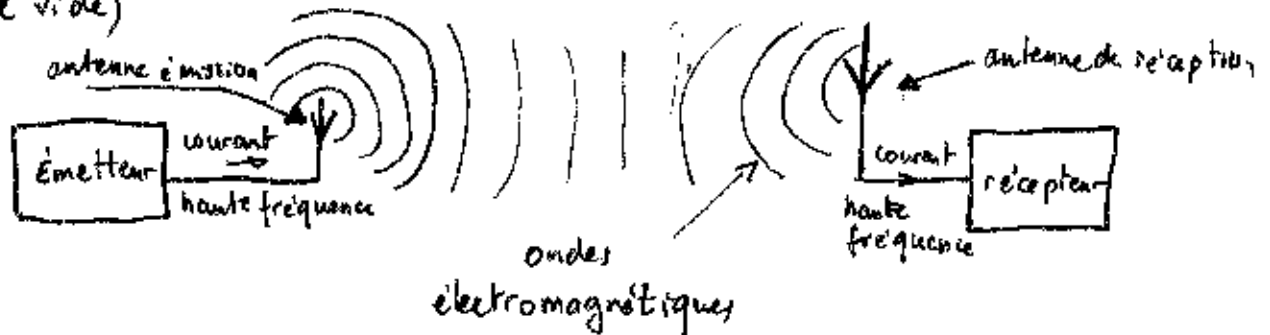


## Rappels sur le principe des liaisons radio-électriques

Les liaisons radio-électriques sont basées sur le principe suivant :

- à l'émission l'émetteur produit une tension alternative sinusoïdale de haute fréquence. cette tension appliquée à l'antenne y fait circuler des courants de haute fréquence donnant naissance à un champ électromagnétique qui se propage dans l'espace (y compris dans le vide)



- à la réception une antenne capte les ondes électromagnétiques (c.-à-d. les ondes électromagnétiques induisent des tensions dans l'antenne) et il circule des courants haute-fréquence jusqu'au récepteur qui les amplifie et les démodule afin d'extraire du courant haute fréquence l'information contenue dans le signal haute-fréquence

## Principes de la modulation

Pour transmettre un message que ce soit du morse (télégraphie), des sons (téléphone), des images (télévision, fac simile), du texte (télécrypteur, packet-radio) on "module" les tensions haute-fréquence de l'émetteur (c'est à dire on le modifie selon certains procédés de modulation) pour que les courants HF, les ondes électromagnétiques contiennent le message à transmettre.

À la réception on "démodule" le signal HF (on extrait du signal HF le message qui a été inséré à l'émission)

On désigne par signal un courant, une tension, une onde-électromagnétique modulée, donc contenant un message.

Un courant, une tension purement sinusoïdal ne contient pas de message.

## Radio-télégraphie ou modulation par tout ou rien

C'est le plus simple des procédés de modulation.

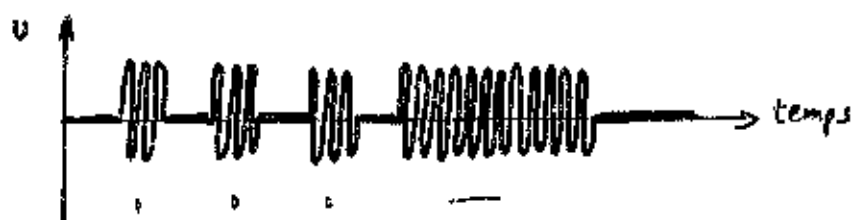
L'émetteur produit une tension HF (haute fréquence) sinusoïdale d'amplitude constante ; l'antenne de l'émetteur émet en permanence une onde électromagnétique d'amplitude constante.

Cette onde captée par l'antenne du récepteur est transmise au récepteur qui met en évidence par un procédé quelconque (généralement un sifflement) le fait qu'il entend une onde électromagnétique sinusoïdale.

Si on arrête l'émission HF le récepteur ne capte plus rien et le sifflement s'interrompt.

Le principe de la radio-télégraphie c'est de découper l'émission HF au rythme de l'alphabet morse ; le sifflement à la réception sera découpé au rythme de l'alphabet morse.

