

TP1 : Modulation Démodulation AM

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

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 -15v, +15v,
- 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.

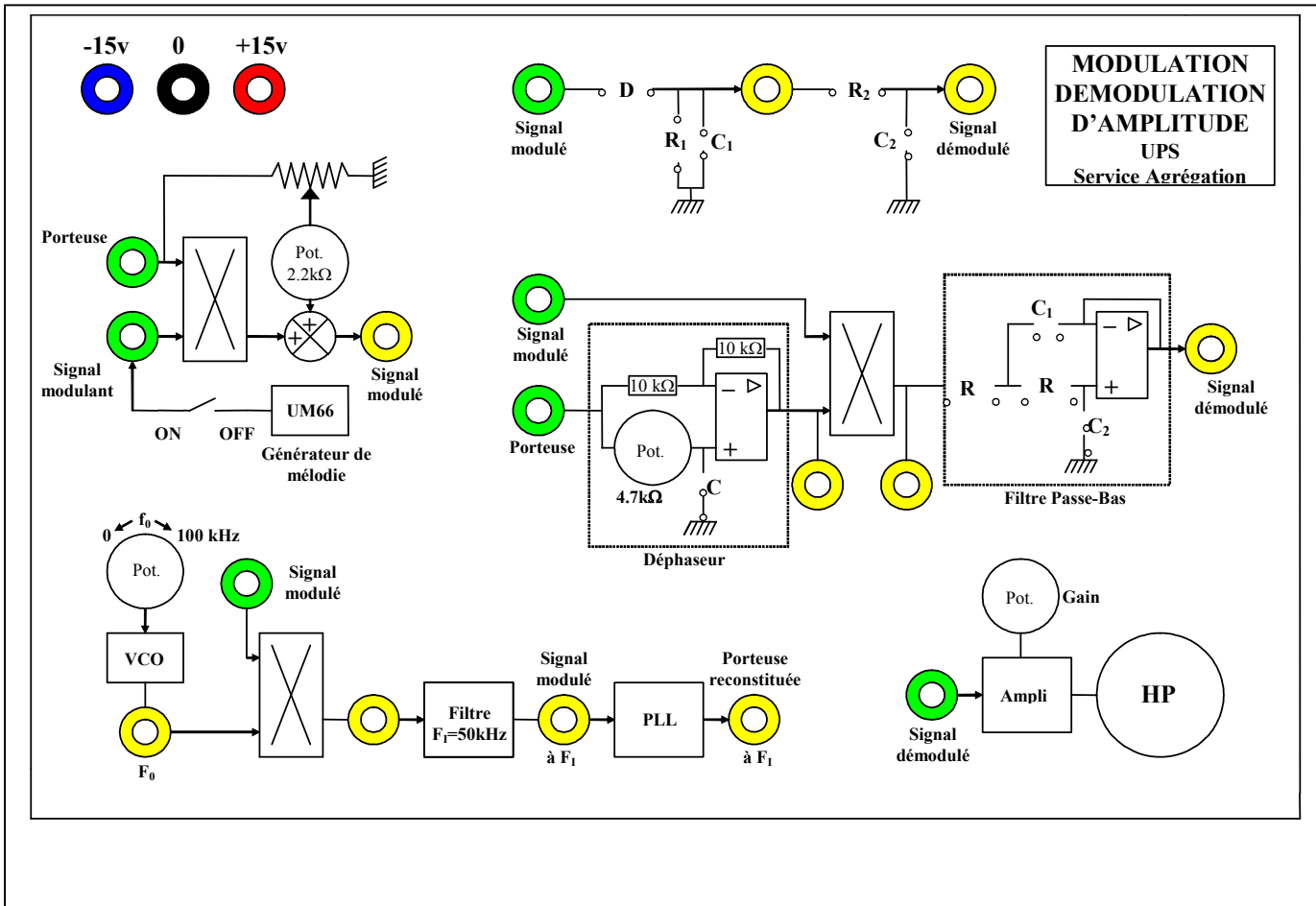


Figure 1 : Face avant de la maquette.

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.

