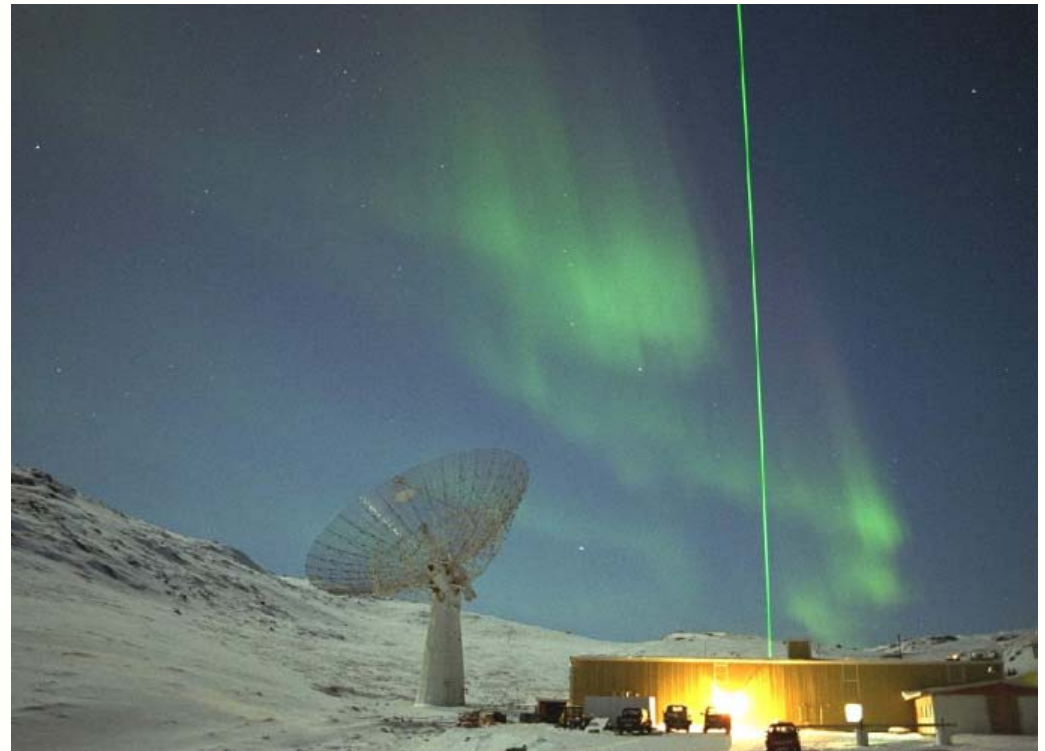




La modulation d'amplitude





- 1- Structure d'un système de communication radio
- 2- L'expérience de Hertz
- 3- Le rôle de la fréquence porteuse
- 4- Spectre des ondes radio
- 5- Fréquence de porteuse et taille de l'antenne
- 6- Les différents types de modulations
- 7- Principe de la modulation AM avec porteuse
- 8- Les débuts de la radiodiffusion
- 9- Les premiers récepteurs AM
- 10- Porteuse modulée par un signal sinusoïdal
- 11- Calcul de l'indice de modulation
- 12- Porteuse modulée par un signal analogique
- 13- Spectre AM avec signal modulant sinusoïdal
- 14- Exemple de spectre avec signal modulant sinusoïdal
- 15- Spectre AM avec signal modulant analogique
- 16- Exemple de spectre avec signal modulant analogique
- 17- Le même exemple avec échelle dBm
- 18- Puissance transportée par un signal AM
- 19- Production d'un signal AM
- 20- Le récepteur AM
- 21- Démodulation AM : le détecteur crête
- 22- Démodulation AM : le démodulateur synchrone
- 23- Les démodulateurs AM et le bruit
- 24- La modulation AM en bande latérale double
- 25- La modulation AM en bande latérale unique
- 26- La modulation par un signal binaire
- 27- Diagramme de l'oeil d'un signal binaire
- 28- Modulation totale ou partielle
- 29- Production d'une modulation AM numérique
- 30- Formes et spectres des signaux AM numériques
- 31- Exemples et illustrations

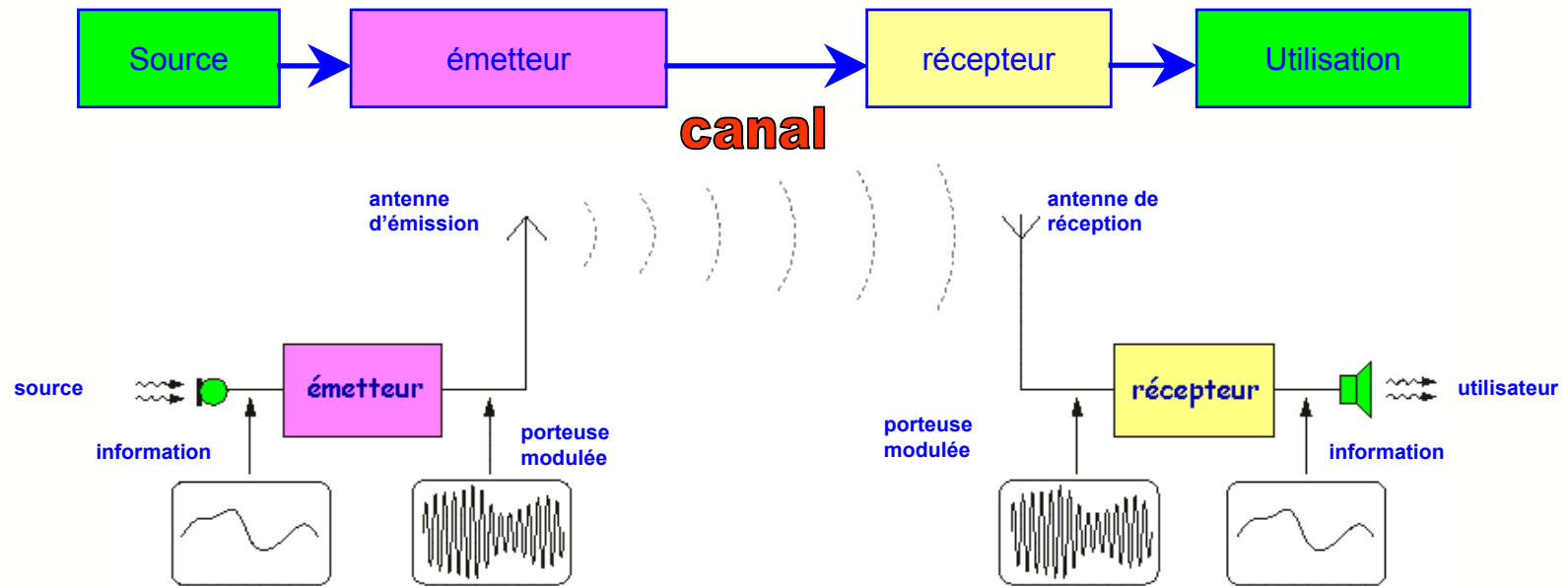




1- Structure d'un système de communication radio



Un système de communication transmet à travers un canal des informations de la source vers un utilisateur :



- la source fournit l'information sous la forme d'un **signal analogique** ou **numérique**
- l'émetteur inscrit cette information sur une porteuse sinusoïdale de fréquence f_0 : c'est la **modulation**
- ce signal électrique modulé est transformé en onde électromagnétique par l'**antenne**
- le **canal** est l'espace libre entre l'antenne d'émission et de réception dans lequel se propage l'onde électromagnétique
- le récepteur **sélectionne** la fréquence de la porteuse et **démodule** l'information qui y est inscrite
- l'information est restituée avec une **dégradation** liée aux qualités de l'émetteur, du récepteur et des perturbations du canal



2- L'expérience de Hertz



Vers 1887, **Heinrich Hertz**, professeur à l'École technique supérieure de Karlsruhe invente et construit un oscillateur à haute fréquence :

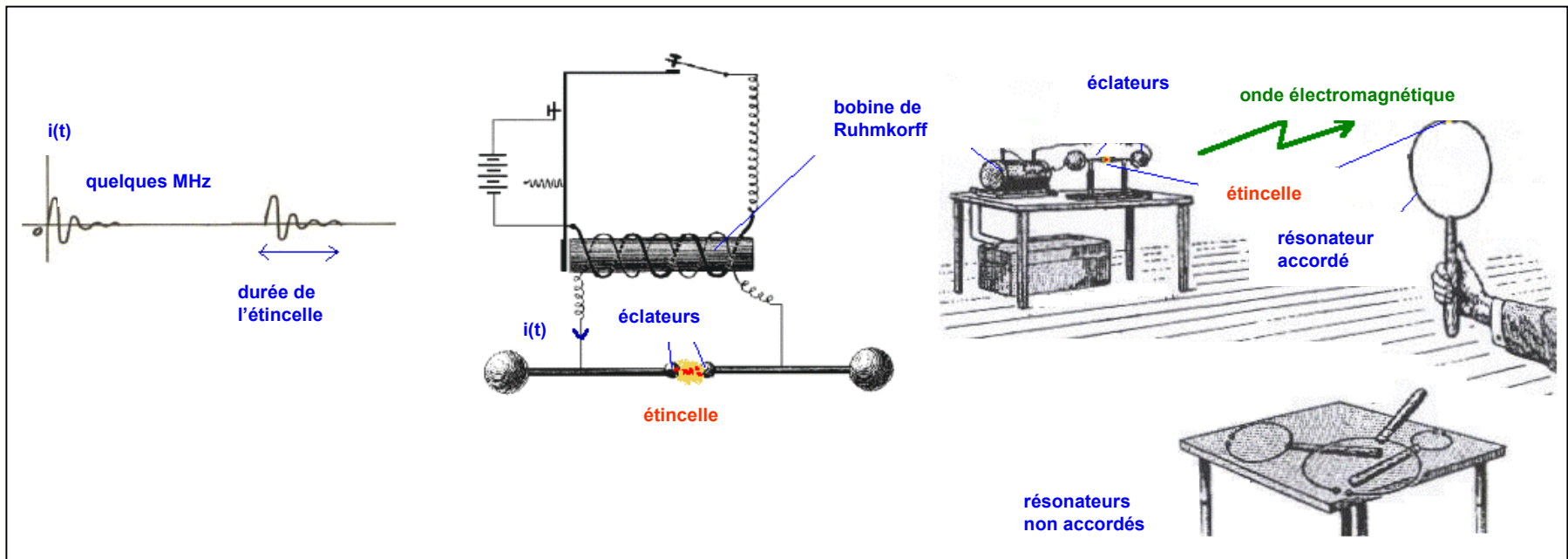
- deux sphères de cuivre de diamètre 30 cm reliées par une tige coupée en son milieu par un éclateur
- les sphères sont reliées à une bobine de Ruhmkorff produisant une très haute tension
- périodiquement, les charges s'accumulent dans les sphères jusqu'au moment où l'étincelle éclate
- les sphères se déchargent alors selon un régime oscillant à une fréquence de quelques MHz



H. Hertz 1857-1894

Ce **courant alternatif** de haute fréquence produit une **onde électromagnétique** qui induit des courants dans le « résonateur » voisin, produisant de petites étincelles dans l'éclateur.

L'oscillateur et le résonateur sont les modèles primitifs d'un émetteur et d'un récepteur radio.





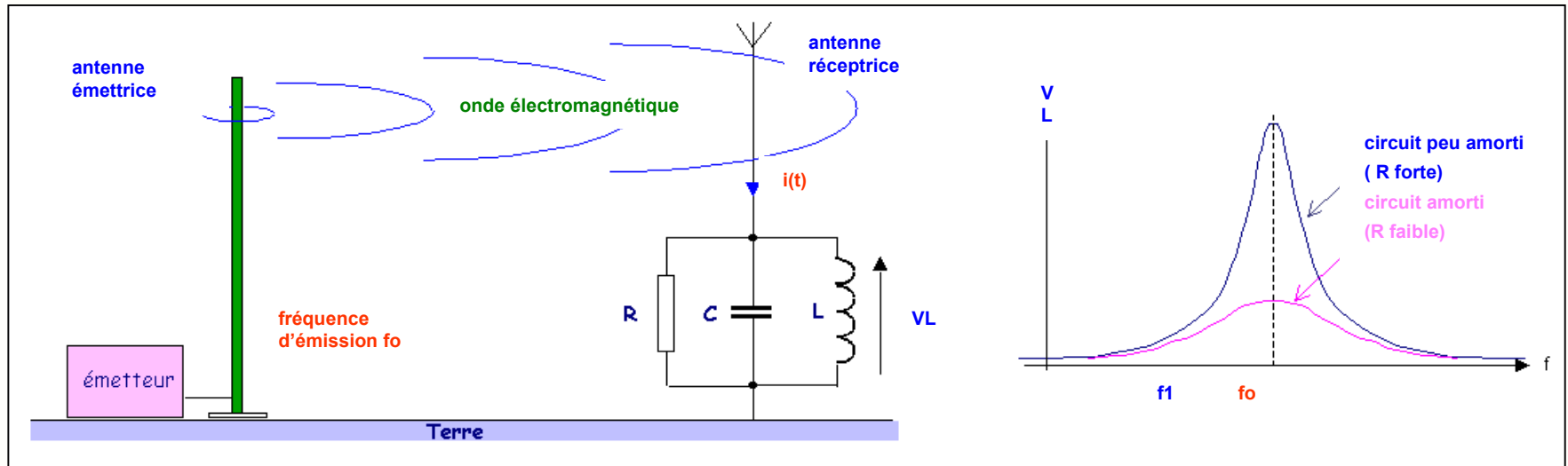
3- Le rôle de la fréquence porteuse



L'émetteur de Hertz a l'inconvénient d'émettre une porteuse discontinue dont la fréquence n'est pas bien connue.

Grâce à un **oscillateur sinusoïdal**, on peut produire une onde entretenue de fréquence f_0 stable :

- l'onde électromagnétique émise est formée de champs E et B variant sinusoïdalement à la fréquence f_0
- cette onde induit un courant $i(t)$ de même fréquence f_0 dans l'antenne de réception
- si ce courant entre dans un **circuit RLC accordé sur f_0** , la tension V_L aux bornes du circuit sera maximale
- un autre émetteur émettant à la fréquence f_1 sera aussi capté par l'antenne, mais produira une tension V_L plus faible



Ainsi, en attribuant à chaque émission une fréquence différente, il est possible par filtrage d'isoler l'émetteur qu'on souhaite recevoir parmi les innombrables signaux captés par une antenne.

