

III) La modulation d'amplitude (AM)

1) Définition de la AM avec porteuse

Soient une porteuse sinusoïdale $e_o(t) = E \cos(\omega t)$ et un signal modulant basse-fréquence $s(t)$ qui peut être un signal audiofréquence, vidéo, analogique ou numérique.

La porteuse modulée en amplitude s'écrit alors :

$$e(t) = E (1 + k.s(t)) \cos(\omega t)$$

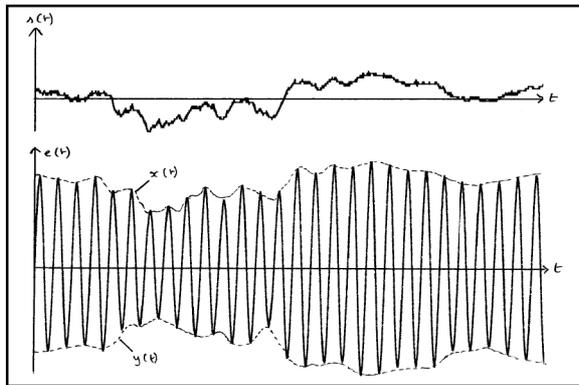
On peut remarquer que :

- en l'absence de signal modulant $s(t)=0$ et $e(t) = e_o(t) = E \cos(\omega t)$
- en présence de modulation l'amplitude de la porteuse s'écrit : $E(1+k.s(t))$

Pour représenter l'allure temporelle d'un signal sinusoïdal modulé en amplitude par un signal $s(t)$ on utilise les propriétés suivantes :

- la porteuse oscille entre deux limites qui sont les enveloppes supérieure et inférieure
- l'enveloppe supérieure a pour équation $x(t) = E (1 + k.s(t))$ (lorsque $\cos(\omega t) = 1$)
- l'enveloppe inférieure a pour équation $y(t) = -E (1 + k.s(t))$ (lorsque $\cos(\omega t) = -1$)
- on retrouve la forme du signal modulant $s(t)$ dans les deux enveloppes

Figure 15.
Allure d'une porteuse modulée en amplitude

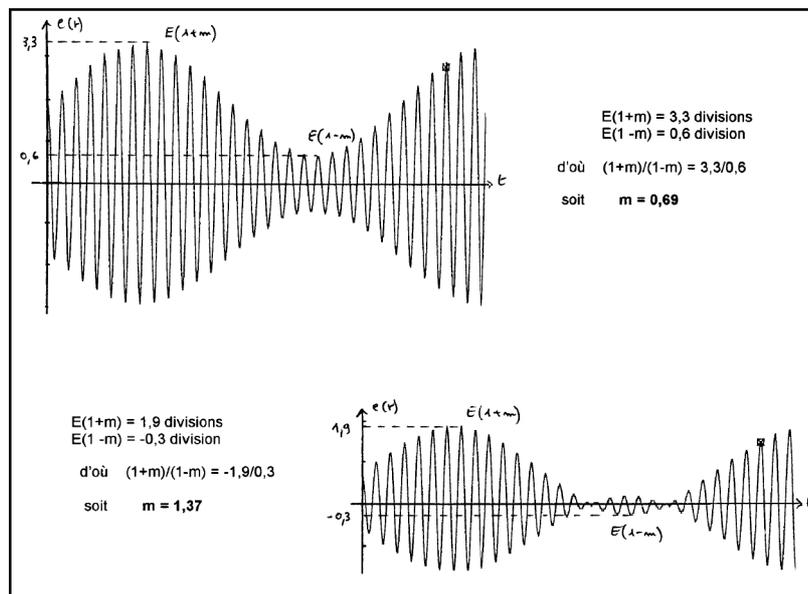


Lorsque le signal modulant est sinusoïdal, on a $s(t) = a \cos(\Omega t)$ et la porteuse modulée s'écrit :

$$e(t) = E (1 + k a \cos(\Omega t)) \cos(\omega t) = E (1 + m \cos(\Omega t)) \cos(\omega t) \quad \text{si on pose } m = ka$$

la grandeur $m = ka$ est appelée **indice de modulation**

Figure 16.
Influence de m sur l'allure de la porteuse



Lorsque l'indice de modulation est supérieur à 1, on parle de **surmodulation**. Lorsqu'on démodule ce signal à l'aide d'un détecteur crête, le surmodulation est à l'origine d'une distorsion inacceptable.

Dans la pratique, on passe en surmodulation chaque fois que le signal $s(t)$ atteint une amplitude excessive. De ce fait, il faut prévoir avant le modulateur un dispositif de compression de dynamique qui maintiendra le signal $s(t)$ autour d'une valeur moyenne acceptable.

Ceci explique pourquoi les émissions en AM (Petites Ondes ou Grandes Ondes) manquent de relief et de dynamique.

