

Moduler en fréquence - Wobuler *Morceaux choisis*

par R. KERAVEC et R. MOREAU

INTRODUCTION (par B. VELAY)

J'ai jugé opportun de reprendre des extraits d'articles antérieurs particulièrement pertinents :

1 - «Présentation de signaux modulés en fréquence et leurs spectres»
par R. MOREAU, B.U.P. n° 675, juin 1985.

2 - «Résonance d'un RLC série par wobulation» par R. KERAVEC ,
B.U.P. n° 727, octobre 1990.

3 - «Schéma de wobulateur 10 Hz / 100 kHz» par R. MOREAU, B.U.P.
n° 675, juin 1985.

Wobuler consiste à moduler en fréquence (c'est-à-dire faire varier périodiquement la fréquence) une tension (porteuse) appliquée au montage étudié, afin de connaître sa réponse en fréquence. Le signal modulant, dans ce cas là, ne contient pas de message utile à transmettre ; il est généralement en forme de rampe ou de triangle pour que l'axe des fréquences soit gradué linéairement, il doit être périodique pour que l'oscilloscope synchronise.

1. Extraits de : Construire et utiliser un analyseur de spectre

par R. MOREAU
B.U.P. n° 675, juin 1985

ONDES MODULÉES EN FRÉQUENCE

Considérons là encore, pour commencer, le cas qui correspond à un signal modulant sinusoïdal.

On parle de modulation de fréquence lorsque, disposant d'un signal $s(t)$, on s'arrange pour que la pulsation instantanée d'une porteuse soit de la forme $\Omega + k \cdot s(t)$. Soit θ la phase instantanée.

Dans le cas où $s(t) = a \cdot \cos(\omega t)$, de l'égalité :

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega_{\text{instantanée}} = \Omega + \Delta\Omega \cos(\omega t),$$

en posant $\Delta\Omega = k \cdot a$,

on déduit : $\theta = \Omega t + \frac{\Delta F}{f} \sin(\omega t)$,

si bien que l'expression de l'onde modulée $f(t) = A \cdot \cos \theta(t)$ devient :

$$f(t) = A \cdot \cos \left[\Omega t + \left(\frac{\Delta F}{f} \right) \cdot \sin(\omega t) \right] = A \cdot \cos [\Omega t + m \cdot \sin(\omega t)]$$

Le coefficient m , appelé indice de modulation est ainsi égal au rapport de l'excursion maximale de fréquence $\Delta F = \frac{\Delta\Omega}{2\pi}$, à la fréquence f du signal modulant. C'est donc un scalaire sans dimension.

Le calcul de spectre de $f(t)$ fait intervenir les fonctions de Bessel et nous ne le donnerons pas, mais, par contre, nous indiquerons quelques expériences faciles à réaliser, qui éclairent le sujet.

– Lorsque m est petit (0,1), le spectre de $f(t)$ a même allure que celui d'une onde modulée en amplitude. Il se compose d'une porteuse d'amplitude A et de deux raies satellites de fréquences $F - f$ et $F + f$, et d'amplitude commune $(m \cdot A)/2$. Cela montre que le seul spectre en amplitude (ou en puissance) d'une fonction $f(t)$ ne suffit pas à la caractériser ; il faut de plus connaître le comportement en phase des diverses composantes du spectre ;

– La forme générale du spectre d'une porteuse modulée en fréquence ne dépend, à un facteur d'échelle près portant sur les fréquences, que de l'indice m : choisir pour fréquence du signal modulant $f = 5$ kHz (par exemple), et pour fréquence de la porteuse $F = 40$ kHz. Régler l'amplitude du signal modulant pour obtenir une dizaine de raies bien visibles, cela correspond à peu près à $m = 3$. Repérer l'amplitude de ce signal modulant (ce sera par exemple une tension de 1,2 V qui, appliquée sur l'entrée de modulation d'un oscillateur contrôlé en

tension, provoquera une variation de fréquence de ce dernier de 20 kHz ; nous supposons la modulation linéaire). Si, à partir de cet état, on multiplie par un même facteur (1/2 ou 2 par exemple), à la fois l'amplitude du signal modulant et sa fréquence, on obtient d'autres spectres dont les raies, certes, sont plus ou moins rapprochées de la porteuse, mais qui gardent la même disposition relative et les mêmes amplitudes ;

