

Toute la modulation et la démodulation d'amplitude sur une maquette didactique

par Frédéric LAGARDE et Hélène LEYMARIE
Préparation à l'agrégation de physique appliquée
Université Paul Sabatier - 31062 Toulouse

RÉSUMÉ

Cet article présente la réalisation d'une maquette permettant l'étude détaillée de la modulation et surtout de la démodulation d'amplitude. En effet, la détection crête et la détection synchrone avec reconstitution éventuelle de la porteuse sont ici analysées en détail. D'autre part, cette maquette a été spécialement conçue pour que les étudiants puissent observer facilement tous les signaux grâce à une face avant très didactique. Enfin, la liberté dans le choix des composants, pour la plupart amovibles, ont rendu cette maquette utilisable à tous les niveaux (terminale S et GEL, BTS électronique, Capes de physique-chimie, Capes et Agrégation de physique et de physique appliquée).

1. INTRODUCTION

Cette maquette permet de réaliser :

- une modulation d'amplitude avec ou sans porteuse à l'aide d'un multiplieur,
- une démodulation par détection d'enveloppe,
- une démodulation synchrone avec ou sans reconstitution de porteuse,
- la transmission d'un signal sonore, issu d'un générateur de mélodie et écouté grâce à un haut-parleur.

L'originalité de cette maquette est de permettre l'étude détaillée de la démodulation synchrone, très utilisée en réception radio AM et lors du traitement de signaux basse fréquence noyés dans le bruit (systèmes de mesure [5]). L'utilisateur pourra, dans un premier temps étudier l'influence d'un déphasage sur la porteuse, puis reconstituer celle-ci à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).

Le matériel nécessaire au fonctionnement de la maquette est le suivant :

- une alimentation stabilisée – 15 V, + 15 V,

- deux GBF,
- un oscilloscope et éventuellement un analyseur de spectre.

La face avant et le schéma électrique complet de la maquette sont représentés respectivement figure 1 et en annexe 1.

2. MODULATION AVEC OU SANS PORTEUSE

Le montage présenté figure 2, construit autour du multiplieur AD633, permet de réaliser le produit de deux signaux (la porteuse et le signal modulant), et d'y ajouter, si on le désire, une partie de la porteuse. On réalise ainsi une modulation avec ou sans porteuse.

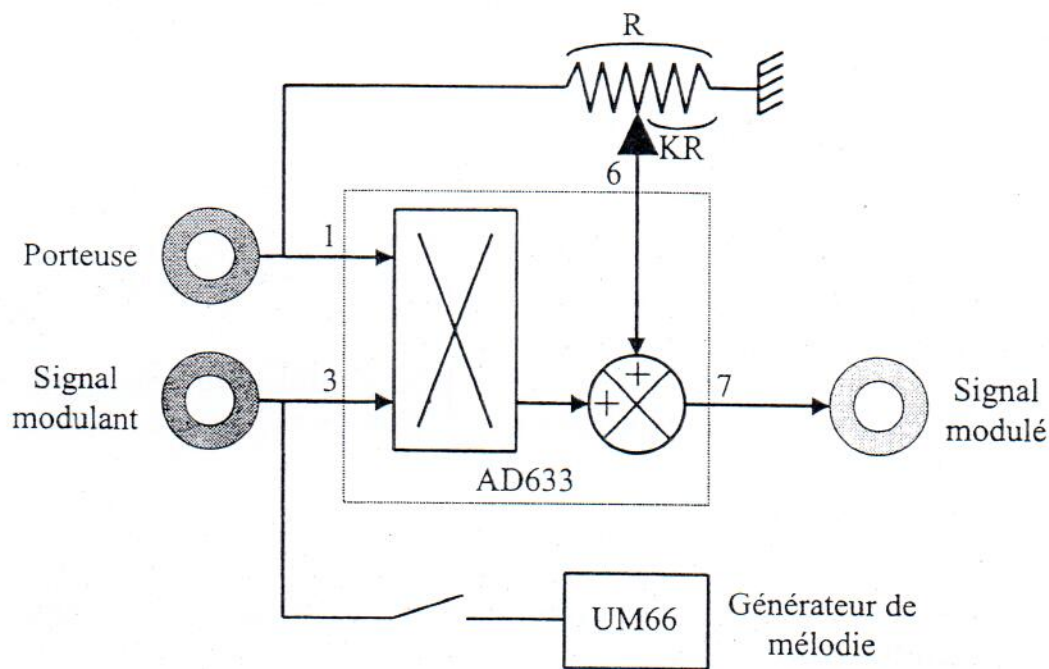


Figure 2 : Circuit de modulation d'amplitude avec ou sans porteuse.