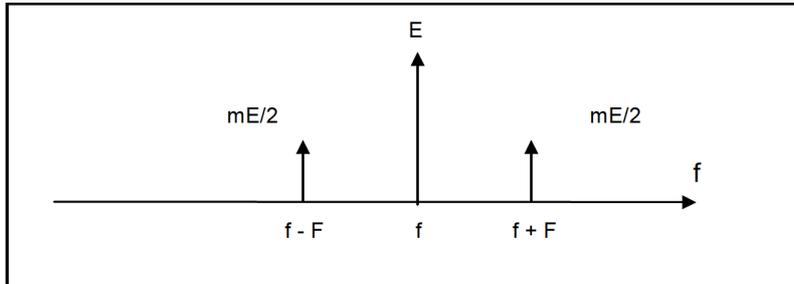
2) Spectre d'un signal AM

Intéressons-nous maintenant au **spectre** du signal modulé, et étudions le cas simple où le signal modulant est sinusoïdal :

$$\begin{aligned}
 e(t) &= E (1 + m\cos(\Omega t)) \cos(\omega t) \\
 &= E \cos(\omega t) + E m \cos(\Omega t) \cos(\omega t) \\
 &= E \cos(\omega t) + \frac{E m}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{E m}{2} \cos(\omega - \Omega)t
 \end{aligned}$$

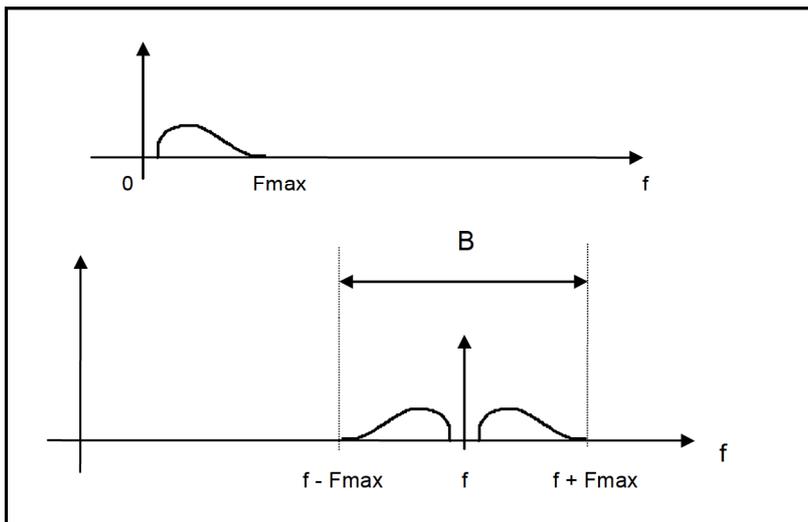
Le spectre est donc formé de 3 raies et a l'allure suivante :

Figure 17.
Spectre d'un signal AM avec signal modulant sinusoïdal



Dans le cas général, le signal $s(t)$ est quelconque, mais a un spectre borné par F_{max} . Le spectre du signal modulé en amplitude a alors l'allure suivante :

Figure 18.
Spectre d'un signal AM avec signal modulant quelconque



On constate que la bande B occupée par un signal AM vaut : **B = 2.Fmax**

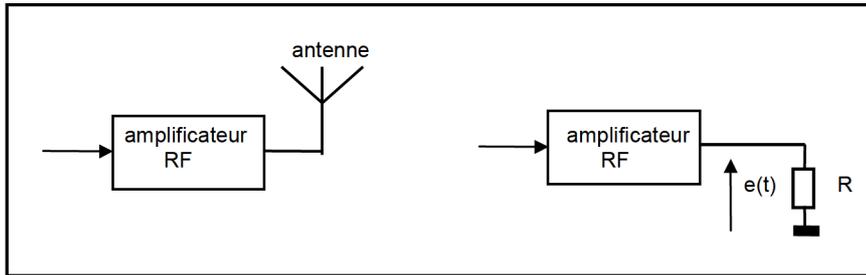
Applications :

- en radiodiffusion PO ou GO, un émetteur a droit à une bande de 9 kHz, ceci ne peut être réalisé que si on limite le spectre basse-fréquence à 4 kHz
- un canal CB ayant une largeur de 10 kHz, le spectre basse-fréquence doit être limité à 5kHz

3) 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 :

Figure 19.
Etage de sortie de l'émetteur



La puissance totale dissipée dans l'antenne et donc émise vaut :

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

Prenons un exemple numérique : $E = 50V$, $m = 0,5$, antenne $R = 50\Omega$

Nous aurons : pour la porteuse $P_p = 25 W$ et pour une raie latérale : $P_s = P_i = 1,56 W$

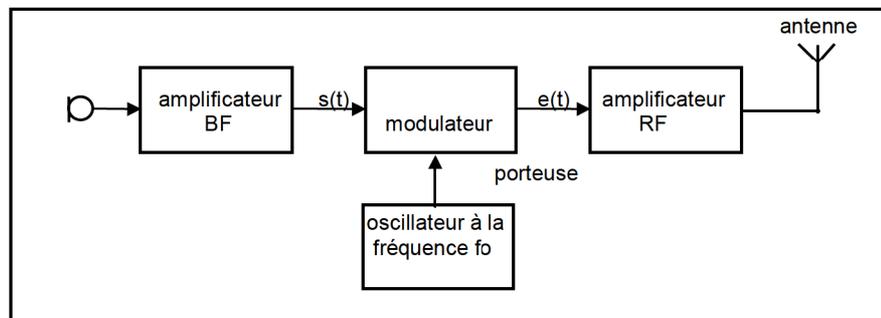
soit une puissance totale de : $P = 25 + 1,56 + 1,56 = 28,12 W$

On peut noter l'importance de la puissance de la porteuse, qui est émise même en l'absence de signal modulant, alors que l'information se trouve dans les bandes latérales. On a donc eu l'idée de supprimer la porteuse et d'émettre uniquement les deux bandes latérales (**modulation en bande latérale double**) ou une seule bande latérale (**bande latérale unique**).

