

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,

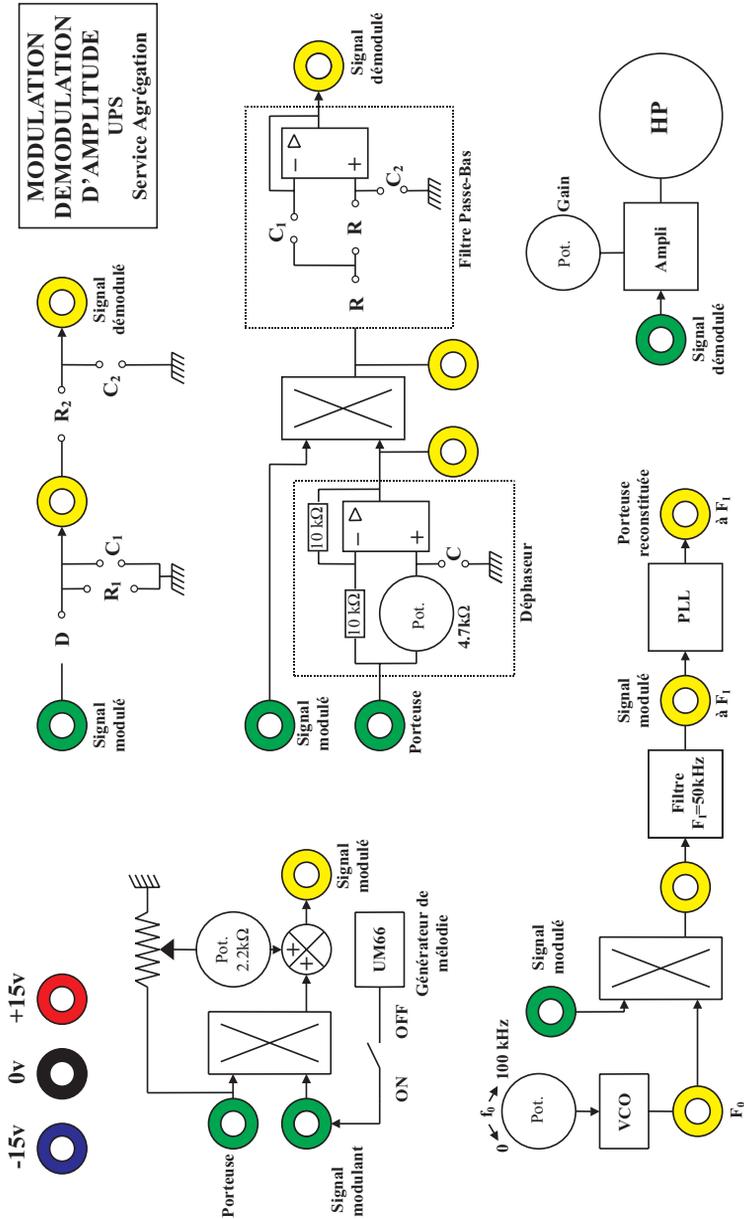


Figure 1 : Face avant de la maquette.

- 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.

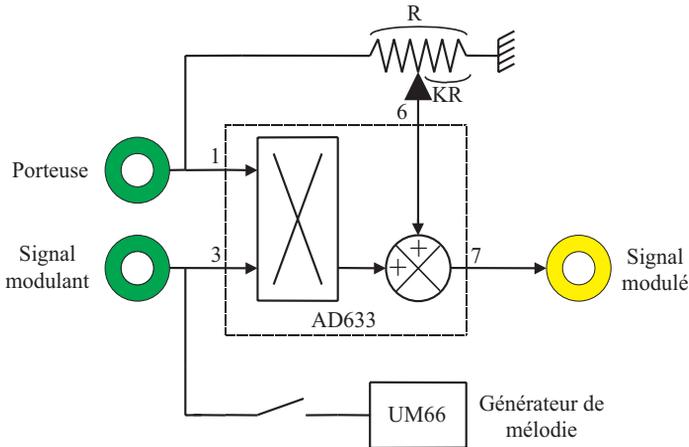


Figure 2 : Circuit de modulation d'amplitude avec ou sans porteuse.

2.1. Principe

Si les signaux d'entrée ont pour expressions :

- porteuse : $\mathcal{V}_p(t) = V_p \cos(\omega_p t)$,
- modulant : $\mathcal{V}_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$,

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

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

soit :
$$\mathcal{V}_{\text{mod}}(t) = KV_p \cos(\omega_p t) [1 + m \cos(\omega_m t)]$$

où l'indice de modulation m vaut :
$$\frac{V_m}{10K}$$

La valeur de K est réglée par un potentiomètre ($0 \leq K \leq 1$). Il est donc possible de faire varier l'indice de modulation sans modifier les amplitudes des signaux d'entrée.

