

Partie $\phi 2$ - PRODUIRE DES SIGNAUX, COMMUNIQUER

COURS $\phi 1$ - LES ONDES ELECTROMAGNETIQUES.

1. SUPPORT ET CANAL D'INFORMATION.

1.1. INTRODUCTION.

Les notions de support et de canal peuvent être introduites simplement en analysant les premières méthodes de transmission d'informations. 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).

Un messager (le support) peut en effet transporter plusieurs lettres. Chaque lettre constitue un canal, assurant la transmission d'un message qu'il est alors aisé de séparer des autres à la réception.

Il est possible d'écouter à la radio différents morceaux de musiques. La transmission des signaux correspondants s'effectue simultanément par ondes électromagnétiques (le support) mais sur un domaine de fréquence spécifique (le canal) attribué à chaque émetteur.

On peut faire des feux de fumées (le support) de couleurs différentes (les canaux).

	Canal	Signal	Note
Signaux fumée	Lumière	Fumée	Code «Morse»
Sémaphore XVIII ^e	Lumière	Lumière	Code «Morse»
Télégraphe XIX ^e	Fil	Electrique	Code
Téléphone XX ^e	Fil	Electrique	Onde sonore
Radio-télécommunication	Lumière	Electrique	Onde sonore

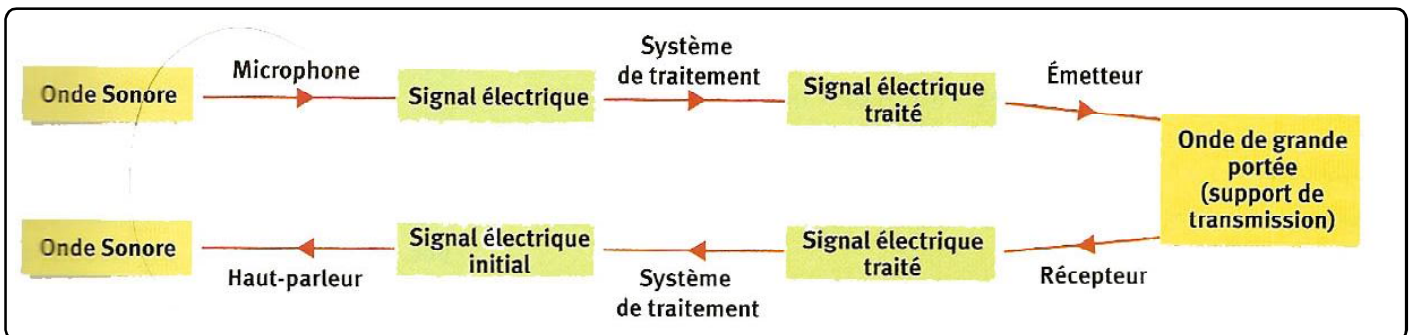
La transmission simultanée de plusieurs informations nécessite un canal différent affecté à chacune d'elles.

1.2. SUPPORT DE TRANSMISSION.

Le principe des télécommunications réside dans la transformation d'un signal afin de pouvoir en assurer la transmission. Prenons l'exemple des signaux sonores audibles. Ils occupent une bande de fréquences de 20 Hz à 20 kHz, s'atténuant très vite et leur portée est faible (de l'ordre du mètre au kilomètre).

En radiophonie ou en téléphonie, le signal sonore est transformé en un autre type de signal générant une onde de plus grande portée: c'est le support de la transmission de l'information.

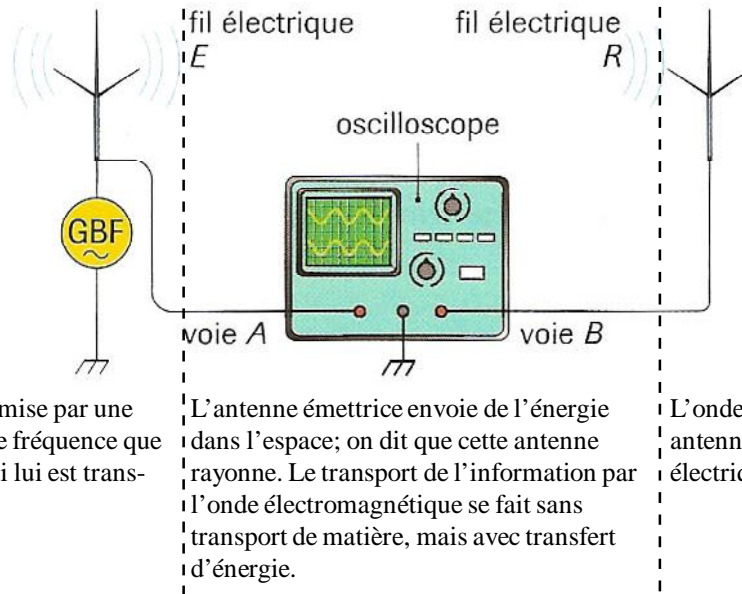
Voici le schéma de principe du traitement de l'information sonore, de sa transmission et de sa restitution.