2.1. Principe

Si les signaux d'entrée ont pour expressions :

- porteuse : $v_p(t) = V_p \cos(\omega_p t)$,
- modulant : $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$,

conformément à la documentation technique de l'AD633 [4], le signal modulé s'écrit :

$$v_{\text{mod}}(t) = \frac{V_p \cos(\omega_p t) \times V_m \cos(\omega_m t)}{10} + KV_p \cos(\omega_p t)$$

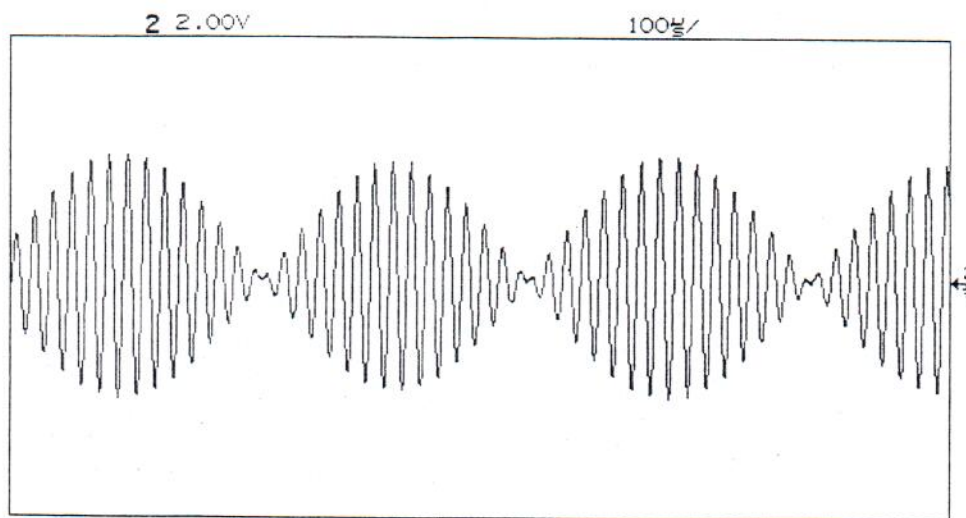


Figure 3 : Forme du signal modulé sans porteuse.

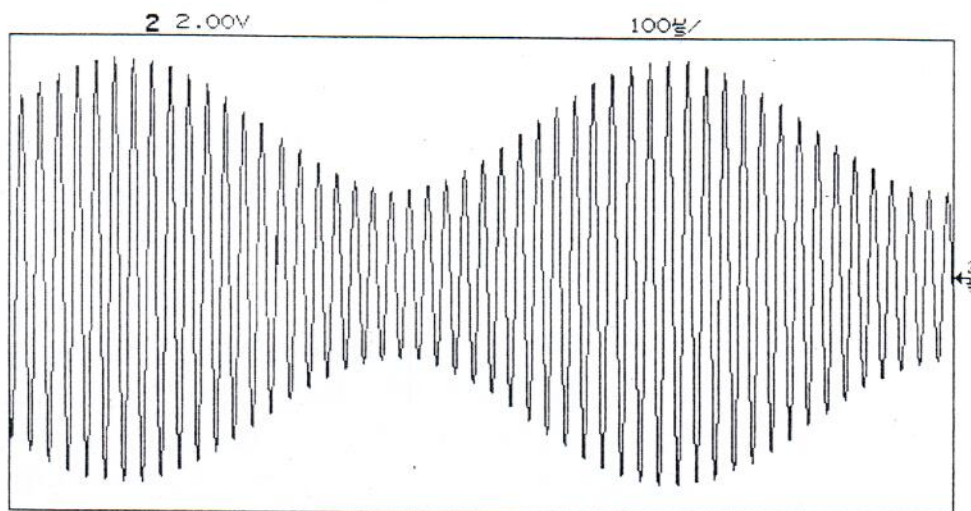


Figure 4 : Forme du signal modulé avec porteuse.