Par exemple pour transmettre la lettre V qui en morse s'écrit ... — (à l'origine le morse a été utilisé pour le télégraphe : message écrit sous forme de traits et de points) le signal HF à l'émission aura l'allure suivante



Il suffit donc d'émettre des ondes sinusoïdales HF pendant un court instant trois fois de suite puis une fois un peu plus longuement. On aura ainsi transmis un "V" puisque le correspondant entendra un sifflement court 3 fois de suite puis un sifflement plus long (soit ti-ti-ti-ta).

Dans la pratique par ce procédé on peut transmettre, des lettres, des chiffres, de la ponctuation à des vitesses relativement élevées : (un opérateur entraîné arrive facilement à 1500 à 2000 mots à l'heure). Pour cela il "hache" les ondes HF avec son manipulateur (qui n'est jamais qu'un interrupteur). Le correspondant à la réception décrypte ces sifflements et écrit les lettres correspondantes.

A l'examen pour la licence radio-amateur B ou D il est simplement demandé de savoir lire au son un message transmis à la vitesse de 600 mots (de 5 lettres) à l'heure soit 50 lettres à la minute. Rassurez-vous ce n'est pas très rapide ; de plus à l'examen il n'y a pas d'épreuve de manipulation.

Au fur et à mesure que vous progresserez en lecture au son vous apercevrez que la principale difficulté consiste à écrire assez rapidement. A partir de 1200 mots à l'heure cela devient difficile, au delà il faut soit taper à la machine soit lire directement des mots entiers dans sa tête sans rien noter, mais rassurez-vous il n'est pas nécessaire d'arriver à ce niveau pour réaliser d'excellents QSO en CW.

Ce procédé de modulation est appelé télégraphie pour réception auditive - modulation d'amplitude double bande latérale sans emploi d'une sous-porteuse modulante et est noté A1A

On parle de modulation d'amplitude car l'amplitude des ondes HF "varie" en amplitude passant du maxi à zéro. Les termes bandes latérales et sous-porteuse seront expliqués ultérieurement.

On peut aussi imaginer des systèmes automatique où à l'émission on tape sur un clavier de machine à écrire et le signal HF en morse (correspondant à la lettre du clavier) est émis automatiquement. De même à la réception la HF découpée au rythme de l'alphabet morse commande directement une imprimante qui tape sur papier la lettre qui a été transmise. Ce type de télégraphie automatique est noté A1B

Dans certains systèmes automatiques de télégraphie on n'utilise plus le code morse mais des codes spéciaux plus adaptés tels que ASCII ou Baudot. Il s'agit alors de transmissions de données qu'on note A1D

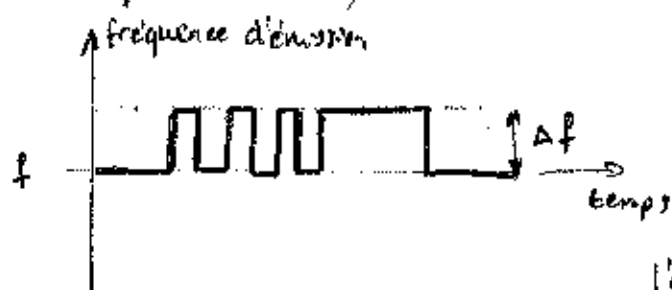
## télégraphie par déplacement de fréquence

Dans la télégraphie en modulation d'amplitude A1A ou A1B, l'onde HF n'est pas émise en permanence.

En télégraphie par déplacement de fréquence une onde HF de fréquence  $f$  est émise en permanence, mais par contre quand on appuie sur le manipulateur la fréquence d'émission change et devient  $f + \Delta f$  ( $\Delta f$  étant de l'ordre de quelques centaines de Hertz).

Si à la réception le récepteur est conçu de telle manière qu'en captant un signal de fréquence  $f$  rien ne se passe et que lorsque celle-ci devient  $f + \Delta f$  on entend un sifflement de fréquence  $\Delta f$  par exemple on pourra alors entendre les signaux morse au rythme desquels la fréquence d'émission a été déplacée de  $\Delta f$ .

Ce type de modulation est noté F1A, si le décodage est automatique F1B, si on transmet des données F1D.