– Le spectre d'une onde modulée en fréquence n'est pas toujours symétrique par rapport à la porteuse : moduler avec des impulsions rectangulaires de rapport cyclique égal à 0,2 (ou 0,8) environ, en choisissant un indice de modulation égal à 2 environ : on obtient un spectre très dissymétrique ;

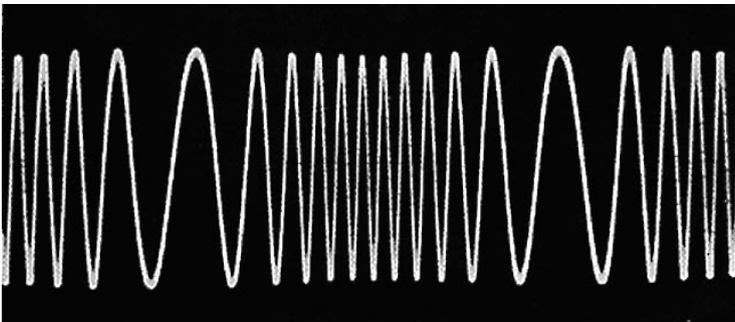
– La largeur spectrale d'une onde modulée en fréquence est en général beaucoup plus grande que celle d'une onde modulée en amplitude. Elle s'étend de part et d'autre de la fréquence de la porteuse non modulée, sur une bande approximativement égale à $\Delta F + f$.

L'excursion de fréquence nécessaire, en ondes métriques, pour transmettre, en modulation de fréquence, des signaux de largeur spectrale 15 kHz, est ainsi de 75 kHz ; c'est le cas des radios «libres» ;

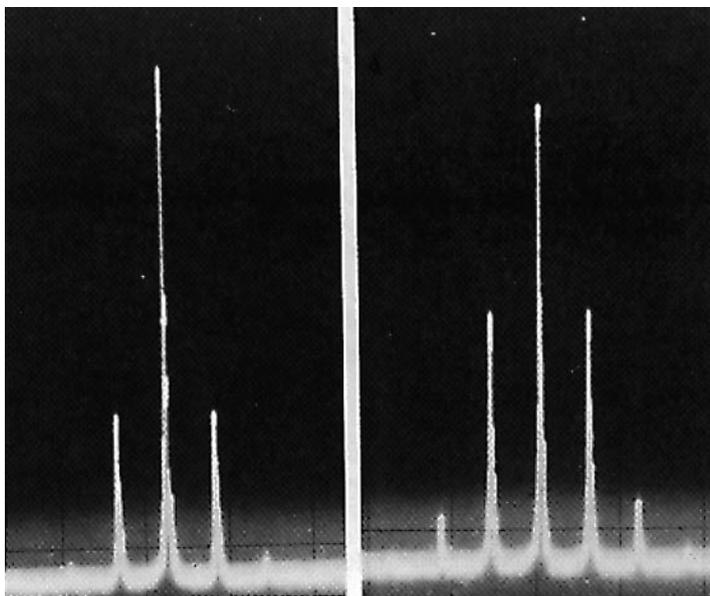
– La raie correspondant à la porteuse non modulée peut fort bien disparaître. On observera ce phénomène en faisant croître l'indice de modulation continûment ; il suffit, pour cela, de diminuer la fréquence f du signal modulant tout en maintenant son amplitude constante (et donc l'excursion de fréquence ΔF).

Les groupes de photos 6 et 7 illustrent ces propriétés.

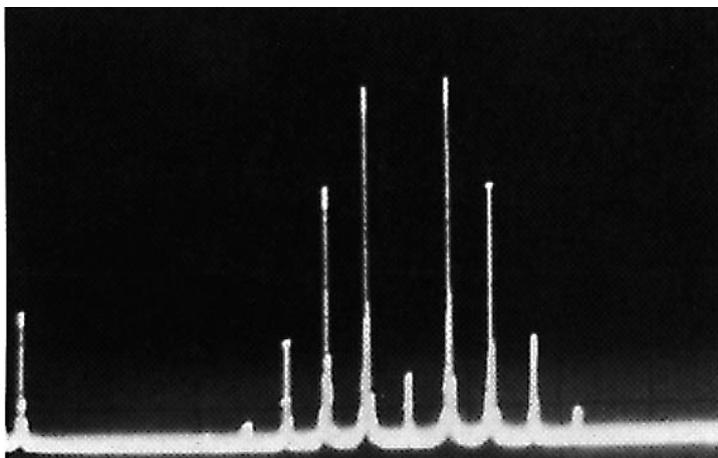
Groupe de photos n° 6 : Onde modulée en fréquence par un signal sinusoïdal.