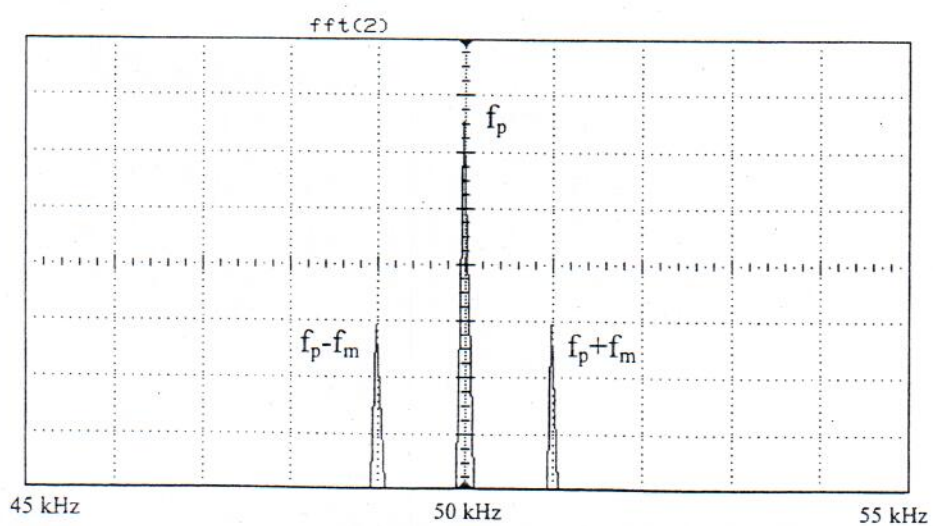


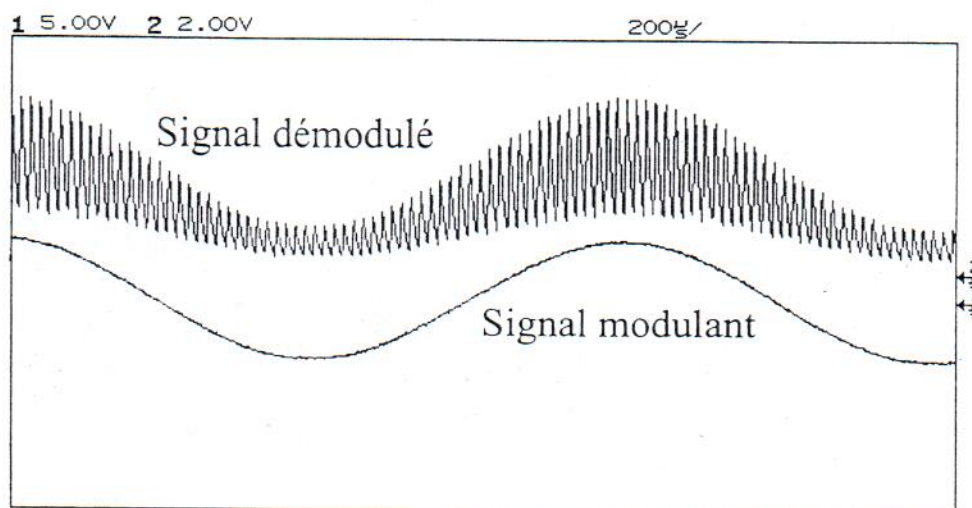
Figure 5 : Spectre du signal modulé avec porteuse.

Le choix de $R_1 C_1$ repose sur un compromis (cf. figure 8) :

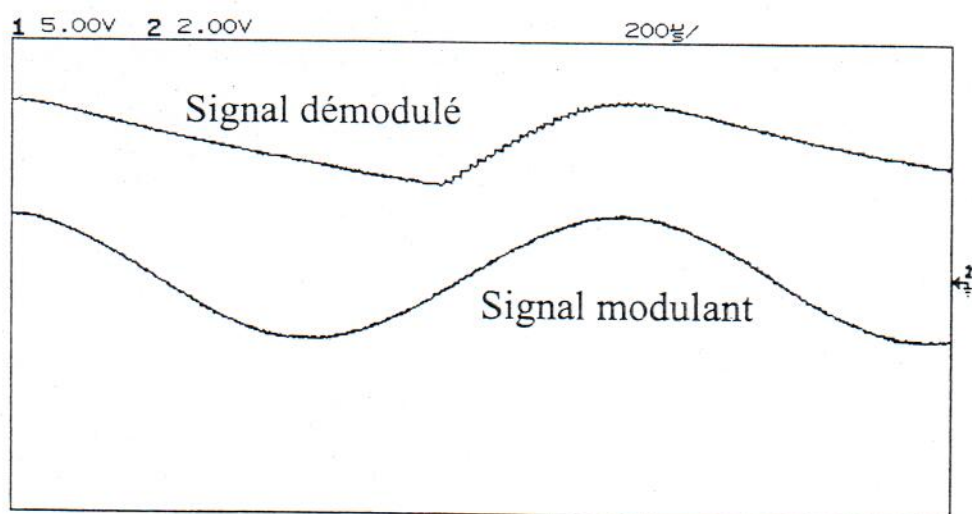
- le temps de décharge du condensateur doit être grand devant la période de la porteuse (on veut limiter l'ondulation),
- la décharge ne doit pas être trop lente car la tension aux bornes de C_1 pourrait quitter l'enveloppe, et donner ainsi une image faussée du modulant.

