

TRANSMISSION / RECEPTION D'UN SIGNAL SONORE PAR MODULATION D'AMPLITUDE

I.	INTRODUCTION.....	2
A.	PAR VOIE AERIENNE	2
B.	PAR CABLE ELECTRIQUE (COAXIAL, « PAIRE DE FIL » TELEPHONE).....	2
C.	PAR FIBRE OPTIQUE	2
D.	PAR VOIE HERTZIENNE	3
II.	TRANSMISSION PAR UN CABLE ELECTRIQUE	3
III.	TRANSMISSION PAR VOIE HERTZIENNE : MODULATION D'AMPLITUDE.....	3
A.	NECESSITE DE LA MODULATION	3
B.	PRINCIPES DE LA MODULATION D'AMPLITUDE.....	4
1.	<i>Expression de la tension modulée, $v_{mod}(t)$</i>	4
2.	<i>Représentation graphique</i>	5
3.	<i>Spectre du signal modulé, $v_{mod}(t)$</i>	5
C.	MODULATION D'AMPLITUDE PAR PRODUIT DES SIGNAUX ET AJOUT DE LA PORTEUSE	6
1.	<i>représentation graphique</i>	6
2.	<i>Spectre du signal</i>	7
D.	MODULATION PAR UN SIGNAL MODULANT DECALE	7
1.	<i>Cas général – Pratique</i>	9
E.	PUISSANCE VEHICULEE PAR UN SIGNAL (MODULE EN AMPLITUDE).....	9
F.	PRESENTATION EXPERIMENTALE DE LA MODULATION D'AMPLITUDE	10
1.	<i>Matériel pour l'émission en modulation d'amplitude</i>	10
2.	<i>Observation des signaux</i>	13
3.	<i>Visualisation du spectre</i>	14
G.	DEMODULATION	15
1.	<i>Définition</i>	15
2.	<i>Dispositif expérimental de réception</i>	15
3.	<i>Démodulation par diode</i>	15
4.	<i>Démodulation synchrone</i>	18
5.	<i>Filtre RC</i>	19
IV.	CONCLUSION	20
V.	ANNEXE 1 : RÉSISTANCE NÉGATIVE.....	22
VI.	ANNEXE 2 : CIRCUITS.....	24

TRANSMISSION / RECEPTION D'UN SIGNAL SONORE PAR MODULATION/DEMODULATION D'AMPLITUDE

Voir également les cours et montages :

- Acoustique
- Modulation d'amplitude, diode, transistor, AOp

I. INTRODUCTION

La transmission et la réception d'un signal sonore peuvent être réalisées de différentes façons, en fonction des conditions de production du signal, de la distance à parcourir entre « émetteur » et « récepteur », du nombre et de la densité de récepteurs, des moyens dont on dispose...etc.

A. PAR VOIE AERIENNE

On utilise alors microphones et haut-parleurs (cf. concerts et autres meetings).

Intérêt : peu coûteux, permet d'atteindre un grand nombre de « récepteurs » (auditeurs)

Inconvénients : un seul « signal » transmis. Puissances importantes parfois nécessaires, pour des portées malgré tout limitées. Nuisances pour les voisins, confidentialité exclue...

B. PAR CABLE ELECTRIQUE (COAXIAL, « PAIRE DE FIL » TELEPHONE)

Le signal acoustique est transformé en signal électrique par un microphone puis, après transmission sous forme d'un signal électrique, restitué par un haut-parleur.

Intérêt : Transmission à longue distance, puissance limitée.

Inconvénients : Un seul récepteur, fixe. Les pertes en lignes nécessitent d'amplifier le signal électrique à intervalles réguliers. Les techniques simples (analogiques) ne permettent de transmettre qu'un seul signal par fil, sinon il faut employer des techniques plus sophistiquées (multiplexage temporel, numérisation) pour transmettre plusieurs signaux simultanément sur une même bande de fréquence. Confidentialité limitée.

C. PAR FIBRE OPTIQUE

Le signal acoustique module le flux lumineux émis par une diode (LED ou diode laser). Le flux lumineux modulé est alors transmis via une fibre optique vers le récepteur.

Intérêt :

- Transmission à longue distance, puissance faible.
- Pertes en ligne faibles.
- Possibilité de transmettre plusieurs signaux simultanément, en analogique et en numérique. Insensible aux perturbations électriques et électromagnétiques / pas de générations de parasites électriques et électromagnétiques.
- Confidentialité optimale par rapport aux autres méthodes de transmission.

Inconvénients :

- Malgré les faibles pertes en ligne, il est nécessaire de placer des répéteurs (amplificateurs) (≈ 100 km).
- Un seul récepteur fixe.

D. PAR VOIE HERTZIENNE

Le signal acoustique à transmettre module (l'amplitude ou la fréquence ou la phase) une onde porteuse à haute fréquence.

Intérêt :

- Possibilité de transmettre plusieurs signaux simultanément (porteuses). Le nombre de canaux disponible augmente avec la fréquence de porteuse.
- Puissance limitée (par rapport à la voie aérienne acoustique).
- Possibilité d'être capté par une infinité de récepteurs (dans la zone d'émission), fixes ou mobiles.
- Transmissions à grandes distances possible sur terre (radio amateurs) ou dans l'espace (satellites, sondes).

Inconvénients :

- Nécessité d'une antenne (émission, réception).
- Zone d'émission limitée ou puissances élevées ou émetteurs/récepteurs sophistiqués.
- Sensible aux perturbations électromagnétiques.
- Pas de confidentialité.

II. TRANSMISSION PAR UN CABLE ELECTRIQUE

(voir également les montages d'acoustique)

Matériel :

- GBF, sortie 10 V- 50 Ω
- AOp, adaptation d'impédance (pas indispensable)
- Haut-parleur
- Câble coaxial, BNC basse tension.

On peut remplacer le GBF par un microphone (mais le signal en sortie de micro est très faible). On peut utiliser un diapason pour produire un son qui sera capté par le microphone. On peut placer un oscilloscope en parallèle avec le HP pour visualiser simultanément le signal acoustique et le signal délivré par le GBF, si possible à la même fréquence.

III. TRANSMISSION PAR VOIE HERTZIENNE : MODULATION D'AMPLITUDE

A. NECESSITE DE LA MODULATION

La transmission directe d'un signal sonore n'est possible que sur des distances très courtes [m-km]. Elle nécessite pourtant des puissances d'émetteur relativement importantes et crée des nuisances sonores dans l'entourage immédiat. Il est cependant possible de transformer les ondes acoustiques en signaux électriques puis en ondes électromagnétiques (O.E.M.) par l'intermédiaire de transducteurs type microphone / haut parleur et à l'aide d'antennes émettrice/réceptrice. Les signaux électromagnétiques produits sont alors dans la gamme [20 Hz – 20 kHz] qui est la gamme la plus large des sons audibles par une personne à l'oreille exercée. On rencontre alors un problème concernant l'émission d'O.E.M. dans cette bande de fréquence :

1. La puissance rayonnée (dipôle de Hertz) est proportionnelle à $(\omega)^2$ (puissance moyenne). Il est donc plus intéressant d'utiliser les hautes et très hautes fréquences.

2. Les antennes « émettent » dans de bonnes conditions lorsque leur longueur est égale à $\lambda/2$ ou $\lambda/4$ (régime stationnaire résonnant). Or les O.E.M. se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière, $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

$$\lambda = c/f \quad \begin{array}{ll} \text{si } f = 300 \text{ Hz} & \lambda \approx 10^6 \text{ m} \\ \text{si } f = 15 \text{ kHz} & \lambda \approx 2 \times 10^4 \text{ m} \end{array}$$

L'antenne doit donc être longue de 5 à 150 km, pour travailler dans des conditions optimales ! On conçoit que cela n'est pas réalisable pratiquement....

Si le signal émis est à la fréquence de 1 MHz, alors $\lambda/4 \approx 75 \text{ m}$, ce qui est une longueur acceptable et techniquement réalisable¹. L'idée est donc d'utiliser un signal porteur (l'onde « porteuse ») à haute fréquence (H.F.), qui va contenir l'essentiel de l'énergie. Ce signal est alors modulé par l'information acoustique à basse fréquence (B.F.) qui est « transportée » par l'onde H.F.. Plus la porteuse est à haute fréquence, moins cela « coûte » en énergie et, de surcroît, les « bandes » disponibles (ou canaux) sont d'autant plus nombreuses que l'onde est à haute fréquence. La modulation peut, bien sur, être réalisée avec un signal complexe présentant un spectre de fréquence très large (son d'un instrument, par exemple).

On propose donc dans ce cours d'étudier les conditions de production d'un signal modulé ainsi que les conditions de sa réception et de sa restitution.

On étudiera dans ce chapitre différents moyens de réaliser la modulation d'amplitude d'une onde « porteuse » (H.F.) par un signal modulant (B.F.).

B. PRINCIPES DE LA MODULATION D'AMPLITUDE

1. Expression de la tension modulée, $v_{\text{mod}}(t)$

L'onde porteuse est une simple sinusoïde décrite par : $v_p(t) = V_0 \cos(\omega_p t)$

Avec : $\omega_p = \text{pulsation de la porteuse ; constante}$ $\omega_p = 2\pi f_p$
 $f_p = \text{fréquence de la porteuse ; constante}$

La tension du signal modulant est décrite par : $v_s(t) = V_m \cos(\omega t)$

Pour une première explication le signal modulant ne contient qu'une seule fréquence f_m , mais il faut savoir que pour les signaux « réels », ω est une variable qui permet de décrire le spectre du son à transmettre et $v_s(t)$ est une somme de signaux sinusoïdaux (cf décomposition de Fourier en acoustique). On traitera ici le cas simple d'un signal (son) purement sinusoïdal.

