

Modulation d'amplitude

A propos d'une maquette didactique

Propositions de T.P.

par J.-C. FROMONT, J.-Y. GANCEL et P. HALLIER
Centre de Ressources de l'Académie de Paris
Lycée Jacquard - 2, rue Bouret - 75019 Paris

RÉSUMÉ

Dans le cadre des activités du Centre de Ressources, nous avons été amené à concevoir une maquette permettant :

- la modulation en amplitude de divers signaux,
- la transmission par voie hertzienne ou par signal ultrasonore (curieux mais probant),
- la démodulation par détecteur à diode ou démodulateur synchrone.

La maquette couvre donc les besoins de la TS mais va au-delà.

SYNOPTIQUE

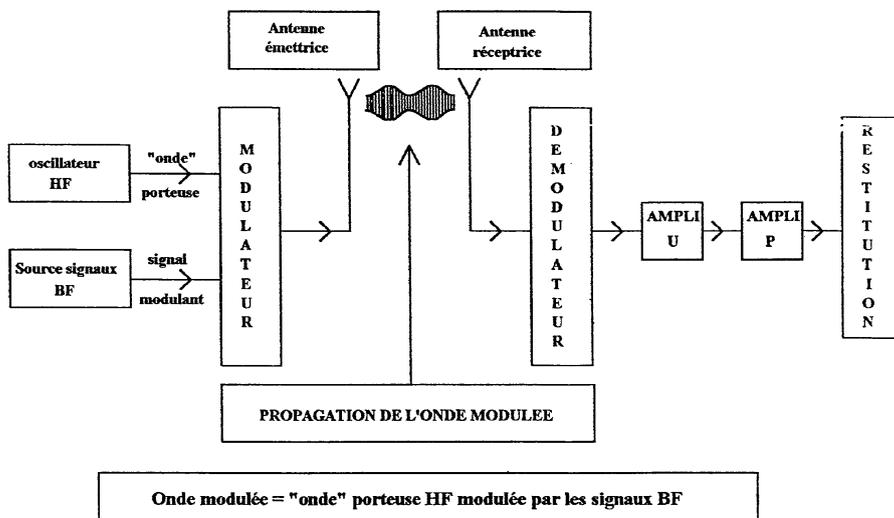


Figure 1

1. ÉMISSION

1.1. Oscillateur

Sa fonction est de générer la tension sinusoïdale de haute fréquence, tension qui fournira la porteuse HF.

L'oscillateur est construit autour d'un circuit LC de fréquence propre $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Un montage électronique adapté doit fournir, à chaque instant, une puissance compensant exactement la puissance perdue par effet Joule dans la résistance du circuit.

Dans le système à ultrasons utilisé ici, la fréquence de la porteuse étant égale à 40 kHz, nous pouvons utiliser un montage à résistance négative organisé autour d'un amplificateur opérationnel.

Une bobine à noyau de ferrite mobile permet de régler la fréquence à sa valeur optimale : fréquence de résonance du système Émetteur - Récepteur d'ultrasons.

Un condensateur, une résistance ajustable pour optimiser la puissance reçue par le dipôle LC, deux résistances assurant réaction positive et réaction négative, complètent le montage.

Oscillateur à «résistance négative»

- Structure série

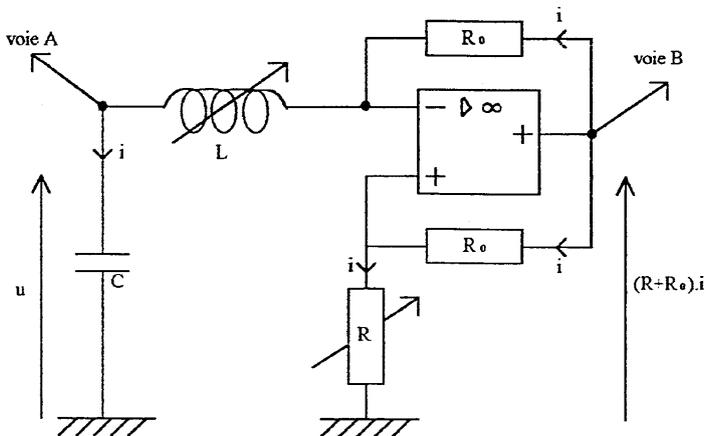


Figure 2

Vérifier que :

- u et i sont en quadrature,
- si R est trop grand, on observe un phénomène de saturation (trop de puissance fournie au dipôle LC par le montage à résistance négative).

- *Structure parallèle*

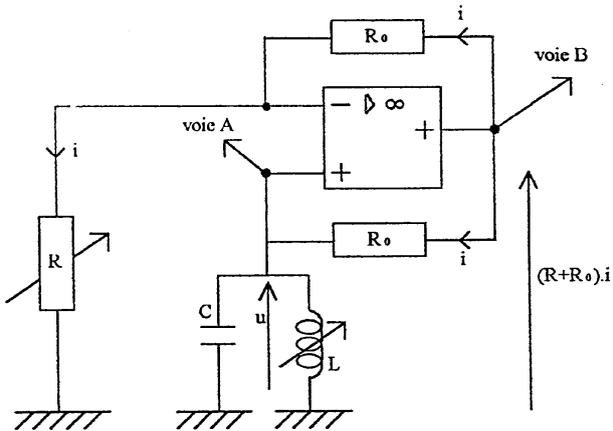


Figure 3

1.2. Élaboration du signal à transmettre

Le signal à transmettre est issu soit d'un GBF (indispensable pour l'analyse et les réglages de la chaîne), ou d'un baladeur voire d'un microphone.

Le montage est un simple amplificateur inverseur avec une capacité de couplage empêchant la transmission d'une composante continue (c'est en fait un filtre passe haut de fréquence de coupure égale à $\frac{1}{2\pi R_1 C}$; avec les valeurs choisies ici, on a $f_c < 100$ Hz, ce qui est tout à fait suffisant pour la transmission acoustique).

• Montage

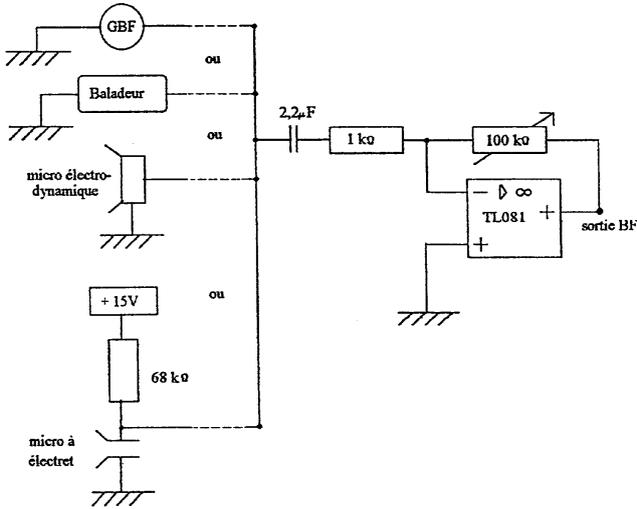


Figure 4

1.3. Modulateur

Son rôle est d'associer, de mélanger, le signal BF à transmettre à la porteuse HF.