4) Production d'un signal AM avec porteuse

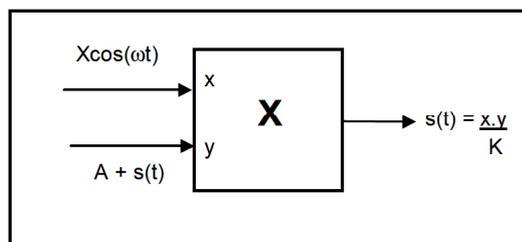
Lorsqu'on veut transmettre un signal en AM, on module la porteuse par l'information basse-fréquence à l'aide d'un modulateur :

Figure 20.
Structure d'un émetteur AM



On peut créer facilement un signal AM en multipliant la porteuse par le signal modulant décalé d'une composante continue :

Figure 21.
Production d'un signal AM par multiplieur



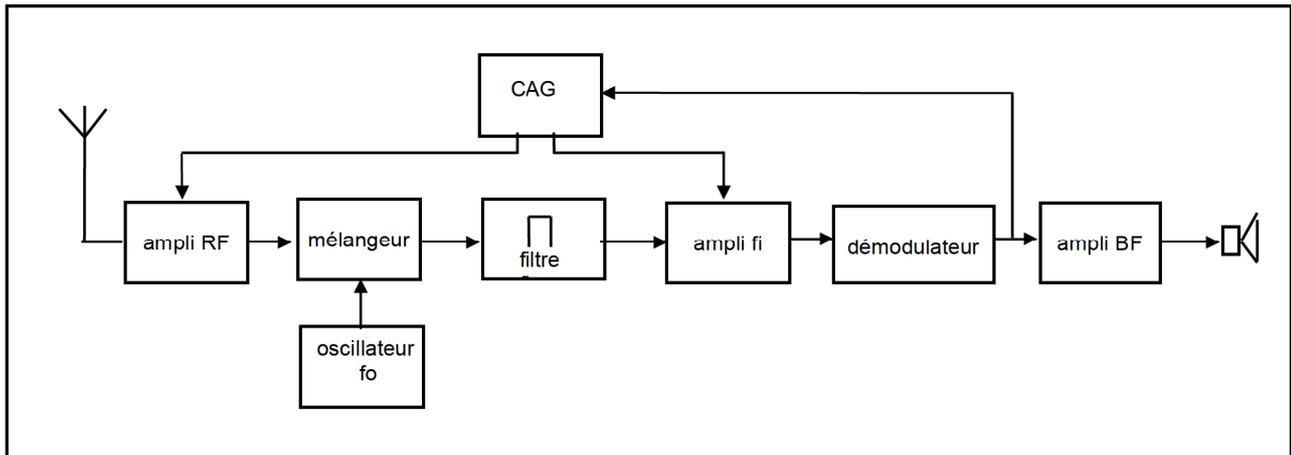
Si on appelle K le coefficient du multiplieur, on aura : $s(t) = \frac{X\cos(\omega t) \cdot (A + s(t))}{K} = \frac{XA}{K} \left(1 + \frac{1}{A}s(t) \right) \cos(\omega t)$

On peut donc régler l'indice de modulation m en jouant sur la valeur de la composante continue A.

5) Démodulation d'un signal AM

Dans un récepteur AM, le signal peut être démodulé une fois qu'on a sélectionné l'émetteur que l'on désire capter. La sélection est faite à l'aide de la structure habituelle : oscillateur local-mélangeur.

Figure 22.
Structure d'un récepteur AM



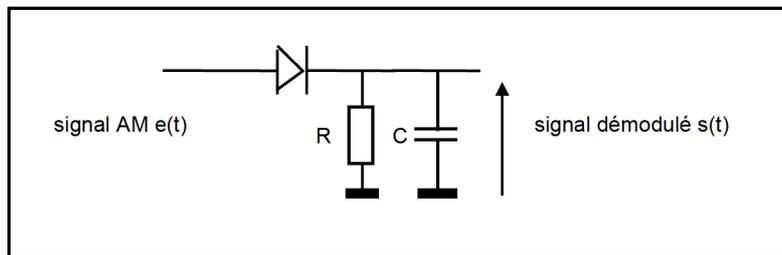
Le signal AM à démoduler se trouve à la fréquence intermédiaire f_i .

On rencontre en AM deux types de démodulateurs : le **détecteur crête** et le **démodulateur synchrone**.

Le **détecteur crête** a le mérite d'une simplicité apparente, mais à cause du seuil de la diode nécessite un niveau suffisant avant démodulation, typiquement de quelques centaines de mV.

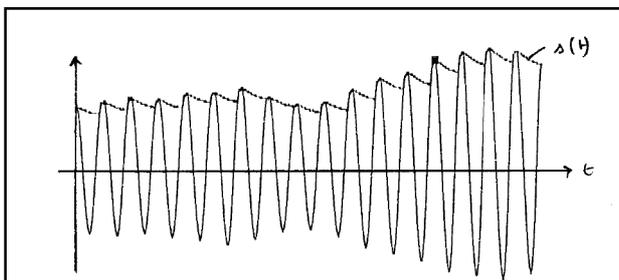
On utilisera de préférence une diode à pointe au germanium caractérisée par un faible seuil (0,2V) et une faible capacité parasite.