Les conditions à respecter sont les suivantes [1] :

$$\frac{10}{f_p} < R_1 C_1 < \frac{\sqrt{1-m^2}}{2\pi m f_m}$$



a) $R_1 C_1$ trop faible.

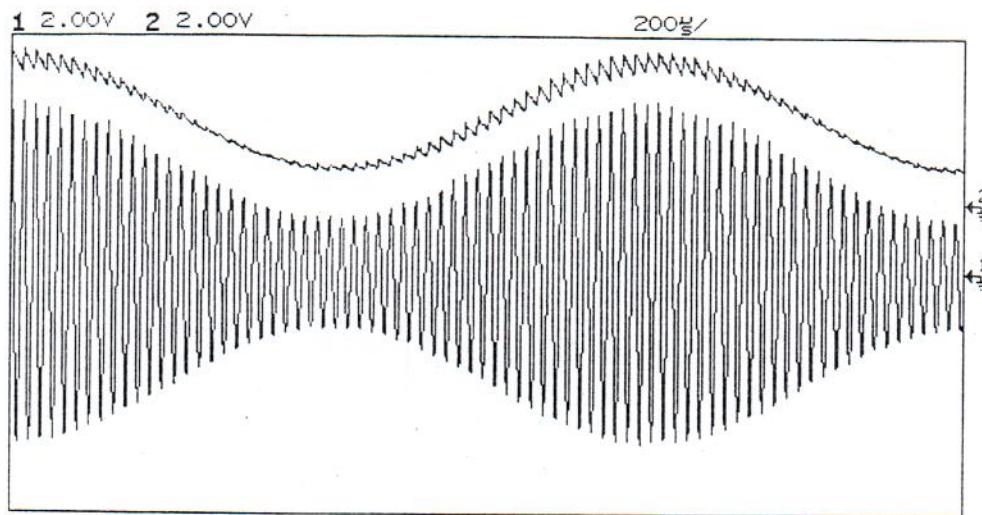


b) $R_1 C_1$ trop grand.

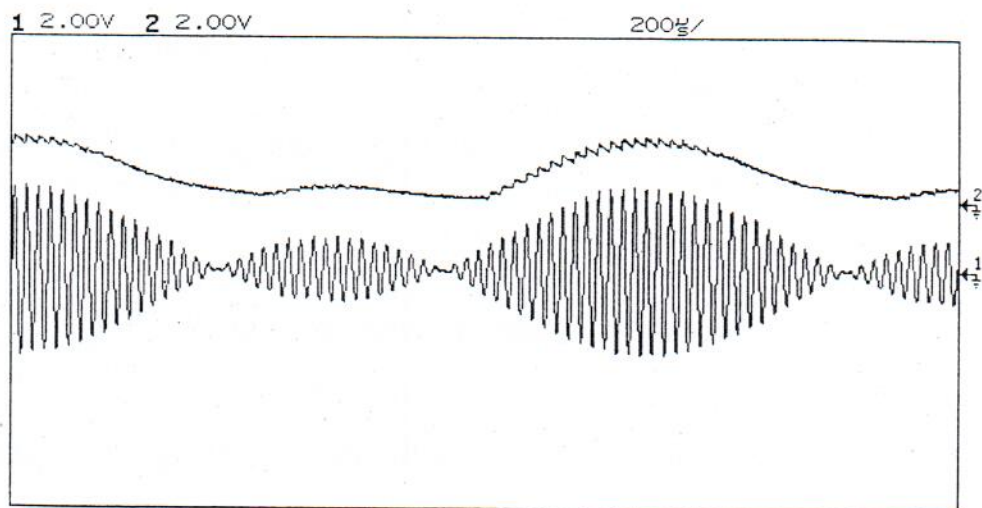
Figure 8 : Influence de la constante de temps $R_1 C_1$ sur la démodulation.

c) Limitations

Pour que l'enveloppe soit une image fidèle du signal modulant, il faut que l'indice de modulation soit inférieur à 1 (cf. figure 10).



a) $m < 1$: démodulation correcte.



b) $m > 1$: mauvaise démodulation.

