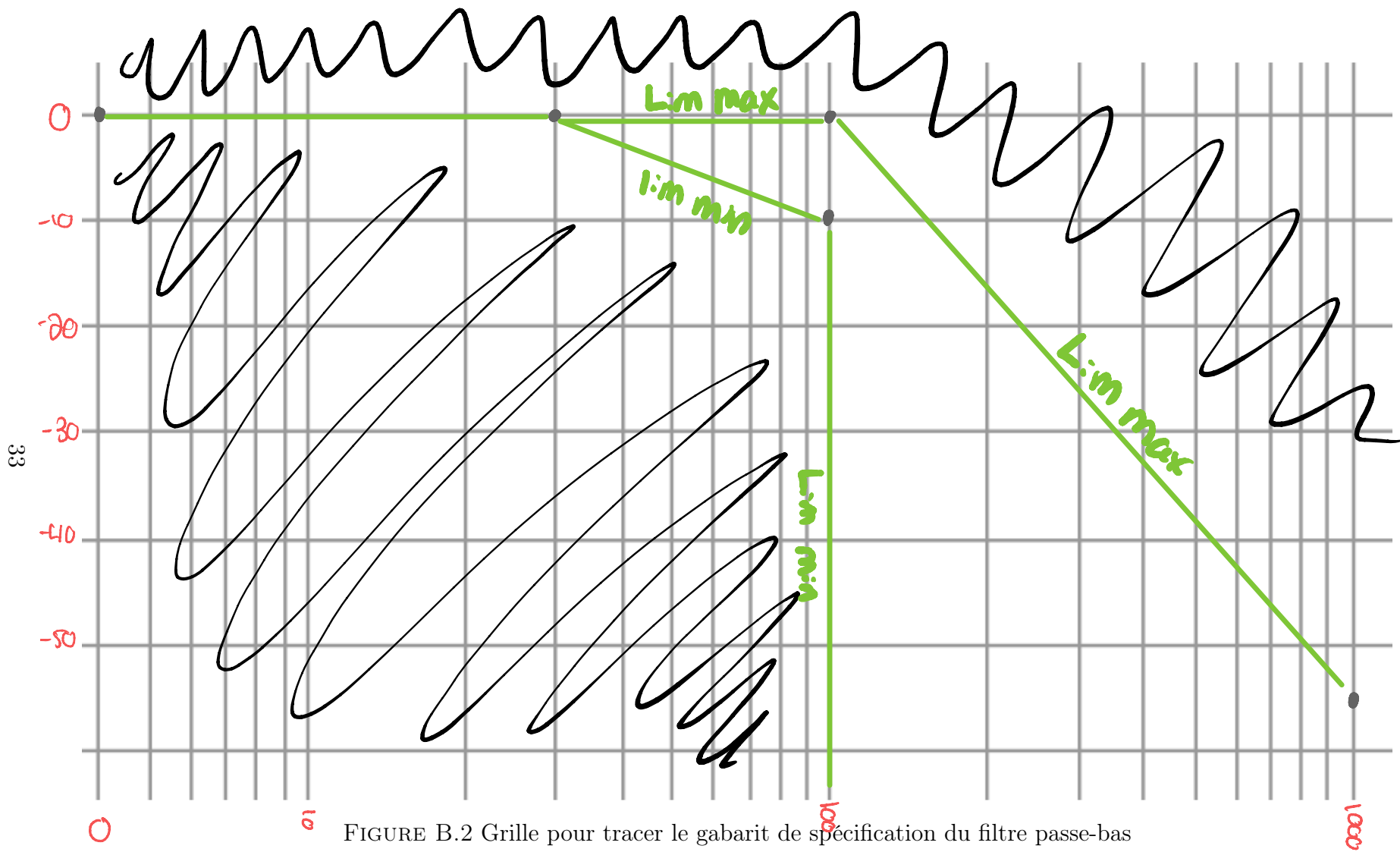


FIGURE B.2 Grille pour tracer le gabarit de spécification du filtre passe-bas

