



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER



Université
de Toulouse

Licence EEA Semestre **3**

Cahier de Travaux Dirigés d'Electronique

Responsable : Mr Ternisien, marc.ternisien@laplace.univ-tlse.fr

Préambule aux enseignements d'Electronique

Introduction

L'électronique est une science de l'ingénieur qui consiste à étudier et concevoir des dispositifs effectuant un traitement non linéaire des signaux électriques, c'est-à-dire courant ou tension électrique, porteurs d'information ou d'énergie. Dans cette définition, la notion de l'information est considérée dans son sens le plus large: elle désigne toute grandeur (physique, telle que la température ou la vitesse, ou abstraite, telle qu'un son, une image ou un code) qui évolue en temps réel selon une loi inconnue à l'avance.

Comme tous les automatismes, les systèmes électroniques bien conçus comportent deux parties:

- l'une, opérative, gère les signaux de puissance porteurs d'énergie (courants forts),
- l'autre, informationnelle, gère les signaux porteurs d'information (courants faibles).

Disciplines de l'électronique

L'électronique est une famille de disciplines se distinguant suivant le type de signal traité, la famille d'application ou encore le niveau hiérarchique qu'occupe l'élément étudié dans le système global. Parmi les différents types de signaux on distingue :

- Le signal informationnel numérique (électronique numérique)
- **Le signal informationnel analogique (électronique analogique) (cours F. Morancho)**
- Le signal de puissance (électronique de puissance)

Il existe aussi toute une partie de l'électronique concernant l'électronique mixte (systèmes dans lesquels coexistent les signaux numériques et analogiques)

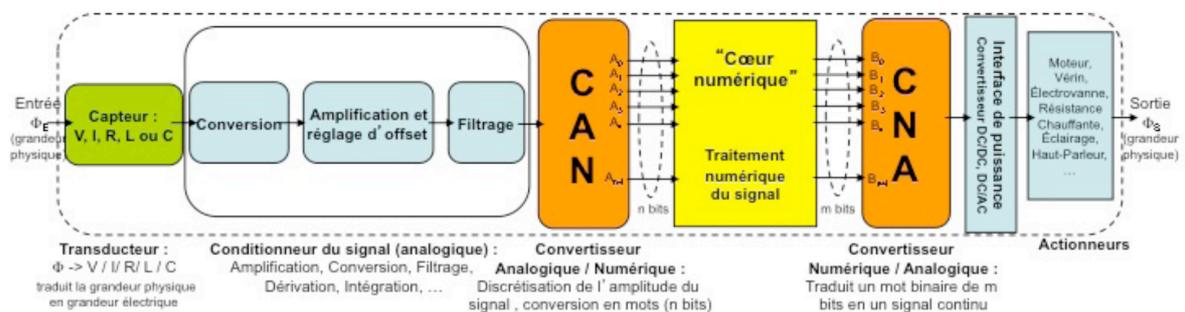


Figure 1 : Exemple d'un circuit électronique mixte comprenant des blocs analogiques, numériques et de puissance.

L'électronique est un secteur qui est appelé à continuer sa forte croissance dans les années à venir. En effet, on a déjà assisté à l'explosion de la téléphonie mobile, des ordinateurs et des lecteurs DVD par exemple.

Un autre exemple de notre vie quotidienne est l'automobile : l'électronique y a été introduite par vagues successives. La première a été initiée en 1974 par les législations sur l'environnement qui ont conduit à l'introduction de commandes du contrôle du moteur. La deuxième a été déclenchée par l'introduction sur le marché de nouveaux dispositifs de sécurité comme l'ABS et l'airbag qui sont apparus respectivement en 1978 et 1982. La troisième vague provient de la large introduction des systèmes de transport intelligent qui sont entrés sur le marché en 1998. La quatrième vague, dont les premiers systèmes sont apparus en 2000, consiste à remplacer les systèmes mécaniques et hydrauliques, souvent lourds et coûteux, par des systèmes électroniques. La vague actuelle consiste à remplacer les moteurs thermiques, gros consommateurs des réserves mondiales de pétrole, par des moteurs hybrides, qui résultent de l'association d'un moteur thermique et d'un moteur électrique (Figure 2-a) ou par des moteurs entièrement électriques (Figure 2-b).

Afin d'illustrer les différentes fonctions de l'électronique qui vont être étudiées lors de cette année universitaire, un exemple de circuit électronique utilisé dans l'automobile "moderne" est présenté dans ce préambule : il s'agit du circuit d'allumage automatique des phares d'une automobile en cas d'obscurité. Depuis quelques années déjà, cette fonction électronique est présente sur de nombreux modèles : un composant électronique appelé photo-détecteur (cela peut être une photo-diode, un photo-transistor ou une photo-résistance) situé dans le pare-brise ou à proximité de celui-ci, réagit différemment selon qu'il est ou non exposé à la lumière. Ce photo-détecteur commande ainsi un circuit qui déclenche l'allumage ou l'extinction des phares de l'automobile.



Figure 2 : Exemple d'automobiles "modernes" : a) la Toyota Prius hybride, b) la Tesla Model S électrique ; un photo-détecteur placé sur la planche de bord détecte l'obscurité (ou la lumière) et allume (ou éteint) automatiquement les phares.

Exemple de circuit analogique et d'approche par bloc

La figure 3 montre l'intégralité d'un circuit de commande d'allumage automatique des phares. Il est composé de plusieurs blocs fonctionnels :

- un bloc **détection de l'obscurité** qui est un photo-transistor (c'est le capteur) alimenté sous + 12 Volts qui délivre un courant proportionnel à l'intensité lumineuse détectée,

- un bloc de **conversion** effectuant ici la conversion “courant-tension”,
- un bloc **conditionneur du signal** multi-fonctionnel effectuant ici amplification, filtrage et décalage de la tension,
- un bloc **comparateur** dont la sortie permet l’allumage ou l’extinction des phares (qui sont ici les actionneurs) .

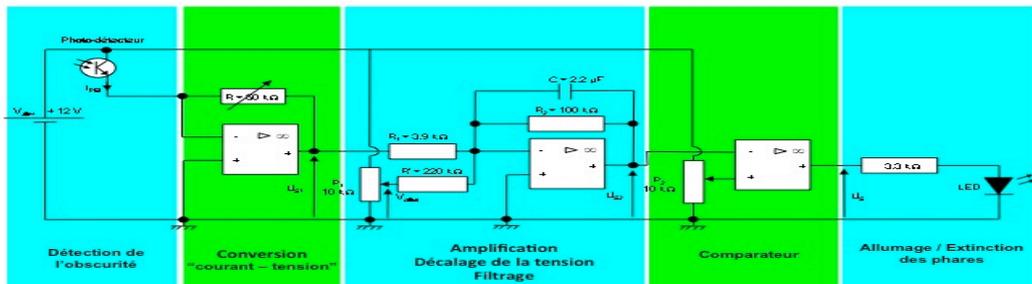


Figure 3: Circuit de commande d’allumage automatique des phares d’une automobile en cas d’obscurité.

On peut voir que, pour réaliser ces blocs fonctionnels, on a besoin de composants électroniques de base: des capteurs, des composants passifs (résistances, condensateurs, inductances) et des composants actifs (amplificateurs opérationnels, diodes, transistors,...).

Lors de ce 1^{er} semestre, certaines de ces fonctions analogiques seront étudiées: le filtrage (passif et actif), l’amplification et l’intégration.

Les étudiants qui poursuivront dans l’option EEA au second semestre étudieront d’autres fonctions: la source de courant, la conversion d’impédance (résistance négative, simulateur de capacité ou d’inductance), le comparateur, la bascule de Schmitt,...L’objectif pour cette année est de vous permettre d’appréhender un certain nombre de blocs fonctionnels pour pouvoir par la suite (L3, Master) les assembler de manière à créer des dispositifs de traitement de l’information plus complexes.