- $K = 0$: Modulation d'amplitude sans porteuse

$$\mathcal{V}_{\text{mod}}(t) = \frac{V_m V_p}{20} [\cos(\omega_p - \omega_m)t + \cos(\omega_p + \omega_m)t]$$

Le spectre du signal modulé contient deux raies à $f_p - f_m$ et $f_p + f_m$.

- $0 < K \leq 1$: Modulation d'amplitude avec porteuse ($m \geq 1$ ou $m < 1$)

$$\mathcal{V}_{\text{mod}}(t) = KV_p \cos(\omega_p t) + \frac{V_m V_p}{20} [\cos(\omega_p - \omega_m)t + \cos(\omega_p + \omega_m)t]$$

Le spectre contient trois raies à $f_p - f_m$ et $f_p + f_m$.

2.2. Exploitation expérimentale

La porteuse est une sinusoïde générée par un GBF, d'amplitude maximum inférieure à 6 V pour éviter la saturation du multiplieur, et ayant une fréquence inférieure à 300 kHz.

Le signal modulant peut être :

- soit une sinusoïde délivrée par un GBF, de fréquence voisine du kHz par exemple, et d'amplitude maximum inférieure à 6 V,
- soit la sortie d'un générateur de mélodie (UM66) délivrant des créneaux dont la fréquence varie au rythme de la mélodie (entre 500 et 1000 Hz).

L'utilisateur pourra :

- visualiser les signaux à l'oscilloscope (*cf. figures 3 et 4*) et réaliser une mesure de m sur le signal modulé,
- faire varier l'indice de modulation grâce au potentiomètre, et réaliser par exemple le passage d'une modulation sans porteuse à une modulation avec porteuse,
- observer le signal modulé à l'analyseur de spectre (*cf. figure 5*),
- utiliser un fil comme antenne émettrice et écouter le signal sur un récepteur radio (début des GO : $f_p = 150 \text{ kHz}$).

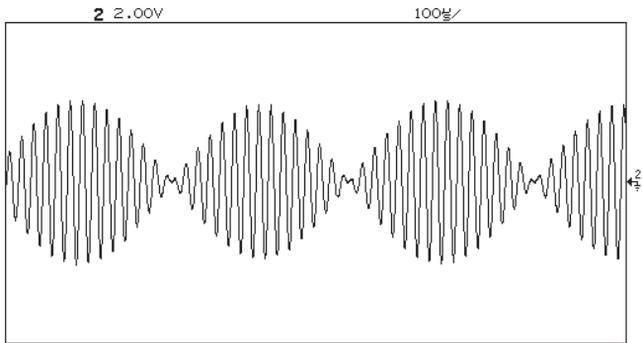


Figure 3 : Forme du signal modulé sans porteuse.

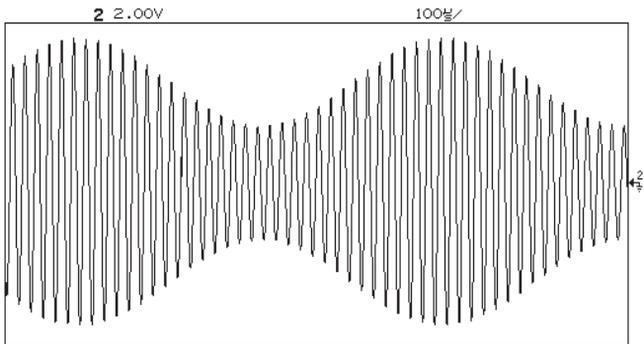


Figure 4 : Forme du signal modulé avec porteuse.

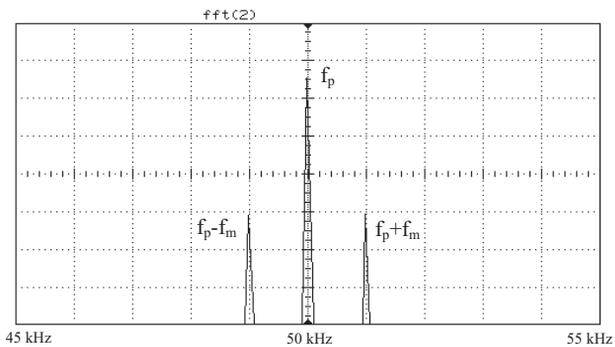


Figure 5 : Spectre du signal modulé avec porteuse.

3. DÉMODULATION PAR DÉTECTION D'ENVELOPPE

Le montage, présenté figure 6, est constitué d'un détecteur crête (D, R_1, C_1) et d'un filtre passe-bas du premier ordre (R_2, C_2). Il permet de réaliser une détection d'enveloppe.