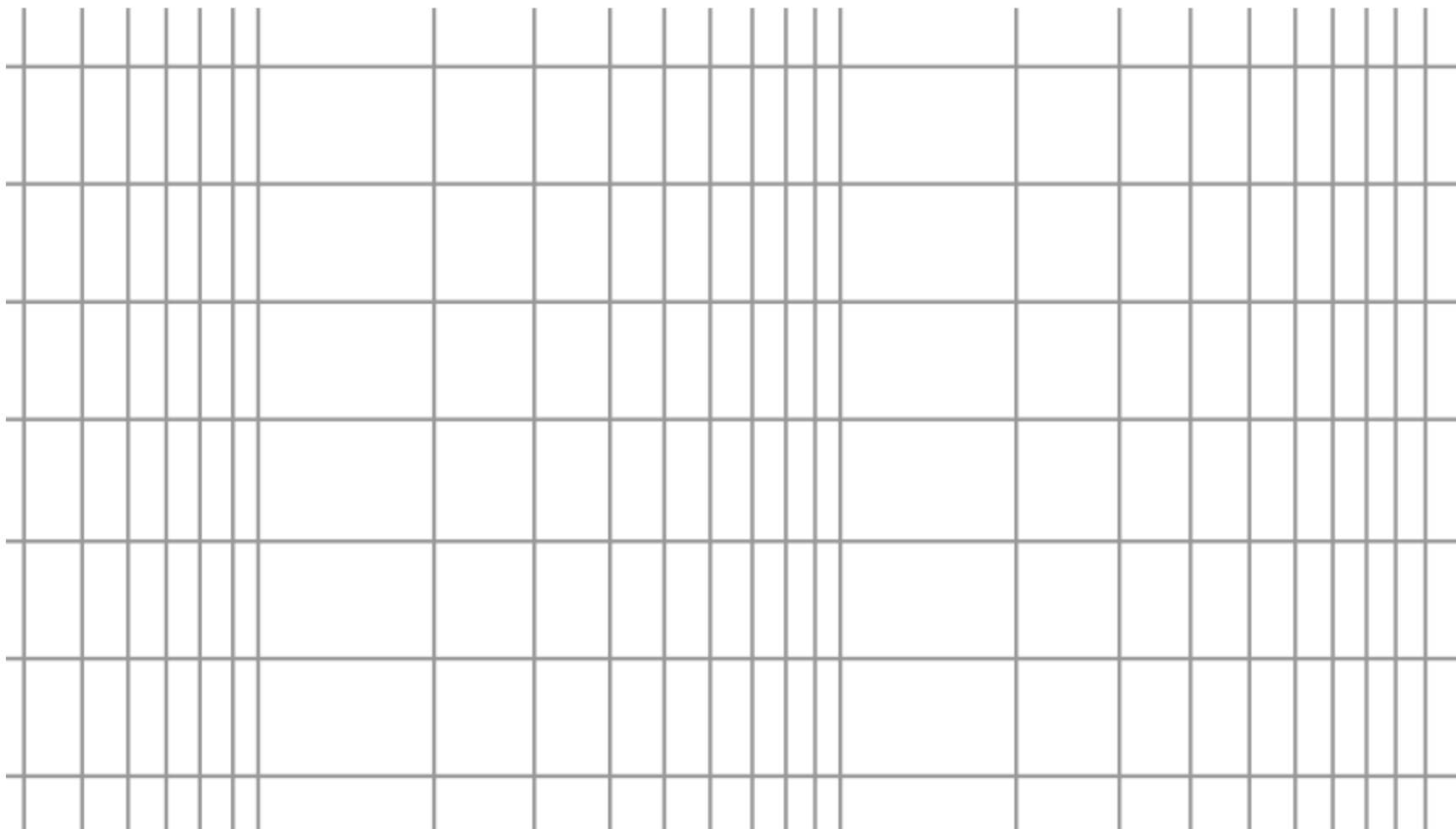


FIGURE B.3 Grille pour tracer le gabarit de spécification du filtre passe-bas normalisé

