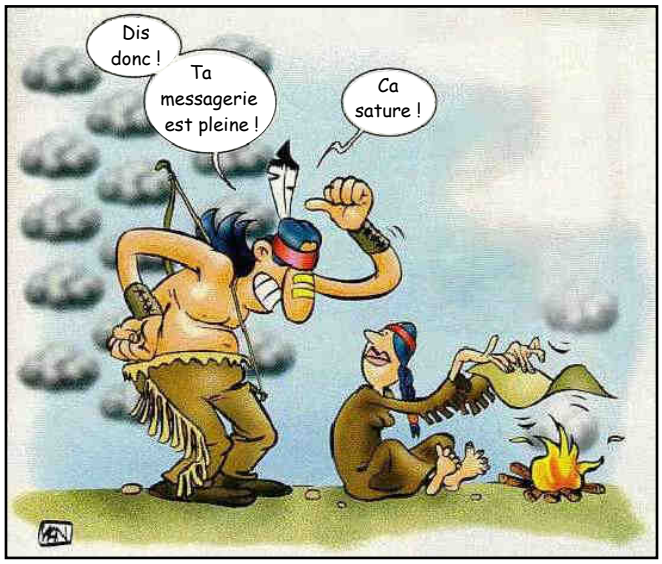
PARTIE 3
PRODUIRE DES SIGNAUX, COMMUNIQUER

A. TRANSMISSION D'INFORMATIONS PAR ONDES ELECTROMAGNETIQUES



I. PRINCIPE DES TELECOMMUNICATIONS

1. Support et canal de la transmission

1.1. En utilisant l'activité *Ap3.1spé*, remplir le tableau suivant :

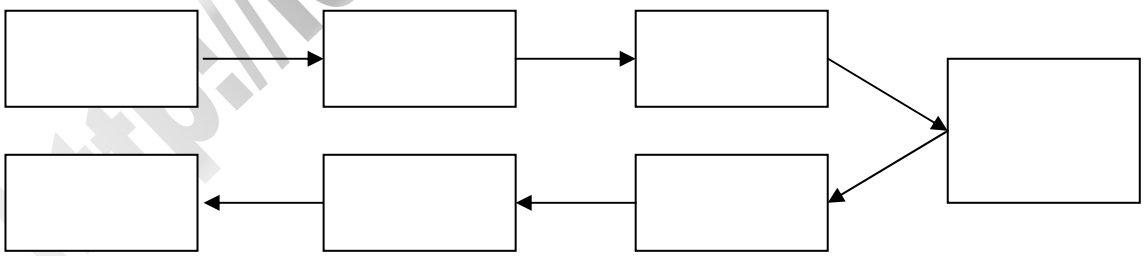
instrument	support	canal	codé ?
signaux de fumée	fumée	lumière	oui

Depuis toujours, les hommes ont tenté de transmettre des messages le plus rapidement possible, d'un lieu à l'autre. On a d'abord fait appel à des messagers (hommes ou pigeons), à des signaux audibles (tam tam) ou à des signaux lumineux (feu ou fumée).
Par exemple, le facteur (***le support***) peut transporter simultanément plusieurs enveloppes contenant chacune un message informatif. Chaque enveloppe, avec une adresse différente, constitue ***un canal***, assurant la transmission de l'information. Il est alors aisé de distribuer chacune des enveloppes grâce aux différentes adresses, puis en ouvrant l'enveloppe (qui n'intéresse pas le destinataire) de récupérer le message.
Dans le cas des ondes radio : il est possible d'écouter à la radio différents morceaux de musique. La transmission des signaux correspondants s'effectue simultanément par ondes électromagnétiques (……) mais sur un domaine de fréquence spécifique (……) attribué à chaque émetteur.

En radiophonie ou en téléphonie, l'information (ou signal) que l'on veut transmettre est transformée en un autre type de signal porté par une onde électromagnétique.

2. Intérêt de l'utilisation d'une onde électromagnétique

1.2. Expliquer pourquoi on ne peut pas transporter directement le signal sonore et pourquoi on utilise une onde électromagnétique pour « porter » ce signal.
1.3. Compléter le schéma de principe de la transmission d'une onde sonore :



II. LES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

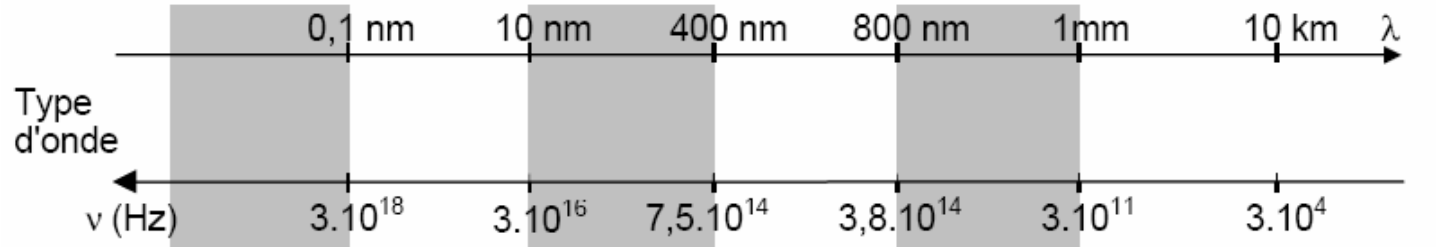
1. Historique

En 1865, James Maxwell (1831-1879) établit une théorie des ondes électromagnétiques. Celles-ci se propagent, se réfléchissent et se réfractent comme les ondes lumineuses. En fait, il montre que la lumière fait partie des ondes électromagnétiques dans un domaine restreint de fréquence.
En 1887, Heinrich Hertz (1857-1894) produit des ondes électromagnétiques et parvient à les détecter. Ces ondes découvertes par Hertz font partie d'un autre domaine de fréquence et sont appelées ondes hertziennes.