Figure 10 : Influence de l'indice de modulation sur la qualité de la démodulation.

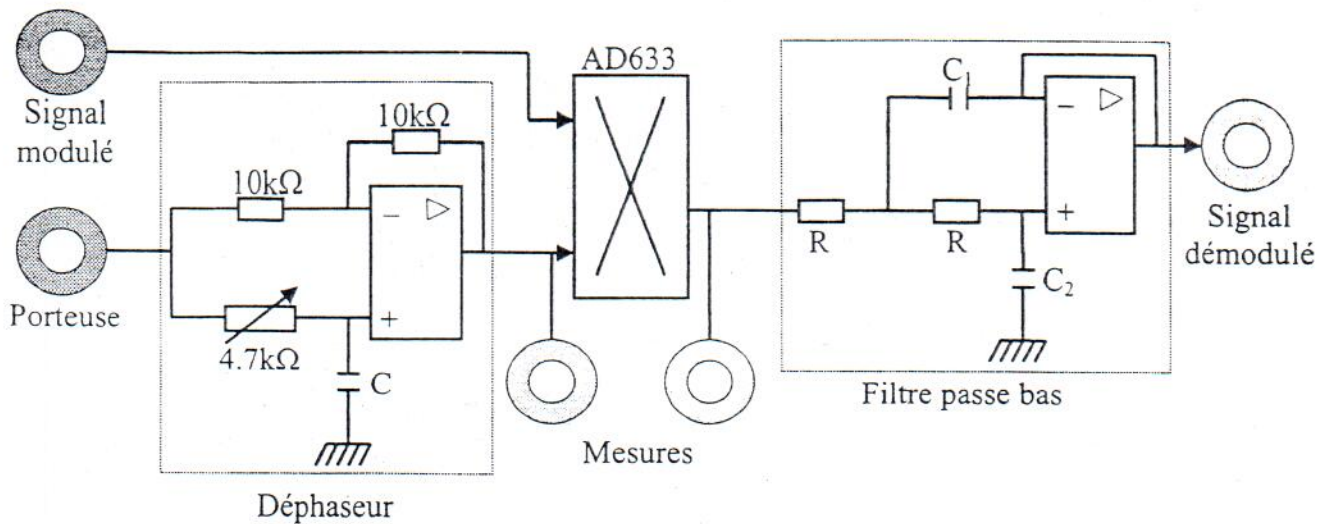


Figure 12 : Circuit de démodulation synchrone.

4.1. Démodulation sans reconstitution de porteuse

a) Principe de la démodulation

On multiplie le signal modulé par sa porteuse supposée connue (c'est le cas dans les systèmes de mesure). Si les signaux à l'entrée du multiplieur ont pour expressions :

- signal modulé : $v_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}}[(1 + m \cos(\omega_m t))\cos(\omega_p t)]$,
- porteuse : $v_p(t) = V_p \cos(\omega_p t)$,

on a en sortie du multiplieur, sachant que l'AD633 introduit un gain de $\frac{1}{10}$:

$$v_{\text{mod}} \times v_p = \frac{V_p V_{\text{mod}}}{20} [1 + m \cos(\omega_m t) + \cos(2\omega_p t) + m \cos(\omega_m t) \cos(2\omega_p t)]$$

et après filtrage ($f_c \ll 2f_p$) :

$$v_{\text{demodule}} = \frac{V_p V_{\text{mod}}}{20} + \frac{V_p V_{\text{mod}}}{20} m \cos(\omega_m t)$$

On obtient un signal comportant une composante continue facile à supprimer et sachant que m est proportionnel à V_m , une composante proportionnelle au modulant. On réalise donc une démodulation qui fonctionne quelle que soit la valeur de l'indice de modulation.

On peut effectuer le même calcul avec une modulation d'amplitude sans porteuse : le résultat est le même mais la sortie ne comporte pas de composante continue.

c) Étude du filtre passe-bas

Le filtre, dont la structure est de type Sallen-Key, est du second ordre pour une meilleure atténuation des hautes fréquences.

