

AMPLIFICATEUR LINÉAIRE INTÉGRÉ MODULATION D'AMPLITUDE

*On prendra soin de reporter dans le compte-rendu :
courbes visualisées, mesures et leur incertitude, commentaires et interprétations.*

La puissance d'un signal de pulsation ω , émis par une antenne (radio par exemple), est proportionnelle à ω^4 . Ainsi, les signaux électriques de basse fréquence ont une portée limitée. Ils sont donc transmis à distance par une onde porteuse de fréquence élevée dont ils modulent une caractéristique : l'amplitude (AM) ou la fréquence (FM). À la réception du signal modulé, le signal basse fréquence doit être récupéré : c'est l'opération de démodulation.

Objectifs :

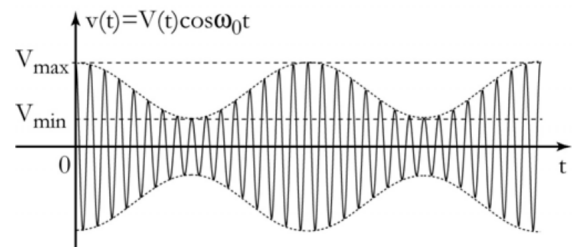
- Réaliser un signal modulé en amplitude dans le but de transporter une information ;
- Réaliser une acquisition numérique d'un signal correctement échantillonnée ;
- Observer l'*enrichissement spectral* dû à un dipôle non linéaire par analyse de Fourier.
- Concevoir un filtre passe-bande sélectif adapté pour prélever une partie du spectre ;
- Démoduler le signal avec un détecteur de crêtes.

I. Modulation d'amplitude : définition et principe

I.1. Signal modulé en amplitude

Soit $s(t)$ l'information basse fréquence (de pulsation ω) que l'on souhaite transmettre (*signal modulant*). Supposons pour simplifier que le signal est sinusoïdal :

$$s(t) = S \cos(\omega t)$$



Son transport se fait par l'intermédiaire d'une onde *porteuse* de pulsation $\omega_0 \gg \omega$ (haute fréquence) en réalisant un signal modulé $v(t)$ (haute fréquence), dont l'amplitude $V(t)$ contient l'information $s(t)$:

$$v(t) = V(t) \cos(\omega_0 t) \quad \text{avec} \quad V(t) = S + m s(t) = S(1 + m \cos(\omega t)) \quad \text{et} \quad m < 1$$

où m est appelé le *taux de modulation*.

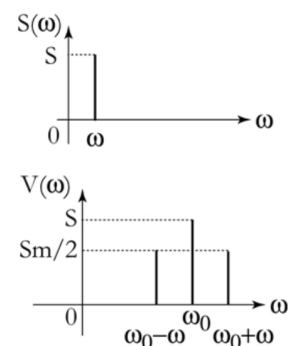
REMARQUE : Un des intérêts de la modulation d'amplitude est le *multiplexage* en téléphonie : on transmet sur une même ligne des informations à basses fréquences différentes $s_1(t)$, $s_2(t)$, ... par des porteuses différentes de pulsations ω_{01} , ω_{02} , ...

I.2. Spectre du signal modulé

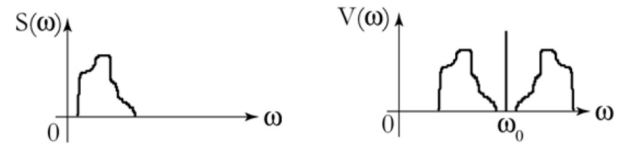
Si le signal $s(t)$ à transmettre est sinusoïdal $s(t) = S \cos(\omega t)$, son spectre (représentation des amplitudes en fonction des pulsations composant le signal) ne comporte alors qu'une seule pulsation : ω (cf figure ci-contre).

Le spectre du signal modulé comporte alors trois pulsations : ω_0 , $\omega_0 - \omega$ et $\omega_0 + \omega$, car

$$\begin{aligned} v(t) &= S(1 + m \cos(\omega t)) \cos(\omega_0 t) \\ &= S \left[\cos(\omega_0 t) + \frac{m}{2} \cos((\omega_0 - \omega)t) + \frac{m}{2} \cos((\omega_0 + \omega)t) \right] \end{aligned}$$



REMARQUE : Pour un signal $s(t)$ quelconque, le signal modulé aura le spectre ci-contre à 2 bandes.