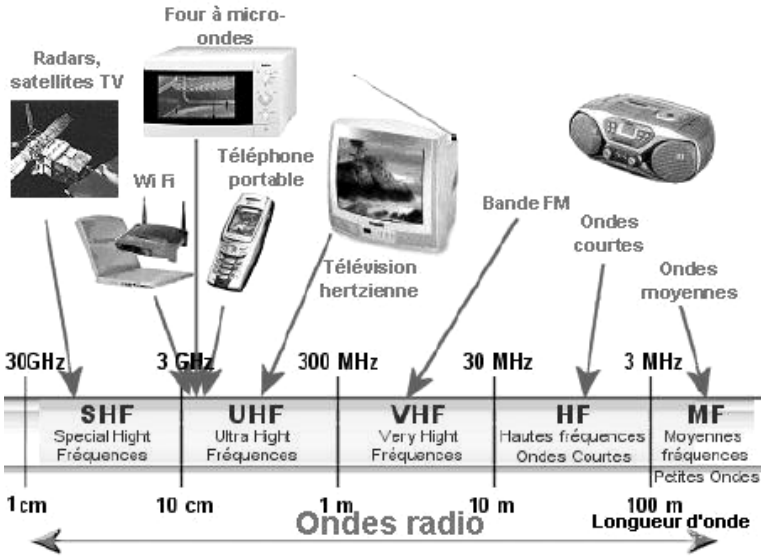
http://lefevre.pc.free.fr

2. Propriétés des ondes électromagnétiques

2.1. Rappeler la définition d'une onde.
2.2. A quelle vitesse se propage une onde électromagnétique dans le vide (ou dans l'air) ?
2.3. Quelles sont les fréquences des ondes lumineuses (visible) ?
2.4. Compléter le schéma ci-dessous en plaçant les mots : rayons γ, rayons X, UV, visible, I.R., ondes hertziennes.



Les ondes hertziennes sont celles dont les fréquences sont les plus faibles. Leurs longueurs d'onde sont supérieures au mm et peuvent atteindre plusieurs km. Ces ondes s'amortissent généralement faiblement au cours du transport et elles ne traversent pas les métaux.
L'ionosphère (couche de l'atmosphère comprise entre 50 et 500 km) peut réfléchir ou réfracter certaines ondes hertziennes.



3. Rôle des antennes dans la transmission

exp1 *Objectifs :*
- *Mettre en évidence le rôle des antennes*
- *Mettre en évidence la transmission par ondes électromagnétiques*
- *Utiliser un circuit oscillant LC*

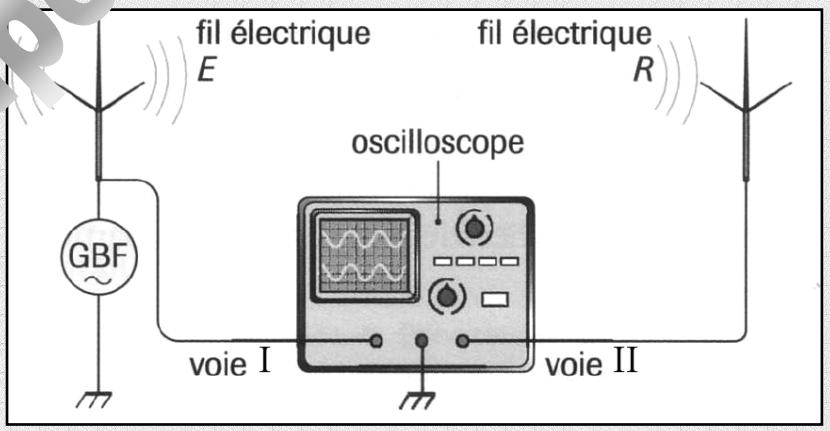
au bureau

a. Les ondes traversant la salle

▪ Connecter un fil électrique R sur la voie II d'un oscilloscope (pas de fil connecté à la masse).
✍ Quel est le rôle de ce fil électrique ?
✍ Qu'observe-t-on sur l'oscilloscope après avoir réglé la base de temps (5 ou 10 ms/div) et la sensibilité verticale ?
✍ Peut-on mettre en évidence une fréquence particulière ? A quoi peut-elle correspondre ?

b. Transmission d'un signal

▪ Connecter un fil électrique E sur la sortie d'un GBF (ou d'un circuit oscillant LC)
▪ Régler le GBF sur un signal alternatif sinusoïdal, de fréquence voisine de 200 kHz.
▪ En voie I entrer le signal de sortie du GBF et le visualiser, après avoir réglé la base de temps (20 µs/div) et la sensibilité verticale, en même temps que le signal reçu (appuyer sur DUAL).
✍ Quelle est la forme du signal reçu ?
✍ Quel est le rôle de chaque fil E et R ?
✍ Quelle est la position relative qui rend la réception optimale ?



Une onde électromagnétique est créée par un courant électrique variable (obtenu grâce à un circuit LC par exemple). Une antenne émettrice reliée au circuit oscillant émet une onde électromagnétique de même fréquence que le signal électrique du circuit. Cette onde, qui s'est propagée dans tout l'espace, engendre dans l'antenne réceptrice un signal électrique de même fréquence.

http://etoile.pc.free

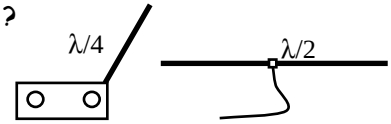
4. Principe de la modulation d'une tension sinusoïdale

a. Nécessité d'une onde porteuse

Une station radio doit transmettre un signal (voix humaine, musique) de fréquence comprise entre 20Hz et 20 kHz.

2.5. Que se passerait-il si plusieurs stations émettaient directement ces signaux ?

2.6. Sachant que l'antenne adaptée à une onde hertzienne a une longueur égale à $\lambda/2$ ou $\lambda/4$, quel serait l'ordre de grandeur de l'antenne ?



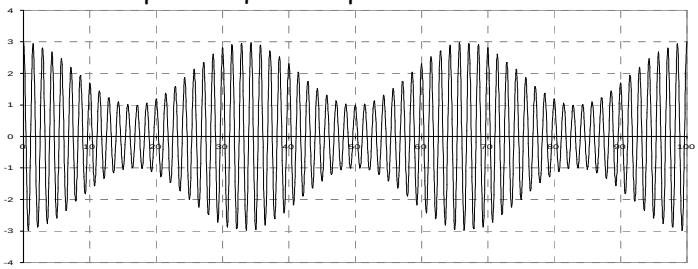
De plus les signaux de basses fréquences rayonnent très peu et sont rapidement amorties avec la distance.