Les supports de transmission les plus appropriés sont les ondes électromagnétiques se propageant soit dans l'air et le vide (ondes hertziennes), soit dans des milieux matériels (câbles en cuivre ou encore fibres optiques pour la lumière).

2. ONDES ELECTROMAGNETIQUES.

2.1. EMISSION, TRANSMISSION ET RECEPTION.



L'onde électromagnétique émise par une antenne émettrice a la même fréquence que celle du signal électrique qui lui est transmis.

L'antenne émettrice envoie de l'énergie dans l'espace; on dit que cette antenne rayonne. Le transport de l'information par l'onde électromagnétique se fait sans transport de matière, mais avec transfert d'énergie.

L'onde électromagnétique reçue par une antenne réceptrice engendre un signal électrique de même fréquence.

A noter que l'antenne d'un téléphone portable fonctionne en antenne émettrice ou bien en antenne réceptrice.

2.2. CLASSEMENT DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES.

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur fréquence ou leur longueur d'onde dans le vide.

La lumière fait partie des ondes électromagnétiques mais correspond à un domaine de longueur d'onde restreint compris entre 400 et 800 nm. Les ondes utilisées en radio sont de même nature mais ont des fréquences bien plus petites et des longueurs d'onde bien plus grandes.

Le domaine des ondes hertziennes correspond à des longueurs d'onde dans le vide comprises entre 0,1 m et 10^5 m. En fonction de leurs caractéristiques, on utilise ces ondes comme porteuses pour différents types de transmissions (voir tableau annexe).

2.3. PROPRIETES DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES.

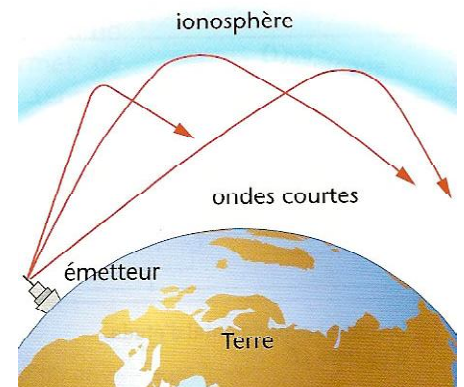
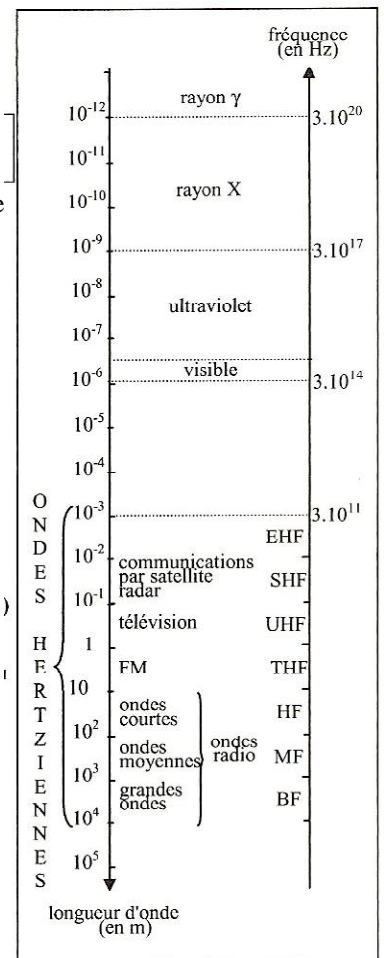
Les propriétés des ondes lumineuses se généralisent à toutes les ondes électromagnétiques:

- ❑ Une onde électromagnétique se propage dans le vide et dans les milieux matériels dits transparents. ainsi, elle permet, par exemple, de communiquer en utilisant des satellites de relais.
- ❑ La célérité d'une onde électromagnétique est très grande. Dans le vide, elle est de $3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹. Dans une fibre optique utilisée en téléphonie, elle est aussi de l'ordre de 10^8 m.s⁻¹. Ceci permet un transport extrêmement rapide de l'information.
- ❑ Une onde électromagnétique peut, selon sa fréquence, être plus ou moins amortie dans un milieu donné. Certains milieux, comme les métaux, sont ainsi très absorbants (on dit qu'ils sont opaques). D'autres peuvent être aussi très réfléchissants.