Avec : $\omega = \omega_m = \text{constante}$ $\omega_m = 2\pi f_m$

Si le signal modulé est réalisé par le produit des deux signaux (porteuse x modulante), alors :

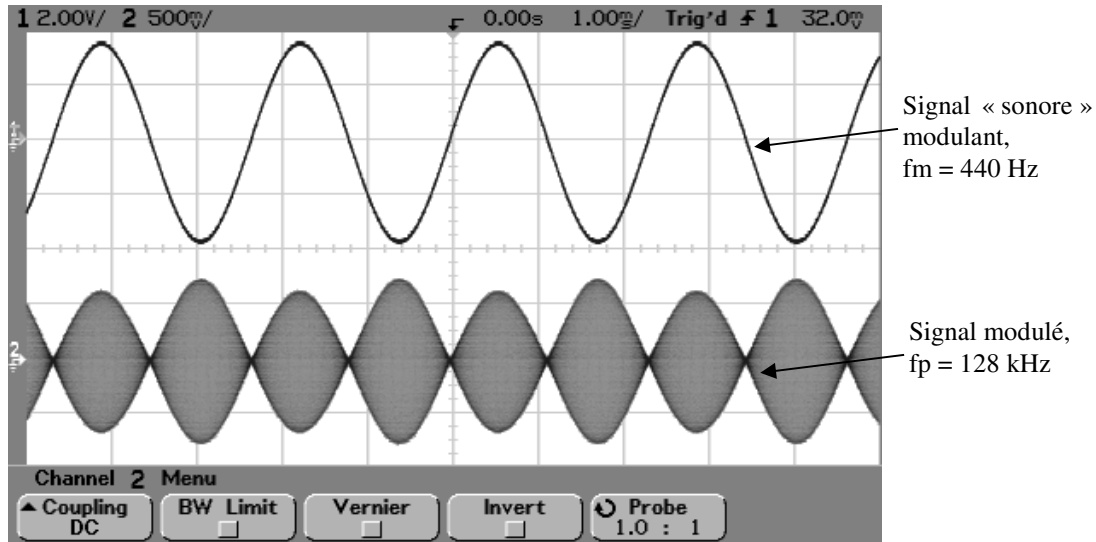
$$v_{\text{mod}}(t) = K V_0 V_m \cos(\omega_p t) \cos(\omega_m t) \quad (1a)$$

On notera par la suite : $V_{\text{mod}}^m = K V_0 V_m$ avec $[K] = V^{-1}$

¹ Pour plus d'information sur une antenne en service voir par exemple la page web consacré à Allouis, commune du Cher qui « héberge » l'antenne de France Inter G.O., antenne qui mesure 350 m de haut avec un émetteur de 1000 kW.
<http://perso.wanadoo.fr/tvignaud/am/allouis/fr-allouis.htm>

Les valeurs de $v_{\text{mod}}(t)$ sont comprises entre $-V_{\text{mod}}$ et $+V_{\text{mod}}$
On voit que cette tension est modulée à deux fréquences f_p et f_m .

2. Représentation graphique



On voit que la porteuse présente une modulation lente de son amplitude, qui passe de $\pm V_{\text{mod}}$ à 0. Lorsque $v_{\text{mod}}(t)$ s'annule périodiquement, on dit alors que le taux de modulation est égal ou supérieur à 100%.

Le signal a la même allure qu'une figure de battement, mais attention :

- Les **battements** se produisent lors du **couplage** de deux oscillateurs de fréquences proches. C'est une *somme* d'amplitudes.
- La **modulation** fait intervenir le *produit* de deux signaux de fréquences très éloignées.

3. Spectre du signal modulé, $v_{\text{mod}}(t)$.

a) Définition

Lorsque l'on reporte sur un diagramme l'amplitude des différentes composantes d'un signal en fonction de leur fréquence, on trace alors le spectre du signal. Ce spectre peut être obtenu par décomposition en série de Fourier (discret) ou par Transformation de Fourier (continu)².

b) Décomposition

Décomposition du signal simple,

$$v_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}}^m \cos(\omega_p t) \cos(\omega_m t)$$

$$v_{\text{mod}}(t) = \frac{1}{2} V_{\text{mod}}^m [\cos(\omega_p + \omega_m)t + \cos(\omega_p - \omega_m)t] \quad (1b)$$

Il apparaît donc deux composantes aux pulsations :

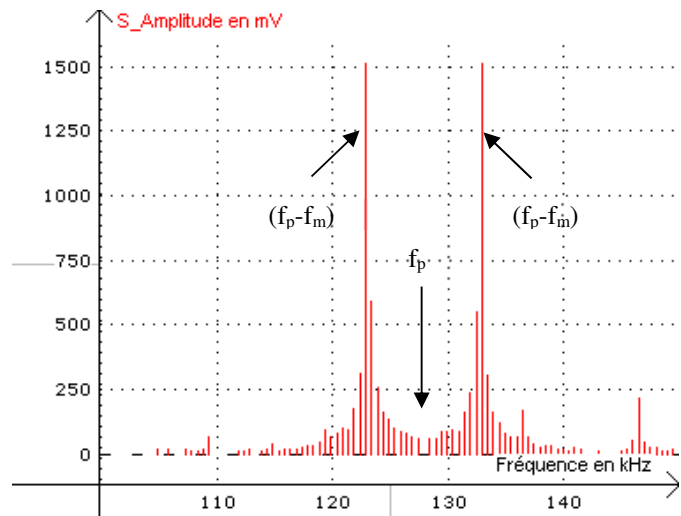
$$(\omega_p + \omega_m) \quad \text{et} \quad (\omega_p - \omega_m)$$

² Voir le montage M25 »Filtrage et analyse harmonique » Pour la TF voir le poly sur : <http://arche.uhp-nancy.fr/course/view.php?id=446>

C'est à dire aux fréquences :

$$(f_p + f_m) \quad \text{et} \quad (f_p - f_m)$$

On remarque que la fréquence de la porteuse n'apparaît pas dans le spectre. C'est un inconvénient car on ne peut pas prédéterminer la fréquence pour laquelle on doit accorder le récepteur. Il faudra donc trouver une solution technique pour faire apparaître la porteuse dans ce spectre. Nous allons voir deux techniques simples permettant de faire apparaître la porteuse dans le spectre.



C. MODULATION D'AMPLITUDE PAR PRODUIT DES SIGNAUX ET AJOUT DE LA PORTEUSE

Rappel :
$$v_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}}^m \cos(\omega_p t) \cos(\omega_m t) = \frac{1}{2} V_{\text{mod}}^m [\cos(\omega_p + \omega_m)t + \cos(\omega_p - \omega_m)t]$$

Si on ajoute la porteuse après multiplication des signaux, $v_{\text{mod}}(t)$ devient :

$$\begin{aligned} v_{\text{mod}}(t) &= K V_0 V_m \cos(\omega_p t) \cos(\omega_m t) + V_0 \cos(\omega_p t) \\ &= V_0 \cos(\omega_p t) [1 + K V_m \cos(\omega_m t)] \end{aligned}$$

On pose $m = K V_m$ où m est défini comme le taux de modulation du signal modulé.

$$v_{\text{mod}}(t) = \{V_0 [1 + m \cos(\omega_m t)]\} \cos(\omega_p t) \quad (2a)$$

Le terme $\{V_0 [1 + m \cos(\omega_m t)]\}$ correspond à l'amplitude, variable, de l'onde porteuse de pulsation ω_p .

1. représentation graphique

On voit que l'amplitude de $v_{\text{mod}}(t)$ est comprise entre $\pm (V_0 [1+m])$ et qu'elle présente une modulation de période $T_m = 1/f_m \gg T_0$.

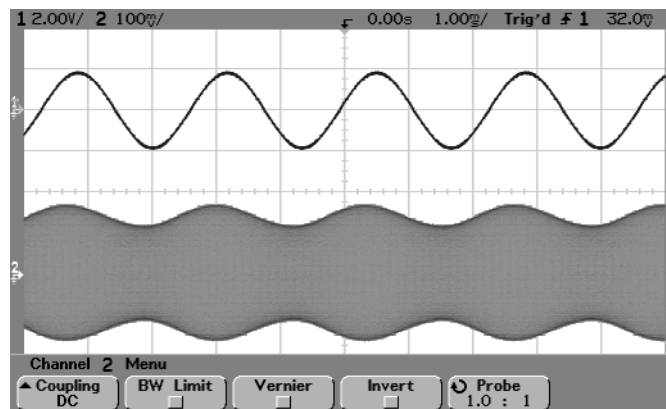
L'amplitude (crête à crête) du signal est comprise entre :

$$\begin{aligned} A^+ &= 2 V_0 [1+m] \quad \text{et} \quad A^- = 2 V_0 [1-m] \\ (A^+) + (A^-) &= 4 V_0 \quad \text{et} \quad (A^+) - (A^-) = 4 m V_0 \end{aligned}$$

$$\text{d'où} \quad m = \frac{(A^+) - (A^-)}{(A^+) + (A^-)} \quad (2c)$$

On pourra exprimer m en %.