Pour transmettre un signal de basse fréquence, on utilise une onde de haute fréquence modulée par ce signal.
Par la suite, on notera :
- s(t) le signal basse fréquence à transmettre ou ***signal modulant***, de fréquence $\mathbf{f_s}$: $s(t) = S_m \cdot \cos(2\pi \mathbf{f_s}.t+\varphi_s)$
- p(t) ***la porteuse*** de fréquence $\mathbf{f_p}$ très grande par rapport à f_s : $p(t) = P_m \cdot \cos(2\pi \mathbf{f_p}.t+\varphi_p)$

b. Paramètres pouvant être modulés

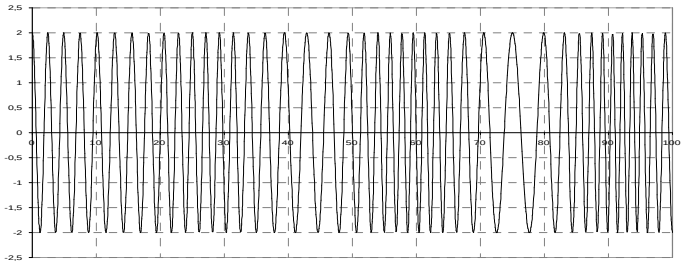
Le signal transmis, noté u(t), dépend de la façon dont on a modulé l'onde ***porteuse*** :

Modulation d'amplitude :
c'est l'amplitude qui n'est plus constante :



u(t) = ……

Modulation de fréquence :
c'est la fréquence qui n'est plus constante :



u(t) = ……

Modulation de phase :
c'est la phase qui n'est plus constante : u(t) = ……

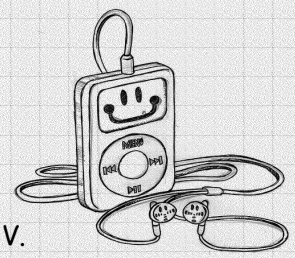
B. MODULATION ET DEMODULATION D'AMPLITUDE

I. MODULATION D'AMPLITUDE

1. Exemple d'émission par modulation d'amplitude

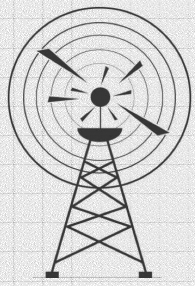
exp2 *Objectifs :* - *Observer les éléments essentiels pour émettre un signal modulé*
- *Simuler une station radio grandes ondes (GO)*

au bureau



a. Observation du signal modulant
- Brancher le signal d'un lecteur mp3 sur un ampli relié à un haut-parleur puis l'écouter.
- Observer le signal à transmettre à l'oscilloscope.
- ✍ Dessiner grossièrement l'allure du signal noté s(t).
- Brancher ce signal sur l'entrée X_1 du multiplieur/modulateur.

b. Observation de la porteuse
- Régler sur le GBF une tension sinusoïdale de fréquence $f_p \approx 200$ kHz et d'amplitude $P_m \approx 1$ V.
- Observer la ***porteuse*** à l'oscilloscope.
- ✍ Dessiner grossièrement l'allure de la ***porteuse*** notée p(t).
- Brancher ce signal sur les entrées X_2 et Z du multiplieur/modulateur.



c. Observation du signal modulé
- Observer à l'oscilloscope le ***signal modulé*** à la sortie du multiplieur.
- ✍ Dessiner grossièrement l'allure du ***signal modulé*** noté u(t).

d. Emission du signal modulé
- Relier une antenne à la sortie du multiplieur pour rayonner ce signal.

e. Réception sur un poste radio du signal modulé
- Se placer en grandes ondes (GO ou LW) et sélectionner la station aux alentours de 200 kHz (= f_p).
- Augmenter le volume pour tenter de capter le signal issu du lecteur mp3.
- ✍ Conclure sur les éléments essentiels pour émettre un signal modulé.

wlefevre-pc.free.fr

2. Réalisation d'une onde modulée en amplitude

exp3 *Objectifs :*
- *Observer à l'oscilloscope le signal modulant, la porteuse*
- *Utiliser le multiplieur pour réaliser le signal modulé*
- *Observer à l'oscilloscope le signal modulé*

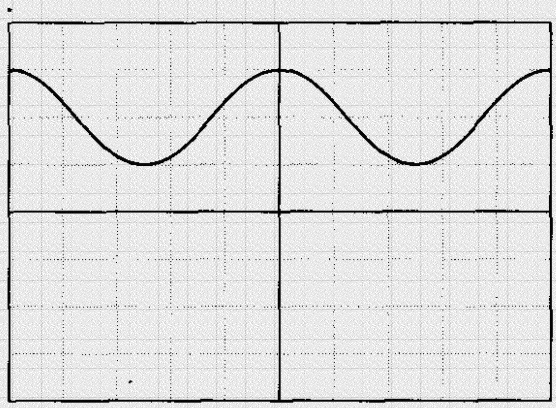
a. Réglage de l'oscilloscope

- Vérifier que la voie I et la base de temps de l'oscilloscope ne sont pas décalibrées (tourner le bouton central complètement à droite).
- Pour cette voie I, positionner au milieu de l'écran la trace correspondant à une tension nulle.
- Choisir le couplage DC.
- Sélectionner par la suite pour le déclenchement « TRIG » la position LF ou HF selon le signal à observer.

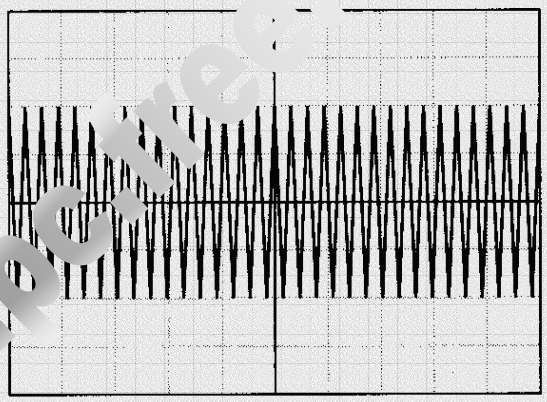
b. Etude du signal modulant

Pour simuler le ***signal modulant***, on utilise le GBF_1 délivrant une tension sinusoïdale s(t) d'amplitude S_m = 1,0 V et de fréquence f_S = 1,0 kHz. À l'aide du réglage du décalage du signal de sortie du générateur (offset), on superpose à la tension sinusoïdale s(t) une tension constante positive de valeur U_0. On visualise la tension s(t) + U_0 sur la voie I de l'oscilloscope.

