

But

- Savoir que réaliser une modulation d'amplitude c'est rendre l'amplitude du signal modulé fonction affine de la tension modulante.
- Connaitre les conditions à remplir pour éviter la surmodulation.
- Savoir que la tension modulée d'un signal sinusoïdal est la somme de trois tensions sinusoïdales.
- Réaliser la modulation d'amplitude.

INTRODUCTION

Nous avons vu dans le TP précédent que les informations que l'on transmet par ondes hertziennes (paroles, musiques, images ...) correspondent à des signaux dont les fréquences sont de l'ordre de grandeur du kilohertz (de 20 Hz à 20 kHz pour les ondes sonores). Ces signaux **basse fréquence (BF)** ne peuvent pas être émis directement car des problèmes se posent :

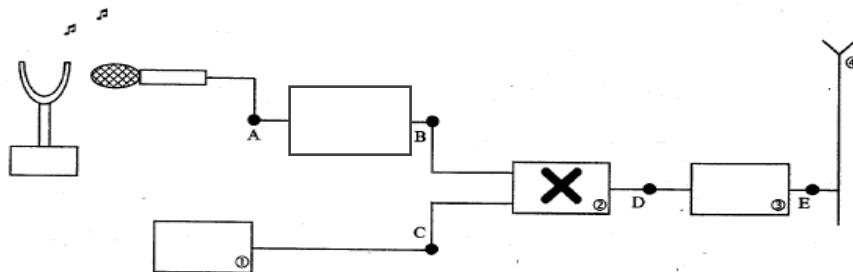
- ☞ la propagation des ondes BF se fait sur de courtes distances car elles sont fortement amorties ;
- ☞ le brouillage des informations à transmettre à cause de signaux parasites (signaux industriels à 50 Hz ...) ou des signaux de même fréquence émis par d'autres stations ;
- ☞ la dimension des antennes de réception de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des signaux à transmettre (300 km !!).

Ainsi l'idée de transmettre les informations par une onde de **fréquence élevée (HF)** est naturellement apparue. Les informations à transmettre (**signal modulant**) sont alors **inscrites ou modulées** dans une onde de **haute fréquence (HF)** (**onde porteuse**) : on obtient ainsi un **signal modulé**.

I. PRINCIPE DE LA MODULATION D'AMPLITUDE

Le signal porteur (onde porteuse) de haute fréquence HF est modifié, on dit modulé, pour que son amplitude varie à l'image du **signal modulant** (informations à transmettre) basse fréquence BF.

Nous allons modéliser un émetteur radio en modulation d'amplitude. En voici le principe :



a. SIGNAL MODULANT (INFORMATION À TRANSMETTRE)

À la place du diapason et du micro, nous allons utiliser un GBF, qui délivrera une tension sinusoïdale, image du son à transmettre.

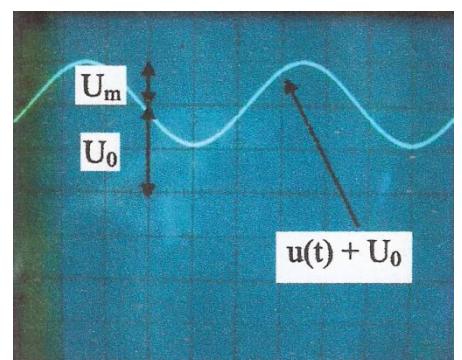
Cette tension est **le signal modulant** (il n'est pas forcément sinusoïdal, mais peut toujours être décomposé en une somme de sinusoïdes (transformée de Fourier)).

Cette tension alternative sinusoïdale, de fréquence f , est modélisable par une fonction.

1. Donner la forme de cette fonction.

U_0 : Tension de décalage ou d'offset : il s'agit d'une tension continue, notée U_0 , que l'on ajoute à la tension modulante.

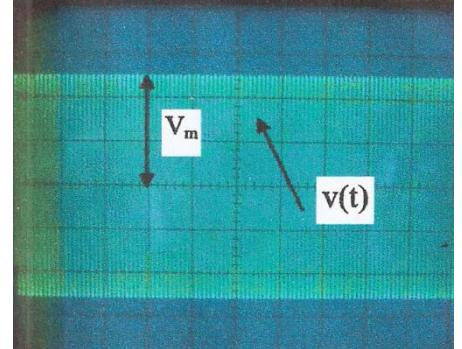
Dans notre expérience, on pourra ajouter cette tension continue à la tension modulante à l'aide de la fonction "décalage" du GBF.



b. LE SIGNAL PORTEUR

Il s'agit d'une tension sinusoïdale de fréquence très élevée F , qu'on modélisera par une fonction.

