



Chapitre 4 : Les récepteurs

par Pierre Cornélis, ON7PC rue J. Ballings, 88 1140 Bruxelles

Certes, l'émetteur et le récepteur sont 2 éléments fondamentaux dans une station radioamateur. Pour des raisons de simplification et d'économie, ces deux appareils sont souvent regroupés en un seul que l'on appelle un transceiver. La plupart des radioamateurs utilisent des transceivers, mais pour les besoins de ce cours nous aborderons séparément les émetteurs et les récepteurs.

Nous analyserons principalement l'émetteur et le récepteur ou le transceiver dans le cadre du radio amateurisme mais parfois on en parlera dans un cadre plus général de la radiodiffusion.

Nous essayerons de développer les exemples concrets sur ce qui nous intéresse directement : les transceivers décimétrique avec les modulations CW et SSB et les transceivers VHF (ou UHF) en modulation de fréquence (NBFM).

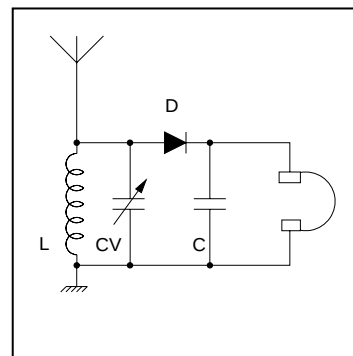
4.1. Types de récepteurs

4.1.1. Récepteurs directs

Lorsque Marconi fit ses expériences "radio", il utilisa un récepteur avec un détecteur que l'on appelait alors le cohéreur de Branly.

Le récepteur à galène est une variante de ce premier récepteur, et il comporte un circuit d'accord, un détecteur (une galène) et un casque pour écouter le signal.

Dans un dessin un peu plus moderne, on aurait le circuit ci-contre : L'accord sur la fréquence à recevoir se fait grâce à la self L et au condensateur CV. La détection se fait par la diode D et C supprime la HF.

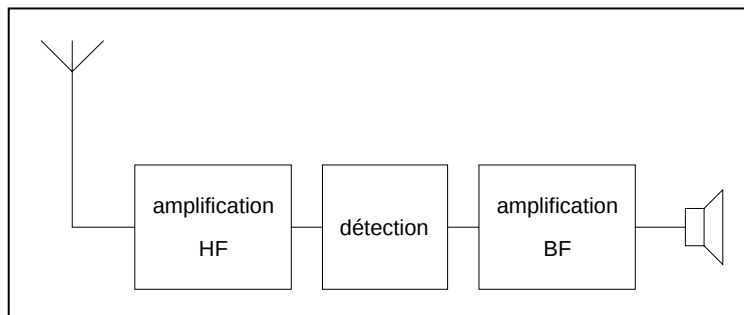


Ce type de récepteur est encore appelé **récepteur direct**.

Il ne reçoit que les stations proches, et il y a beaucoup de distorsion lorsque le signal est élevé. Il sera toutefois utilisé pendant quelques dizaines d'années, pour la réception des signaux AM (A3E).

Ces récepteurs vont disparaître avec l'apparition des tubes où l'amplification HF¹ va permettre d'améliorer sa sensibilité et la sélectivité, tandis que l'amplification BF va permettre d'écouter les émissions sur un haut parleur.

Le schéma bloc d'un tel récepteur direct avec ses étages d'amplification est repris ci-contre.



¹ A l'époque on faisait la distinction entre "basse fréquence" pour désigner tout le spectre audio et "haute fréquence" pour désigner tout le reste !

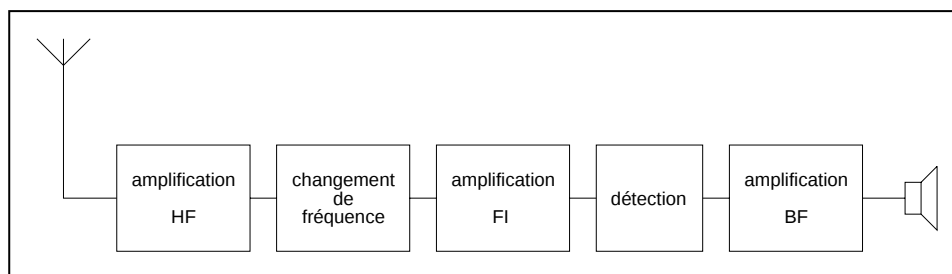


4.1.2. Récepteurs superhétérodynes

Dans un récepteur direct, chaque étage HF doit être accordé, ce qui constitue déjà un handicap au niveau de la manipulation. Il en résulte aussi que la caractéristique globale du récepteur est fonction de l'endroit où on se trouve (début, milieu ou fin de bande). Le problème devient encore plus marqué lorsqu'on veut utiliser plusieurs bandes de fréquence (les OL, les OM et peut être les OC).

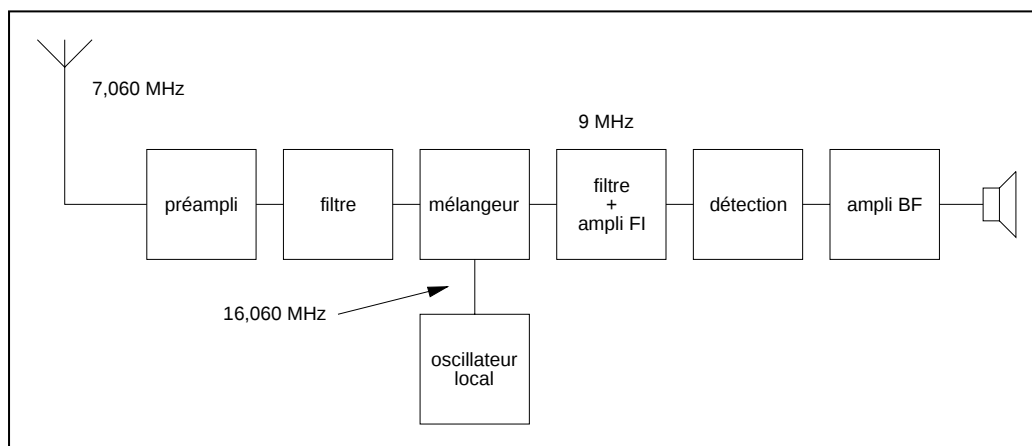
De plus la bande passante (donc la sélectivité) est variée d'un bout à l'autre de la bande à recevoir.

Il est alors venu l'idée de construire une chaîne d'amplification à fréquence unique et à convertir le signal d'entrée vers cette fréquence unique. C'est ainsi qu'est apparu le récepteur **superhétérodyne**.



Deux nouvelles fonctions apparaissent dans le schéma bloc : le **changement de fréquence** qui aura pour but de transformer le signal reçu à une fréquence f_r en une autre fréquence appelée fréquence intermédiaire^{2 3} et notée FI, et, l'**amplification à fréquence intermédiaire**.