Onde modulée sinusoidalement en fréquence : $f(t)$.

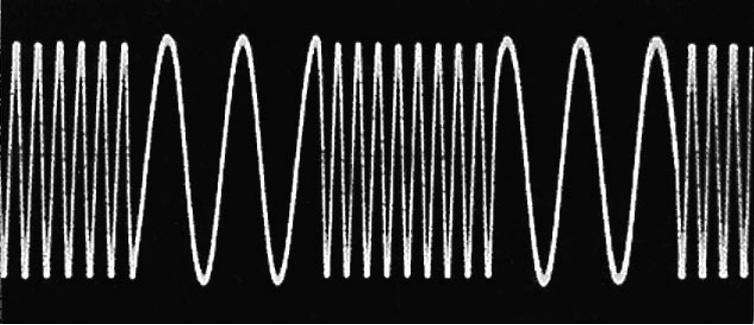


Spectres pour m faible (environ 0,3 puis 1,0) ; porteuse à 50 kHz ; signal modulant : 5 kHz.

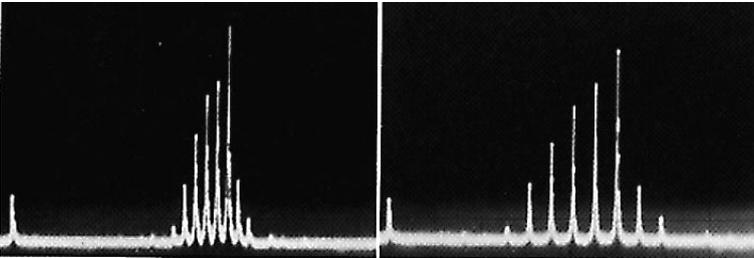


Spectre pour m plus élevé ($m \approx 2,2$) ; porteuse à 50 kHz ; signal modulant : 5 kHz.

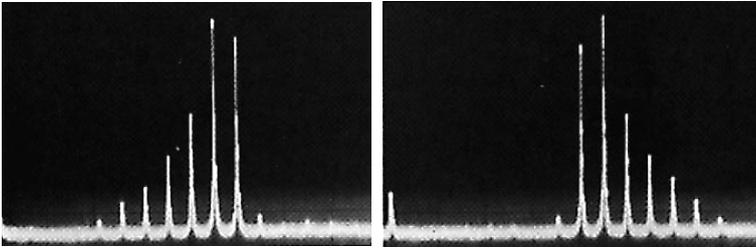
Groupe de photos n° 7



Onde modulée en fréquence par des signaux «carrés», ou signaux d'horloge de rapport cyclique égal à 1/2.



Sur ces deux photos, le signal modulant a gardé la même forme (signaux d'horloge de même rapport cyclique). On a seulement multiplié par deux, à la fois la fréquence et l'amplitude de ce signal : à un facteur 2 près, portant sur les fréquences, les spectres sont identiques. L'indice de modulation (indice généralisé), est resté le même.



Spectres (dissymétriques) d'une onde modulée en fréquence par des signaux d'horloge rectangulaires, de fréquence 5 kHz, de rapports cycliques respectifs 0,2 et 0,8, provoquant, de part et d'autre de la porteuse (dont la raie - la plus grande - est inchangée) une excursion de fréquence de 8 kHz.

N.D.L.R. : Outre cet article, on peut consulter le B.U.P. n° 752 (MULLER / DAVEAU) pour un autre schéma d'analyseur spectral analogique. L'analyse spectrale numérique mise en œuvre dans de nombreux logiciels est étudiée en détail dans le B.U.P. n° 754.

2. Extraits de : Circuit RLC - Résonance Wobulation

par R. KERAVEC
B.U.P. n° 727, octobre 1990

REMARQUES PRÉALABLES

Le tracé d'une courbe de résonance avec un GBF exige que la tension reste constante quelle que soit la fréquence. Or à la résonance, l'impédance du circuit RLC se réduit à R qui peut se trouver du même ordre de grandeur que l'impédance interne du GBF : dans ces conditions la tension fournie au circuit par le GBF est inférieure à celle qu'on lui avait donnée au départ.