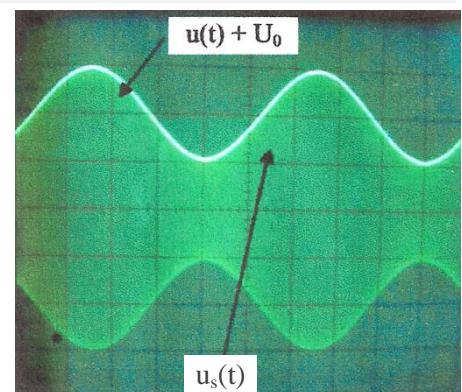
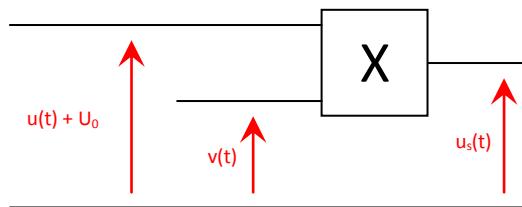
2. Donner la forme de cette fonction.



Pour notre expérience, cette tension sera délivrée par un GBF.

c. LE SIGNAL DE SORTIE $U_s(t)$: SIGNAL MODULÉ EN AMPLITUDE

Un circuit électronique, appelé **multiplieur** et faisant intervenir l'amplificateur opérationnel, permet d'obtenir, à partir des signaux précédents une tension notée $u_s(t)$, proportionnelle au produit des deux tensions qu'on lui applique :

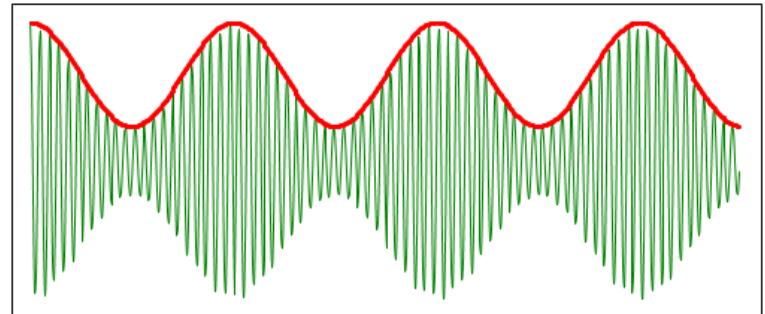


3. Écrire la tension $u_s(t)$ sous la forme $u_s(t) = Ax(m \cos \omega t + 1) \times \cos \Omega t$ en déterminant les expressions de A et m.

La partie ($\cos \Omega t$) traduit l'oscillation à haute fréquence du signal porteur.

La partie $U_s = Ax(m \cos \omega t + 1)$ est l'amplitude du signal modulé. Elle traduit les variations de l'enveloppe du signal et donc l'information portée.

On appellera $m = \frac{U_m}{U_0}$ le **taux de modulation du signal**.



Allure du signal modulé en amplitude et du signal modulant qui crée l'enveloppe du signal modulé et porte l'information :

d. SPECTRE EN FRÉQUENCE DE LA TENSION MODULÉE

4. À l'aide de la relation trigonométrique $\cos a \times \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$, montrer que le signal $u_s(t)$ peut être exprimé sous la forme d'une somme de trois fonctions sinusoïdales de pulsations respectives Ω , $\Omega + \omega$ et $\Omega - \omega$.
Aide : commencer par développer l'expression : $u_s = Ax(m \cos \omega t + 1) \times \cos \Omega t$.

On arrive ainsi à l'expression :

$$u_s(t) = [A \cdot \cos 2\pi F t] + \frac{1}{2} [A \cdot m \cdot \cos 2\pi(F+f)t] + \frac{1}{2} [A \cdot m \cdot \cos 2\pi(F-f)t]$$

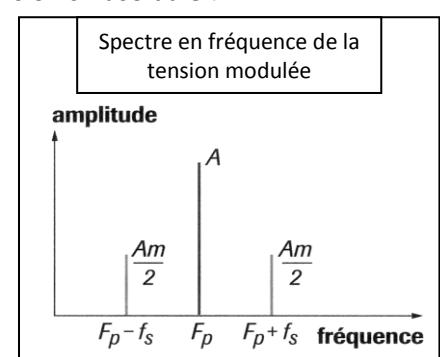
Donc, une tension sinusoïdale, de **fréquence F**, modulée en amplitude par une tension sinusoïdale de **fréquence f < F**, est la **somme de 3 tensions sinusoïdales, de fréquence F-f, F, et F+f**.

On peut établir le spectre en fréquence de la tension modulée en amplitude par une tension sinusoïdale :

- les fréquences sont portées en abscisses, et les amplitudes des signaux correspondant en ordonnées.
- La raie centrale correspond à la fréquence de la porteuse F, c'est la raie de plus grande amplitude.
- Les raies latérales correspondent aux fréquences F-f et F+f.

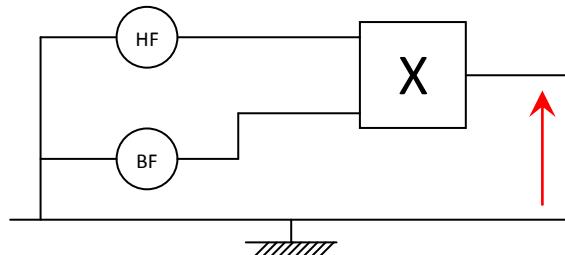
Pour transmettre un signal BF de fréquence f sur une onde porteuse de fréquence F, il faut disposer d'une bande de fréquences [(F-f), (F+f)].