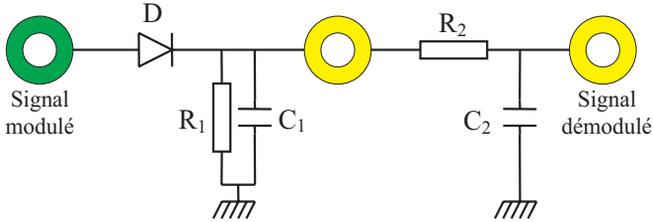


Figure 6 : Circuit de détection d'enveloppe.

3.1. Principe

Le principe de cette méthode de démodulation est de récupérer l'enveloppe supérieure du signal modulé, de manière à obtenir une image du signal modulant.

a) Détecteur crête : D, R_1, C_1

La diode conduit brièvement durant chaque cycle de porteuse, et charge le condensateur C_1 jusqu'à la tension crête. Entre les crêtes, le condensateur se décharge via la résistance R_1 . Si la constante de temps $R_1 C_1$ est bien choisie, la tension récupérée aux bornes de C_1 ressemble à l'enveloppe supérieure, avec une petite ondulation à la fréquence porteuse (cf. figure 7).

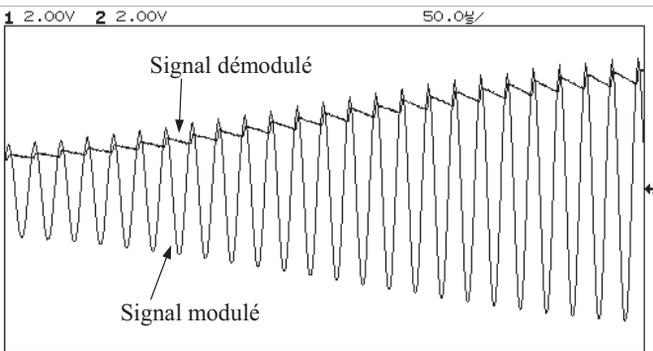


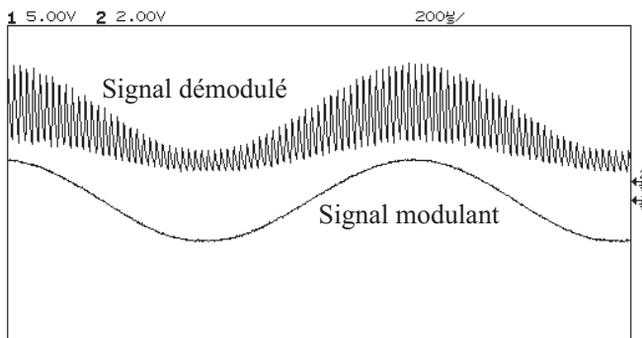
Figure 7 : Charge et décharge de C_1 .

Le choix de R_1C_1 repose sur un compromis (cf. figure 8) :

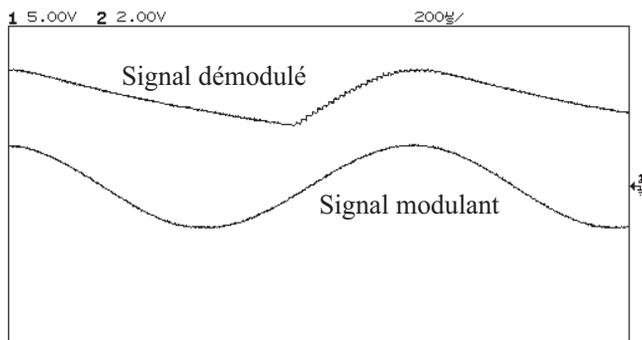
- le temps de décharge du condensateur doit être grand devant la période de la porteuse (on veut limiter l'ondulation),
- la décharge ne doit pas être trop lente car la tension aux bornes de C_1 pourrait quitter l'enveloppe, et donner ainsi une image faussée du modulant.

Les conditions à respecter sont les suivantes [1] :

$$\frac{10}{f_p} < R_1C_1 < \frac{\sqrt{1-m^2}}{2\pi mf_m}$$



a) R_1C_1 trop faible.



b) R_1C_1 trop grand.