La fonction de transfert est :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + j2RC_2\omega + R^2C_1C_2(j\omega)^2}$$

La pulsation naturelle ω_n et le facteur d'amortissement ξ valent donc respectivement :

$$\omega_n = \frac{1}{R\sqrt{C_1C_2}} \quad \text{et} \quad \xi = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

On calcule R , C_1 , et C_2 pour avoir :

$$\xi = 0,7 \quad \text{et} \quad f_m < \frac{\omega_n}{2\pi} \ll 2f_p$$

d) Étude expérimentale

Le signal modulé est issu du modulateur de la maquette et la porteuse est directement récupérée à l'entrée du multiplieur.

L'utilisateur peut calculer la capacité du déphaseur et les éléments du filtre (composants amovibles), ou bien utiliser des valeurs prédéterminées.

On pourra faire les manipulations suivantes :

- Avec $\varphi = 0$:
 - vérifier que la démodulation fonctionne correctement quelle que soit la valeur de m et pour une modulation avec ou sans porteuse,
 - visualiser la sortie du multiplieur à l'analyseur de spectre (cf. figure 13).
- Pour différentes valeurs de φ , visualiser l'entrée et la sortie du déphaseur à l'oscilloscope (cf. figure 14).
- Observer l'influence du déphasage sur le signal démodulé (cf. figure 15) :
 - $\varphi = 0$: on retrouve le signal modulant avec une composante continue positive,
 - $\varphi = 90^\circ$: la sortie est nulle (la démodulation est impossible),
 - $\varphi = 180^\circ$: on retrouve le signal modulant en opposition de phase et avec une composante continue négative.

Nous avons mis en évidence la nécessité de posséder une image fidèle de la porteuse pour réaliser une démodulation synchrone correcte. Ceci est possible en reconstituant la porteuse à l'aide d'une PLL.

4.2. Reconstitution de la porteuse

Le montage (cf. figure 16) permet de réaliser le produit du signal modulé par la sortie d'un VCO (ICL8038), dont la fréquence d'oscillation f_0 est réglée par un potentiomètre. La sortie du multiplieur (AD633) est suivie d'un filtre passe bande (centré sur la fréquence $f_1 = 50$ kHz), puis d'une PLL analogique (LM565).

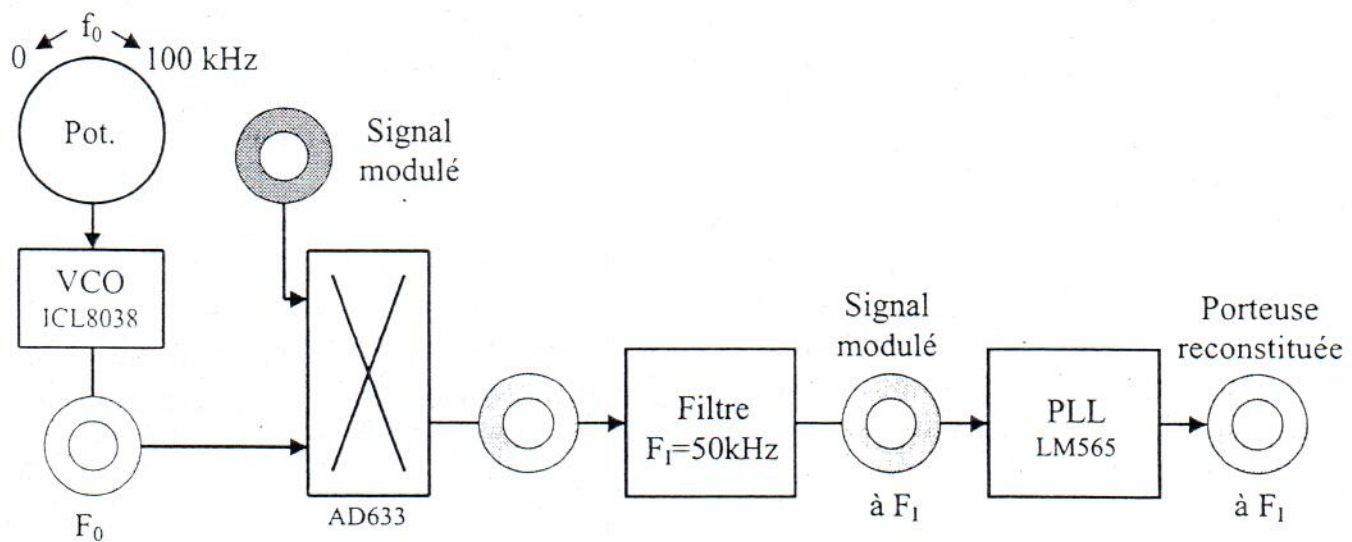


Figure 16 : Circuit de reconstitution de la porteuse à partir du signal modulé.

a) Accrochage de la PLL

Nous rappelons qu'une boucle à verrouillage de phase, ou PLL (Phase Locked Loop), permet d'asservir deux signaux en fréquence : on dit que la PLL est accrochée lorsque ses signaux d'entrée et de sortie ont rigoureusement la même fréquence [2].