La modulation est possible grâce à un multiplieur.

Plusieurs méthodes sont possibles ; seuls deux cas sont explicités.

Le multiplieur AD633JN :

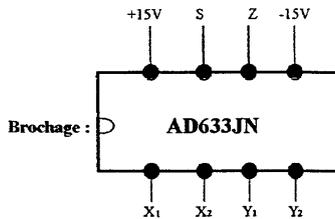


Figure 5

Fonction de transfert :

$$V_S = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10} + Z$$

a - Modulation par simple multiplication

X_2 , Y_2 et Z_2 sont reliés à la masse :

$$\Rightarrow V_S = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10}$$

b - Modulation par multiplication et addition de la porteuse

X_2 et Y_2 à la masse, Z_2 relié à X_1 :

$$\Rightarrow V_S = \frac{X_1 \cdot Y_1}{10} + X_1 = X_1 \cdot \left(1 + \frac{Y_1}{10} \right)$$

Soit :

- porteuse HF $u_1(t) = A \cdot \cos \Omega t$ appliquée en X_1 ,
- signal BF $u_2(t) = a \cdot \cos \omega t$ appliqué en Y_1 .

$m = \frac{a}{10}$: indice ou taux de modulation.

Par simple multiplication on obtient :

$$u_{Sa}(t) = A \cdot m \cdot \cos \omega t \cdot \cos \Omega t$$

ou
$$u_{Sa}(t) = A \cdot \frac{m}{2} [\cos (\Omega - \omega) t + \cos (\Omega + \omega) t]$$

Par multiplication et addition de la porteuse, on obtient :

$$u_{Sb}(t) = A \cdot (1 + m \cdot \cos \omega t) \cdot \cos \Omega t$$

ou
$$u_{Sb}(t) = A \cdot \cos \Omega t + A \cdot \frac{m}{2} [\cos (\Omega - \omega) t + \cos (\Omega + \omega) t]$$

Remarque : $u_{Sb}(t) = A \cdot \cos \Omega t + u_{Sa}(t)$

1.3.1. Formalisme simplifié*

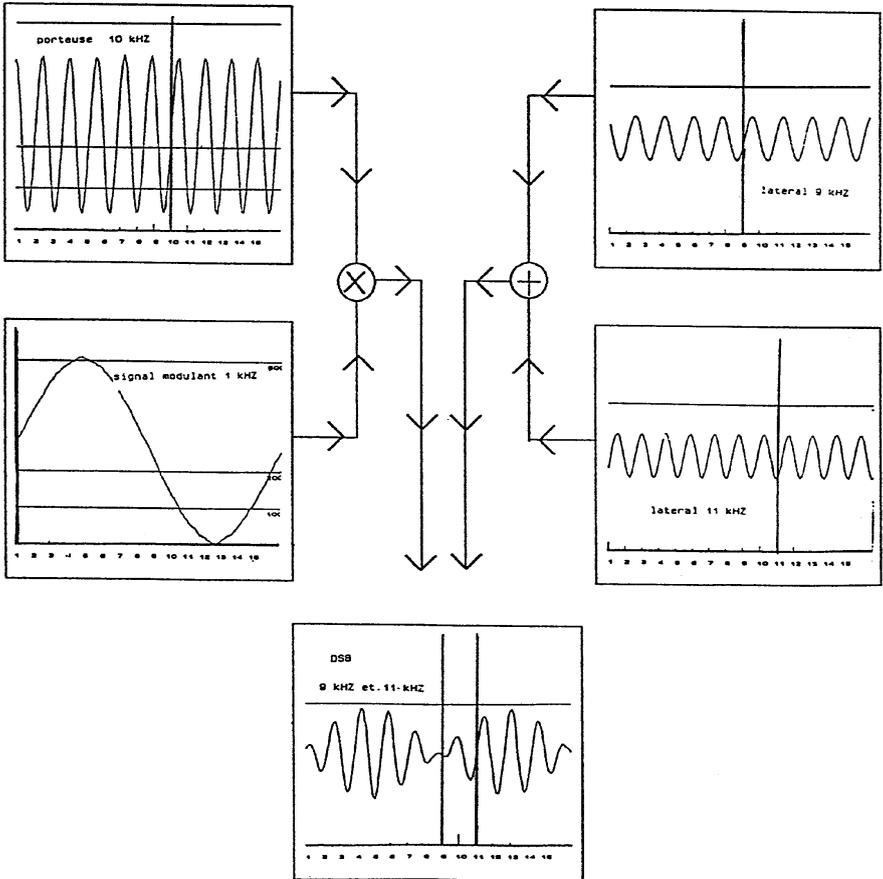
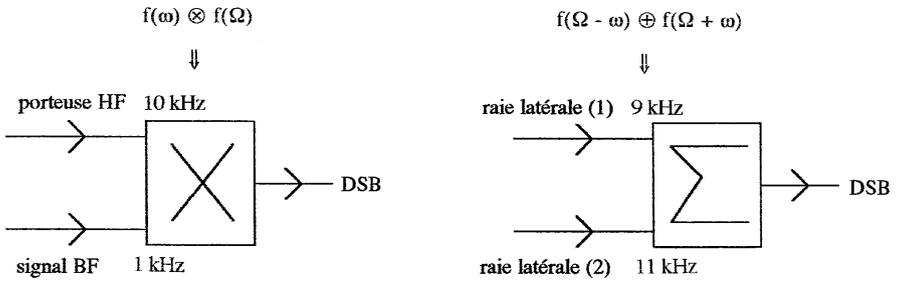
$$U_{sa} = f(\omega) \otimes f(\Omega) = f(\Omega - \omega) \oplus f(\Omega + \omega)$$

$$U_{sb} = f(\Omega) \otimes [1 \oplus f(\omega)] = f(\Omega) \oplus f(\Omega - \omega) \oplus f(\Omega + \omega)$$

Remarques : Par simple multiplication, la raie centrale correspondant à la porteuse HF est absente du spectre de l'onde modulée ; c'est pourquoi la modulation par simple multiplication est souvent appelée DSB («double side band») avec porteuse (cas b) ou sans porteuse (cas a).