Rappel : $m = K V_m$ avec $[K] = V^{-1}$ donc m est sans dimension.



- Si $m < 1$, l'enveloppe n'atteint pas la valeur 0 : la période T_m est bien celle de la modulante.
- Si $m = 1$, l'enveloppe passe par 0 en un point par période.
- Si $m > 1$, il se produit le phénomène de surmodulation. Il y a perte d'information et la période T_m du signal peut être divisée par 2 pour une valeur particulière de m .

2. Spectre du signal

$$v_{\text{mod}}(t) = \frac{1}{2} V_{\text{mod}}^m [\cos(\omega_p + \omega_m)t + \cos(\omega_p - \omega_m)t] + V_0 \cos(\omega_p t)$$

Il apparaît donc trois composantes aux pulsations :

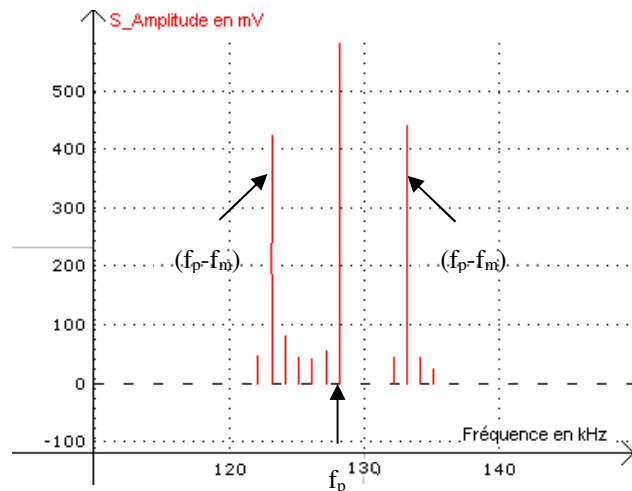
$$(\omega_p + \omega_m), \omega_p \text{ et } (\omega_p - \omega_m)$$

C'est à dire aux fréquences :

$$(f_p + f_m), f_p \text{ et } (f_p - f_m)$$

On remarque que la fréquence de la porteuse apparaît bien dans le spectre.

On peut alors accorder le récepteur sur la fréquence de porteuse et réceptionner de façon simple le signal modulé.



D. MODULATION PAR UN SIGNAL MODULANT DECALE

Si : $v_s(t) = V_m \cos(\omega_m t) + V_d$

Avec V_d une tension continue, on observe un décalage de la tension modulante par rapport à la masse ($V = 0$).

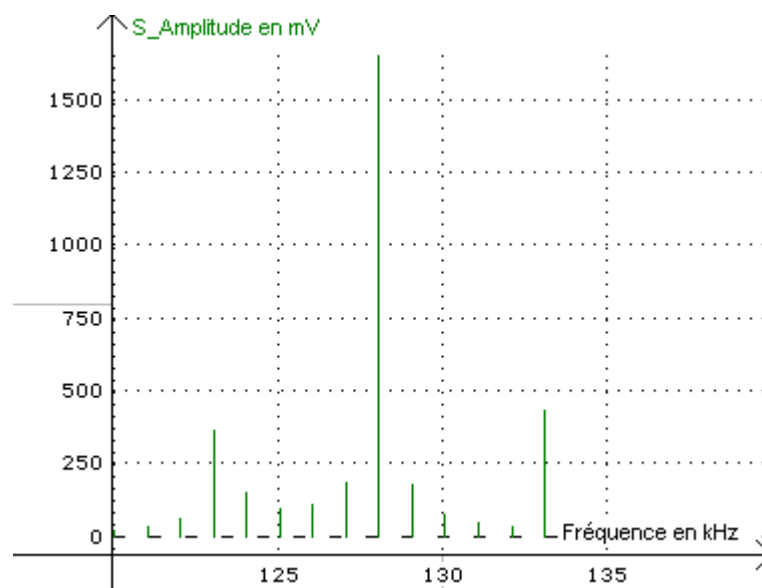
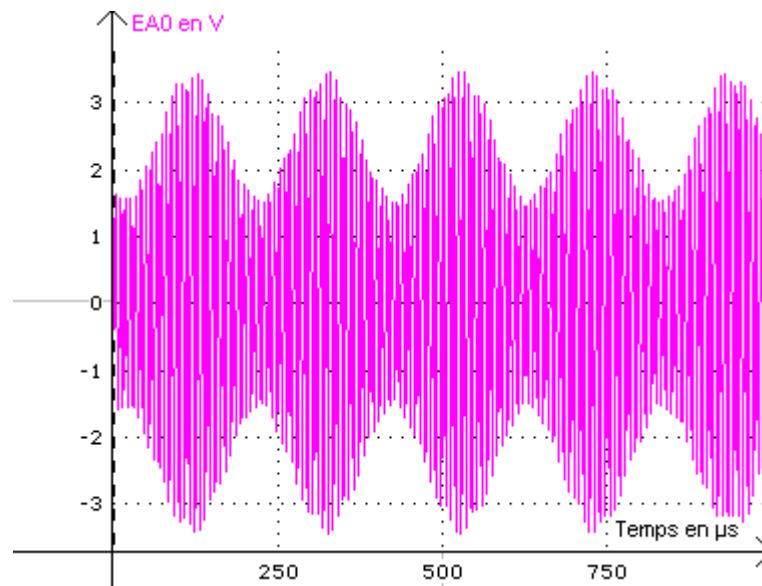
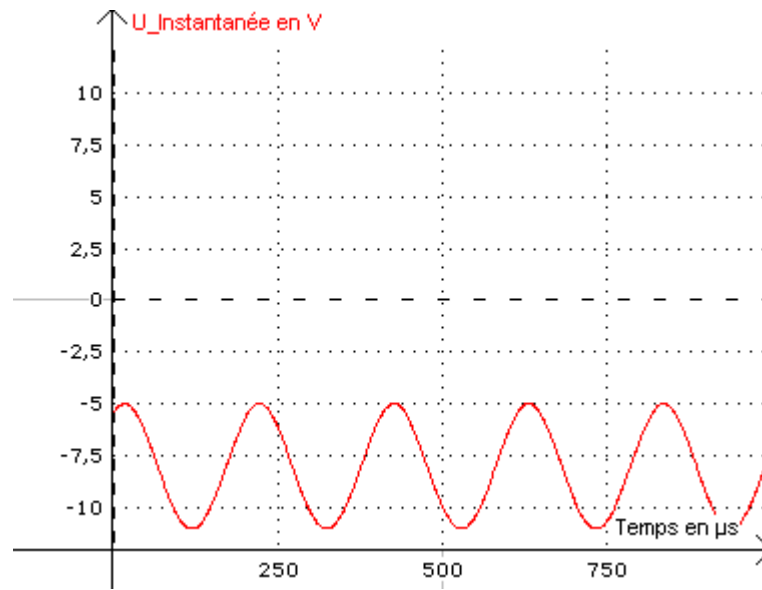
Le produit des signaux donne alors :

$$\begin{aligned} v_{\text{mod}}(t) &= K V_0 \cos(\omega_p t) \{ V_m \cos(\omega_m t) + V_d \} \\ &= \{ K V_0 V_d [1 + \frac{V_m}{V_d} \cos(\omega_m t)] \} \cos(\omega_p t) \end{aligned}$$

On pose $m = \frac{V_m}{V_d}$ où m est défini comme le taux de modulation du signal modulé.

$$v_{\text{mod}}(t) = \{ K V_0 V_d [1 + m \cos(\omega_m t)] \} \cos(\omega_p t) \quad (2b)$$

Le terme $\{ K V_0 V_d [1 + m \cos(\omega_m t)] \}$ correspond à l'amplitude, variable, de l'onde porteuse de pulsation ω_p .



1. Cas général – Pratique

On transmet, en radio, non pas une seule fréquence, mais une bande de fréquence (avec une porteuse donnée, cf § II-B-3). On parle alors de :

- Bande Latérale Inférieure (BLI)
- Bande Latérale Supérieure (BLS)

Ou bien encore de Bande Latérale Unique (BLU) lorsque l'une des deux bandes (BLI ou BLS) est filtrée afin de réduire la largeur occupée.

Nous n'avons travaillé qu'avec une seule fréquence de modulante, ce qui correspond à un son pur ($f_m = 440$ Hz, par exemple). Il est évident que la voix humaine, et à fortiori un « élément » musical est plus riche en fréquences et présente donc un spectre $[f_m^- ; f_m^+]$ plus large et plus complexe qu'un simple signal sinusoïdal.