L1EEA : Fiche récapitulative de connaissances et compétences**Semestre 2****Connaissances Acquisies**

- Connaître les éléments théoriques nécessaires à la compréhension des phénomènes électriques

Compétences Acquisies

- Déterminer les grandeurs électriques dans un circuit
- Modéliser un circuit par un schéma équivalent et résoudre les équations mathématiques associées

Compétences Consolidées

- Compétences issues du S1 et de la terminale

L2EEA : Fiche récapitulative de connaissances et compétences**Semestre 3****Connaissances Acquisées**

- Notion d'Ampli de Tension et de filtrage du 1^o ordre passif
- Fonctionnement d'AOP en régime linéaire
- Lecture de Datasheet associée à l'utilisation d'AOP
- Utilisation d'outils de caractérisation électrique (Oscilloscope, Multimètre)

Compétences Acquisées

- Maîtriser les mesures électriques en continu et alternatif (oscilloscope - multimètre) ainsi que leur interprétation
- Mesurer la fonction de transfert d'un quadripôle simple (amplificateur, filtre premier ordre) et la tracer dans le plan de Bode.
- Comprendre et vérifier les données techniques (datasheet) d'un amplificateur opérationnel à l'aide de mesures
- Savoir définir un filtre (Nature, sélectivité)

Compétences Consolidées

- Application des théorèmes de l'électrocinétique
- Utilisation des complexes et notion d'impédance associée

Semestre 4**Connaissances Acquisies**

- Utilisation de montages AOPs pour des circuits spécifiques (Filtrage du second ordre, Oscillateurs, Compérateurs)
- Maitrise des techniques de mesures de circuits (Oscilloscope, Multimètre)

Compétences Acquisies

- Concevoir et réaliser un circuit électrique à base d'un ou 2 AOPs pour des fonctions simples (Amplification, Filtrage, Oscillateurs)
- Maitrise des mesures électriques et interprétations
- Analyse d'un circuit et déduction de sa fonction

➤ Compétences Consolidées

- Compétences du programme de S3

L3EEA : Fiche récapitulative de connaissances et compétences**Semestre 6****Connaissances Acquisies**

- Caractéristiques des matériaux SC et leur utilisation en fonctionnement transistor
- Propriétés des montages à base de composants actifs
- Approfondissement des connaissances de l'AOP et les types de contre réaction associées

Compétences Acquisies

- Analyse à l'aide d'outils mathématiques de structures de circuits complexes comportant un ou plusieurs composants actifs
- Proposer, concevoir, tester et valider un cahier des charges concernant un montage avec plusieurs composants actifs

Compétences Consolidées

- XXX1
- XXX2

TD 1 : GÉNÉRALITÉS SUR L'AMPLIFICATION

Objectifs :

- **Énoncer** les définitions des grandeurs suivantes : fonction de transfert, facteur d'amplification en tension, gain en tension, résistance d'entrée et résistance de sortie.
- **Dessiner** le modèle d'un amplificateur de tension quelconque.
- **Énoncer et appliquer** correctement l'énoncé du pont diviseur de tension.
- **Calculer** un facteur d'amplification en tension à vide et en charge.

Exercice 1

On considère un amplificateur de tension linéaire (pour petits signaux) défini par sa fonction de transfert à vide $\underline{H}_0 = \frac{\underline{U}_{S0}}{\underline{U}_E}$, son facteur d'amplification à vide $A_{v0} = \left| \frac{\underline{U}_{S0}}{\underline{U}_E} \right|$, sa résistance d'entrée R_E et sa résistance de sortie R_S .

1. **Dessiner** le modèle équivalent simplifié de cet amplificateur dans le cadre pointillé ci-dessous.



Cet amplificateur de tension est attaqué par un générateur sinusoïdal qui délivre, à vide, une tension \underline{E}_g et de résistance interne R_g ($R_g = 50 \Omega$).

2. **Dessiner** le générateur sinusoïdal sur la figure ci-dessus.
3. **Exprimer** \underline{U}_E en fonction de \underline{E}_g , R_g et R_E .
4. **Exprimer** \underline{U}_{S0} en fonction de \underline{U}_E et en **déduire** \underline{U}_{S0} en fonction de \underline{E}_g , R_g et R_E .
5. On règle le générateur sinusoïdal à la valeur efficace $E_g = 51 \text{ mV}$. Les mesures effectuées montrent que les tensions d'entrée et de sortie sont en opposition de phase et que leurs tensions efficaces valent : $U_E = 50 \text{ mV}$ et $U_{S0} = 0,5 \text{ V}$.
 - a. **Calculer** la valeur de la résistance d'entrée R_E de l'amplificateur.
 - b. **Calculer** la fonction de transfert \underline{H}_0 et le facteur d'amplification à vide A_{v0} de l'amplificateur.
6. On branche en sortie de l'amplificateur une résistance de charge R_L ($R_L = 1 \text{ k}\Omega$) : la tension de sortie est alors modifiée ; elle a désormais pour valeur efficace : $U_S = 0,45 \text{ V}$.
 - a. **Dessiner** la résistance de charge R_L sur la figure ci-dessus.

- b. **Calculer** la valeur de la résistance de sortie R_S de l'amplificateur.

Exercice 2

On considère un amplificateur de tension linéaire (pour petits signaux) défini par son facteur d'amplification en tension à vide : $A_{V0} = |H_0(j\omega)| = \left| \frac{U_{S0}}{U_E} \right|$, sa résistance d'entrée R_E et sa résistance de sortie R_S .

Le générateur sinusoïdal délivre, à vide, une tension de valeur efficace 53 mV et sa résistance interne vaut $R_g = 5 \text{ k}\Omega$.

À l'aide de l'oscilloscope, on observe que les tensions d'entrée et de sortie sont en opposition de phase ; en outre, leur amplitude vaut : $U_E = 50 \text{ mV}$ et $U_{S0} = 5 \text{ V}$.

1. **Exprimer** l'amplitude de la tension d'entrée U_E en fonction de l'amplitude de la f.é.m. du générateur E_g et des résistances R_E et R_g . En **déduire** la valeur de la résistance d'entrée R_E .
2. **Calculer** la fonction de transfert $H_0(j\omega)$ et le facteur d'amplification en tension A_{V0} à vide.
3. L'amplificateur de tension a une résistance de sortie R_S et il est chargé par une résistance R_U . **Exprimer** le facteur d'amplification en tension en charge A_{Vcb} en fonction de A_{V0} , R_S et R_U .
4. Lorsque l'amplificateur est chargé par une résistance de $200 \text{ }\Omega$, l'amplitude de la tension de sortie, qui valait 5 V à vide, vaut alors 3,33 V, alors que l'amplitude de la tension d'entrée n'a pas été modifiée. **Calculer** la valeur de la résistance de sortie R_S de l'amplificateur.
5. Comment **vérifier** que l'impédance de sortie est purement résistive ?

Exercice 3

En régime continu, deux amplificateurs identiques sont placés à la suite (en chaîne) : leur résistance d'entrée vaut $10 \text{ k}\Omega$ et leur résistance de sortie vaut $1 \text{ k}\Omega$ et leur facteur d'amplification en tension à vide est : $A_{V0} = 10$.

1. **Calculer** la tension de sortie aux bornes d'une résistance de charge de $1 \text{ k}\Omega$, quand le générateur a une f.é.m. de 20 mV et une résistance de $1 \text{ k}\Omega$.
2. **Déterminer** le facteur d'amplification en tension à vide, la résistance d'entrée et la résistance de sortie de l'amplificateur équivalent à cette association.

Exercice 4

Un amplificateur de résistance d'entrée R_E , de facteur d'amplification en tension à vide A_{V0} et de résistance de sortie R_S , est chargé par une résistance R_U . Un générateur continu, de résistance interne R_g et de tension à vide d'amplitude E_g , applique une tension U_E à l'entrée de cet amplificateur.

1. **Exprimer** la tension de sortie en charge U_S en fonction de E_g , R_g , R_E , A_{V0} , R_S et R_U . Quelles doivent être les valeurs de R_E et R_S pour que la tension de sortie soit maximale, quelles que soient les valeurs de R_g et de R_U ?
2. **Exprimer** la puissance absorbée par R_U en fonction de U_E , A_{V0} , R_S et R_U . Quelle valeur de R_S permet de transférer une puissance maximale dans R_U ?

3. **Exprimer** la puissance délivrée par la source liée \mathcal{A}_{V0}, U_E et la puissance disponible sur la charge R_U ; **tracer** ces puissances en fonction de R_U et interpréter.

Questions :

- **Dessiner** le modèle d'un amplificateur de tension quelconque.
- **Donner** la résistance d'entrée d'un amplificateur idéal.
- **Donner** la résistance de sortie d'un amplificateur idéal ?
- Comment varie la tension à la sortie d'un amplificateur non idéal lorsqu'on y branche une résistance ?
- Dans un amplificateur à plusieurs étages, quel est l'effet de l'impédance d'entrée d'un étage sur l'étage qui le précède ?

TD 2 : AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL - MONTAGES DE BASE

Objectifs :

- **Savoir utiliser** du papier semi-logarithmique.
- **Énoncer** les hypothèses de l'amplificateur opérationnel idéal.
- **Donner** (sans calcul) les fonctions de transfert des amplificateurs non-inverseur et inverseur.
- **Savoir calculer** les fonctions de transfert des amplificateurs non-inverseur et inverseur.

Exercice 1 : Utilisation du papier semi-logarithmique

Des mesures réalisées sur un amplificateur de tension ont permis d'établir le relevé de mesures suivant :

Fréquence f (Hz)	10	15	20	28	42	65	110	220	460	1000
G_V (dB)	-17,5	-14,2	-11,7	-9,1	-6,2	-3,7	-1,7	-0,5	-0,1	0

Fréquence f (Hz)	2000	4200	8500	15000	23000	34000	48000	70000	100000	2000
G_V (dB)	-0,1	-0,4	-1,5	-3,6	-6	-8,8	-11,5	-14,5	-17,5	-0,1

On rappelle que le gain en tension d'un amplificateur est défini par la relation : $G_V(dB) = 20 \log\left(\frac{U_S}{U_E}\right)$, où U_S et U_E sont respectivement les tensions de sortie et d'entrée de l'amplificateur.