Remarque : l'antenne elle-même participe déjà à ce filtrage puisque ses dimensions sont calculées pour fonctionner au mieux à la fréquence de travail f_0

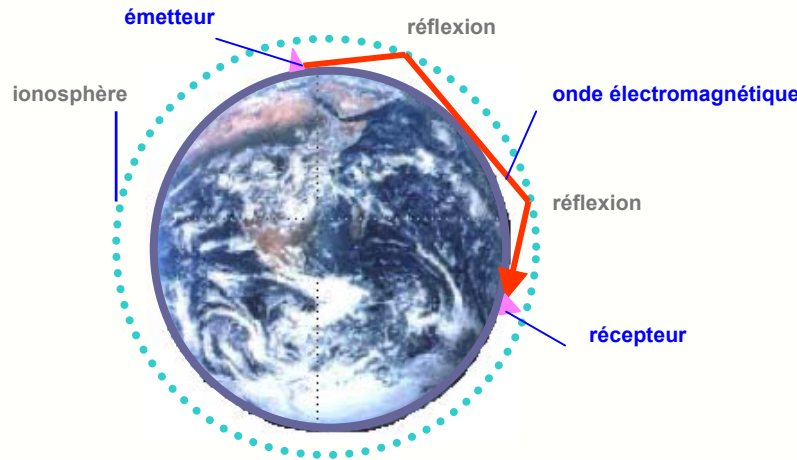


4- Spectre des ondes radio AM

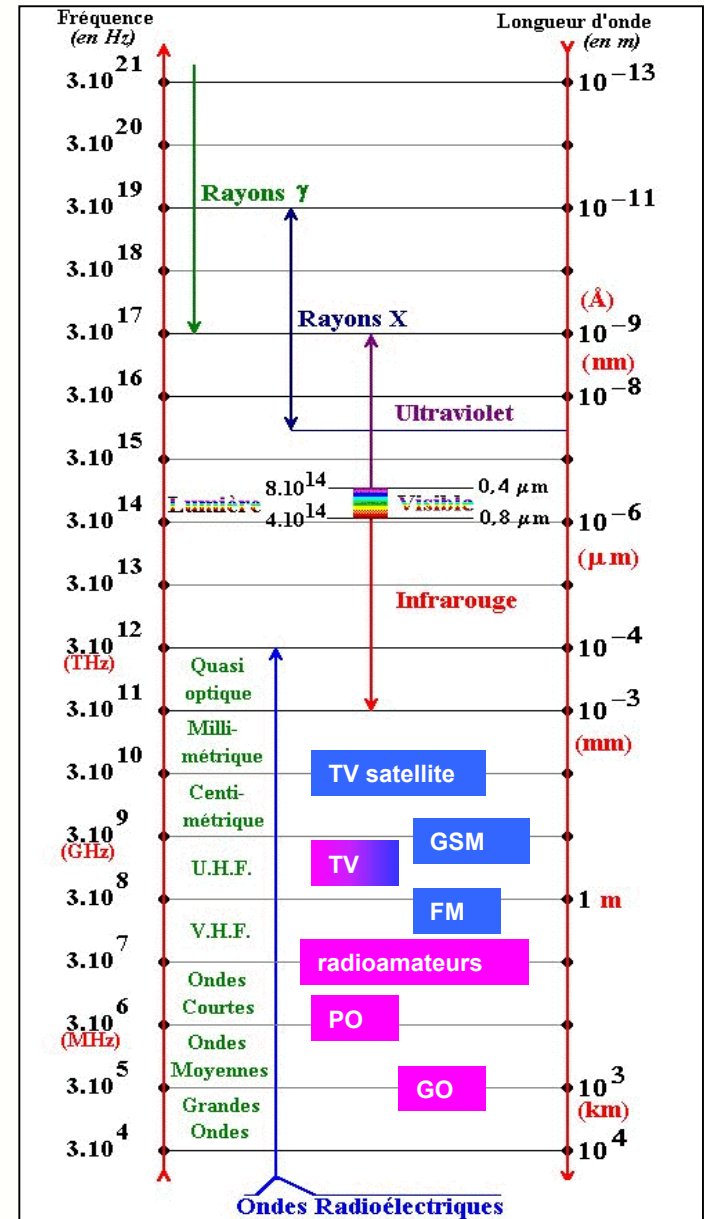


La AM est utilisée dans un grand nombre d'applications :

- les Grandes Ondes de 150 à 280 kHz pour la radiodiffusion commerciale
- de 30 kHz à 3 MHz : les radiophares, balises d'aéroports, radios maritimes, services de météorologie...
- les Petites Ondes de 520 à 1710 kHz pour la radiodiffusion commerciale
- les Ondes Courtes de 3 à 30 MHz avec les cibistes (autour de 27 MHz) et les radio-amateurs trafiquant dans 13 bandes allant de 120m (2,3 à 2,5 MHz) à 11m (25,6 à 26,1 MHz)
- les VHF et UHF de 30 MHz à 3 GHz où on trouve les radioamateurs, la télévision pour la luminance et le son, les communications avec les satellites, les émissions des aéroports, de la police...



Remarque : jusqu'à 50 MHz, les ondes radio peuvent se réfléchir sur l'ionosphère, ce qui permet une portée importante avec une puissance réduite.



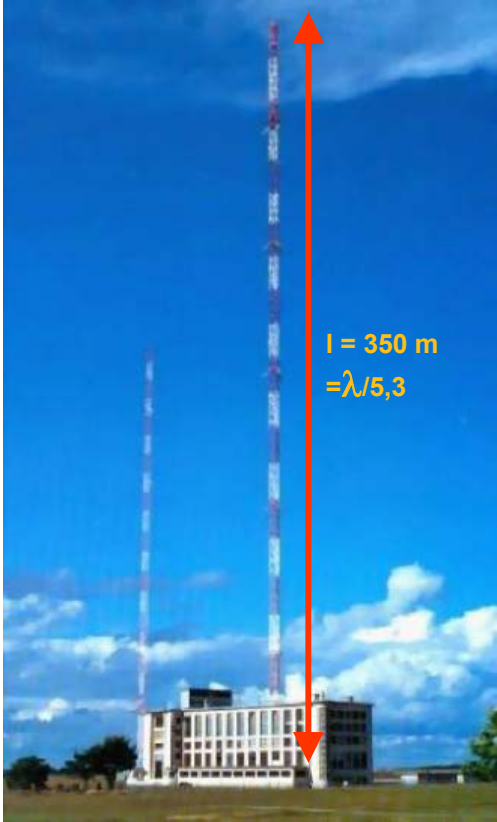
5- Fréquence de porteuse et taille de l'antenne



Une antenne a une fréquence de résonance liée à la dimension du brin actif :

- sa longueur est typiquement égale au quart de la longueur d'onde
- en travaillant à une fréquence f_0 élevée, l'antenne sera donc de **taille réduite**

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_0}$$



antennes bande FM : 88 à 108 MHz et $\lambda \approx 3\text{m}$



Antenne TV-UHF : 400 à 800 MHz et $\lambda \approx 50\text{cm}$

Le centre GO d'Allouis utilise deux antennes pylônes de 350m de haut diffusant les programmes de France Inter à 162 kHz ($\lambda = 1852\text{m}$).



Ce mobile GSM qui tient dans la main contient 3 antennes différentes :

- bande GSM autour de 900 MHz
- bande DCS autour de 1,8 GHz
- bande Bluetooth autour de 2,45 GHz



6- Les différents types de modulations

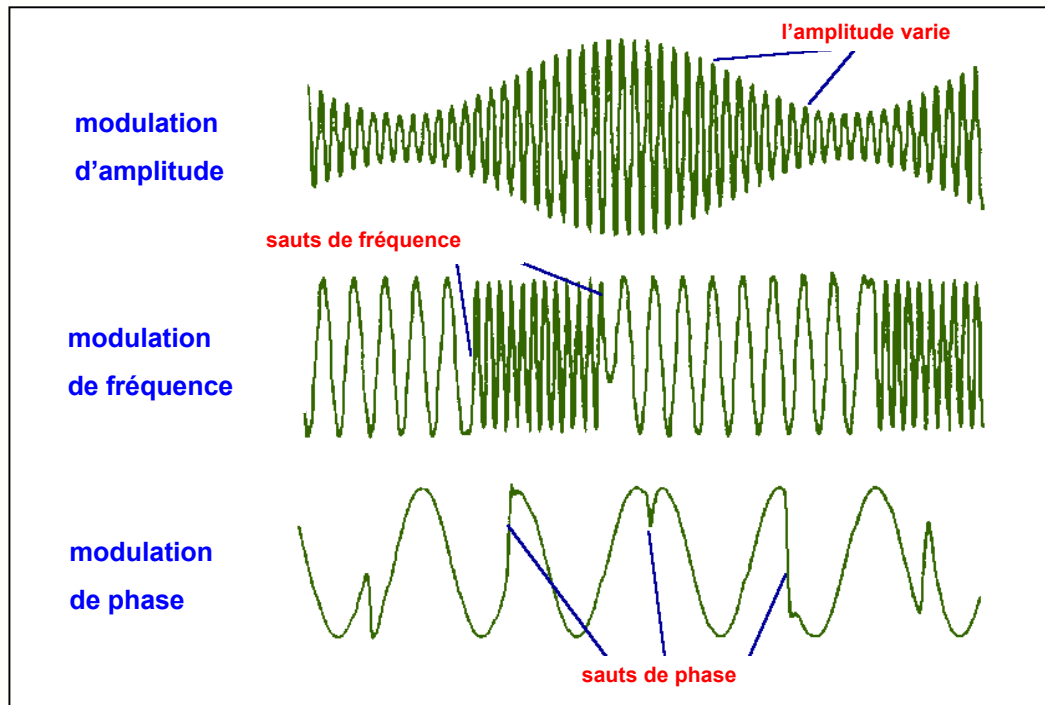


L'expression générale d'un signal sinusoïdal est :

$$e_0(t) = E \cos(\omega t + \varphi)$$

Pour inscrire une information sur cette porteuse, on pourra donc :

- faire varier son **amplitude** en fonction du signal à transmettre (modulations AM, BLU ou SSB, ASK, OOK ...)
- faire varier sa **fréquence** en fonction du signal à transmettre (modulations FM, FSK, GMSK ...)
- faire varier sa **phase** en fonction du signal à transmettre (modulations PM, PSK ...)



Chacune de ces modulations a des propriétés particulières en ce qui concerne :

- la complexité du modulateur-démodulateur et donc le coût
- l'encombrement spectral de la porteuse modulée
- la consommation de l'émetteur, donnée importante pour un équipement mobile
- la résistance du signal modulé aux parasites

7- Principe de la modulation AM avec porteuse

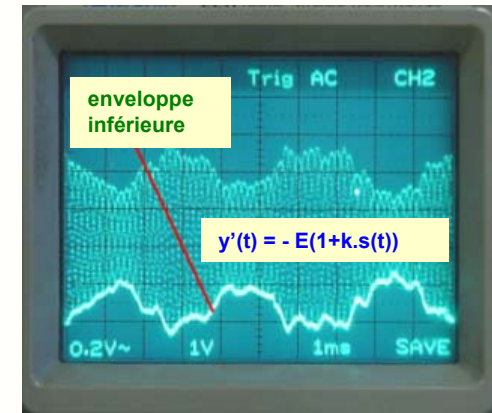
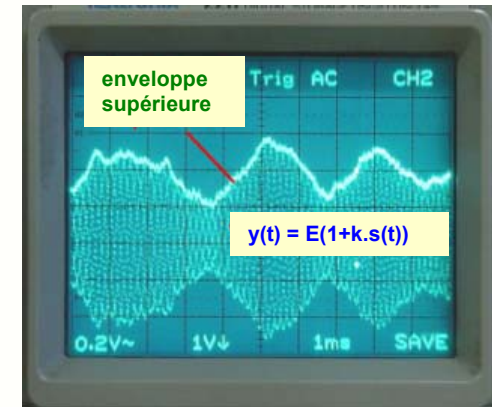
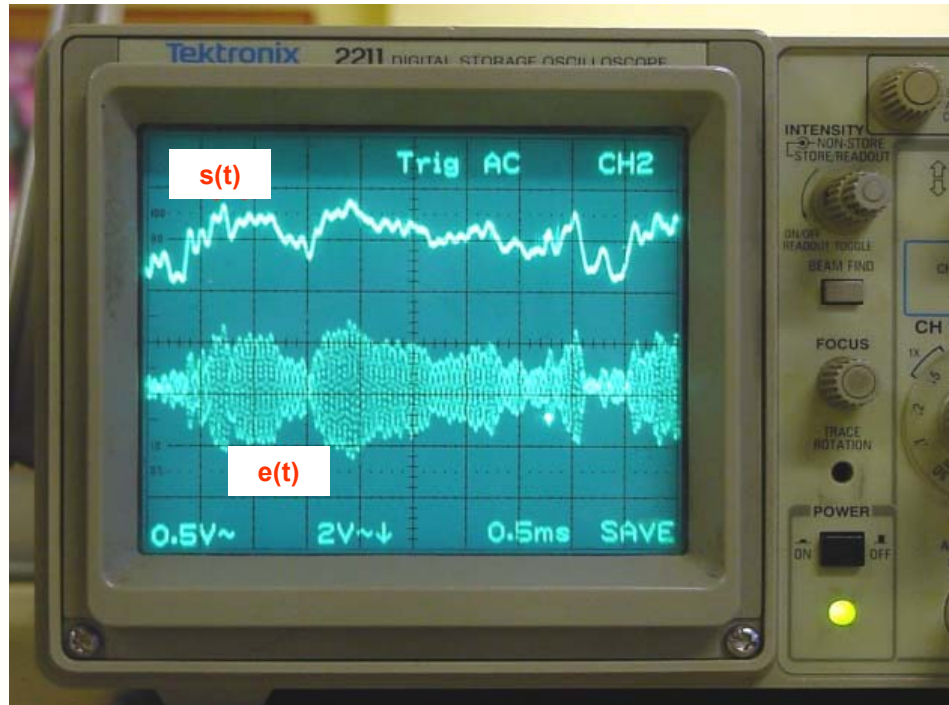


Pour produire un signal modulé en amplitude, il faut :

- une information basse-fréquence $s(t)$ qui peut être un signal audiofréquence, vidéo, analogique ou numérique
- une porteuse sinusoidale $eo(t)$

La porteuse modulée en amplitude s'écrit alors :

$$e(t) = E[1 + k \cdot s(t)] \cos(\omega t + \varphi)$$



- en l'absence de signal modulant $s(t)=0$ et $e(t) = eo(t) = E \cos(\omega t)$
- en présence de modulation, la porteuse oscille entre les enveloppes supérieure et inférieure
- l'enveloppe supérieure s'écrit $y(t) = E(1+k \cdot s(t))$ et l'enveloppe inférieure $y'(t) = -E(1+k \cdot s(t))$



8- Les débuts de la radiodiffusion

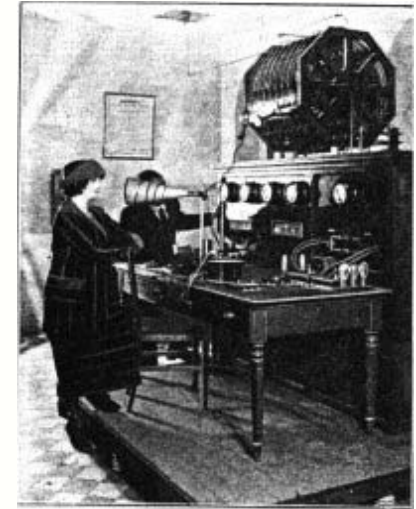


Le 26 novembre 1921 a lieu la première émission de radiophonie française :

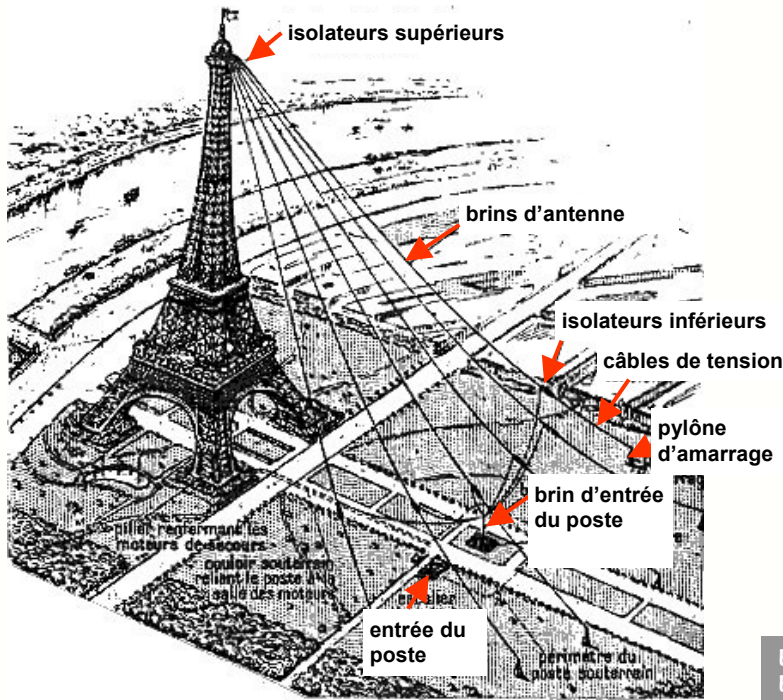
- à **Sainte-Assise**, près de Melun, Yvonne Brothier, debout au milieu de tout l'appareillage d'émission, interprète "la Marseillaise" et un air du "Barbier de Séville"
- cette musique est captée par un microphone puis **module en amplitude** une porteuse
- à 40 kilomètres de là, à Paris, une assemblée d'ingénieurs ravis entend la voix de la chanteuse
- le concert est également capté par de nombreuses stations dans un rayon de 1600 km

A cette époque, les nombre d'émissions est faible et l'audience réservée à quelques passionnés. En 1922, Émile GIRARDEAU crée un service public d'information et de musique, l'émetteur de la **Tour Eiffel** est installé et commence à émettre à $f_0 = 113,2 \text{ kHz}$ (2650 m) avec $P = 1 \text{ kW}$

Les émissions radio en modulation d'amplitude n'ont plus cessé depuis...