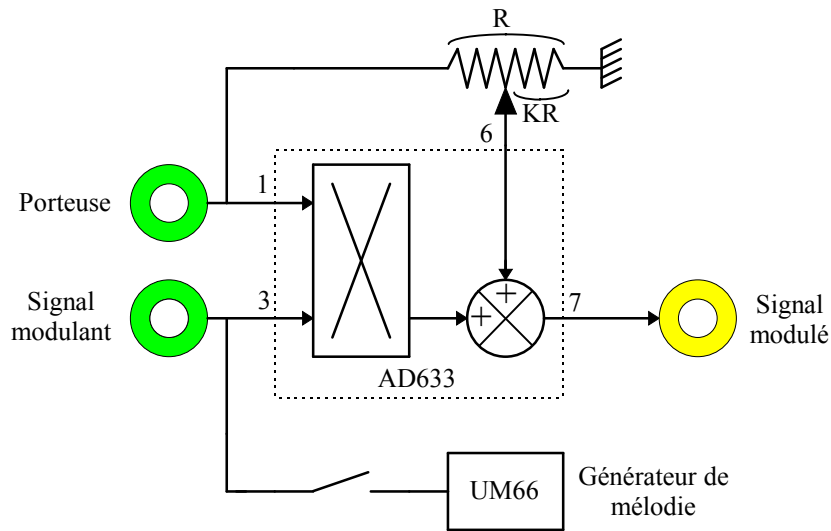


Figure 2 : Circuit de modulation d'amplitude avec ou sans porteuse.

2.1. Principe

Si les signaux d'entrée ont pour expressions:

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

Questions théoriques :

- **Conformément à la documentation technique de l'AD633[4], donner l'équation du signal modulé : $v_{\text{mod}}(t)$.**
- **Montrer que $v_{\text{mod}}(t)$ peut se mettre sous la forme suivante : $v_{\text{mod}}(t) = KV_p \cos(\omega_p t)[1 + m \cos(\omega_m t)]$**
- **Montrer que l'indice de modulation m vaut : $\frac{V_m}{10.K}$**
- **Pour $K=0$:** Donner l'équation du signal modulé : $v_{\text{mod}}(t)$.
Donner l'équation de $v_{\text{mod}}(f)$ et l'allure du spectre du signal modulé
- **Pour $0 < K \leq 1$:** Donner l'équation du signal modulé : $v_{\text{mod}}(t)$.
Donner l'équation de $v_{\text{mod}}(f)$ et l'allure du spectre du signal modulé

2.2. Exploitation expérimentale

La **porteuse** est une sinusoïde générée par un GBF, d'amplitude maximum inférieure à 6v 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 6v,
- 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).

Questions expérimentales :

- **Visualiser les signaux $v_p(t)$ et $v_m(t)$ à l'oscilloscope.**

- Réaliser une mesure de m sur le signal modulé $v_{\text{mod}}(t)$.
- Faire varier l'indice de modulation m 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. (oscilloscope FFT)
- Retrouver les amplitudes et les fréquences des différentes raies.
- Utiliser un fil comme antenne émettrice et écouter le signal sur un récepteur radio (début des GO: $f_p=150$ kHz).

3. DEMODULATION PAR DETECTION D'ENVELOPPE

Le montage, présenté figure 3, 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.

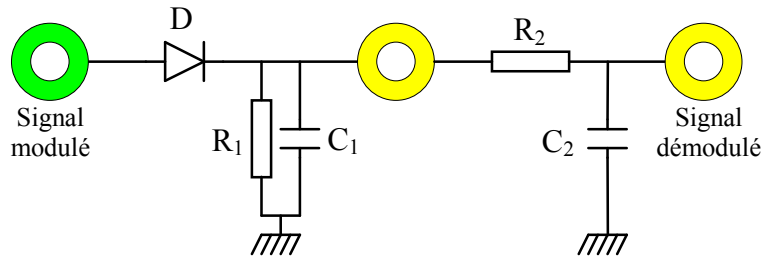


Figure 3 : Circuit de détection d'enveloppe.

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_1C_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.

Le choix de R_1C_1 repose sur un compromis :

- 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 :

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

Questions théoriques :

- Retrouver les conditions sur R_1C_1 ?
- Dimensionner R_1 et C_1 ?