Ce dernier comportement de l'onde est mis à profit pour transmettre des informations, là aussi, sur de très longues distances:

- ❑ Ainsi les ondes hertziennes de fréquences typiquement inférieures à 30 MHz sont réfléchies par l'ionosphère;
- ❑ Les ondes de plus grandes fréquences traversent l'ionosphère. Ce phénomène a certaines conséquences:
 - ❑ les ondes radio des gammes courtes, ondes moyennes et grandes ondes, se trouvent ainsi piégées entre l'ionosphère et la Terre sur lesquelles elles sont réfléchies;
 - ❑ les ondes de fréquences supérieures traversent l'ionosphère. Il est donc nécessaire d'installer des «relais de télévision» qui réceptionnent ces ondes, les amplifient et les réémettent.

Ce même phénomène est mis à profit pour les communications et la télévision. On envoie une onde directionnelle vers un satellite (géostationnaire) qui la réémet en «arrosant» une grande surface sur la Terre.



3. INFORMATION - MODULATION ET DEMODULATION.

Etudions le cas de la transmission d'un signal radio.

Chaque station radio recueille une information sonore (voix humaine, musique ...) captée par un microphone qui transforme ces sons en un signal électrique basse fréquence.

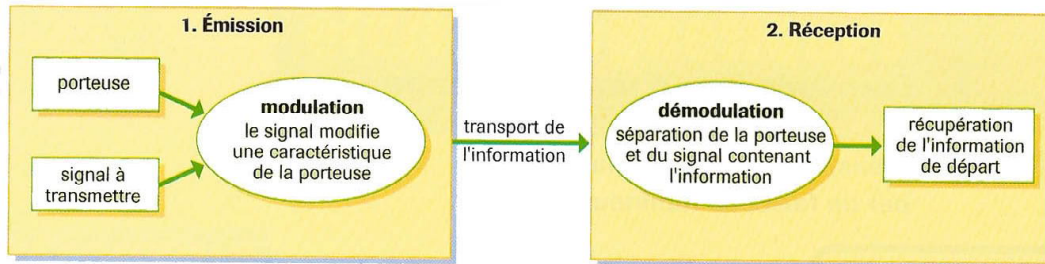
Ce signal ne peut être émis directement car plusieurs problèmes se posent:

- ❑ toutes les informations transmises par les stations radio correspondent à des signaux qui sont dans le domaine de fréquences 0 - 20 kHz. Si les stations émettaient directement leur information, ces signaux se chevaucheraient et les informations correspondantes seraient incompréhensibles pour les auditeurs;
- ❑ les dimensions de l'antenne réceptrice pour une onde donnée doivent être de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde. Cela conduirait à des antennes irréalisables du fait de leurs dimensions;
- ❑ enfin, les signaux basse fréquence sont fortement amortis avec la distance.

Pour pallier ces problèmes, c'est une onde porteuse haute fréquence (HF) qui va transporter l'information basse fréquence (BF) sous forme d'une onde modulée.

On appelle porteuse le support qui transporte l'information. Le signal est une «image» électrique de l'information à transmettre. Le signal module la porteuse lors de la transmission de l'information.

Le schéma suivant présente le principe de la chaîne d'émission-réception d'une information.

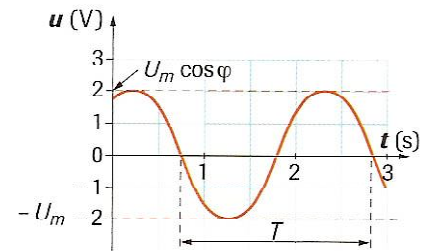


4. MODULATION D'UNE TENSION SINUSOÏDALE.

4.1. TENSION SINUSOÏDALE.

L'expression mathématique d'une tension $u(t)$ sinusoïdale est de la forme:

$$u(t) = U_m \cos[2.\pi.f.t + \phi] \text{ où } \begin{array}{l} U_m \text{ est l'amplitude (en volts)} \\ f \text{ est la fréquence (en Hertz)} \\ \phi \text{ est appelée phase à l'origine des temps.} \end{array}$$