La transmission d'un signal modulé en amplitude occupera donc une bande de fréquence de largeur 2f : **c'est la largeur de bande ou bande passante**.



II. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Notre montage expérimental sera constitué de trois parties distinctes : un générateur HF fournissant un signal sinusoïdal de haute fréquence (la porteuse), un générateur BF fournissant un signal sinusoïdal décalé de basse fréquence (le signal modulant) et un multiplieur réalisant la modulation. Le signal modulé, $u_m(t)$ sera observé sur l'écran d'un oscilloscope. **Attention, pour toutes les manipulations, oscilloscope en position DC**.



→ **Réglage du signal porteur :**

- Connecter une voie d'oscilloscope à la sortie du générateur et sélectionner avec précision un signal sinusoïdal de fréquence $F = 200 \text{ kHz}$ et d'amplitude $V_m = 5V$: ce signal sera la porteuse.
- Une fois ces réglages faits, on éteint le générateur et on débranche l'oscilloscope.
- On relie la sortie du générateur éteint au module multiplicateur entre les voies **X** et la masse (**v1**).

Le signal modulant sera délivré par un générateur BF.

→ **Réglage du signal modulant :**

- On branche une voie de l'oscilloscope à la sortie du générateur BF (sortie 50Ω).
- On sélectionne avec précision un signal sinusoïdal de fréquence $f = 1 \text{ kHz}$ et d'amplitude $U_m = 2V$.
- On ajoute à ce signal, grâce à la fonction décalage enclenchée, une tension continue positive de valeur $U_0 = 3V$: ce signal sera la tension modulante décalée.
- Une fois ces réglages faits, on éteint le générateur et on débranche l'oscilloscope.
- On relie la sortie (50Ω) du générateur éteint au module multiplicateur entre les voies **Y** et la masse (**v2**).

→ **Alimentation du multiplicateur :**

- L'alimentation du multiplicateur n'est en général pas représentée sur les schémas mais ne doit pas être oubliée. Il sera alimenté par un générateur continu symétrique **+15V/-15V** dont la masse devra être connectée à la masse du circuit. Le fonctionnement interne du multiplicateur et son schéma électrique détaillé ne sont pas à connaître.
- On connecte les bornes de l'alimentation avec celles du multiplicateur (+15V avec +15V, -15V avec -15 V et la borne 0 du générateur avec la borne 0V du multiplicateur).
- **L'alimentation du multiplicateur devra être mise sous tension AVANT les autres générateurs.**

→ **Réglages de l'oscilloscope :**

- On relie la sortie 50Ω du générateur modulant à la voie 1 de l'oscilloscope et la sortie **vs** du multiplicateur à la voie 2 sans oublier de connecter la masse de l'oscilloscope à celle du circuit.
- On vérifie que toutes les masses du circuit soient bien connectées entre elles : les deux générateurs, l'oscilloscope, l'alimentation du multiplicateur, les bornes de v1 et v2.
- On règle le balayage sur **0,5 ms/div**.
- On règle les sensibilités verticales des voies 1 et 2 respectivement sur **2V/div** et **1V/div**.

→ **Observation des signaux :**

- On met sous tension le générateur d'alimentation du multiplicateur **+15V/-15V**.
- On met sous tension les deux générateurs HF et BF.
- On enclenche le bouton **DUAL** de l'oscilloscope de manière à voir les deux signaux.
- On enclenche sur chaque voie les boutons **AC/DC** sur la position DC afin de ne pas supprimer la composante continue U_0 rajoutée par le générateur modulant (la fonction AC de l'oscilloscope supprime les composantes continues d'une tension).
- On effectue les réglages nécessaires afin d'observer la tension modulée.

5. *Calculer les fréquences exactes des tensions « porteuse F » et « modulante f ».*

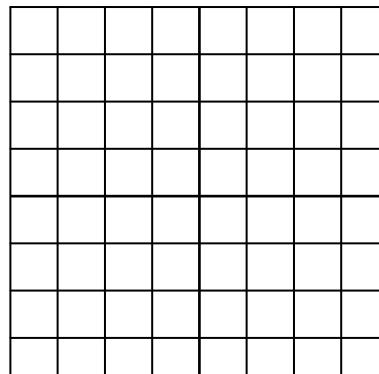
→ **Taux de modulation m :**

- En jouant sur les boutons « amplitude » et « tension de décalage U_0 » du générateur modulant (BF), observer les trois cas suivants et représenter les oscillogrammes obtenus :

1^{er} cas

$U_0 > U_m \Leftrightarrow m < 1$: on parle de modulation normale

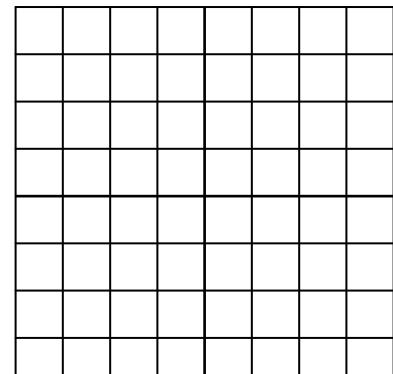
En mode balayage



Balayage :