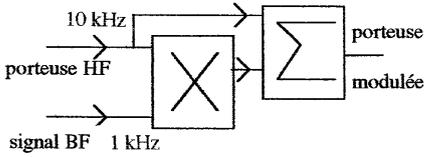
* Ce formalisme «maison» est illustré par les schémas, chronogrammes et spectres qui suivent. Il a l'intérêt d'aider à l'analyse de la structure spectrale.

a - Modulation DSB par simple multiplication

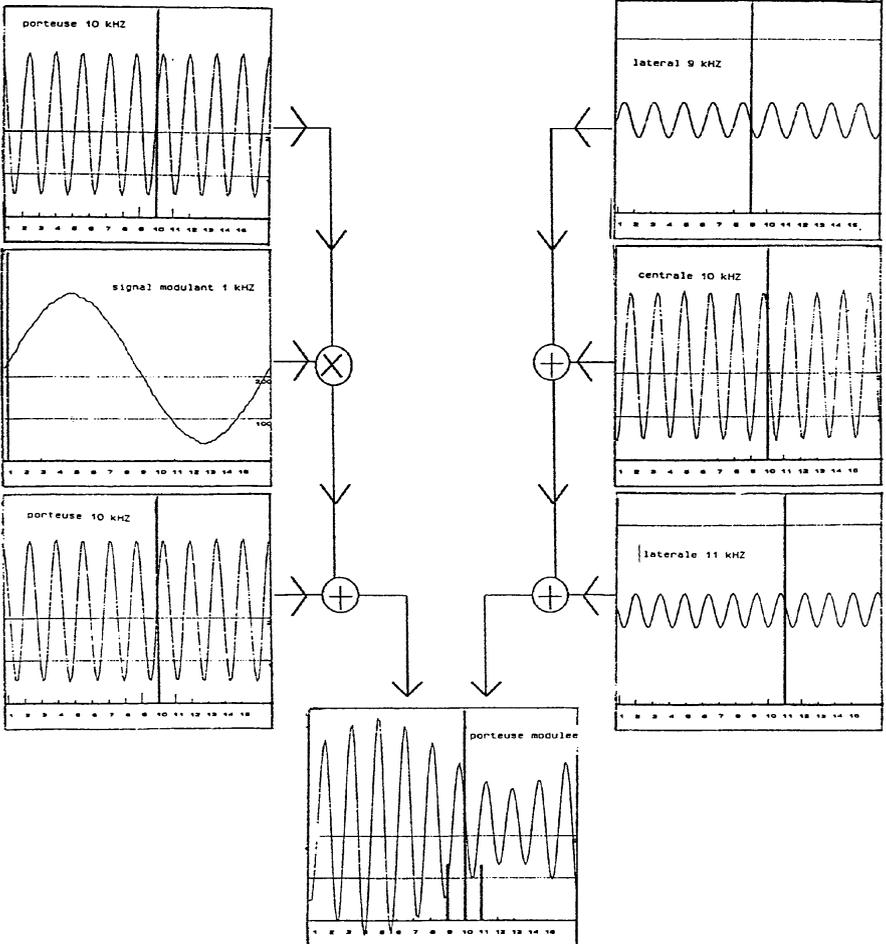
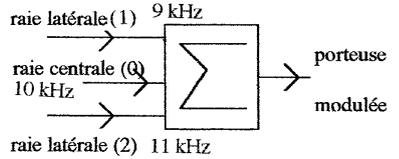


b - Modulation DSB avec porteuse

$$[f(\omega) \otimes f(\Omega)] \oplus f(\Omega)$$



$$f(\Omega - \omega) \oplus f(\Omega) \oplus f(\Omega + \omega)$$



1.3.2. **Proposition de T.P. : Modulation d'amplitude**• **Objectifs**

- Apprendre à reconnaître une courbe de modulation.
- Identifier les paramètres agissant sur la modulation.
- Mesurer un taux de modulation.

• **Matériel par groupe**

- Deux générateurs de fonctions (un pour la HF + un pour la BF).
- Un multiplieur AD633JN sur support.
- Un oscilloscope.
- Une alimentation stabilisée symétrique (+ 15 V ; 0 V ; – 15 V).

Remarque : Il est possible de remplacer le générateur délivrant la HF par un oscillateur à amplificateur opérationnel et résistance négative ; il faut alors prévoir en plus :

- un AOP TL081 sur support,
- deux résistances de réaction de valeur supérieure ou égale à 10 k Ω ,
- une bobine d'inductance L et de résistance r,
- un condensateur de capacité C,
- une résistance ajustable de valeur maximale supérieure à r,
- un potentiomètre à placer en sortie de l'AOP pour pouvoir régler l'amplitude de la tension HF.

L et C doivent être choisies de sorte que $f_{HF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 100 \text{ kHz.}^*$

Les bobines moulées (1 mH ; 60 Ω) fabriquées par Secr e conviennent très bien, mais les bobines   noyau de ferrite récupérées sur les téléviseurs conviennent tout aussi bien, sinon mieux (L réglable).

* ou 40 kHz dans le cas de la transmission par ultrasons.

• Montage

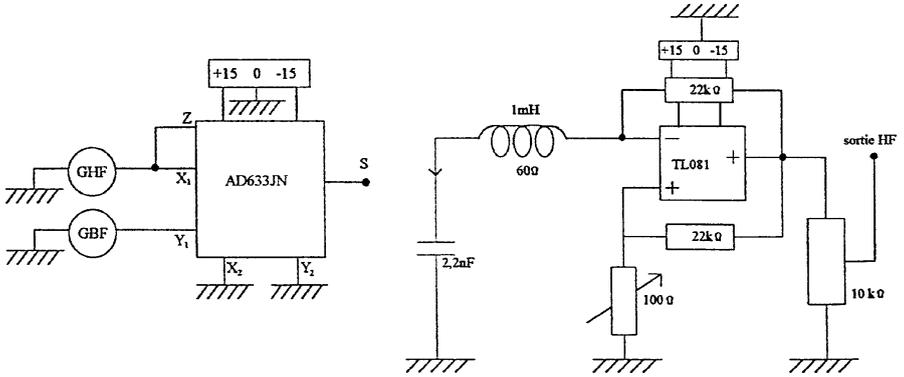


Figure 8 : Exemple d'oscillateur HF à $R < 0$ délivrant une fréquence de 100 kHz environ, à amplitude de sortie réglable.

• Protocole expérimental

- Observer la tension HF et la tension BF sur chacune des voies de l'oscilloscope en synchronisant sur l'une ou sur l'autre de ces deux voies.
- Régler les fréquences de sorte qu'il y ait un rapport cent entre ces fréquences (par exemple 100 kHz et 1 kHz). Les mesurer.
- Régler l'amplitude de la tension HF environ au tiers de la tension d'alimentation des circuits intégrés (CI) (4 à 5 V par exemple) et celle de la tension BF à 5 V environ.
- Observer la tension modulée en amplitude sur l'une des voies et une à deux périodes de la tension BF sur l'autre.
- Comparer la période de l'enveloppe de la tension modulée à celle de la tension BF.
- Comparer la période de la tension modulée à celle de la tension HF.
- Constaté que l'enveloppe est une «courbe fictive».
- Revenir à l'observation globale de l'onde modulée et mesurer le taux de modulation.