Le changement de fréquence lui-même nécessite deux fonctions distinctes : le mélangeur et l'oscillateur local. Le schéma bloc d'un récepteur pour radioamateur (bande 40 m) ressemble donc à la figure ci-dessous



L'amplificateur à fréquence intermédiaire va fournir la plus grosse partie du gain de la chaîne de réception, c'est lui aussi qui va limiter le spectre de fréquence de sorte que le détecteur ne voie que le signal à recevoir.

² On a aussi utilisé le terme "moyenne fréquence", puisqu'elle se situait entre la haute fréquence et la basse fréquence, mais le terme fréquence intermédiaire est plus correct, car parfois la fréquence intermédiaire peut être supérieure à la fréquence du signal à recevoir.

³ En anglais Intermediate Frequency ou IF.



La valeur de cette fréquence intermédiaire dépend de plusieurs critères, et les valeurs fréquemment rencontrées sont les suivantes :

- les récepteurs de radiodiffusion AM ont souvent une fréquence intermédiaire de 455 kHz,
- pour la FM, la FI est de 10,7 MHz,
- pour la TV, la FI est à 38,9 MHz pour l'image et 33,4 MHz pour le son,
- pour les radioamateurs les FI des récepteurs décimétriques sont aux environs de 8 ou 9 MHz,
- pour la bande 144 à 146 MHz, la FI est généralement de 10,7 MHz
- pour la bande 430 à 440 MHz, la FI est généralement de 21,6 MHz

La chaîne d'amplification à FI, est suivie d'un détecteur, puis d'un amplificateur audio qui donne au signal le niveau et la puissance nécessaire pour attaquer le haut parleur.

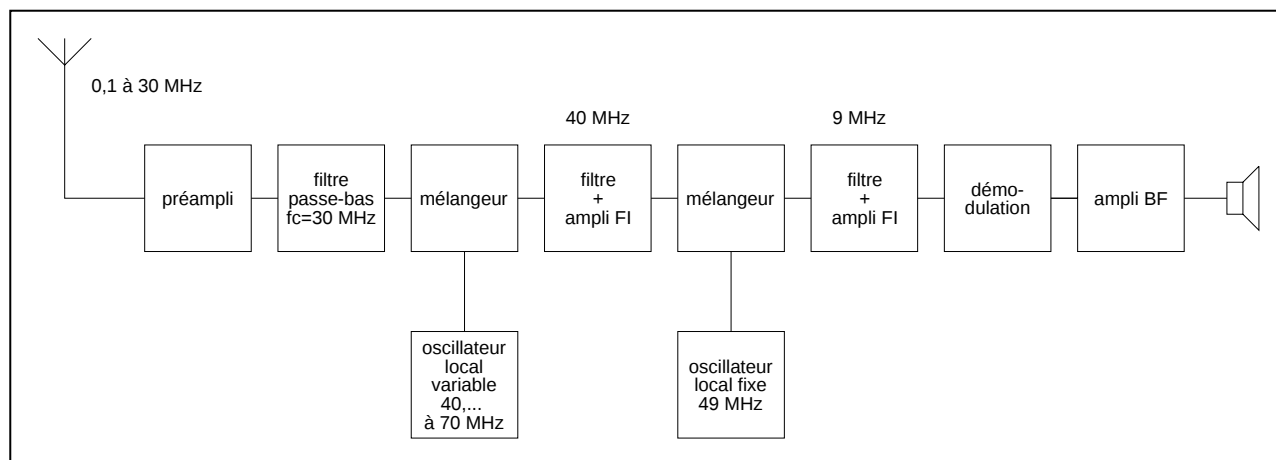
Devant cette chaîne à fréquence intermédiaire on devra procéder au changement de fréquence. Ceci s'effectue à l'aide d'un mélangeur qui reçoit d'une part

- le signal d'antenne filtré et éventuellement amplifié, et d'autre part,
- le signal de l'oscillateur local.

Nous aurons l'occasion de revenir sur chacun de ces éléments plus tard, contentons-nous d'abord de les identifier dans le schéma bloc ci-dessus.

Si on veut réaliser un récepteur avec un grand gain, il apparaît rapidement un problème d'accrochage. Dans ce cas on préfère réaliser deux changements de fréquence consécutifs, on parle alors de récepteurs à double changement de fréquence. On aura donc 2 changements de fréquences en cascade.

Dans le cas d'un récepteur décimétrique, par exemple :

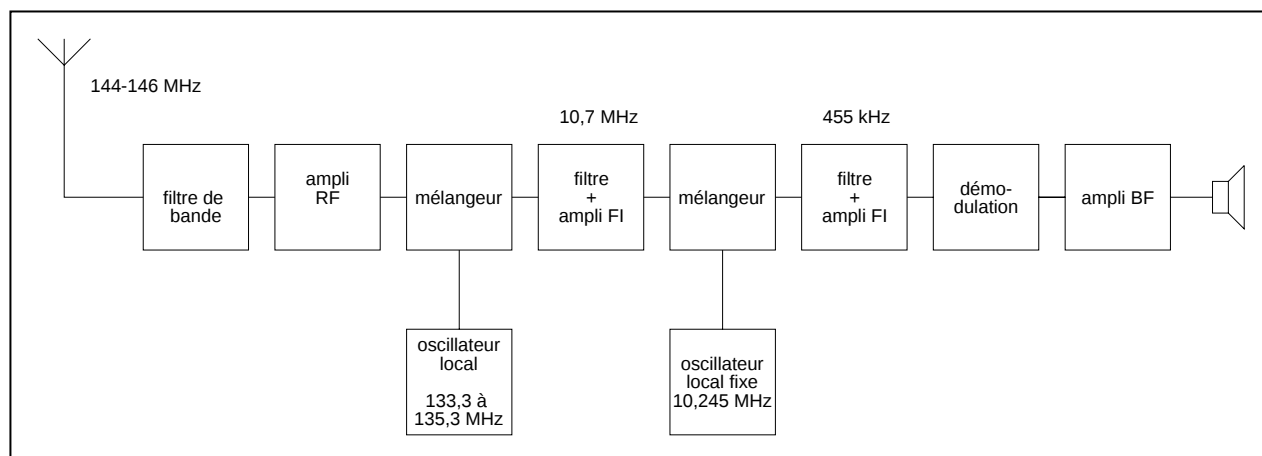


La 1ère FI est à 40 MHz, donc si nous voulons couvrir 0,1 à 30 MHz, l'oscillateur local devra être accordé entre 40,1 et 70 MHz. La 2ème FI étant à 9 MHz, le deuxième oscillateur local sera fixe et sur 49 MHz.

Notons que nous parlons ici de démodulation, qui est un terme plus générique applicable à plusieurs modes de modulation (AM, CW, SSB, FM, ...) alors que la détection ne s'applique qu'à l'AM.



