

TP ÉLECTRONIQUE : TRANSMISSION D'UN SIGNAL AUDIO ANALOGIQUE

L'objectif de cette série de TP est de mettre en œuvre et d'analyser le fonctionnement des différents éléments qui permettent la transmission radio d'un signal analogique. Alors que la plupart des transmissions d'information sont réalisées de façon numérique (internet, TNT, téléphonie mobile...), la radio fait figure d'exception : même si le déploiement de la RNT (Radio Numérique Terrestre) commence dans certaines régions, la transmission reste essentiellement analogique.

La première annexe présente de façon globale la chaîne de transmission depuis l'enregistrement du signal audio à sa restitution. Les différents éléments de la chaîne seront étudiés successivement au cours des trois premières séances de TP de l'année.

Table des matières

I	Techniques et méthodes en électronique	2
I.1	Observation d'un signal à l'oscilloscope	2
I.2	Tracé d'un diagramme de Bode	2
I.3	Tracé de la caractéristique d'un dipôle	2
I.4	Analyse spectrale	3
II	Réalisation et étude d'un signal modulé en amplitude	4
II.1	Utilisation d'un multiplieur	4
II.2	Signal modulant harmonique	4
II.3	Signal modulant quelconque	4
III	Démodulation d'un signal modulé en amplitude	6
III.1	Détecteur de crête	6
III.2	Filtrage	6
IV	Synthèse de la porteuse : oscillateur de Wien	7
IV.1	Principe de fonctionnement de l'oscillateur de Wien	7
IV.2	Étude de l'amplificateur non-inverseur	8
IV.3	Étude du filtre de Wien	8
IV.4	Étude de l'oscillateur	9

I. Techniques et méthodes en électronique

L'objectif de cette première partie est de mettre en oeuvre des méthodes générales en électronique qui seront utiles pour la suite du TP. Lors de l'utilisation de l'oscilloscope, on évitera au maximum l'utilisation de la fonction Autoset.

I.1 Observation d'un signal à l'oscilloscope

À l'aide d'un générateur **Metrix 3240**, réaliser un signal sinusoïdal de fréquence 1 kHz, d'amplitude 2 V. Relier ensuite le générateur à la voie 1 de l'oscilloscope.

1. Observer le signal à l'oscilloscope. Modifier l'amplitude ; que constatez-vous à l'écran de l'oscilloscope ?
2. À l'aide du menu **Trigger** déclencher sur la voie 1 puis sur la voie 2. Que se passe-t-il ? Quelle conséquence pratique en tirez-vous ?
3. À l'aide du menu **Curseurs** réaliser une mesure de la fréquence et de l'amplitude du signal. Comparer aux valeurs indiquées sur le générateur. Commenter. Comment choisir un calibre permettant les mesures les plus précises ? Quel est l'effet sur les mesures du paramètre **Sonde** du menu **CH1** ?
4. Mesures automatiques : refaire ces mesures à l'aide du menu **Mesures**. À quelle grandeur correspond la mesure **Amplitude C-C** ?

Ajouter au signal une tension de décalage (ou *offset*) de 1,5 V.

5. Observer successivement le signal en mode **CC** et en mode **CA** (menu **CH 1**). Que constatez-vous ? Expliquer.
6. Réaliser une mesure de la fréquence, de la tension de décalage et de l'amplitude du signal (méthode au choix).

I.2 Tracé d'un diagramme de Bode

Cette sous-partie est à rendre

On souhaite réaliser un filtre passe-bas de fréquence de coupure voisine de 10 kHz à l'aide d'une résistance et d'un condensateur.

1. Proposer un montage ainsi que des valeurs possibles pour R et C. Donner les valeurs choisies pour R et C et leurs incertitudes-types.
2. Mettre en oeuvre le filtre. Observer rapidement son comportement basse fréquence et haute fréquence. Les observations correspondent-elles au comportement attendu ? Valider la compatibilité entre l'expression théorique de ω_c , la pulsation de coupure et sa valeur expérimentale.
3. Tracer le diagramme de Bode du filtre **à la main** (en faisant varier la fréquence entre 100 Hz et 1 MHz).

I.3 Tracé de la caractéristique d'un dipôle

1. Proposer un montage permettant de visualiser la caractéristique d'un dipôle à l'oscilloscope¹.
2. Utiliser ce montage pour visualiser la caractéristique d'une résistance, puis d'une diode au germanium.

1. Si nécessaire, une méthode est donnée en annexe.

I.4 Analyse spectrale

1. Réaliser l'acquisition à l'ordinateur d'un signal purement sinusoïdal d'amplitude 2 V et de fréquence 1 kHz en prenant une période d'échantillonnage de 1 μ s et 10000 points. Réaliser le spectre et commenter. Il est conseillé d'observer simultanément le signal à l'oscilloscope.
2. Ajouter une tension de décalage de 1 V au signal d'entrée. Quelle est la conséquence sur le spectre ?
3. Remplacer le signal sinusoïdal par un signal triangulaire (en supprimant la tension de décalage). Relever l'amplitude des différentes composantes du spectre.
4. Faire de même avec un signal créneau. Commenter.
5. Reprendre un signal purement sinusoïdal d'amplitude 2 V et de fréquence 1 kHz. Faire l'acquisition du signal et visualiser son spectre en prenant $T_e = 833 \mu$ s (correspondant à une fréquence d'échantillonnage $f_e = 1,2$ kHz) et 1000 points. Que devient le spectre ?

Le phénomène observé est appelé « repliement de spectre »². Afin de ne pas observer ce phénomène, il faut respecter le critère de Shannon : la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure au double de la fréquence maximale présente dans le spectre du signal :

Critère de Shannon
$$f_e > 2 f_{\max}$$

Pour un signal non-sinusoïdal comme un signal créneau, on ne peut pas respecter le critère de Shannon pour toutes les fréquences du spectre. Réaliser le spectre d'un signal créneau de fréquence $f_0 = 1960$ Hz en utilisant une fréquence d'échantillonnage de 25 kHz (soit $T_e = 40 \mu$ s) et en prenant 10000 points.

