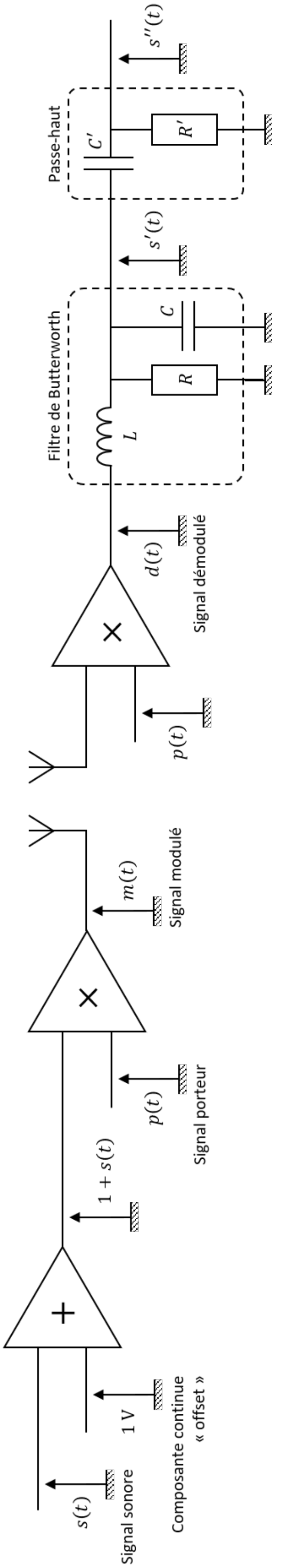
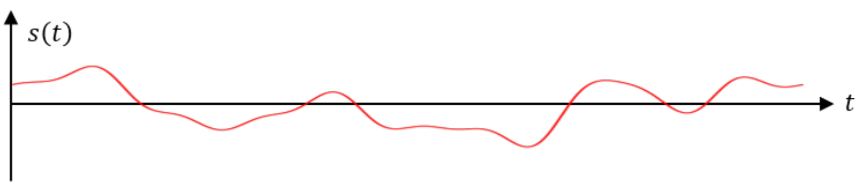
[E] TP n°9 – Modulation en amplitude



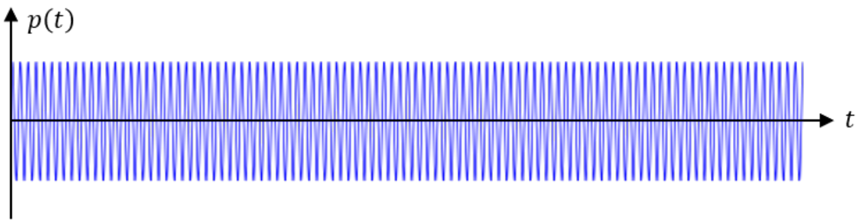
Dans ce TP, nous allons étudier une opération omniprésente dans les télécommunications : la modulation d'un signal en vue de sa transmission.

I) Modulation en amplitude – théorie

Soit un signal sonore $s(t)$ que l'on cherche à transmettre sur une grande distance. Ce signal possède des pulsations centrées autour d'une valeur notée ω_m.

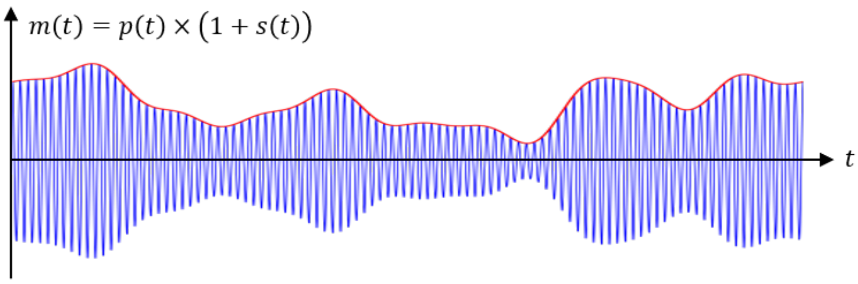


Pour des raisons pratiques, il n'est pas possible de transmettre directement une onde électromagnétique de pulsation ω_m. L'objectif est d'encoder $s(t)$ dans un signal porteur $p(t) = A_p \cos(\omega_p t)$, qui est un signal harmonique dont la fréquence est dans la gamme des ondes radios ($\omega_p \gg \omega_m$)



Il existe plusieurs types de modulation. Nous allons ici traiter le cas de la modulation en amplitude, qui consiste à encoder $s(t)$ dans l'amplitude de $p(t)$.