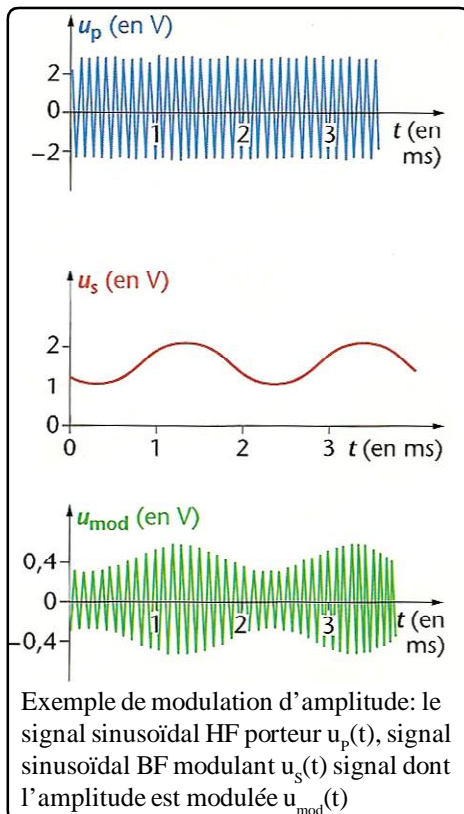


4.2. PARAMETRES POUVANT ETRE MODULES.

Nous savons que le signal à transmettre module l'onde porteuse.

L'amplitude, la fréquence ou la phase sont les trois caractéristiques de l'onde porteuse qui peuvent être modulées.

On parle alors respectivement de modulation d'amplitude, de modulation de fréquence et de modulation de phase.

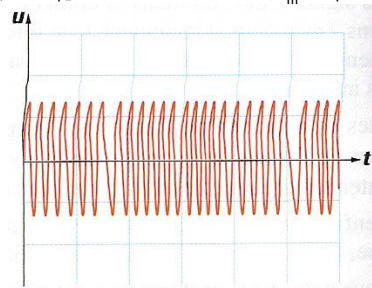


- ❑ La modulation d'amplitude, l'amplitude de l'onde porteuse est modifiée par le signal modulant. L'amplitude U_m n'est plus constante, elle suit les variations du signal modulant. L'expression de la tension modulée en amplitude $u(t)$ est alors de la forme:

$$u(t) = U_m(t) \cos[2.\pi.f.t + \phi] \text{ où seules } f \text{ et } \phi \text{ sont des constantes avec } f \text{ la fréquence de la porteuse}$$

- ❑ La modulation de fréquence, la fréquence de l'onde porteuse est modifiée par le signal modulant. L'expression de la tension modulée en fréquence $u(t)$ est alors de la forme:

$$u(t) = U_m \cos[2.\pi.f(t).t + \phi] \text{ où seules } U_m \text{ et } \phi \text{ sont des constantes.}$$



- ❑ La modulation de phase, la phase de l'onde porteuse est modifiée par le signal modulant. L'expression de la tension modulée en phase $u(t)$ est alors de la forme:

$$u(t) = U_m \cos[2.\pi.f.t + \phi(t)] \text{ où seules } U_m \text{ et } \phi \text{ sont des constantes.}$$

5. PRINCIPE DE LA MODULATION D'AMPLITUDE

Nota. Pour aborder ces notions théoriques, j'ai pris le parti de résoudre un exercice type bac qui regroupe les principales questions qui se rapportent à ce thème parfois délicat à maîtriser par les élèves, en faisant le parallèle avec une approche expérimentale au bureau, c'est-à-dire effectuer une modulation d'un signal porteur par un signal modulant (voir la vidéo sur le site)

Les ondes électromagnétiques ne peuvent se propager dans l'air sur de grandes distances que dans un domaine de fréquences élevées.

On veut transmettre, entre des points éloignés, des signaux (sons ou images par exemple) dont la portée est très limitée. La modulation d'amplitude permet cette transmission.

On envisage dans cet exercice un signal à transporter, sinusoïdal, correspondant à un son audible.

Ce signal sonore est utilisé pour produire une tension électrique sinusoïdale, de même fréquence, qui sert à moduler en amplitude une tension également sinusoïdale, dite porteuse. Cette tension modulée génère une onde électromagnétique.