Deux méthodes possibles :

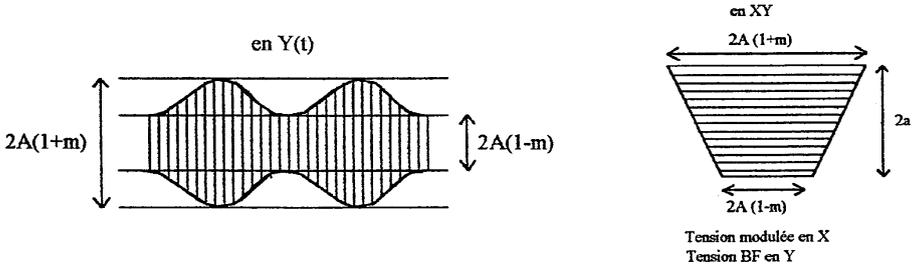


Figure 9

Dans les deux cas, on a :
$$m = \frac{2A(1+m) - 2A(1-m)}{2A(1+m) + 2A(1-m)}$$

- Faire varier a et observer l'effet produit sur m .
- Quand on fait varier a (en observation XY), on justifie l'appellation profondeur de modulation souvent utilisée pour m .
- Observer l'allure des oscillogrammes lorsque $m > 1$.

Hors programme :

- mettre l'entrée Z à la masse,
- observer la différence entre modulation DSB par simple multiplication et modulation DSB par multiplication et addition.

1.4. Antenne émettrice

a - Sur notre maquette, elle est constituée d'un émetteur d'ultrasons dont la fréquence est de 40 kHz.

Il suffit de brancher cet émetteur en sortie du multiplieur.

On choisit un condensateur de capacité telle qu'avec la bobine utilisée, on puisse obtenir cette fréquence de 40 kHz pour la porteuse HF.

Pour optimiser le réglage, on place un récepteur d'ultrasons en face de l'émetteur et on cherche la fréquence de résonance de l'ensemble {E.US ; R.US} en déplaçant le noyau de ferrite à l'intérieur de la bobine (bobine récupérée sur un téléviseur).

Remarques : Nous **insistons** sur la nécessité de prévenir les élèves qu'il ne s'agit que d'une **simulation** ; dans la réalité la propagation se fait par onde électromagnétique qui n'a pas besoin de milieu matériel pour se propager.

Pour obtenir une modulation d'amplitude (DSB avec porteuse) performante, il faut atteindre un rapport cent entre la fréquence HF de la porteuse et la fréquence BF du signal à transmettre. La fréquence de 40 kHz est donc trop faible si nous voulons transmettre tout le spectre audio (théoriquement de 20 Hz à 20 kHz).

De plus la bande passante des transducteurs ultrasonores n'est que de 1 kHz ce qui signifie que tout le signal modulant de fréquence supérieure à 500 Hz est atténué.

Notre système de transmission est donc cohérent mais très peu performant (les aigus sont très fortement atténués).

Dans la réalité, les fréquences des porteuses AM (GO et PO) sont de l'ordre de 100 kHz à 1 MHz ce qui est meilleur que notre système mais encore trop limité pour pouvoir transmettre les harmoniques élevées qui font la qualité d'une chaîne HIFI à modulation de fréquence.

b - Si nous remplaçons l'émetteur d'ultrasons par un fil (rigide ou souple) dont une extrémité est «en l'air» (antenne) et l'autre à la sortie du multiplieur, on obtient une antenne émettrice peu performante mais suffisante pour que l'onde rayonnée soit captée à une distance de l'ordre du mètre à condition d'augmenter la fréquence de la porteuse jusqu'aux limites permises par les AOp (entre 100 et 200 kHz).

2. RÉCEPTION

2.1. Antenne réceptrice

a - *Le récepteur d'ultrasons joue ce rôle*

Les deux antennes sont orientables.

Elles peuvent être distantes de plusieurs mètres.

Un préamplificateur de tension (non inverseur) permet de redonner de l'amplitude au signal reçu, avant de le démoduler.

Schéma du préamplificateur :

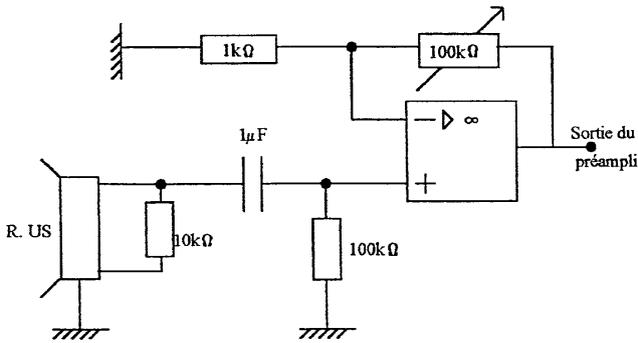


Figure 10

Remarques : Une résistance de 10 kΩ montée directement en sortie du récepteur permet d'atténuer le parasitage dû en particulier au «50 Hz» (sans blinder le câble d'antenne).

Un filtre passe haut de fréquence de coupure $\left(\frac{1}{2 \pi R C}\right)$ égale à 1,6 Hz «arrête» une éventuelle composante continue.

b - Dans le cas de notre transmission électromagnétique ; nous avons remplacé le récepteur d'US par un circuit d'accord constitué d'un résonateur LC parallèle avec une bobine à noyau de ferrite pour «chercher» la résonance.

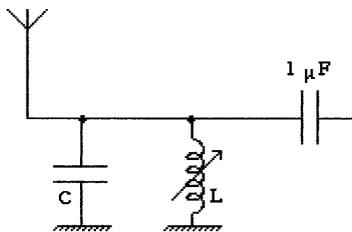


Figure 11 : Antenne réceptrice et circuit d'accord.

Remarque : En orientant convenablement le «cadre» d'un poste récepteur AM près de l'antenne émettrice on peut «écouter» le message transmis par onde électromagnétique. Pour cela il faut que la porteuse soit à une fréquence située en limite de la bande explorée par ce type de poste récepteur (100 à 120 kHz convient avec celui que nous avons essayé).

2.2. Démodulateur

Il doit réaliser l'opération inverse de la modulation, c'est-à-dire séparer le signal BF de la porteuse HF.

C'est possible avec une diode de détection, un condensateur et une résistance. Ces diodes ont un seuil inférieur à celui d'une diode de redressement et sont plus rapides.