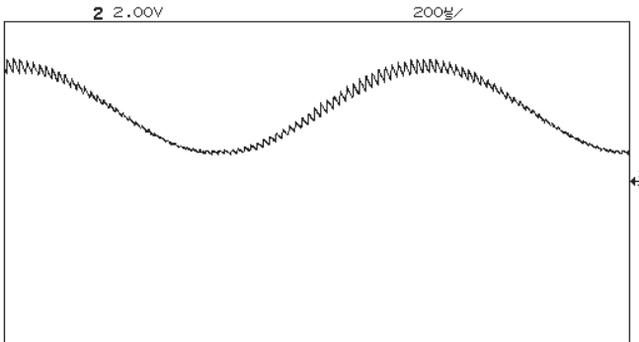
Figure 8 : Influence de la constante de temps R_1C_1 sur la démodulation.

b) Filtre passe-bas : $R_2 C_2$

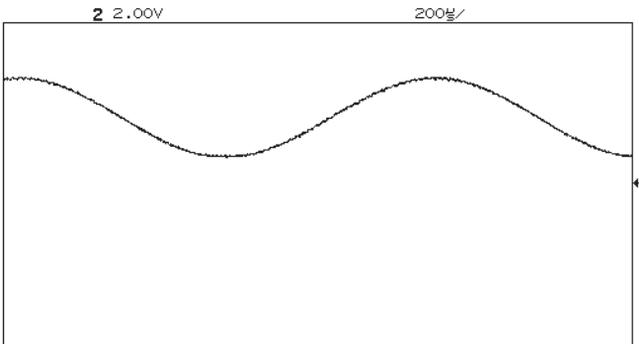
Le filtre passe-bas $R_2 C_2$ permet de supprimer l'ondulation résiduelle (cf. figure 9). Il doit couper la fréquence porteuse et laisser passer la fréquence du modulant :

$$f_p \gg \frac{1}{2\pi R_2 C_2} > f_m$$

On choisira la résistance R_2 grande pour ne pas charger le filtre $R_1 C_1$.



a) Avant le filtre.

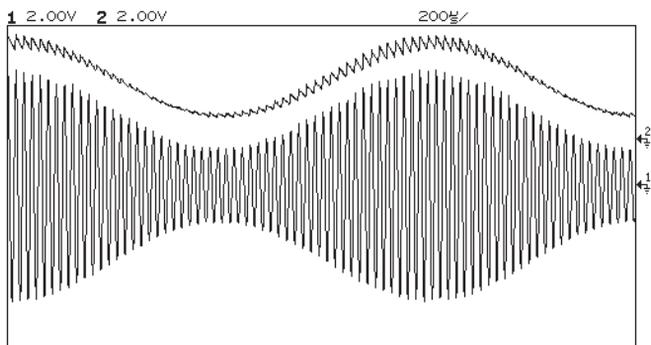


b) Après le filtre.

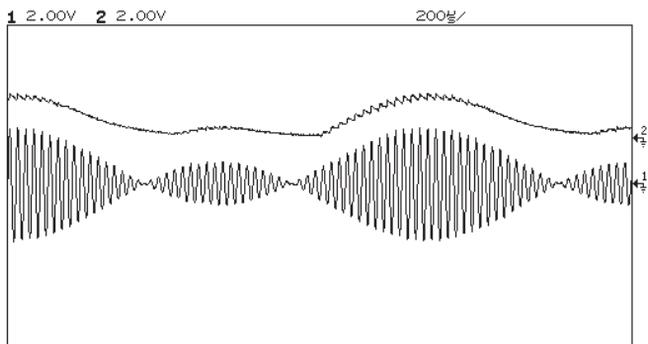
Figure 9 : Filtrage des résidus HF par le filtre $R_2 C_2$.

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.

Même dans le cas où m est inférieur à 1, la démodulation peut être incorrecte à cause du seuil de la diode. En effet, si l'amplitude du signal à démoduler devient inférieure à ce seuil, la diode reste bloquée et le condensateur C_1 se décharge entièrement dans R_1 : le signal obtenu ne suit pas l'enveloppe (cf. figure 11). On pourra alors utiliser une diode à faible seuil comme par exemple une diode schottky (référence BAT42).

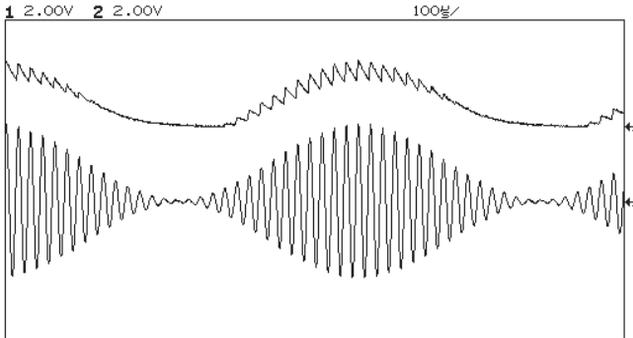


Figure 11 : Mauvaise démodulation due au seuil de diode ($m = 1$).