1. **Tracer** sur la feuille semi-log fournie la courbe représentant la variation du gain G_V en fonction de la fréquence f . On choisira pour l'axe des gains une échelle de 1 cm pour 1 dB.
2. À l'aide du graphique, **déterminer** le gain correspondant à une fréquence de 100 Hz. **Déduire** par le calcul l'amplitude de la tension de sortie, sachant que l'amplitude de la tension d'entrée a été fixée à 10 V, indépendamment de la fréquence.
3. La bande passante est la largeur de la plage des fréquences pour lesquelles le gain obéit à l'inégalité : $G_V > G_I = G_{V_{max}} - 3$ dB.
 - a. **Déterminer** graphiquement $G_{V_{max}}$ puis calculer G_I .
 - b. **Déterminer** graphiquement les fréquences f_1 et f_2 pour lesquelles le gain est égal à G_I .
 - c. En **déduire** la bande passante $\Delta f = f_2 - f_1$ de cet amplificateur.
4. **Déterminer** graphiquement les pentes à basses et hautes fréquences.

Exercice 2

On considère le schéma de la **figure 1** qui est le modèle d'un amplificateur particulier : l'amplificateur opérationnel. Ce modèle comprend les impédances d'entrée sur les entrées inverseuse (Z_{E-}) et non-inverseuse (Z_{E+}), l'impédance d'entrée différentielle (Z_d), une source de tension liée à la tension différentielle de l'entrée (A_r) et une impédance de sortie (Z_S).

1. Quelle est l'hypothèse d'un amplificateur idéal en terme d'impédance d'entrée ?
2. Quelles sont les hypothèses d'un amplificateur opérationnel idéal en termes d'impédances d'entrée ?
3. Quelle est l'hypothèse d'un amplificateur idéal en terme d'impédance de sortie ?
4. Quelle est l'hypothèse d'un amplificateur opérationnel idéal en terme d'impédance de sortie ?
5. Quelles sont les hypothèses d'un amplificateur opérationnel idéal en terme de fonction de transfert (ou facteur d'amplification « complexe » \underline{A}_d) ?
6. **Redessiner** le schéma de la figure 1 en tenant compte des hypothèses simplificatrices posées aux questions 2, 4 et 5.
7. Quelles sont les hypothèses d'un amplificateur opérationnel idéal en termes de tensions d'entrée (U_{E-} et U_{E+}) et de courants d'entrée (I^+ et I^-) ?

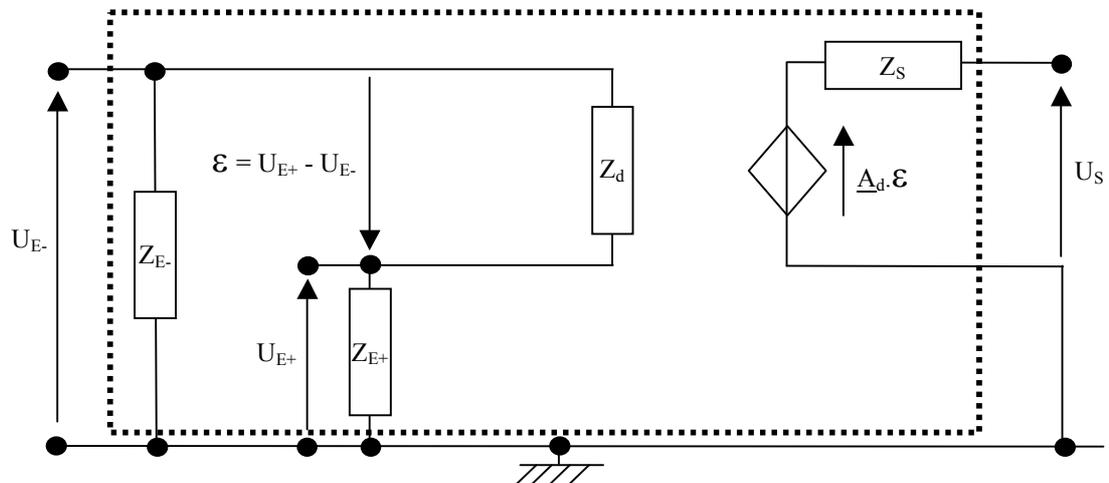


Figure 1

Exercice 3

On considère le montage de la **figure 2** dans lequel la tension d'entrée U_E est continue.

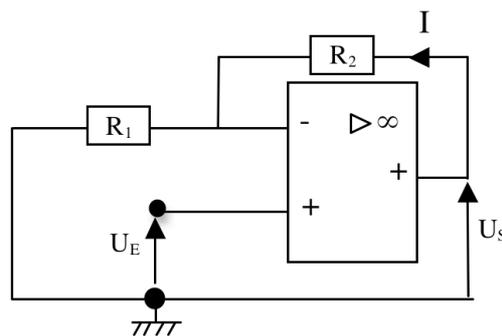


Figure 2

1. **Expliquer** pourquoi l'amplificateur opérationnel peut fonctionner en régime linéaire.
2. **Rappeler** les deux hypothèses d'idéalité d'un amplificateur opérationnel concernant les courants d'entrée I^+ et I^- d'une part et les tensions d'entrée U_{E+} et U_{E-} d'autre part.
3. **Exprimer** I en fonction de U_E et de R_1 .
4. En **déduire** la fonction de transfert $H = \frac{U_S}{U_E}$ en fonction de R_1 et de R_2 .

5. **A.N.** : $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $U_E = 1 \text{ V}$. **Calculer** U_S .
6. On connecte une résistance de charge R_L ($R_L = 5,5 \text{ k}\Omega$) en sortie. **Calculer** le courant traversant R_L .
7. Quel est le nom de ce montage ?
8. Quelles sont les impédances d'entrée et de sortie de ce montage ?

Exercice 4

On considère le montage de la **figure 3** dans lequel la tension d'entrée U_E est continue.

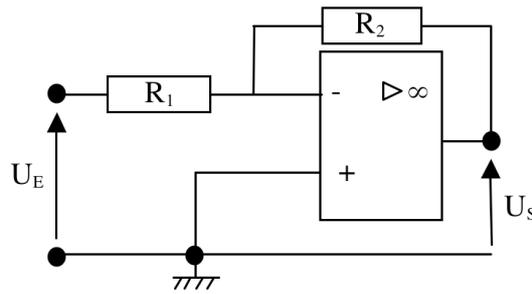


Figure 3

1. **Déterminer** la fonction de transfert $H = \frac{U_S}{U_E}$ en fonction de R_1 et de R_2 .
2. En **déduire** le facteur d'amplification en tension $A_v = |H|$.
3. **A.N.** : $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $U_E = 1 \text{ V}$. **Calculer** U_S .
4. Quel est le nom de ce montage ?
5. Quelles sont les impédances d'entrée et de sortie de ce montage ?

Exercice 5

On considère à nouveau le montage de la **figure 2** dans lequel la tension d'entrée est une tension sinusoïdale. Le facteur d'amplification différentielle A_d d'un AO dépend de la fréquence suivant

l'expression : $A_d = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$ avec $A_0 = 10^5$ et $\omega_0 = 20\pi \text{ rad/sec}$.

Tracer la réponse dans le plan de Bode (module uniquement) :

- de l'AO en boucle ouverte,
- du montage non inverseur.

Exercice 6

On considère le schéma de la **figure 4** dans lequel la tension d'entrée est une tension sinusoïdale.

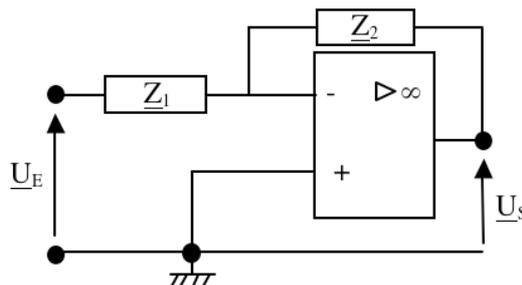


Figure 4

1. Quel est le nom de ce montage ?
2. **En déduire** la fonction de transfert $\underline{H} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E}$ en fonction de \underline{Z}_1 et \underline{Z}_2 .

Dans les questions 3, 4 et 5, \underline{Z}_1 et \underline{Z}_2 sont deux résistances (respectivement R_1 et R_2).

3. Dans ces conditions, déterminer :
 - a. la fonction de transfert \underline{H} ,
 - b. le facteur d'amplification A_{V_s} ,
 - c. le gain en tension en dB G_{V_s} ,
 - d. l'impédance d'entrée $\underline{Z}_E = \frac{\underline{U}_E}{\underline{I}_E}$ de ce montage.