Les oscillographes modernes permettent de s'affranchir de tout autre appareil de mesure (en particulier de l'ampèremètre dont la résistance n'est pas toujours aussi petite qu'on le pense !) et d'opérer dans un très large domaine de fréquence. **L'oscillographe sera ainsi utilisé comme multimètre pour la mesure des durées, tensions et intensités, fréquences, déphasages.**

Les générateurs de fonctions récents présentent deux avantages : une faible impédance interne (50Ω) et la possibilité de modulation de la fréquence par application d'une tension externe ou interne («wobulation»).

1. OBTENTION D'UNE SOURCE D'IMPÉDANCE NULLE

Même les générateurs de fonction récents d'impédance 50Ω peuvent poser problème, lorsqu'on souhaite une résonance aiguë avec une faible résistance.

Le montage suiveur ayant été introduit dans les programmes depuis la seconde, nous avons là l'occasion de le réintroduire en association avec le GBF :

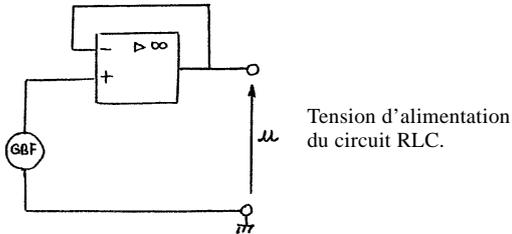


Figure 1

L'association GBF-suiveur est équivalente à une source de tension sinusoïdale parfaite (impédance nulle).

Cet avantage s'accompagne hélas d'une contrainte : l'amplificateur opérationnel ne peut débiter un courant d'intensité supérieure à 20 mA (un dispositif de protection est prévu par le constructeur). Il est possible d'utiliser un A.O. de puissance.

Selon la valeur de R choisie pour le circuit RLC, il faudra limiter la tension appliquée :

$$\text{si } R = 50 \Omega \quad \hat{U}_{\max} = 50 \times 0,020 = 1 \text{ V}$$

2. ÉTUDE DU CIRCUIT RLC SÉRIE À L'OSCILLOGRAPHE

2.1. Choix des composants

Il est possible d'associer une bobine de transformateur démodulable de 500 spires (≈ 12 mH) avec un condensateur de 22 nF ; la fréquence de résonance sera voisine de 10 kHz ; la gamme 2 kHz - 20 kHz du GBF permettra de balayer un domaine de fréquences suffisant. Le coefficient de qualité sera de l'ordre de 15 avec $R = 50 \Omega$.

2.2. Montage

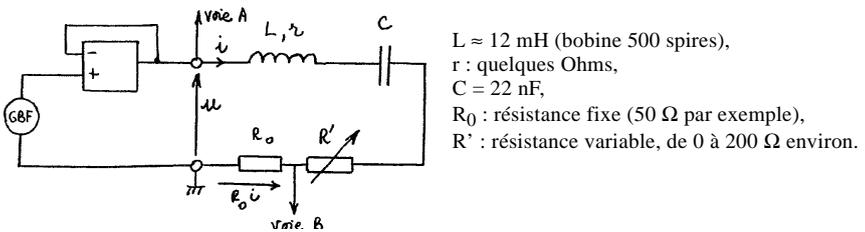


Figure 2

R_0 et R' peuvent être réalisées par des boîtes de résistances variables ou des résistances type radio (valeurs normalisées 47 Ω pour R_0 et 470 Ω variable pour R').

2.3. Mode opératoire

1 - Associer le GBF et l'amplificateur suiveur. Contrôler la tension de sortie sur la voie A de l'oscilloscope, le GBF étant sur la gamme choisie (ici 2-20 kHz). Régler cette tension 1 V crête (ou mieux à 2 V crête à crête). On pourra choisir le calibre 0,5 V sur la voie A. On ne touchera plus au réglage du niveau du GBF.

2 - Réaliser le circuit RLC (avec $R' = 0$) et l'alimenter par la tension u . Balayer la gamme de fréquence pour s'assurer de la constance de cette tension en valeur maximale.

Revenir à la fréquence minimale de la gamme et faire apparaître sur l'écran deux ou trois périodes complètes du signal.

3 - Observer sur la voie B, la tension $u_{R_0} = R_0 i$, image de l'intensité. Balayer la gamme de fréquence sans modifier la base de temps. Repérer le passage de \hat{U}_{R_0} par un maximum, c'est-à-dire le passage de \hat{I} par un maximum.

4 - Revenir au maximum de \hat{I} . Observer alors la concordance de phases entre u et i . Le passage en mode «XY» permet de parfaire ce réglage.