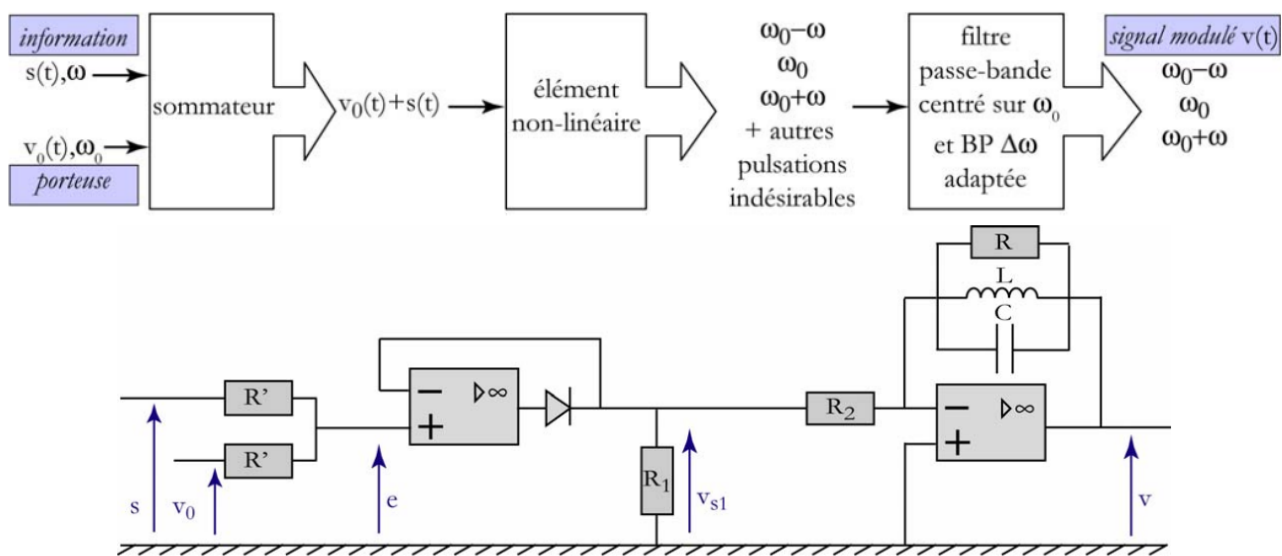


I.3. Schéma de principe de réalisation d'un signal modulé en amplitude

On veut obtenir le signal modulé $v(t)$ à partir d'un signal basse fréquence (B.F.) $s(t) = S \cos(\omega t)$ (l'information) de pulsation ω et d'un signal haute fréquence (H.F.) $v_0(t) = V_0 \cos(\omega_0 t)$ (la porteuse) de pulsation ω_0 . Le signal modulé $v(t)$ doit contenir les pulsations $\omega_0 - \omega$, ω_0 et $\omega_0 + \omega$, et uniquement celles-ci.

Pour l'obtenir, il faut pouvoir **multiplier** 2 signaux. Cela peut se faire en **enrichissant le spectre** de $s(t)$ grâce à un système **non linéaire** qui fournira, entre autre, les pulsations $\omega_0 - \omega$, ω_0 et $\omega_0 + \omega$. D'autres pulsations indésirables seront également obtenues et devront être éliminées par un **filtrage** adéquat.

Le montage complet du modulateur est indiqué ci-dessous. Nous en étudierons séparément chaque élément.



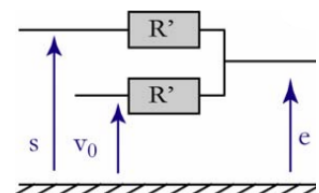
II. Construction du modulateur d'amplitude

II.1. Montage sommateur

Q1. Montrer que dans le montage ci-contre, on a $e(t) = \frac{1}{2}(v_0(t) + s(t))$.

• MANIP 1 : Sommateur isolé

- Réaliser le montage ci-contre. On prendra $R' = 22 \text{ k}\Omega$. On utilisera deux GBF pour $v_0(t)$ (porteuse : sinusoïde de fréquence 16 kHz) et $s(t)$ (modulant : sinusoïde de fréquence 1 kHz).
- Visualiser à l'oscilloscope $e(t)$. Vérifier le rôle de chaque signal d'entrée en modifiant les amplitudes. Le résultat est-il conforme à celui attendu ?