3.2. Exploitation expérimentale

Le signal modulé peut provenir d'un modulateur extérieur ou de celui de la maquette. L'utilisateur peut changer facilement tous les composants (D, R_1, C_1, R_2, C_2), dont les pattes s'enfichent dans des douilles de 1 mm.

Différents aspects de la démodulation pourront être observés :

- observation de la charge et de la décharge de C_1 (cf. figure 7),
- visualisation du signal démodulé pour différentes valeurs de R_1 et C_1 (cf. figure 8),
- intérêt du filtrage des résidus haute fréquence (cf. figure 9),
- mauvais fonctionnement pour $m > 1$ (cf. figure 10),
- influence du seuil de la diode (cf. figure 11).

4. DÉMODULATION SYNCHRONE

Ce montage (cf. figure 12) permet de réaliser le produit d'un signal modulé par sa porteuse, éventuellement déphasée. Après filtrage des hautes fréquences, on obtient le signal démodulé.

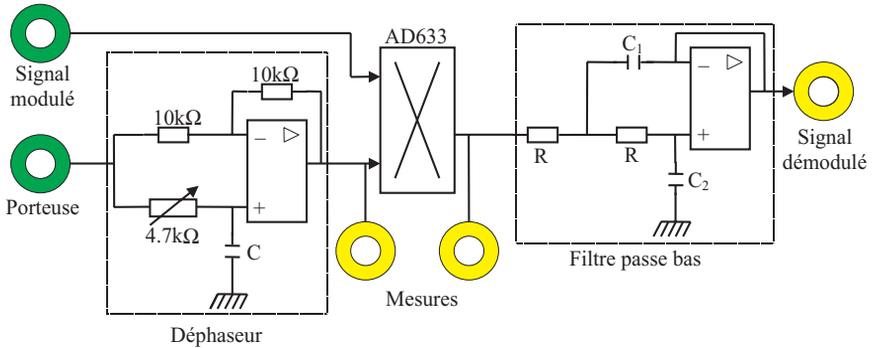


Figure 12 : Circuit de démodulation synchrone.

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 : $\mathcal{V}_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}}[(1 + m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_p t)]$,
- porteuse : $\mathcal{V}_p(t) = V_p \cos(\omega_p t)$,

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

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

et après filtrage ($f_c \ll 2f_p$) :

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

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.

Dans le cas de la réception radio, on ne dispose pas directement de la porteuse. Sa reconstitution peut entraîner l'apparition d'un déphasage fixe ou variable par rapport à la porteuse réelle, dont la présence peut perturber la démodulation. Pour étudier ce problème, on introduit volontairement un déphasage réglable. Il suffit de reprendre le calcul précédent avec :

$$\mathcal{V}_p(t) = V_p \cos(\omega_p t - \varphi)$$

On obtient alors :

$$\mathcal{V}_{\text{demodule}} = \frac{V_p V_{\text{mod}}}{20} \cos \varphi [1 + m \cos(\omega_m t)]$$

La valeur du déphasage de la porteuse (φ) a une importance capitale : en effet, si celui-ci vaut 90° , le signal de sortie est nul et la démodulation est impossible ($\cos 90^\circ = 0$). D'autre part, si ce déphasage est variable (fréquence légèrement différente de la fréquence porteuse réelle), l'amplitude du signal démodulé varie au rythme de $\cos \varphi$ et la démodulation est perturbée : c'est le défaut de «Fading».

b) Étude du circuit déphaseur

On pose :

$\mathcal{V}_e(t) = V_e \cos(\omega t)$ la tension d'entrée,

et $\mathcal{V}_s(t) = V_s \cos(\omega t - \varphi)$ la tension de sortie.

La fonction de transfert du déphaseur est :

$$\frac{\mathcal{V}_s}{\mathcal{V}_e} = \frac{1 - jRC\omega}{1 + jRC\omega}$$

où R est variable (potentiomètre de 4,7 k Ω).

Le déphasage vaut donc $\varphi = 2\text{Arctan}(RC\omega)$.

Les tensions d'entrée et de sortie ont même amplitude ($V_s = V_e$) mais sont déphasées d'un angle φ , compris entre 0 et 180° , et qui dépend de la valeur de $RC\omega$. C et ω étant fixés, le potentiomètre R permettra de faire varier φ .

On calcule C de manière à ce que φ soit égal à 90° au milieu de la plage de variation de R . La relation à vérifier est alors la suivante :

$$RC\omega = 1$$

avec R de l'ordre de 2,3 k Ω .

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.