6. Quels sont les fréquences présentes dans le spectre ? Lesquelles correspondent réellement aux harmoniques du signal ?

Pour illustrer l'importance du nombre de points lors d'une acquisition, on réalise l'expérience suivante. On fait l'acquisition simultanée des signaux délivrés par deux GBF ; on choisit pour cela deux signaux de fréquence très voisine (par exemple 2,000 kHz et 1,990 kHz). Choisir une période d'échantillonnage de 50 μ s (le critère de Shannon est-il respecté ?), et 50 points.

7. Après avoir fait l'acquisition, observer le spectre des signaux, et mesurer leurs fréquences à l'aide du pointeur.
8. Refaire l'acquisition avec successivement 100, puis 1000 et enfin 10000 points, en mesurer à chaque fois les fréquences. Qu'en concluez-vous ?

On retiendra qu'en augmentant le nombre de points on augmente la résolution en fréquence.

2. Voir l'annexe correspondante.

II. Réalisation et étude d'un signal modulé en amplitude

II.1 Utilisation d'un multiplieur

Le principe de la modulation d'amplitude consiste à multiplier deux signaux :

- la porteuse, signal purement harmonique à haute fréquence,
- le signal modulant, qui contient l'information à transmettre.

Cette multiplication peut être réalisée à l'aide d'un multiplieur : il s'agit d'un composant électronique actif (il doit être alimenté par une tension continue $+15\text{ V} / -15\text{ V}$), comportant deux entrées (tensions e_1 et e_2) et une sortie (tension s) ; la tension de sortie est proportionnelle au produit des tensions d'entrée :

$$s(t) = k e_1(t) e_2(t)$$

où k est une constante ($k = 0,10\text{ V}^{-1}$ pour le multiplieur utilisé en TP). Il faut toujours alimenter le multiplieur **avant** de relier les entrées aux sources de tension.

Pour la modulation, on utilise une porteuse harmonique :

$$e_1(t) = u_p(t) = u_p \cos(\omega_p t)$$

Le signal modulant, $m(t)$ est *a priori* quelconque³. Le signal modulé, obtenu en sortie du multiplieur, a pour expression

$$s_m(t) = (k u_p) m(t) \cos(\omega_p t)$$

II.2 Signal modulant harmonique

On commence par utiliser comme signal modulant un signal harmonique comportant une tension de décalage :

$$m(t) = u_0 + u_1 \cos(\omega_m t)$$

1. Quelle condition doivent vérifier u_1 et u_0 pour que la tension modulante reste positive ?

Pour la première expérience, on prendra une fréquence du signal modulant de quelques kilohertz et une fréquence de porteuse de quelques dizaines de kilohertz.

Observer le signal modulé et le signal modulant à l'oscilloscope⁴. À l'aide de l'ordinateur, faire une acquisition des différents signaux. Visualiser le spectre du signal modulé.

2. Quelle est l'allure du spectre du signal modulé ? Quelles sont les fréquences présentes dans ce spectre ?
3. Donner l'expression du signal modulé⁵, préciser les fréquences attendues dans le spectre ainsi que les amplitudes. Est-ce cohérent avec les résultats expérimentaux ?
4. Comment doit-on choisir les paramètres d'acquisition pour observer correctement le signal ?

II.3 Signal modulant quelconque

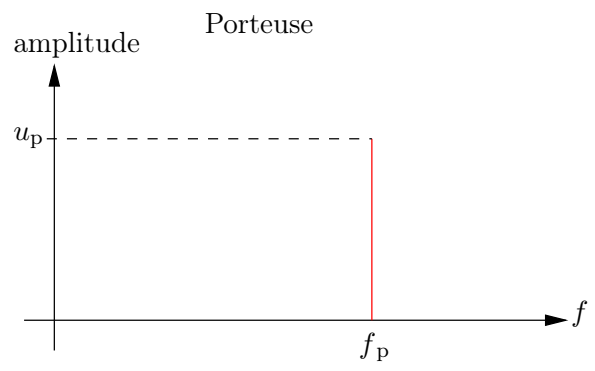
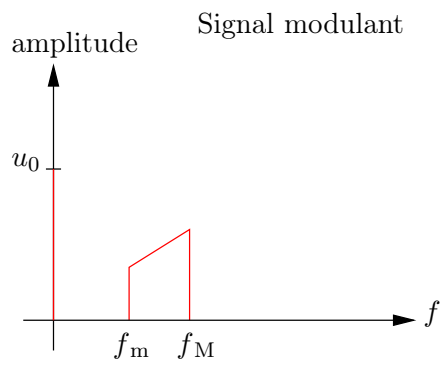
On utilise maintenant un signal modulant triangulaire. Visualiser le spectre du signal modulant, de la porteuse puis du signal modulé.

1. Représenter le spectre du signal modulé et commenter son allure.
2. On donne maintenant le spectre suivant pour le signal modulant et la porteuse. Prédire l'allure du spectre du signal modulé.

3. Pour des raisons liées à la méthode de démodulation, le signal modulant doit rester positif.

4. Attention au réglage du déclenchement : il faut déclencher sur la voie qui reçoit le signal modulant.

5. Linéariser le produit des deux cosinus.

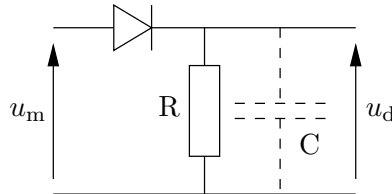


III. Démodulation d'un signal modulé en amplitude

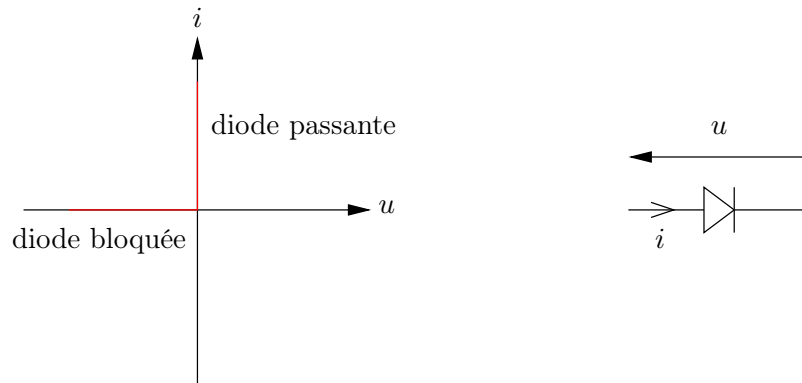
Nous allons étudier une méthode de démodulation utilisant un détecteur de crête. Ce circuit, particulièrement simple, comporte notamment une diode.