On peut grâce à une PLL extraire la porteuse d'un signal modulé en amplitude. Pour que la boucle s'accroche sur le signal modulé et que la sortie soit stable, il faut vérifier :

- que la fréquence de la porteuse soit proche de la fréquence centrale f_1 de la PLL,
- que l'indice de modulation soit inférieur à 1. En effet, lorsque m est supérieur à 1, il peut y avoir des sauts de phase du signal d'entrée entraînant une instabilité de la sortie (cf. figure 17).

La PLL peut alors s'accrocher et délivrer une sinusoïde d'amplitude constante, dont la fréquence est rigoureusement égale à $f_0 - f_p$ (cf. figure 18).

c) *Démodulation synchrone avec reconstitution de porteuse*

On dispose maintenant :

- d'un signal modulé en amplitude $\mathcal{V}'_{\text{mod}}$, de fréquence porteuse $f_0 - f_p$,
- d'une sinusoïde de fréquence $f_0 - f_p$, image de la porteuse.

Il suffit, pour réaliser une démodulation synchrone, d'appliquer ces deux signaux au montage décrit au § 4.1.

d) *Étude expérimentale*

La fréquence centrale de la PLL a été fixée à $f_l = 50$ kHz pour pouvoir utiliser un analyseur de spectre numérique ($f < 100$ kHz). La fréquence f_0 du VCO est réglable grâce à un potentiomètre et peut varier de 0 à 100 kHz.

On envoie un signal modulé en amplitude (issu du modulateur de la maquette ou d'un circuit extérieur) à l'entrée du multiplieur. La fréquence maximum de la porteuse est de 150 kHz : en effet il faut $f_p - f_0 = f_l = 50$ kHz pour que la PLL s'accroche.

L'utilisateur pourra réaliser les opérations suivantes :

- visualiser l'accrochage de la PLL en faisant varier f_0 (cf. figure 18),
- observer l'instabilité de la sortie de la PLL lorsque l'indice de modulation est supérieur à 1,
- observer le déplacement du spectre en sortie du multiplieur (cf. figure 19),
- démoduler un signal modulé en amplitude sans disposer de la porteuse en combinant les montages décrits aux § 4.1 et 4.2.

5. ÉCOUTE DU SIGNAL DÉMODULÉ

Le montage (cf. figure 20) est constitué d'un amplificateur de gain variable suivi d'un haut-parleur.

L'amplificateur, dont le gain est réglable grâce à un potentiomètre, amplifie la partie alternative du signal d'entrée. Après élimination de la composante continue, le signal amplifié est écouté sur un haut-parleur.

On pourra donc écouter le signal démodulé quelle que soit la méthode de démodulation utilisée. On appréciera tout particulièrement la ravissante mélodie délivrée par l'UM66...

6. CONCLUSION

Cette maquette permet de réaliser une étude complète de la modulation et de la démodulation d'amplitude. Elle permet notamment de mettre en évidence des phénomènes habituellement longs et délicats à étudier d'un point de vue pratique, comme les problèmes de Fading et de reconstitution de porteuse. Facile d'utilisation et attrayante, elle pourra être utilisée à tous les niveaux.

Afin de ne pas trop allonger cet article, nous n'avons pas mis les dessins des circuits imprimés, ni les plans d'implantation des composants. Pour tout renseignement, n'hésitez pas à nous contacter par courrier :

Université Paul Sabatier
Agrégation de Physique Appliquée - Bât 3A
118, route de Narbonne - 31062 TOULOUSE Cedex

par téléphone au : 05 61 55 86 89
ou par mél : leymarie@cict.fr

REMERCIEMENTS

Nous tenons spécialement à remercier M. Franck LACOURREGE, technicien-maquettiste, pour sa participation à la réalisation technique de la maquette.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. MANNEVILLE et J. ESQUIEU : «*Systèmes bouclés linéaires de communication et de filtrage*» - Dunod, 1990.
- [2] P. HOROWITZ et W. HILL : «*Traité d'électronique analogique et numérique*» - volume 2 - Publitronic Elektor, 1996.
- [3] D. VENTRE : «*Communications analogiques*» - Ellipses, 1991.
- [4] B. FAGOT et D. CHATAIN : «*Multiplieur analogique AD633JN*» - BUP n° 771, février 1995, pp. 347-348.
- [5] P.A. PARATTE et P. ROBERT : *Traité d'électricité*, volume XVII : «*Systèmes de mesure*» - Presses Polytechniques Romandes, 1986.