Dans le cas d'un récepteur VHF par exemple :



La 1^{ere} FI est à 10,7 MHz, donc si nous voulons couvrir 144 à 146 MHz, l'oscillateur local devra être accordé entre 133,3 MHz et 135,3 MHz.

La 2^{eme} FI étant à 455 kHz, le deuxième oscillateur local sera fixe et sur $10,7 - 0,455$ soit 10,245 MHz.



4.1.3. Particularités des récepteurs superhétérodynes

Nous allons maintenant préciser quelques peu le choix de la fréquence intermédiaire :

4.1.3.1. Fréquence de l'oscillateur local

L'oscillateur local doit toujours osciller à une fréquence égale à

$$f_{OL} = f_r - FI \quad \text{ou} \quad f_{OL} = f_r + FI$$

suivant le cas, on parle d'

- **infradyne** si $f_{OL} = f_r - FI$
- **supradyne** si $f_{OL} = f_r + FI$

4.1.3.2. Fréquence image et choix de la fréquence de l'oscillateur local

Soit f_r la fréquence à recevoir et f_{FI} la valeur de la fréquence intermédiaire, donc l'oscillateur local devra osciller sur une fréquence

$$f_{OL} = f_{FI} + f_r$$

Dans ces conditions si un signal non désiré à une fréquence $f'_r = f_r + 2 f_{FI}$, il donnera par battement :

$$f'_r - f_{OL} = (f_r + 2 f_{FI}) - (f_{FI} + f_r) = f_{FI}$$

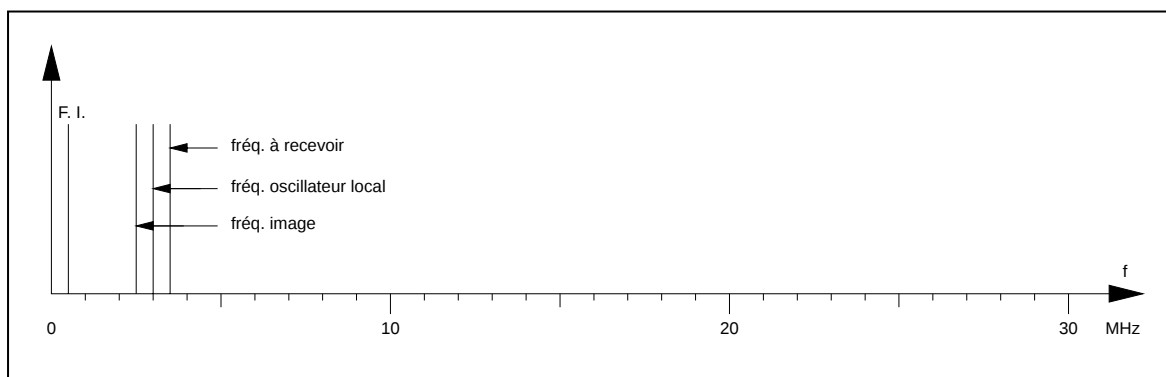
le signal f'_r est appelé "**fréquence image**" et produira aussi un signal dans la partie fréquence intermédiaire du récepteur. La fréquence image est donc un signal perturbateur, c'est probablement l'inconvénient majeur du récepteur superhétérodyne et il conviendra de l'éliminer avant qu'il n'atteigne le mélangeur.

La relation générale de la fréquence image est:

fréquence image

$$f_{\text{image}} = f_{RF} \pm 2 FI$$

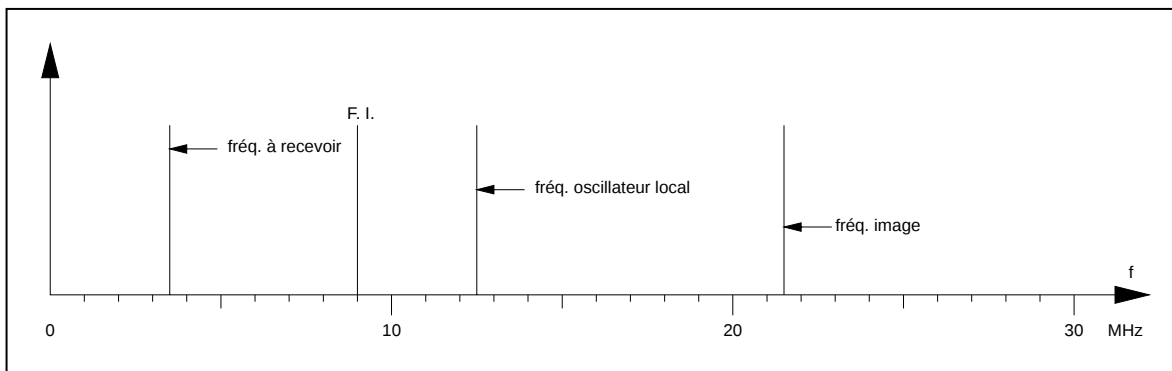
Soit par exemple à recevoir un signal sur 3,5 MHz. Une première hypothèse est de prendre une FI assez basse, disons 500 kHz⁴, la fréquence de l'oscillateur local sera alors de 3 MHz et la fréquence image sera de 2,5 MHz. représentons nos fréquences sur un axe de 0 à 30 MHz :



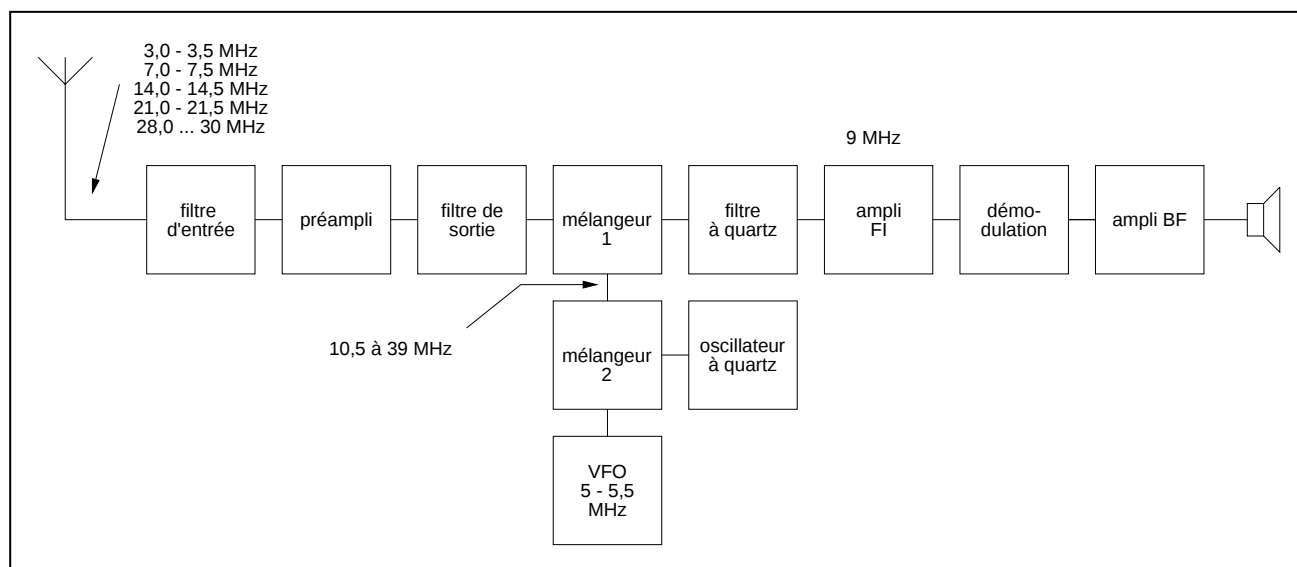
⁴ Nous pourrions être tenté de prendre 500 kHz à l'image des FI à 455 kHz que l'on rencontre dans les récepteurs OL, OM.