Mesurer \hat{U}_{R_0} max, d'où \hat{I}_0 à la résonance. Comparer avec sa valeur théorique.

A l'oscillographe, déterminer la période T_0 ; calculer f_0 à la résonance. Comparer avec la valeur indiquée par le cadran du GBF (On choisira une valeur adaptée pour la base de temps) ou celle donnée par un fréquencemètre.

Déterminer la valeur de L si on se donne la valeur de la capacité C (mesurable par exemple avec certains multimètres).

5 - Détermination de la bande passante : chercher les deux fréquences ($f_1 < f_0$ et $f_2 > f_0$) qui conduisent à une valeur de u_{R_0} telle que $\hat{U}_{R_0} = \frac{\hat{U}_{R_0} \max}{\sqrt{2}}$. Choisir un calibre approprié sur la voie B.

Contrôler les déphasages en choisissant convenablement la base de temps.

6 - Déterminer le coefficient de qualité $Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{RC\omega_0}$.

7 - Revenir à la résonance. Permuter C et R_0 .

Mesurer alors \hat{U}_{C_0} . Comparer \hat{U}_{C_0} et \hat{U} .

8 - Courbe de résonance : $\hat{I} = g(f)$.

Trois points en sont déjà connus : pour f_1, f_0, f_2 . Se borner à déterminer \hat{I} , pour trois ou quatre valeurs de f (lues sur le cadran du GBF ou sur le fréquencesmètre) inférieures à f_1 , puis supérieures à f_2 .

9 - Prolongements possibles :

- tracer la courbe de résonance pour une valeur $R' = 50$ ou 100Ω . Se borner à chercher la résonance et balayer la gamme de fréquences tous les 2 kHz par exemple (on gardera le même calibre sur la voie B, pour déterminer \hat{I}) ;
- faire le même travail que précédemment en remplaçant le condensateur de 22 nF par un de 0,1 μF . On prendra $R' = 0$.

10 - Remarque : Il serait intéressant de donner aux élèves un document rassemblant sur un graphe unique, l'ensemble des trois courbes de résonance évoquées ci-dessus, à moins que les bobines et condensateurs disponibles soient identiques ce qui autoriserait la mise en commun des résultats de plusieurs groupes d'élèves.

3. MISE EN ŒUVRE DE LA WOBULATION

Lors du tracé d'une courbe de résonance, on fait varier la fréquence manuellement et de manière discontinue.

Les générateurs de fonction munis d'une prise «wobulation» permettent un balayage en fréquence, entre deux limites, par application d'une tension variable. Si cette dernière est périodique, la tension fournie par le GBF est à amplitude constante, pseudo-périodique ; le phénomène est répétitif.

La wobulation peut-être considérée comme un cas particulier de modulation de fréquence, bien que cette dernière terminologie soit réservée au cas des signaux contenant une information.

La mise en œuvre par les élèves est peut-être délicate, en raison des contraintes de temps essentiellement. Elle donne lieu cependant à des expériences remarquables qu'un professeur se doit au moins de présenter soit à l'occasion d'un cours sur le circuit RLC ou d'une séance

de T.P. L'impact sur les élèves peut être une source de motivation qui n'est pas à négliger.

3.1. Étude de la wobulation

Il est bon de consulter la notice du GBF auparavant, bien que celle-ci ne soit pas toujours très explicite sur le sujet !

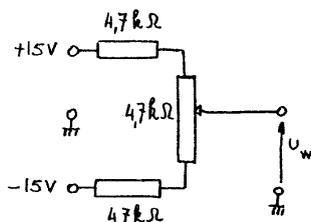


Figure 3

a - Régler le GBF sur une fréquence donnée (par exemple au milieu d'une gamme choisie pour l'étude du circuit RLC). Visualiser le signal à l'oscillographe (voie B).

b - Appliquer à la prise «wobulation» du GBF une tension continue U_W obtenue à partir d'un montage diviseur (figure 3) :

- observer le signal de sortie du GBF,
- faire varier U_W .

On peut établir la relation (affine) : $f = g(U_W)$.

- En déduire le domaine de variation de U_W pour balayer une gamme de fréquence donnée ;
- Appliquer la tension U_W sur la voie A de l'oscillo, la voie B étant toujours reliée à la sortie du GBF.

Passer en mode XY ; en faisant varier U_W on peut ainsi étalonner l'axe des X en fréquences (choisir un calibre adapté sur la voie A).