Figure 23.
Schéma du détecteur crête



Voici l'allure du signal en sortie du démodulateur lorsque les valeurs de R et C sont correctes:

Figure 24.
Signal démodulé par un détecteur crête bien conçu



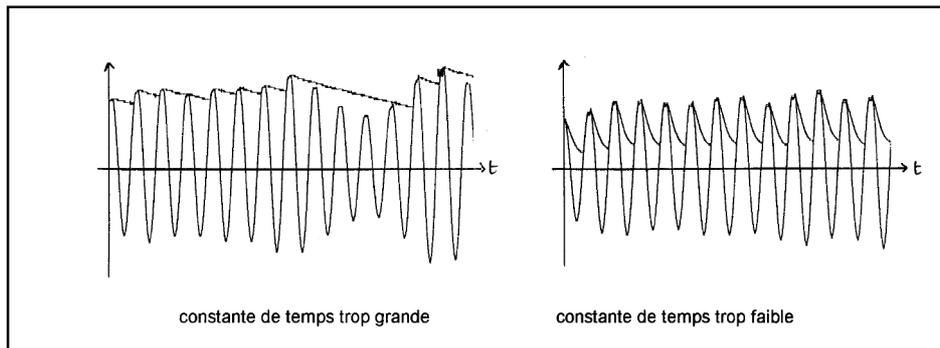
La constante de temps τ du circuit RC doit être grande devant la période de la porteuse et faible devant la période de variation du signal modulant.

On pourra par exemple choisir une constante de temps telle que :

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{F_{\max} \cdot f_i}}$$

Si la constante de temps du circuit RC est trop grande ou trop faible, le signal de sortie de ce démodulateur ne reproduit pas fidèlement le signal basse-fréquence modulant :

Figure 25.
Porteuse démodulée par un détecteur crête mal conçu



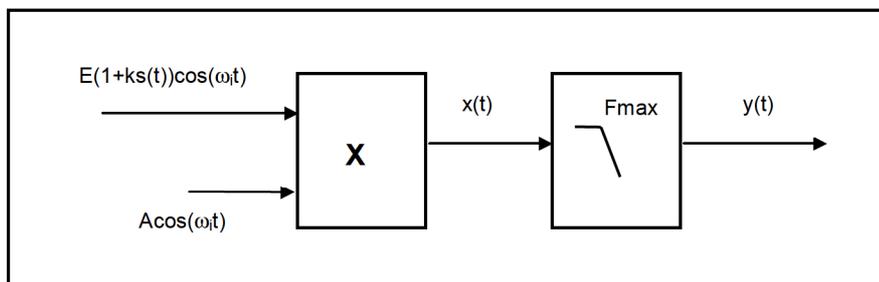
Le gros défaut de ce type de démodulateur est qu'il introduit en cas de surmodulation une distorsion inacceptable. On est donc contraint d'éviter la surmodulation à l'émission en insérant un étage amplificateur à contrôle automatique de gain qui évite au signal modulant de dépasser la valeur limite.

D'autre part, à cause du seuil de la diode, il est nécessaire d'avoir un niveau de signal suffisant à l'entrée du détecteur crête. C'est pour cette raison qu'on a placé un circuit de CAG (contrôle automatique de gain) qui règle le gain des amplificateurs HF et fi. De cette façon on pourra avoir un niveau satisfaisant à l'entrée du détecteur quelle que soit l'intensité du signal reçu.

Ce détecteur crête est le seul qui fonctionne encore aux fréquences élevées supérieures au gigahertz.

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

Figure 26.
Principe du démodulateur synchrone

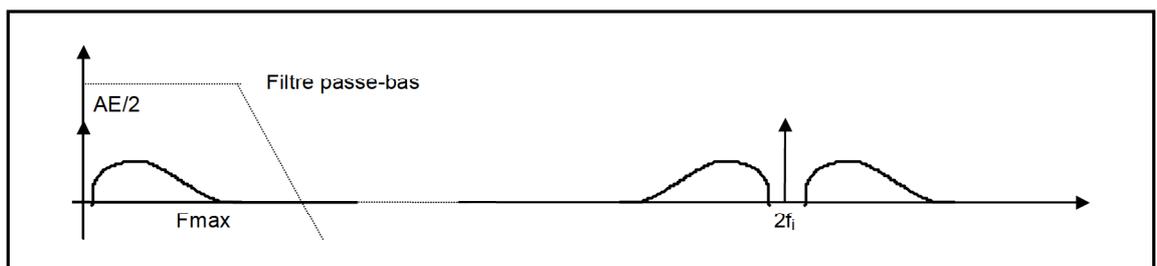


$$x(t) = AE(1+ks(t))\cos^2(\omega t) = AE(1+ks(t)) \frac{1 + \cos(2\omega t)}{2}$$