Sensibilité :

En mode XY



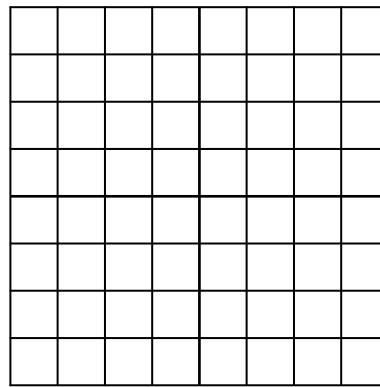
L'amplitude du signal modulé ne change pas de signe au cours du temps : l'enveloppe du signal modulé ne coupe jamais le signal et **correspond au signal modulant**. La modulation est bonne et l'information pourra être démodulée facilement.

En mode XY, on observe

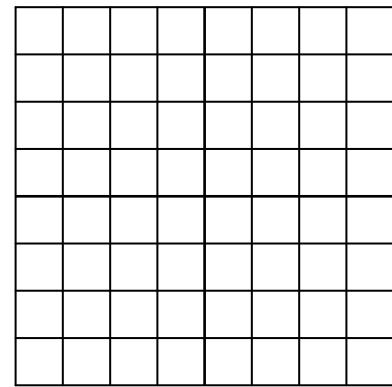
2^{ème} cas

$U_0 = U_m \Leftrightarrow m = 1$: on parle de modulation critique (maximale)

En mode balayage



En mode XY



Balayage :

Sensibilité :

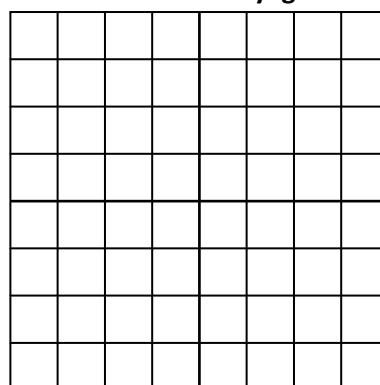
L'amplitude du signal modulé ne change pas de signe au cours du temps : l'enveloppe du signal modulé ne coupe jamais le signal mais s'annule. C'est la limite critique (maximale) permise pour la modulation.

En mode XY, on observe un

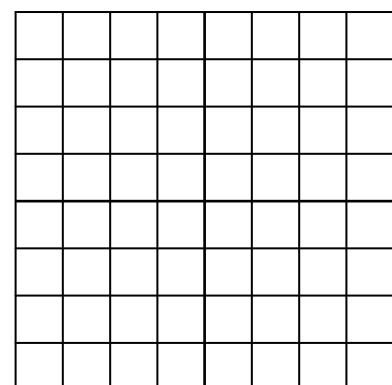
3^{ème} cas

$U_0 < U_m \Leftrightarrow m > 1$: on parle de surmodulation

En mode balayage



En mode XY



Balayage :

Sensibilité :

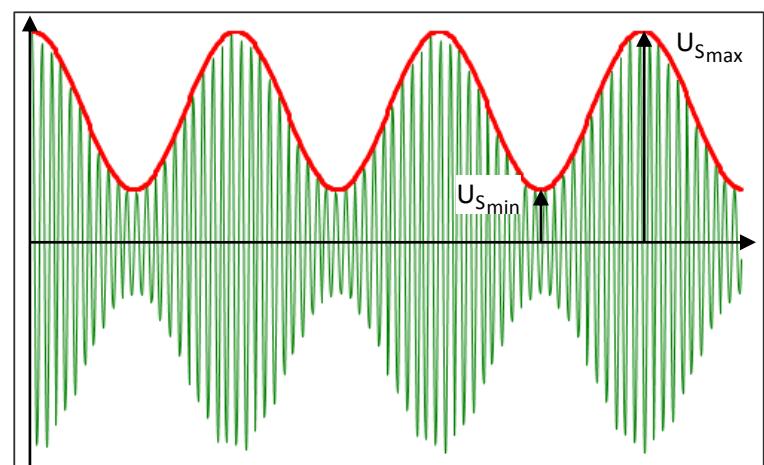
L'amplitude du signal modulé change de signe au cours du temps : l'enveloppe du signal modulé coupe le signal et ne correspond plus au signal modulant. L'information ne pourra pas être démodulée. C'est le phénomène de surmodulation.

En mode XY, on observe

6. Dans le cas d'une **modulation normale** ($m < 1$), démontrer que : $m = \frac{U_{S_{\max}} - U_{S_{\min}}}{U_{S_{\max}} + U_{S_{\min}}}$

Rappel :

on sait que le signal modulé a pour fonction :
 $u_s(t) = U_s \times \cos \Omega t$ avec $U_s = A \times (m \cos \omega t + 1)$
 qui est son amplitude.