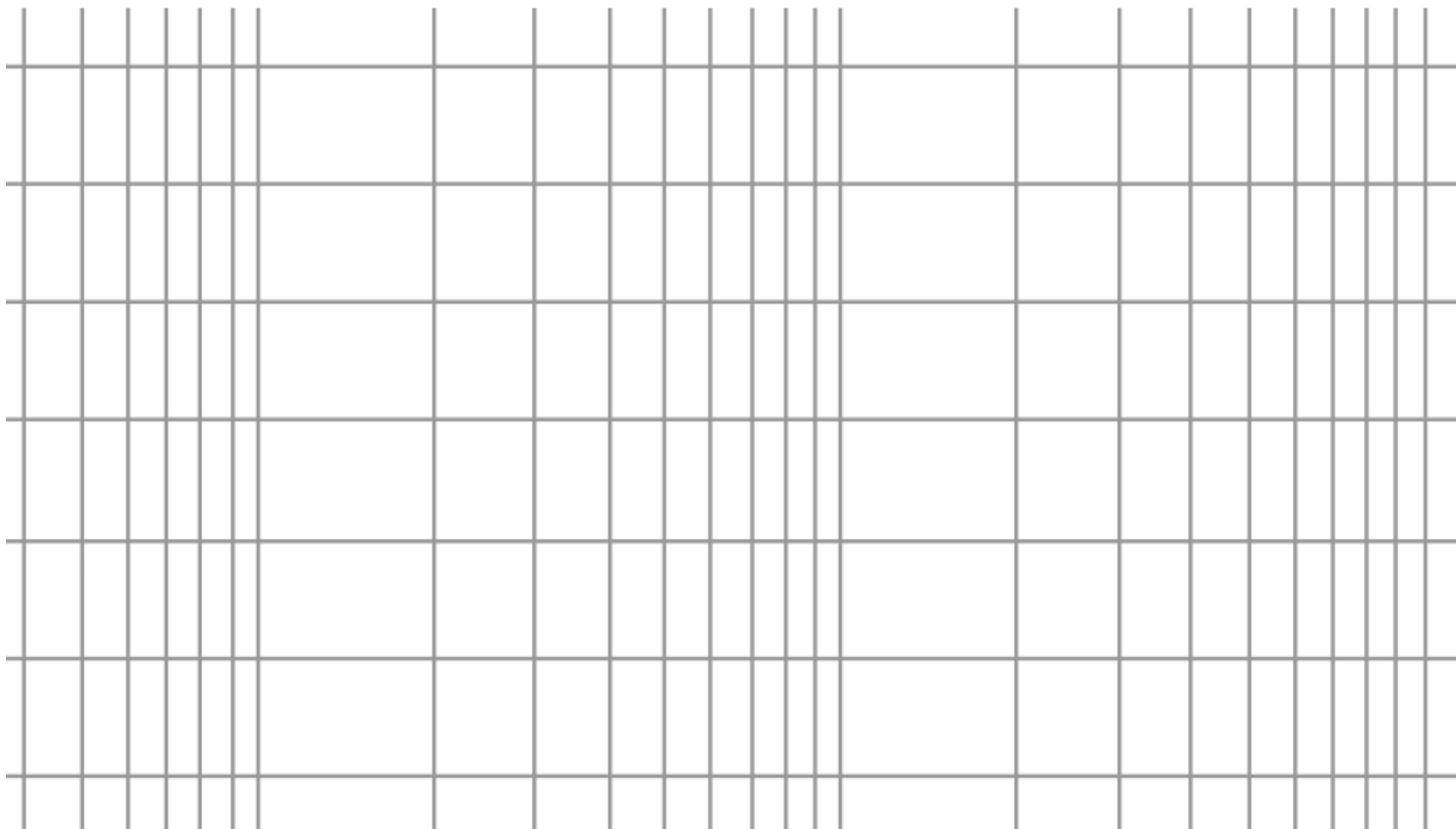


FIGURE B.3 Grille pour tracer le gabarit de spécification du filtre passe-bas normalisé