La première émission AM



Émetteur de la tour Eiffel



Récepteur à galène



9- Les premiers récepteurs AM

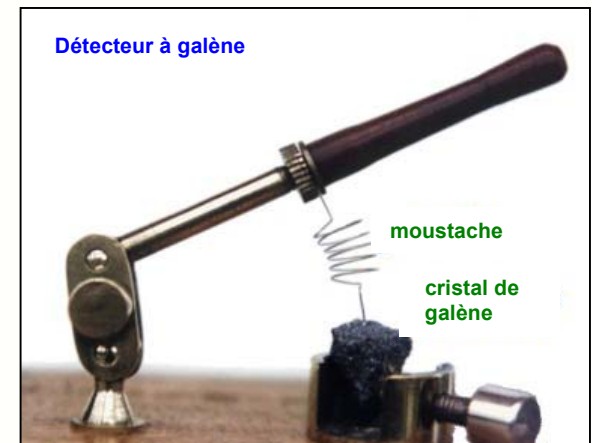
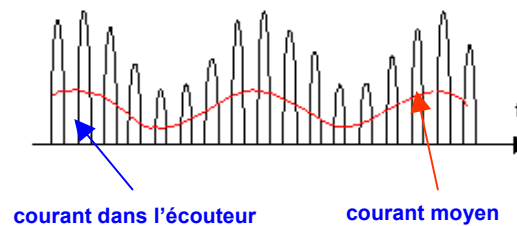
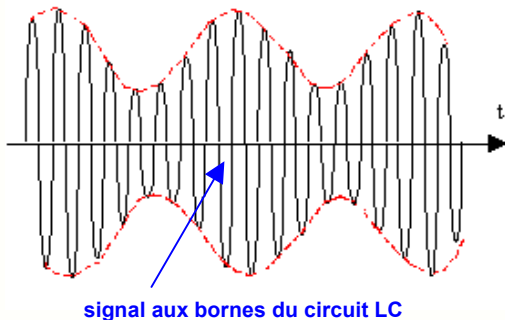
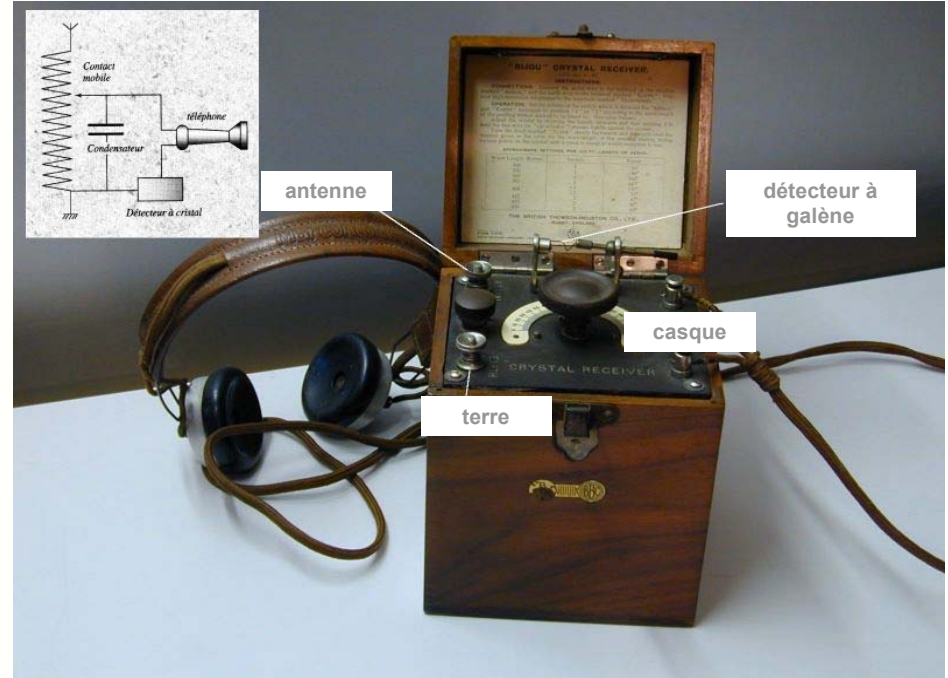


Les premiers récepteurs ont été les postes à galène dont la structure est très simple :

- un long fil métallique qui sert d'antenne
- un circuit LC accordé sur la fréquence à recevoir
- un morceau de galène avec son chercheur, bras articulé équipé d'un léger ressort en acier ou en laiton
- un écouteur

En déplaçant avec précaution l'extrémité acérée du ressort à la surface de la galène, il est possible de trouver le point le plus sensible. Après cela, ne plus bouger et écouter ...

La galène est une pierre de teinte gris foncé aux multiples éclats argentés qui a des propriétés semi-conductrices. On la trouve dans les mines de plomb en Bretagne, dans les Pyrénées, en Cornouaille, en Sardaigne et dans bien d'autres contrées.





10- Porteuse modulée par un signal sinusoïdal



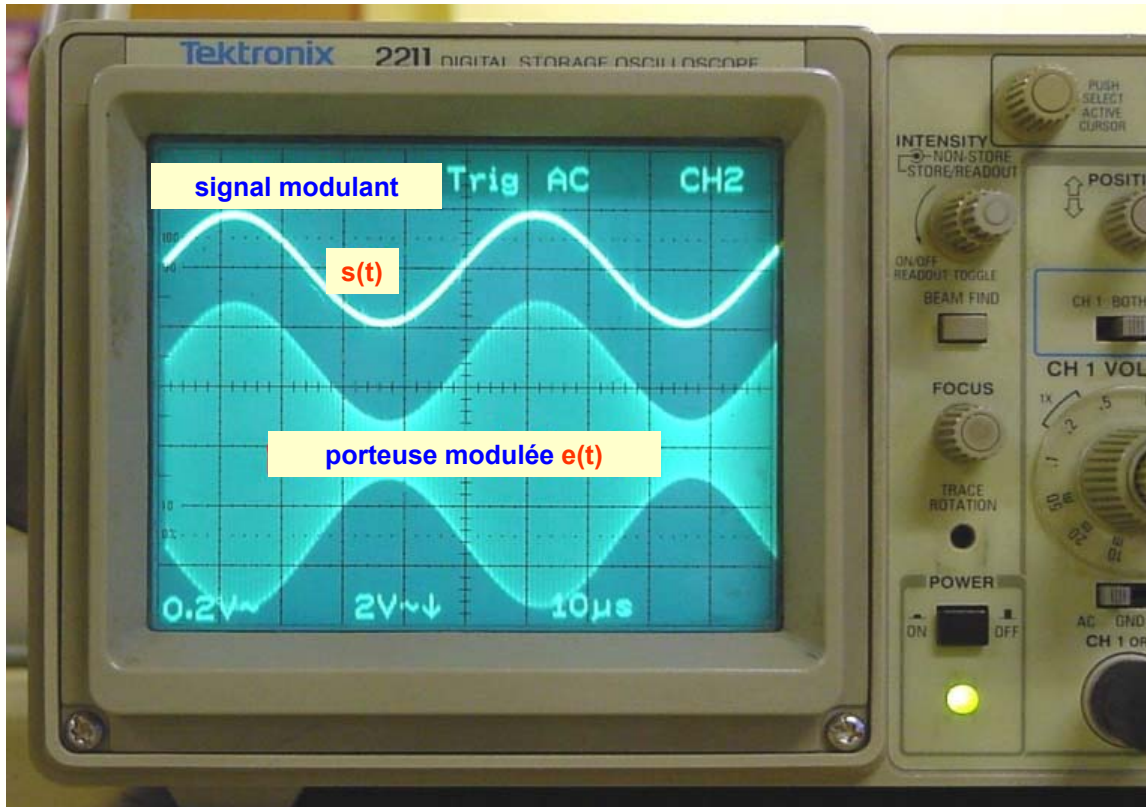
Lorsque le signal modulant est sinusoïdal, on a

$$s(t) = a \cos(\Omega t)$$

et la porteuse modulée s'écrit :

$$e(t) = E[1 + k \cdot a \cos(\Omega t)] \cos(\omega t) = E[1 + m \cos(\Omega t)] \cos(\omega t)$$

si on pose $m = ka$: indice de modulation



animation : influence de m

animation : influence de la BF

Remarque : l'indice de modulation m n'est défini que dans le cas où le signal modulant est sinusoïdal.



11- Calcul de l'indice de modulation



A partir de l'oscillogramme de la porteuse modulée $e(t)$, il est facile de déterminer l'indice de modulation.

- la porteuse modulée s'écrit

$$e(t) = E[1 + m \cos(\Omega t)] \cos(\omega t)$$

- l'enveloppe supérieure

$$y(t) = E[1 + m \cos(\Omega t)]$$

- varie entre la valeur maximale et minimale

$$y_{\max} = E[1 + m]$$

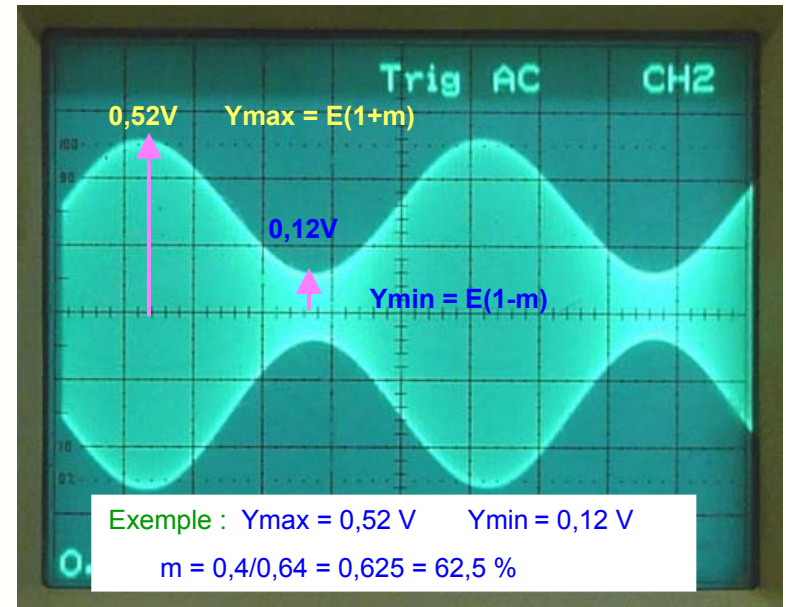
$$y_{\min} = E[1 - m]$$

- le rapport s'écrit

$$\frac{y_{\max}}{y_{\min}} = \frac{1 + m}{1 - m}$$

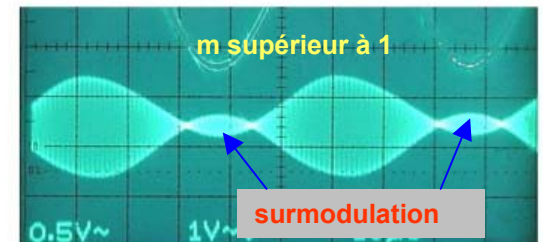
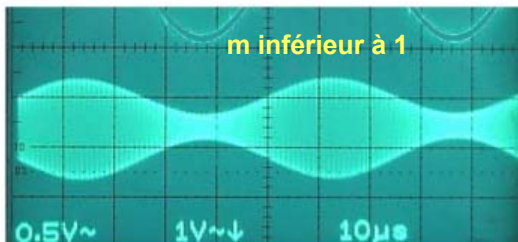
- on en déduit l'indice de modulation :

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



L'indice de modulation utilisé en AM est en principe inférieur à 1, une valeur de m supérieure à 1 correspond à une surmodulation.

Cette surmodulation sera à l'origine d'une distorsion inacceptable si le récepteur utilise un détecteur crête.



12- Porteuse modulée par un signal analogique



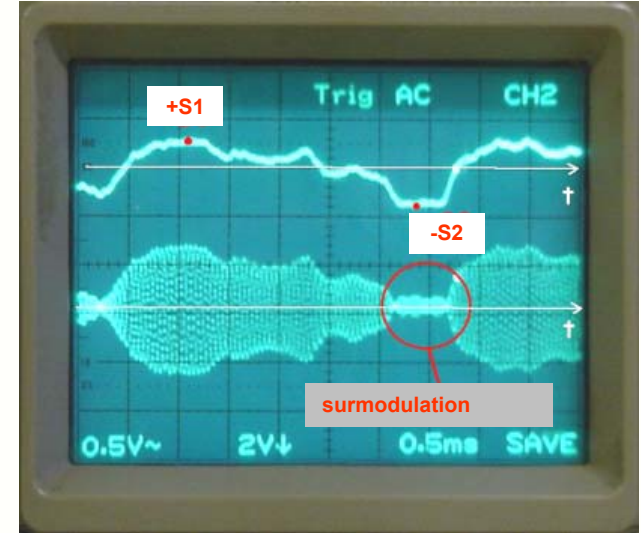
Dans le cas général, le signal modulant $s(t)$ est analogique et la porteuse modulée s'écrit :

$$e(t) = E[1 + k \cdot s(t)] \cos(\omega t)$$

Si l'amplitude du signal modulant varie entre $+S1$ et $-S2$, l'enveloppe supérieure $y(t)$ varie entre :

- une valeur maximale $Y1 = E(1 + k \cdot S1)$
- une valeur minimale $Y2 = E(1 - k \cdot S2)$

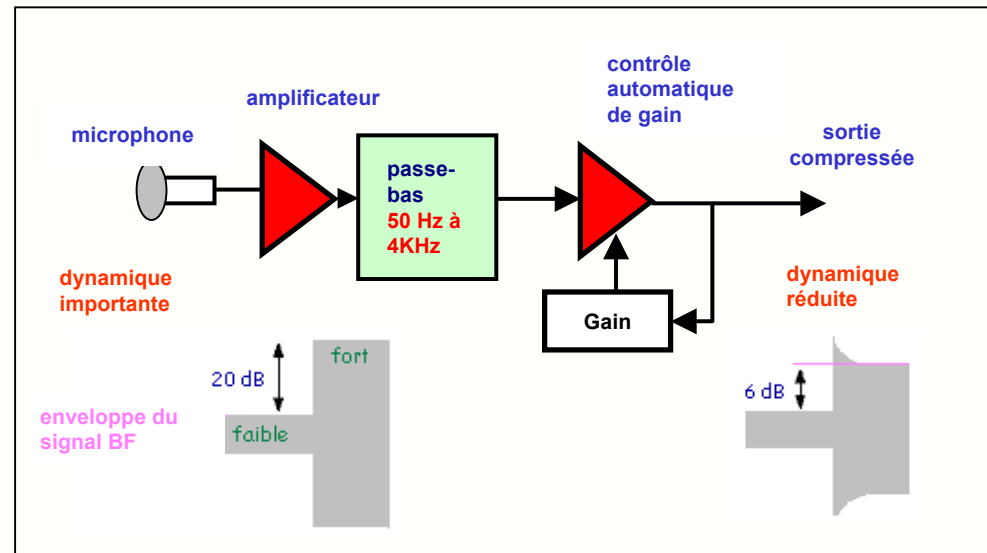
Si la valeur minimale devient négative, on passe en **surmodulation** lors des crêtes négatives du signal modulant.