- Brancher un premier GBF pour simuler la tension modulante [s(t) + U_0].
- Régler d'abord la fréquence à l'aide du fréquencemètre : f_s = 1,0 kHz.
- Ajuster l'amplitude du signal à l'aide de l'oscilloscope : S_m = 1,0 V.
- Ajouter ensuite la tension de décalage U_0 = 2,0 V à l'aide du bouton d'offset du GBF.



Tension modulante s(t) + U_0
Coefficient de balayage : 200 µs / div
Sensibilité verticale : 1 V / div



Porteuse p(t)
Coefficient de balayage : 20 µs / div
Sensibilité verticale : 2 V / div

✍ Repérer sur l'oscillogramme la tension de décalage U_0 ainsi que l'amplitude de la tension modulante S_m.

c. Etude de la porteuse

Pour simuler l'onde ***porteuse***, on utilise le GBF_2 délivrant une tension sinusoïdale p(t) d'amplitude P_m = 4,0 V et de fréquence f_P = 160 kHz. On visualise cette tension p(t) sur la voie I de l'oscilloscope.

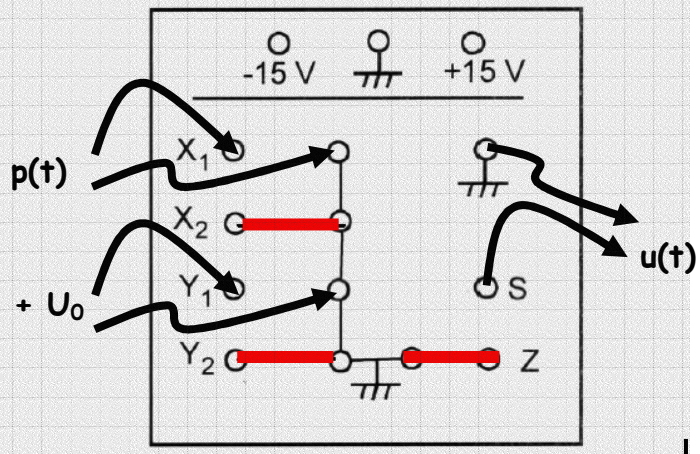
- Brancher un deuxième GBF pour simuler la ***porteuse*** p(t)
- Régler d'abord la fréquence à l'aide du fréquencemètre : f_p = 160 kHz.
- Ajuster l'amplitude du signal à l'aide de l'oscilloscope : P_m = 4,0 V.

✍ Repérer sur l'oscillogramme l'amplitude de la ***porteuse*** P_m.

d. Etude du signal modulé

Le modulateur est un composant électronique appelé multiplieur. Son rôle est simple : il multiplie les tensions qui lui sont appliquées en entrée.

Le multiplieur utilisé dans ce TP comporte 5 entrées (X_1, X_2, Y_1, Y_2 et Z) et une sortie S et effectue l'opération suivante : $S = \frac{(X_1 - X_2)\times(Y_1 - Y_2)}{10} + Z$



- Alimenter le multiplieur en (+15 V ; 0 ; -15 V).
- Relier les entrées X_2, Y_2 et Z à la masse à l'aide de cavaliers comme sur le schéma ci-contre.
- Envoyer la ***porteuse*** p(t) sur l'entrée X_1, le ***signal modulant*** [s(t) + U_0] sur Y_1 comme sur le schéma ci-contre.
- Observer le ***signal modulé*** u(t) à la sortie S du multiplieur sur la voie I de l'oscilloscope.

philetevre.pc

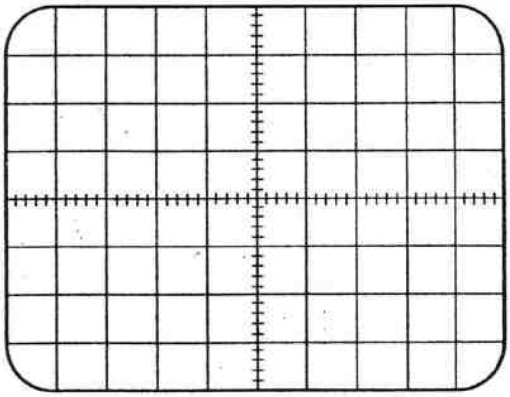
3. Etude théorique d'une onde modulée en amplitude

a. Expression du signal modulé

1.1. Représenter l'oscillogramme du ***signal modulé***.
Attention à la sensibilité verticale et au balayage !

Pour simplifier l'étude théorique, on considèrera les phases des différents signaux nulles : $\varphi_s = \varphi_p = \varphi_u = 0$. Ainsi le ***signal modulant*** aura pour expression $s(t) = S_m \cdot \cos(2\pi \mathbf{f_s}.t)$ et la ***porteuse*** $p(t) = P_m \cdot \cos(2\pi \mathbf{f_p}.t)$.

1.2. Pour le montage de l'exp. 3, déterminer les valeurs de X_1, X_2, Y_1, Y_2 et Z et en déduire l'expression littérale du ***signal modulé*** u(t).



Signal modulé u(t)
Coefficient de balayage : 200 µs / div
Sensibilité verticale : 2 V / div

b. Taux de modulation

1.3. En introduisant le ***taux de modulation*** $m = S_m / U_0$ et en posant $A = P_m \times U_0 / 10$, montrer que la tension modulée en amplitude peut se mettre sous la forme : $u(t) = A \times [m \times \cos(2\pi \mathbf{f_s}.t) + 1] \times \cos(2\pi \mathbf{f_P}.t)$

Une tension modulée en amplitude peut également se mettre sous la forme :

$$u(t) = U_m(t) \times \cos(2\pi \mathbf{f_p}.t) \quad \text{avec} \quad U_m(t) = A \times [m \times \cos(2\pi \mathbf{f_s}.t) + 1]$$

L'amplitude de la tension modulée $U_m(t)$ varie alors entre deux valeurs extrêmes notées U_{min} et U_{max},

1.4. Expliquer pourquoi on dit que « réaliser une modulation d'amplitude c'est rendre l'amplitude du signal modulé fonction affine de la tension modulante ».

1.5. Déterminer les expressions littérales de U_{min} et U_{max} en fonction de A et m.

En déduire que l'expression littérale du taux de modulation peut se mettre sous la forme : $m = \dfrac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}$.