Questions expérimentales :

- Visualiser les signaux $v_m(t)$ et $v_{\text{mod}}(t)$ après le détecteur crête appelé ($v_{\text{md}}(t)$) à l'oscilloscope.
- Visualiser la charge et la décharge de C_1
- Conclure sur différentes valeurs de R_1C_1 ?

b) Filtre passe bas: R_2, C_2

Le filtre passe bas R_2C_2 permet de supprimer l'ondulation résiduelle. Il doit couper la fréquence porteuse et laisser passer la fréquence du modulant:

Questions théoriques :

- **Intérêt du filtrage des résidus haute fréquence ?**
- **Quelles sont les conditions sur R_2C_2 ?**
- **Dimensionner R_2 et C_2 . Comment faut-il choisir la résistance R_2 ?**

Questions expérimentales :

- **Visualiser les signaux $v_{md}(t)$ avant le filtre et $v_{md}(t)$ après le filtre $v_{mdf}(t)$ à l'oscilloscope.**
- **Conclure sur différentes valeurs de R_1C_1 ?**

c) Limitations

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

Questions expérimentales :

- **Visualiser les signaux modulé et démodulé avec $m < 1$ et avec $m > 1$.**
- **Conclure ?**

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. On pourra alors utiliser une diode à faible seuil comme par exemple une diode Schottky (référence BAT42).

Questions expérimentales :

- **Montrer la limitation du au seuil de la diode ?.**
- **Conclure ?**

4. DEMODULATION SYNCHRONE

Ce montage (cf figure 4) permet de réaliser le produit d'un signal modulé par sa porteuse, éventuellement déphasée. Après filtrage des hautes fréquences, on obtient le signal démodulé.

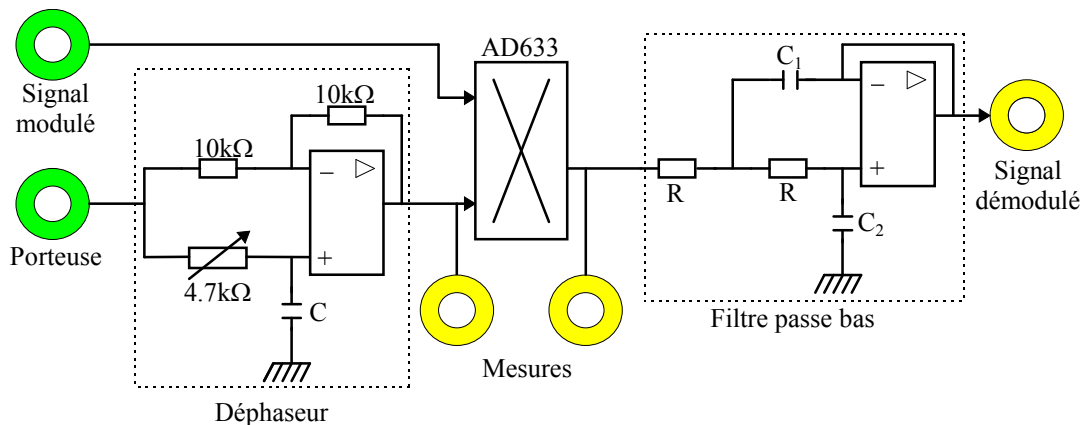


Figure 4 : Circuit de démodulation synchrone.

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:

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

$$\text{-porteuse: } V_p(t) = V_p \cos(\omega_p t),$$

Questions théoriques :

- **Conformément à la documentation technique de l'AD633, donner l'équation du signal en sortie du multiplieur : $\mathcal{V}_x(t)$.**
- **Donner après filtrage l'équation du signal démodulé : $\mathcal{V}_{\text{démod}}(t)$.**
- **Montrer que pour une modulation avec porteuse, 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.**

- **Cette démodulation fonctionne t'elle quelle que soit la valeur de l'indice de modulation m ?**
- **Quelle est la différence avec une modulation d'amplitude sans porteuse ?**

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:

$$v_p(t) = V_p \cos(\omega_p t - \varphi)$$

On obtient alors:

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

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) Etude du circuit déphaseur

On pose:

$$v_e(t) = V_e \cos(\omega t) \quad \text{la tension d'entrée,}$$

et
$$v_s(t) = V_s \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{la tension de sortie.}$$

Questions théoriques :

- **Donner l'équation de la fonction de transfert $v_d(j\omega) / v_e(j\omega)$.**
- **Donner l'équation du déphasage φ .**
- **Dimensionner R et C de manière à ce que φ soit égal à 90° .**

Questions expérimentales :

- **Réaliser le câblage et montrer que l'on a le déphasage désiré.**

c) Etude 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.