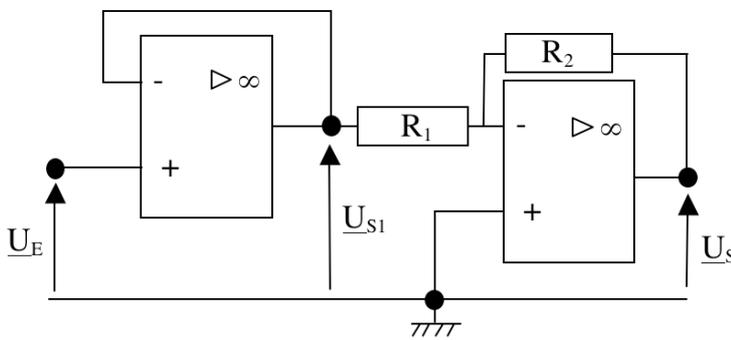


Figure 5

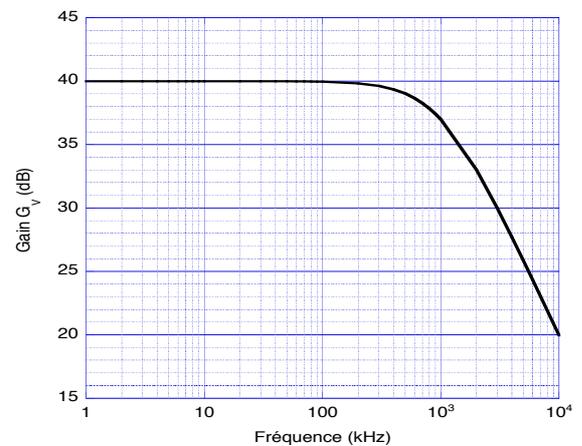


Figure 6

4. On ajoute un étage supplémentaire à l'entrée du montage (**figure 5**).
 - a. Déterminer la fonction de transfert $\underline{H} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E}$ en fonction de R_1 et R_2 .
 - b. Quels sont le nom et le rôle de cet étage supplémentaire ?
5. Dessiner le modèle équivalent simplifié de type « amplificateur » réalisé par le montage de la figure 5. On supposera que l'impédance de sortie du montage est celle d'un amplificateur opérationnel idéal.
6. On donne : $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$. La mesure, **sur un amplificateur opérationnel réel**, du gain en tension en fonction de la fréquence dans le plan de Bode a permis d'obtenir la courbe de la **figure 6**.
 - a. Déduire de cette courbe la valeur de la résistance R_2 .
 - b. À quoi est due la chute du gain en haute fréquence ?

Questions :

- Qu'est-ce qu'un amplificateur opérationnel idéal ?
- **Dessiner** un montage inverseur utilisant un ampli op et deux résistances. Où se trouve la masse virtuelle ? Quels sont le facteur d'amplification en tension et l'impédance d'entrée de ce montage ?
- **Dessiner** un amplificateur non-inverseur utilisant un ampli op et deux résistances. Où se trouve la masse virtuelle ? Quels sont le facteur d'amplification en tension et l'impédance d'entrée de ce montage ?
- **Dessiner** un amplificateur sommateur de deux tensions utilisant un ampli op. Expliquer le principe de fonctionnement.
- **Dessiner** un amplificateur de différence de deux tensions utilisant un ampli op. Expliquer le principe de fonctionnement.
- **Dessiner** un montage suiveur de tension utilisant un ampli op. Quel est le gain en tension de ce montage ? Quel est l'intérêt de ce montage puisque son gain en tension est si faible ?

Travail personnel :

Exercices supplémentaires non corrigés en séances de Travaux Dirigés.

Exercice 7

On considère un AO non contre-réactionné. La tension de saturation de l'AO est $\pm V_{sat} = \pm 13V$ et son gain différentiel est $A_d = 10^5$. On applique V_1 et V_2 , tensions continues, sur les entrées inverseuse et non-inverseuse. L'AO est chargé par une résistance de $1\text{ k}\Omega$ (**figure 7**).

Calculer le courant i à la sortie de l'AO.

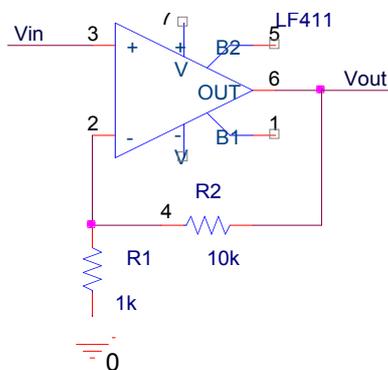


Figure 7

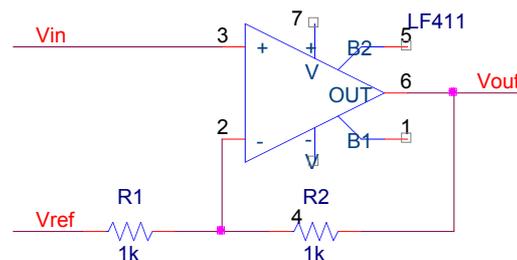


Figure 8

Exercice 8

Soit le montage de la **figure 8** ($R_1 = 0,5\text{ k}\Omega$ et $R_2 = 10\text{ k}\Omega$). Le signal sinusoïdal appliqué en entrée V_{in} a une amplitude de 100 mV et $V_{ref} = -0,2\text{ V}$. L'AO est considéré idéal.

1. **Dessiner** le signal de sortie.
2. Le signal d'entrée a une composante continue $V_0 = 5\text{ V}$. Comment **choisir** V_{ref} pour qu'en sortie la composante continue soit nulle ?

Exercice 9

On considère le montage de la **figure 9** où l'AO est considéré idéal.

1. **Exprimer** la tension de sortie V_S en fonction de V_A et V_C .
2. Quelle relation entre R_1 , R_2 , R_3 et R_4 permet d'obtenir V_S dépendant seulement de la différence $V_d = V_A - V_C$?

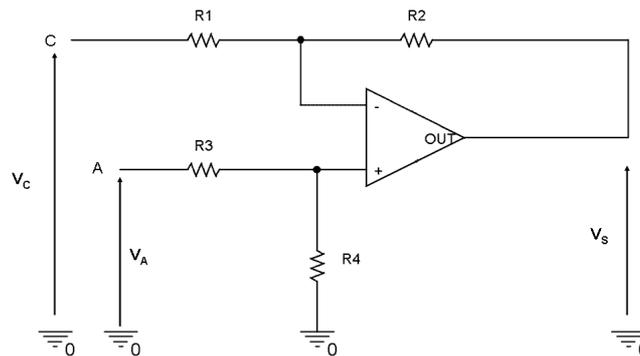


Figure 9

On considère à présent le montage de la **figure 10** où les AO sont idéaux.

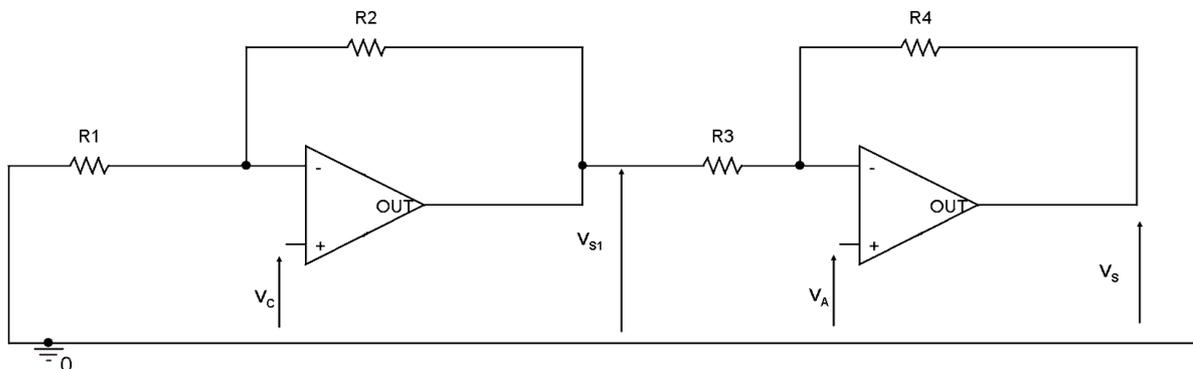


Figure 10

3. **Exprimer** V_{S1} en fonction de V_C , R_1 et R_2 .
4. **Exprimer** V_S la tension de sortie du montage en fonction des quatre résistances R_1 , R_2 , R_3 , R_4 et de V_A et V_C .
5. Quelle est la condition sur ces résistances pour que ce montage soit un amplificateur de différence ?
6. Si l'on veut faire varier le facteur d'amplification, combien de résistances doit-on faire varier dans le montage ?

Dans les deux cas précédents (**figures 9 et 10**), la valeur du facteur d'amplification du montage n'était réglable qu'en réglant à la fois R_1 et R_2 . On se propose à présent d'étudier le montage de la **figure 11** où les AO sont idéaux.