III.1 Détecteur de crête

Le montage détecteur de crête a l'allure suivante.



On a noté u_m la tension modulée et u_d la tension démodulée; la tension modulée est celle obtenue en première partie (avec $f_p = 100$ kHz et $f_m = 1$ kHz). On utilise une diode au germanium, dont la caractéristique s'approche de celle d'une « diode idéale » :



1. Câbler le détecteur de crête **sans** le condensateur; prendre par exemple $R = 1$ k Ω . Observer l'allure du signal à démoduler; identifier sur la courbe $u_d(t)$ les régions où la diode est bloquée et les régions où la diode est passante.
2. Justifier que le produit RC doit vérifier

$$\frac{1}{f_p} \ll RC \ll \frac{1}{f_m}$$

3. Choisir des valeurs adaptées pour R et C, câbler le détecteur de crête puis observer le signal démodulé; le comparer au signal modulant.
4. Que se passe-t-il
 - a) si la condition $1/f_p \ll RC$ n'est pas satisfaite?
 - b) si la condition $RC \ll 1/f_m$ n'est pas satisfaite?

III.2 Filtrage

Afin d'obtenir un signal démodulé plus fidèle au signal modulant, on peut filtrer le signal obtenu en sortie du détecteur de crête avec un filtre passe-bas.

Proposer un montage réalisant cette fonction (en justifiant le choix des composants), le mettre en œuvre et observer le résultat.

IV. Synthèse de la porteuse : oscillateur de Wien

Pour moduler un signal en amplitude, il faut disposer d'un signal harmonique, la porteuse. Dans cette partie du TP, nous allons étudier comment fabriquer simplement un signal harmonique.

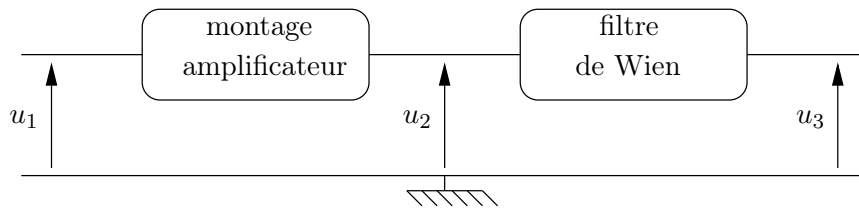
IV.1 Principe de fonctionnement de l'oscillateur de Wien

L'oscillateur de Wien est constitué de deux parties :

- un montage amplificateur : il est réalisé à l'aide d'un amplificateur opérationnel⁶ ; on admet que la tension de sortie d'un tel montage est proportionnelle à la tension d'entrée ; on note A le coefficient de proportionnalité.
- un filtre passe-bande, appelé filtre de Wien : il s'agit d'un filtre passif du second ordre, réalisé à l'aide deux résistances identiques R et de deux condensateurs identiques de capacité C ; sa fonction de transfert s'écrit

$$H(j\omega) = \frac{j\omega\tau}{1 + 3j\omega\tau + (j\omega\tau)^2} \text{ avec } \tau = RC$$

Considérons d'abord le montage suivant



On a d'une part

$$u_2 = A u_1$$

et d'autre part

$$u_3 = \frac{j\omega\tau}{1 + 3j\omega\tau + (j\omega\tau)^2} u_2$$

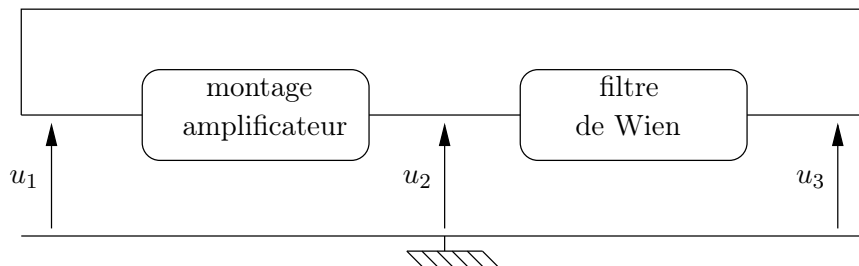
soit

$$\tau^2 \frac{d^2 u_3}{dt^2} + 3\tau \frac{du_3}{dt} + u_3 = \tau \frac{du_2}{dt}$$

On en déduit l'équation différentielle reliant u_1 et u_3

$$\tau^2 \frac{d^2 u_3}{dt^2} + 3\tau \frac{du_3}{dt} + u_3 = A\tau \frac{du_1}{dt}$$

Bouclons maintenant le montage



On a ainsi $u_1 = u_3$, et ainsi

$$\tau^2 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + 3\tau \frac{du_1}{dt} + u_1 = A\tau \frac{du_1}{dt}$$

soit

$$\tau^2 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + (3 - A)\tau \frac{du_1}{dt} + u_1 = 0$$

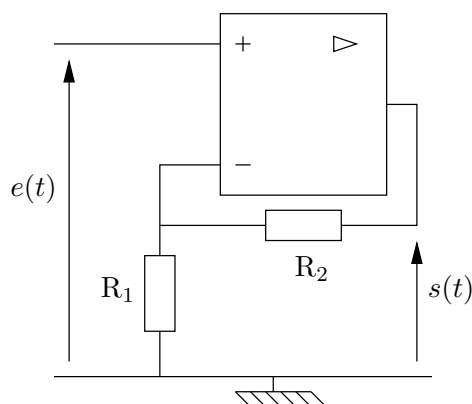
Dans le cas particulier où $A = 3$, on obtient l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique de pulsation propre $\omega_0 = 1/(RC)$. Le montage oscille donc à la pulsation ω_0 .

6. Aucune connaissance sur ce composant électronique actif n'est nécessaire.

IV.2 Étude de l'amplificateur non-inverseur

sous-partie à rendre

On s'intéresse d'abord au montage amplificateur non-inverseur.