$$= \frac{AE}{2} + \frac{AEks(t)}{2} + \frac{AE(1+ks(t)) \cos(2\omega t)}{2}$$

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

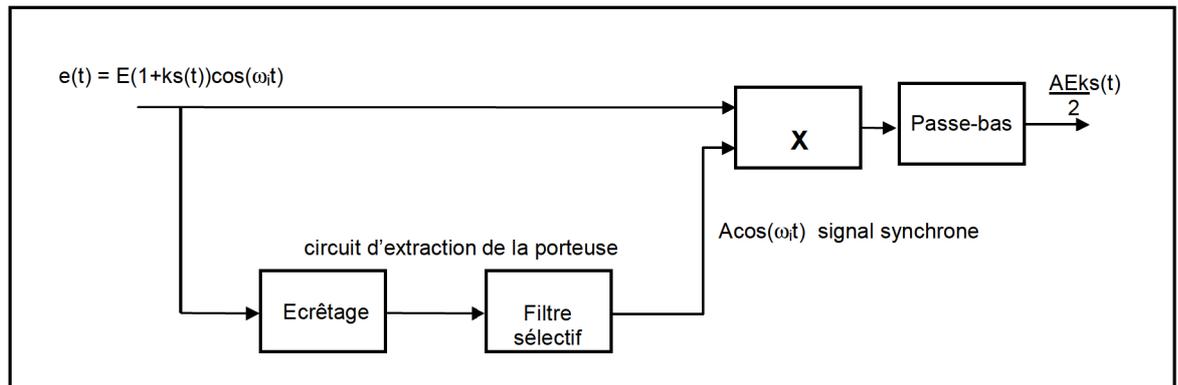
Figure 27.
Spectre en sortie du démodulateur synchrone



Après filtrage et suppression de la composante continue, nous obtenons le signal $y(t) = \frac{AEk}{2} \cdot s(t)$

La détection synchrone nécessite la présence d'un signal synchrone avec la porteuse. Pour l'obtenir dans un récepteur, on peut le fabriquer à partir du signal AM par écrêtage et filtrage sélectif :

Figure 28.
Exemple de circuit de récupération de la porteuse



Dans certaines applications, le circuit d'extraction de la porteuse est constitué par une boucle à verrouillage de phase accrochée sur la porteuse modulée.

6) Influence du bruit sur les démodulateurs

A la sortie du filtre de fréquence intermédiaire, le signal modulé est affecté de petites fluctuations aléatoires appelées **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

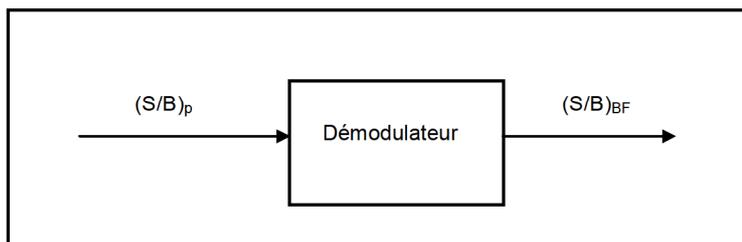
A la sortie de l'étage fi, le signal est caractérisé par son rapport signal sur bruit, qu'il faut plutôt appeler rapport porteuse sur bruit dans ce cas :

$$(S/B)_p = \frac{\text{valeur efficace de la porteuse en l'absence de modulation}}{\text{valeur efficace du bruit électrique}}$$

En sortie du démodulateur, on définit le rapport signal sur bruit du signal basse-fréquence :

$$(S/B)_{BF} = \frac{\text{valeur efficace de } s(t)}{\text{valeur efficace du bruit}}$$

Figure 29.
Le bruit dans le démodulateur



On démontre alors les résultats suivants :

- pour le **détecteur crête** : si $(S/B)_p \gg 1$ $(S/B)_{BF} = 2 \cdot (S/B)_p$ soit une amélioration de 6dB
si $(S/B)_p \ll 1$ $(S/B)_{BF} \ll 1$
ceci veut dire que le détecteur crête ne fonctionne pas si la porteuse est trop bruitée
- pour le **démodulateur synchrone** : $(S/B)_{BF} = 2 \cdot (S/B)_p$ l'amélioration est de 6dB quel que soit le niveau du signal modulé

Pour la démodulation de signaux très faibles et donc fortement bruités, il convient donc d'utiliser la détection synchrone.

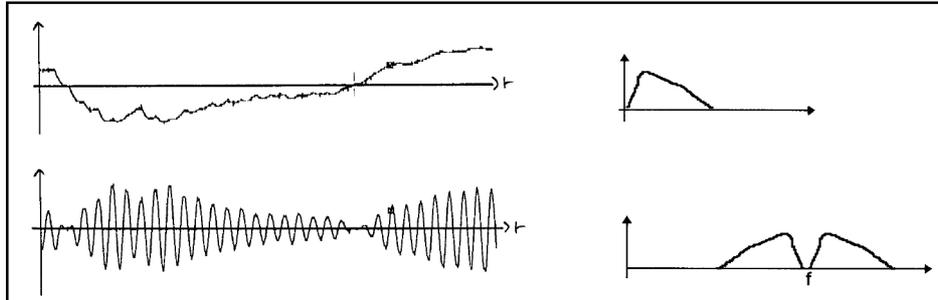
7) Les modulations d'amplitude sans porteuse

On obtient une autre forme de modulation d'amplitude en multipliant le signal modulant par la porteuse. L'expression mathématique du signal modulé s'écrit :

$$e(t) = E.s(t).cos(\omega t)$$

L'allure temporelle et le spectre d'un tel signal sont les suivants :