Vidéo : porteuse modulée AM

C'est la raison pour laquelle les émetteur AM sont souvent équipés d'un **compresseur de dynamique** :

- le préamplificateur placé après le microphone a un gain variable
- ce gain s'ajuste automatiquement au niveau du signal sonore
- si le signal capté par le microphone est faible, le préampli a une amplification $A1$
- si le signal capté par le microphone est fort, le préampli a une amplification $A2 < A1$
- en conséquence, la musique diffusée par les émetteurs de radiodiffusion AM **manque de dynamique**



13- Spectre AM avec signal modulant sinusoïdal



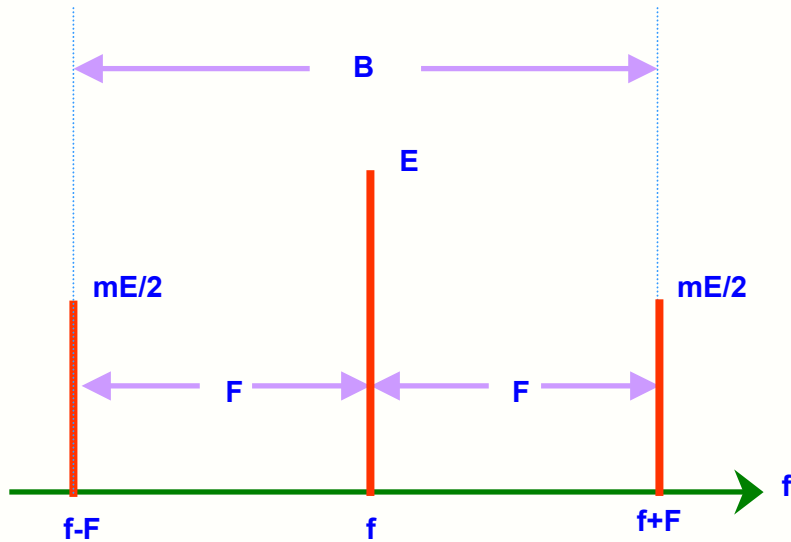
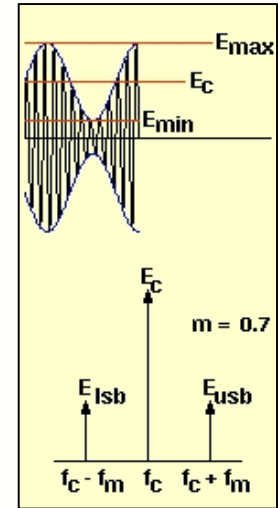
Dans le cas simple où le signal modulant est sinusoïdal, l'expression du signal modulé peut être développée :

$$e(t) = E[1 + m \cos(\Omega t)] \cos(\omega t) = E \cos(\omega t) + E m \cos(\Omega t) \cos(\omega t)$$

d'où :

$$e(t) = E \cos(\omega t) + \frac{Em}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{Em}{2} \cos(\omega - \Omega)t$$

animation :
influence de m



- le spectre est formé de 3 raies : la porteuse à f , les raies latérales supérieure à $f+F$ et inférieure à $f-F$
- la porteuse a une amplitude E
- les raies latérales supérieure et inférieure ont la même amplitude $mE/2$
- l'encombrement spectral du signal modulé est le double de la fréquence modulante $B = 2.F$

Applet : influence de la fréquence de la porteuse, du signal modulant et de m sur le signal AM

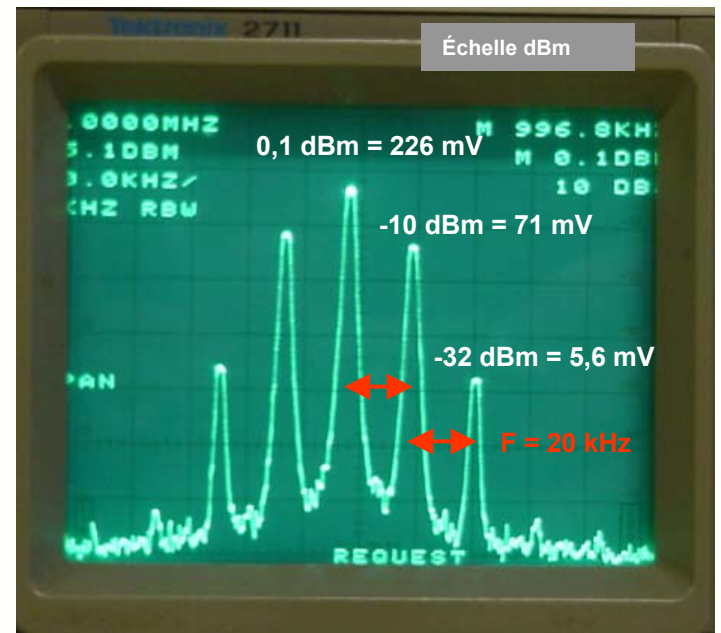
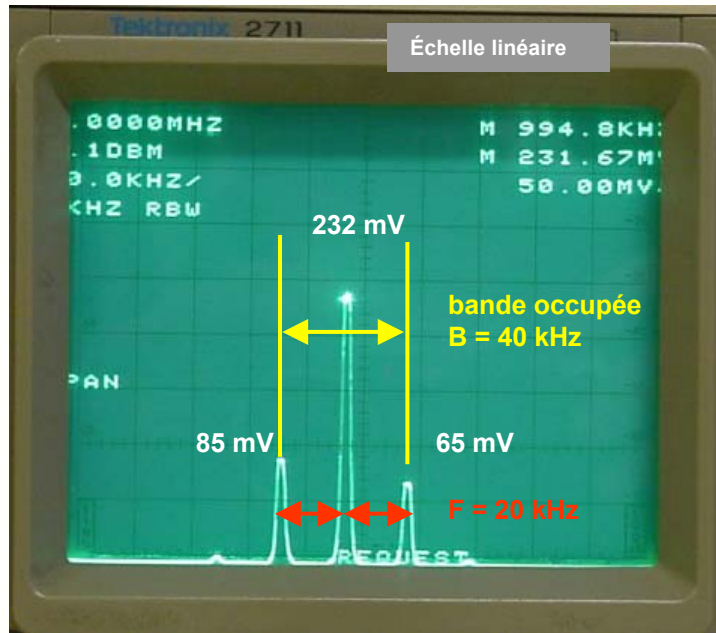
Applet : reconstitution du signal AM à partir de ses 3 composantes sinusoïdales



14- Exemple de spectre avec signal modulant sinusoïdal



Un signal sinusoïdal de fréquence $F = 20 \text{ kHz}$ module une porteuse d'amplitude $E = 230 \text{ mV}$ et de fréquence $f = 1 \text{ MHz}$:



- le spectre est formé de la porteuse à $f = 1 \text{ MHz}$ et des raies latérales supérieure à $f + F = 1,02 \text{ MHz}$ et inférieure à $f - F = 0,998 \text{ MHz}$
- les raies latérales supérieure et inférieure ont une amplitude moyenne $mE/2 = 75 \text{ mV}$
- l'indice de modulation vaut : $m = 2.75/232 = 0,65$
- l'encombrement spectral du signal modulé est le double de la fréquence modulante $B = 2.F = 40 \text{ kHz}$
- l'échelle dBm permet de mettre en évidence la présence de raies à $f - 2F$ et $f + 2F$ traduisant un défaut du modulateur AM

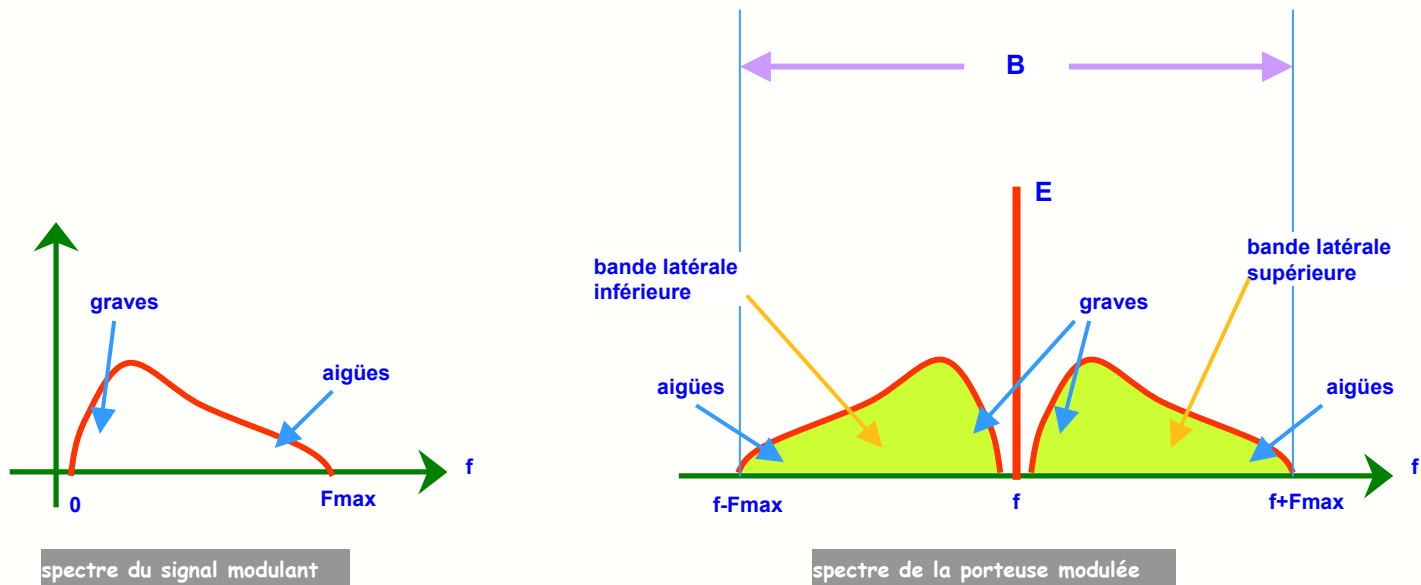


15- Spectre AM avec signal modulant analogique



Dans ce cas, le calcul simple n'est plus possible, et John R. Carson a démontré en 1914 que le spectre d'un signal modulé en amplitude est formé de 3 composantes :

- une raie à la fréquence de la porteuse f
- deux bandes latérales supérieure et inférieure
- la forme d'une bande latérale est celle du spectre du signal modulant
- l'encombrement spectral du signal modulé est de $B = 2.F$



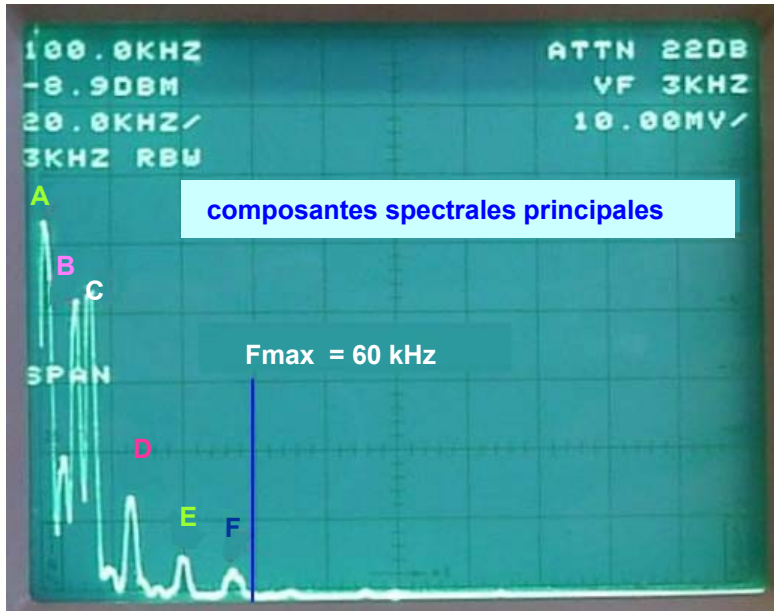
Remarque : en radiodiffusion PO et GO, chaque émetteur disposant d'un canal de largeur $B = 9$ kHz, la largeur du spectre BF a donc dû être limité à $F_{max} = 4,5$ kHz. Ceci explique la qualité assez moyenne des émissions dans ces bandes.



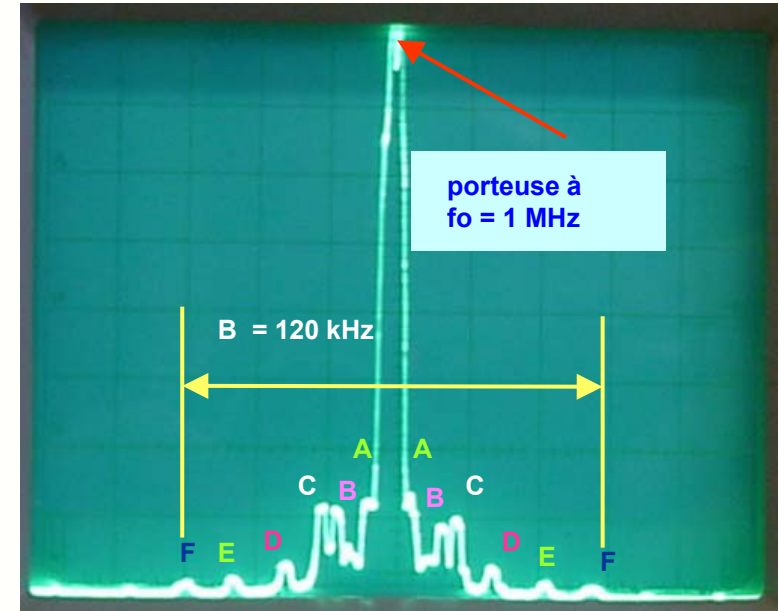
16- Exemple de spectre avec signal modulant analogique



Un signal analogique dont le spectre monte jusqu'à $F_{max} = 60 \text{ kHz}$ module une porteuse de fréquence $f = 1 \text{ MHz}$:



spectre du signal analogique



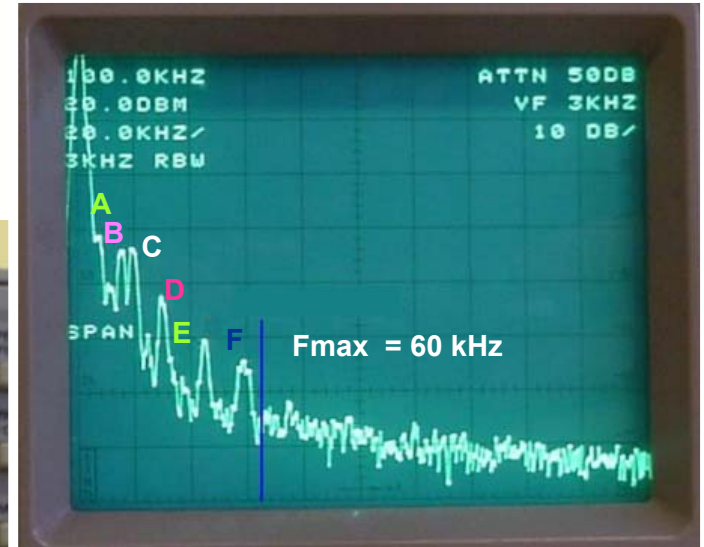
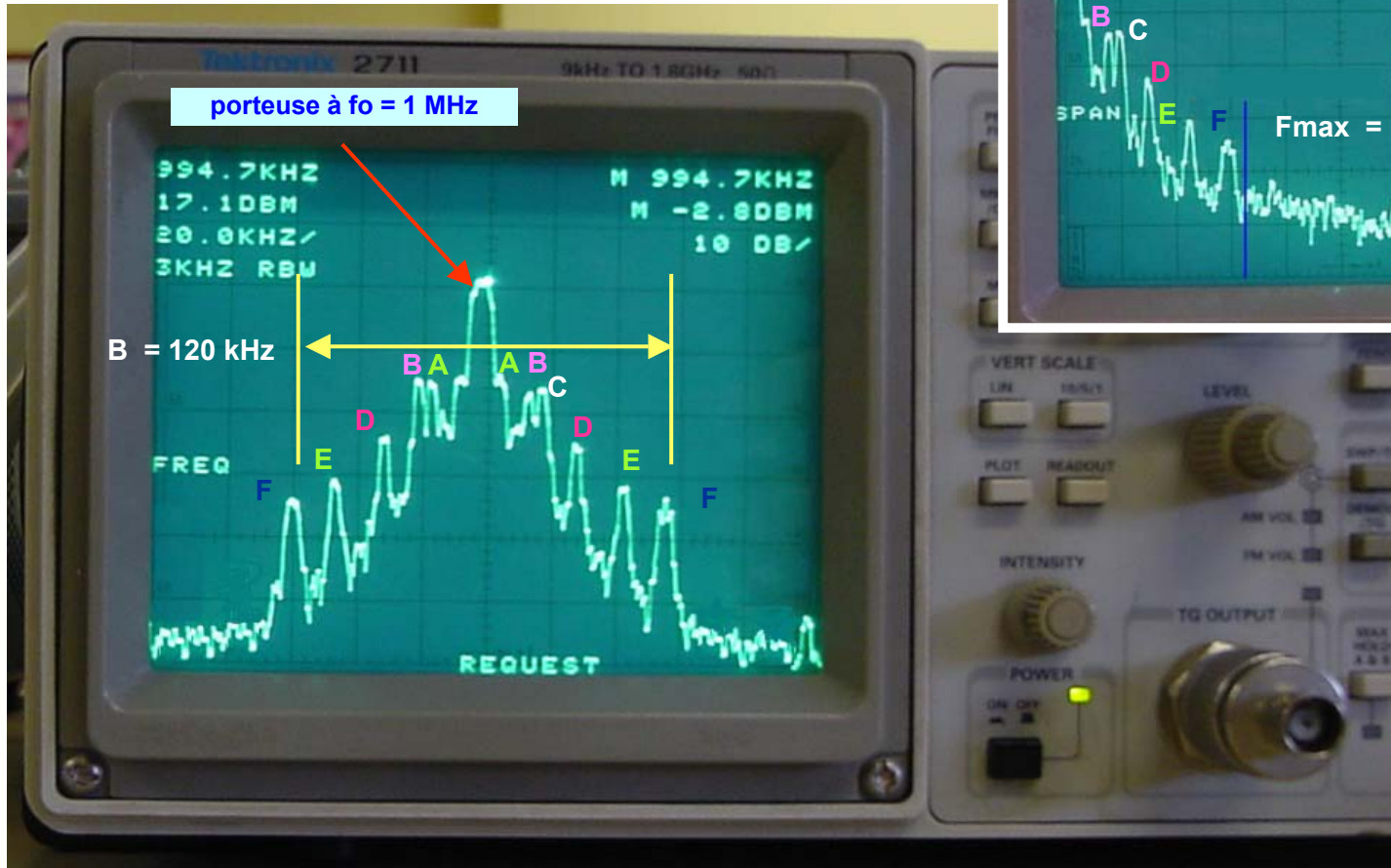
spectre de la porteuse modulée