L'amplificateur opérationnel comporte deux entrées (appelées respectivement entrée non-inverseuse et entrée inverseuse, notées + et -) ainsi qu'une sortie. C'est un composant électronique actif : il doit être alimenté par une tension continue (+15 V / - 15 V). Cette alimentation n'est pas représentée sur le schéma mais elle ne doit pas être oubliée lors du câblage.

Lors du câblage du montage, il convient mettre sous tension l'alimentation de l'amplificateur opérationnel **avant** le générateur qui délivre la tension d'entrée $e(t)$.

L'étude du fonctionnement de l'amplificateur linéaire permet de montrer la relation

$$s(t) = A e(t) \quad \text{avec} \quad A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Cette relation est vraie tant que $|s(t)| \leq V_{\text{sat}}$; au-delà, l'amplificateur opérationnel sature.

1. Câbler le montage en prenant $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$. Imposer pour $e(t)$ une tension sinusoïdale de fréquence de l'ordre de 1 kHz et d'amplitude voisine de 1 V. Observer $e(t)$ et $s(t)$ à l'oscilloscope. Augmenter progressivement l'amplitude de $e(t)$. Qu'observez-vous ?

2. Pour différentes valeurs de l'amplitude de $e(t)$, mesurer l'amplitude de e et de s ; on veillera à ne pas saturer l'amplificateur opérationnel.

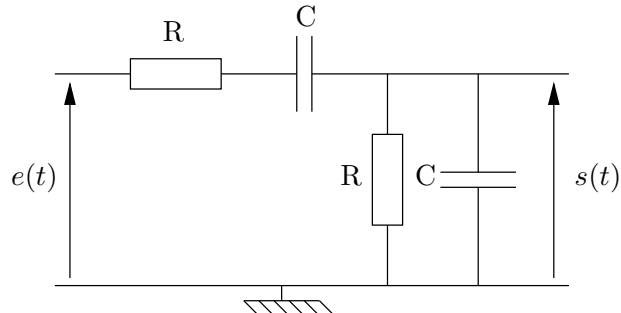
EN déduire un ensemble de valeur de A puis la valeur la plus probable et l'incertitude-type associée à cette valeur. À l'aide d'un test statistique, montrer que la valeur expérimentale obtenue est compatible avec la mesure effectuée.

3. Observer le comportement du montage pour un signal d'entrée triangulaire, créneau ou continu. Le montage fonctionne-t-il ?
4. Reprendre un signal d'entrée sinusoïdal et augmenter la fréquence. Que se passe-t-il⁷ ? Qu'en concluez-vous quant au domaine d'utilisation du montage ?

IV.3 Étude du filtre de Wien

cette partie est à rendre

Le filtre de Wien a la structure suivante :



Pour la réalisation expérimentale, on prend

$$R = 1 \text{ k}\Omega \text{ et } C = 10 \text{ nF}$$

1. Tracer le diagramme de Bode en mesurant le gain et le déphasage à l'aide de l'oscilloscope.

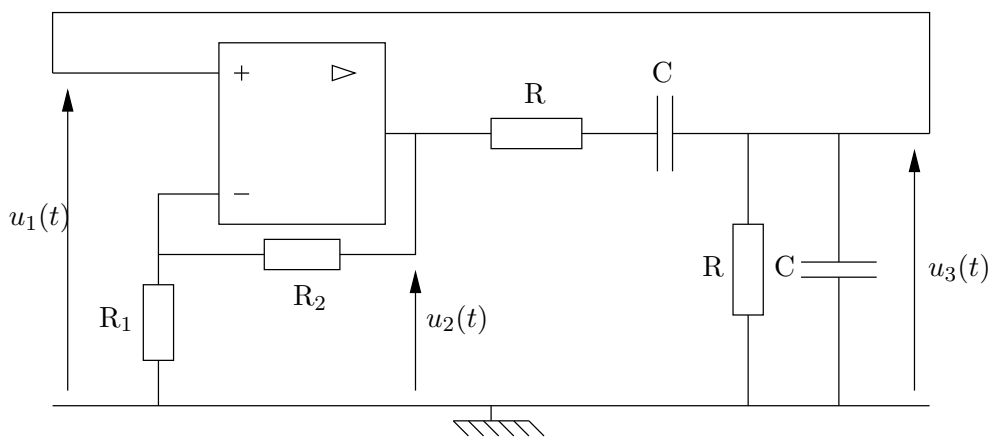
7. On pourra observer en mode XY. Pourquoi ?

2. Sur la courbe de gain, déterminer la pente des asymptotes, le gain maximum, la fréquence de résonance, la bande passante et le facteur de qualité⁸. Comparer la fréquence de résonance et le facteur de qualité aux valeurs attendues.
3. Sur la courbe de phase, déterminer les valeurs asymptotiques du déphasage ainsi que la fréquence de résonance.
4. Comment déterminer très précisément et très rapidement la fréquence de résonance à l'oscilloscope ? Comparer la valeur obtenue à la valeur attendue.
5. On souhaite ensuite tracer l'allure du diagramme de Bode en gain à l'ordinateur directement sans faire du point par point. Proposer un protocole permettant de l'obtenir (ou utiliser celui fourni en annexe) et le mettre en œuvre.

IV.4 Étude de l'oscillateur

à rendre

On étudie maintenant l'oscillateur complet.



$$R = R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C = 10 \text{ nF}$$

Pour R_2 , on utilise une résistance variable.
On observe u_1 et u_2 à l'oscilloscope.

On rappelle que les tensions u_1 , u_2 et u_3 sont solutions de l'équation différentielle

$$\tau^2 \frac{d^2 u}{dt^2} + (3 - A)\tau \frac{du}{dt} + u = 0 \text{ avec } A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

On prend d'abord R_2 voisin de $1 \text{ k}\Omega$.

1. Que vaut approximativement A ? Qu'observe-t-on sur l'oscilloscope ? Interpréter l'observation en lien avec la solution de l'équation différentielle.

Augmenter progressivement R_2 jusqu'à observer l'apparition d'oscillations. Ces oscillations sont appelées quasi-sinusoïdales.

2. Pour quelle valeur de R_2 les oscillations apparaissent-elles ? Que vaut alors A ? Mesurer la fréquence des oscillations. Relier ces mesures aux propriétés de l'équation différentielle.

Continuer à augmenter R_2 .