Exemple de transmission d'un "V"

l'amplitude des ondes HF reste constante

## modulation d'amplitude

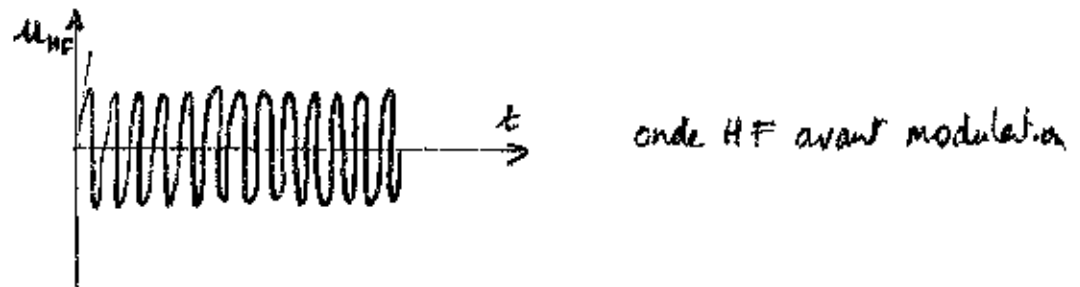
Lorsque nous parlons nous émettons des sons, nous faisons vibrer l'air autour de nous à des fréquences correspondant au son de notre voix et à une amplitude fonction de la force avec laquelle nous parlons.

Un microphone est un appareil qui permet de transformer ces vibrations de l'air en vibrations électriques de mêmes fréquences et d'amplitudes proportionnelles (si le micro est fidèle) à la force de la voix.

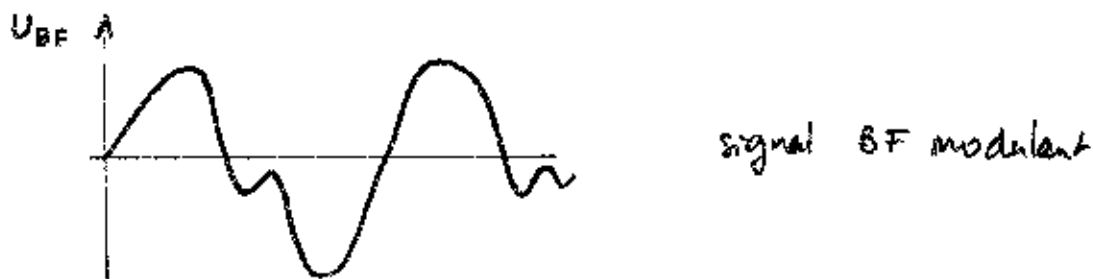
Le haut-parleur est l'appareil qui permet de restituer le son à partir de ces vibrations électriques.

le principe de la modulation d'amplitude consiste à faire varier l'amplitude des ondes HF de l'émetteur au rythme des vibrations électriques produites par la voix dans le microphone.

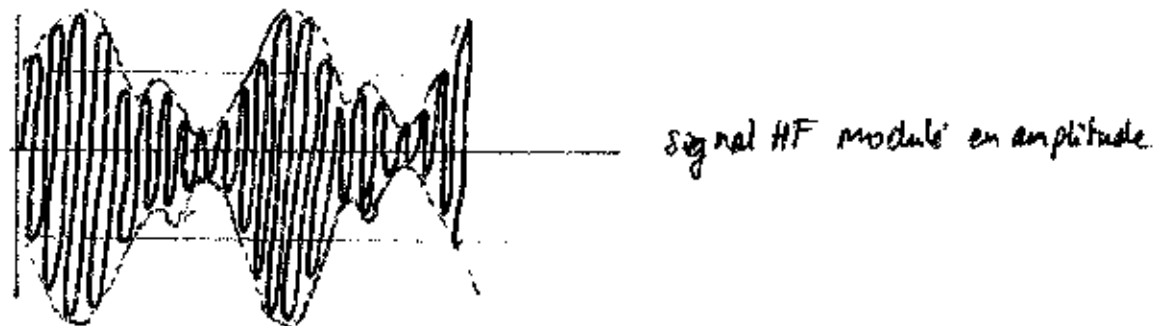
Avant modulation le signal HF est purement sinusoïdal, d'amplitude constante et a la forme suivante



si on module par un signal basse fréquence (vibrations électriques du microphone) dont la forme est la suivante