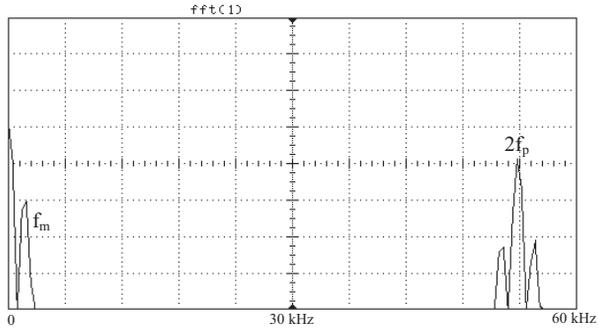


Figure 13 : Spectre après multiplication.

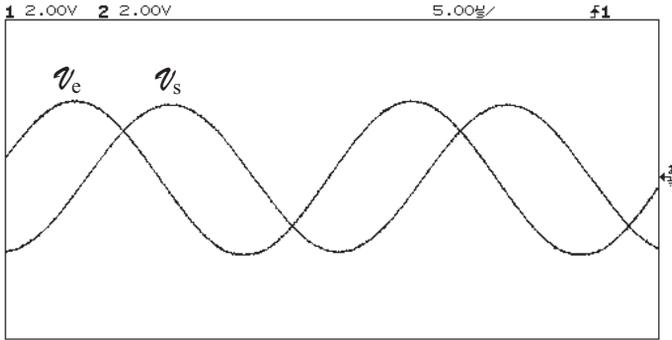


Figure 14 : Signaux à l'entrée et à la sortie du déphaseur ($\varphi = 90^\circ$).

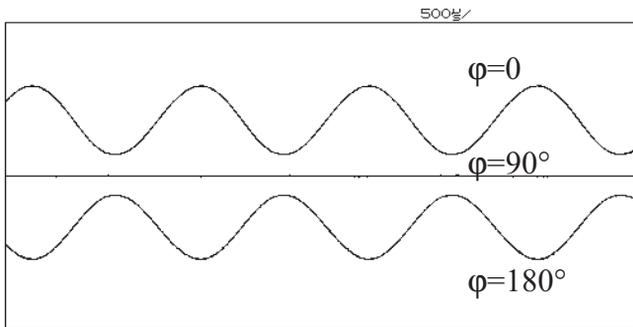


Figure 15 : Signal démodulé pour différentes valeurs de φ .

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 $f_i = 50$ kHz), puis d'une PLL analogique (LM565).

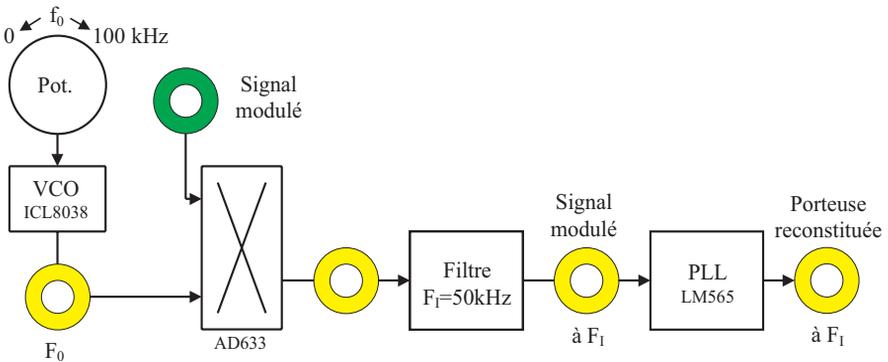


Figure 16 : Circuit de reconstitution de la porteuse à partir du signal modulé.

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_i 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).

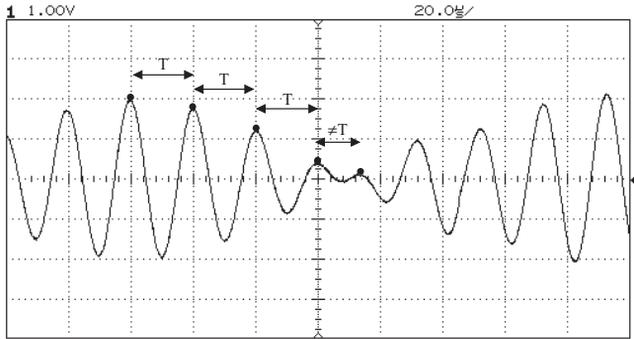


Figure 17 : Mise en évidence d'un saut de phase lors du passage par zéro du signal modulé ($m > 1$).

b) Déplacement du spectre

La fréquence centrale f_I de la PLL est fixe. On ne peut donc accrocher qu'un signal dont la fréquence est proche de f_I . Si l'on veut que le montage marche pour différentes valeurs de la fréquence porteuse f_p (cas de la réception radio), il faut réaliser un déplacement du spectre du signal modulé, de manière à ce que la fréquence d'entrée de la PLL reste proche de f_I quelle que soit la valeur de f_p . C'est le principe du récepteur hétérodyne [2][3].