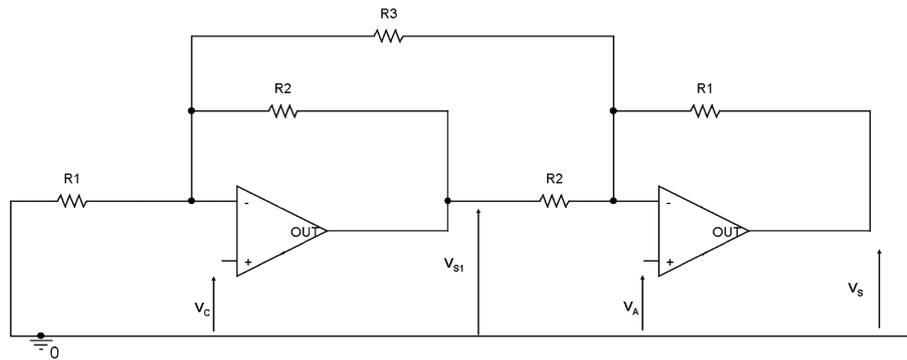
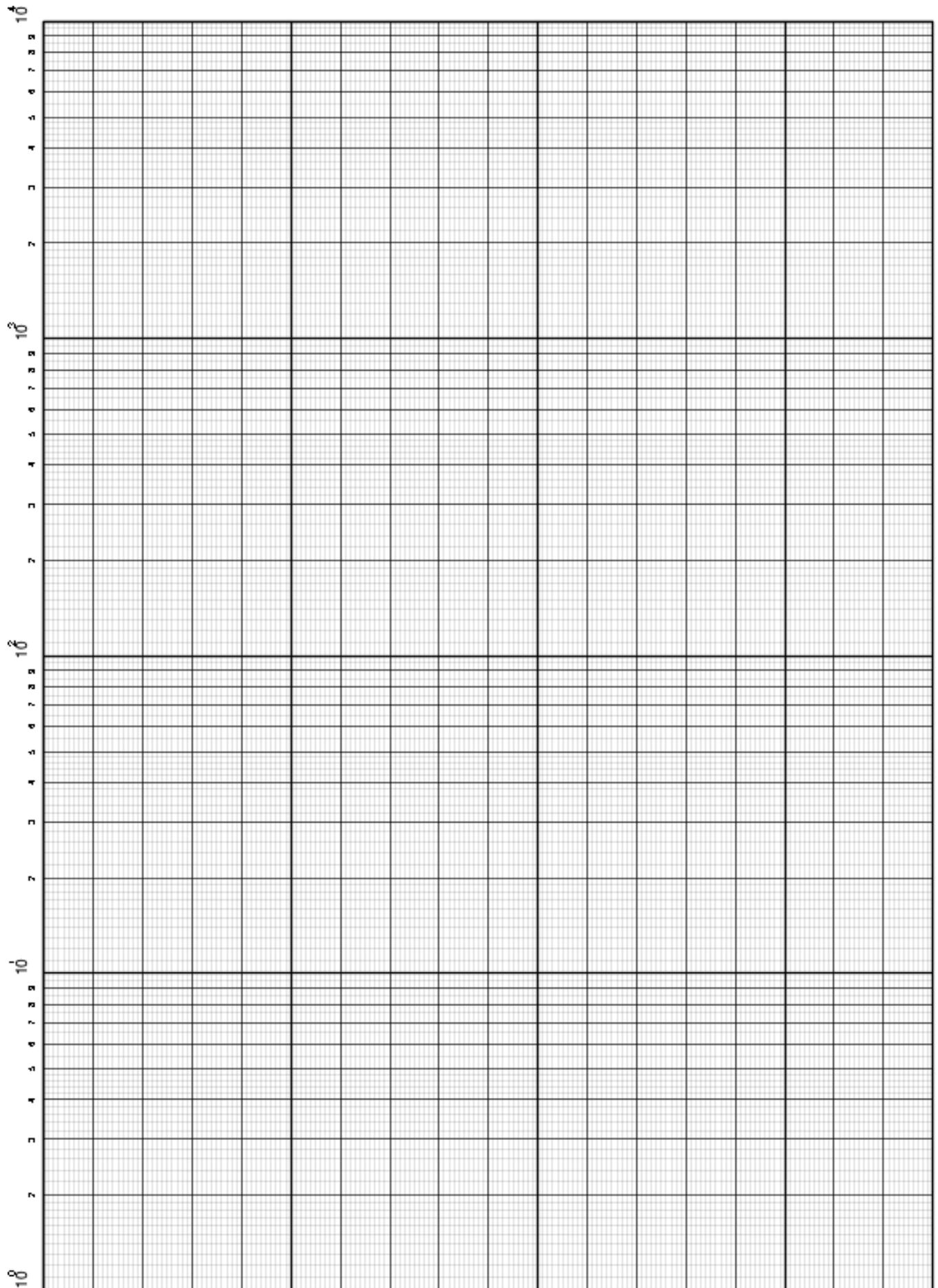


Figure 11

7. Quelle est la valeur de V_s en fonction de V_c et V_A ?
8. On pose $R_2 = 9800 \Omega$ et $R_1 = 490 \text{ k}\Omega$. Quelle est la valeur de R_3 , nécessaire pour avoir un facteur d'amplification de 100 ?
 - Quel est le facteur d'amplification minimal que l'on pourrait obtenir avec ce montage sans faire varier ni R_1 ni R_2 ?
 - Quel est le facteur d'amplification maximum ?
9. Quel avantage présente ce montage par rapport aux deux autres ?



TD 3 : FILTRAGE PASSIF

Objectifs :

- **Savoir calculer** une impédance complexe.
- **Exprimer** la fonction de transfert d'un filtre à partir du circuit correspondant.
- **Exprimer** le gain et la phase de la fonction de transfert.
- **Étudier** et **représenter** les diagrammes de Bode asymptotiques et réels (gain et phase) du filtre.
- **Identifier** le type de filtrage (passe-bas, passe-haut, passe-bande, réjecteur).

Exercice 1 : Filtre passif du premier ordre

On considère le circuit RL représenté sur la **figure 1**. Ce circuit est commandé par une tension sinusoïdale de pulsation ω .

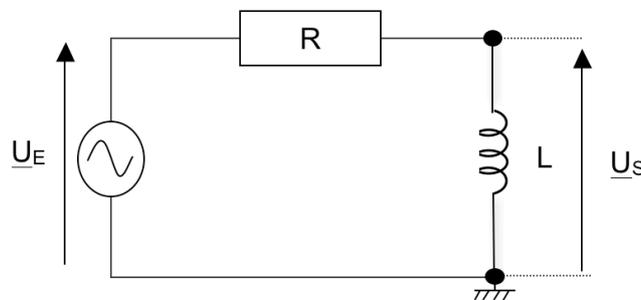


Figure 1

1. Sans calculer la fonction de transfert mais en se basant sur les valeurs des impédances, **étudier** et **prévoir** le comportement asymptotique de ce filtre aux basses et hautes pulsations.

2. **Calculer** la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \frac{U_S}{U_E}$ et la mettre sous la forme : $\underline{H}(j\omega) = \frac{K}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}}$ où K

et ω_0 sont deux constantes réelles que l'on exprimera en fonction des éléments du circuit.

3. En **déduire** :

- a. le facteur d'amplification en tension (« gain linéaire ») $A_V = |\underline{H}(j\omega)|$,
- b. le gain en dB $G_{dB} = 20 \log|\underline{H}(j\omega)|$,
- c. la pente du gain en basse fréquence ($\omega \ll \omega_0$),
- d. le gain maximal,
- e. le déphasage entre la tension de sortie $u_S(t)$ et la tension d'entrée $u_E(t)$.

4. **Déterminer** la pulsation de coupure ω_C à - 3dB.

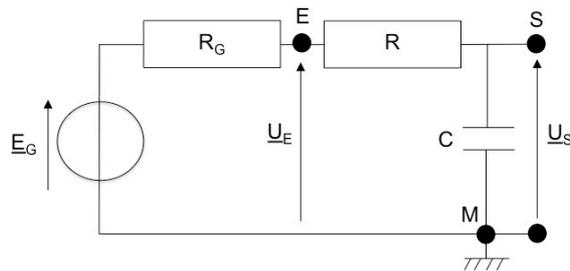
5. **Étudier** et **représenter** les diagrammes asymptotiques (gain et phase) et réels de ce filtre.

6. **Donner** le type et l'ordre de ce filtre.

NB : il est conseillé de faire également l'exercice 5 (non corrigé en TD), qui est un filtre du même type.

Exercice 2 : Bande passante d'un filtre passe-bas

On considère le circuit RC commandé par un générateur de f.é.m $e_G(t)$ et de résistance interne R_G avec $C = 1\text{nF}$ représenté sur la **figure 2**.