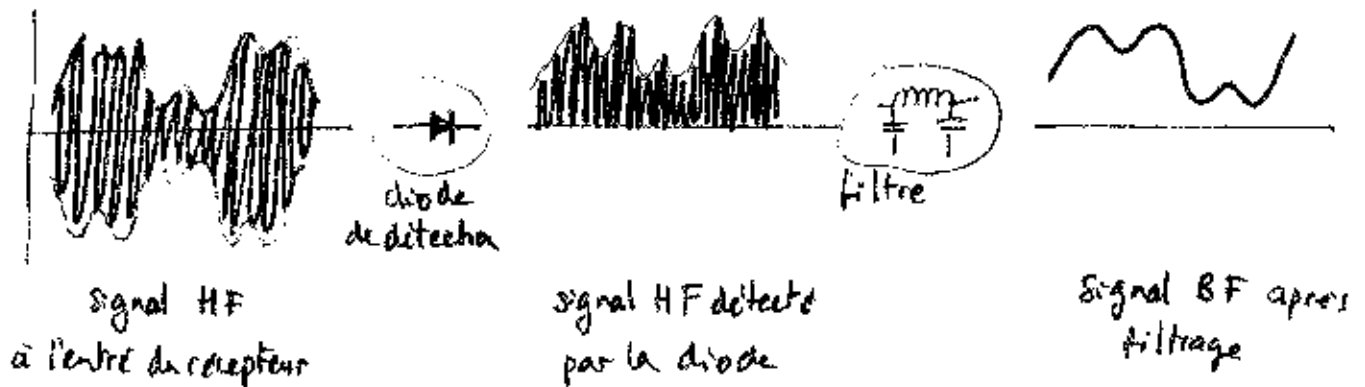


On obtient le signal HF modulé suivant



l'onde HF ainsi modulée se propage et parvient au récepteur qui capte cette onde et la démodule en extrayant un signal BF (basse fréquence) proportionnel à l'amplitude de l'onde HF. le signal BF appliqué, après amplification, au haut-parleur restituera la voix de celui qui a parlé dans le micro de l'émetteur.

le plus simple des procédés de démodulation d'amplitude est la détection par la diode. Il suffit de faire traverser après l'avoir amplifié, le courant HF d'amplitude variable dans une diode et faire passer le signal redressé dans un filtre passe-bas pour obtenir le signal BF.



### Bandes latérales

Sans entrer dans le détail des procédés utilisés pour la modulation d'amplitude il faut voir du point de vue mathématique que moduler en amplitude une tension HF sinusoïdale de valeur  $U_{HF} = U_m \cos(\omega t + \phi)$  par une tension BF sinusoïdale de valeur  $U_{BF} = U_{BFm} \cos(\omega' t + \phi')$  revient à faire le produit des valeurs instantanées des deux tensions et finalement le signal modulé obtenu est la somme de plusieurs fonctions sinusoïdales d'amplitudes constantes (mais différentes) et de fréquences égales respectivement à  $f, F, F+f, F-f$ ,  $F$  étant la fréquence du signal HF non modulé,  $f$  étant la fréquence du signal BF.

Exemple si on module une tension HF de 14 MHz avec un signal BF de 2 kHz, le signal résultant est la somme de 4 tensions sinusoïdales de fréquences 14,000 MHz, 14,002 MHz, 13,998 MHz et 2 kHz.

$F$  est la fréquence de l'onde appelé porteuse

$F+f$  et  $F-f$  sont les fréquences des ondes appelées bandes latérales

Le signal BF de 2 kHz se trouve éliminé par les circuits oscillants de l'émetteur accordés sur la fréquence  $F$ .

La voix humaine n'est jamais un son sinusoïdal pur, mais un mélange de tout une série de sons de fréquences comprises entre quelques dizaines de Hertz et plusieurs kilohertz.

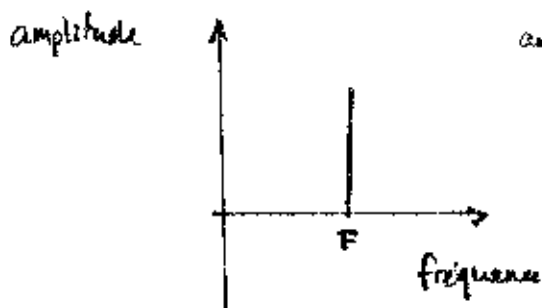
Si par exemple le micro de l'émetteur ne laisse passer que les sons de fréquences comprises entre 0 et 5 kHz la fréquence des bandes latérales (après modulation de la HF) sera comprise respectivement entre  $F+0$  et  $F+5\text{ kHz}$  pour la bande latérale dite supérieure et notée BLS et entre  $F-5\text{ kHz}$  et  $F-0$  pour la bande latérale inférieure notée BLI.