3.2. Étude de la résonance d'un circuit RLC

I - Reprendre le montage (figure 2) du paragraphe 2.

2 - Appliquer la tension wobulée manuellement au circuit RLC ; on fera varier U_W dans le domaine défini pour balayer une gamme de fréquence.

En mode XY, appliquer U_W à la voie A (c'est-à-dire X) et U_{R0} (c'est-à-dire i) à la voie B (en Y).

En agissant sur U_W , retrouver la fréquence de résonance.

3 - Remplacer la tension U_W variable manuellement par une tension périodique fournie par un second GBF. Ce dernier sera préalablement réglé : on opérera avec un signal triangulaire dont la tension variera dans le même domaine de variations que celui défini précédemment pour U_W ; la fréquence sera prise successivement égale à 0,1 - 1 - 10 Hz.

a - Observer simultanément u_W (voie A) et u fournie à la sortie de l'ampli-suiveur (voie B).
Passer en mode X-Y.

b - A la fréquence 0,1 Hz du signal modulant, observer u (voie A) et U_{R0} (voie B). A cette très basse fréquence, on peut suivre facilement l'évolution des grandeurs u et i (amplitudes, phases relatives). Cette belle expérience est à montrer aux élèves !

c - Afficher le signal modulant u_W en voie A, u_{R0} reste en voie B, et passer en mode XY.

Opérer successivement à 0,1 Hz, 1 Hz et 10 Hz environ. A cette dernière fréquence, il pourra être nécessaire de procéder à de légères retouches de la fréquence de modulation pour éviter un éventuel dédoublement de la courbe affichée.

L'enveloppe supérieure de la courbe (figure 4) constitue la courbe de résonance \hat{I} en fonction de f .

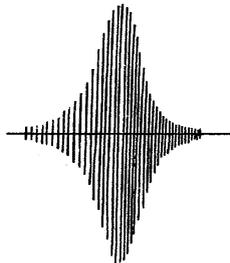


Figure 4

En agissant sur R' , ou sur C , on observe immédiatement les courbes de résonance correspondantes, et si l'axe des X a été étalonné en fréquence, la détermination de f_0 est rapide.

3.3. Affichage de la courbe de résonance

Il faut procéder à une «déttection» selon le principe classique :

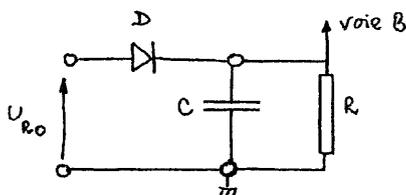


Figure 5 : (D : diode à pointe (type OA90)).

La constante de temps du circuit RC doit être courte par rapport à la période du signal modulant (ici de 0,1 à 10 s) et grande devant la période du signal modulé (ici de l'ordre de la centaine de microsecondes). L'association $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 0,33 \text{ }\mu\text{F}$ réalise un bon compromis ($\tau = RC \approx 3,3 \text{ ms}$).

En l'absence de condensateur on observe les alternances positives de u_{R0} .

En présence de C , celui-ci se décharge partiellement entre les crêtes positives de u_{R0} .

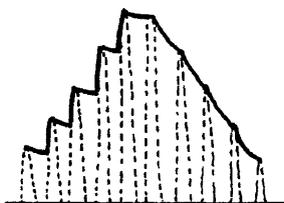


Figure 6 : Principe de détection d'enveloppe par le circuit D-R-C.

Le circuit détecteur n'est pas parfait : la diode ne peut être idéale, R introduit un amortissement supplémentaire et il est nécessaire que la

tension d'entrée soit suffisante. Il sera indispensable d'insérer un montage amplificateur (figure 7) entre U_{R0} et le circuit détecteur :

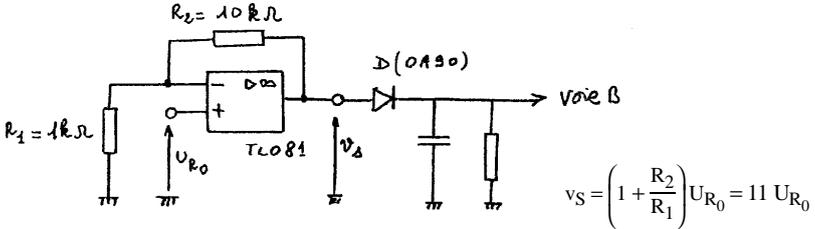


Figure 7

Ce dispositif peut être réalisé soit sur une seule plaquette ou sur deux plaquettes séparées (amplificateur et détecteur). Il permet de disposer d'une tension maximale voisine de 10 V pour alimenter le détecteur.