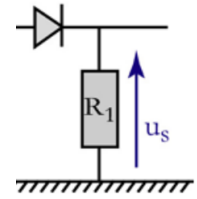


II.2. Enrichissement du spectre grâce à un redresseur mono-alternance

On réalise le montage vu au TP°3, puis on compare le spectre du signal de sortie à celui du signal d'entrée.

• MANIP 2 : Redresseur monoalternance avec seuil - analyse spectrale

- Effectuer le montage du redresseur ci-contre avec $u_e(t)$ sinusoïdale de fréquence ~ 1 kHz et d'amplitude ~ 1 V. On prendra $R_1 = 1$ k Ω .
- Visualiser $u_e(t)$ et $u_s(t)$ à l'oscilloscope en mode DUAL, puis en mode XY.
- Faire une étude du spectre de $u_s(t)$ à l'aide du logiciel Génériss (Transformée de Fourier) en effectuant une acquisition numérique ^a.
- Indiquer les principales fréquences observées dans le spectre de $u_s(t)$. Conclusion : y a-t-il bien eu enrichissement du spectre ?



^a. Rmq : Pour obtenir une transformée de Fourier correcte, acquérir une dizaine de périodes. Prendre également garde à ce que le signal soit correctement échantillonné : réfléchir à la durée et au nombre de points d'acquisition (*critère de Shannon*).

II.3. Sommateur-redresseur

Commençons naïvement par associer le sommateur au redresseur...

• MANIP 3 : Sommateur-redresseur sans adaptation d'impédance

- Associer le redresseur au sommateur en réutilisant les deux GBF avec les mêmes signaux.
- Visualiser à l'oscilloscope la sortie du sommateur, $e(t)$, et la sortie du redresseur, $v_{s1}(t)$. Sont-elles conformes à ce que l'on souhaite ? Pourquoi ?

• MANIP 4 : Sommateur-redresseur avec adaptation d'impédance

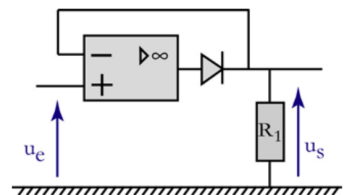
- Dans le précédent montage, intercaler le montage suiveur entre le sommateur et le redresseur.
- Visualiser à l'oscilloscope la sortie du sommateur, $e(t)$, et la sortie du redresseur, $v_{s1}(t)$. Expliquer.

On peut améliorer le dispositif en fabriquant un redresseur sans seuil, de sorte que le signal de sortie ne soit pas diminué à cause de la tension de seuil de la diode. Il suffit pour cela d'insérer la diode dans la boucle de rétroaction sur l'entrée inverseuse de l'AO. On montre alors que :

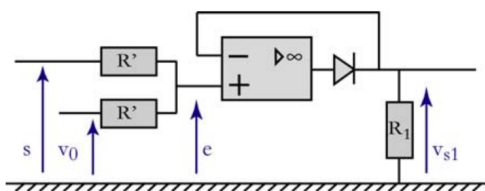
$$u_s(t) = u_e(t) \quad \text{si} \quad u_e(t) > 0, \quad \text{et} \quad u_s(t) = 0 \quad \text{si} \quad u_e(t) < 0$$

• MANIP 5

Effectuer ce nouveau montage seul et visualiser $u_e(t)$ et $u_s(t)$ à l'oscilloscope, en mode DUAL puis XY. Vérifier que la tension de sortie est maintenant exactement la partie positive du signal d'entrée.



Finalement on utilisera donc le circuit suivant.



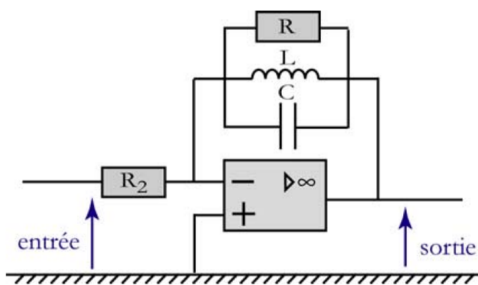
• MANIP 6 : Sommateur-redresseur sans seuil

- Réaliser le montage du sommateur-redresseur. On utilisera deux GBF pour $v_0(t)$ (porteuse : sinusoïde de fréquence 16 kHz) et $s(t)$ (modulant : sinusoïde de fréquence 1 kHz).
- Visualiser à l'oscilloscope $e(t)$ et $v_{s1}(t)$.
- Étudier le spectre de $v_{s1}(t)$ à l'aide du logiciel Génériss. Que peut-on en conclure ?