Mathématiquement, le signal modulé $m(t)$ s'écrit :



On constate graphiquement que le signal $m(t)$ est une sinusoïde de pulsation ω_p (domaine radio, propice à l'émission sur de longues distances) dont l'amplitude est modulée par la valeur du signal d'intérêt $s(t)$.

Dans ce TP, nous allons générer le signal modulé $m(t)$ et l'objectif sera de récupérer un signal $s''(t)$ proportionnel au signal d'intérêt $s(t)$. Nous n'étudierons pas l'émission ou la réception du signal à l'aide d'antennes.

II) Réalisation du montage expérimental

1) Signal d'intérêt

Afin de simplifier l'étude, nous allons chercher à transmettre un signal $s(t)$ sinusoïdal.

$$s(t) = A_m \cos(\omega_m t)$$

L'objectif sera de retrouver ce signal en fin de TP.

Pour que la modulation en amplitude marche, on peut montrer qu'il faut : $A_m < 1$ V afin que $1 + s(t) > 0 \; \forall t$. On choisit une fréquence dans le domaine audible : $f_m = 200$ Hz.

Nous allons ajouter la composante continue de 1 V directement à l'aide des outils du GBF.

Générer sur la voie CH2 du GBF d'un signal de fréquence $f_m = 200$ Hz, d'amplitude 0,5 V et d'offset 1 V.

Visualiser ce signal sur la voie EA0 de la carte d'acquisition (logiciel LatisPro). Paramètres d'acquisition : $N = 40\,000$, $T_e = 500$ ns, $T_{tot} = 20$ ms et déclenchement sur EA0 à 1 V sur front montant.

Remarque : pour chaque signal que vous allez observer dans ce TP, choisir le calibre de manière adapté (le plus petit calibre ne provoquant pas de saturation du calibre), et changer les propriétés de la courbe : mettre la courbe en trait continu pour plus de lisibilité.

Cliquer sur « Traitement » puis « Analyse de Fourier ». Réaliser l'analyse de Fourier de EA0. Renommer la courbe « FourierAE0 » (ou tout autre nom bien identifiable).

Remarque : pour chaque signal que vous allez observer dans ce TP, réaliser l'analyse de Fourier telle que décrite précédemment.

2) Signal porteur

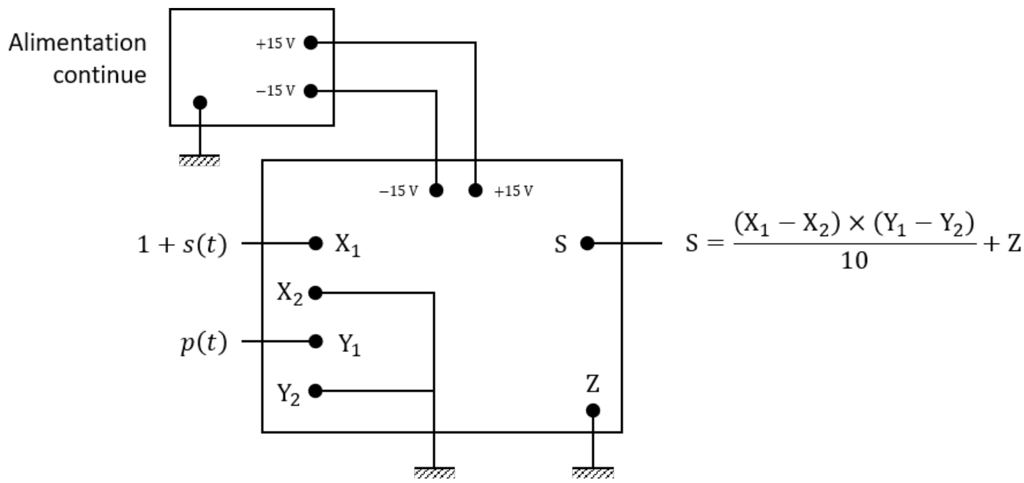
Générer sur la voie CH1 du GBF un signal $p(t)$ sinusoïdal de fréquence $f_p = 100$ kHz, d'amplitude 10 V.