**Figure 2**

1. **Déterminer** l'expression de la fonction de transfert complexe $\underline{H}_1(j\omega) = \frac{U_S}{U_E}$ et la mettre sous la

forme : $\underline{H}_1(j\omega) = \frac{K_1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{01}}}$ où K_1 et ω_{01} sont deux constantes réelles que l'on exprimera en

fonction des éléments du circuit.

2. **Calculer** la valeur de R permettant d'obtenir une bande passante $B_f = 100\text{ kHz}$ à -3 dB .

3. **Déterminer** l'expression de $\underline{H}_2(j\omega) = \frac{U_S}{E_G}$ et la mettre sous la forme :

$$\underline{H}_2(j\omega) = \frac{K_2}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{02}}}$$

où K_2 et ω_{02} sont deux constantes réelles que l'on exprimera en fonction des éléments du circuit.

4. En **déduire** la nouvelle expression de la bande passante B_2 à -3 dB en fonction de R , R_G et B_f .
A.N. : $R_G = 9R$.

5. On branche en parallèle aux bornes de C une résistance d'utilisation $R_U = 10\text{ k}\Omega$. **Déterminer** l'expression $\underline{H}_3(j\omega) = \frac{U_S}{E_G}$ et la mettre sous la forme : $\underline{H}_3(j\omega) = \frac{K_3}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{03}}}$ où K_3 et ω_{03} sont deux

constantes réelles que l'on exprimera en fonction de ω , R , R_G , R_U et C .

6. En **déduire** la nouvelle bande passante B_3 en fonction de R , R_G , R_U et C . **Calculer** B_3 et **comparer** à B_2 .

Exercice 3 : Filtre série pour enceintes acoustiquesI- Présentation :

Lors de la restitution de la musique en qualité haute fidélité, il est important d'utiliser les haut-parleurs dans la bande de fréquence où la réponse est la meilleure. Il est donc nécessaire de ne fournir que les signaux dans la bande appropriée à l'aide de filtres : signaux basse fréquence pour les boomers, haute fréquence pour les tweeters, etc... Cette association est illustrée sur des filtres destinés à équiper une enceinte acoustique 2 voies. Le schéma d'étude est donné sur la **figure 3**. Dans sa bande passante, chaque haut-parleur est assimilé à une résistance $R = 8\ \Omega$. L'étude comprend aussi le calcul de la valeur des éléments L et C .

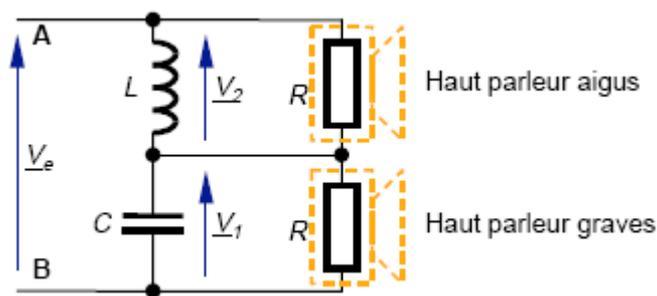


Figure 3

II- Étude à réaliser :

II-1- Impédance :

- Déterminer** l'expression de l'impédance complexe \underline{Z} entre les bornes A et B en fonction de la pulsation ω (du signal $\underline{V_e}$), de L , R et C .
- Déterminer** la relation entre R , L et C pour que l'impédance \underline{Z} soit identique à la résistance R quelle que soit la pulsation ω . Cette condition sera appelée $[E_1]$.
- En **déduire** l'intérêt que procure cette condition sur la puissance délivrée par l'amplificateur fournissant la tension $\underline{V_e}$.

Dans la suite du problème, la condition $[E_1]$ est vérifiée.

II-2- Étude du premier filtre :

- Exprimer** la fonction de transfert $\underline{H}_1(j\omega) = \frac{V_1}{V_e}$ et l'**écrire** sous la forme

$$\underline{H}_1(j\omega) = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}. \text{ Exprimer alors la pulsation } \omega_0 \text{ en fonction de } R \text{ et } C.$$

- On souhaite obtenir un filtre coupant à $\omega_0 = 2\pi \cdot 10^3 \text{ rad.s}^{-1}$. **Calculer** les valeurs de L et C .
- Étudier** puis **tracer** les diagrammes de Bode (gain et phase) asymptotiques et réels de ce filtre. On **déterminera** la pulsation de coupure ω_c à - 3 dB. **Indiquer** son type et **contrôler** la cohérence avec le haut-parleur associé.

II-3- Étude du second filtre :

- Exprimer** la fonction de transfert $\underline{H}_2(j\omega) = \frac{V_2}{V_e}$.
- Étudier** puis **tracer** les diagrammes de Bode (gain et phase) asymptotiques et réels de ce filtre sur le même tracé que précédemment. **Indiquer** son type et **contrôler** la cohérence avec le haut-parleur associé.
- Contrôler** que tout le domaine des fréquences est couvert par l'enceinte.

Questions :

- Sur un diagramme de Bode en amplitude, quelle est la pente de l'asymptote dans la zone d'atténuation d'un filtre passe-haut du premier ordre ?
- **Donner** le schéma d'un montage RC permettant de réaliser un filtre passe-bas. Quelle est la fonction de transfert de ce montage, le gain maximal et la fréquence de coupure à - 3 dB ?
- **Donner** le schéma d'un montage CR permettant de réaliser un filtre passe-haut. Quelle est la fonction de transfert de ce montage, le gain maximal et la fréquence de coupure à - 3 dB ?

Travail personnel :**Exercices supplémentaires non corrigés en séances de Travaux Dirigés.****Exercice 4 : Filtre passe-bas passif du premier ordre**

On considère le circuit RC représenté sur la **figure 4**. Ce circuit est commandé par une tension sinusoïdale de pulsation ω .

1. **Calculer** la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \frac{U_S}{U_E}$ et la mettre sous la forme : $\underline{H}(j\omega) = \frac{K}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$ où K

et ω_0 sont deux constantes réelles que l'on exprimera en fonction des éléments du circuit.

2. En **déduire** :

- f. le facteur d'amplification en tension $A_V = |\underline{H}(j\omega)|$,
- g. le gain en dB $G_{dB} = 20 \log |\underline{H}(j\omega)|$,
- h. la pente du gain en haute fréquence ($\omega \gg \omega_0$),
- i. le gain maximal,
- j. le déphasage entre la tension de sortie $u_S(t)$ et la tension d'entrée $u_E(t)$.

3. **Déterminer** la pulsation de coupure ω_C à -3 dB.

4. **Étudier et représenter** les diagrammes asymptotiques (gain et phase) et réels de ce filtre.

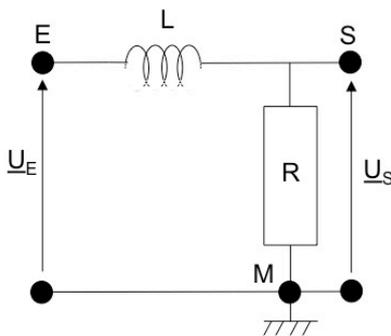


Figure 4

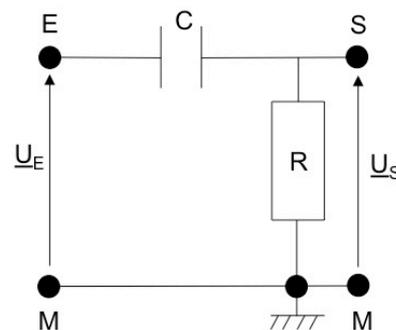


Figure 5

Exercice 5 : Filtre passe-haut passif du premier ordre

On considère le circuit CR représenté sur la **figure 5**. Ce circuit est commandé par une tension sinusoïdale de pulsation ω .