But

- Connaissant la fonction de l'ensemble diode-RC parallèle et du dipôle RC série, savoir les placer correctement dans un schéma de montage de démodulation.
- Savoir exploiter les oscillogrammes relatifs à la modulation et la démodulation d'amplitude.
- Savoir que le dipôle LC parallèle, utilisé ici comme filtre passe bande pour la tension, est un circuit bouchon pour l'intensité et expliquer son utilité pour la sélection d'une tension modulée.
- *Réaliser la démodulation d'amplitude.*

I. LA DÉMODULATION D'AMPLITUDE
a. NÉCESSITÉ DE LA DÉMODULATION

Nous avons vu dans le TP précédent que pour transporter une information par voie hertzienne, il fallait réaliser une modulation d'amplitude.

À la réception de l'onde électromagnétique, il est nécessaire de décomposer le signal pour pouvoir lire l'information qui a été transportée : **il faut tout d'abord éliminer la porteuse HF, puis la tension continue de décalage afin de ne garder que le signal périodique modulant de basse fréquence.**

L'enveloppe du signal étant symétrique, il n'est pas nécessaire de s'intéresser à sa globalité : **le déchiffrage de la partie supérieure sera suffisant.**

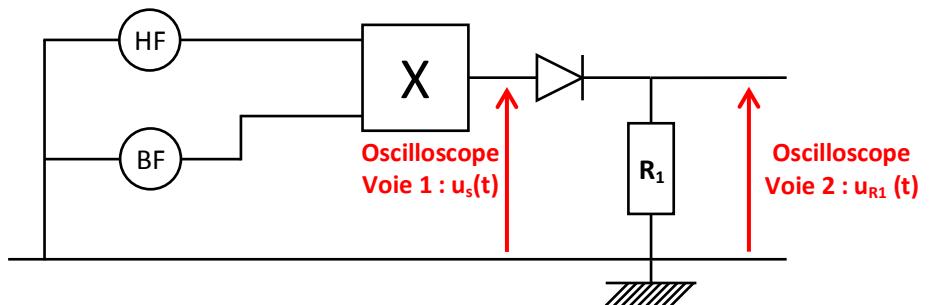
b. RÉCUPÉRATION DE L'INFORMATION TRANSMISE (DU SIGNAL BF MODULANT)

On utilise un montage dit "détecteur d'enveloppe ou de crête" (voir ci-dessous), qui permet d'éliminer les variations rapides de tension dues à la porteuse pour retrouver la forme du signal basse fréquence portant l'information.

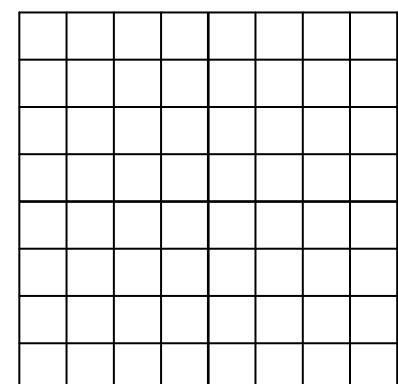
Ce montage fait intervenir **une diode et un circuit RC parallèle**.

→ Rôle de la diode de détection / montage redresseur

- On réalise d'abord le montage de modulation d'amplitude (voir TP P10 : **HF : 100 kHz ; 5V et BF : 1 kHz 2V**), et on règle les paramètres des tensions d'entrée de manière à avoir une modulation normale et un taux de modulation m de l'ordre de **0,5**.
- On place à la sortie du multiplicateur une diode de détection de tension seuil **$U_s = 1,05 \text{ V}$** et une résistance **$R_1 = 47 \text{ k}\Omega$** suivant le schéma ci-contre :
- On compare à l'oscilloscope la tension modulée $u_s(t)$ à la sortie du multiplicateur à la tension $u_{R1}(t)$ aux bornes de la résistance R_1 .



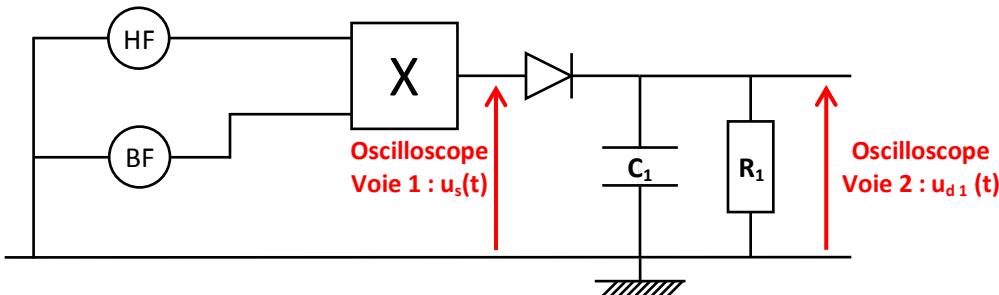
1. Représenter ci-contre l'oscillogramme aux bornes de la résistance et noter vos observations.