Visualiser ce signal sur la voie EA1 de la carte d'acquisition. Zoomer sur la courbe pour voir la sinusoïde apparaître, puis retirer l'affichage de la courbe (mais pas son enregistrement) car elle occupe tout l'écran.

3) Signal modulé

Pour toute la suite du montage, bien faire attention à connecter les masses des différente partie du montage entre elles : BGF, alimentation continue, multiplieur, carte d'acquisition, etc.

Réaliser le branchement du premier multiplieur.



Visualiser le signal modulé $m(t)$ sur la voie EA2 de la carte d'acquisition. Vérifier que l'on a bien une courbe oscillant à la même fréquence que EA1, mais dont l'amplitude est modulée par la valeur de EA0.

Remarque : l'amplitude de 10 V du signal porteur permet uniquement de compenser le facteur 1/10 imposé par le multiplieur. On peut ainsi considérer que le signal porteur est d'amplitude 1 V et que le multiplieur n'applique pas de facteur d'atténuation.

Mathématiquement, le signal modulé $m(t)$ s'écrit (après utilisation de formules trigonométriques) :

$$m(t) = p(t) \times \Big(1 + s(t)\Big) = \frac{1}{4}\ \cos((\omega_p - \omega_m)\,t) + \cos(\omega_p t) + \frac{1}{4}\ \cos((\omega_p + \omega_m)\,t)$$

L'analyse de Fourier de $m(t)$ est-elle en accord avec la théorie ?

4) Signal démodulé

Le signal $m(t)$ ne contenant que de fréquences dans le domaine radio, il peut être envoyé puis réceptionné à l'aide de deux antennes radio. Par soucis de simplicité, nous n'allons pas inclure ces antennes dans le montage et envoyer directement $m(t)$ dans le module de démodulation.

Réaliser le branchement du second multiplieur. Brancher $m(t)$ sur la voie X_1 et $p(t)$ (voie CH1 du GBF) sur la voie Y_1. Visualiser le signal démodulé $d(t)$ sur la voie EA3 de la carte d'acquisition.

Mathématiquement, le signal modulé $d(t)$ s'écrit (après utilisation de formules trigonométriques) :

$$d(t) = p(t) \times m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}\ \cos(\omega_m t) + \frac{1}{8}\ \cos((2\omega_p - \omega_m)\,t) + \frac{1}{2}\ \cos(2\omega_p t) + \frac{1}{8}\ \cos((2\omega_p + \omega_m)\,t)$$

L'analyse de Fourier de $d(t)$ est-elle en accord avec la théorie ?

5) Filtre de Butterworth – filtrage passe-bas

Le filtre de Butterworth est un filtre dont la fonction de transfert est donnée par :

$$\underline{H} = \frac{1}{1 - x^2 + \dfrac{jx}{Q}} \quad \text{avec :} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad Q = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

Il s'agit d'un filtre passe-bas d'ordre 2 dont le rôle est de supprimer les hautes fréquences contenues dans $d(t)$.

Construire le filtre de Butterworth. Choisir les valeurs de R, L et C afin d'avoir $f_0 \simeq 500$ Hz et $Q \simeq 1$.

Déterminer l'expression théorique de $s'(t)$.

L'analyse de Fourier de $s'(t)$ est-elle en accord avec la théorie ?