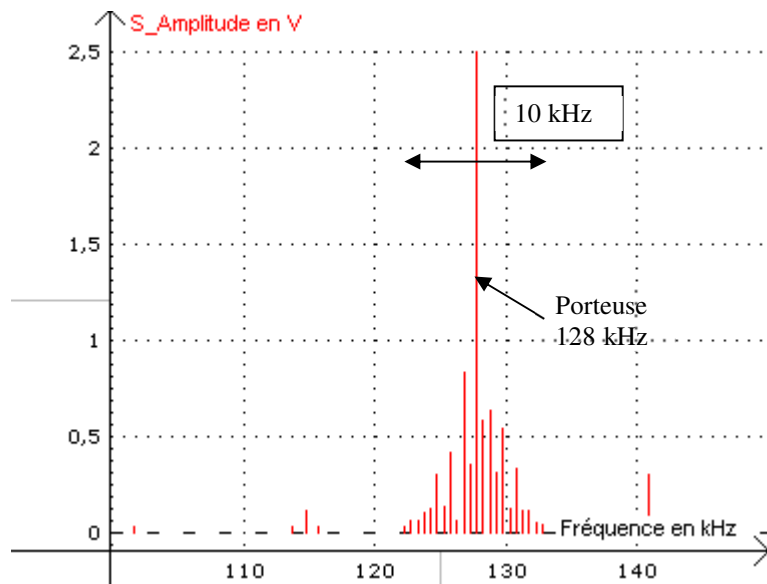
Le spectre du signal modulé est constitué de la porteuse et des bandes, continues:

$$\begin{aligned} \text{BLI :} & \quad [f_p + f_m^+ ; f_p - f_m^-] \\ \text{BLS :} & \quad [f_p + f_m^- ; f_p + f_m^+] \end{aligned}$$

La bande réservée à la porteuse de fréquence f_p à donc pour largeur $2 f_m^+$ et est centrée sur f_p : on dispose d'un « canal ».

Les canaux devraient, en théorie, être séparés de $2 f_m^+$ soit 40 kHz, si les sons les plus aigus étaient transmis.

En pratique, en AM, on limite la bande passante à 10 kHz par canal, ce qui permet d'obtenir une qualité de son satisfaisante et de « libérer » de la place pour disposer d'un plus grand nombre de canaux.



E. PUISSANCE VEHICULEE PAR UN SIGNAL (MODULE EN AMPLITUDE).

$p(t)$ est la puissance dépensée dans une charge R_u .

$$p(t) = \frac{(v_{\text{mod}}(t))^2}{R_u}$$

$$p(t) = \frac{1}{R_u} (V_0)^2 \cos^2(\omega_p t) [1 + m \cos(\omega_m t)]^2$$

Les variations de puissance liées au terme $\cos^2(\omega_p t)$ sont très rapides et les capteurs utilisés ne sont donc sensibles qu'à la puissance moyenne.

$$\langle p_{\text{mod}} \rangle = \frac{\langle (v_{\text{mod}}(t))^2 \rangle}{R_u} = \frac{V_0^2}{R_u} \left[1 + \frac{m^2}{2} \right]$$

$$\langle p_{\text{mod}} \rangle = 2\langle p_{\text{porteuse}} \rangle + \langle p_{\text{porteuse}} \rangle m^2 \quad \text{avec} \quad \langle p_{\text{porteuse}} \rangle = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{R_u}$$

L'essentiel de la puissance (active) véhiculée par l'O.E.M., en modulation d'amplitude, est localisée « dans » la porteuse. La puissance active du « signal information » (modulante) étant très faible, il faudra l'amplifier après séparation porteuse/modulante.

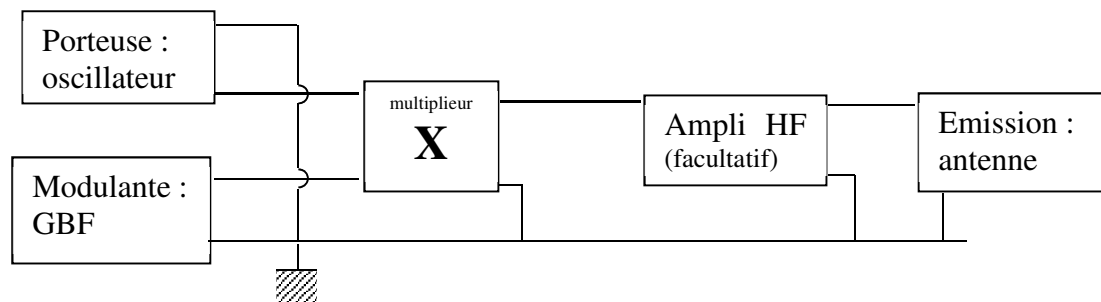
F. PRESENTATION EXPERIMENTALE DE LA MODULATION D'AMPLITUDE

1. Matériel pour l'émission en modulation d'amplitude

Les maquettes dont nous disposons sont du type type Montelec : la présentation des paragraphes suivants est basée sur ce type de maquette.

a) Schéma de bloc

On doit disposer d'un générateur pour produire le signal audio (info) à transporter (ou « modulante »), d'un générateur pour l'onde porteuse, d'un circuit réalisant le produit des signaux, éventuellement d'un amplificateur HF, et d'une antenne d'émission.



b) Réalisation d'un oscillateur

On pourra réviser le cours sur les AOp en fonction oscillateur (voir aussi annexe 2, p21)

Schéma d'un oscillateur à R négative :

Cet oscillateur permet d'obtenir une tension sinusoïdale,

$u_s(t)$ de fréquence $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Les composants utilisés sur la maquette sont :

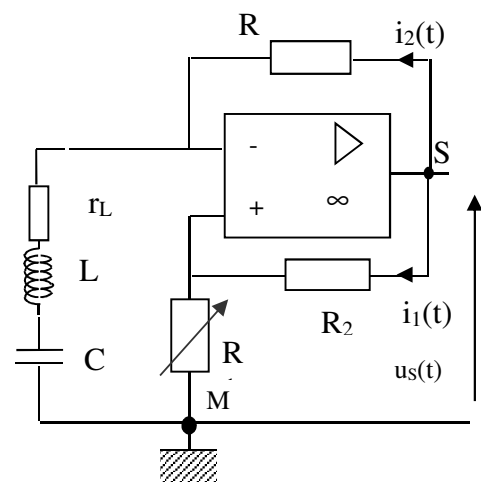
$L = 1 \text{ mH}$ $C = 1,5 \text{ nF}$ d'où :

$\omega_p = 816\,500 \text{ rd s}^{-1}$

$f_p = 130 \text{ kHz}$

Expérimentalement, on trouve :

$f_p = 128 \text{ kHz}$



On retrouve cette fréquence dans les exemples précédents de spectre pour lesquels la porteuse est présente.

c) Utilisation d'un circuit multiplieur

Ce circuit est destiné à réaliser le produit de la porteuse par le signal modulant (signal audio).

Porteuse : $v_p(t) = V_0 \cos(\omega_p t)$

Modulante :

(signal) $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$

$V_0 =$ Volts

$f_p =$ 130 kHz

$V_m =$ 2 V (environ)

$f_m =$ 440 Hz (son) ou qlq kHz (FFT)

$$v_{\text{mod}}(t) = \{V_0 [1 + m \cos(\omega_m t)]\} \cos(\omega_p t) \quad \text{Produit + ajout porteuse}$$

Avec $m = K V_m$. K est un coefficient multiplicateur (voir §d) ci-dessous)

$$\text{Ou bien } v_{\text{mod}}(t) = \{K V_0 V_d [1 + m \cos(\omega_m t)]\} \cos(\omega_p t)$$

Produit de la porteuse par une tension décalée : $v_m^*(t) = V_m \cos(\omega_m t) + V_d$

V_d tension de décalage environ 2 V, continu. et $m = \frac{V_m}{V_d}$

Attention : Utiliser l'oscilloscope ou un multimètre de bande passante connue pour réaliser les mesures de tension.

d) Description du circuit AD633JN (multiplieur-additionneur)

Le circuit permet de réaliser l'opération suivante :

$$S = K(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) + Z$$

Avec :

X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z les valeurs instantanées des tensions appliquées à ces entrées.

K un coefficient tel que : $K=0,1 \text{ V}^{-1}$

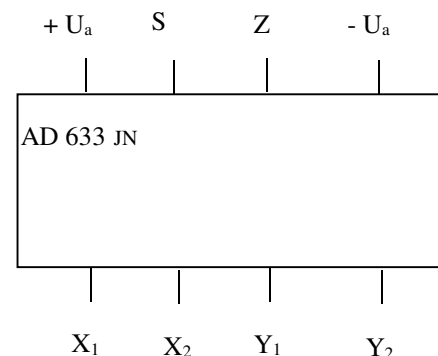
S est la valeur instantanée de la tension de sortie du circuit.

e) Antenne³

C'est un fil de cuivre isolé électriquement par un vernis. Ce fil est parcouru par un courant $i(t) \sim v_{\text{mod}}(t)$ variable : les charges électriques (e^-) subissent des variations d'accélération et génèrent alors des ondes électromagnétiques.

Remarque :

- Si le fil d'antenne n'est pas en $\lambda/4$: l'émission n'est pas optimisée
- L'émission d'ondes électromagnétiques est strictement réglementée : il est important de ne pas perturber les autres signaux $\rightarrow$ puissance limitée



³ Voir par exemple : Electronique, 2^{ème} année, Thierry GERVAIS, Vuibert, 2003, Chapitre 9 p215

- Dans la maquette, l'antenne est le bobinage du L d'un circuit LC.

f) Matériel et utilisation de la maquette « Montelec »

La maquette⁴ est composée de trois modules alimentés en ± 15 V, si nécessaire.

- Module générateur de porteuse (oscillateur à R < 0 ou multivibrateur astable). Ce module fait partie d'une maquette sur laquelle on trouve également un ampli-BF (utilisation d'un microphone) et un suiveur en sortie de l'oscillateur.
- Module multiplieur
- Module émetteur : LC série

+ un GBF pour le signal modulant.