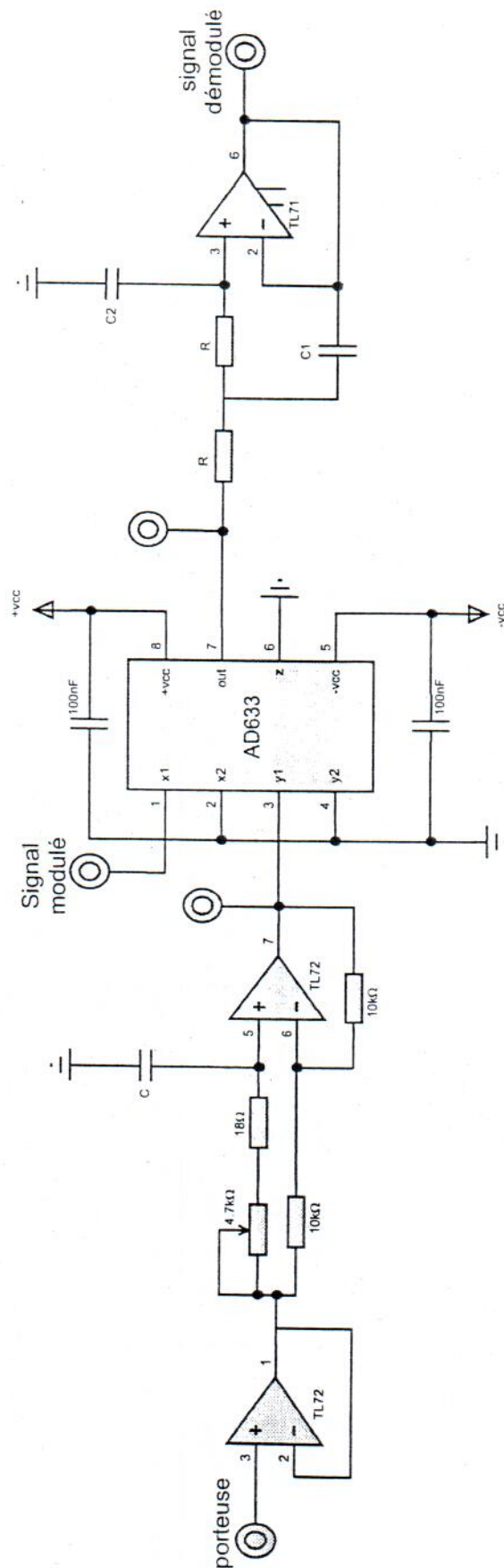


Figure 22 : Schéma électrique du démodulateur synchrone.

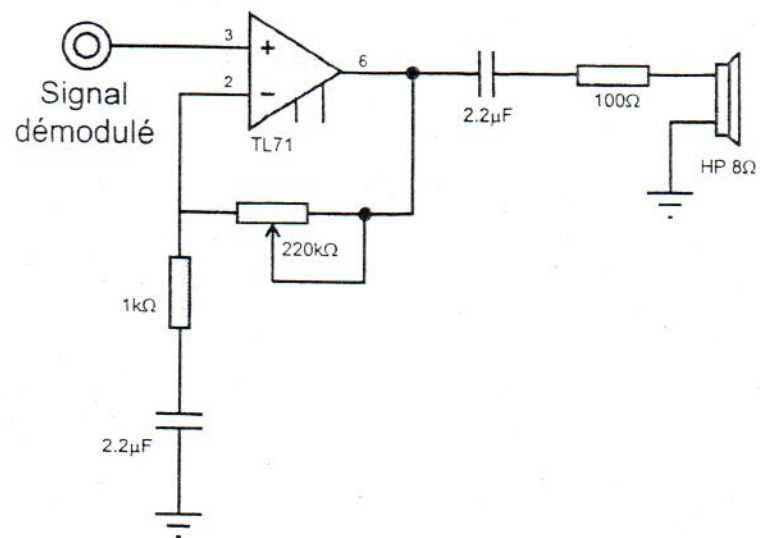


Figure 24 : Schéma électrique de l'amplificateur audio.