L'émission (comme la réception) du signal modulé se fait avec une antenne métallique. Dans le cas d'une antenne linéaire, on montre qu'un bon fonctionnement de l'ensemble impose à l'antenne d'être d'une taille comparable à la longueur d'onde du signal émis.

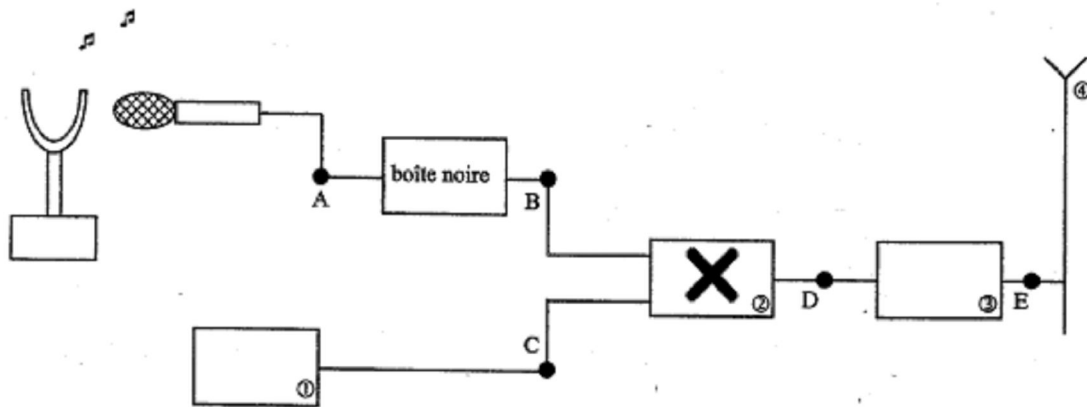
Données : Célérité de la lumière dans l'air $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Domaine de fréquences des sons audibles : [20 Hz ; 20 kHz].

1. Une des raisons de la modulation

1.1. Si une station émettait directement un signal électromagnétique de même fréquence que le signal sonore, à quel intervalle de longueurs d'onde appartiendrait ce signal électromagnétique ?

1.2. En se servant du texte introductif, avancer une raison pour laquelle les stations de radio n'émettent pas directement un signal électromagnétique de même fréquence que le signal sonore.

Le schéma 1 suivant représente la chaîne simplifiée de transmission d'un son par modulation d'amplitude. Elle est constituée de plusieurs dispositifs électroniques.

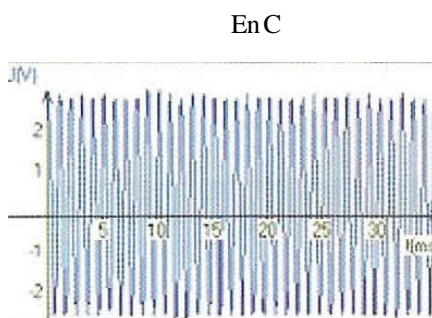


1.3. Parmi les cinq propositions ci-dessous, retrouver le nom des quatre dispositifs électroniques numérotés.

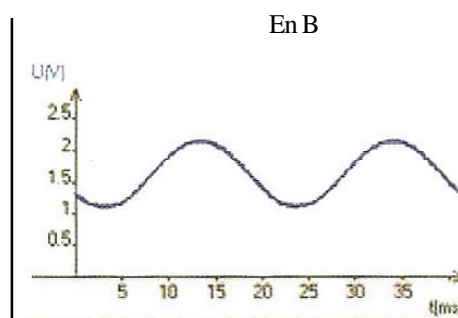
Dispositifs électroniques : Antenne, amplificateur HF (Haute Fréquence), générateur HF (Haute Fréquence), multiplieur, voltmètre.

2. Principe de la modulation.

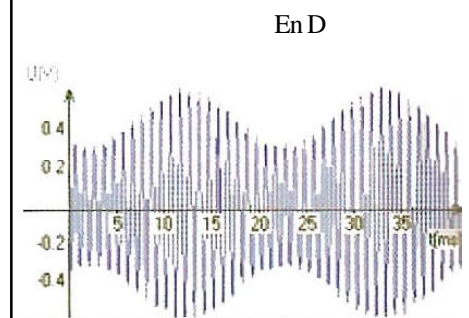
2.1. Quels sont les signaux obtenus en B, C et D parmi ceux cités ci-dessous ?