- le spectre est formé de la porteuse à $f = 1 \text{ MHz}$ et de 2 bandes latérales supérieure et inférieure
- les raies latérales supérieure et inférieure ont la même forme que le spectre du signal modulant
- l'encombrement spectral du signal modulé est le double de la fréquence modulante maximale $B = 2.F_{max} = 120 \text{ kHz}$

[Vidéo](#) : spectre d'une porteuse modulée AM



17- Le même exemple en échelle dBm

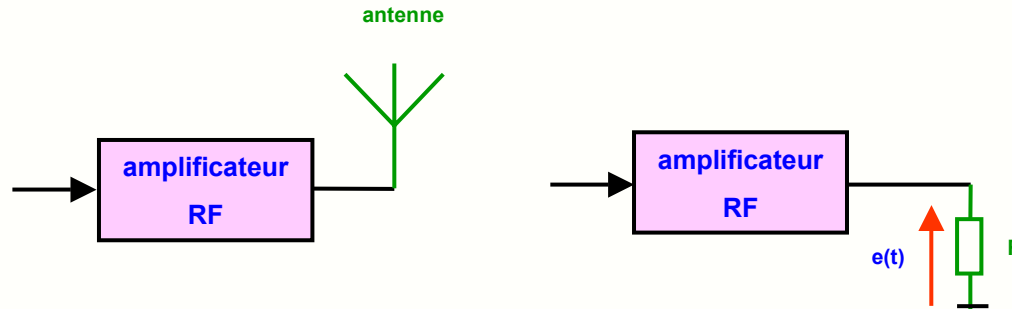




18- Puissance transportée par un signal AM



Le signal AM est appliqué à l'antenne qui se comporte vis-à-vis de l'amplificateur de sortie comme une charge résistive R :



Le signal appliqué à l'antenne est constitué de 3 composantes sinusoïdales :

$$e(t) = E \cos(\omega t) + \frac{Em}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{Em}{2} \cos(\omega - \Omega)t$$

La puissance totale dissipée dans l'antenne vaut alors :

$$P = \frac{E^2}{2R} + \frac{\left(\frac{Em}{2}\right)^2}{2R} + \frac{\left(\frac{Em}{2}\right)^2}{2R} = \frac{E^2}{2R} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$$

Exemple : $E = 50V$, $m = 0,5$, antenne $R = 50\Omega$

- puissance de la porteuse $P_p = 25 W$ et pour une raie latérale : $P_s = P_i = 1,56 W$
- puissance totale $P = 25 + 1,56 + 1,56 = 28,12 W$

Remarque : la puissance de la porteuse, émise même en l'absence de signal modulant, est très élevée alors que l'information se trouve dans les bandes latérales.

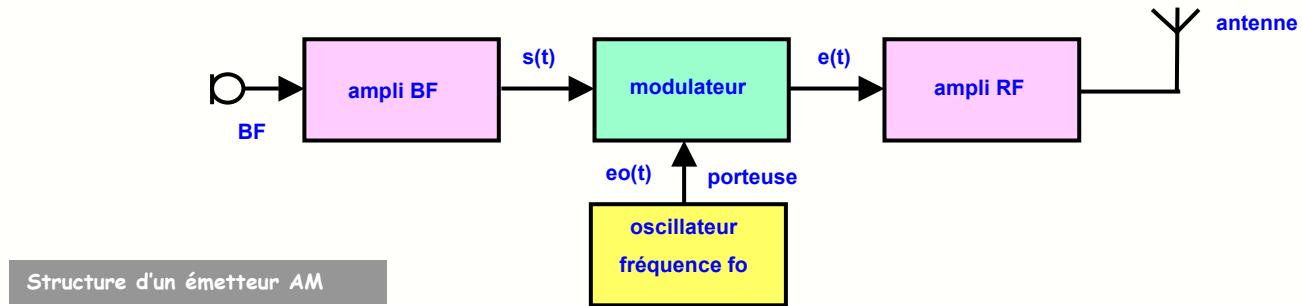
Pour émettre avec une consommation plus faible, on peut supprimer la porteuse et émettre uniquement une seule bande latérale : c'est la modulation **BLU** (bande latérale unique), très utilisée dans les équipements portables.



19- Production d'un signal AM

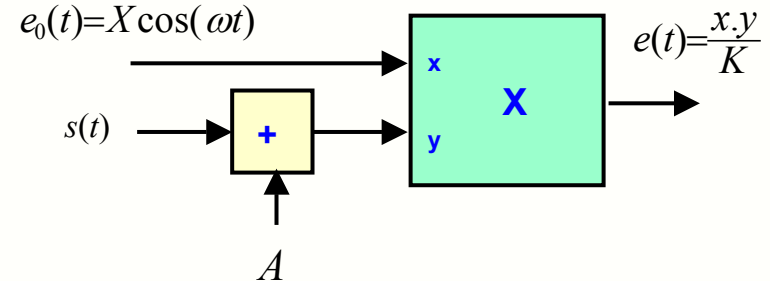


Lorsqu'on veut transmettre un signal en AM, on module la porteuse par l'information basse-fréquence à l'aide d'un modulateur.



On peut créer facilement un signal AM en utilisant un multiplieur :

- le signal modulant $s(t)$ est décalé par une composante continue A
- le résultat $A + s(t)$ est appliqué sur une des entrées du multiplieur
- l'autre entrée reçoit la porteuse $eo(t)$



A la sortie du multiplieur, l'expression du signal est la suivante :

$$e(t) = [A + s(t)] X \cos(\omega t) \cdot \frac{1}{K} = \frac{XA}{K} \left(1 + \frac{1}{A} s(t)\right) \cos(\omega t)$$

On obtient un signal modulé en amplitude :

- l'amplitude de la porteuse vaut $E = XA/K$
- l'indice de modulation m est réglable en jouant sur la valeur de la composante continue A

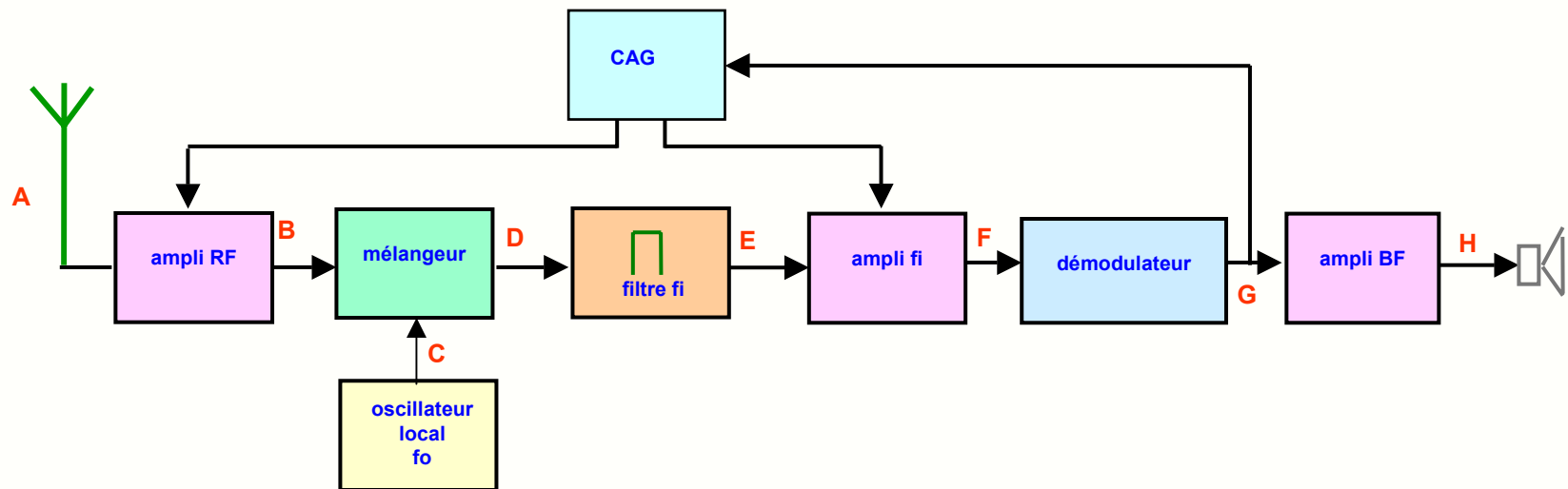


20- Le récepteur AM



La sélection de l'émetteur à recevoir est faite à l'aide de la structure habituelle : **oscillateur local-mélangeur-filtre fi** :

- le signal à recevoir de fréquence f_1 est capté par l'antenne avec d'autres signaux (A)
- tous ces signaux sont amplifiés par un ampli RF à faible bruit (B)
- ils sont mélangés (D) au signal de fréquence f_0 issu de l'oscillateur local (C)
- si f_0 est bien choisie, le signal de fréquence différence $f_1 - f_0$ tombe à f_i et traverse le filtre (E)
- le signal transportant l'information est maintenant isolé et se trouve à la fréquence f_i , il est amplifié (F)
- le démodulateur extrait l'information BF qui se trouve dans l'amplitude (G)
- le signal BF sera enfin amplifié et envoyé sur le haut-parleur (H)

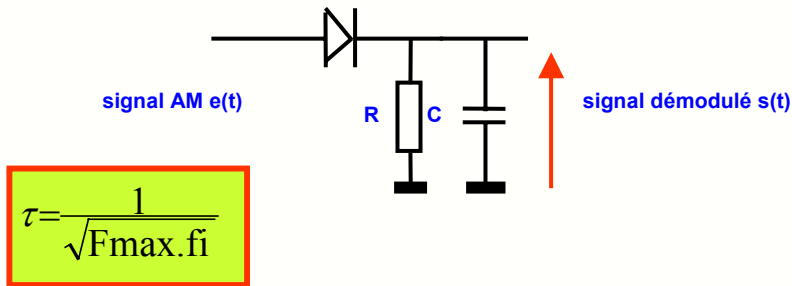


Remarque : l'information étant inscrite dans l'amplitude, il faut absolument éviter l'écrêtage du signal. C'est la raison pour laquelle le circuit de Contrôle Automatique de Gain ajuste les amplifications des amplis RF et fi en fonction du niveau BF.

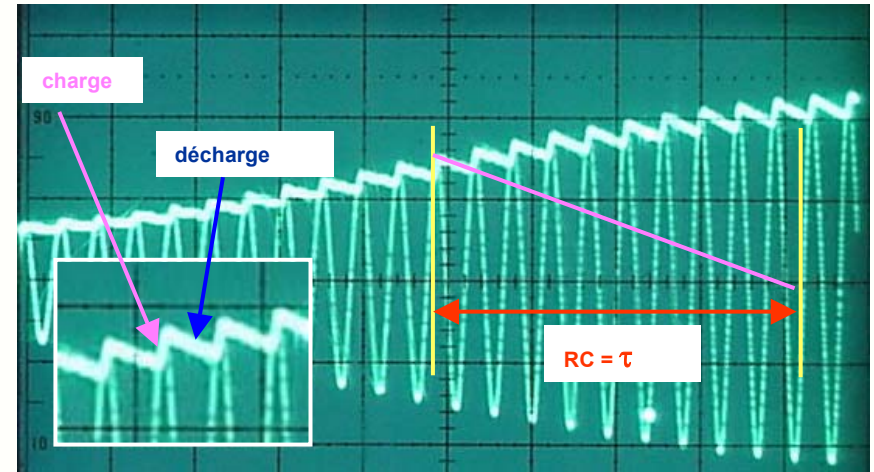
21- Démodulation AM : le détecteur crête



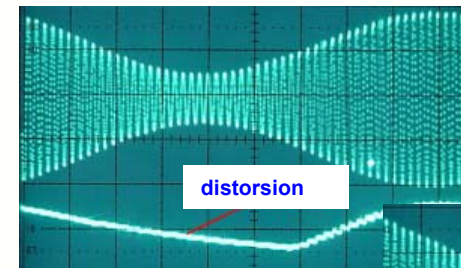
Le détecteur crête est très simple en apparence, mais le choix des composants délicat :



- si la constante de temps du circuit RC est mal choisie, le signal de sortie ne reproduit pas fidèlement le signal modulant
- la constante de temps τ du circuit RC doit être grande devant la période de la porteuse et faible devant la période de variation du signal modulant
- le détecteur crête introduit en cas de surmodulation une distorsion inacceptable. Si on l'utilise à la réception, il faut donc prévoir une compression de dynamique à l'émission
- à cause du seuil de la diode, il faut avoir un niveau de signal suffisant à l'entrée du détecteur crête, typiquement de quelques centaines de mV
- ce détecteur crête est le seul démodulateur AM qui fonctionne encore aux fréquences élevées supérieures au gigahertz
- pour le réaliser, on utilise des diodes à pointe au germanium ayant un faible seuil (0,2V) et une faible capacité parasite.



allure du signal démodulé



RC trop forte

RC trop faible

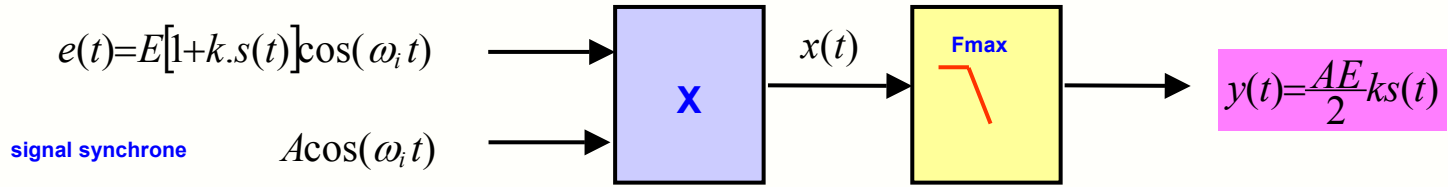


résidu de porteuse

22- Démodulation AM : la détection synchrone



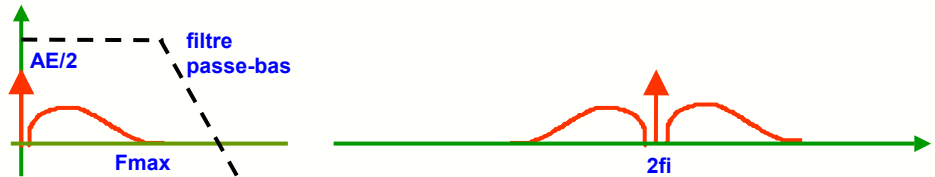
Dans un **démodulation synchrone**, on multiplie le signal AM par un signal sinusoïdal en phase (synchrone) avec la porteuse.