1. **Calculer** la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \frac{U_S}{U_E}$ et la mettre sous la forme : $\underline{H}(j\omega) = K \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$ où

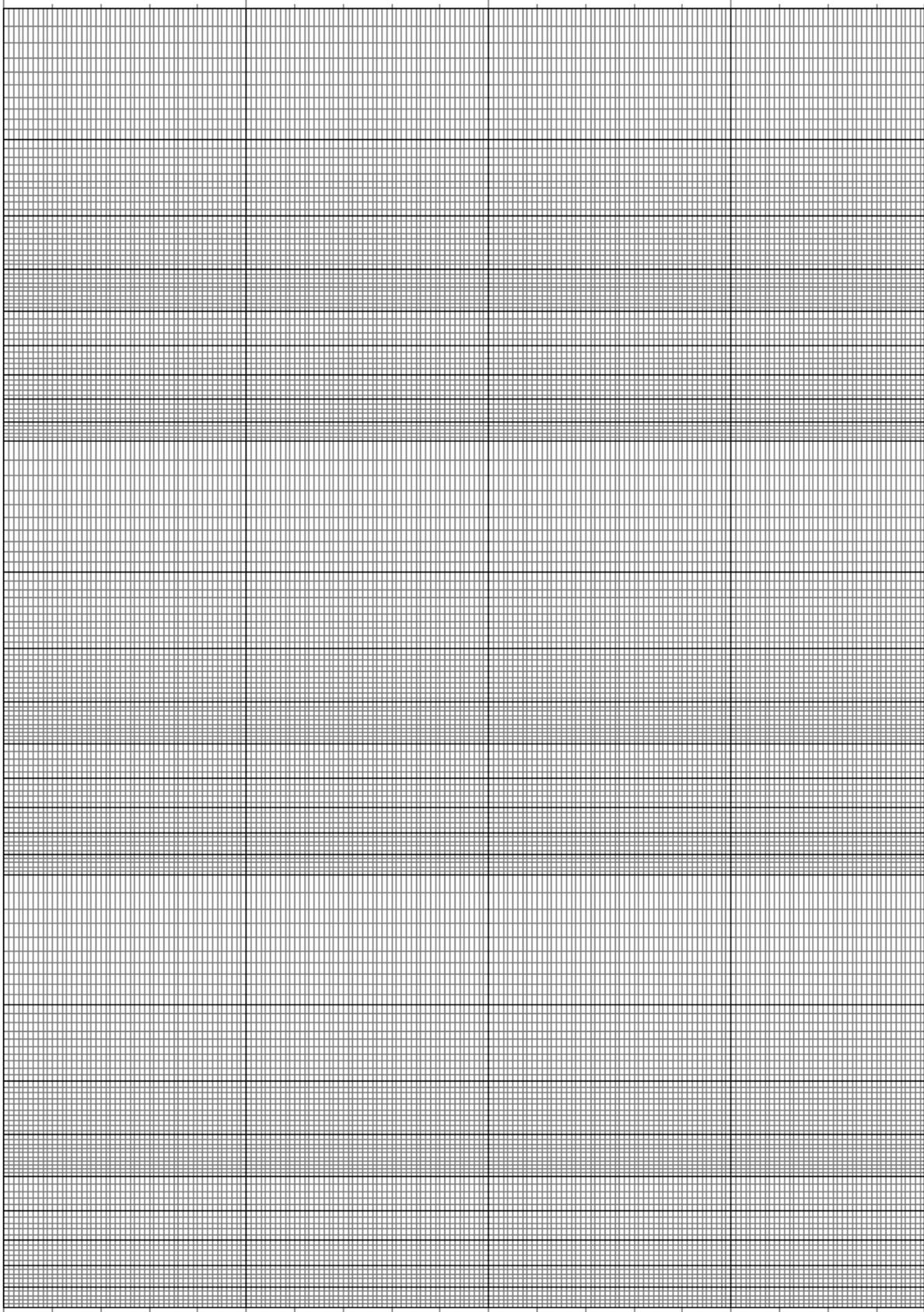
K et ω_0 sont deux constantes réelles que l'on exprimera en fonction des éléments du circuit.

2. En **déduire** :

- a. le facteur d'amplification en tension $A_V = |\underline{H}(j\omega)|$,
- b. le gain en dB $G_{dB} = 20 \log |\underline{H}(j\omega)|$,
- c. la pente du gain en basse fréquence ($\omega \ll \omega_0$),
- d. le gain maximal,
- e. le déphasage entre la tension de sortie $u_S(t)$ et la tension d'entrée $u_E(t)$.

3. **Déterminer** la pulsation de coupure ω_C à -3 dB.

4. **Étudier et représenter** les diagrammes asymptotiques (gain et phase) et réels de ce filtre.



TD 4 : MONTAGES INTEGRATEUR ET DERIVATEUR ACTIFS

Objectifs :

- **Dimensionner** un circuit intégrateur
- **Dimensionner** un circuit dérivateur
- **Étudier** et **représenter** les diagrammes de Bode asymptotiques et réels (gain et phase) d'un filtre actif.

Exercice 1 : Montage intégrateur actif

1. Intégrateur idéal

On considère le montage de la **figure 1** dans lequel la tension d'entrée $u_E(t)$ est quelconque.

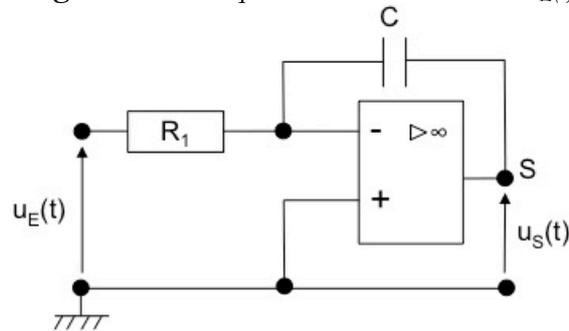


Figure 1

Cas d'un amplificateur opérationnel idéal

- a. **Exprimer** la tension de sortie $u_S(t)$ en fonction de la tension d'entrée $u_E(t)$.
- b. Quelle est la fonction de ce montage ?

Cas d'un amplificateur opérationnel non idéal

Dans la réalité, l'AO employé est non idéal et un courant continu de polarisation I_B existe sur l'entrée inverseuse de l'AO.

- c. Quelle est la nouvelle expression de la tension de sortie en fonction de $u_E(t)$ et I_B ?
- d. Quel inconvénient présente ce montage ?

2. Pseudo-intégrateur

Pour pallier le problème de la composante continue, on place en parallèle au condensateur C une résistance R_2 (**figure 2**). À présent, la tension d'entrée est une tension sinusoïdale de fréquence f .

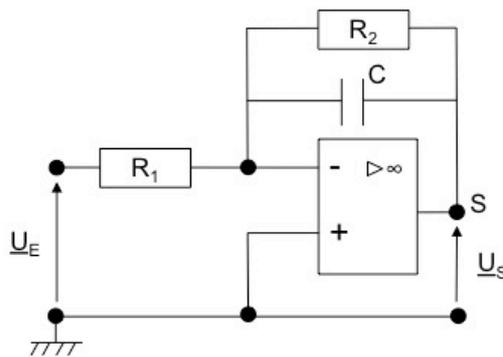


Figure 2

- a. **Montrer** que la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \frac{U_S}{U_E}$ du montage de la **figure 2** peut se mettre sous la forme : $\underline{H}(j\omega) = -\frac{K}{1+j\frac{\omega}{\omega_0}}$ où K et ω_0 sont deux constantes que l'on exprimera en fonction de R_1 , R_2 et C .
- b. Que devient la fonction de transfert en régime continu (c'est-à-dire lorsque $\omega \rightarrow 0$) ? Dans ces conditions, **dessiner** le schéma équivalent de la **figure 2** et **donner** le nom du montage ainsi obtenu.
- c. Que devient la fonction de transfert en régime alternatif sinusoïdal haute fréquence (lorsque $\omega \rightarrow \infty$) ? Dans ces conditions, **dessiner** le schéma équivalent de la **figure 2** et **donner** le nom du montage ainsi obtenu.
- On donne : $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ et $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$.
- d. **Déterminer** le facteur d'amplification $A_V = |\underline{H}(j\omega)|$ et le gain en tension $G_V = 20 \cdot \log A_V$. En **déduire** le gain maximal $G_{V_{max}}$, la pulsation de coupure ω_C et la pente de G_V en haute fréquence. **Tracer** les variations asymptotiques de ce gain dans le plan de Bode.
- e. **Déterminer** le déphasage de la tension de sortie $u_s(t)$ par rapport à la tension d'entrée $u_e(t)$. Tracer les variations asymptotiques de ce déphasage dans le plan de Bode.
- f. **Donner** le type et l'ordre de ce filtre.
- g. Dans le plan de Bode, **déterminer** la fréquence à partir de laquelle le montage de la **figure 2** devient un intégrateur.

Exercice 2 : Montage dérivateur actif

1. Dérivateur idéal

On considère le montage de la **figure 3** dans lequel la tension d'entrée $u_E(t)$ est quelconque.

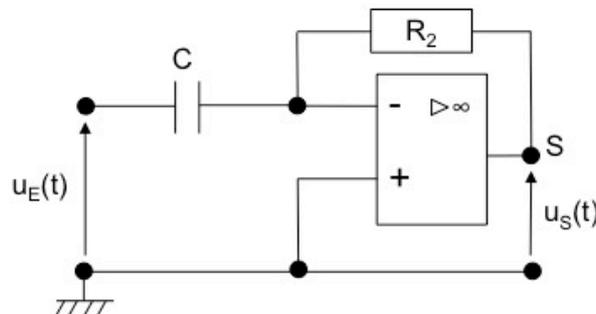


Figure 3

Cas d'un amplificateur opérationnel idéal

- Exprimer** la tension de sortie $u_S(t)$ en fonction de la tension d'entrée $u_E(t)$.
- Quelle est la fonction de ce montage ?

À présent, la tension d'entrée est une tension sinusoïdale de fréquence f .

- Quelle est la nouvelle expression de la tension de sortie en fonction de U_E , R_2 , C et ω ?
- Quel inconvénient présente ce montage en haute fréquence ?