Porteuse
notée $u_p(t)$
avec $u_p(t) = U_p(\max)\cos(2\pi Ft)$



Signal modulant BF
noté $u_m(t) + U_0$
avec $u_m(t) = U_m(\max)\cos(2\pi ft)$



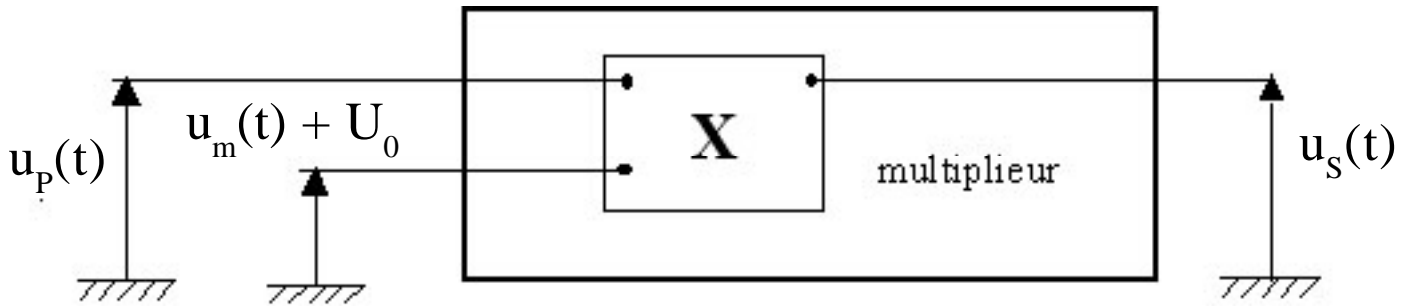
Signal en sortie modulé
noté $u_s(t)$

2.2. Le dispositif électronique X est un multiplieur qui effectue la multiplication $(u_m(t) + U_0) \times u_p(t)$

Pour réaliser une modulation d'amplitude, on utilise donc un montage multiplieur (représenté sur la figure ci-dessous). Le multiplieur donne donc en sortie une tension modulée $u_s(t)$ proportionnelle au produit des tensions appliquées sur les entrées :

$$u_s(t) = k \cdot (u_m(t) + U_0) \times u_p(t)$$

où le coefficient k est une constante qui ne dépend que du multiplieur.



2.3 Obtenir une modulation d'amplitude consiste à moduler l'amplitude d'une tension sinusoïdale $u_p(t)$ appelée **porteuse**, par le signal à transmettre, noté $u_m(t)$, appelé signal **modulant**.

- ❑ L'expression de la sinusoïde porteuse est de la forme $u_p(t) = U_p(\max) \cos(2\pi Ft)$. Son amplitude $U_p(\max)$ est constante et sa fréquence F est bien plus élevée que la fréquence f du signal modulant.
- ❑ L'expression de la sinusoïde modulante est de la forme $u_m(t) = U_m(\max) \cos(2\pi ft)$.

Pour réaliser une modulation d'amplitude, on utilise un multiplieur

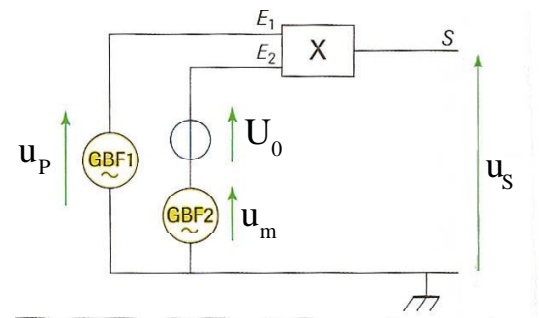
A la sortie du multiplieur, la tension modulée $u_m(t)$ est proportionnelle au produit des tensions d'entrée:

- ❑ $u_p(t)$ appliquée en E_1 ;
- ❑ et $u_m(t) + U_0$ appliquée en E_2 .

$$u_s(t) = k \cdot u_p(t) \cdot [u_m(t) + U_0] = k \times U_p(\max) \times \cos(2\pi Ft) \times [u_m(t) + U_0]$$

$$u_s(t) = k \times U_p(\max) \times \cos(2\pi Ft) \times [U_m(\max) \cos(2\pi ft + U_0)]$$

$$u_m(t) = k \times U_p(\max) \times U_m(\max) \cos(2\pi Ft) \times \left[\frac{U_m(\max)}{U_0} \cos(2\pi ft) + 1 \right]$$