1.6. A partir du signal modulé de l'exp. 3, déterminer les valeurs de U_{max} et U_{min} et calculer la valeur du taux de modulation m. La comparer avec la valeur trouvée en utilisant l'expression $m = S_m / U_0$.

c. Conditions pour éviter la surmodulation

Pour réaliser une bonne modulation, le signal modulé doit comporter l'information ; le profil supérieur ou inférieur de l'enveloppe de la tension modulée est alors l'image du signal modulant.

La qualité de la modulation peut être également estimée en utilisant l'oscilloscope en XY, avec en X (voie 2) la tension modulante s(t) et en Y (voie 1) la tension modulée u(t).

exp4

Objectifs :
- *Observer les signaux en mode XY*
- *Utiliser la méthode du trapèze*
- *Déterminer les conditions pour éviter la surmodulation*

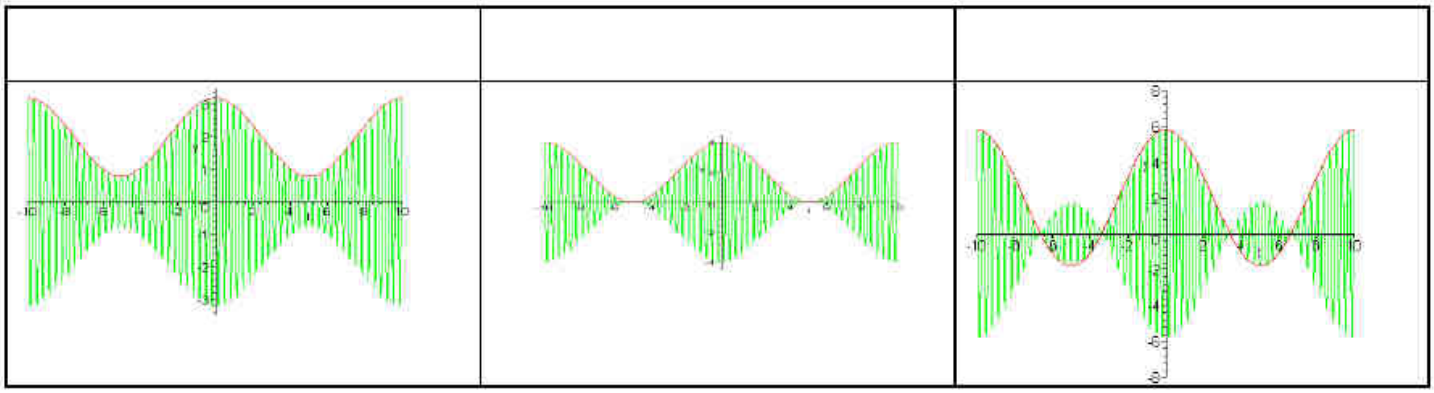
▪ Régler l'oscilloscope pour visualiser la tension modulante s(t) en voie 2 et la tension modulée u(t) en voie 1.
✍ Observer le signal modulé pour le cas où 0 < m < 1.
▪ Sur l'oscilloscope passer en mode XY.
✍ Observer la figure correspondante.
▪ Désactiver le mode XY et augmenter l'amplitude S_m du signal modulant délivré par le GBF_1.
✍ Observer le signal modulé pour le cas où m = 1.
▪ Réactiver le mode XY de l'oscilloscope.
✍ Observer la figure correspondante.
▪ Désactiver le mode XY et fixer de nouveau l'amplitude S_m du signal délivré par le GBF_1 à 1,0 V. Changer la valeur de U_0 avec le bouton d'offset du GBF.
✍ Observer le signal modulé pour le cas où m > 1.
▪ Réactiver le mode XY de l'oscilloscope.
✍ Observer la figure correspondante.

1.6. Faire correspondre les oscillogrammes suivants en mode balayage puis en mode XY en notant les différents cas : 0 < m < 1 ou m = 1 ou m > 1.

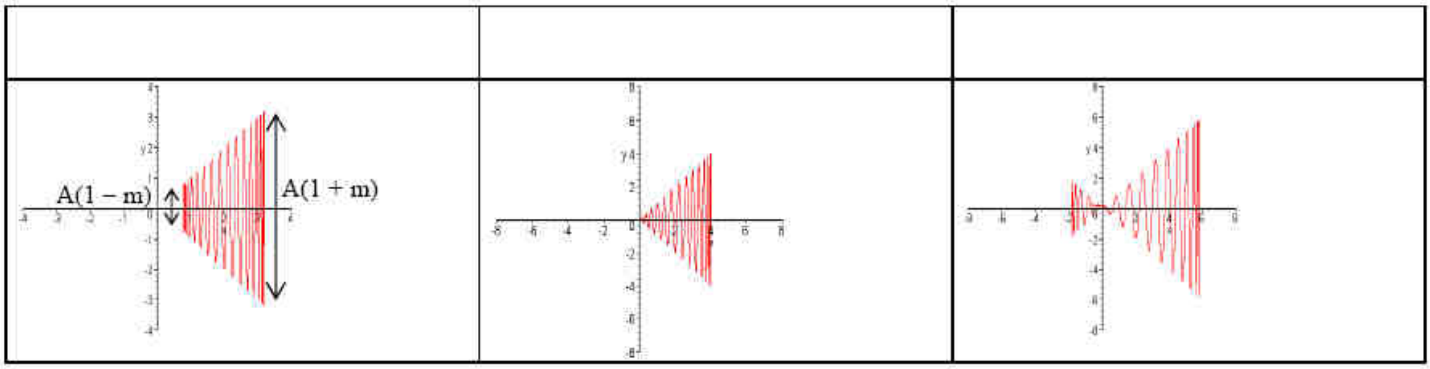
1.7. Citer la condition pour éviter la surmodulation.

lelefevre.pc.free.fr

☞ En mode balayage :



☞ En mode XY :



d. Bandes de fréquence du signal modulé

1.8. En utilisant une relation de trigonométrie (formules d'addition) montrer que le signal modulé peut s'écrire sous la forme : $u(t) = A.\cos(2\pi \mathbf{f_p}.t) + A.m/2.\cos(2\pi(\mathbf{f_p}+\mathbf{f_s}).t) + A.m/2.\cos(2\pi(\mathbf{f_p}-\mathbf{f_s}).t)$

1.9. En utilisant le fait que la tension modulée est la somme de 3 tensions sinusoïdales de fréquences $\mathbf{f_p}$, $\mathbf{f_p}+\mathbf{f_s}$ et $\mathbf{f_p}-\mathbf{f_s}$, dessiner le spectre en fréquence du signal modulé.