2. Quel est le rôle de la diode de détection ?

→ Détection de l'enveloppe par le dipôle R_1C_1

- On branche le condensateur C_1 ($C_1 = 4,7 \text{ nF}$) en parallèle avec la résistance R_1 comme indiqué sur le schéma suivant :



3. Sachant que $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$, comparer la constante de temps τ_1 du circuit de détection R_1C_1 à la période de la porteuse T_p .

- En mode DUAL, on superpose le signal démodulé $u_{d1}(t)$ obtenu en voie 2 avec le signal modulé $u_s(t)$ obtenu en voie 1.

4. Représenter (en couleurs différentes) sur l'oscillogramme ci-contre.

5. Pourquoi ce montage s'appelle-t-il « détecteur d'enveloppe » ?

→ Comment le circuit RC permet-il de reconstituer l'enveloppe du signal ?

- Lorsque la tension $u_s(t)$ augmente, le condensateur se charge, la diode est passante.
- Lorsque la tension $u_s(t)$ décroît, la tension aux bornes du condensateur est supérieure à la tension d'entrée. La diode n'est plus passante, et le condensateur se décharge alors dans la résistance R, avec la constante de temps τ_1 .
- Cette décharge s'arrête dès que la tension $u_s(t)$ devient égale à la tension aux bornes du condensateur. Alors, la diode devient passante, et le condensateur se charge à nouveau.

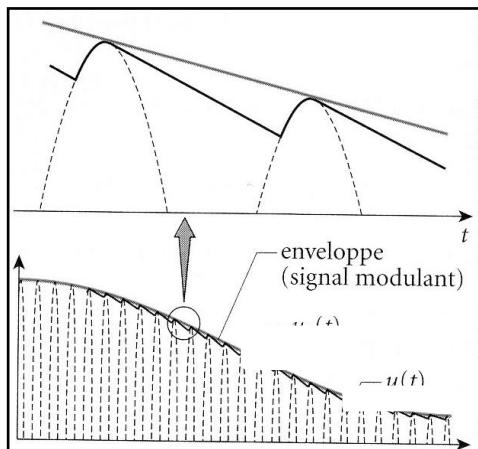


Figure 1 : décharge trop rapide

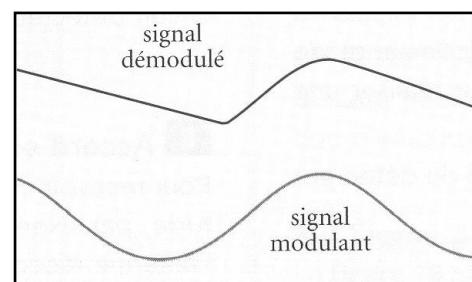
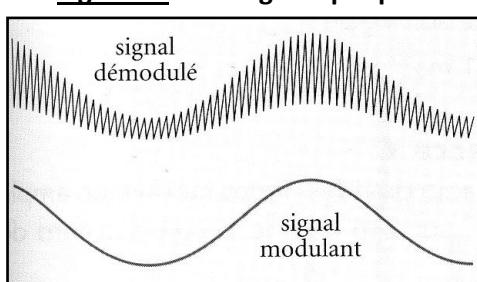
La détection ne sera efficace que si les caractéristiques de R_1 et de C_1 sont bien accordées à la fréquence du signal à démoduler : la constante de temps $\tau_1 = R_1 C_1$ du circuit détecteur doit être très supérieure à la période de la porteuse et inférieure à la période du signal modulant.

Il y aura une bonne démodulation si et seulement si :

En effet, si la valeur de τ_1 est trop faible devant la période du signal porteur, la décharge est trop rapide et la démodulation n'est pas suffisante (fig1).

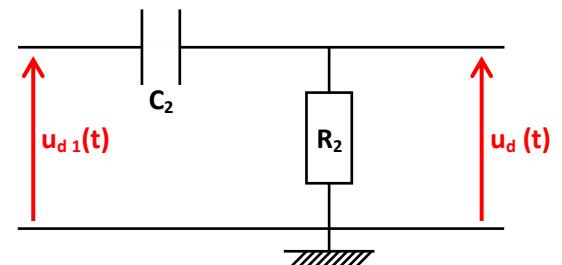
Si la valeur de τ_1 est trop grande devant la période du signal à transmettre, la décharge est trop lente (fig 2), et la tension aux bornes du condensateur ne suit plus les variations de l'enveloppe.