Questions théoriques :

- **Donner la fonction de transfert sous forme canonique.**
- **En déduire la pulsation naturelle ω_n et le facteur d'amortissement ξ .**

Questions expérimentales :

- **Calculer R, C1, et C2 pour avoir:**

$$\xi = 0.7$$

et

$$f_m < \frac{\omega_n}{2\pi} \ll 2f_p$$

- **Tracer le diagramme de Bode du filtre.**

d) Etude 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.

Questions expérimentales :

- **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.

pour différentes valeurs de φ :

- Visualiser l'entrée et la sortie du déphaseur à l'oscilloscope.

- Observer l'influence du déphasage sur le signal démodulé :

➢ $\varphi=0^\circ$: 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.

- Mettre 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 5) 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).

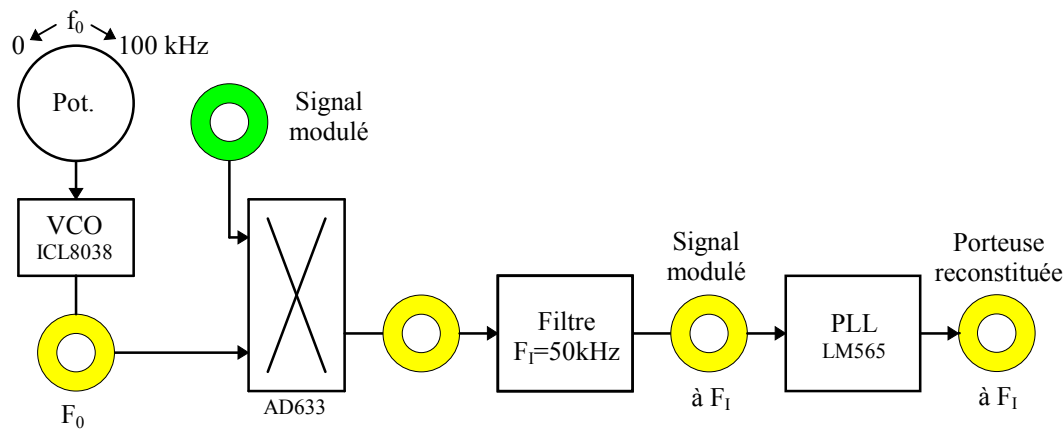


Figure 5 : Circuit de reconstitution de la porteuse à partir du signal modulé.

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.

b) Déplacement du spectre

La fréquence centrale f_1 de la PLL est fixe. On ne peut donc accrocher qu'un signal dont la fréquence est proche de f_1 . 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_1 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: $\mathcal{V}_{\text{mod}}(t) = V_{\text{mod}}(1 + m\cos\omega_m t)\cos\omega_p t$

Questions théoriques :

- **Conformément à la documentation technique de l'AD633, donner l'équation du signal en sortie du multiplieur : $\mathcal{V}_x(t)$. ?**

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 $f_1 = f_0 - f_p$ ou $f_1 = f_0 + f_p$.

- **Dans le cas où on choisit $f_1 = f_0 - f_p$, donner l'expression du signal à l'entrée de la PLL ?**

Questions expérimentales :

Visualiser le signal modulé et la sortie de la PLL. Conclusion ?

c) Démodulation synchrone avec reconstitution de porteuse

On dispose maintenant:

- d'un signal modulé en amplitude V'_{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 en 4.1.

d) Etude expérimentale

La fréquence centrale de la PLL a été fixée à $f_1 = 50$ 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 $f_p - f_0 = f_1 = 50$ kHz pour que la PLL s'accroche.

Questions expérimentales :

- **Visualiser l'accrochage de la PLL en faisant varier f_0 .**
- **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.**
- **Démoduler un signal modulé en amplitude sans disposer de la porteuse en combinant les montages décrits en 4.1 et 4.2.**

5. ECOUTE DU SIGNAL DEMODULE

Le montage (cf figure 6) est constitué d'un amplificateur de gain variable suivi d'un haut-parleur.