Finalement le signal HF de fréquence initiale  $F$  modulé en amplitude par une BF de fréquence maxi 5 kHz, sera la somme de toute une série de signaux sinusoïdaux d'amplitudes différentes et de fréquences comprises entre  $F-5\text{ kHz}$  et  $F+5\text{ kHz}$ .

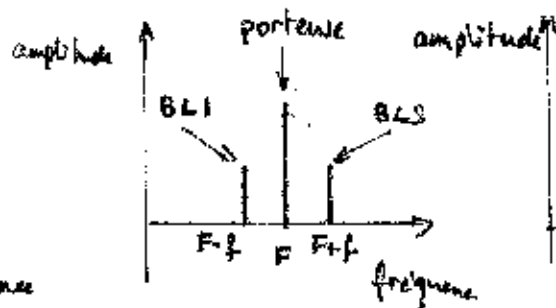
Cet intervalle de  $F-5\text{ kHz}$  à  $F+5\text{ kHz}$  soit 10 kHz est appelé largeur de spectre de l'émission.

La réglementation impose aux radio-amateurs sur les bandes décimétriques d'avoir une émission dont la largeur de spectre en modulation d'amplitude (largeur de bande) soit de  $\pm 3\text{ kHz}$  ce qui est suffisant pour une compréhensibilité satisfaisante.

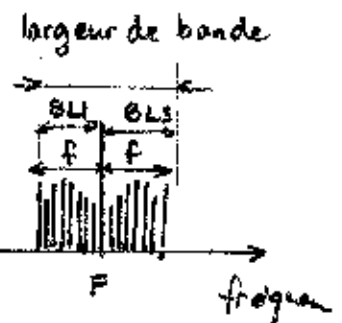
Si on représente le spectre des fréquences d'un signal modulé en amplitude c'est à dire l'amplitude de chaque tension sinusoïdale qui compose le signal en fonction de sa fréquence on obtient les graphiques suivants.



Onde pure  
non modulée



Onde modulée  
par un signal  
sinusoïdal de fréquence  $f$



Onde modulée par  
une voix de fréquence  
maximum  $f$

## Bande latérale unique

On vient de voir que le spectre d'une émission modulée en amplitude était composé d'une porteuse et de bandes latérales symétriques par rapport à la porteuse. La largeur de spectre occupée par l'émission est  $2f$  (2 fois la fréquence maximum de la BF)

Comme l'information BF n'est contenue que dans les bandes latérales (puisque ces bandes latérales n'apparaissent qu'en présence de signal BF) et que de plus ces bandes latérales sont symétriques on a pensé qu'on pourrait donc transmettre le signal BF en envoyant dans l'antenne un signal HF qui ne contiennne que l'une des deux bandes latérales sans la porteuse.

Ce procédé est appelé modulation d'amplitude à bande latérale unique (BLU), si on transmet la bande latérale supérieure on dit qu'on est en BLS - idem pour la BLI

La BLU est notée J3E dans la réglementation lorsque la porteuse est totalement supprimée, R3E si elle est simplement réduite.

Le grand intérêt de la BLU est de diviser par deux la largeur de spectre donc de placer deux fois plus de stations dans une bande de fréquence ex : dans la bande des 40m : 7,000 - 7,100 MHz on place  $\frac{100 \text{ kHz}}{5 \text{ kHz}} \approx 17$  stations AM ou  $\frac{100}{2} \approx 33$  stations BLU