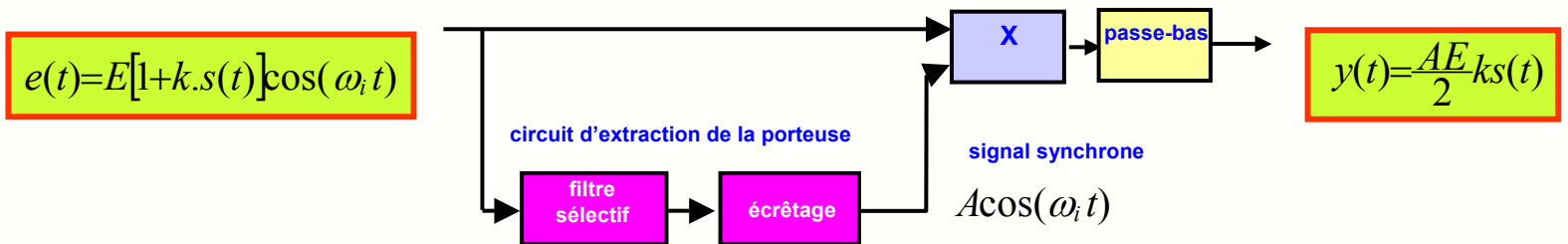
En sortie du multiplieur, le signal $x(t)$ s'écrit :

$$x(t) = AE[1 + k.s(t)]\cos^2(\omega_i t) = AE[1 + k.s(t)]\frac{1 + \cos(2\omega_i t)}{2} \quad \text{soit} \quad x(t) = \frac{AE}{2} + \frac{AE}{2}ks(t) + \frac{AE}{2}[1 + k.s(t)]\cos(2\omega_i t)$$

Le tracé du spectre de $x(t)$ montre bien que ce signal contient, en partie basse, le signal modulant $s(t)$:



Après filtrage et suppression de la composante continue, on obtient le signal basse-fréquence :



Remarque : la détection synchrone nécessite la présence d'un signal synchrone avec la porteuse qu'on peut produire à partir du signal AM par **écrêtage et filtrage sélectif** ou par une **boucle à verrouillage de phase** accrochée sur la porteuse modulée



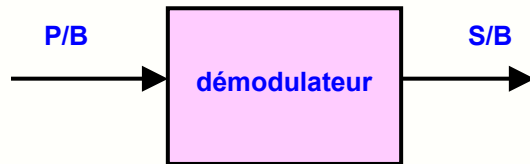
23- Les démodulateurs AM et le bruit



A la sortie du filtre de fréquence intermédiaire, le signal modulé est affecté de **bruit électrique** provenant :

- de tous les émetteurs de parasites radioélectriques (systèmes industriels, soleil, signaux cosmiques) tombant dans la bande de fréquence reçue par le récepteur
- de l'agitation thermique des électrons qui produit du bruit dans tous les circuits électroniques du récepteur

On définit alors le **rapport signal/bruit** à l'entrée et à la sortie du démodulateur :



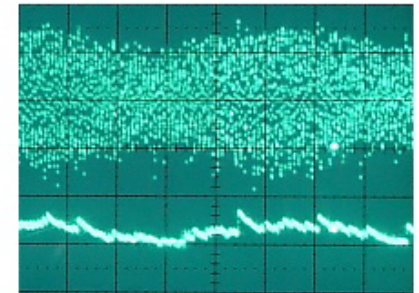
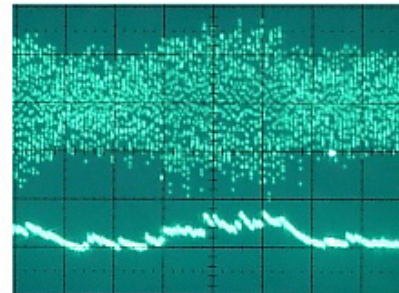
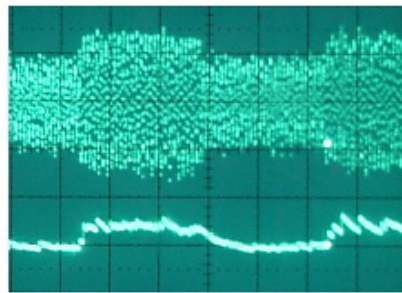
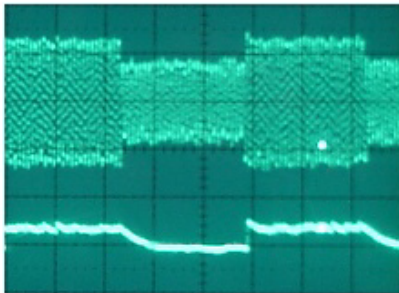
P : valeur efficace de la porteuse non modulée
 S : valeur efficace du signal basse-fréquence s(t)
 B : valeur efficace du bruit

- si le signal à démoduler est "propre", les démodulateurs apportent une amélioration d'un facteur 2, soit 6 dB : $S/B = 2.P/B$
- si le signal à démoduler est très bruité, le détecteur crête ne fonctionne plus

Pour la démodulation de **signaux très faibles** et donc fortement bruités, on préférera donc la **détection synchrone**.

porteuse peu bruitée

porteuse très bruitée



le détecteur crête en présence de bruit

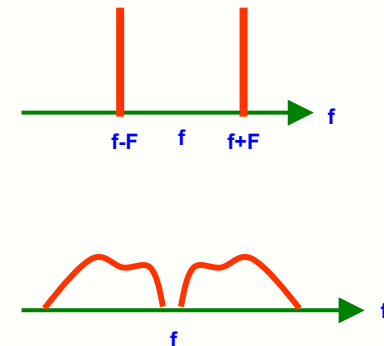
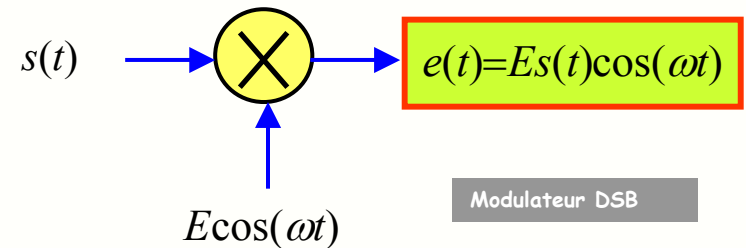
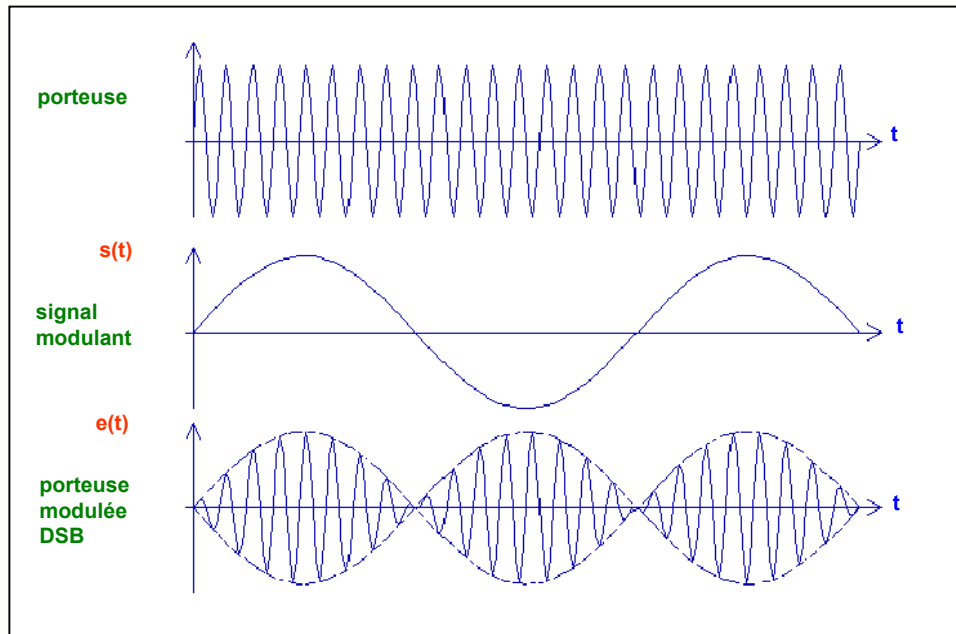
24- La modulation AM en bande latérale double



Pour diminuer la consommation de l'émetteur dans les équipements mobiles, d'autres types de modulations AM ont vu le jour.

Dans la modulation AM-BLD (bande latérale double ou AM-DSB : dual side band) :

- la porteuse modulée est obtenue en multipliant le signal modulant par la porteuse
- ce signal se démodule avec un démodulateur synchrone



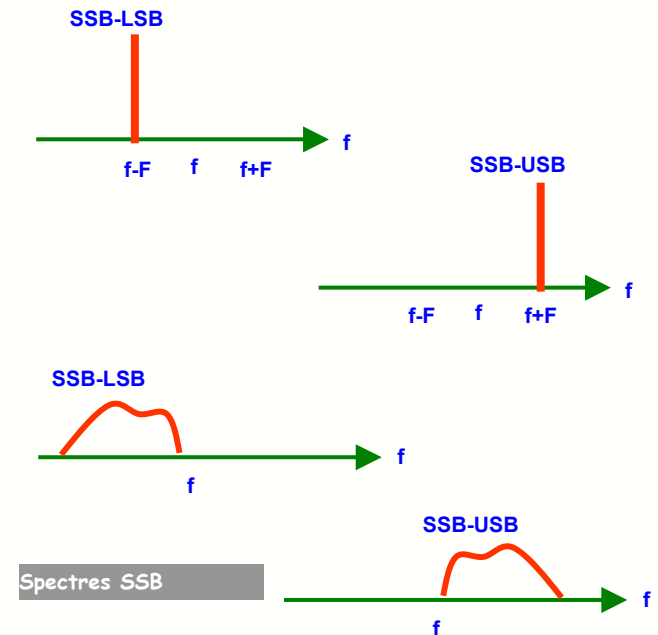
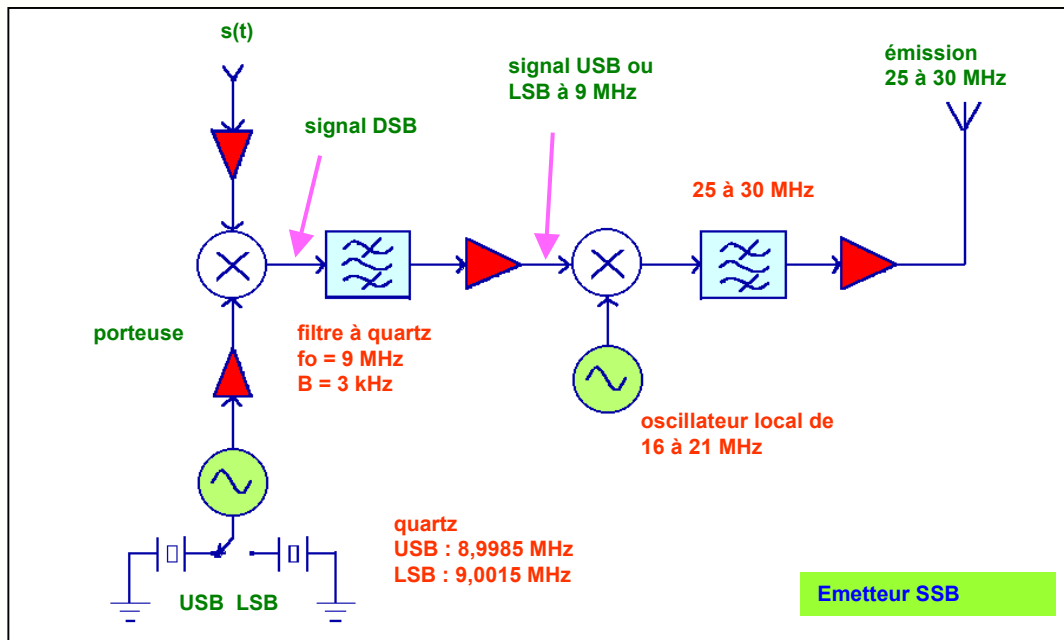
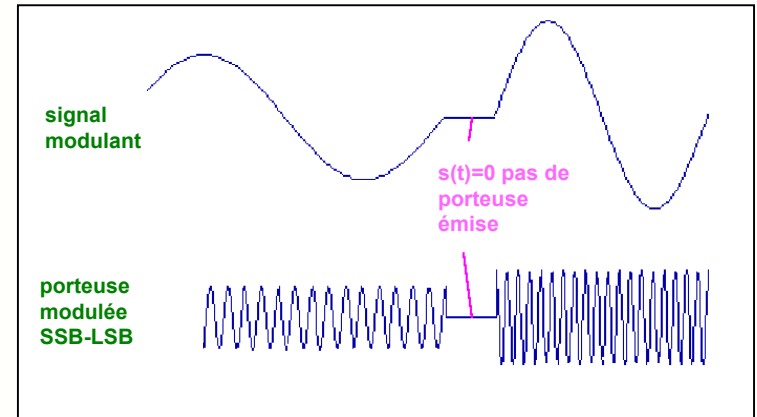
Remarque : en l'absence de modulation, $s(t) = 0$ et aucune porteuse n'est émise. Ceci explique que la AM-DSB est beaucoup plus économique que la AM classique où la porteuse est émise en permanence.

25- La modulation AM en bande latérale unique



Grâce aux travaux de Carl R. [Englund](#) qui a montré que la porteuse ne contenait pas d'information, [J.Carson](#) met au point en 1923 la modulation BLU (bande latérale unique ou SSB : single side band) :

- la première liaison radio transatlantique New-York, Londres fut inaugurée en 1927 et fonctionnait en BLU
- la BLU est économe en énergie et permet une portée intéressante avec une puissance émise faible
- la BLU est très utilisée dans les équipements portables et par les radioamateurs
- le spectre est constitué par la bande latérale supérieure (Upper Side Band) ou inférieure (Lower Side Band) du signal AM classique
- elle peut être produite par filtrage d'un signal DSB ou par synthèse directe



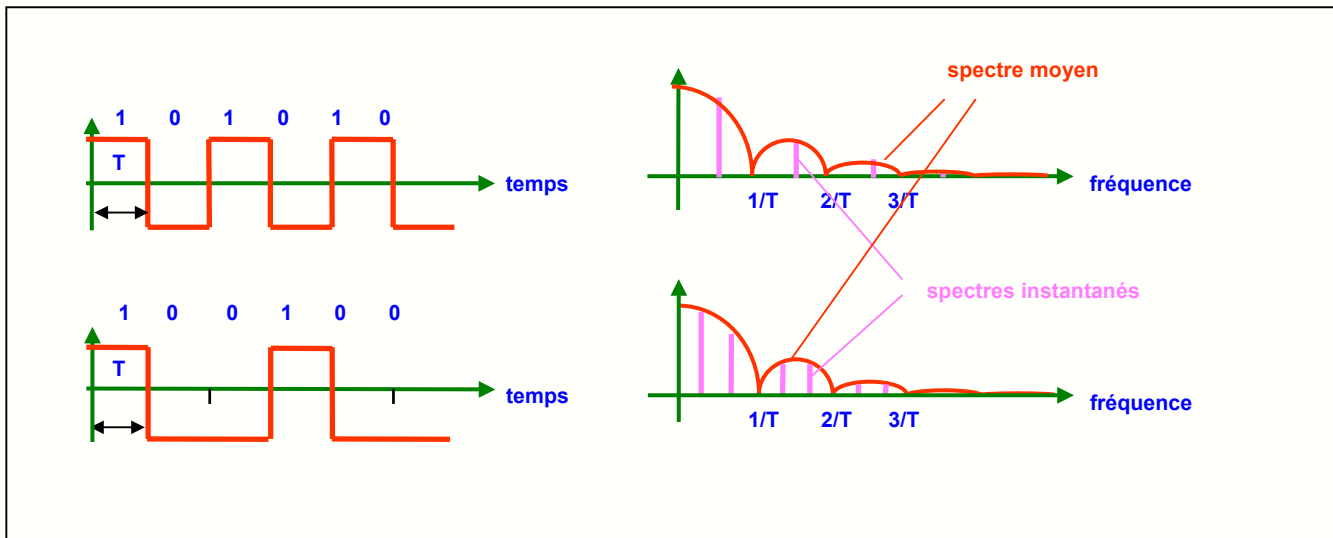


26- La modulation par un signal numérique



La modulation AM peut aussi être utilisée pour transmettre un **signal numérique $x_n(t)$** :

- le signal numérique est constitué d'une succession aléatoire de « 0 » et de « 1 »
- pour avoir une valeur moyenne nulle, on affecte au « 0 » la valeur -1V et au « 1 » la valeur +1V
- la durée d'un symbole est T et le débit binaire $D=1/T$
- le spectre du signal binaire $x_n(t)$ à un instant donné dépend du contenu du signal
- le spectre moyen n'est pas borné (F_{max} infinie) et a une forme en $\sin(X)/X$
- il passe par 0 à tous les multiples de la fréquence $1/T$

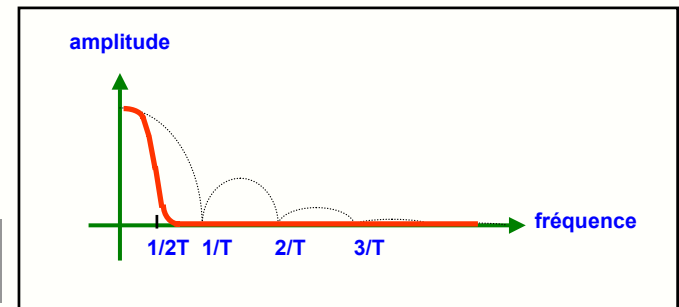


Spectre d'un signal binaire brut

Si on module en amplitude une porteuse par ce signal, la bande occupée sera infinie, ce qui est inacceptable.