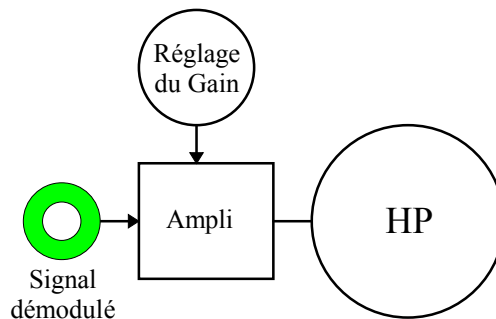


Figure 6 : L'amplificateur associé à son haut-parleur.

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.

7. 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, pp347-348.
- [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.

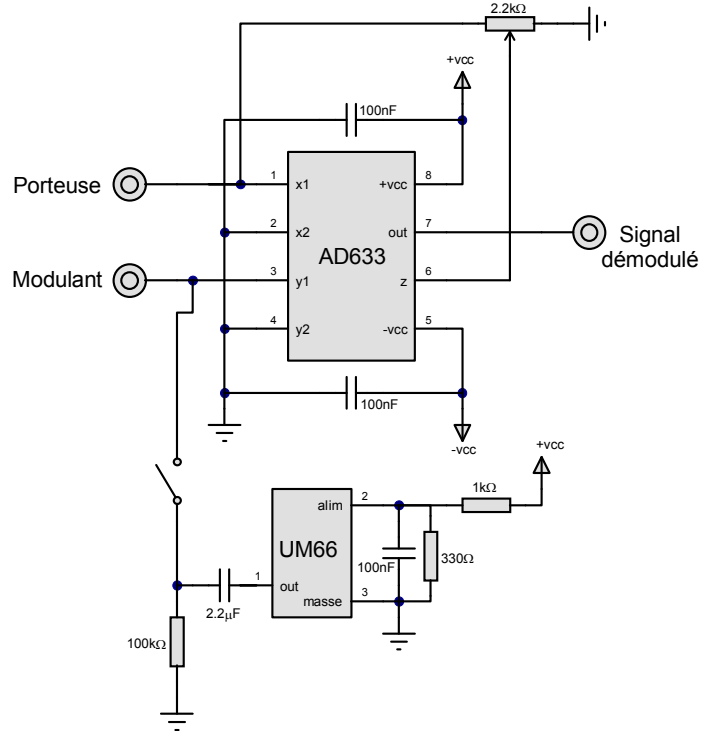


Figure 7 : Schéma électrique du modulateur et du générateur de mélodie.

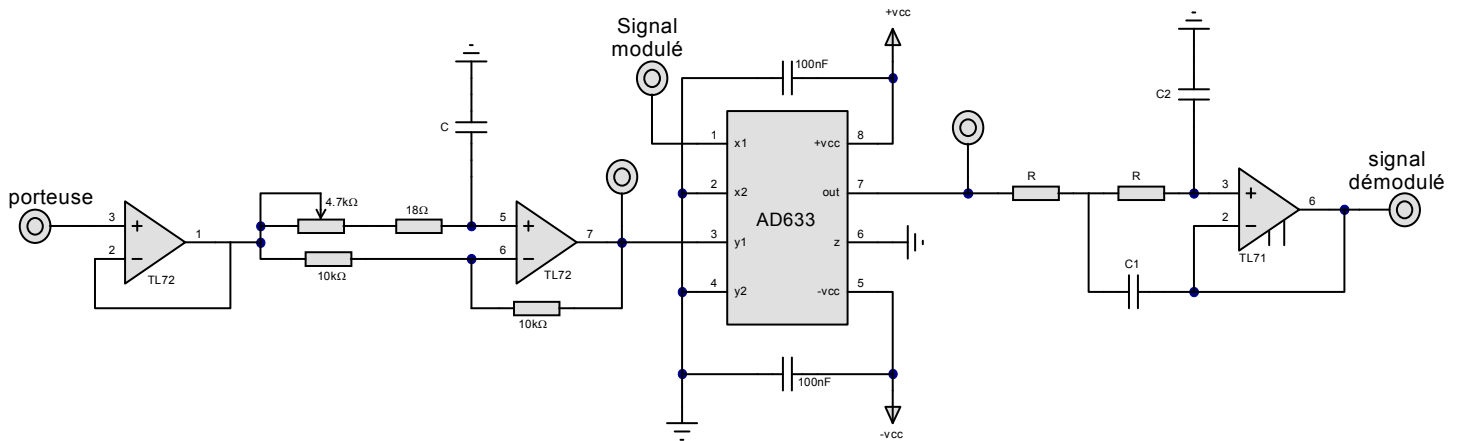


Figure 8 : Schéma électrique du démodulateur synchrone.