La courbe de résonance s'inscrit alors dans de bonnes conditions. Faire varier R' et C .

Observer que pour une très basse fréquence de modulation, le spot décrit lentement la courbe et semble rebondir aux extrémités de la courbe.

BIBLIOGRAPHIE

Voir B.U.P. n° 637, octobre 1981, pages 47-51.

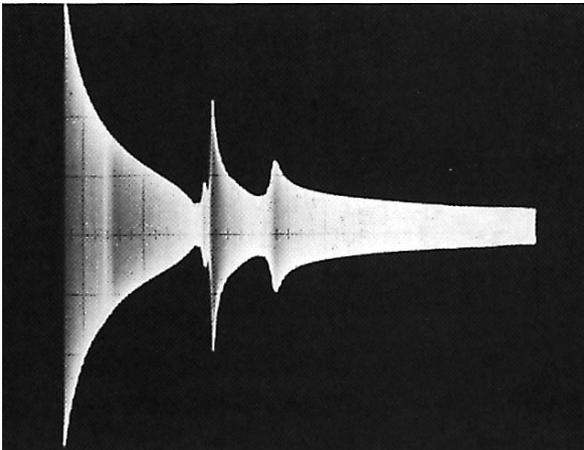
3. Extraits de : Construire et utiliser un analyseur de spectre

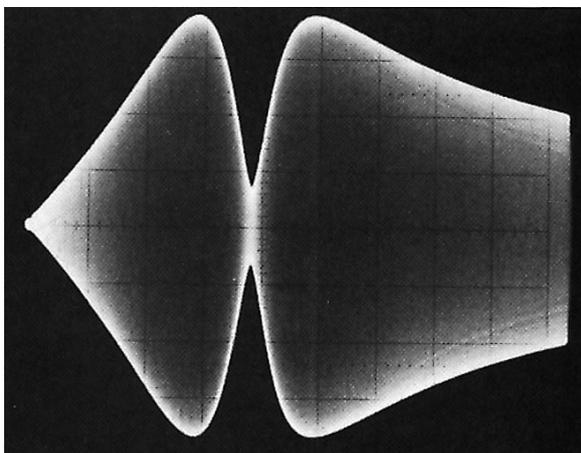
par R. MOREAU
B.U.P. n° 675, juin 1985

...Pour terminer ce trop long article, nous indiquons le schéma d'un wobulateur d'excellente qualité que l'on peut construire à partir des éléments de base de l'analyseur de spectres décrit précédemment.

Le fait que l'on puisse régler l'excursion de fréquence, ainsi que la fréquence centrale permet d'obtenir des figures plus esthétiques, comme en témoignent les deux photographies reproduites ci-après.

La première représente les variations de l'impédance d'un transducteur à ultrasons (B.U.P. n° 49, p. 353), lorsque la fréquence varie, (il y a là de la belle Physique !), la seconde, beaucoup plus simplement, traduit la variation, en fonction de l'impédance d'un dipôle formé d'un circuit bouchon en parallèle avec un circuit résonnant série.





FONCTIONNEMENT

Le circuit intégré XR 2206 fournit sur sa broche n° 2 une tension en dents de scie dont la fréquence se règle grâce au potentiomètre P_0 .

Le condensateur de $22 \mu\text{F}$ qui doit être placé entre les deux bornes 5 et 6 de ce circuit est, en fait, un condensateur chimique dont la polarité est sans importance (l'amplitude de la tension qu'il supporte est faible).