Attention :

- ces modules comportent des circuits intégrés (AOp, ...etc) qui nécessitent d'être alimentés en (+15 V ; -15 V)
- lorsque que l'on réalise le montage il faut penser à réserver une « ligne de masse » sur laquelle on connectera **toutes les masses** : des modules, des alimentations, des appareils de mesure.

Schéma d'ensemble de la chaîne d'émission :

⁴ Photos et schémas de la maquette sont présentés en annexe, p 23

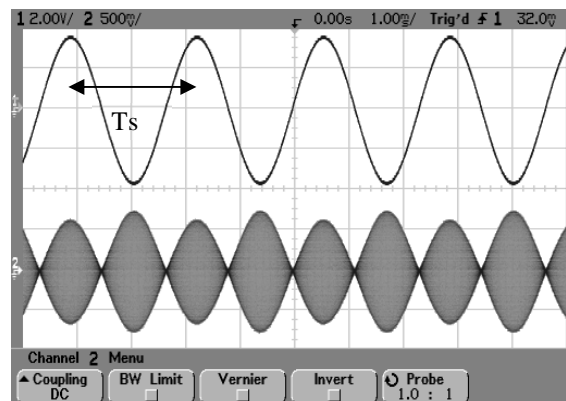
2. Observation des signaux

On peut utiliser un Haut Parleur pour mettre en évidence le signal audio : dans ce cas, on connecte un ampli audio en sortie du GBF, afin de ne pas atténuer sa tension de sortie, puis on connecte le HP en sortie de l'ampli audio. Le signal électrique modulant est appliqué à l'entrée du circuit multiplieur. **Penser à connecter l'entrée Z (additionneuse) du circuit multiplieur :**

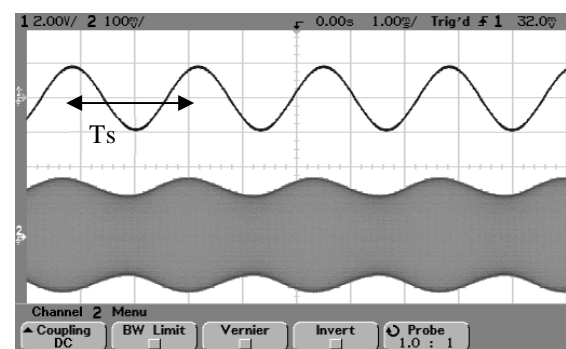
- Soit **à la masse**, pour montrer le signal modulé par simple produit des signaux **ou si on superpose à la modulante une tension continue** pour réaliser la modulation d'amplitude.
- Soit **sur la porteuse**, pour montrer le signal modulé par produit des signaux et ajout de la porteuse.

La figure ci contre présente les signaux enregistrés à l'aide d'un oscilloscope à mémoire :

- sur la voie 1 : le signal audio délivré par le GBF (440 Hz)
- en voie 2 : le signal modulé par simple produit des signaux



- sur la voie 1 : le signal audio délivré par le GBF (440 Hz)
- en voie 2 : le signal modulé par produit des signaux et ajout de la porteuse.



Le signal de la voie 2 est pris en sortie du multiplieur.

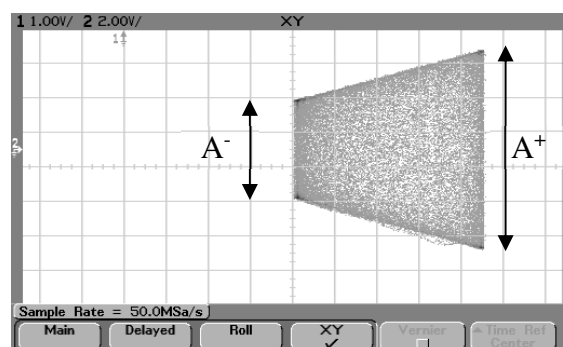
Mise en évidence du taux de modulation -m- :

Signal modulant en voie 1 : $V_s^m =$

Signal modulé en voie 2 : $V_{mod}^m =$
(en sortie du multiplieur)

On visualise sur un oscilloscope en fonction du temps ou en mode X-Y (méthode du trapèze).

On peut mesurer expérimentalement le taux de modulation m :

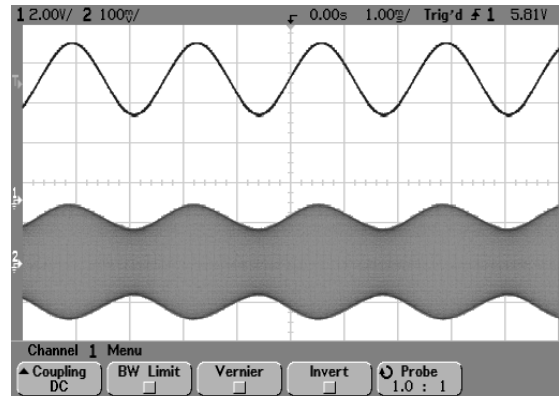
$$m = \frac{A^+ - A^-}{A^+ + A^-}$$


Options de travail :

- Rappel : on peut moduler soit en ajoutant la porteuse sur l'entrée Z du multiplieur soit en injectant un signal modulant « décalé » (continu+alternatif) sur l'entrée X ou Y du multiplieur. Dans ce cas il faut mettre l'entrée Z à la masse.
- On peut utiliser un second GBF pour générer la porteuse, ce qui permet d'avoir une plus grande latitude sur la fréquence f_p et sur l'amplitude de la porteuse.

Modulation par produit des signaux avec un signal audio décalé (continu + alternatif).

- sur la voie 1 : le signal audio délivré par le GBF (440 Hz). La tension continue est de l'ordre de 6 V.
- en voie 2 : le signal modulé par produit des signaux.



L'utilisation d'un GBF pour produire le signal modulant permet également d'ajouter une tension continue V_d grâce à l'offset du GBF. Cette technique est intéressante aussi du fait de l'expression du coefficient $m = \frac{V_m}{V_d}$. On pourra modifier le taux de modulation en jouant sur V_m et sur V_d : l'amplitude du signal sera donc plus facilement ajustable.

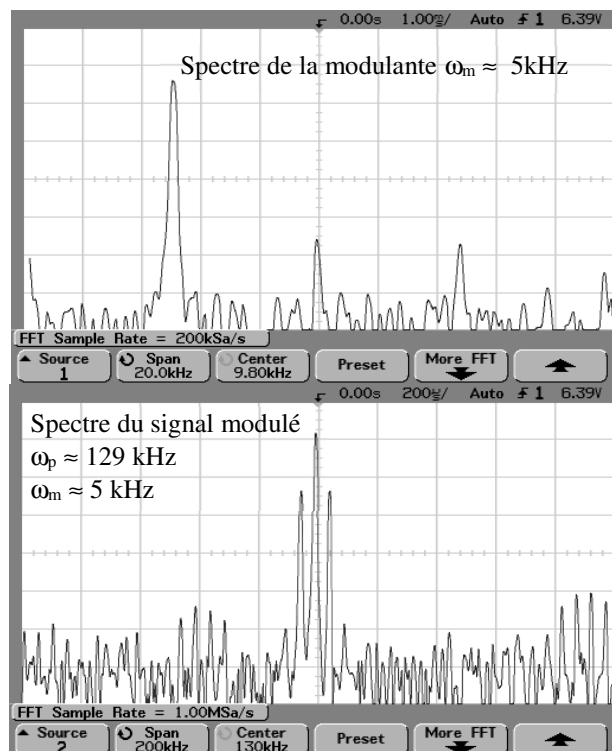
3. Visualisation du spectre

a) Avec l'oscilloscope

Certains oscilloscopes numériques possèdent une fonction FFT (Fast Fourier Transform) qui permet de calculer et d'afficher la transformée de Fourier du signal d'entrée i.e. le spectre des fréquences présentes dans ce signal. Sur l'oscilloscope « Agilent xxxx » utilisé en TP, on trouve cette fonction dans la partie « vertical » de la façade, bouton « math », menu / FFT / settings / source (1 ou 2) /

Il faut alors choisir le centre de la bande de fréquence (sous-menu / centre), la largeur de la bande de fréquence (sous-menu / span) et la base de temps (échantillonnage) pour afficher correctement le signal. Il faudra être vigilant à ne pas échantillonner le signal à une fréquence inférieure à $2f_p$ (théorème de Shannon).

Remarque : le choix de $f_m = 5$ kHz permet de séparer dans le spectre les pics à $(f_p - f_m)$, f_p , $(f_p + f_m)$



b) Avec une carte d'acquisition ESAO

La bande passante de cette carte est trop réduite (environ 10kHz) pour pouvoir analyser un signal HF à 130 kHz.

c) Avec Latis pro + Sysam SP5

On utilisera le système d'acquisition comme un oscilloscope (et en parallèle avec un oscilloscope). La bande passante de carte permet de travailler dans de bonnes conditions, et la fonction FFT (calcul) permet d'obtenir des spectres d'assez bonne qualité.

En résumé. On s'attachera dans cette partie à :

- produire les signaux porteuse (f_p) et modulante (f_m)
- Faire la démonstration que le signal de la modulante correspond bien à un son, en utilisant un amplificateur audio suivi d'un haut parleur. Faire varier f_m .
- Réaliser le produit des signaux (tension décalée)
- Connecter correctement l'antenne : LC série.