Figure 30.
La modulation
AM-DSB

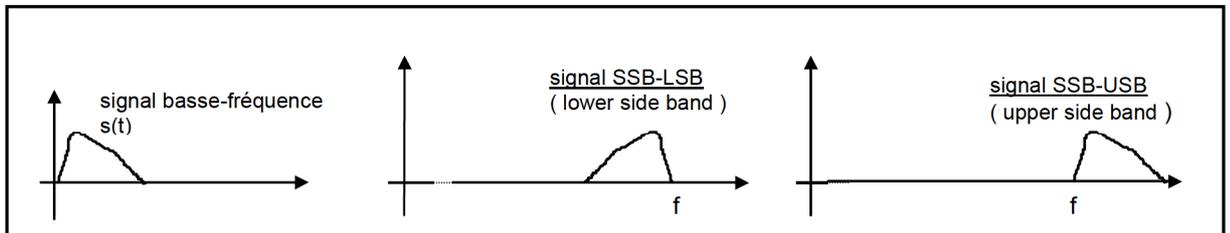


Ce type de modulation est aussi appelé **AM-BLD** (bande latérale double) ou **AM-DSB** (dual side band).

Ce signal AM-DSB est produit à l'aide d'un multiplieur et se démodule par détection synchrone. Cependant, vu que la porteuse n'est pas transmise, il n'est plus possible d'extraire un signal synchrone et la démodulation est plus délicate. Pour cela on transmet un peu de porteuse pour faciliter la démodulation. Mais, à part l'application dans le codage stéréophonique, ce type de modulation est très peu utilisé pour les transmission et on préfère passer directement à la modulation en bande latérale unique.

La modulation **BLU** (bande latérale unique ou SSB : single side band) est beaucoup plus délicate à produire, et l'allure temporelle difficile à représenter dans le cas général. Par contre le spectre d'un signal BLU est constitué par l'une des deux bandes latérales du signal AM classique :

Figure 31.
Signal modulé en
AM-BLU



Ce type de modulation permet d'avoir une portée intéressante avec une puissance émise nettement plus faible qu'en AM classique et est donc très utilisée dans les équipements portables.

8) Application au codage stéréophonique des émissions FM

Pour obtenir un effet stéréophonique, il faut transmettre simultanément deux signaux

- le canal droit D capté par le microphone placé du côté droit
- le canal gauche G capté par le microphone placé du côté gauche

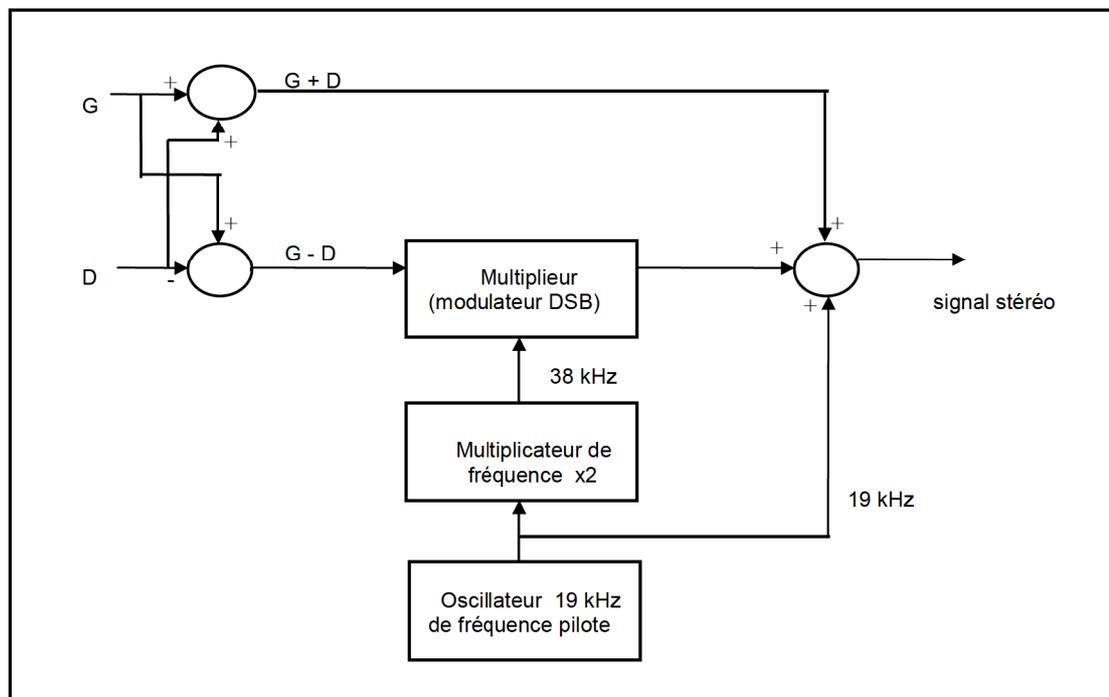
A l'émission, ces deux signaux D et G sont combinés par le codeur stéréo qui fournit un signal basse-fréquence composite stéréo $s(t)$ qui va moduler la porteuse de l'émetteur (en modulation de fréquence en l'occurrence).

A la réception, ces deux voies devront à nouveau être séparées pour être envoyées sur les haut-parleurs droit et gauche.

Ce codage stéréophonique doit évidemment rester compatible avec un récepteur monophonique qui doit reproduire sur son haut-parleur unique la totalité du message , soit le signal $D + G$.