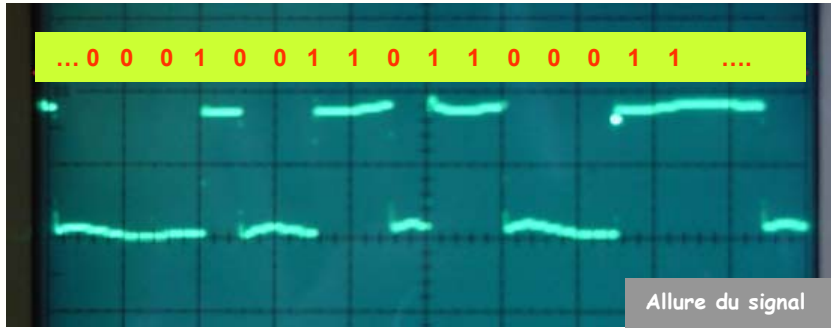
Le signal binaire est donc **toujours filtré**, souvent même assez sévèrement, avant d'attaquer le modulateur.

Spectre d'un signal binaire filtré

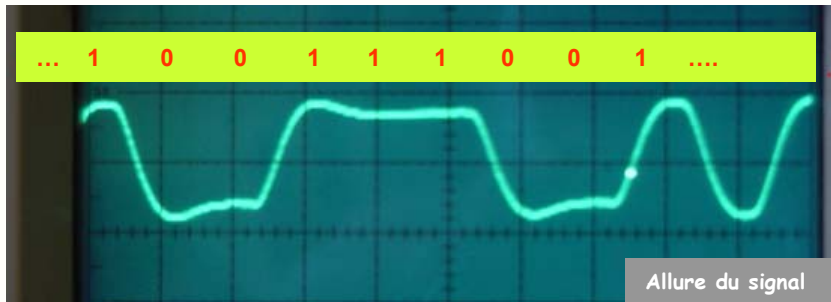




27- Diagramme de l'œil d'un signal binaire



Allure du signal binaire brut



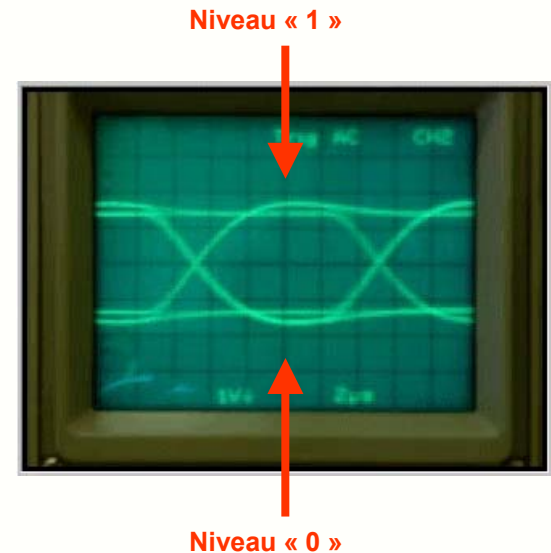
Allure du signal binaire filtré

Le filtrage du signal binaire modifie sa forme :

- après le filtrage passe-bas, les impulsions sont arrondies et les temps de montée et de descente rallongés
- la disparition des fronts est liée à la limitation du spectre par filtrage des fréquences aiguës
- à la réception, le signal en sortie du démodulateur a la même forme arrondie
- un étage à comparateur permet de restaurer la forme carrée initiale du signal binaire
- cette remise en forme est possible tant que le bruit en sortie du démodulateur n'est pas trop important

La visualisation du signal binaire filtré à l'oscilloscope donne une courbe caractéristique appelée « **diagramme de l'œil** ».

La restauration du signal binaire est possible à la réception aussi longtemps que l'œil est « ouvert » et que les niveaux « 1 » et « 0 » sont bien distincts.



[video](#)

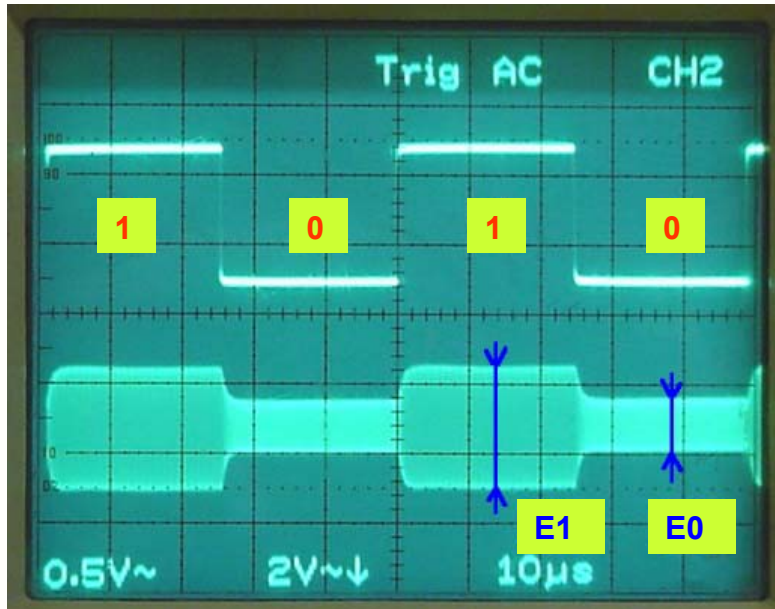


28- Modulation partielle ou totale

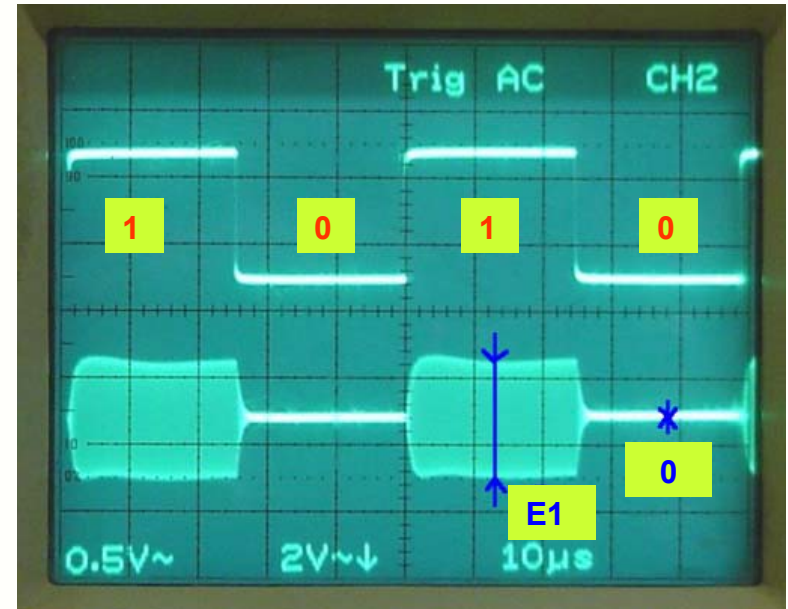


La porteuse peut être modulée en amplitude de deux manières :

- partiellement (Amplitude Shift Keying) comme dans certains standards de modems téléphoniques ou
- totalement (On-Off Keying) pour une modulation en « tout-ou rien » très utilisée dans les télécommandes



Modulation partielle (ASK)



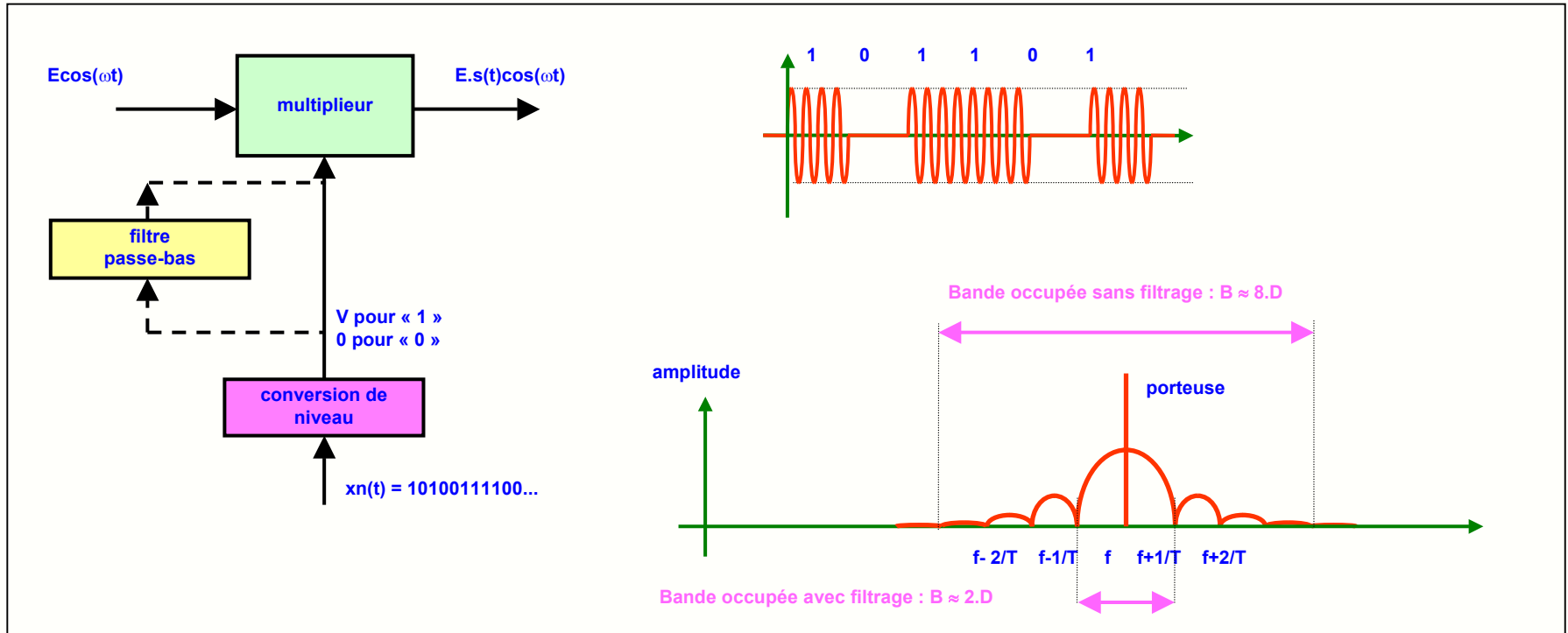
Modulation totale (OOK)

- la modulation OOK est particulièrement simple à mettre en œuvre puisqu'il suffit de commander l'alimentation de l'oscillateur radiofréquence par le signal binaire à transmettre
- dans ce type de modulation, le signal binaire n'est pas filtré, et l'encombrement spectral est limité par la bande passante des étages amplis RF et de l'antenne

29- Production d'une modulation AM numérique



Le modulateur d'amplitude numérique est aussi construit autour d'un multiplieur :



Modulateur « tout-ou-rien » OOK

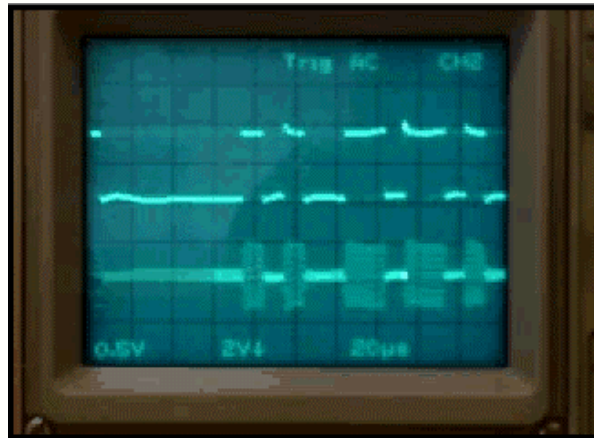
- en l'absence de filtrage passe-bas du signal modulant, l'encombrement spectral est de $B = 8.D$ environ
- si on utilise un passe-bas ayant une coupure raide au-delà de $f_c = 1/T$, l'encombrement spectral est de $B = 2.D$ environ
- dans une transmission radio à 27 MHz, le récepteur a une valeur standard de $f_i = 455$ kHz avec une largeur de 9 kHz
- le spectre du signal transmis sera donc limité à une bande de largeur 9 kHz, ce qui limite le débit numérique à $D = 4,5$ kbits/s environ.
- à 433,92 MHz, on pourra utiliser des filtres à $f_i = 10,7$ MHz de largeur 300 kHz, ce qui permettra un débit de 150 kbits/s.



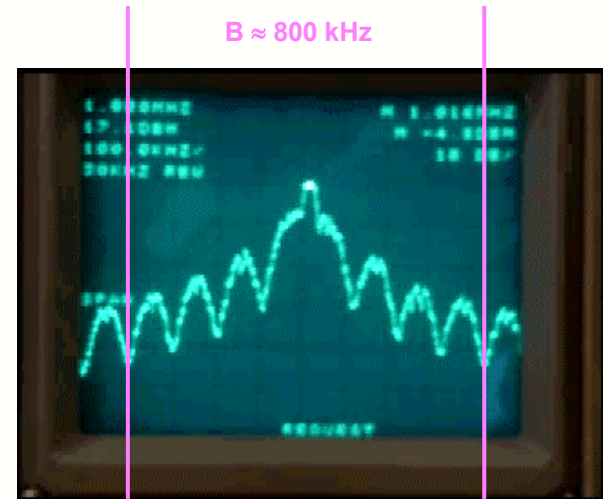
30- Formes et spectres des signaux AM numérique



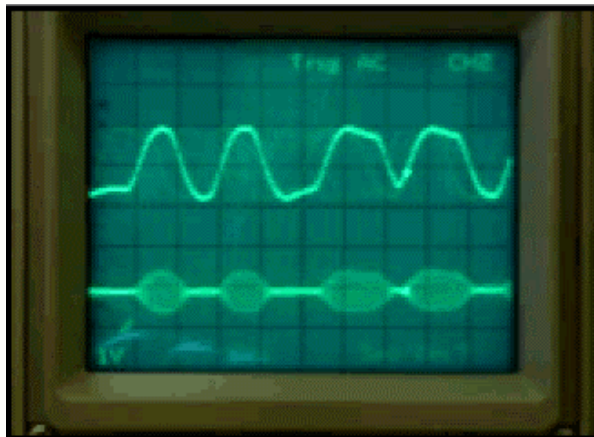
Voici deux exemples de porteuses modulées par un signal binaire à $D = 100 \text{ kbits/s}$:



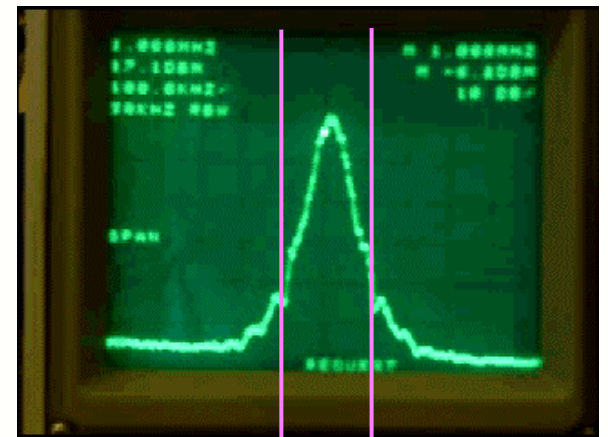
video



video



video



video

$B \approx 800 \text{ kHz}$

$B = 200 \text{ kHz}$

Oscillogrammes

Spectres



31 - Exemples et illustrations



- équipement RF utilisé pour les tracés



- récepteur à amplification directe



- récepteur superhétérodyne



- modules d'émission réception AM



- un récepteur AM moderne



- un récepteur 27 MHz simple





Équipement radiofréquence



Générateur basse-fréquence

Metrix produisant le
signal modulant



Générateur radio-fréquence
Unohm 100 kHz-120 MHz
modulable en AM ou FM

Oscilloscope à mémoire
Tektronix 2211

Analyseur de spectre
9kHz-1,8 GHz
Tektronix 2711



Récepteur AM à amplification directe



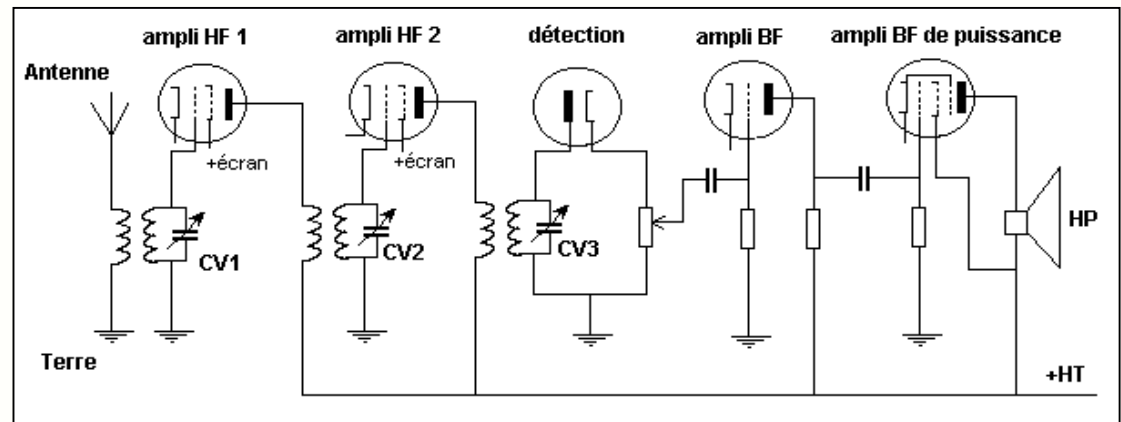
Poste PHILIPS (1932)

La commercialisation des récepteurs "grand public" utilisant le principe de l'amplification directe à été assez brève (de 1928 à 1934).

Ce type de récepteur a été rapidement supplanté par le "superhétérodyne" ou récepteur à changement de fréquence.

Le récepteur à amplification directe comprend :

- un **ampli RF**, souvent à plusieurs étages
- un **détecteur crête**
- un **amplificateur basse fréquence**



Le schéma ci-dessus donne la structure d'un tel récepteur à lampes (seuls sont représentés les composants caractéristiques).

Les condensateurs d'accord sont couplés sur le même axe Le nombre de circuits accordés variait de deux (le plus souvent) à quatre sur les récepteurs de grande qualité.

Le défaut de cette structure est l'impossibilité à maintenir la largeur des filtres sélectifs constante sur toute la bande de réception.

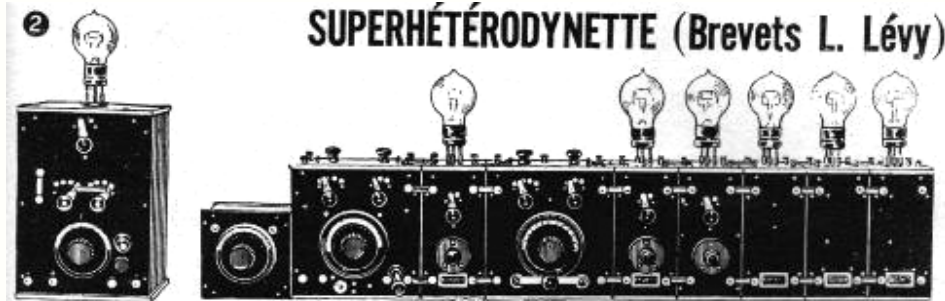


Récepteur AM superhétérodyne



Le mot le mot "superhétérodyne" n'est plus guère utilisé, et on préfère aujourd'hui parler de "récepteur à changement de fréquence". Il décrit le procédé encore employé de nos jours dans tous les récepteurs (radio, TV,...).

Le principe fut découvert par Lucien Lévy et E.H Armstrong en 1918, mais il faudra attendre la fin des années 1920 pour que ce dispositif soit mis enfin à la portée du grand public.



Sélectivité
et
Sensibilité
incomparables

Cet appareil est le seul permettant de recevoir, dans toute la France, les postes anglais sur cadre de un mètre, en haut-parleur, en éliminant totalement toutes les émissions locales et toute perturbation parasite quelconque. Sur antenne, sa portée est illimitée.

Seuls inventeurs et constructeurs du
SUPERHÉTÉRODYNETTE

HOBS CONCOURS - MEMBRE DU JURY
A L'EXPOSITION-CONCOURS DE T. S. F. 1924

Dans ces récepteurs, le problème de la recherche d'une station et celui de la sélectivité se trouvent séparés :

- le premier étage "mélangeur" permet de choisir la station désirée
- le second étage "amplificateur moyenne fréquence" assure l'amplification et la sélectivité

Les premiers récepteurs superhétérodyne étaient sensibles et avaient une bonne sélectivité. Mais ils nécessitaient beaucoup de réglages et le son était affecté de sifflements et de distorsions.



Récepteur DUCRETET RM7 - 1926 –

Cet appareil ne compte pas moins de 13 boutons en façade et des bobines à changer pour les diverses gammes d'ondes.



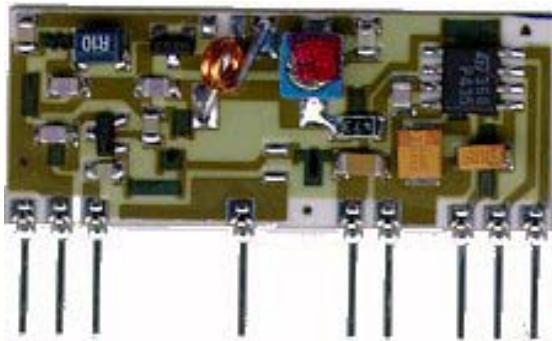
Modules d'émission-réception



Émetteur AUREL sur 433 MHz

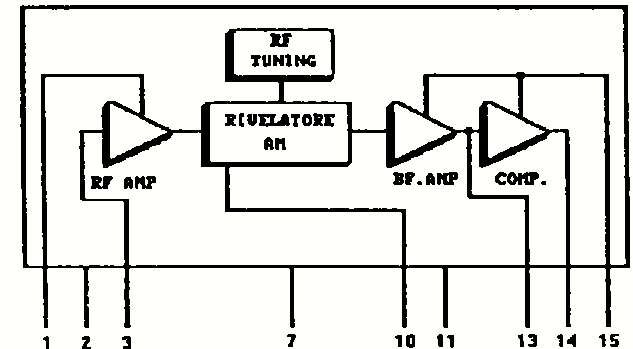
- taille :12,2 mm de largeur, 38,1 mm de longueur et 6 mm d'épaisseur
- sa fréquence précise d'émission est de 433,92 MHz
- ce module émet en modulation d'amplitude
- la broche 1 (la plus à gauche) est la masse, ainsi que les broches 4 et 13
- la broche 2 est l'entrée du signal si Vcc > 8V
- la broche 3 est l'entrée du signal si Vcc > 8V
- la broche 11 est la sortie antenne.
- la broche 15 est l'alimentation Vcc, qui peut être entre 4V et 12V
- sous 5 volts, le module consomme 3,5 mA

Ces modules sont très simples à utiliser : on alimente sur deux broches, on amène le signal à envoyer sur une troisième et on branche l'antenne sur une quatrième.



Récepteur AUREL de 220 à 433 MHz

- broches 1 et 10 : +5V
- broches 2, 7, 11 : masse.
- broche 3 : entrée antenne.
- broche13 : sortie du signal démodulé
- broche 14 : sortie du signal 13 mis en forme par le comparateur
- broche 15 : alimentation les deux Aop avec une tension entre +5V et +24V



Le démodulateur AM est relié à un "RF TUNING" qui permet de régler la fréquence à recevoir grâce à un potentiomètre scellé par de la cire



Un récepteur AM moderne



Specifications

- couverture sans trou de 150 kHz à 30 MHz
- la bande FM de 88 à 108 MHz
- toutes les bandes OC de 120 m à 11m
- oscillateur BFO pour la réception BLU et CW
- récepteur à double changement de fréquence
- oscillateur local synthétisé par boucle à verrouillage de phase
- filtre fi large ou étroit : 6 kHz ou 2,8 kHz à -6dB
- réglage du gain RF pour éviter la saturation
- choix de la fréquence de réception au clavier ou par scanning
- semiconducteurs : 1LSI , 12 ICs , 8 FETs , 48 transistors

Bandes OC radio-amateurs :

- 2,300 – 2,495 MHz (120m)
- 3,200 – 3,400 MHz (90m)
- 4,750 – 5,060 MHz (60m)
- 5,950 – 6,200 MHz (49m)
- 7,100 – 7,300 MHz (41m)
- 9,500 – 9,900 MHz (31m)
- 11,650 – 12,050 MHz (25m)
- 13,600 – 13,800 MHz (21m)
- 15,100 – 15,600 MHz (19m)
- 17,550 – 17,900 MHz (16m)
- 21,450 – 21,850 MHz (13m)
- 25,670 – 26,100 MHz (11m)



L'antenne et son enrouleur



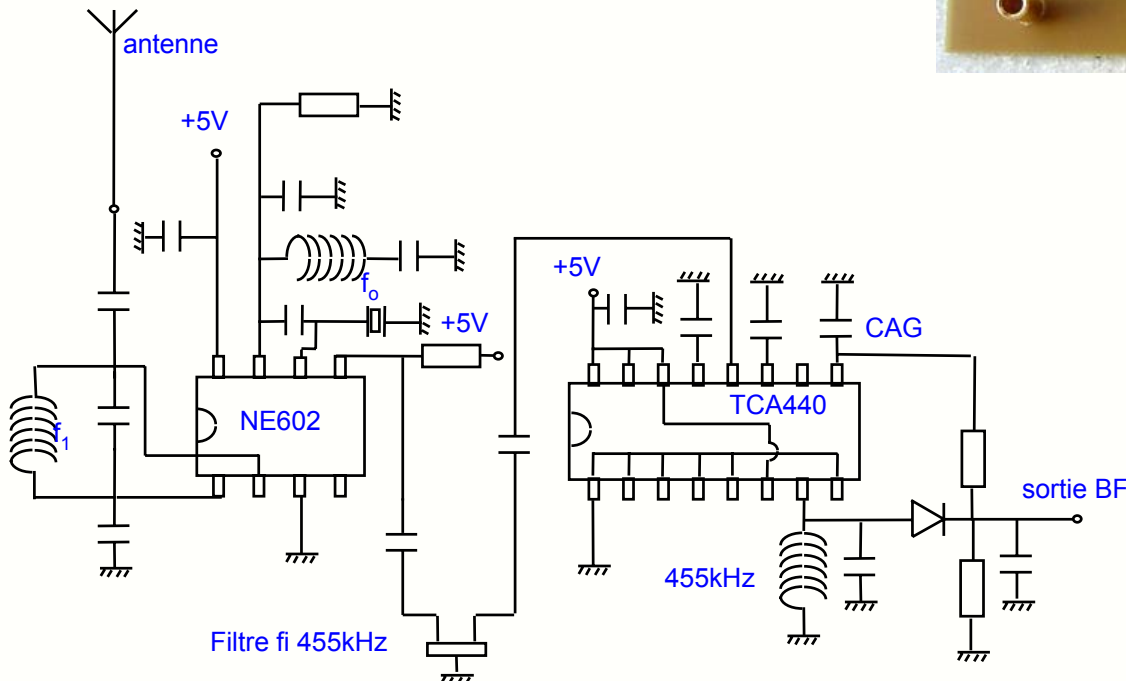
Le récepteur

Un récepteur AM simple pour la bande CB



Ce récepteur AM didactique permet de recevoir un canal de la bande CB des 27 MHz :

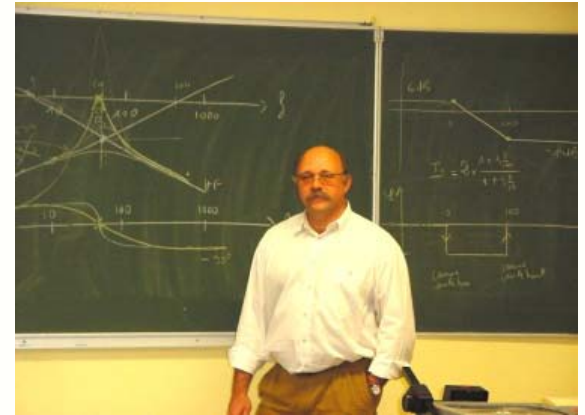
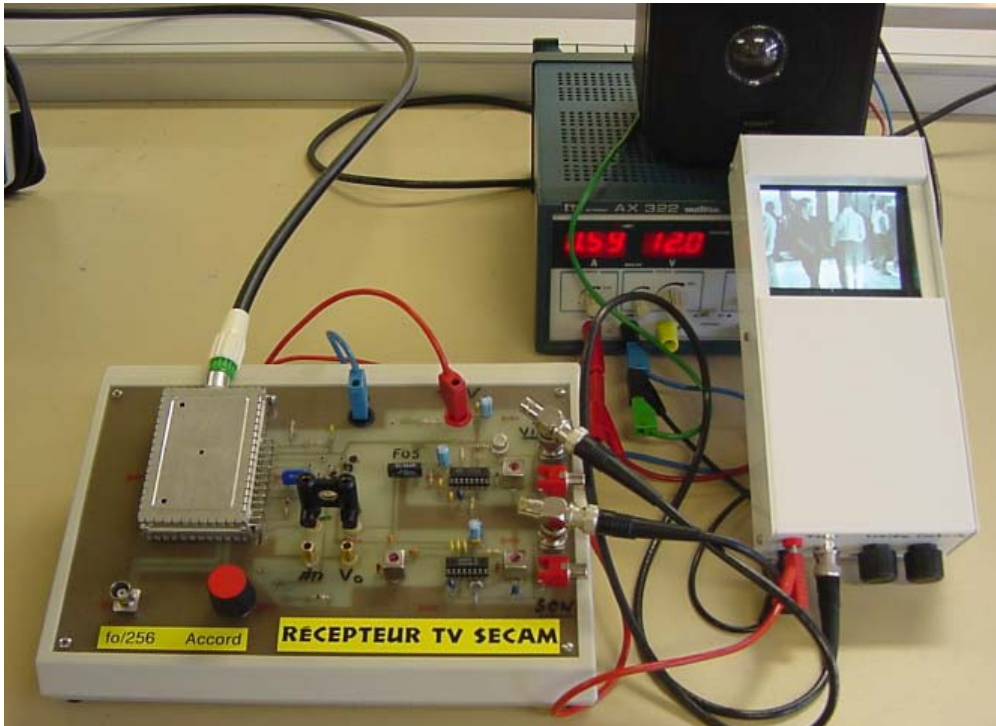
- le signal à f_1 est capté par l'antenne et filtré
- la fréquence de l'oscillateur du NE602 est fixée par le quartz f_0
- le mélangeur du NE602 mélange ces 2 signaux
- le filtre f_i à 455 kHz sélectionne la fréquence différence
- ce signal est amplifié par l'ampli du TCA440 à gain contrôlé
- le signal de sortie est filtré puis démodulé par un détecteur crête



$f_0 = 26,640 \text{ MHz}$
 $f_1 = 27,095 \text{ MHz}$
 $f_1 - f_0 = 455 \text{ kHz}$



Maquette de récepteur TV SECAM



FIN