Maintenant choisissons une FI assez élevée disons 9 MHz, dans ce cas, la fréquence de l'oscillateur local sera alors de 12,5 MHz et la fréquence image sera de 21,5 MHz. C'est une très bonne solution car la fréquence image est très écartée des autres raies et elle sera facile de l'éliminer.



Pour un récepteur décimétrique, il conviendrait de faire la même étude particulière pour chacune des bandes, et ceci conduirait aux fréquences intermédiaires standardisées. Si on considère un récepteur construit pour recevoir des segments de 0,5 MHz (3 à 3,5 MHz , 7 à 7,5 MHz , 14 à 14,5 MHz, etc ...) on arrive alors au schéma classique⁵ suivant :



On trouve dans ce schéma :

- un ampli sélectif pré amplifie le signal reçu, pour chaque bande on doit commuter l'entrée et la sortie de cet ampli,
- un mélangeur qui reçoit un signal compris entre 10,5 (pour la bande 3 à 3,5 MHz) à 39 MHz (pour la bande 29,5 à 30 MHz),
- un filtre à quartz centré sur 9 MHz
- un ampli FI, également à 9 MHz, le système de démodulation propre au mode de modulation (CW, AM ou SSB)
- l'amplificateur BF et le haut parleur.

⁵ C'est le schéma des FT101, FT901, TS520, TS820, ... très populaires depuis 1970 jusque vers 1990.

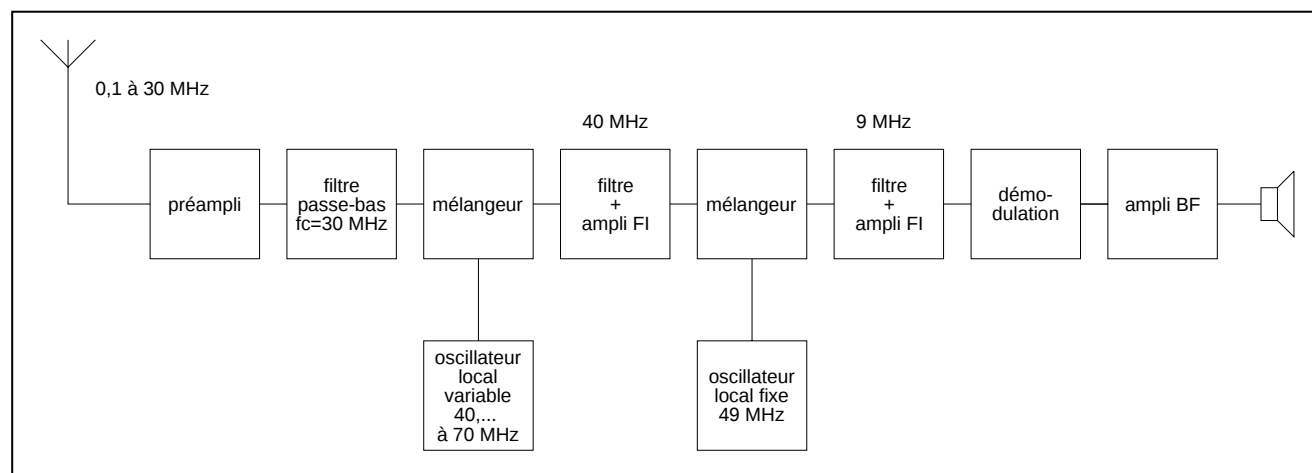


Le signal de l'oscillateur local est également issu d'un mélange, celui

- de la fréquence variable d'un VFO, qui permettra de choisir la fréquence et
- la fréquence d'un oscillateur fixe à quartz qui dépendra de la bande choisie

L'étage de présélection fournira ici la réjection image requise. Cependant plus la fréquence d'entrée sera élevée, plus il sera difficile d'obtenir une réjection satisfaisante et d'autre part, il sera plus difficile de réaliser un oscillateur local sur une fréquence proche de la fréquence à recevoir, à cause du phénomène d'entraînement ("pulling").

Si la fréquence intermédiaire est importante, il deviendra plus difficile d'obtenir une bonne sélectivité, c'est une raison supplémentaire pour recourir au double changement de fréquence : la première fréquence intermédiaire peut être supérieure à la fréquence maximale à recevoir et la fréquence image sera alors simplement rejetée à l'aide d'un filtre passe-bas. Le signal à fréquence intermédiaire sera alors amplifié, et filtré au moyen d'un filtre à quartz dont la bande passante est "moyenne" (disons 10 kHz) et ce signal subira un deuxième changement de fréquence vers une fréquence intermédiaire (par exemple 9 MHz) où on pourra effectuer la sélection de la bande passante requise. Soit le schéma que nous avons déjà vu et qui est repris pour tous les récepteurs actuels dit avec "general coverage" ⁶.



Dans ce qui a été présenté ci-dessus, l'élimination de la fréquence image est obtenu en filtrant cette fréquence image au niveau de l'entrée, mais un autre concept est également possible. Imaginons un récepteur que l'on veuille recevoir entre 500 kHz ($f_{\min}$) et 1500 kHz ($f_{\max}$). Pour que la fréquence image ne nous gêne pas, il faut qu'elle soit plus haute que $f_{\max}$, donc $f_{\max} : f_r = f_{\min} + 2 FI > f_{\max}$ soit encore $FI > (f_{\max} - f_{\min}) / 2$

Exemples:

en radiodiffusion OM : 530 à 1620 kHz $\rightarrow FI > (1620 - 530) / 2 = 545$ kHz

en radiodiffusion FM : 87,5 à 108 MHz $\rightarrow FI > (108 - 87,5) / 2 = 10,25$ MHz, elle est normalisée à 10,7 MHz

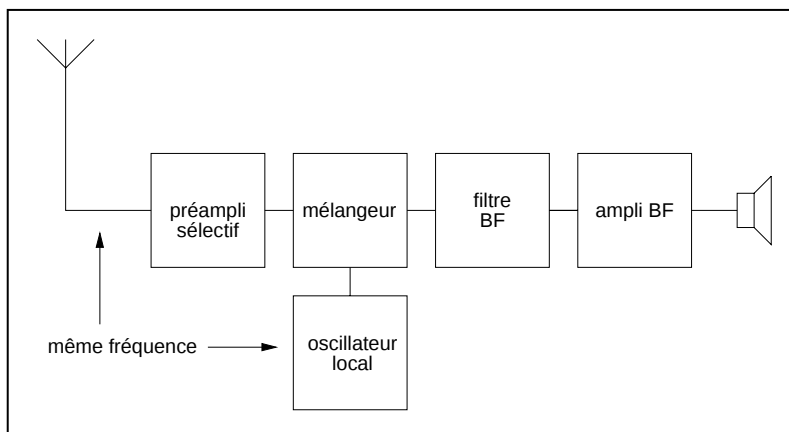
⁶ On désigne par "general coverage" un récepteur allant, de façon continue, de 100 kHz à 30 MHz.