Le codeur stéréophonique a la structure suivante :

Figure 32.
Structure du
codeur
stéréophonique

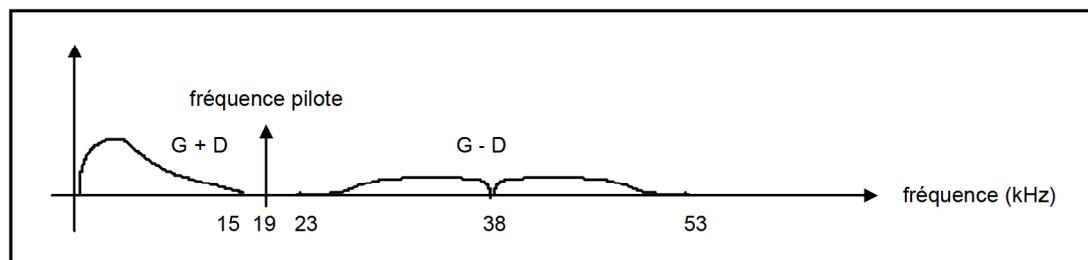


Ce signal codé « stéréo » peut maintenant servir de signal modulant pour l'émetteur qui peut être un émetteur AM ou FM.

Ce type de codage est utilisé en France dans la bande FM pour la radiodiffusion commerciale .

Sachant que le signal issu des deux microphones est limité en fréquence à 15 kHz, le spectre du signal codé stéréo a l'allure suivante :

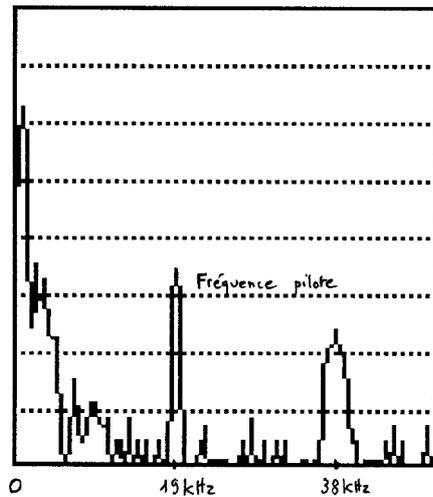
Figure 33.
Spectre du
signal codé
stéréophonique



A la réception, on retrouve ce signal composite en sortie du démodulateur.

Voici l'allure réelle d'un signal codé stéréo enregistré à la sortie du démodulateur d'un récepteur en modulation de fréquence :

Figure 34.
Spectre réel
d'un signal
stéréophonique

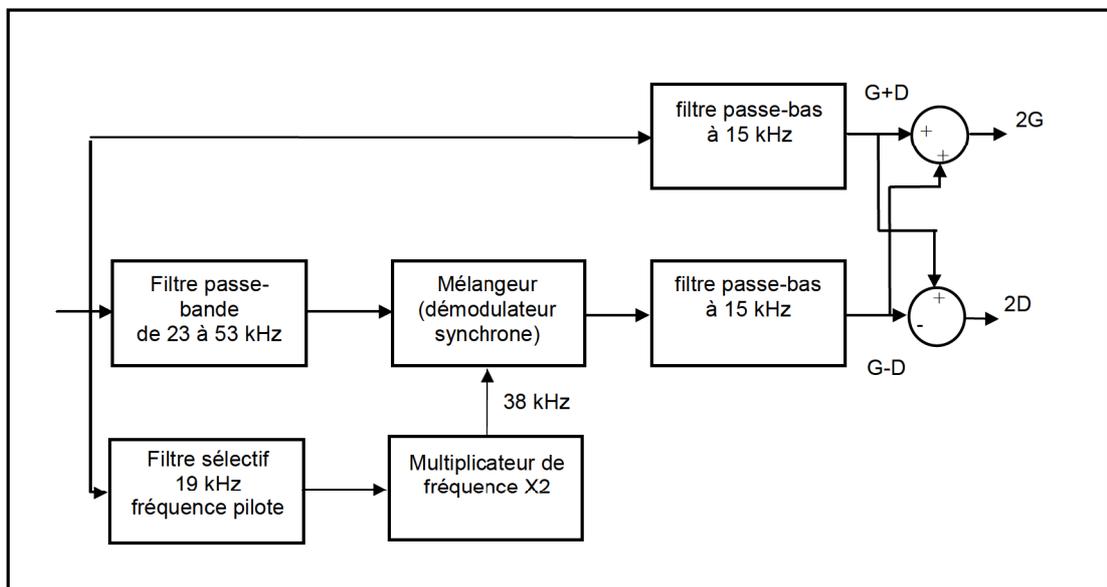


L'information G + D est récupérée par un simple filtre passe-bas. C'est ce signal complet qui est envoyé sur le haut-parleur dans un récepteur monophonique.

Lorsque le décodeur stéréophonique détecte la présence de la fréquence pilote à 19 kHz, il allume le voyant « stéréo » et procède à la démodulation synchrone du signal DSB à 38 kHz.