6) Suppression de la composante continue – filtrage passe-haut

La dernière étape consiste à filtrer la composante continue. On réalise pour cela un filtre RC passe-haut d'ordre 1 dont la fonction de transfert est donnée par :

$$\underline{H} = \frac{jx}{1 + jx} \quad \text{avec :} \quad \omega_0' = \frac{1}{RC}$$

Construire le filtre passe-haut. Choisir les valeurs de R' et C' afin d'avoir $f_0' \simeq 10$ Hz.

Déterminer l'expression théorique de $s''(t)$.

L'analyse de Fourier de $s''(t)$ est-elle en accord avec la théorie ?

III) Numérisation du signal démodulé

1) Rappel – critère de Shannon

Plaçons-nous dans la position du récepteur, qui vient d'obtenir le signal démodulé $d(t)$. Plusieurs options s'offrent à lui en vue de la numérisation du signal :

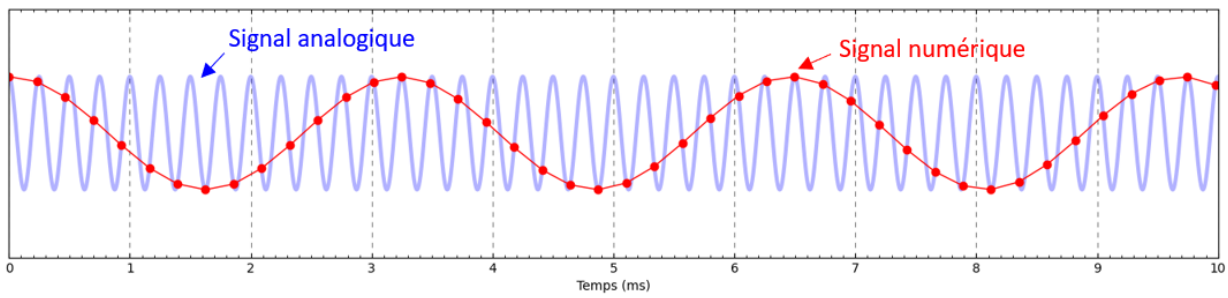
- filtrer $d(t)$ en $s''(t)$ puis numériser ce signal ;

- ◦ filtrer $d(t)$ en $s'(t)$, numériser ce signal, puis supprimer numériquement la composante continue ;
- ◦ numériser directement $d(t)$, puis effectuer l'ensemble du filtrage numériquement.

Le fichier numériser doit être le moins lourd possible. On va pour cela se placer proche de la limite du critère de Shannon pour la fréquence du signal d'intérêt f_m.

Critère de Shannon

Lors de l'acquisition d'un signal de fréquence f_s, il faut que la fréquence d'échantillonnage f_e respecte le critère de Shannon : $\boxed{f_e \geq 2f_s}$. Si ce critère n'est pas respecté, alors le signal analogique HF est transformé en un signal numérique BF, comme illustré sur l'exemple ci-dessous.



2) Nécessité du filtrage analogique

Le signal d'intérêt possède une fréquence $f_m = 200$ Hz. Nous allons choisir une fréquence d'échantillonnage $f_e = 2$ kHz. Le critère de Shannon est ainsi bien respecté.

Changer les paramètres de LatisPro : prendre $T_e = 500$ µs tout en gardant $T_{tot} = 20$ ms.

Cette modification conduit à un nombre de points $N = 40$ au lieu de 40 000 comme en début de TP. Ainsi, pour un même temps d'enregistrement, la taille du fichier a été divisée par 1000, c'est une amélioration considérable !

Remarque : pour une meilleure visualisation du signal, changer les propriétés de l'affichage des courbes : choisir des points reliés par des traits, au lieu d'un simple trait.

Conséquence de cette nouvelle fréquence d'échantillonnage, toutes les fréquences $f > 1$ kHz ne respectent pas le critère de Shannon, leur numérisation va donc envoyer ces composantes HF dans le domaine des BF, c'est-à-dire là où se trouve la fréquence d'intérêt f_m.

Vérifier que les signaux EA0, EA4 et EA5 sont « bien » échantillonnés, et que les signaux EA1, EA2 et EA3 sont « mal » échantillonnés. Conclure : laquelle des trois options présentées au III.1 va-t-on préférer ?