1.10. En déduire la largeur minimale de la bande de fréquences nécessaire à la propagation et à la réception du signal à transmettre.

1.11. Sachant que pour *France Inter* $\mathbf{f_p}$ = 162 kHz et que pour *Europe 1* $\mathbf{f_p}$ = 182 kHz, expliquer pourquoi les signaux des 2 stations se superposent et pourquoi il y a donc éventuellement brouillage.

Remarque : On voit bien ici l'intérêt de la FM où $\mathbf{f_p}$ est bien plus grande (en MHz et non kHz) et on peut donc porter une gamme de $\mathbf{f_s}$ bien supérieure.

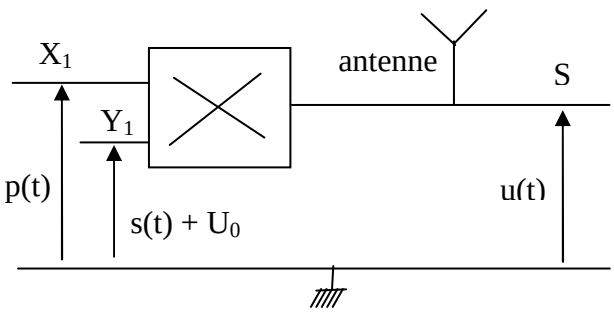
4. Emission et réception d'une onde modulée en amplitude

1.12. Afin de transmettre le signal, que faut-il rajouter au montage précédent ?

☞ Le réaliser et essayer de capter le signal informatif sur le poste de radio mis à disposition.

☞ Si le temps le permet, refaire l'exp.2 à sa paillasse avec son lecteur mp3.

A RETENIR :



http://lefevre.pc.

II. RECEPTION ET DEMODULATION D'AMPLITUDE

1. Les stations émettrices en France

Différentes stations radiophoniques émettent en modulation d'amplitude sur les grandes ondes :

Radio émettrice	Longueur d'onde (m)	Fréquence f_p (kHz)
France Inter	1852	
Europe 1	1648	
RMC	1400	
RTL	1282	

2.1. Calculer les fréquences $\mathbf{f_p}$ de la porteuse pour ces différentes stations et compléter le tableau.

La largeur de la bande de fréquences légalement autorisée pour émettre en modulation d'amplitude est en fait de Δf = 9 kHz. En effet, la voix humaine n'utilise qu'une bande de fréquence qui va de quelques dizaines de Hz à quelques kHz.

2.2. Quelle est la bande de fréquences attribuée à France Inter ?

2.3. Sachant qu'une antenne reçoit des ondes hertziennes émises par un très grand nombre de stations radiophoniques, quelle fonction le circuit électrique couplé à l'antenne doit-il remplir pour capter la bonne station ?

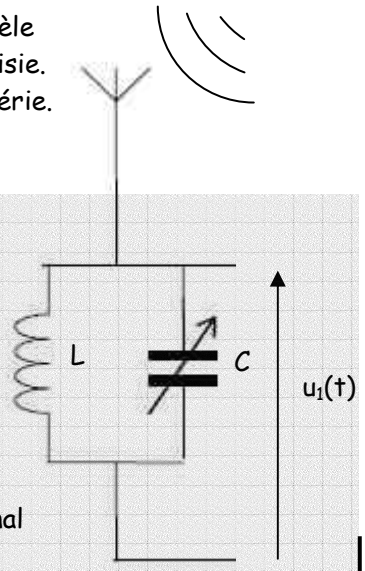
2. Réception : circuit d'accord {LC parallèle}

La sélection d'une station de radio se fait, sur un poste de radio, par un circuit LC parallèle qu'on accorde (c'est-à-dire qu'on règle) sur la fréquence de la porteuse de la station choisie.
La fréquence d'accord (ou fréquence de résonance) est la même que pour un circuit LC série.

2.4. Quelle est l'expression de cette fréquence $\mathbf{f_r}$ en fonction de L et C ?

exp5 *Objectifs :* - *Sélectionner une fréquence d'accord*
- *Comprendre le terme « passe-bande »*

au bureau



- Reprendre le montage de l'exp.3 pour obtenir un signal modulé.
- L'envoyer via une antenne émettrice vers l'ensemble {antenne réceptrice - circuit LC parallèle} situé à quelques cm.
- Faire varier la valeur de C grâce au bouton de réglage du circuit LC et observer sur la voie 1 de l'oscilloscope le signal $u_1(t)$.

✍ L'inductance de la bobine valant L = 1 mH, pour quelle valeur de C observe-t-on un signal significatif à l'oscilloscope ?

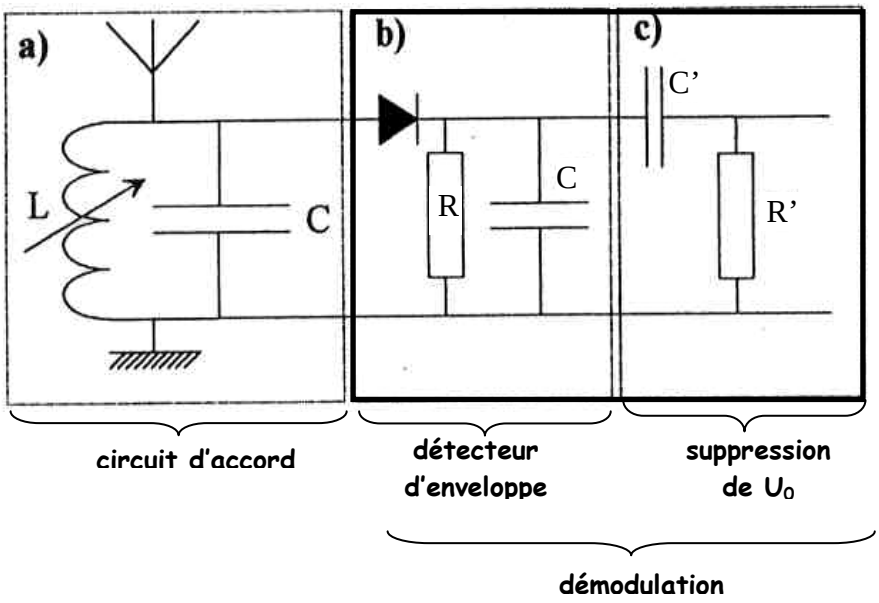
L'accord est réalisé quand l'amplitude de la tension est maximale.