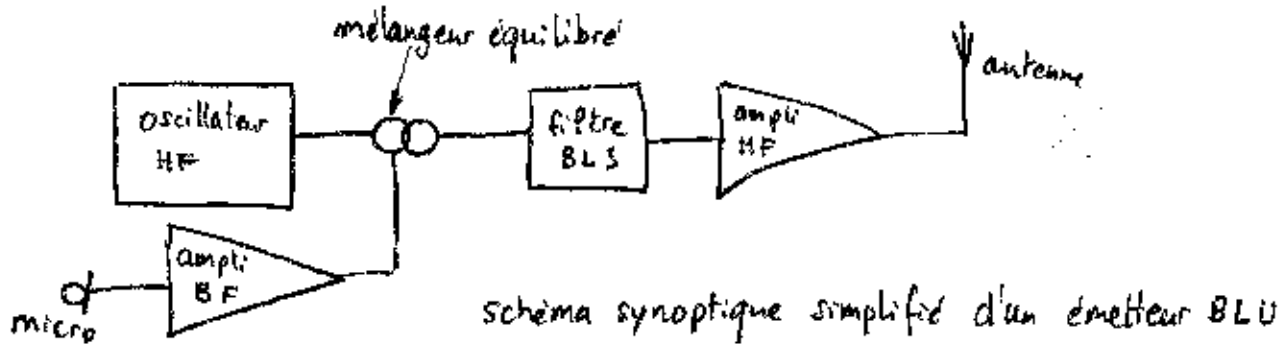
L'autre intérêt de la BLU est aussi d'augmenter l'efficacité de l'émission car à puissance égale de l'émetteur comme on ne transmet qu'une bande latérale, l'amplitude de la bande latérale transmise a une amplitude bien supérieure à celle transmise en modulation d'amplitude à double bande latérale avec porteuse.

On notera aussi qu'en l'absence de BF il n'y a pas de HF transmise, donc possibilité aux amplificateurs HF de refroidir dans "les blancs de modulation" alors qu'en AM (A3E) il faut toujours transmettre la porteuse.



Par contre la difficulté essentielle de réaliser un émetteur BLU est d'avoir une fréquence d'émission d'une extrême stabilité (dérive de quelques centaines de Hz par heure).

Pour ces avantages considérables les radio-amateurs n'utilisent plus que la BLU en téléphonie sur les bandes décimétriques.



Dans un émetteur BLU le signal BF du micro, amplifié est mélangé à un signal HF sinusoïdal dans un mélangeur dit équilibré. Le mélangeur équilibré est un modulateur en amplitude un peu particulier parce qu'à sa sortie au lieu de trouver les fréquences  $f, F, F+f, F-f$  (portuses et bandes latérales) il n'y a que les bandes latérales, la portuse est supprimée (la BF aussi d'ailleurs).

Ensuite un filtre à quartz très sélectif élimine (ou atténue très fortement) une des deux bandes latérales et la bande latérale qui reste est alors amplifiée par l'ampli HF et envoyée dans l'antenne.

### Démodulation d'un signal en bande latéral unique

On a vu qu'en BLU, le son BF ne contenant qu'une fréquence  $f$  se traduit par un signal HF de fréquence  $F+f$  si on est en BLS par exemple.

À la réception si on module le signal HF  $F+f$  reçu et amplifié par un signal HF sinusoïdal de fréquence  $F$  on produit comme en modulation d'amplitude les signaux de fréquences  $F+f, F, F+f-F=f, F+F+f=2F+f$  soit trois signaux HF et un signal BF de fréquence  $f$ .

En filtrant l'ensemble des produits du mélange  $F+f$  et  $F$  avec un filtre passe bas il ne reste plus que le signal BF de fréquence  $f$  - On a ainsi récupéré le signal BF

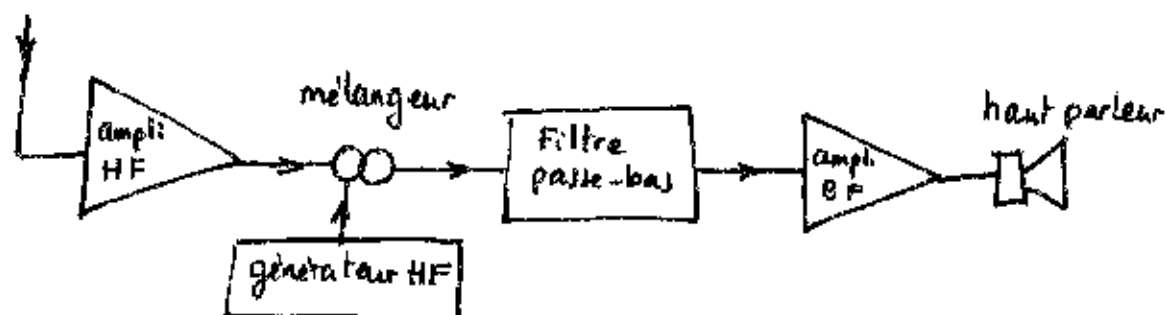


schéma synoptique simplifié d'un récepteur BLU.