3. L'équation différentielle permet-elle de rendre compte des observations ? Proposer une interprétation.

8. On rappelle la relation $\Delta f = f_0/Q$.

Annexe : Structure d'une chaîne de transmission radio

Présentation simplifiée

Du côté de l'émetteur, on trouve

- le micro, dont la fonction est de transformer l'onde sonore en signal électrique,
- un amplificateur (le signal délivré par le micro est en général d'amplitude faible et doit être amplifié),
- un étage de modulation dont la fonction sera détaillée plus loin,
- un dispositif d'émission, qui transforme le signal électrique en onde électromagnétique.

Du côté du récepteur, on trouve

- une antenne, qui sous l'effet de l'onde électromagnétique produit un signal électrique,
- un premier étage d'amplification,
- un étage de démodulation, qui permet de restituer le signal de départ sous forme électrique,
- un dernier étage d'amplification relié à un haut-parleur pour émettre l'onde sonore.

Le dispositif sera de bonne qualité si le son émis par le haut-parleur est aussi proche que possible du son capté par le micro.

Remarque

L'oreille humaine est sensible aux ondes sonores dont la fréquence est comprise approximativement entre 20 Hz et 20 kHz, mais les systèmes de communication ne transmettent pas l'intégralité du spectre audible. Ainsi, en téléphonie mobile, la fréquence maximale transmise est de l'ordre de 3 kHz.

Rôle de la modulation

La méthode *a priori* la plus simple pour transmettre un signal audio est de le transformer directement en onde électromagnétique de même fréquence, et dont l'amplitude est proportionnelle à celle du signal sonore. Ce n'est cependant pas possible pour les raisons suivantes :

- les ondes électromagnétiques dont les fréquences correspondent au spectre audible se propagent mal dans l'air,
- on ne peut pas émettre plusieurs signaux simultanément, sinon ils sont brouillés,
- pour une émission et une réception efficace, il faut que la taille de l'antenne soit du même ordre de grandeur que la longueur d'onde ; or, pour une fréquence de 30 Hz, l'onde électromagnétique a pour longueur d'onde $\lambda = c/f = 10.10^6$ m.

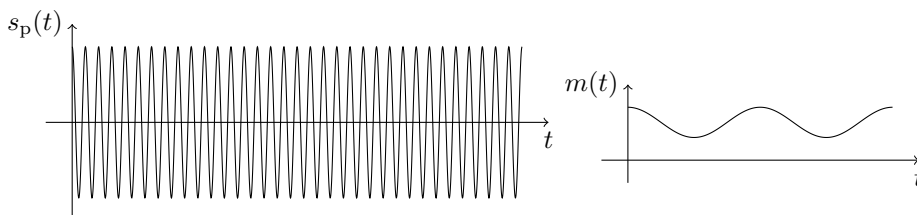
L'information doit donc être transportée par des ondes électromagnétiques de haute fréquence (plus centaines de kilohertz à plusieurs centaines de mégahertz). Le procédé consistant à transformer le signal électrique de départ en signal à haute fréquence est appelé « modulation ». Cette opération est réversible : on peut extraire l'information du signal modulé ; cette étape est appelée « démodulation ». Le signal modulé s'appuie sur un signal harmonique à haute fréquence appelée porteuse.

Différents types de la modulation

Les deux principales méthodes pour moduler un signal sont la modulation d'amplitude (AM) ou la modulation de fréquence (FM). Dans les deux cas, on construit le signal modulé à partir d'un signal modulant $m(t)$ (le signal que l'on veut transmettre), à basse fréquence, et d'une porteuse à haute fréquence $s_p(t)$; la porteuse est harmonique

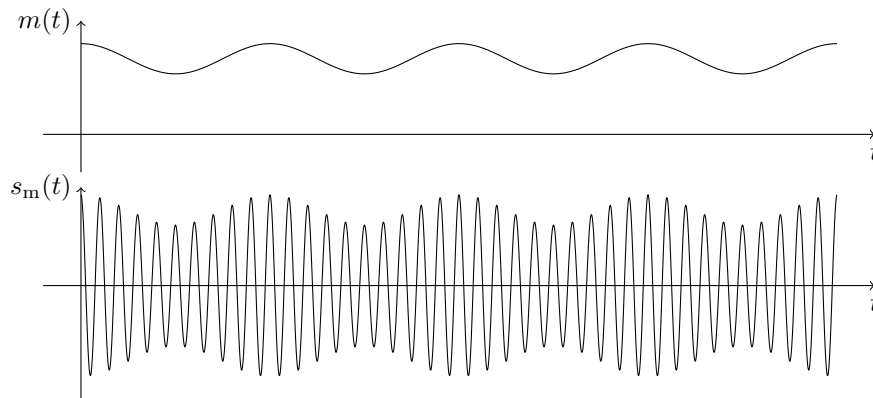
$$s_p(t) = A_0 \cos(\omega_p t) = A_0 \cos(2\pi f_p t)$$

Le signal modulant $m(t)$ est quelconque (positif). Pour alléger les notations, on considère que les signaux sont sans dimension.

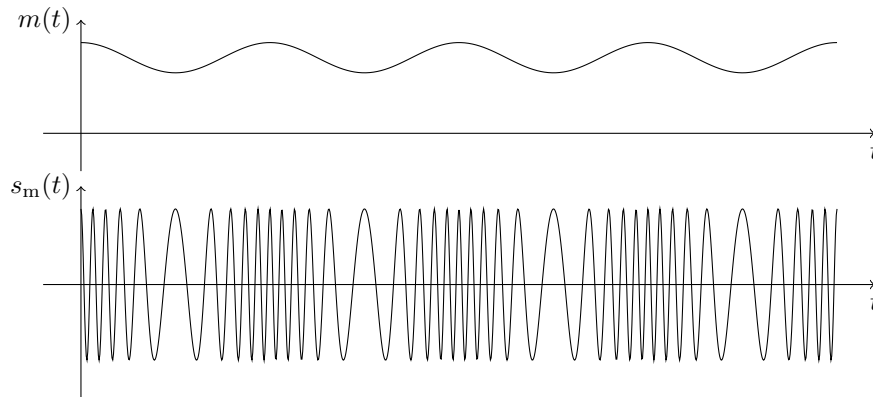


Dans le cas de la modulation d'amplitude, on déforme la porteuse en faisant varier son amplitude; c'est l'amplitude du signal modulé qui contient l'information.

$$s_m(t) = A_0 m(t) \cos(\omega_p t) = A_0 m(t) \cos(2\pi f_p t)$$



Dans le cas de la modulation de fréquence, on déforme la porteuse en faisant varier sa fréquence; c'est la fréquence du signal modulé qui contient l'information.