- Changer la valeur de la fréquence de la porteuse $\mathbf{f_p}$ et observer. Accorder de nouveau le circuit LC.

2.5. Pourquoi le circuit LC parallèle est-il appelé ***filtre passe-bande*** pour la tension ?

2.6. En utilisant la réponse à la question 1.9. dire pourquoi le filtre ne doit pas être trop sélectif, c'est-à-dire pourquoi il ne doit pas sélectionner une bande de fréquences trop fine.

Après réception du signal modulé (étape a), il faut le démoduler. Cette opération est réalisée en 2 étapes (b et c).



http://etevre.pc.free.fr

La démodulation consiste à récupérer le signal informatif modulant qui est contenu dans l'enveloppe du signal modulé en amplitude.

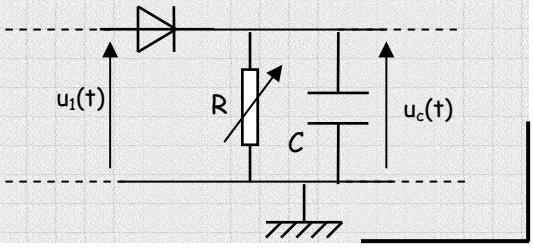
3. Démodulation. Etape 1 : la détection de l'enveloppe {diode - RC parallèle}

a. Observation expérimentale

exp6 *Objectifs :* - *Observer la détection d'enveloppe*
- *Comprendre le rôle des différents éléments*

au bureau

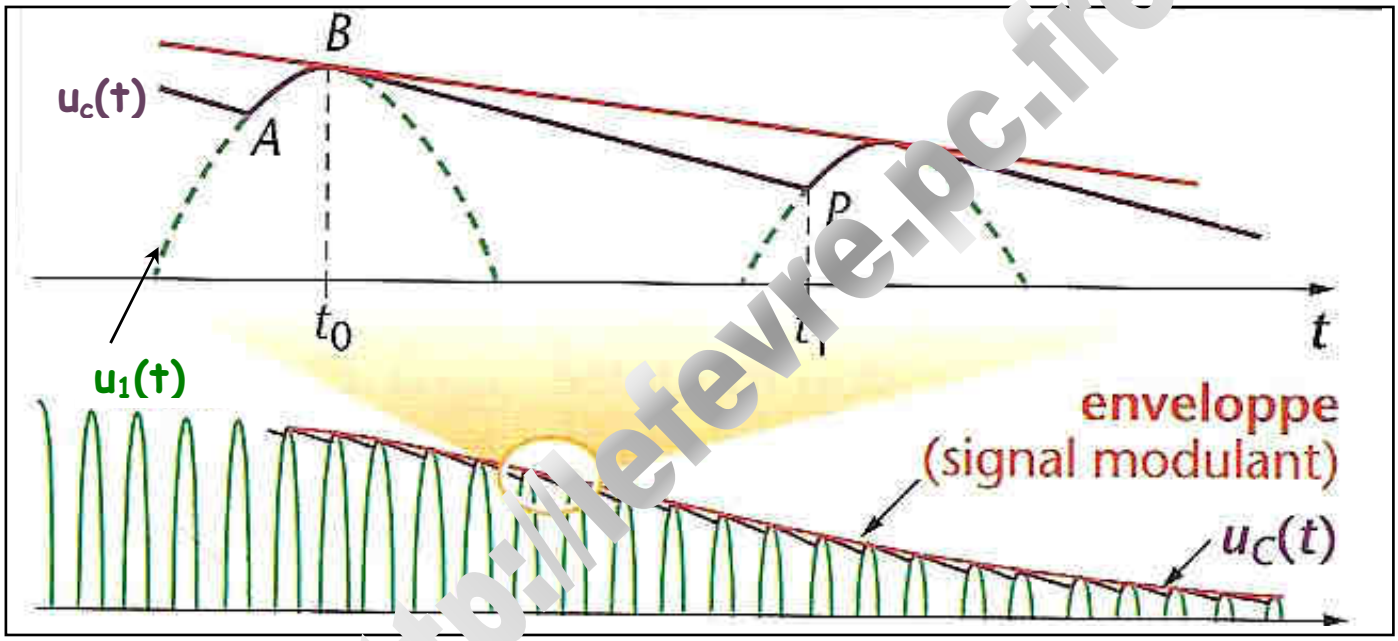
▪ Reprendre le montage de l'exp.5 et relier $u_1(t)$ au circuit « détecteur d'enveloppe ». Visualiser $u_c(t)$ sur la voie 1 de l'oscilloscope.
▪ Faire varier la valeur de R grâce au bouton de réglage. Observer.
✍ Justifier le nom donné au circuit.
✍ Représenter le cas où la détection d'enveloppe est satisfaisante.



b. Principe de fonctionnement

Au sujet de la diode :
La diode fonctionne comme un interrupteur commandé en tension. Idéalement, en notant u_d la tension à ses bornes :
- si $u_d < 0$ alors la diode est bloquante : la diode se comporte comme un interrupteur ouvert
- si $u_d = 0$ alors la diode est passante : la diode se comporte comme un interrupteur fermé.

Interprétation grâce à la figure suivante :



- sur la partie AB :
☞ $u_1(t)$ croît, la diode est passante, c'est juste un interrupteur fermé : $u_c(t) = u_1(t)$.
☞ Le condensateur se charge alors et $u_c(t)$ reproduit les variations de $u_1(t)$.
- sur la partie BP :
☞ $u_1(t)$ commence à décroître, alors pendant un bref instant $u_c(t) > u_1(t)$ ce qui implique $u_d < 0$ est donc la diode devient bloquante, fonctionnant comme un interrupteur ouvert.
☞ Le condensateur se décharge alors dans le conducteur ohmique, ce qui se traduit par une décroissance exponentielle de $u_c(t)$.
☞ Cette décharge se produit jusqu'à ce que, à nouveau, $u_c(t) = u_1(t)$ et alors $u_d = 0$ et la diode redevient passante et le processus recommence.

c. Qualité de la détection d'enveloppe

Au cours de la décharge (partie BP), pour avoir une bonne détection d'enveloppe, la courbe représentant $u_c(t)$ doit rester proche de l'enveloppe de $u_1(t)$. Donc le condensateur doit se décharger suffisamment lentement.