Une autre technique appelée démodulation synchrone utilise un multiplieur et un filtre passe bas (méthode hors programme TS).

a - Démodulateur à diode

Principe :

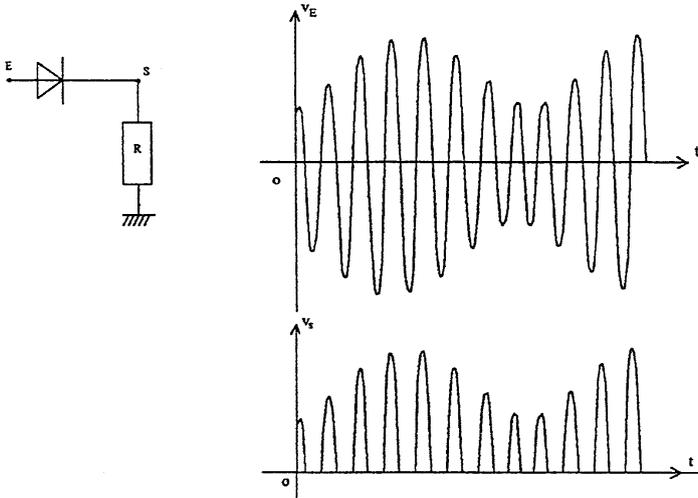


Figure 12

Avec un condensateur monté en parallèle avec R, on obtient :

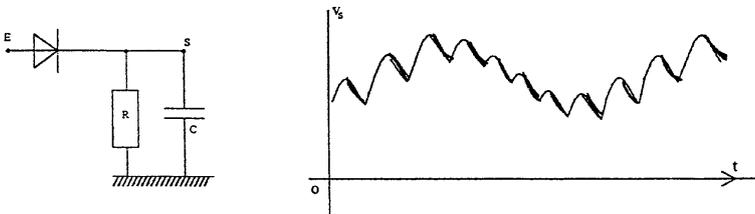


Figure 13

Conditions d'une bonne détection :

1 - Rapport $\frac{F}{f} \approx 100$ (F : fréquence de la porteuse ; f : fréquence du signal modulant) ;

2 - $RC \leq \frac{\sqrt{1-m^2}}{2\pi m f}$ (RC : constante de temps ; m : taux de modulation.

Remarque : $m < 1$) ;

3 - $RC \geq \frac{10}{F}$ (afin de lisser au mieux la phase croissante du signal en atténuant les «dents de scie» HF).

Exemple de calcul prévisionnel :

- F = 40 kHz et f = 500 Hz \Rightarrow la première condition est «à peu près» vérifiée,

- la troisième condition impose $RC \geq 0,25$ ms,

- appliquons la deuxième condition pour prévoir le taux maximal de modulation avec $RC = 0,25$ ms :

$$RC \leq \frac{\sqrt{1-m^2}}{2\pi m f} \quad \Rightarrow \quad m \leq \frac{1}{\sqrt{1+4\pi^2 f^2 R^2 C^2}}$$

Application Numérique : avec f = 500 Hz et $RC = 0,25$ ms on trouve : $m \leq 0,786$ soit $m \leq 0,8$.

Si C = 10 nF, on pourra prendre R = 25 k Ω valeur obtenue approximativement en plaçant 33 k Ω en parallèle avec 100 k Ω .

Pour un taux de modulation supérieur à 0,8, on aura un phénomène de distorsion très marqué au «creux» du signal démodulé.

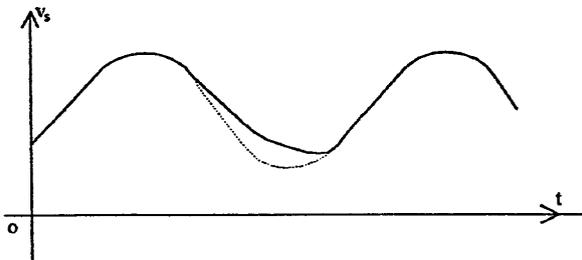


Figure 14

Afin d'éliminer la composante continue du signal détecté, on ajoute un filtre passe haut, ce qui donne le montage complet suivant :

$$\left. \begin{array}{l} R' = 100 \text{ k}\Omega \\ C' = 1 \text{ }\mu\text{F} \end{array} \right| \Rightarrow \frac{1}{2 \pi R' C'} \approx 1,6 \text{ Hz}$$

(fréquence de coupure du filtre passe haut).

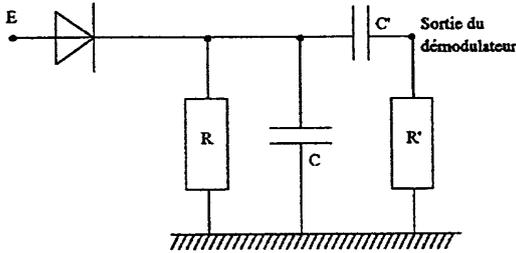


Figure 15

Remarque : A l'aide d'un montage suiveur à AOP incluant la diode de détection dans la boucle de réaction on s'affranchit complètement du seuil de la diode ce qui permet de détecter à plus bas niveau.

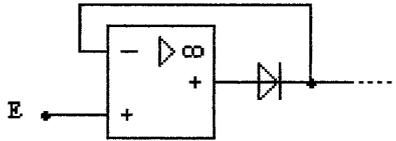


Figure 16 : Détecteur sans seuil.

Proposition de T.P. : démodulation d'amplitude

• Objectif

- Analyser expérimentalement un montage démodulateur à diode.
- Rechercher expérimentalement les conditions optimales d'une bonne détection.

• Matériel par groupe

- Idem T.P. sur modulation.
- Une diode de détection (AA119 ou germanium ou équivalent ou bien 1n4148 au silicium).
- Un condensateur de capacité ($C = 10 \text{ nF}$).

- Une résistance ajustable ($R = 100 \text{ k}\Omega$)
- Un condensateur de capacité ($C' = 1 \text{ }\mu\text{F}$).
- Une résistance fixe ($R' = 100 \text{ k}\Omega$).
- Un multimètre utilisé en ohmmètre pour mesurer $R_{ajusté}$,
- Une plaque support de composants pour réaliser le montage.

• **Montage**

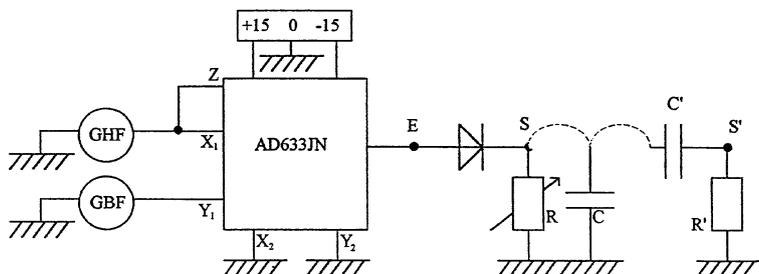


Figure 17

• **Protocole expérimental**

- Régler la fréquence de la tension HF à 100 kHz et son amplitude à 4 V.
- Régler la fréquence de la tension BF à 1 kHz et son amplitude de sorte que le taux de modulation soit égal à 0,5.
- Observer le signal BF sur la voie A et conserver ce signal en référence.
- Observer la tension $v_S(t)$ aux bornes de R sur l'autre voie ($R \approx 50 \text{ k}\Omega$; C, C' et R' ne sont pas en service).
- Mettre le condensateur de capacité C en service.
- Faire varier R.
- Observer :
 - si la valeur de R est trop petite, des «dents de scie» de haute fréquence sont visibles sur la courbe démodulée,
 - si la valeur de R est trop grande, les «dents de scie» sont très atténuées mais une distorsion apparaît au «creux» du signal.
- Mettre R' et C' en service et observer la tension $v_{S'}(t)$. Quel est le rôle de ces composants ?

La suite du protocole est sans doute aux limites du programme et difficile à mettre en œuvre en TS.