Figure 2 : décharge trop lente

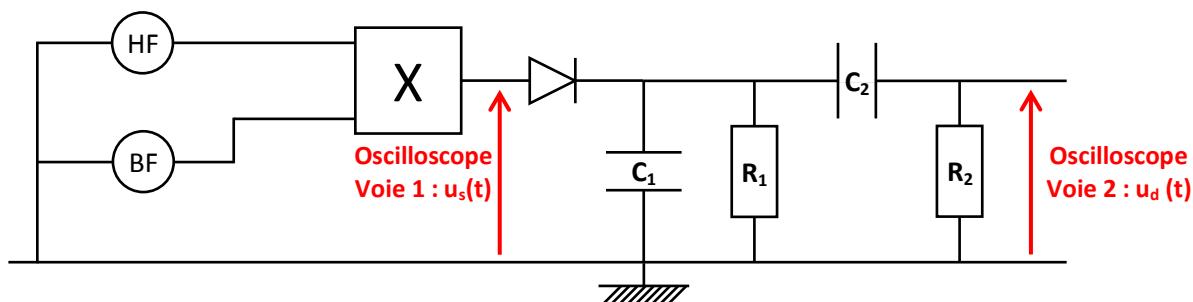


→ Élimination de la composante continue / filtre passe - haut

Le signal $u_{d1}(t)$ obtenu est décalé par une tension continue U_0 que l'on va supprimer par un circuit appelé « filtre passe-haut ». Il s'agit d'un montage RC série, dont les caractéristiques R_2 et C_2 seront choisies de manière à fixer la constante de temps τ_2 du circuit très supérieure à la période du signal modulant :



- On ajoute au montage précédent un filtre R_2C_2 tel qu'indiqué sur le circuit suivant :



Il faut, pour que le filtre soit efficace, que la constante de temps du filtre soit très supérieure à la période du signal modulant ($\tau_2 \gg T_{\text{signal modulant}}$).

6. La fréquence du signal modulant étant $f = 1000 \text{ Hz}$, sa période vaut $T = 1 \text{ ms}$ donc on prendra $\tau_2 = 100 \text{ ms}$. Calculer la valeur de la résistance R_2 qu'il faudra associer à un condensateur de capacité $C_2 = 1 \mu\text{F}$.
-

7. Observer le signal finalement obtenu après démodulation et élimination de la tension continue. Ce signal correspond-il à la tension modulante de départ ?
-

II. LE RÉCEPTEUR « GRANDES ONDES »

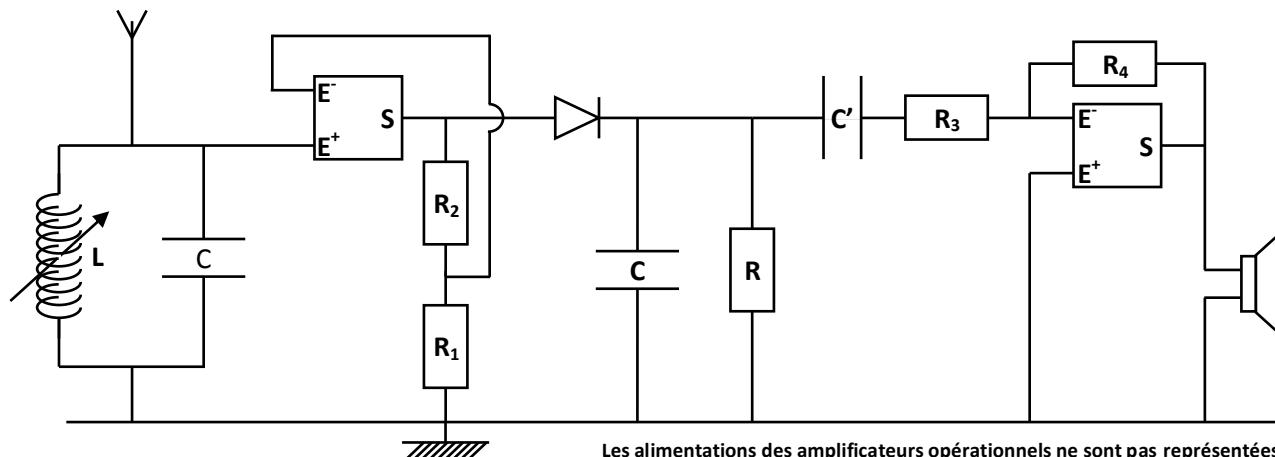
Nous allons dans cette dernière partie étudier le principe d'un récepteur radio destiné à capter des grandes ondes modulées en amplitude (AM).

a. ÉLÉMENTS D'UN RÉCEPTEUR RADIO

Un récepteur comportera cinq parties distinctes ayant chacune un rôle propre :

- ☞ une partie « antenne » destinée à capter et filtrer l'onde électromagnétique (en jouant sur L ou C). Le filtre utilisé dans cette partie permettra de sélectionner la fréquence de l'onde porteuse que l'on veut capturer.
- ☞ une partie « pré-amplification », nécessaire pour que la diode utilisée ensuite dans la démodulation ne coupe pas une partie du signal.
- ☞ une partie « démodulation » destinée à décrypter le signal modulant et donc l'information.
- ☞ une partie « amplification » permettant de régler le volume du signal sonore qui va être émis.
- ☞ une partie « haut-parleur » destinée à l'émission sonore.