4.1.4. Récepteur à conversion directe

Lorsque la fréquence de l'oscillateur local est égale à la fréquence à recevoir, le récepteur superhétérodyne devient un récepteur à conversion directe ou **homodyne**. Dans ce cas il n'y a plus de fréquence intermédiaire, mais la sortie du mélangeur est tout simplement le signal audio.

Le filtrage est alors effectué au niveau du signal audio.





4.2. Schémas blocs de récepteurs

En expliquant la façon dont les récepteurs superhétérodynes étaient mis en œuvre pour la réception des émissions radioamateurs nous avons déjà partiellement entrevu le sujet. Abordons donc ici les spécificités propres à chaque mode de modulation.

4.2.1. Récepteur AM (A3E)

Ce qui sera particulier au récepteur AM c'est

- sa bande passante en FI qui est de 6 kHz pour la radiotéléphonie, de façon à pouvoir transmettre un signal audio de 300 à 3000 Hz., mais cette bande passante est de 9 kHz pour la radiodiffusion AM.
- l'étonnante simplicité de son démodulateur : une diode et deux condensateurs (voir § ?????).

4.2.2. Récepteur CW (A1A)

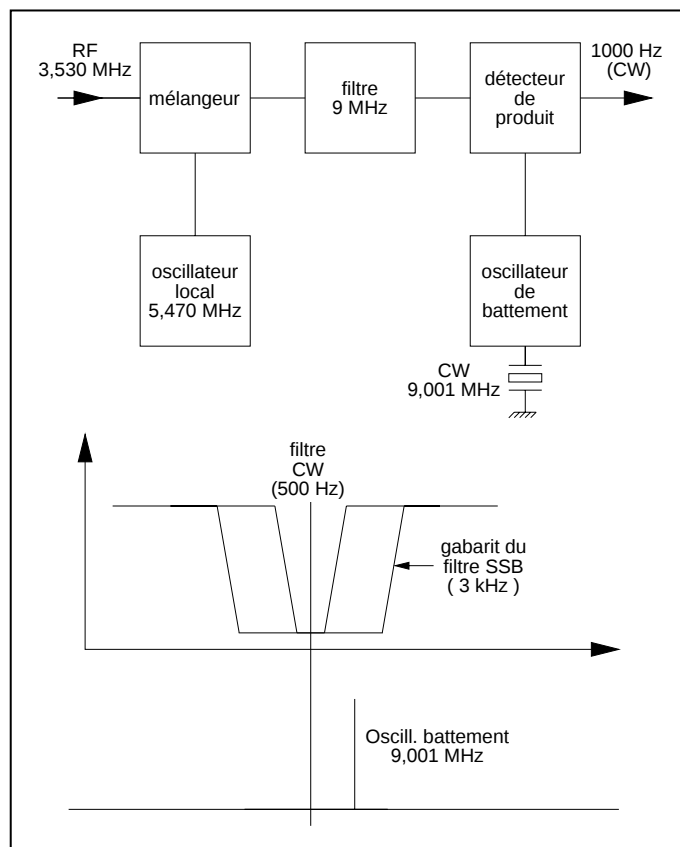
Soit donc une station émettant sur 3,530 MHz en télégraphie (A1A).

Imaginons que le note que l'on veut décoder soit du 1000 Hz⁷. Si au niveau filtre FI, notre signal est exactement sur 9 MHz, il faudra alors faire le battement entre 9 MHz et 9,001 MHz pour obtenir très exactement du 1000 Hz ! Donc l'oscillateur de battement sera sur 9,001MHz⁸. Le mélangeur s'appelle ici détecteur de produit, son fonctionnement est tout à fait similaire à un autre mélangeur.

Pour que notre signal à 3,530 MHz soit transformé en 9 MHz, il faut que l'oscillateur local soit sur $9,0000 - 3,530 = 5,470$ MHz.

Le filtre à 9 MHz peut être le filtre utilisé pour la SSB, toutefois il est préférable d'utiliser un filtre FI plus étroit, avec une largeur de 500 Hz par exemple.

Nous avons volontairement simplifié notre schéma, nous n'avons pas parlé, ni représenté, la préamplification sélective qui précède, ni de l'amplification audio qui suivait.



⁷ Les télégraphistes préfèrent une "note" plus basse se situant entre 400 et 800 Hz, mais pour simplifier quelque peu les calculs nous dirons que cette note est à 1000 Hz.

⁸ Notez que cela fonctionne aussi avec 8,999 MHz !



4.2.2. Récepteur BLU (SSB) pour la téléphonie avec porteuse supprimée (J3E)

Une première solution : Imaginons donc que le signal à recevoir aille de 3,697 à 3,700 MHz. Le problème de la BLU (SSB) est qu'il faut faire battre le signal avec un oscillateur de battement pour restituer le signal d'origine. On fait donc appel à un oscillateur de battement.

Imaginons que notre oscillateur de battement fonctionne sur 9 MHz.