G. DEMODULATION

1. Définition

C'est le processus qui consiste à éliminer la porteuse du signal modulé réceptionné par l'antenne et à restituer le signal information (acoustique ou autre) contenu dans la modulante.

2. Dispositif expérimental de réception

Antenne réceptrice : fil métallique (cuivre ou autre conducteur). Dans le montage didactique, elle est placée à quelques centimètres de l'antenne émettrice.

En sortie de l'antenne, on place un circuit bouchon (anti-résonnant) pour lequel la tension à ses bornes est maximum lorsque $LC_b\omega_p^2=1$. On accorde le circuit de réception sur la fréquence de la porteuse en jouant sur la valeur de C_b (capacité en peigne) ou, dans certains montages didactiques, sur la valeur de L (en déplaçant un barreau de fer doux dans la bobine L).

Dans les maquettes utilisées, l'antenne et la bobine sont confondues en un seul circuit : l'antenne est le fil de la bobine qui constitue la partie inductive du circuit LC parallèle. Le barreau de ferrite permet d'amplifier les phénomènes d'induction.

Une fois le signal reçu par l'antenne puis filtré par le circuit bouchon, il faut séparer la modulante de la porteuse. On propose d'étudier deux techniques :

- Démodulation par diode détectrice
- Démodulation synchrone

3. Démodulation par diode

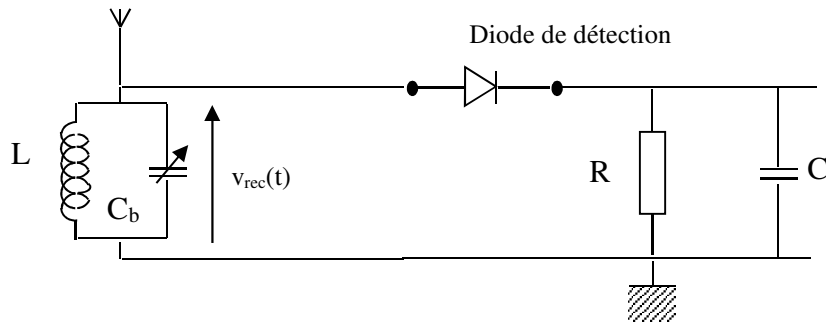
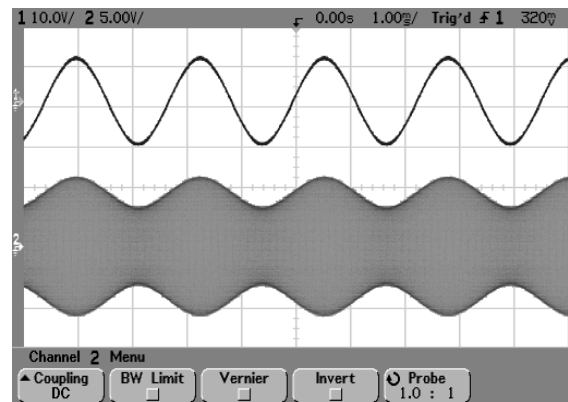


Schéma de principe de la chaîne de démodulation par diode détectrice.

Observations :

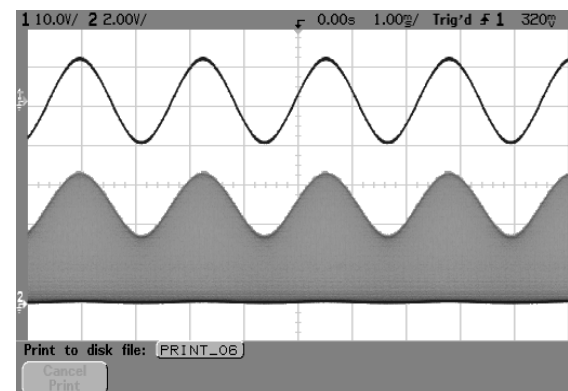
Modulation par produit des signaux avec ajout de la porteuse. Signal en sortie du module de réception :

- sur la voie 1 : le signal audio délivré par le GBF (440 Hz).
- en voie 2 : le signal modulé reçu par l'antenne, après amplification.



Signal en sortie de la diode détectrice (diode 1Nxxxx)

Seules les alternances positives sont conservées. L'enveloppe supérieure de la courbe correspond au signal audio à démoduler.



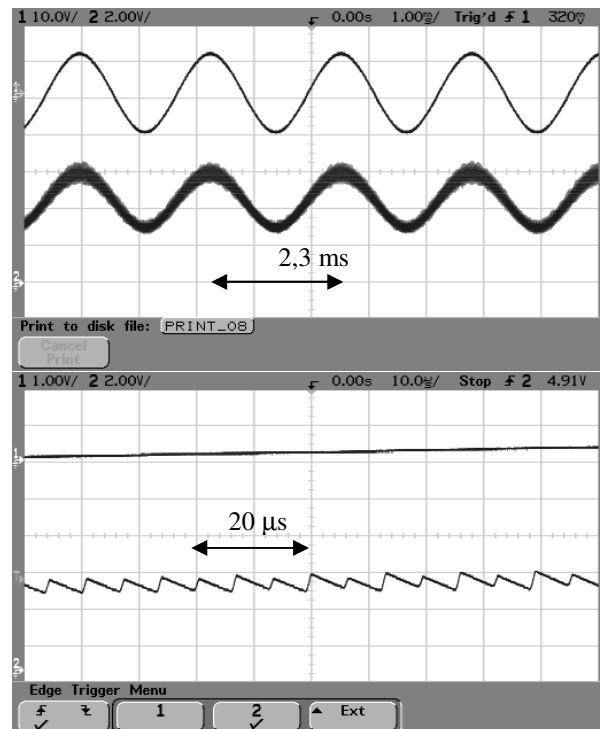
Signal aux bornes de la capacité :

On observe que le signal démodulé est à la même fréquence que le signal modulant. Il présente cependant une « épaisseur » plus importante. Ceci est dû aux cycles de décharge de la capacité, à haute fréquence.

Un filtre passe bas permettra d'éliminer la composante H.F, si nécessaire (voir §III-G-5, p19).

En résumé : on s'attachera dans cette partie à montrer les caractéristiques de la démodulation par diode détectrice, à savoir :

- la tension de seuil de la diode et sa capacité parasite.
- La constante de temps τ associée à la valeur de la capacité C et son effet sur la détection.
- La composante résiduelle à haute fréquence (f_p) dans le signal démodulé.
- Faire la démonstration que le signal démodulé correspond bien au son à transmettre, en utilisant le même amplificateur audio suivi du haut parleur. Faire varier f_s .



4. Démodulation synchrone

a) Principe

On cherche par cette méthode à obtenir un signal dans lequel se trouve une composante à la fréquence du signal modulant. On effectue donc le produit du signal reçu par une tension sinusoïdale à la fréquence de la porteuse.

$$\begin{aligned} \text{Signal reçu : } v_{\text{rec}}(t) &= \{ V_r^m [1 + m \cos(\omega_m t)] \} \cos(\omega_p t) \\ \text{ou } v_{\text{rec}}(t) &= \left\{ \frac{m}{2} V_r^m [\cos(\omega_p + \omega_m)t + \cos(\omega_p - \omega_m)t] + V_r^m \cos(\omega_p t) \right\} \\ \text{Porteuse : } v_x(t) &= V_x^m \cos(\omega_p t) \\ \text{Modulante : (signal) } v_s(t) &= V_s^m \cos(\omega_m t) \end{aligned}$$

Le produit du signal reçu par la porteuse donne :

$$\begin{aligned} S(t) &= v_{\text{rec}}(t) \cdot v_x(t) \quad \text{que l'on peut écrire :} \\ S(t) &= \left\{ \frac{m}{2} V_r^m [\cos(\omega_p + \omega_m)t + \cos(\omega_p - \omega_m)t] + V_r^m \cos(\omega_p t) \right\} \cdot V_x^m \cos(\omega_p t) \end{aligned}$$

$$S(t) = (V_x^m V_r^m \cos^2(\omega_p t)) + \left\{ \frac{m}{4} V_x^m V_r^m [\cos(2\omega_p + \omega_m)t + \cos(\omega_m t) + \cos(2\omega_p - \omega_m)t + \cos(-\omega_m t)] \right\}$$

$$S(t) = \frac{V_x^m V_r^m}{2} + \left(\frac{V_x^m V_r^m}{2} \cos(2\omega_p t) \right) + \left\{ \frac{m}{4} V_x^m V_r^m [\cos(2\omega_p + \omega_m)t + \cos(2\omega_p - \omega_m)t + 2\cos(\omega_m t)] \right\}$$

$$S(t) = V_x^m V_r^m \left\{ \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2} \cos(2\omega_p t) \right) + \left\{ \frac{m}{4} [\cos(2\omega_p + \omega_m)t + \cos(2\omega_p - \omega_m)t + 2\cos(\omega_m t)] \right\} \right\}$$

$\downarrow$
 $f=0$
 (continu)