On réalise cette opération en multipliant le signal modulé par la sortie d'un VCO délivrant une sinusoïde de fréquence f_0 . On a les signaux suivants:

- sortie du VCO : $\mathcal{V}_0(t) = V_0 \cos \omega_0 t$,
- signal modulé : $\mathcal{V}_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}}(1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_p t$,
- sortie du multiplieur : $\frac{V_{\text{mod}}V_0}{20} (1 + m \cos \omega_m t) [\cos(\omega_0 - \omega_p)t + \cos(\omega_0 + \omega_p)t]$

Le spectre du signal modulé est donc translaté autour des fréquences $f_0 - f_p$ et $f_0 + f_p$.

Un filtre passe bande centré sur la fréquence centrale de la PLL permet de ne garder qu'une des deux translations : on a alors $f_I = f_0 - f_p$ ou $f_I = f_0 + f_p$.

Dans le cas où l'on choisit $f_I = f_0 - f_p$, le signal à l'entrée de la PLL a pour expression :

$$\mathcal{V}'_{\text{mod}}(t) = \frac{V_{\text{mod}}V_0}{20} (1 + m \cos \omega_m t) \cos(\omega_0 - \omega_p)t$$

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.

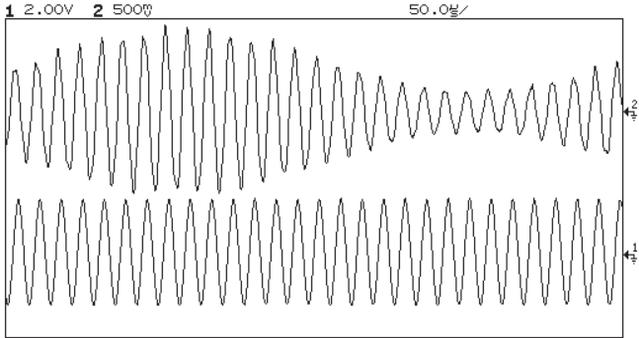


Figure 18 : Signaux d'entrée (2) et de sortie (1) de la PLL accrochée.

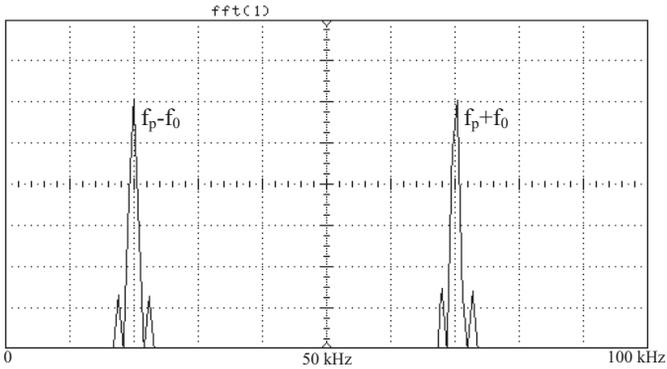


Figure 19 : Déplacement du spectre.

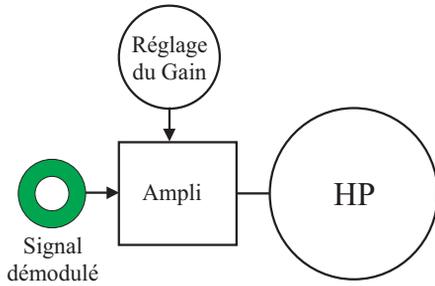


Figure 20 : L'amplificateur associé à son haut-parleur.

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-maquetiste, 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 - Publitronec 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.

Annexe 1

Schéma électrique complet de la maquette

Cette annexe donne le schéma électrique détaillé des principaux éléments de la maquette.