2. Pseudo-dérivateur

Pour pallier le problème de la composante continue, on place en série avec le condensateur C une résistance R_1 (**figure 4**).

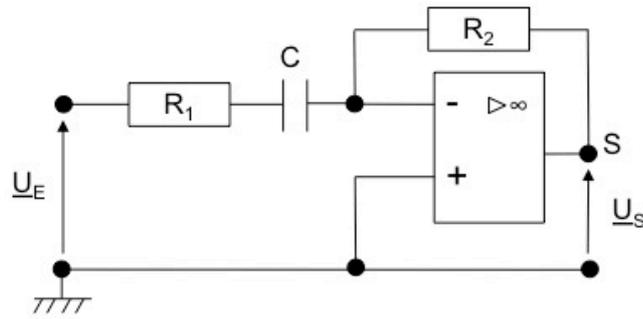


Figure 4

- a. **Montrer** que la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \frac{U_S}{U_E}$ du montage de la **figure 4** peut se mettre sous la forme : $\underline{H}(j\omega) = -\frac{K}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}}$ — ou $\underline{H}(j\omega) = -K \frac{j\frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$, le choix est libre ! — où K et ω_0 sont deux constantes que l'on exprimera en fonction de R_1 , R_2 et C .
- b. Que devient la fonction de transfert en régime alternatif haute fréquence (lorsque $\omega \rightarrow \infty$) ? Dans ces conditions, **dessiner** le schéma équivalent de la **figure 4** et **donner** le nom du montage ainsi obtenu.
- c. Que devient la fonction de transfert en régime continu (c'est-à-dire lorsque $\omega \rightarrow 0$) ? Dans ces conditions, **dessiner** le schéma équivalent de la **figure 4** et **donner** le nom du montage ainsi obtenu.
- On donne : $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ et $C = 1 \text{ nF}$.
- d. **Déterminer** le facteur d'amplification $A_v = |\underline{H}(j\omega)|$ et le gain en tension $G_V = 20 \cdot \log A_v$. En **déduire** le gain maximal $G_{V_{max}}$, la pulsation de coupure ω_C et la pente de G_V en basse fréquence. **Tracer** les variations asymptotiques de ce gain dans le plan de Bode.
- e. **Déterminer** le déphasage de la tension de sortie $u_s(t)$ par rapport à la tension d'entrée $u_e(t)$. Tracer les variations asymptotiques de ce déphasage dans le plan de Bode.
- f. **Donner** le type et l'ordre de ce filtre.
- g. Dans le plan de Bode, **déterminer** la fréquence à partir de laquelle le montage devient un intégrateur.

Questions :

- Dessiner le schéma d'un pseudo-intégrateur.
- On applique à l'entrée d'un intégrateur actif une fonction triangulaire : quelle sorte de sortie peut-on espérer obtenir ?
- On applique un signal continu à l'entrée d'un pseudo-intégrateur : quelle est la forme du signal de sortie ?
- Dessiner le schéma d'un pseudo-dérivateur.
- Une tension carrée est appliquée à l'entrée d'un montage dérivateur actif : quelle est la forme du signal de sortie ?
- On applique un signal alternatif sinusoïdal haute fréquence à l'entrée d'un pseudo-dérivateur : quelle est la forme du signal de sortie ?

Travail personnel :
Exercice supplémentaire non corrigé en séances de Travaux Dirigés

Problème

Dans ce problème, les parties A et B sont indépendantes.

Partie A

Sur le montage de la **figure 5**, on applique une tension d'entrée sinusoïdale : $u_E(t) = U_E \sqrt{2} \cos(\omega t)$.

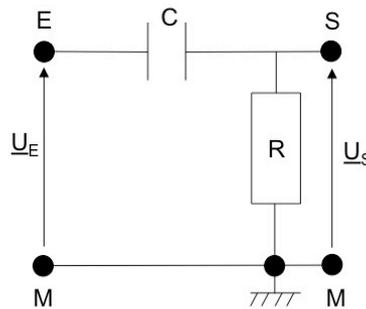


Figure 5

1. Donner l'expression de la valeur efficace complexe \underline{U}_E de $u_E(t)$.
2. Déterminer la fonction de transfert $\underline{H}_1(j\omega) = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E}$ du montage de la **figure 5** et la mettre sous la forme : $\underline{H}_1(j\omega) = \frac{1}{1 - j \frac{\omega_1}{\omega}}$ en précisant l'expression littérale de ω_1 en fonction de R et C.
3. A.N. : $R = 1 \text{ k}\Omega$ et $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$. Calculer la pulsation ω_1 .
4. Déterminer, en fonction de ω et ω_1 :
 - a. le facteur d'amplification en tension \mathcal{A}_{V1} ,
 - b. le gain en tension G_{V1} ,
 - c. le déphasage Φ_{\square} de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.
5. Tracer le diagramme asymptotique du gain en tension G_{V1} (en dB) en fonction de $\log \omega$.
6. Donner, en justifiant la réponse, le type et l'ordre du filtre représenté par $\underline{H}_1(j\omega)$.

Partie B (6 pts)

On considère à présent le montage de la **figure 6** où la tension d'entrée est également sinusoïdale.

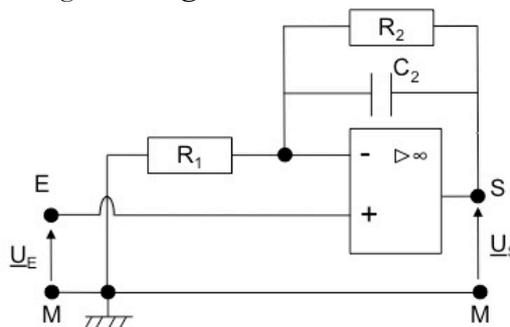


Figure 6

1. Déterminer la fonction de transfert $\underline{H}_2(j\omega) = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E}$ du montage de la **figure 6** et la mettre

sous la forme : $\underline{H}_2(j\omega) = K \cdot \frac{1 + j\frac{\omega}{\omega_3}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_2}}$, en précisant les expressions littérales de K , ω_2 et ω_3 en

fonction de R_1 , R_2 et C_2 .

2. A.N. : $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ et $C_2 = 10 \text{ nF}$. Calculer K , ω_2 et ω_3 .
3. Déterminer le gain en tension G_{V_2} en fonction de ω , K , ω_2 et ω_3 .
4. Déterminer les valeurs de G_{V_2} lorsque $\omega \rightarrow 0$ et $\omega \rightarrow \infty$.
5. On considère la fonction « gain » suivante : $G_A = 10 \log\left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_3^2}\right)$. Déterminer les équations des asymptotes de G_A lorsque $\omega \rightarrow 0$ et $\omega \rightarrow \infty$ et le point d'intersection de ces deux asymptotes. Tracer le diagramme asymptotique de G_A en fonction de $\log \omega$.
6. On considère à présent la fonction « gain » suivante : $G_B = -10 \log\left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_2^2}\right)$. Déterminer les équations des asymptotes de G_B lorsque $\omega \rightarrow 0$ et $\omega \rightarrow \infty$ et le point d'intersection de ces deux asymptotes. Tracer le diagramme asymptotique de G_B en fonction de $\log \omega$.
7. En déduire le tracé du diagramme asymptotique du gain en tension G_{V_2} (en dB) en fonction de $\log \omega$.

Partie C (4 pts)

On considère à présent le montage de la **figure 7**.

R , R_1 , R_2 , C et C_2 conservent les mêmes valeurs numériques que dans les questions précédentes.

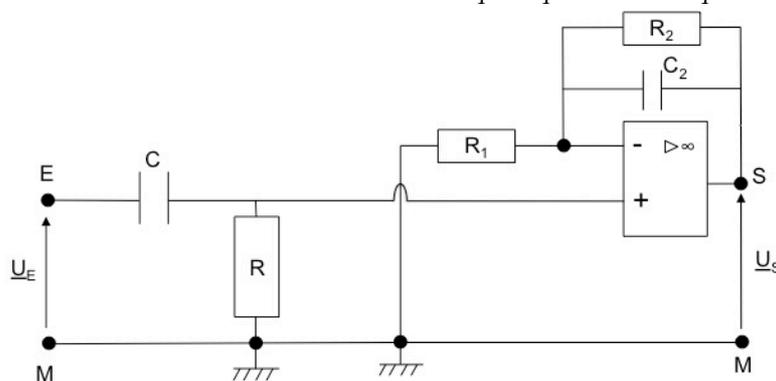


Figure 7

1. Expliquer pourquoi la fonction de transfert de ce montage peut s'écrire :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{U_S}{U_E} = \underline{H}_1(j\omega) \cdot \underline{H}_2(j\omega)$$

2. Déterminer le gain en tension G_V en fonction de G_{V_1} et G_{V_2} .
3. En déduire le tracé du diagramme asymptotique du gain en tension G_V (en dB) en fonction de $\log \omega$.