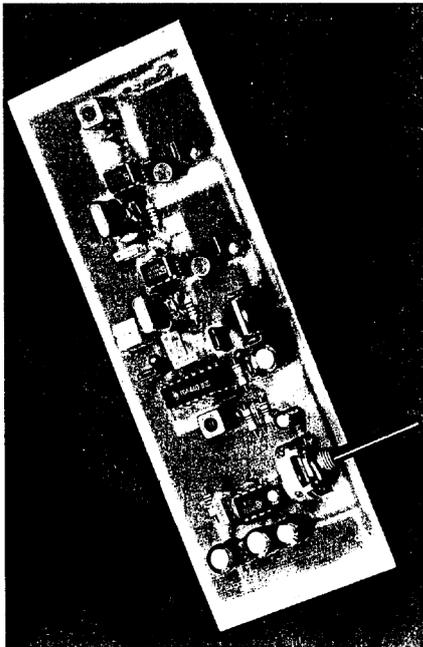
La structure du décodeur est la suivante :

Figure 35.
Structure du
décodeur
stéréophonique

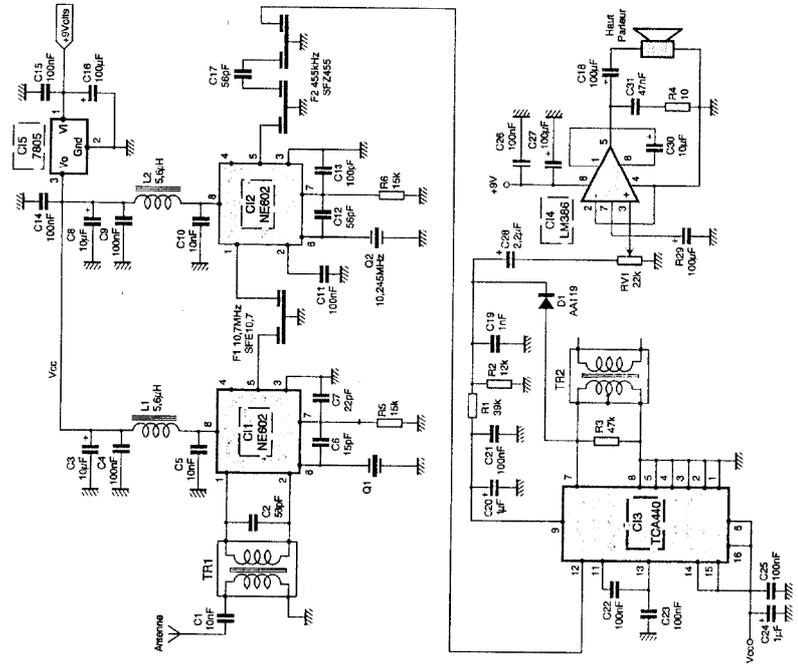


Annexe E - exemple de récepteur AM-CB canal 19

RECEPTEUR CANAL 19 (27,185 MHz)



- NE 602 : oscillateur + mélangeur
- TCA 440 : ampli. f.
- LN 386 : ampli. BF
- TR 1 : transformateur accordé sur 27,185 MHz
- TR 2 : " " " " 4 455 kHz



Exercices d'application

1) Soit le signal AM : $e(t) = 5(1 + 0,7\cos(10^3t)) \cos(10^6t)$.

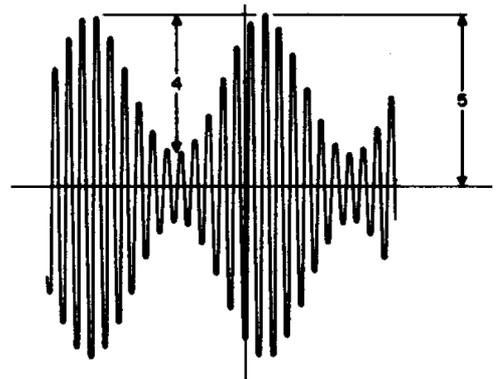
Déterminer la fréquence de la porteuse, la fréquence modulante et l'indice de modulation m .

2) Un signal AM a une fréquence de porteuse de 100 kHz, une fréquence modulante de 4 kHz et une puissance d'émission de 150 kW.

Le signal reçu par le récepteur a l'allure suivante :

Déterminer :

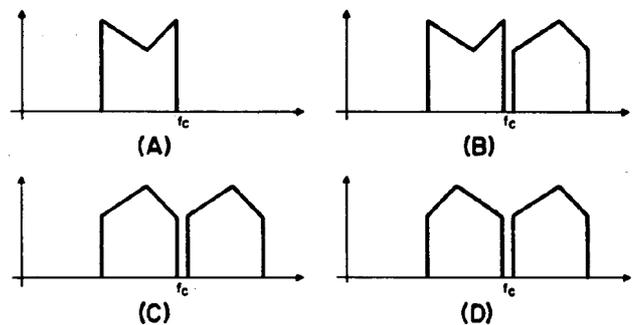
- les fréquences contenues dans ce signal
- la bande de fréquence occupée
- l'indice de modulation
- la puissance de la porteuse
- la puissance d'une bande latérale



3) Le spectre d'un signal BF modulant une porteuse f_c en bande latérale double est donné ci-dessous. Quel sera le spectre du signal modulé ?



spectre du signal BF



4) Un récepteur à double changement de fréquence reçoit une émission à 50 MHz. Les deux valeurs de f_1 et f_2 sont 10,7 MHz et 455 kHz.

Dessiner la structure de ce récepteur et préciser les valeurs des deux oscillateurs f_{o1} et f_{o2} , ainsi que les caractéristiques des deux filtres f_i .

Calculer la valeur de la fréquence image de l'émetteur reçu et conclure quant à l'intérêt de cette structure.