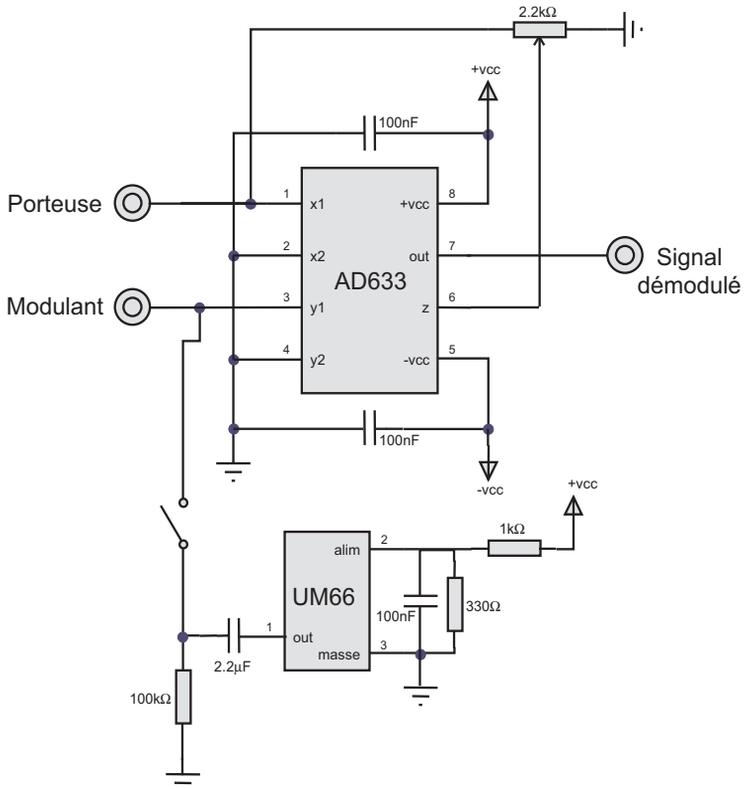


Figure 21 : Schéma électrique du modulateur et du générateur de mélodie.

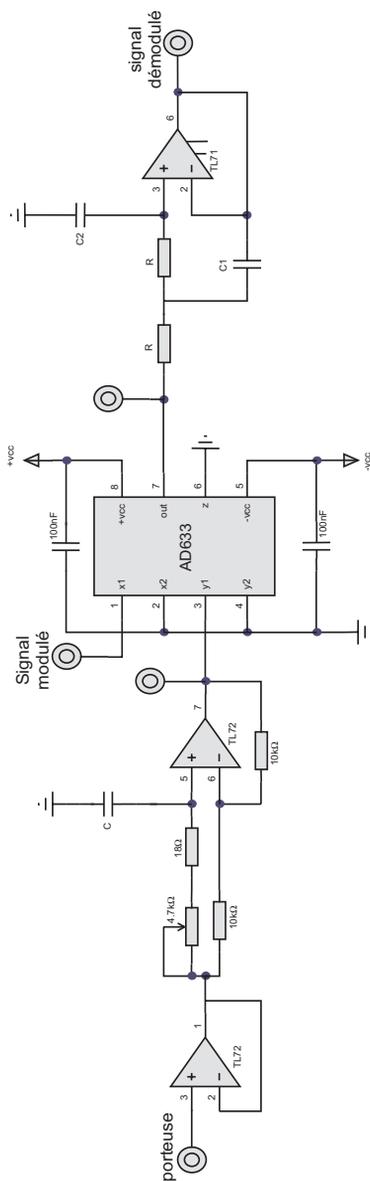


Figure 22 : Schéma électrique du démodulateur synchrone.

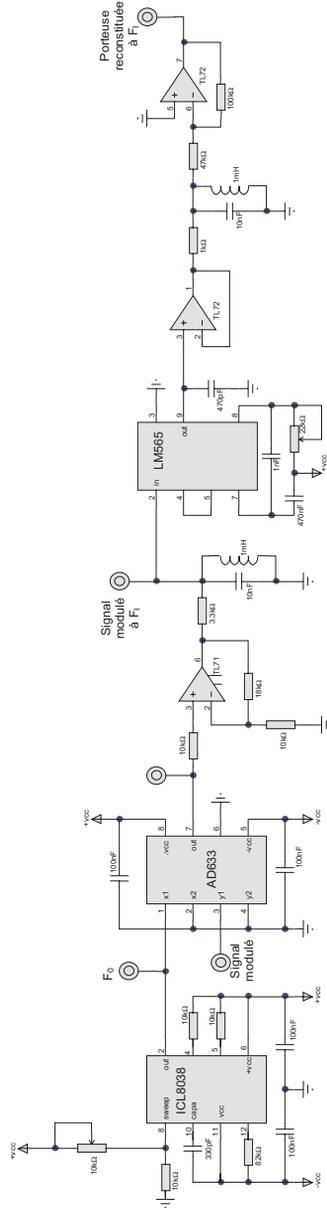


Figure 23 : Schéma électrique du circuit de reconstitution de porteuse.

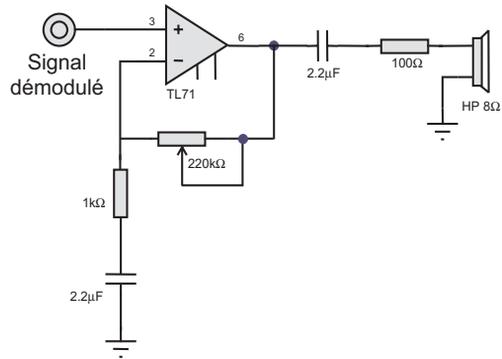


Figure 24 : Schéma électrique de l'amplificateur audio.