- Rechercher la plage de réglage optimale de R. Mesurer R_{MAX} et R_{min} . Recommencer avec d'autres valeurs de m et compléter le tableau :

m	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
R_{MAX} (k Ω)					
R_{min} (k Ω)					

Au-delà de quelle valeur de m, la démodulation correcte du signal n'est-elle plus possible ?

- Pour obtenir une bonne démodulation, on admet que la constante de temps RC du circuit de démodulation doit être comprise entre $\frac{10}{F}$ et $\frac{\sqrt{1 - m^2}}{2 \pi m f}$.

- Compléter le tableau suivant :

m	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\frac{\sqrt{1 - m^2}}{2 \pi m f}$ (μ s)					
$R_{MAX} \cdot C$ (μ s)					
$R_{min} \cdot C$ (μ s)					
$\frac{10}{F}$ (μ s)					

L'expérience précédente vérifie-t-elle cette proposition théorique ? La démodulation d'une onde modulée avec un taux supérieur ou égal à l'unité est-elle possible sans déformation du signal démodulé ?

- Fixer le taux de démodulation à 0,8.

Le réglage de R étant optimisé, diminuer la fréquence HF de la porteuse ($F = 50$ kHz par exemple).

Est-il encore possible de démoduler correctement un signal de fréquence 1 kHz ? Un signal de fréquence 500 Hz ? A quelle condition ?

b - Démodulateur synchrone (hors programme de la TS)

Il met en jeu un multiplieur et nécessite la reconstitution de la porteuse à l'aide du signal reçu ; pour cela on utilise une boucle à verrouillage de phase.

Ici, nous nous contenterons de repiquer la porteuse HF à sa source (l'oscillateur HF) **ce qui est bien sûr une ineptie si on veut faire de la transmission sans fil...**

Schéma du montage :

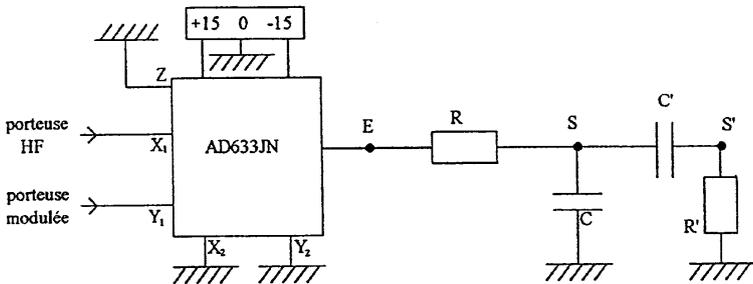


Figure 18

La porteuse HF de la forme $A \cos \Omega t$ contient la fréquence $\{F\}$, la porteuse modulée $A (1 + m \cos \omega t) \cos \Omega t$ contient la fréquence $\{F\}$ et les fréquences $\{F + f\}$ et $\{F - f\}$. Le produit des deux signaux fait apparaître le spectre de fréquences $\{0 ; f ; 2F - f ; 2F ; 2F + f\}$, la fréquence nulle représentant la composante continue du signal obtenu.

Pour retrouver ce spectre, on peut développer le produit ou utiliser le formalisme simplifié défini plus haut (cf. 1.3.).

Il sera intéressant de réaliser expérimentalement cette analyse spectrale à l'aide d'une carte d'acquisition (capable d'échantillonner la HF) et d'un logiciel adapté.

Ne voulant conserver que le signal modulant de fréquence f , nous devons éliminer les hautes fréquences $\{2F - f ; 2F ; 2F + f\}$ par un filtre passe-bas (R ; C) et la composante continue par un filtre passe-haut (R' ; C').

Les valeurs des composants sont choisies de sorte que la fréquence de coupure du filtre passe-bas soit de l'ordre de quelques kHz ($R = 1 \text{ k}\Omega$ et $C' = 47 \text{ nF}$ donnent $\frac{1}{2 \pi R C} \approx 3,4 \text{ kHz}$) et celle du filtre passe-haut de l'ordre de quelques Hz ($R' = 100 \text{ k}\Omega$ et $C' = 1 \text{ }\mu\text{F}$ donnent $\frac{1}{2 \pi R' C'} \approx 1,6 \text{ Hz}$).

- *Avantage* de la démodulation synchrone (que l'on peut mettre en évidence expérimentalement).

Possibilité de démoduler une onde modulée :

- DSB avec ou sans porteuse,
- quel que soit son taux de modulation y compris si $m > 1$,
- quelle que soit la fréquence de la porteuse si celle-ci est en dehors de la bande passante du filtre $\{R ; C ; C' ; R'\}$.

- *Inconvénient*

Il faut reconstituer la porteuse.

c - *Filtres*

L'étude des filtres n'est pas au programme de la TS mais il sera difficile de ne pas en parler du tout.

On constatera leur rôle dans un montage (expériences) mais sans en faire la théorie complète, il sera malgré tout possible de faire quelques calculs pour comprendre ce qui se passe.

Remarque : Une autre solution consiste à simuler le comportement des filtres avec un logiciel tel que PSPICE (voir les articles sur PSPICE dans ce numéro et dans le prochain).

Prenons par exemple l'association précédente :

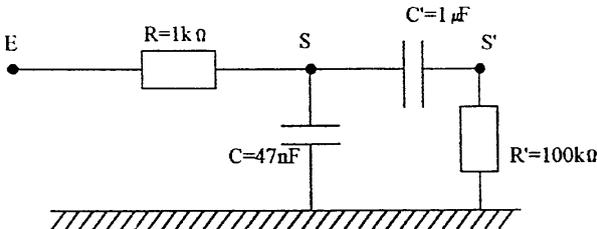


Figure 19

Calculons la réponse de ce filtre dans les trois cas ci-après.

Fréquence nulle (composante continue), BF ($f = 400$ Hz), HF ($F = 40$ kHz). Supposons une tension d'entrée de 1 V (valeur de la tension continue ou de l'amplitude de la tension sinusoïdale).

– *Premier cas* (composante continue : $\omega = 0$)

Les valeurs des impédances des condensateurs $\frac{1}{C\omega}$ et $\frac{1}{C'\omega}$ tendent vers l'infini. Les résistances R et R' de valeurs négligeables par rapport aux impédances des condensateurs peuvent être considérées comme des **court-circuits** et les condensateurs d'impédance infinie comme des **coupe-circuits**.

On a le schéma équivalent suivant :

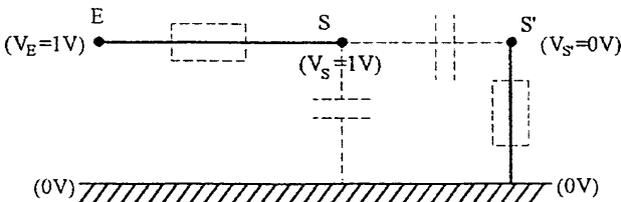


Figure 20

– *Deuxième cas* (haute fréquence : $F = 40$ kHz)

$$\frac{1}{C\omega} = 4 \Omega ; \quad \frac{1}{C'\omega} = 85 \Omega ; \quad R = 1 \text{ k}\Omega \quad \text{et} \quad R' = 100 \text{ k}\Omega.$$

Une approximation grossière consiste à considérer :

- R et R' comme des coupe-circuits,
- C et C' comme des court-circuits.