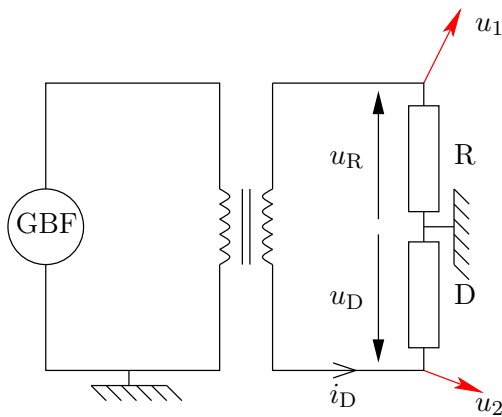


Annexe : Une méthode pour tracer la caractéristique d'un dipôle à l'oscilloscope

La méthode proposée dans cette annexe permet de tracer la caractéristique d'un dipôle à l'aide d'un oscilloscope. Elle nécessite l'utilisation d'un transformateur d'isolement⁹.

Montage

On note D le dipôle dont on souhaite tracer la caractéristique. Le montage est le suivant :



Choix des paramètres

- l'amplitude de la tension délivrée par le GBF doit être du même ordre de grandeur que la tension maximum souhaitée aux bornes du dipôle, typiquement quelques volts,
- la résistance R est choisie pour ne pas dépasser le courant maximum supporté par le dipôle ; pour une tension délivrée par le générateur de quelques volts, $R = 1 \text{ k}\Omega$ permet de ne pas dépasser quelques milliampères,
- la fréquence du GBF doit être suffisamment faible pour que la caractéristique statique du dipôle soit obtenue ; ce choix est indifférent si le comportement du dipôle ne dépend pas de la fréquence.

On a les relations

$$u_D = u_2 \quad \text{et} \quad i_D = -\frac{u_R}{R} = -\frac{u_1}{R}$$

Obtention de la caractéristique

Le protocole est le suivant :

- utiliser le mode XY de l'oscilloscope (menu Affichage),
- inverser la voie 1 (menu CH1).

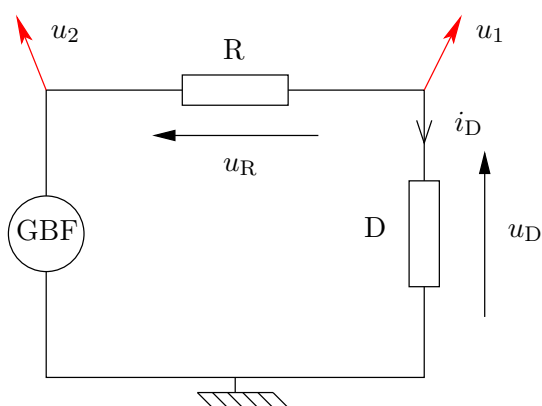
9. parfois appelé transformateur écran.

Annexe : Une méthode pour tracer la caractéristique d'un dipôle à l'ordinateur

La méthode proposée dans cette annexe permet de tracer la caractéristique d'un dipôle à l'aide d'une carte d'acquisition et d'un logiciel comme LatisPro.

Montage

On note D le dipôle dont on souhaite tracer la caractéristique. Le montage est le suivant :



Choix des paramètres

- l'amplitude de la tension délivrée par le GBF doit être du même ordre de grandeur que la tension maximum souhaitée aux bornes du dipôle, typiquement quelques volts,
- la résistance R est choisie pour ne pas dépasser le courant maximum supporté par le dipôle ; pour une tension délivrée par le générateur de quelques volts, $R = 1 \text{ k}\Omega$ permet de ne pas dépasser quelques milliampères,
- la fréquence du GBF doit être suffisamment faible pour que la caractéristique statique du dipôle soit obtenue ; ce choix est indifférent si le comportement du dipôle ne dépend pas de la fréquence.

On a les relations

$$u_R = u_2 - u_1 \quad \text{et} \quad i_D = \frac{u_R}{R} = \frac{u_2 - u_1}{R}$$

Obtention de la caractéristique

Le protocole est le suivant :

- relier u_1 et u_2 aux entrées EA1 et EA2 de la carte d'acquisition,
- choisir une durée d'acquisition inférieure à une période afin que d'éviter que plusieurs caractéristiques se superposent,
- calculer l'intensité en ouvrant une feuille de calcul (menu « Traitements ») :
 $R = \dots \% \text{ Votre valeur}$
 $i_D = (EA2 - EA1) / R$
 puis exécuter la feuille de calcul,
- tracer i_D en fonction de EA1.

Annexe : Mesure d'un déphasage à l'oscilloscope

Généralités sur les mesures à l'oscilloscope

Avant de réaliser des observations et des mesures à l'oscilloscope, il faut **impérativement** effectuer les réglages suivant :