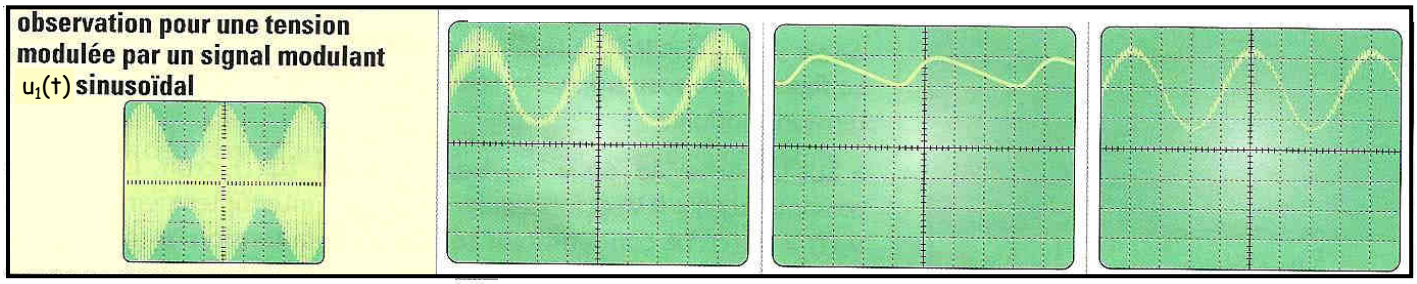
2.7. Quelle doit être la relation entre la constante de temps τ du circuit RC et la période T_p de la porteuse ?

http://lefevre.pc.free.fr

Cependant, la décharge ne doit pas être trop lente non plus, au risque que $u_c(t)$ reste supérieur à $u_1(t)$ même à la crête suivante.

2.8. Quelle doit être la relation entre la constante de temps τ du circuit RC et la période $\mathbf{T_s}$ du signal modulant ?

2.9. Sur les 3 oscillogrammes suivants, indiquer la qualité de la détection d'enveloppe, la cause (τ trop petit, trop grand, bien choisi) et la relation entre τ et $\mathbf{T_p}$ ou $\mathbf{T_s}$.



4. Démodulation. Etape 2 : la suppression de la composante continue {RC série}

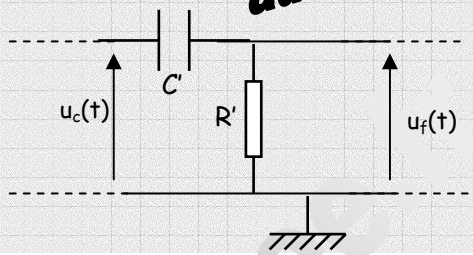
exp7 *Objectifs :* - *Observer la dispartion de la composante continue*
- *Comprendre le terme « passe-haut »*

au bureau

▪ Reprendre le montage de l'exp.6 et relier $u_c(t)$ au circuit « RC série ». Visualiser la tension finale $u_f(t)$ sur la voie 1 de l'oscilloscope.

✍ Qu'est-ce qui a changé entre $u_c(t)$ et $u_f(t)$?

✍ Représenter les 2 signaux sur un même oscillogramme.



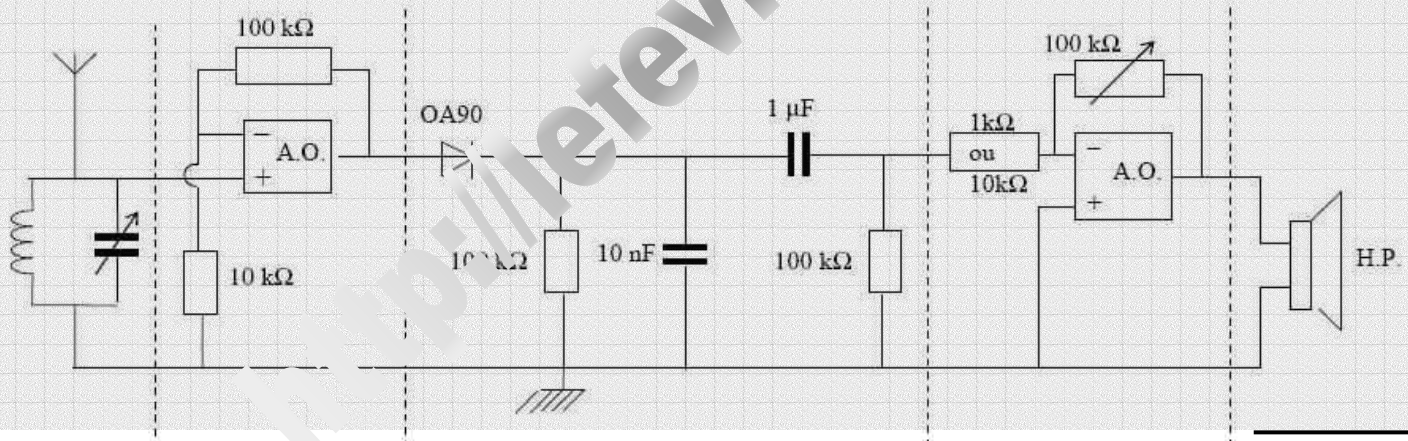
2.10. Pourquoi le circuit RC série est-il appelé ***filtre passe-haut*** pour la tension ?

5. Application à la réception de France Inter

exp8 *Objectifs :* - *Assembler et identifier tous les étages pour recevoir une station G.O.*

▪ Assembler les différents éléments suivants (utiliser la boîte prémontée et repérer les différents étages).

▪ Régler le circuit d'accord pour recevoir une des stations vues dans le II.1. Ecouter.



2.10. Compléter le schéma ci-dessus en nommant les différents étages qui le composent : démodulation ; émission sonore ; amplification BF ; amplification HF ; réception-filtrage

Remarques :

- Le signal modulé obtenu aux bornes du circuit d'accord est très faible et ne peut pas être démodulé tel quel. Il faut donc amplifier la tension modulée par un amplificateur opérationnel (A.O.).
- Le signal démodulé obtenu aux bornes du circuit de démodulation est faible. Il faut donc amplifier la tension finale démodulée pour obtenir une tension suffisante aux bornes du haut-parleur et pouvoir écouter la radio.

http://letevre.pc.free