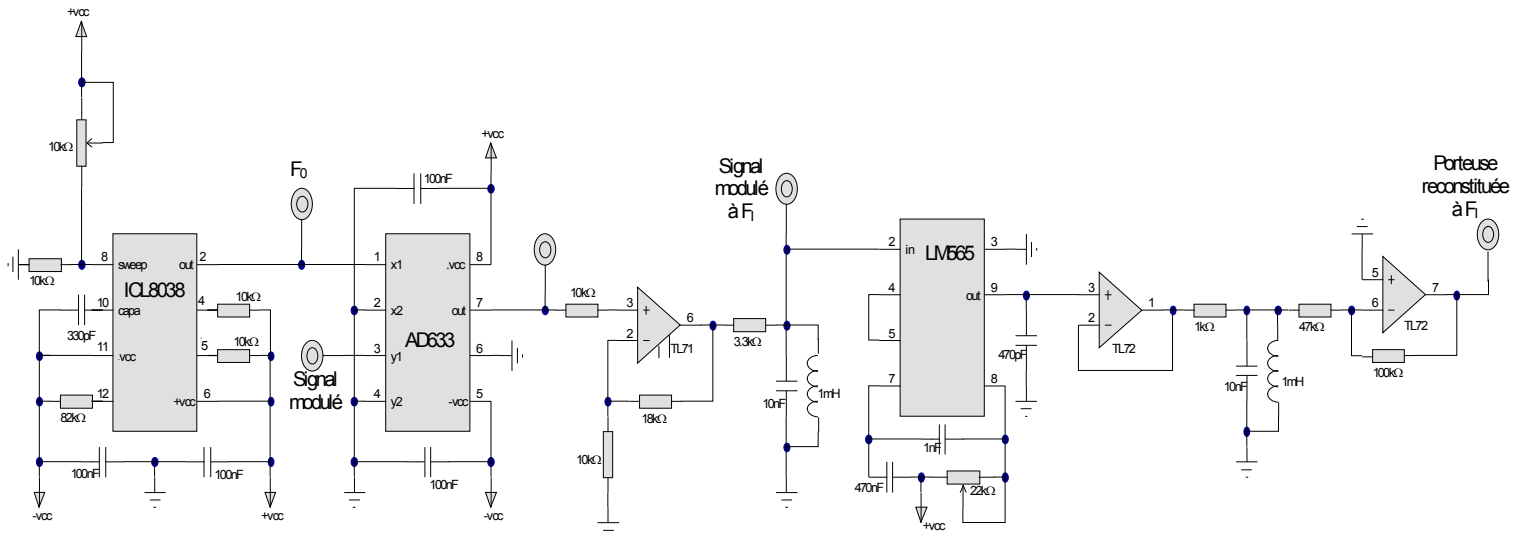


Figure 9 : Schéma électrique du circuit de reconstitution de porteuse.

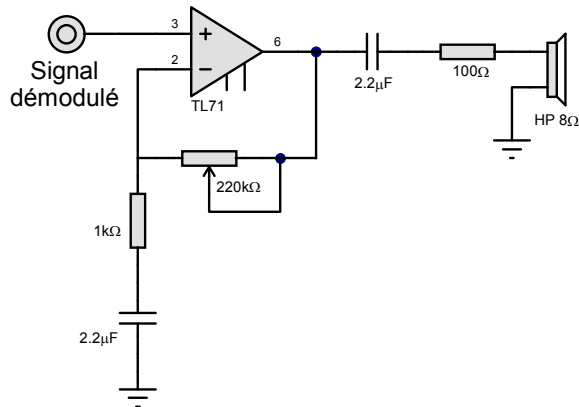


Figure 10 : Schéma électrique de l'amplificateur audio.