Montrez que : $e(t) = \frac{1}{2} (v_0(t) + s(t))$.

ATTENTION : ne pas démonter ce circuit. Il sera nécessaire pour la suite.

II.4. Réalisation du filtre linéaire passe-bande du 2ème ordre



La fonction de transfert du filtre se met sous la forme :

$$\underline{H} = \frac{H_0 jx/Q}{1 - x^2 + jx/Q}$$

$$\text{avec } x = \frac{\omega}{\omega_0}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ et } Q = R\sqrt{\frac{C}{L}}.$$

On prendra : $L = 0,1 \text{ H}$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $C = ? \text{ nF}$ et $R = ? \text{ k}\Omega$.

Q2. Comment choisir les valeurs de C et de R pour que le filtre soit adapté au circuit modulateur ?

• MANIP 7 : Filtrage

- Réaliser le montage du filtre.
- Par un balayage en fréquences, vérifier que le filtre se comporte bien comme un passe-bande, et localiser approximativement la résonance. Vérifier aussi qu'il ne sature pas.
- Mesurer la fréquence de résonance f_0 de façon précise en exploitant la valeur du déphasage à la résonance. La valeur correspond-elle à celle prévue ?
- Mesurer les fréquences de coupure f_{c1} et f_{c2} . La bande passante est-elle celle prévue ?
- Retoucher légèrement, si nécessaire, les valeurs de C et de R pour que le filtre réalise bien la fonction voulue. Expliquez comment vous procédez.

II.5. Étude du modulateur d'amplitude

Q3. Etablir une expression littérale du taux de modulation m en fonction uniquement de V_{\max} et V_{\min} .

Q4. Que se passerait-il si $m > 1$ (*surmodulation*) ?

• MANIP 8 : Modulateur complet

- Réaliser le montage complet du modulateur.
- Visualiser à l'oscilloscope la tension $v(t)$. On jouera si nécessaire sur les amplitudes de $s(t)$ et $v_0(t)$ pour avoir un signal modulé convenable.
- Étudier le spectre de $v(t)$ à l'aide du logiciel Génériss. Obtient-on le résultat escompté ?
- Mesurer m expérimentalement.

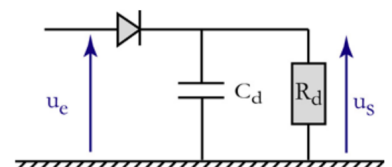
III. Démodulation d'amplitude

L'information $s(t)$ peut être transportée grâce au signal modulé $v(t)$ que l'on vient de créer. À la réception, on récupère le signal modulé $v(t)$ et il faut alors remonter à l'information $s(t)$: il s'agit de l'étape de *démodulation*.

L'« amplitude » $V(t) = S(1 + m \cos(\omega t))$ du signal $v(t)$ obtenu au II est l'enveloppe de ce signal et elle contient l'information $s(t) = S \cos(\omega t)$ à récupérer. Pour obtenir « $\cos(\omega t)$ » à une constante additive près, il « suffit » donc de détecter l'enveloppe de $v(t)$.

• MANIP 9 : Détecteur d'enveloppe

- Construire le détecteur d'enveloppe ci-contre (cf. TP-cours 5). Comment choisir R_d et C_d sachant que la porteuse est de fréquence $\sim 16 \text{ kHz}$?
- Tester le fonctionnement à l'aide d'un signal d'entrée $u_e(t)$ sinusoïdal. Visualiser $u_e(t)$ et $u_s(t)$. Commenter.



• MANIP 10 : Application à la démodulation

- Brancher le détecteur d'enveloppe à la sortie du modulateur.
- Vérifier que l'on obtient le signal $s(t) = S \cos(\omega t)$ en sortie du détecteur d'enveloppe.

ANNEXE - Acquisition numérique d'un signal

Principe de la Conversion Analogique-Numérique

La carte d'acquisition permet de transformer le signal *analogique* en un signal *numérique*. Cette CAN consiste en deux étapes : l'*échantillonnage*¹ puis la *quantification*².