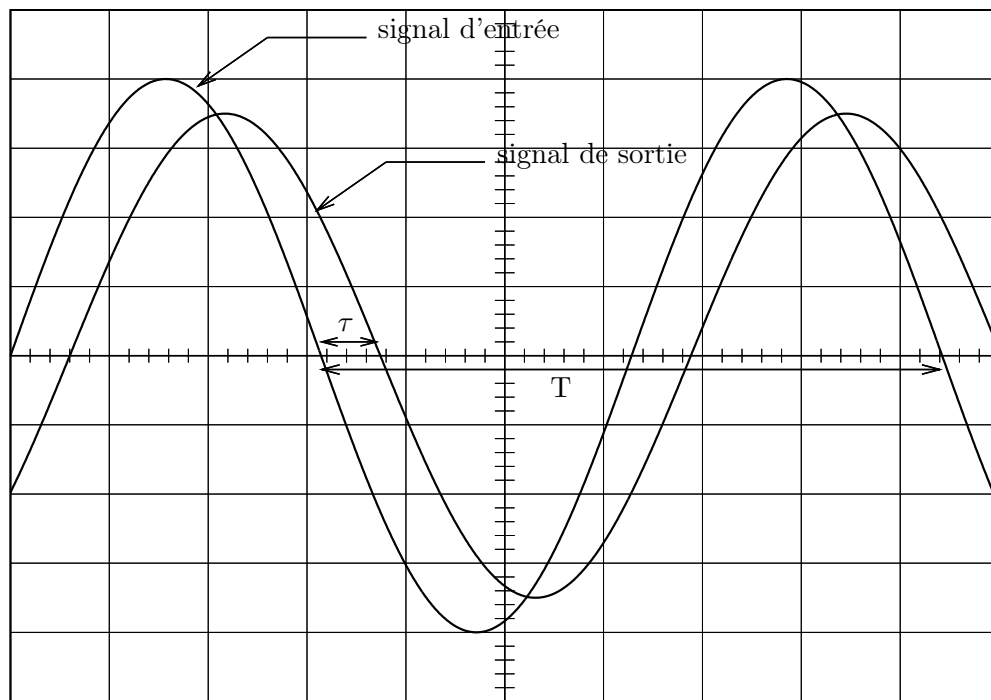
- choisir le mode AC si l'on travaille avec des tensions sinusoïdales, et le mode DC dans le cas contraire,
- vérifier que l'oscilloscope est calibré : en particulier, les sondes ne doivent pas être activées,
- régler les zéros correctement.

Enfin, une fois les tensions visualisées, il faut choisir un calibre adapté : afin de réaliser des mesures les plus précises possibles, il convient de choisir le calibre permettant d'observer des courbes les plus grandes possibles.

Mesure de la valeur absolue d'un déphasage

Voici une méthode qui permet de mesurer rapidement un déphasage. Cette méthode n'est pas la plus précise, mais elle a l'avantage d'être rapide.

Supposons que l'on obtienne l'oscillogramme suivant :



Dans cette configuration, T représentant une période, soit une variation de phase de $2\pi \text{ rad} = 360^\circ$; on en déduit

$$|\varphi_{[\text{degré}]}| = \frac{\tau}{T} \times 360 \quad \text{ou} \quad |\varphi_{[\text{rad}]}| = \frac{\tau}{T} \times 2\pi$$

Signe du déphasage

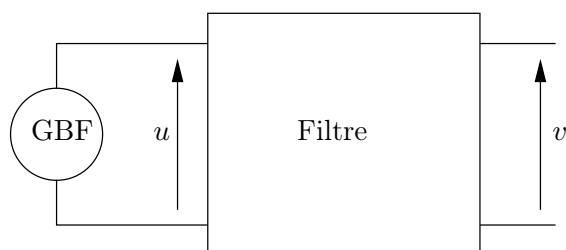
Sur l'oscillogramme précédent, on constate que le signal de sortie est en retard par rapport au signal d'entrée. En effet, le signal de sortie atteint ses maxima après le signal d'entrée. On en déduit que le déphasage est négatif. À retenir :

- si le signal de sortie est en retard par rapport au signal d'entrée, le déphasage (du signal de sortie par rapport au signal d'entrée) est négatif,
- si le signal de sortie est en avance par rapport au signal d'entrée, le déphasage (du signal de sortie par rapport au signal d'entrée) est positif.

Annexe : Tracé de la courbe de gain à l'ordinateur

Principe de l'étude

L'objectif de l'expérience qui suit est de tracer le module de la fonction de transfert d'un filtre (ou son gain en décibel) en fonction de la fréquence. Le montage est le suivant :



On note u la tension à l'entrée du filtre, v la tension à la sortie du filtre. En représentation complexe, la fonction de transfert s'écrit

$$\underline{H} = \frac{v}{u}$$

On a $|\underline{H}| = \frac{v_{\max}}{u_{\max}}$

où $u_{\max}$ et $v_{\max}$ sont respectivement l'amplitude de u et de v .

Expérimentalement, on peut visualiser à l'oscilloscope $u(t)$ et $v(t)$, mesurer $u_{\max}$ et $v_{\max}$ puis en déduire $|\underline{H}|$. On réalise ces mesures pour différentes valeurs de la fréquence f ; on peut ainsi représenter $|\underline{H}|$ en fonction de f (ou $G_{dB} = 20 \log |\underline{H}|$ en fonction de $\log(f)$).

Le protocole qui suit permet d'automatiser ces mesures et d'obtenir directement sur l'écran d'un ordinateur la représentation graphique de $|\underline{H}|$ en fonction de f . On fait en sorte que le GBF délivre une tension sinusoïdale de fréquence variable (mode **sweep**, appelé « wobulation »); la sortie habituelle du GBF délivre le signal sinusoïdal de fréquence variable, tandis que la sortie **sweep out** du GBF délivre une tension proportionnelle à la fréquence.

Acquisition des données

Le protocole est le suivant :

- câbler le montage précédent ;
- observation à l'oscilloscope : relier la sortie du GBF¹⁰ à la voie 1 et la tension de sortie du filtre à la voie 2,
- vérifier le bon fonctionnement à l'aide d'une tension sinusoïdale,
- appuyer sur le bouton **SWEEP ON/OFF** du GBF qui met en route la wobulation ; utiliser le bouton **SWEEP MODE** pour choisir une évolution linéaire (LIN) de la fréquence,
- appuyer sur le bouton **FREQ** puis tourner la molette pour régler $f_{\min}$,
- appuyer sur le bouton **SWEEP FMAX** puis tourner la molette pour régler $f_{\max}$,
- appuyer sur le bouton **SWEEP TIME** puis tourner la molette pour régler le temps de balayage à 10 s,
- vérifier à l'oscilloscope que la tension délivrée par le GBF est une tension sinusoïdale d'amplitude constante et de fréquence variable,
- à l'oscilloscope, mesurer l'amplitude $u_{\max}$ du signal délivré par le GBF ; faire en sorte d'avoir $3 \text{ V} \leq u_{\max} \leq 5 \text{ V}$, et noter la valeur¹¹,
- branchement de la carte d'acquisition : relier la sortie **SWEEP OUT** du GBF à l'entrée EA0 puis la tension de sortie du filtre à l'entrée EA1,
- lancer le logiciel Latis Pro,
- dans le menu **acquisition**, activer les voix EA0 et EA1, puis choisir une acquisition de 10000 points pour une durée totale de 10 s ; choisir le déclenchement sur la voie EA0, sur front descendant, avec un niveau de déclenchement de 10 mV,
- presser la touche **F10** de l'ordinateur pour lancer l'acquisition,
- cliquer (bouton droit) sur le fond du graphique puis sélectionner **calibrage**.