$\downarrow$
 $2f_p$

$\downarrow$
 $2f_p + f_m$

$\downarrow$
 $2f_p - f_m$

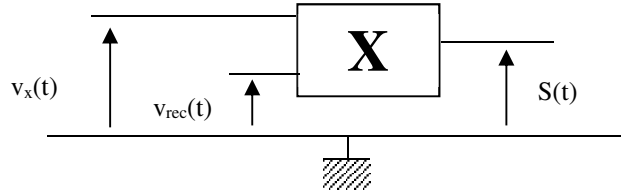
$\downarrow$

f_m

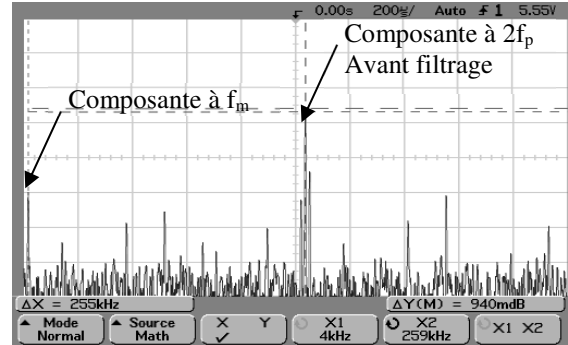
b) Réalisation

On utilisera un second circuit multiplieur, en réception cette fois, pour obtenir le signal :

$$S(t) = v_{\text{rec}}(t) \cdot v_x(t)$$



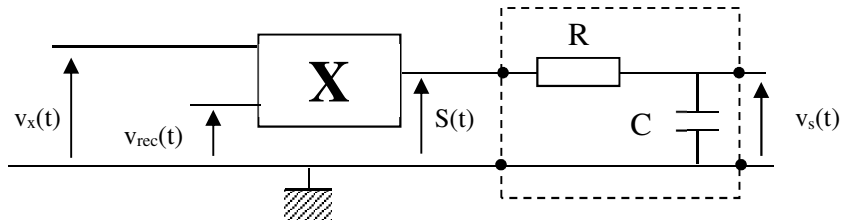
Spectre du signal $S(t)$ en sortie du multiplieur :



Le spectre du signal $s(t)$ comprenant plusieurs fréquences, on va utiliser un filtre passe-bas afin d'isoler la composante f_s , à la fréquence du signal modulant.

Remarque : on voit que de nombreux pics « parasites » apparaissent dans le spectre : ceux ci sont dus le plus souvent à la technique de la FFT. On peut jouer sur la valeur de fréquence (f_m) ou d'amplitude (f_p) pour s'assurer de la position des pics que l'on cherche.

5. Filtre RC



La fonction de transfert du filtre RC est :

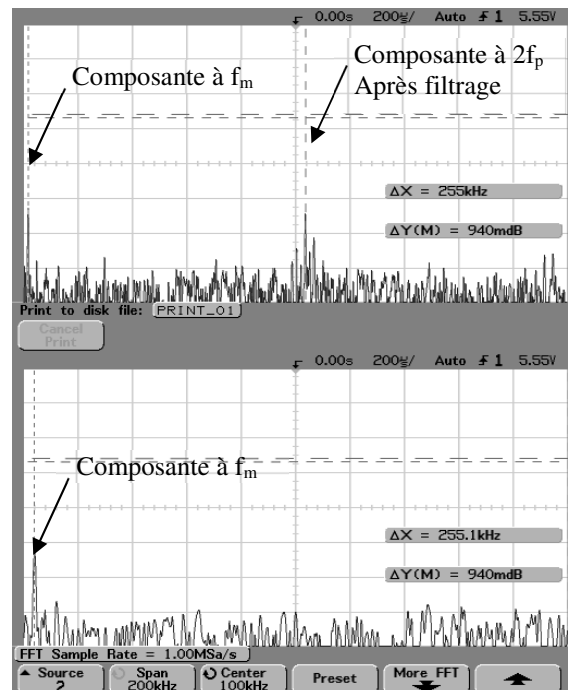
$$H(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

On choisira une pulsation de coupure ω_0 telle que $2\pi f_p \gg \omega_0 \geq 2\pi f_m$.

Si $f_m \in [20 \text{ Hz} ; 20 \text{ kHz}]$ et $f_p > 100 \text{ kHz}$ on fixe la fréquence de coupure à 20 kHz donc

$$\omega_0 = 1,25 \cdot 10^5 \text{ rd.s}^{-1}. \text{ Avec } \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

choix de $C = 10 \text{ nF}$ et $R \approx 800 \Omega$



En résumé : on s'attachera dans cette partie à montrer les caractéristiques de la démodulation synchrone, à savoir :

- La présence dans le spectre des fréquences f_m , $(2f_p - f_m)$, $2f_p$, $(2f_p + f_m)$.
- La sélection de la composante f_m , par le filtre RC.
- Faire la démonstration que le signal démodulé correspond bien au son à transmettre, en utilisant le même amplificateur audio suivi du haut parleur. Faire varier f_m .
- On fera remarquer au public que cette méthode permet de travailler avec des signaux de faible amplitude, sans tension de seuil. La détection synchrone est d'ailleurs une technique de mesure utilisée plus largement pour « extraire » un signal du bruit de fond.

IV. CONCLUSION

Il est possible de transmettre un signal acoustique à courte ou grande distance, par voie Hertzienne, à l'aide de signaux porteurs HF et d'antennes émettrices et réceptrices. Les trois variables d'une onde étant l'amplitude (A), la fréquence (f) et la phase (ϕ), on peut en principe moduler l'une de ces variables (pour la « porteuse ») par le signal à transmettre. En pratique on utilise la modulation de fréquence ou d'amplitude. Dans tous les cas, la puissance de l'émetteur et la réalisation d'une antenne « adaptée » sont deux paramètres essentiels dans la conception du circuit émetteur. On pourra facilement réaliser la M.A. à l'aide d'un circuit multiplieur et de générateurs « ad-hoc ». Le circuit récepteur comportera au moins une antenne de réception suivi d'un filtre LC // permettant de sélectionner la fréquence de porteuse grâce à une capacité variable. On pourra réaliser la démodulation :

- Soit par diode détectrice
- Soit par démodulation synchrone

La transmission des informations par voie Hertzienne est connue depuis un peu plus d'un siècle (travaux de Hertz, Branly, Popov, Ducretet,...) et bien sur depuis les transmissions « historiques » de Marconi, à travers la Manche d'abord (50 km, mars 1899) puis l'atlantique Nord (3 400 km, décembre 1901). Cependant les évolutions en parallèle, ces dernières années, de l'électronique (analogique et digitale) et des méthodes de « codage » de ces signaux ont amené de nouvelles et nombreuses applications mais aussi elles ont modifié fondamentalement les techniques de transmission d'un son ou d'une information (téléphonie IP, ADSL, TNT,...etc).

Applications : Télécommunications (professionnelles et amateurs / ondes courtes, satellites, téléphones portables,...)
 Radio commerciale (A.M., F.M.)
 Télévision (VHF / UHF, TNT, satellite, fibre optique)
 Internet sans fil (via la téléphonie portable ou des réseaux dédié, WiFi, etc)
 Transmission locales sur une large gamme d'ondes (de l'I.R. aux micro-Ondes, « blue-tooth », ...)

Références oral :

Montage : 7) Modulation d'amplitude. Démodulation.

EOD :

Bibliographie pour le concours :

- Livre de TS spécialité.
- « Montages de physique », J.P. Bellier, C. Bouloy, D. Guéant, Dunod, pp.183-206 (modulation et démodulation)
- « Physique et Chimie », TS, M. Montangerand, Chp II et III, pp115-157
-
- « Electronique, Deuxième année », Thierry Gervais, Vuibert, 2002, chp 5 p 117 (modulation)
- « Dictionnaire de Physique Expérimental, T III », D. Aubert et L. Quaranta, (Diode, détection synchrone, modulation), Eds Pierron
- « Guide pratique de l'électronique », R. Bourgeron, Hachette Technique, 1998, (diode)

Sites Web :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Radio_AM

<http://perso.orange.fr/tvignaud/am/allouis/fr-allouis.htm>

<http://dspt.club.fr/index.htm>

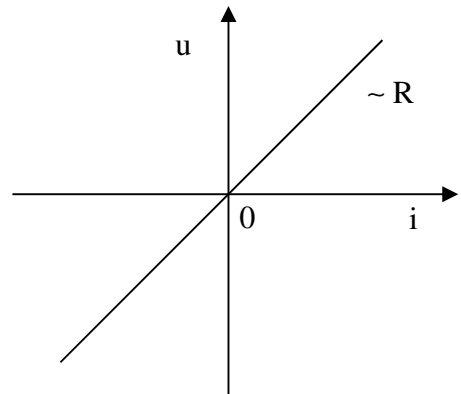
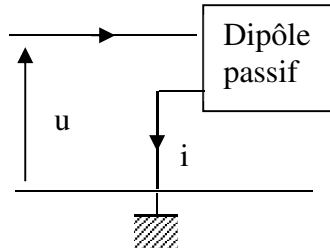
pour trouver les fréquences :

en grande ondes (AM) : <http://www.bric-a-brac.org/radio/modulation.php>

en FM : http://www.csa.fr/infos/operateurs/operateurs_radio_frequences.php

V. ANNEXE 1 : RÉSISTANCE NÉGATIVE

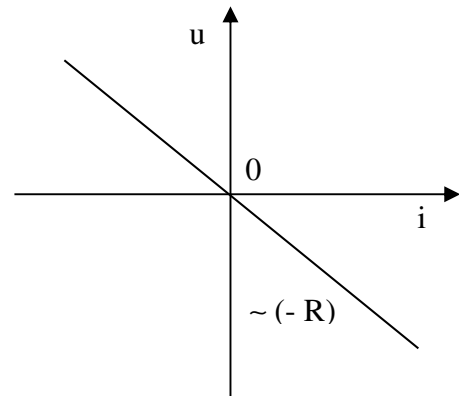
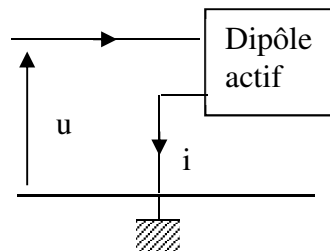
Classiquement :



On s'intéresse d'abord au cas de figure classique d'un dipôle passif résistif tel que représenté ci-dessus, en schéma électrique et par sa caractéristique courant/tension.