Lors de l'acquisition, il faut régler la période d'échantillonnage T_e de sorte à reproduire aussi fidèlement que possible les signaux reçus. Concrètement, plus il y a d'échantillons pour une durée donnée plus le signal est bien reproduit. En théorie, pour percevoir la période d'un signal sinusoïdal de période T , il faut **au minimum deux échantillons par période**, ce qui se traduit par

$$T_e < T/2 \quad \text{ou} \quad f_e > 2f.$$

Ainsi, pour un signal dont le spectre comporte plusieurs fréquences, l'acquisition ne peut reproduire correctement que les fréquences inférieures à f_{\max} vérifiant le *critère de Shannon* :

$$f_{\max} = f_e/2$$

Si le spectre du signal analogique comporte des fréquences supérieures à $f_e/2$, alors le spectre du signal numérisé sera artificiellement enrichi par des composantes spectrales supplémentaires (en général des basse-fréquences), qui modifient profondément la forme du signal.

La période d'échantillonnage T_e est déterminée par deux paramètres de l'acquisition : (i) la durée de l'acquisition Δt et (ii) le nombre de points N utilisé pour cette acquisition. On a donc $T_e = \Delta t/N$.

Transformée de Fourier discrète

Le spectre du signal est obtenu en calculant la Transformée de Fourier (TF) du signal³. Le signal étant numérique, on parle de TF *discrète*.

Pour obtenir un spectre convenable, il convient de **maximiser la fréquence d'échantillonnage**, donc le nombre de points pour une durée d'acquisition donnée ($f_e = N/\Delta t$). Mais cela ne suffit pas. Pour mesurer de façon précise les basses fréquences, il est nécessaire d'avoir une **durée d'acquisition suffisamment grande**. Par exemple, pour un signal périodique de période T , on ne peut mesurer cette période⁴ de façon précise que si la durée d'acquisition lui est nettement supérieure. En effet, l'ordinateur ne connaissant le signal que sur une durée Δt , il percevra d'autant mieux sa périodicité si elle apparaît clairement pendant cette durée⁵. En pratique on fait en sorte par exemple d'**acquérir une dizaine de périodes**.

En conclusion, une bonne acquisition résulte d'un **compromis** entre la durée d'acquisition Δt et la fréquence d'échantillonnage $f_e = N/\Delta t$, qui doivent toutes les deux être aussi grandes que possible. Suivant ce que l'on souhaite mesurer, fréquence fondamentale ou harmoniques hautes fréquences, on peut privilégier l'une ou l'autre respectivement.

1. La carte enregistre les valeurs du signal seulement à certains instants t_k régulièrement espacés d'une durée appelée T_e appelée *période d'échantillonnage*. La fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/T_e$ est réglable, mais limitée par valeur supérieure, la carte étant forcément limitée en rapidité d'exécution.

2. La valeur de la tension $u(t_k)$ est approximée par une valeur u_n parmi N valeurs possibles, dans un système de codage à p bits. Le nombre N dépend de la résolution de la carte (p bits) : $N = 2^p$.

3. Avec le logiciel ATELIER SCIENTIFIQUE (GENERIS), la TF est obtenue via la fenêtre CALCULS.

4. c'est-à-dire mesurer la fréquence du mode fondamental...

5. Pour être précis, l'ensemble des valeurs de fréquence produit par la TF discrète est lui aussi discret. Ceci provient du fait que l'ordinateur considère le signal périodique de période la durée d'échantillonnage. Les fréquences f_k permises sont des multiples entiers de la fréquence minimale $f_{\min} = 1/\Delta t$ (donc vérifiant $f_k = k f_{\min}$). Ainsi, plus f_{\min} est petite, plus la détermination des fréquences est précise.

TP Modulation d'amplitude
Liste de matériel - 6 postes

Matériel pour chaque poste :

- 2 GBF, un oscilloscope ;
- 2 plaquettes à AO + 2 plaquette de montage
- boîtes à décades de résistances et capacités ;
- fils coaxiaux BNC-banane (si possible...) ;
- un ordinateur avec Generis + carte d'acquisition (ancienne ou nouvelle).
- Papier millimétré, semilog, impression via les ordinateurs.
- 2 résistances de qqs $10\text{ k}\Omega$ (ex $22\text{ k}\Omega$) et 2 de $1\text{ k}\Omega$.
- une bobine d'inductance $L = 0,1\text{ H}$.
- 2 diodes.