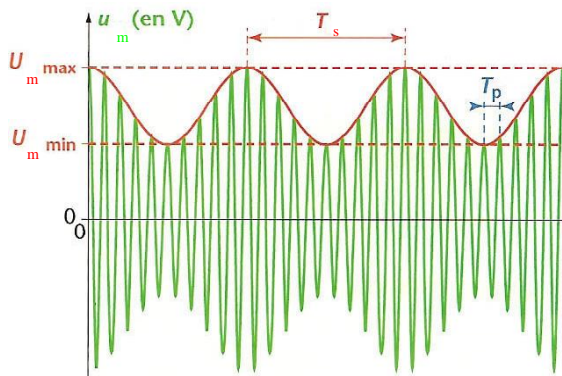
De la forme $u_m(t) = A \cos(2\pi Ft) \times [1 + m \cos(2\pi ft)]$ avec $A = k \times U_p(\max) \times U_m(\max)$ et $m = \frac{U_m(\max)}{U_0}$

2.4. Quelle est l'unité du coefficient k ?

2.5. L'amplitude instantanée $U_s(t)$ du signal modulé varie entre deux valeurs extrêmes $U_{m \max}$ et $U_{m \min}$.

Le taux de modulation m est défini par:

$$m = \frac{U_{m \max} - U_{m \min}}{U_{m \max} + U_{m \min}}$$



$$u_m(t) = k \cdot u_p(t) \cdot [u_s(t) + U_0]$$

$$U_m(t) = k \times U_{Pmax} \cdot (U_{Smax} \cdot \cos(2\pi f_s t) + U_0) \cdot \cos(2\pi f_p t)$$

L'amplitude $U_{m \max}(t)$ de la tension modulée varie entre $U_{m \max}$ et $U_{m \min}$ qui varie en fonction du cosinus qui varie entre -1 et +1, ce qui donne

$$U_{m \max} = k \times U_{Pmax} (U_0 + U_{Smax}) \quad U_{m \min} = k \times U_{Pmax} (U_0 - U_{Smax})$$

$$\text{Ainsi } m = \frac{U_{m \max} - U_{m \min}}{U_{m \max} + U_{m \min}} = \frac{2 U_{Smax}}{2 U_0} = \frac{U_{Smax}}{U_0}$$

Réglages de l'oscilloscope :

Balayage : 0,5 ms/div

Sensibilité verticale : 0,5 V / div

3.1. Calculer les valeurs des tensions maximale $U_s(\max)$ et minimale $U_s(\min)$ du signal modulé.

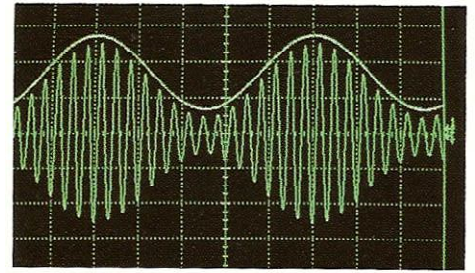
3.2. En déduire la valeur de m

3.3. 3.4 & 3.5

La tension U_0 joue un rôle important dans la qualité de la modulation. Pour que la tension modulée

$$u_m(t) = k \times U_{P_{\max}} \cdot [U_0 + u_s(t)] \cdot \cos(2\pi f_p t)$$

contienne intégralement l'information de la tension modulante, il faut que le terme $[U_0 + u_s(t)]$ conserve un signe constant au cours du temps. Si $[U_0 + u_s(t)]$ change de signe, la partie supérieure de l'enveloppe et la partie inférieure, qui sont symétriques par rapport à 0 vont se croiser. On aura surmodulation. Les enveloppes ainsi obtenues ne permettent plus de retrouver le signal informatif d'origine.



$m < 1$. L'enveloppe de la tension modulée contient l'information sur le signal modulant.

3.6. A l'aide de l'oscillogramme, estimer les valeurs des périodes T_m et T_p du signal modulant et de la porteuse.

3.7. Rappeler l'expression théorique de la fréquence f en fonction de la période T avec les unités, puis calculer les fréquences f du signal modulant et F de la porteuse.

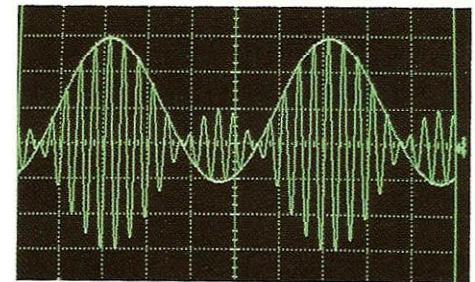
4. Analyse fréquentielle.