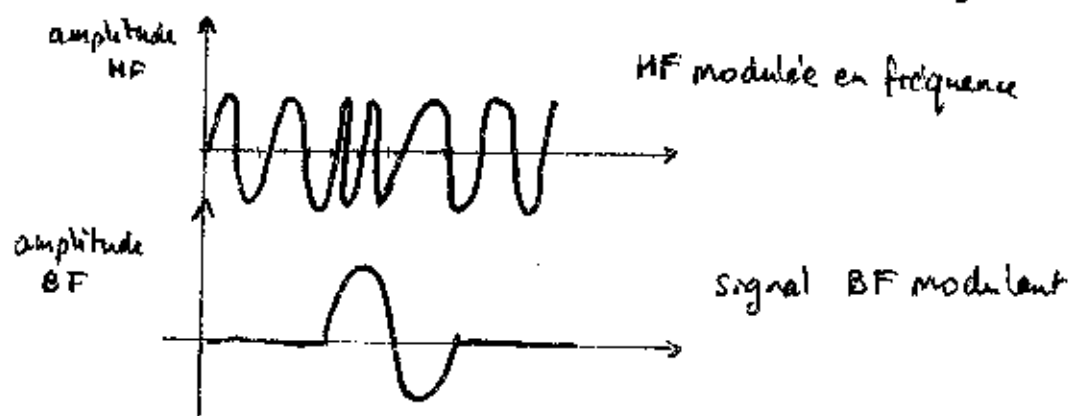
Tout comme à l'émission la stabilité du générateur HF (oscillateur) du récepteur doit être très bonne et doit pouvoir être ajustée avec beaucoup de précision. Un décalage de fréquence de quelques centaines de Hz peut rendre le signal BF incompréhensible.

### Modulation de fréquence

Le système est analogue à la modulation d'amplitude où on fait varier l'amplitude de l'onde HF au rythme de la BF.

En modulation de fréquence l'amplitude de l'onde HF reste constante mais par contre on fait varier la fréquence de l'onde HF au rythme de la BF.

L'écart en fréquence par rapport à la fréquence initiale de l'onde HF est proportionnel à l'amplitude du signal BF.



la modulation de fréquence est notée F3E en téléphonie

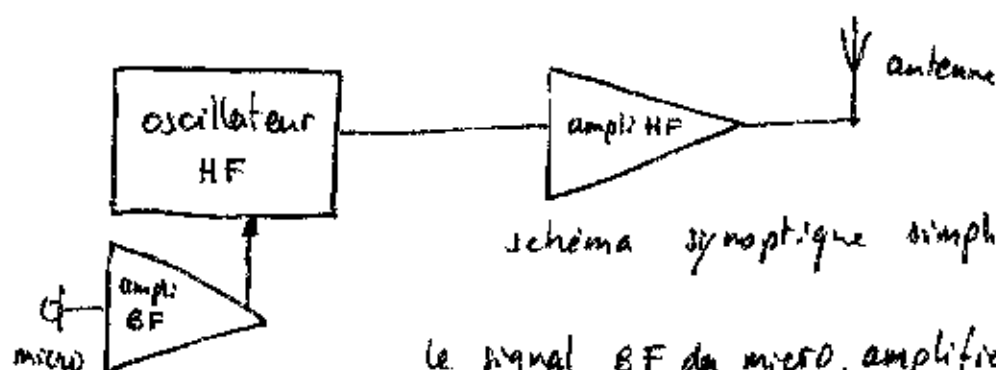


schéma synoptique simplifié d'un émetteur FM

Le signal BF du micro, amplifié, est appliqué à l'oscillateur. La fréquence de l'oscillateur est commandée par le signal BF. Pour cela on utilise souvent des varicaps (diodes à capacité variable)

### Démodulation FM

Pour extraire la BF d'un signal HF modulé en fréquence on utilise différents systèmes tels que discriminateur, détecteurs de rapport qui ont pour fonction de transformer les variations de fréquence en signal BF. Au préalable le signal HF est fortement amplifié puis écarté pour éliminer les parasites puis filtré et alors démodulé



Schéma synoptique simplifié d'un récepteur FM.

L'amplitude de la variation de fréquence en FM est de  $\pm 100 \text{ kHz}$  en bande FM de radiodiffusion. Elle n'est que de  $\pm 7,5 \text{ kHz}$  pour les émissions d'amateur on parle de FM à bande étroite (NBFM = narrow band frequency modulation)