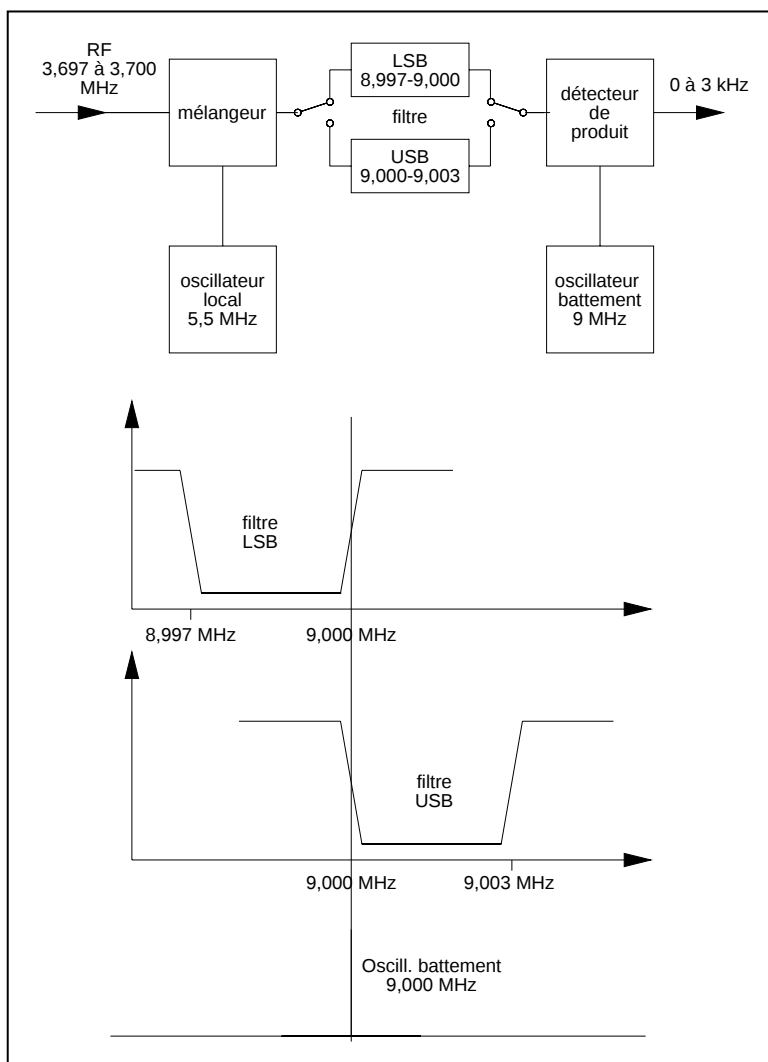
Comme on veut recueillir un signal audio entre 0 et 3000 Hz, il faut donc que notre signal FI soit

- entre 8,997 MHz et 9,000 MHz si on veut recevoir une des bandes latérales, et qu'il soit
- entre 9,000 à 9,003 MHz pour recevoir l'autre bande latérale.

Il faudrait donc 2 filtres FI. Sachant qu'un filtre à quartz est relativement onéreux, on a recherché une autre solution.

Remarquons que notre oscillateur local est à $9,000 - 3,700 = 5,300$ MHz.

Comme pour le récepteur CW, nous avons simplifié notre schéma, nous n'avons pas parlé, ni représenté, la pré amplification sélective qui précède, ni de l'amplification audio qui suivait.



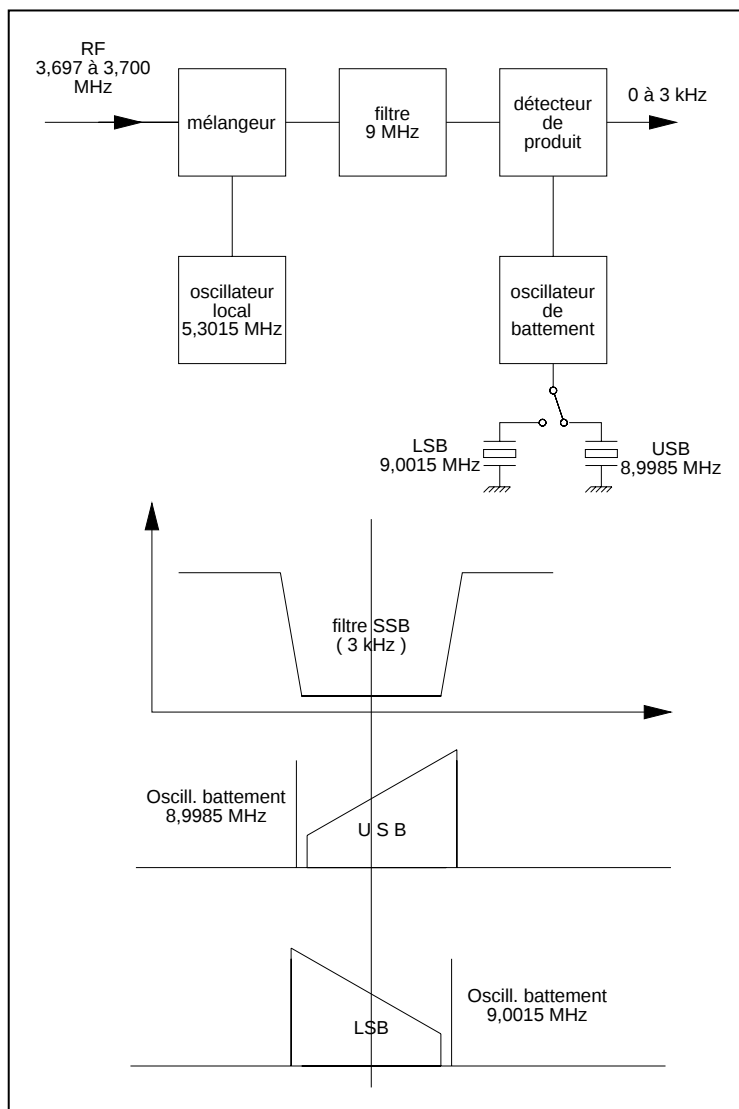


La deuxième solution est beaucoup plus intéressante et c'est celle qui est mise en œuvre en pratique :

Le filtre FI est le même pour les 2 types de réception (bande latérale supérieure ou bande latérale inférieure), et il a une bande passante de 8,9985 à 9,0015 (9 MHz + 1,5 kHz et 9 MHz – 1,5 kHz) et c'est l'oscillateur de battement qui va être commuté entre deux valeurs

- 9,0015 MHz pour la bande latérale inférieure, et
- 8,9985 MHz pour la bande latérale supérieure.

Mais on peut faire mieux ... on peut aussi prévoir la réception de signaux télégraphique, il suffira d'adjoindre un troisième quartz à l'oscillateur de battement pour obtenir de 1000 Hz, en d'autre terme cet oscillateur sera sur le centre de bande c-à-d 9,000 MHz + 1 kHz ou – 1 kHz.





Etant donné que le niveau de réception peut varier considérablement d'une station à une autre et que ce niveau peut aussi varier en fonction de la propagation, le récepteur BLU est équipé d'une boucle de réglage automatique du gain qui limite le gain lorsque le signal est fort et qui l'augmente au fur et à mesure que le niveau diminue.

On mesure donc en permanence le niveau de sortie, et on fabrique une tension continue qui va agir sur les étages d'entrée, c'est la boucle de contrôle automatique du gain ou CAG⁹.

La tension de CAG constitue par ailleurs une "image" de la force des signaux. C'est la tension de CAG qui va également servir d'indication du niveau reçu donc de S-mètre.