On a alors le schéma équivalent :

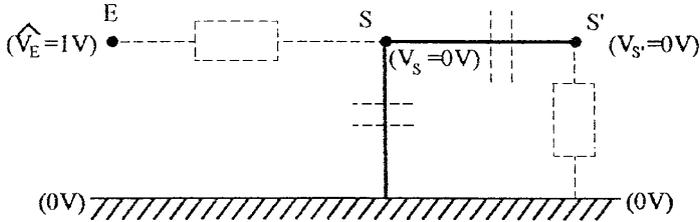


Figure 21

Une approximation plus réaliste conduit au schéma équivalent.

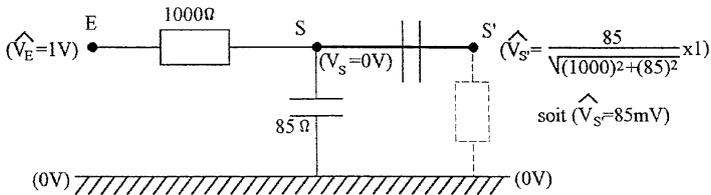


Figure 22

On peut alors rendre compte de l'efficacité du filtre vis-à-vis de la HF en calculant le gain en décibels avec la relation de définition :

$$G_{(dB)} = 20 \log \frac{\hat{V}_{S'}}{\hat{V}_E} \quad \text{soit ici} \quad G \approx -21 \text{ dB.}$$

Remarque : Le filtrage n'est pas très bon mais suffisant, compte tenu de l'utilisation ultérieure du signal «audio» dont la HF résiduelle sera filtrée par le haut-parleur.

– *Troisième cas* (basse fréquence : $f = 400 \text{ Hz}$)

$$\frac{1}{C'\omega} = 400 \Omega ; \quad R = 1 \text{ k}\Omega ; \quad \frac{1}{C\omega} = 8,5 \text{ k}\Omega \quad \text{et} \quad R' = 100 \text{ k}\Omega.$$

En procédant comme précédemment on obtient :

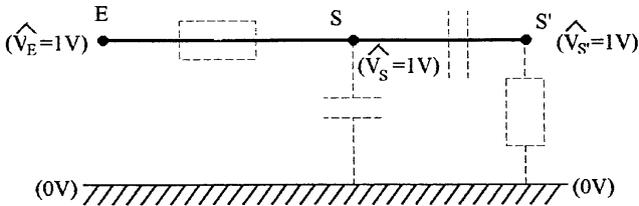


Figure 23

ou mieux :

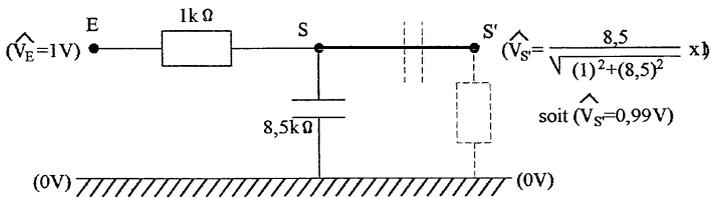


Figure 24

La basse fréquence est donc très peu atténuée par ce filtre.

$$G_{(dB)} \approx -0,06$$

2.3. Amplificateur

Le signal démodulé et filtré est ensuite amplifié :

- amplification de tension à l'aide d'un amplificateur non inverseur,
- amplification de puissance à l'aide d'un ampli-op monté en suiveur incluant un montage push-pull de deux transistors de puissance appariés.

Schéma de montage :

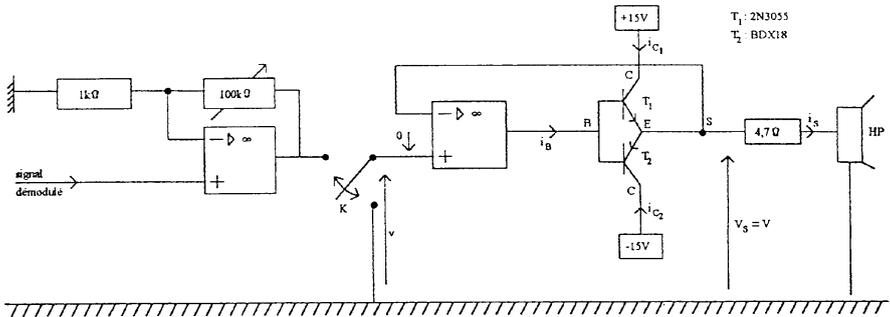


Figure 25 : Hors saturation, $v_s = v$ (montage suiveur).

Alternance positive : $i_s = i_{c1} = \beta i_B > 0$.

Alternance négative : $i_s = i_{c2} = \beta i_B < 0$.

Le courant d'intensité i_s , appelé par le haut parleur ne traverse pas l'ampli-op mais l'un ou l'autre des transistors (T_1 ou T_2).

2.4. Restitution du signal transmis

Un haut parleur d'impédance 4 ou 8 Ω , de quelques watts de puissance, ayant sa bande passante dans les médiums convient très bien à la restitution audible du signal transmis. Un interrupteur à deux positions permet de mettre l'entrée de l'ampli de puissance à la masse en dehors des moments d'écoute.

Il est intéressant de suivre tout au long de la chaîne (émission - propagation - réception - restitution), l'évolution du signal transmis (issu d'un baladeur par exemple).

3. PROPAGATION

La propagation de l'onde ultrasonore modulée en amplitude par un signal audible permet de renouveler les expériences sur :

- la réflexion,
- la réfraction,
- l'absorption et la transmission,
- la diffraction,
- les interférences,

- l'effet Larsen,
- l'effet Doppler.

Effet Doppler

Le déplacement relatif, à la vitesse v , de l'antenne émettrice par rapport à l'antenne réceptrice provoque une variation de fréquence ΔF de la porteuse modulée telle que $\frac{\Delta F}{F} = \frac{v}{C}$ avec : C : vitesse du son (340 m.s⁻¹) ; F : fréquence de la porteuse (40 kHz).

- Si $v = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ on a donc $\Delta F \approx 12 \text{ Hz}$.
- Si $v = 1 \text{ m.s}^{-1}$ on a donc $\Delta F \approx 120 \text{ Hz}$.
- Si $v = 10 \text{ m.s}^{-1}$ on a donc $\Delta F \approx 1,2 \text{ kHz}$.

Dans le cas **a** d'une porteuse modulée par simple multiplication, (cf. formalisme simplifié dans le paragraphe 1.3.) le spectre de la porteuse modulée contiendra les fréquences $\{F + \Delta F - f \text{ et } F + \Delta F + f\}$.

Dans le cas **b** d'une porteuse modulée par multiplication et addition, le spectre contiendra en plus la fréquence centrale $\{F + \Delta F\}$.