On obtient ainsi deux courbes, la première (notée w) traduisant l'évolution de la fréquence, la deuxième l'évolution de $|\underline{H}|$. Il reste à traiter les données pour obtenir $|\underline{H}|$ en fonction de f .

10. Utiliser le GBF Metrix 3240 ; il peut délivrer une tension modulée en fréquence entre 1 kHz et 51 kHz.

11. Ne pas se fier à l'indication fournie par le GBF.

Traitement des données

- cliquer (bouton droit) sur le fond du graphique puis sélectionner **réticule** ; déterminer la valeur finale (maximale) de la tension w , notée $w_{\max}$, puis cliquer sur **terminer**,
- dans le menu **traitement**, cliquer sur **feuille de calcul** ; une feuille de calcul apparaît ; y saisir les instructions suivantes (en remplaçant les points de suspension par vos valeurs)

```
fmin=...
fmax=...
wmax=...
f=fmin+(fmax-fmin)/wmax*EA0 # on obtient la fréquence
logf=log(f) # on obtient le log de la fréquence
umax=...
modH=EA1/umax # on obtient le module de la fonction de transfert
GdB=20*log(abs(modH)) # on obtient le gain en décibel
```

- appuyer sur F2 pour exécuter les calculs, puis fermer la feuille de calcul ; Latis Pro a produit quatre nouveaux tableaux, contenant respectivement les valeurs de f , $\log(f)$, $|\underline{H}|$ et G_{dB} .
- cliquer (bouton droit) sur le fond de la zone graphique et sélectionner **retirer toutes les courbes**,
- ouvrir la liste des courbes¹², puis glisser-déposer $|\underline{H}|$ (ou G_{dB}) sur l'axe vertical du graphique,
- faire de même pour amener f (ou $\log(f)$) sur l'axe horizontal,
- sauvegarder votre travail.

L'enveloppe de la courbe représente $|\underline{H}|$ (ou G_{dB}) en fonction de f (ou $\log(f)$). On peut améliorer la représentation graphique en supprimant les dernières lignes du tableau de valeurs (menu « Traitements » puis « Tableur » ou F11).

12. icône représentant une sinusoïde verte, en haut à gauche.

Annexe : Réalisation d'un signal modulé en fréquence

Le protocole proposé ci-dessous utilise un GBF Metrix 3240 pour produire le signal modulé ainsi qu'un autre GBF (par exemple Metrix GX240) qui fournit le signal modulant.

- mettre en marche le GBF Metrix 3240 et appuyer sur SWEEP ON/OFF pour activer la modulation,
- à l'aide du bouton SWEEP SOURCE choisir la modulation externe EXT,
- la fréquence clignote ; la molette permet alors de choisir la fréquence moyenne du signal modulé en fréquence (par exemple 100 kHz),
- relier la sortie du GBF à l'oscilloscope : aucun signal modulant n'étant utilisé, le signal est harmonique,
- mettre en marche le GBF Metrix GX240, sélectionner un signal sinusoïdal de fréquence voisine de 1 kHz et d'amplitude voisine de 5 V,
- relier la sortie du GBF Metrix GX240 à l'entrée VCF IN du GBF Metrix 3240.

Pour les paramètres d'acquisition, on peut prendre pour commencer 30000 points et une période d'acquisition de 100 ns.

Annexe : Analyse spectrale et repliement de spectre

Échantillonnage d'un signal sinusoïdal

La réalisation de l'échantillonnage d'un signal par une carte d'acquisition ne peut pas reproduire à l'identique le signal étudié. Une étude approfondie du processus d'échantillonnage montre qu'il apparaît dans le spectre du signal échantillonné des fréquences qui n'existent pas dans le signal de départ. Ainsi, dans le cas d'un signal sinusoïdal de fréquence f échantillonné à la fréquence f_e , il apparaît les fréquences $|f + p f_e|$ où p est entier relatif. Pour ne pas voir apparaître ces fréquences supplémentaires :

- on impose la condition $f_e > 2f$ (critère de Shannon),
- on utilise un filtre passe-bas « anti-repliement » de fréquence de coupure $f_e/2$.

Échantillonnage d'un signal périodique non-sinusoïdal

Considérons maintenant un signal périodique non-sinusoïdal de fréquence f_0 ; son spectre comporte les fréquences $f_0, 2f_0, 3f_0$ etc... On souhaite l'échantillonner à la fréquence f_e . Compte-tenu du phénomène de repliement de spectre, on est susceptible d'observer dans le spectre les fréquences $|n f_0 + p f_e|$ où n et p sont entiers.

Exemple

Illustrons ce phénomène sur l'exemple d'un signal créneau de fréquence $f_0 = 1960$ Hz échantillonné à $f_e = 25$ kHz. Normalement, le spectre d'un tel signal ne comporte que les fréquences $n f_0$ avec n entier impair¹³, soit 1960 Hz, 5880 Hz ($n = 3$), 9800 Hz ($n = 5$), 13,72 Hz ($n = 7$) etc... Or, la réalisation du spectre fait apparaître des fréquences supplémentaires : 480 Hz, 3440 Hz, 4400 Hz, 7360 Hz, 8320 Hz, 11,28 Hz, 15,2 Hz.

La première de ces fréquences supplémentaire correspond au repliement de l'harmonique 13 car $13 f_0 - f_e = 480$ Hz ; la deuxième correspond au repliement de l'harmonique 11 car $|11 f_0 - f_e| = 3440$ Hz. Les autres fréquences correspondent respectivement au repliement des harmoniques 15, 9, 17, 7, et 5 (à vérifier).

13. C'est une particularité du signal créneau : l'amplitude des harmoniques de rang pair est nulle.