4.2.4. Récepteur FM (F3E)

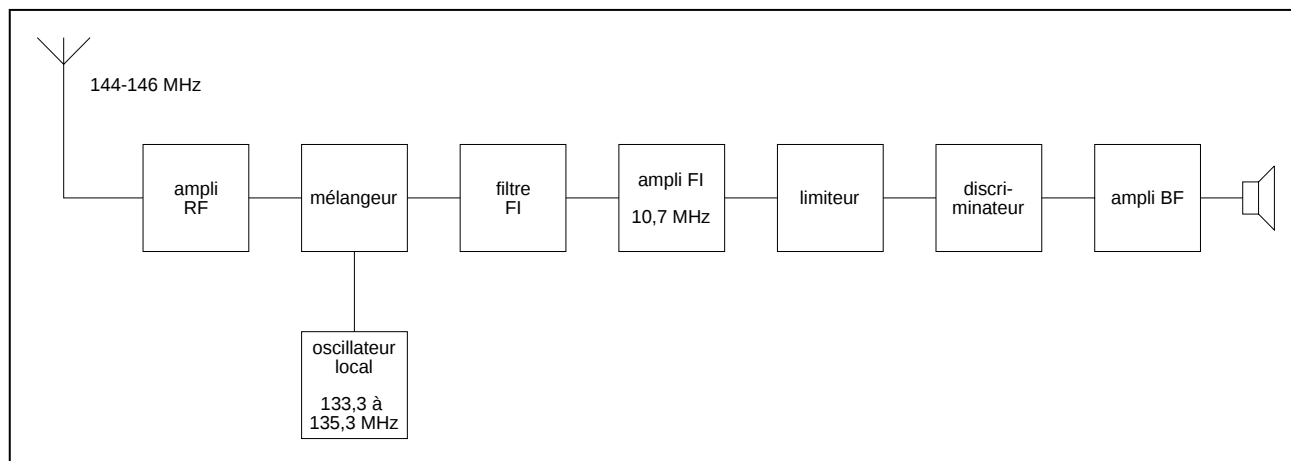
On retrouve dans un récepteur FM, les mêmes fonctions (donc les mêmes blocs) que dans un récepteur AM ou SSB, le démodulateur va être particulier à la FM.

Mais dans la cas de la FM, la largeur de bande des circuits à FI est plus importante. En fait cette largeur de bande dépend de l'excursion,

- par le passé on utilisait des excursions pouvant atteindre ??? kHz et de ce fait la largeur de filtre était fixée à 25-30 kHz
- actuellement avec des excursions de ??? kHz, on utilise plutôt des filtres à 12 kHz.

Dans le cas de la FM on parle souvent de **discriminateur** pour cette fonction. Mais les discriminateurs sont sensibles à l'amplitude, il faudra donc leur fournir un signal d'amplitude rigoureusement constante d'où le rôle du **limiteur**.

⁹ En anglais Automatic Gain Control ou AGC.



4.2.5. Une autre façon d'entendre les choses ...

Nous avons déjà vu quelques schémas bloc ci avant.

Il reste à préciser qu'il y a essentiellement deux éléments caractérisent les récepteurs selon le type de modulation qu'ils doivent recevoir :

- la largeur du filtre dans l'étage à FI,
- le type de démodulateur

	largeur de bande en FI	type de démodulateur
récepteur CW	quelques centaines de Hertz	par battement
récepteur AM (A3E)	9 à 10 kHz	une simple diode suffit
récepteur BLU (J3E)	3 kHz	par battement
récepteur NBFM (F3E)	12 à 25 kHz	un discriminateur de fréquence
récepteur FM broadcast (F3E)	100 à 300 kHz	un discriminateur de fréquence

Qu'arrive t'il si on n'utilise pas le bon récepteur ? Il est évident que si le type de récepteur correspond avec le type de modulation, on peut indiquer "OK", mais voici le tableau complet :

	avec modulation CW	avec mod. AM	avec mod. BLU	avec mod. NBFM	avec mod. FM broadcast
récepteur CW	OK				
récepteur AM	on ne détecte que l'enveloppe, on n'a pas de note de battement.	OK			
récepteur BLU (SSB)	on détecte un battement, mais la largeur de bande est trop grande, on entend aussi les stations voisines		OK		
récepteur NBFM				OK	
récepteur FM broadcast					OK



4.3. Fonctionnement et rôle des différents étages

4.3.1. Amplificateur ou préamplificateur HF

Dans un récepteur, un amplificateur HF a pour but d'amplifier, c.-à-d. d'augmenter les petits signaux qui sont présents à l'antenne. Qu'entend-on par petits signaux ? Lorsque l'aiguille d'un récepteur indique S9¹⁰, c.-à-d. un signal important, alors, le signal a alors une amplitude de 50 μV environ. On peut donc dire qu'un petit signal a une amplitude de l'ordre de 0,5 μV ou peut-être moins.

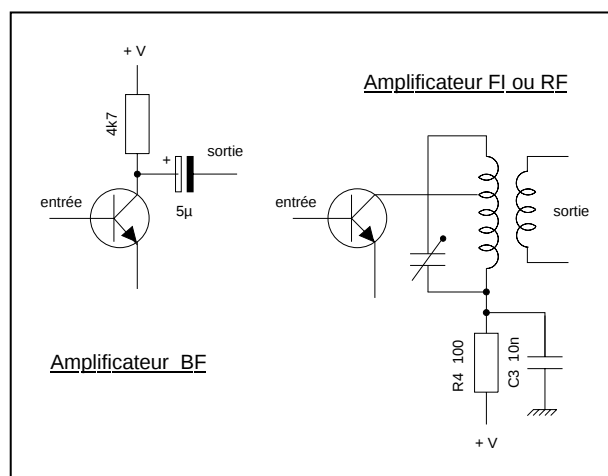
On parle de préamplificateur lorsque l'amplificateur est le premier étage d'amplification rencontré.

Lorsque le signal aura une amplitude suffisante, on va procéder au changement de fréquence pour obtenir une fréquence intermédiaire où la fréquence sera la même quel que soit la fréquence RF sélectionnée. A partir de cet instant on parlera d'amplificateur à FI (voir paragraphe 4.3.4).

Dans un ampli BF, la charge est toujours une résistance et le couplage se faisait par un condensateur.

Les capacités parasites des transistors sont de l'ordre de quelques dixièmes de pF à quelques pF. Or 10 pF à 10 kHz représente une impédance de 15,9 k Ω , on peut donc bien imaginer que ces capacités parasites (et inévitable) vont rapidement limiter la fréquence d'utilisation d'un amplificateur.