Après multiplication par la porteuse de fréquence F dans le démodulateur synchrone on obtient les spectres suivants :

$$\{|\Delta F - f| ; \Delta F + f ; 2F + \Delta F - f ; 2F + \Delta F + f\}$$

dans le cas **a**,

$$\{|\Delta F - f| ; \Delta F ; \Delta F + f ; 2F + \Delta F - f ; 2F + \Delta F ; 2F + \Delta F + f\}$$

dans le cas **b**.

Après filtrage, seules subsisteront les basses fréquences.

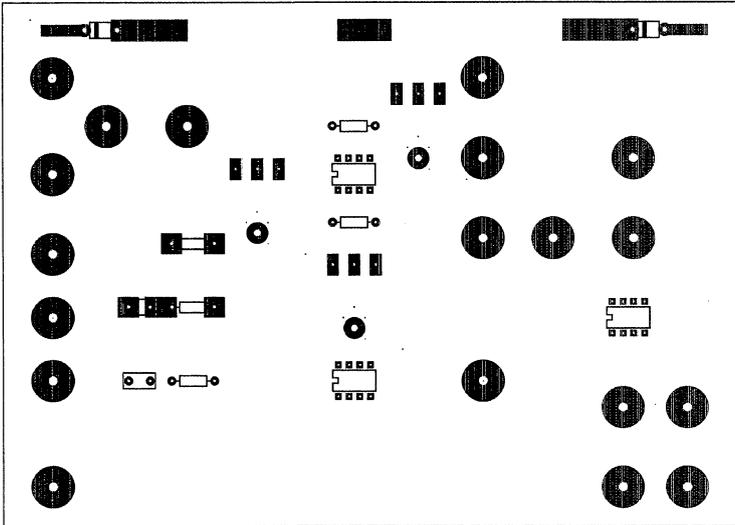
Si vous faites la manipulation, réglez la BF entre 500 Hz et 1 kHz, prenez une antenne dans chaque main et déplacez les «antennes» très lentement comme si vous jouiez du bandonéon ; vous comprendrez pourquoi nous avons baptisé cette expérience «le chant des baleines».

Vous trouverez en annexe une copie à échelle réduite des typons de nos maquettes «émission» et «réception». Si vous désirez une copie à l'échelle 1/1, vous pouvez nous en faire la demande au Centre de Ressources du Lycée Jacquard.

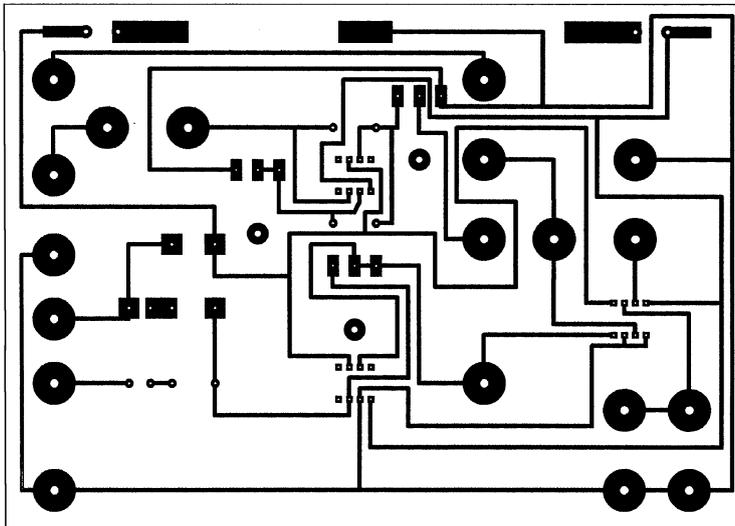
Si nos manipulations vous intéressent mais si vous ne voulez pas passer votre temps à souder, vous trouverez sur le marché des matériels qui permettent de réaliser les expériences décrites. (La société PHYTEX s'est inspirée de nos travaux pour fabriquer ses ensembles ERUS et MAOH. D'autres fabricants, ELECTROME, LA MAISON DES ENSEIGNANTS DE PROVENCE, DMS DIDALAB, ont aussi développé des maquettes sur le sujet).*

* PHYTEX - Tél. : (16) 32.31.06.90.

Annexe 1

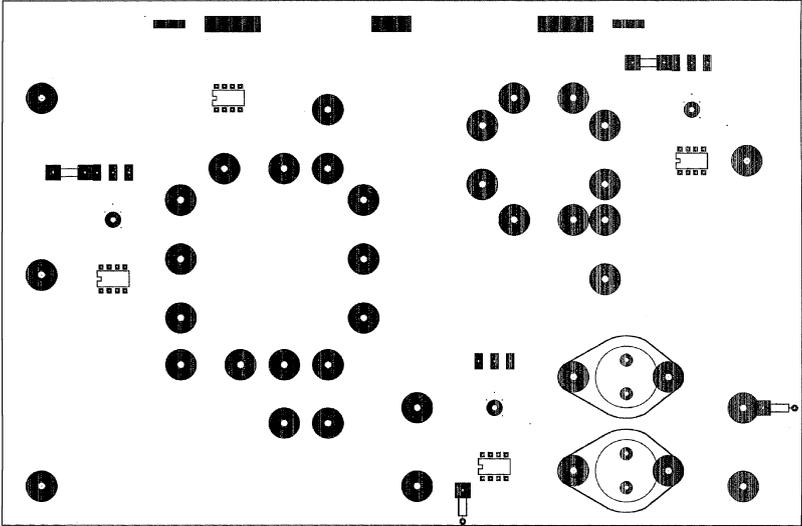


Implantation des composants.

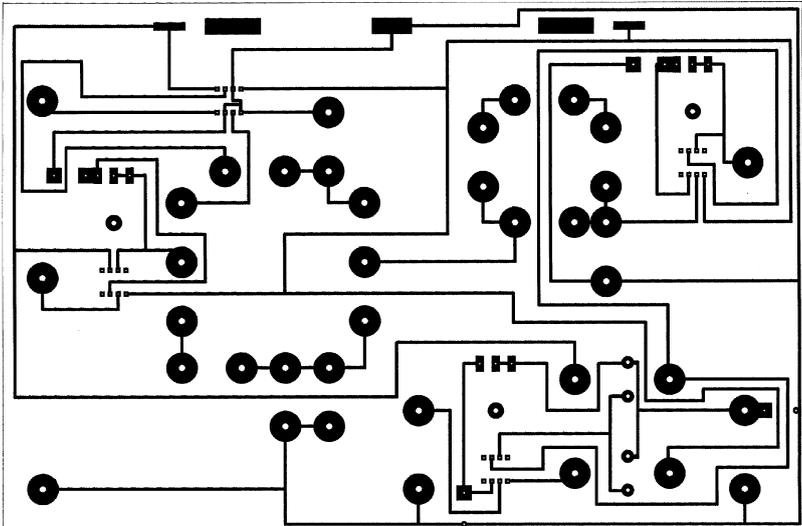


Typon émetteur.

Annexe 2



Implantation des composants.



Typon récepteur.