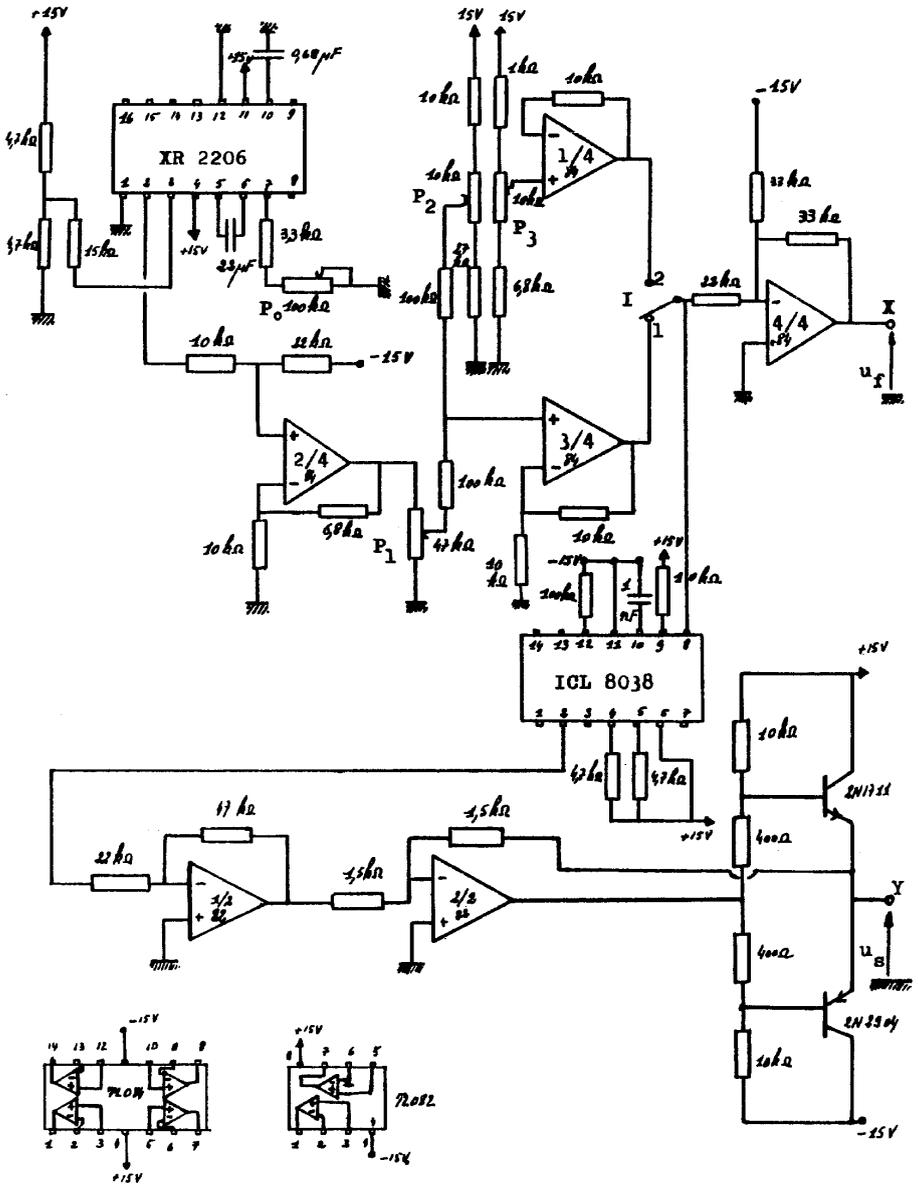
Le potentiomètre P_1 règle l'amplitude de la dent de scie, autrement dit, l'excursion de fréquence du woblateur.

Le potentiomètre P_2 permet, lui, de faire varier la fréquence centrale du woblateur.

L'interrupteur inverseur I permet de passer en position de réglage manuel de la fréquence (position 2), ou en woblateur proprement dit : (1).

En réglage manuel de fréquence, on dispose d'un générateur de signaux sinusoïdaux dont la fréquence se règle grâce au potentiomètre P_3 .

La tension image de la fréquence (à une translation près) est disponible sur la borne X.



Woblateur : 10 à 100 kHz.

La tension sinusoïdale wobulée est générée par le circuit intégré ICL 8038. Pour que la tension délivrée par ce circuit soit bien sinusoïdale, ce circuit doit être chargé très faiblement : d'où la présence d'une résistance de $22\text{ k}\Omega$ dans le premier étage de l'amplificateur de sortie.

L'étage de puissance est constitué d'un montage push-pull à deux transistors. Placer un petit radiateur sur chacun de ces transistors. Dans le cas de manipulations d'élèves, il sera bon de placer en série sur la borne Y, une résistance de $47\ \Omega$, 1 W. Ainsi, l'impédance de sortie du wobulateur sera voisine de $50\ \Omega$, et l'étage de sortie sera parfaitement protégé.

La tension de sortie, sur la borne Y, possède une valeur efficace voisine de 5 V. On pensera à découpler le montage par deux condensateurs chimiques de $100\ \mu\text{F}$ placés entre + 15 V et la masse et - 15 V et la masse.