Nous avons vu que la tension modulée est de la forme

$$u_m(t) = k \times U_{P_{\max}} \cdot [U_0 + u_s(t)] \cdot \cos(2\pi f_p t)$$

$$u_m(t) = k \times U_{P_{\max}} \cdot [U_0 + U_{S_{\max}} \cos(2\pi f_s t)] \cdot \cos(2\pi f_p t)$$

$$u_m(t) = k \cdot U_{P_{\max}} \cdot U_0 \left[1 + \frac{U_{S_{\max}}}{U_{P_{\max}}} \cdot \cos(2\pi f_s t) \right] \cdot \cos(2\pi f_p t)$$



$m > 1$. Il y a surmodulation.

On introduit $m = \frac{U_{S_{\max}}}{U_{P_{\max}}}$ le taux de modulation et $A = k \cdot U_{P_{\max}} \cdot U_0$

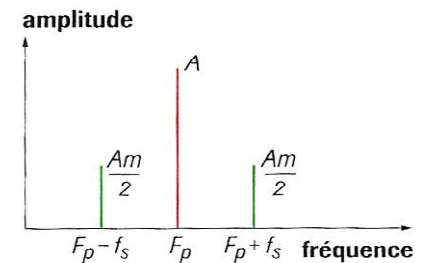
ce qui donne: $u_m(t) = A [1 + m \cdot \cos(2\pi f_s t)] \cdot \cos(2\pi f_p t)$

ce qui donne: $u_m(t) = A \left(\cos(2\pi f_p t) + m \cdot \cos(2\pi f_s t) \cdot \cos(2\pi f_p t) \right)$

or mathématiquement $\cos(a) \cdot \cos(b) = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$

ce qui donne: $u_m(t) = A \left(\frac{m}{2} \cdot \cos[2\pi(f_s + f_p)t] + \frac{m}{2} \cos[2\pi(f_p - f_s)t] + \cos(2\pi f_p t) \right)$

ce qui donne: $u_m(t) = A \cdot \frac{m}{2} \cdot \cos[2\pi(f_s + f_p)t] + A \cdot \frac{m}{2} \cdot \cos[2\pi(f_p - f_s)t] + A \cdot \cos(2\pi f_p t)$



On retiendra, lorsque la tension modulante et la porteuse sont des tensions sinusoïdales, de fréquences respectives f_s et f_p , avec $f_p \gg f_s$, la tension modulée est la somme de trois tensions sinusoïdales de fréquences $f_p - f_s$, f_p et $f_p + f_s$.

Pour une tension modulée en amplitude par une tension sinusoïdale, on peut établir un spectre en fréquence.

Dans un spectre en fréquence, les fréquences sont portées en abscisses et les amplitudes des signaux correspondants sont portées en ordonnées:

❑ la raie centrale correspond à la fréquence de la porteuse f_p . C'est la raie qui a la plus grande amplitude;

❑ les raies latérales correspondent aux fréquences $f_p - f_s$ et $f_p + f_s$ et ont une amplitude $\frac{A m}{2}$ qui dépend de m

Cette décomposition mathématique montre qu'une bande de fréquence de largeur minimale $(f_p + f_s) - (f_p - f_s) = 2 \cdot f_s$ centrée en f_p , est nécessaire à la propagation et à la réception du signal.

Ainsi, dans le cas d'une communication par radio, il ne faut pas que les spectres des signaux envoyés par des émetteurs différents se chevauchent, sous peine de mélanger les informations de chacun. Les fréquences des ondes porteuses associées à deux émetteurs doivent donc être suffisamment espacées, d'au moins $2 f_s$.

Exemple. France Inter $f_p = 164$ kHz et Europe 1 $f_p = 182$ kHz.

L'onde sinusoïdale modulante est une onde sonore (puisque voix des animateurs ou musique) dont la fréquence f_s est comprise entre 20 Hz et 20 kHz. par conséquence la station suivante qui suit France Inter doit se trouver à $f_p \pm 20$ kHz.

Or 164 kHz + 20 kHz = 184 kHz, il y a superposition en partie avec Europe 1, le signal est tronqué. D'où l'intérêt de la FM où f_p est bien plus grande (en MHz et non kHz) et on peut donc porter une gamme de f_s bien supérieure.

Remarque. L'information est contenue dans les raies latérales de faible amplitude et non dans la raie centrale.