On cherche un dipôle actif tel que sa caractéristique soit une résistance pure et que la pente de sa caractéristique courant/tension soit négative :

Résistance < 0 :



On peut réaliser un tel dipôle en utilisant un AOp, monté de la façon suivante :

Si l'AOp est parfait : $i_+ = i_- = 0$

Donc : $i_0 = i$ et $i_2 = i_1$

$$R_1 i_1 = R_1 i_2 \quad [1]$$

$$\text{Et } R i + \varepsilon + R_2 i_2 = 0 \quad [2]$$

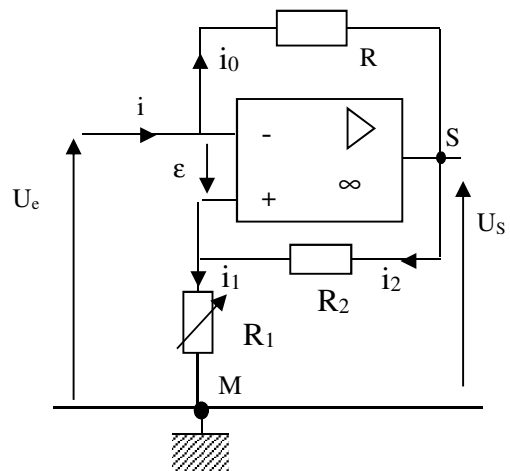
On cherche l'expression de la caractéristique $u_e = f(i)$

En fonctionnement linéaire, $\varepsilon = 0$, $u_+ = u_-$

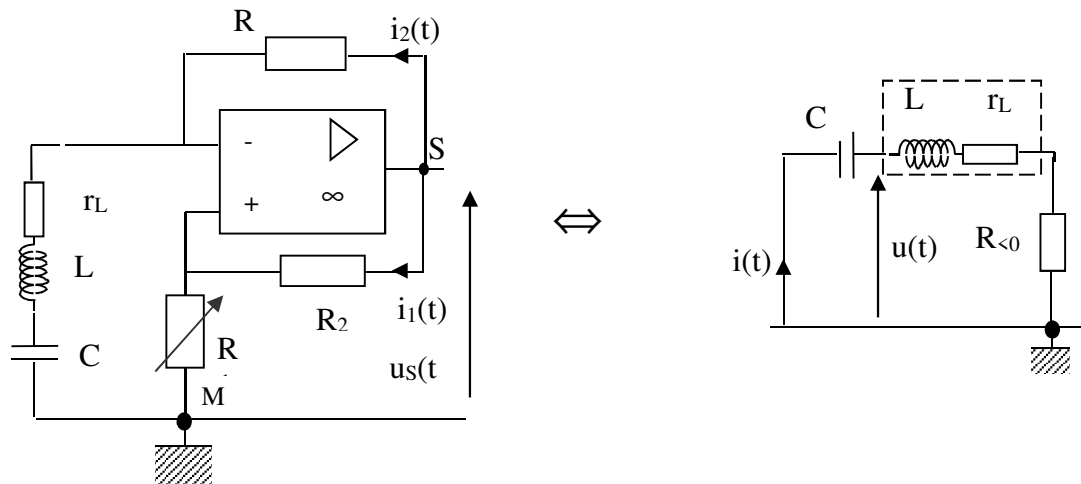
$$u_- = u_e \text{ et } u_+ = R_1 i_1 = R_1 i_2 \quad [3]$$

$$\text{d'où : } u_e = \left(-\frac{R_1}{R_2} R \right) i$$

$$\text{et } R_{<0} = - \left(\frac{R_1}{R_2} R \right)$$



Oscillateur à résistance négative



En écrivant la loi des mailles sur la maille formée par le circuit RLC, on trouve l'équation différentielle décrivant le comportement du circuit :

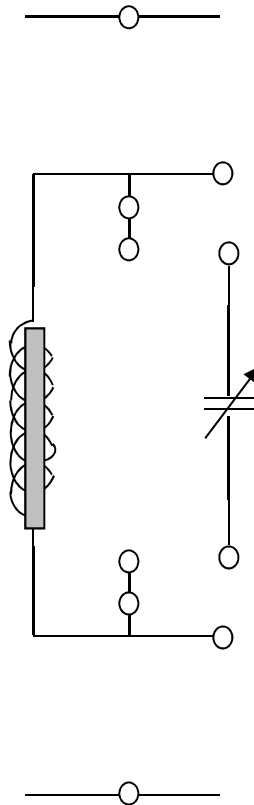
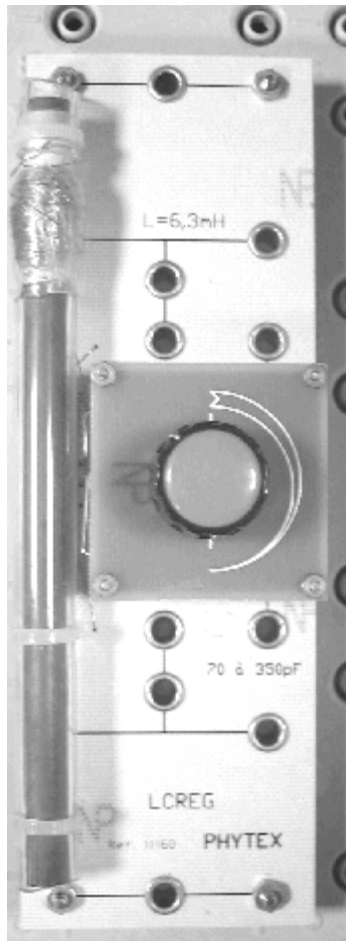
$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} + (r_L + R_{<0})C \frac{du}{dt} + u = 0$$

Un cas particulier correspond à la situation où $(r_L + R_{<0}) = 0$ et donc $LC \frac{d^2 u}{dt^2} + u = 0$

La solution est de la forme $u = U_0 \cos(\omega_0 t)$ avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

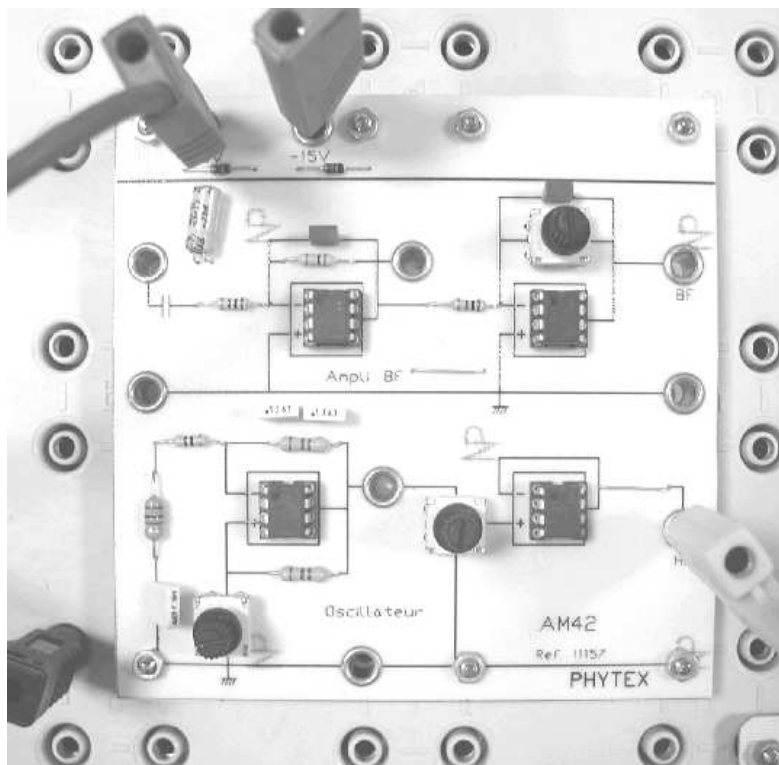
On dispose d'un circuit LC « parfait », i.e. sans résistance interne : ceci est lié à la présence de l'AOp qui fournit l'énergie (donc le courant) nécessaire pour compenser les pertes dues à la résistance r_L d'une bobine réelle.

VI. ANNEXE 2 : CIRCUITS



On remarque que les piste du haut et du bas ainsi que les composants, L et C, ne sont pas électriquement connectés : il faut utiliser des éléments (cavaliers, pontets, fils) afin de les connecter correctement.

1. en série pour l'émission
2. en parallèle pour la réception.



La partie supérieure est un ampli BF, destiné à amplifier un signal audio issu d'un microphone, par exemple, avant l'entrée du multiplieur. Le potentiomètre permet de régler l'amplitude du signal audio.

La partie inférieur gauche est l'oscillateur à résistance négative et la partie inférieur droite un « suiveur » alimenté par un diviseur de tension à potentiomètre qui permet de modifier l'amplitude de la porteuse, avant l'entrée du multiplieur.