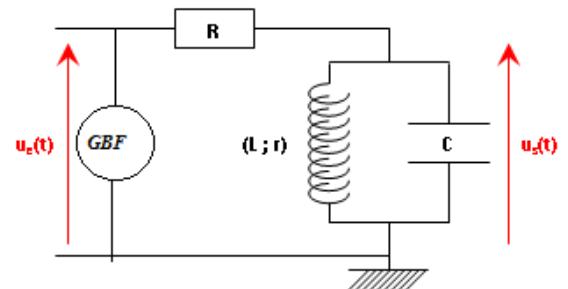
8. Repérer, sur le schéma suivant, chacune des 5 parties citées :



b. ÉTUDE D'UN FILTRE « PASSE-BANDE »

On appelle **circuit d'accord** ou **circuit sélectif** le circuit LC parallèle relié à l'antenne et permettant de capter de manière sélective une onde électromagnétique parmi d'autres. Le circuit LC parallèle utilisé alors est appelé **filtre « passe-bande »**.

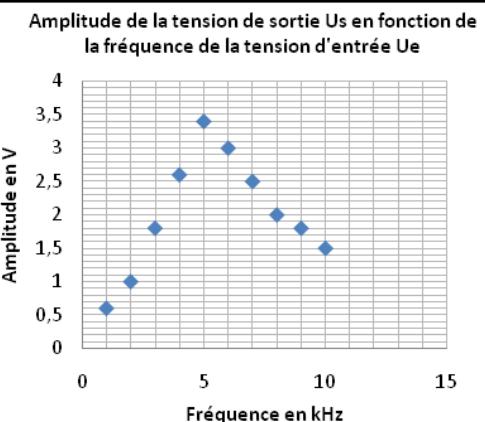
- On a réalisé le circuit ci-contre en prenant $R = 5 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \text{ nF}$ et la bobine d'inductance $L = 100 \text{ mH}$ et $r = 400 \Omega$.
- On a réglé le générateur, en visualisant son signal à l'oscilloscope sur la voie 1, de manière à ce qu'il émette un signal $u_e(t)$ de fréquence $f = 1000 \text{ Hz}$ et d'amplitude 4 V .
- On a branché la voie 2 aux bornes de l'association en parallèle LC, pour visualiser la tension appelée $u_s(t)$.
- On a modifié la fréquence et noté l'amplitude U_s du signal de sortie correspondant et noté les résultats dans le tableau ci-dessous :



Fréquence (f) en kHz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amplitude (U_s) en V	0,6	1	1,8	2,6	3,4	3	2,5	2	1,8	1,5

- On a tracé la courbe $U_s(t)$ en fonction de la fréquence du signal $u_{e(t)}$ délivré par le GBF.

9. Comment se comporte le circuit LC parallèle en fonction de la fréquence du signal d'entrée ? Pourquoi l'appelle-t-on « filtre » passe bande ?



On appellera **bande passante à 3 décibels** la gamme de fréquence pour lesquelles l'amplitude est supérieure ou égale à $\frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$.

10. Trouver la bande passante de ce filtre.

Les fréquences définissant la bande passante sont symétriques par rapport à la fréquence propre f_0 du filtre.

11. Calculer la fréquence propre du filtre, donnée par la formule ci-dessous :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$$

CONCLUSION

Le filtre « passe bande » ne laisse passer, de manière sélective, que les signaux ayant une fréquence proche de sa fréquence propre f_0 . La valeur de cette fréquence propre et la largeur de la bande passante sont directement liées aux caractéristiques (C ; L ; r) du filtre.

Pour être efficace, un filtre devra donc avoir une fréquence propre égale à la fréquence de la porteuse de la station que l'on veut capter, et une bande passante de l'ordre de 20 kHz pour pouvoir capter l'ensemble des signaux audibles.

La fréquence propre du filtre sera réglée grâce à un condensateur de capacité variable ou une bobine d'inductance variable :

- le réglage de L se fait lors du choix de la gamme d'ondes (grandes ondes ou ondes courtes), il modifie en fait la longueur de la bobine;
- le réglage de la capacité du condensateur variable permet de sélectionner la station de radio.

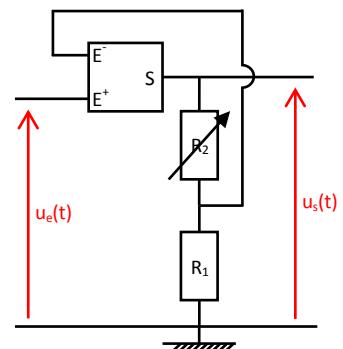
c. AMPLIFICATION D'UN SIGNAL ÉLECTRIQUE

Avant la démodulation, il est nécessaire d'effectuer une pré-amplification pour que la diode, ne coupe pas une partie du signal reçu. Après la démodulation, une nouvelle amplification sera nécessaire pour rendre le signal audible et permettre à l'auditeur de régler le volume d'écoute.

L'amplification est réalisée par un amplificateur opérationnel utilisé en amplification. Bien entendu, cette amplification nécessite un apport d'énergie donc l'A.O doit être alimenté par un générateur.

On définira le **gain en tension**, encore appelé **facteur d'amplification** par la relation : $G = \frac{R_2}{R_1}$

12. Calculer le gain de tension dans le cas suivant : $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ et $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$



Sur le poste de radio, le bouton volume permet de faire varier la valeur d'une résistance par rapport à l'autre, et donc de régler le facteur d'amplification du signal.