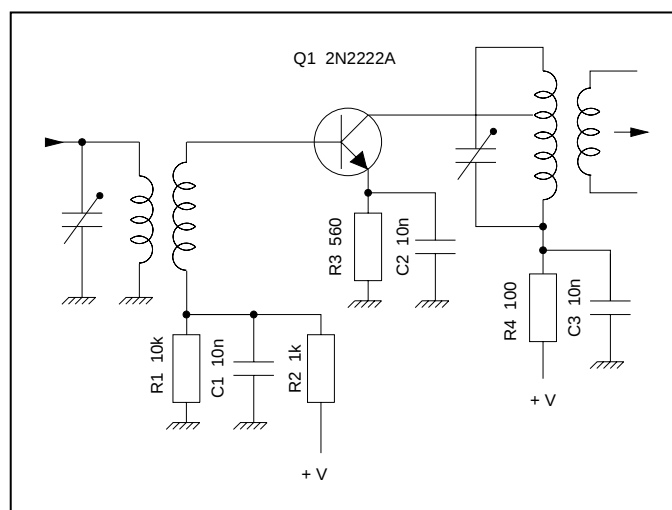
Comme notre but est d'amplifier des signaux RF (Radio Fréquence) dont la fréquence est supérieure à 100 kHz. Dans ce cas on préfère utiliser des circuits LC accordés ou des circuits couplés.



4.3.1.1. Ampli HF à transistor bipolaire

La figure ci contre montre un amplificateur FI avec un transistor bipolaire.

L'avantage du montage EC est que son impédance d'entrée est relativement grande. Il n'amorti donc pas très fort le circuit d'entrée. Toutefois la fréquence de coupure n'est pas très élevée et on lui préfère souvent le montage BC qui possède une impédance d'entrée plus faible mais une fréquence de coupure beaucoup plus élevée.

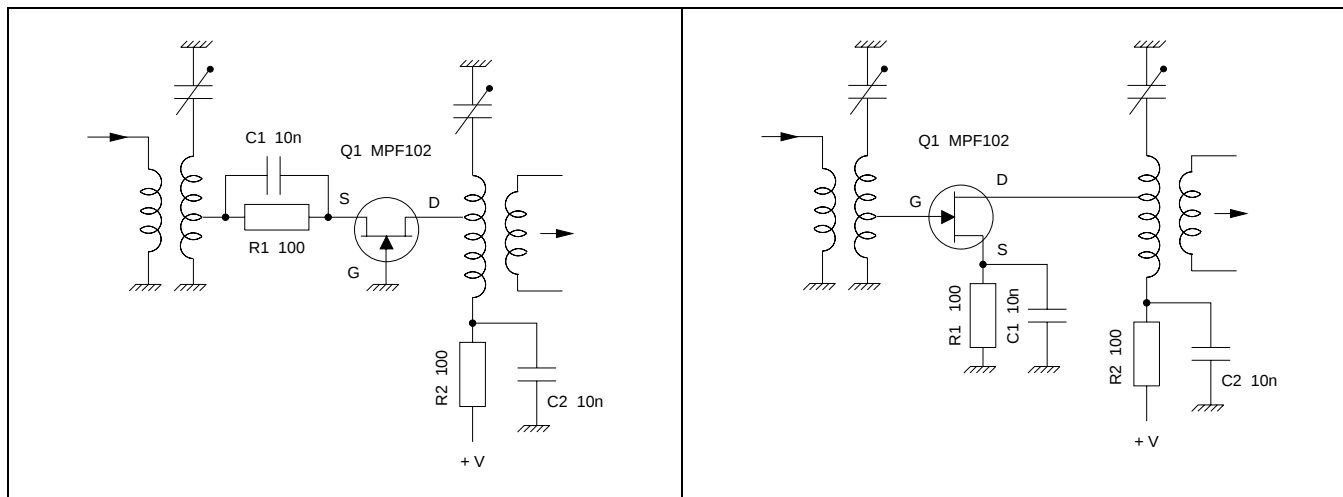


¹⁰ Voir plus loin.



4.3.1.2. Ampli HF à transistor FET

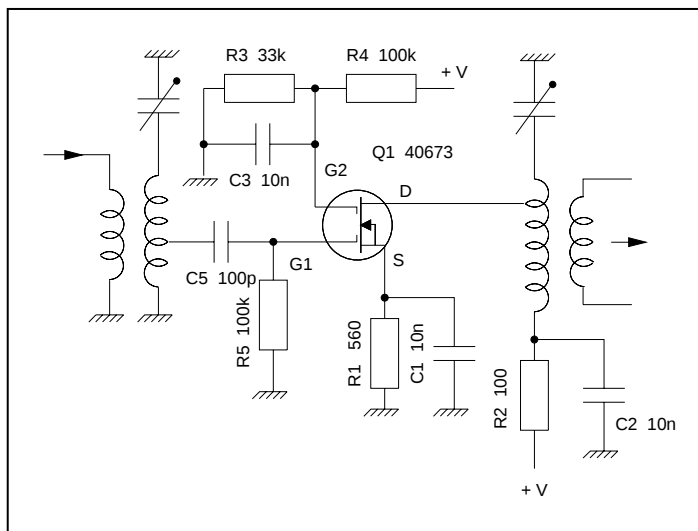
Les deux figures suivantes montrent des amplificateurs FI avec des transistors FET, le premier est en grille commune, le second en source commune.



4.3.1.3. Ampli HF à transistor MOSFET

Le montage suivant fait appel à un MOSFET. Grâce au pont diviseur (R3, R4) on peut choisir le gain.

Mais au lieu d'avoir un pont diviseur, on pourrait aussi avoir un gain variable à l'aide d'un potentiomètre ou réaliser un montage dont le gain est variable en fonction d'une tension. C'est le concept du contrôle automatique du gain CAG qui sera vu plus loin.





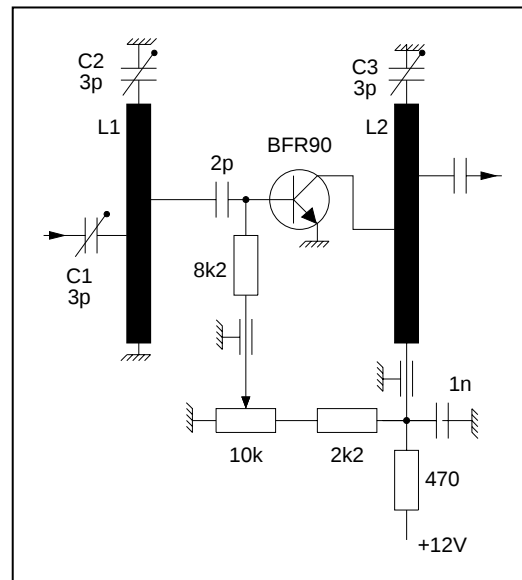
4.3.1.4. Utilisation de lignes quart d'ondes ou de strip-lines

Pour des fréquences de 200 MHz ou plus, on préfère souvent utiliser des circuits accordés sous forme de ligne quart d'onde. En fait la ligne est un peu plus petite qu'un quart d'onde et on la met en résonance à l'aide d'un condensateur variable ou d'une varicap.

Ci-contre un schéma type pour 1296 MHz. Les lignes ont une dimension de 10 x 29 mm et une épaisseur de 1 mm. les points d'attaque sont à 12,5 mm à partir du côté froid.

Dans ce montage on peut régler la polarisation du transistor au moyen d'un potentiomètre. Le but est d'obtenir le facteur de bruit le plus faible.

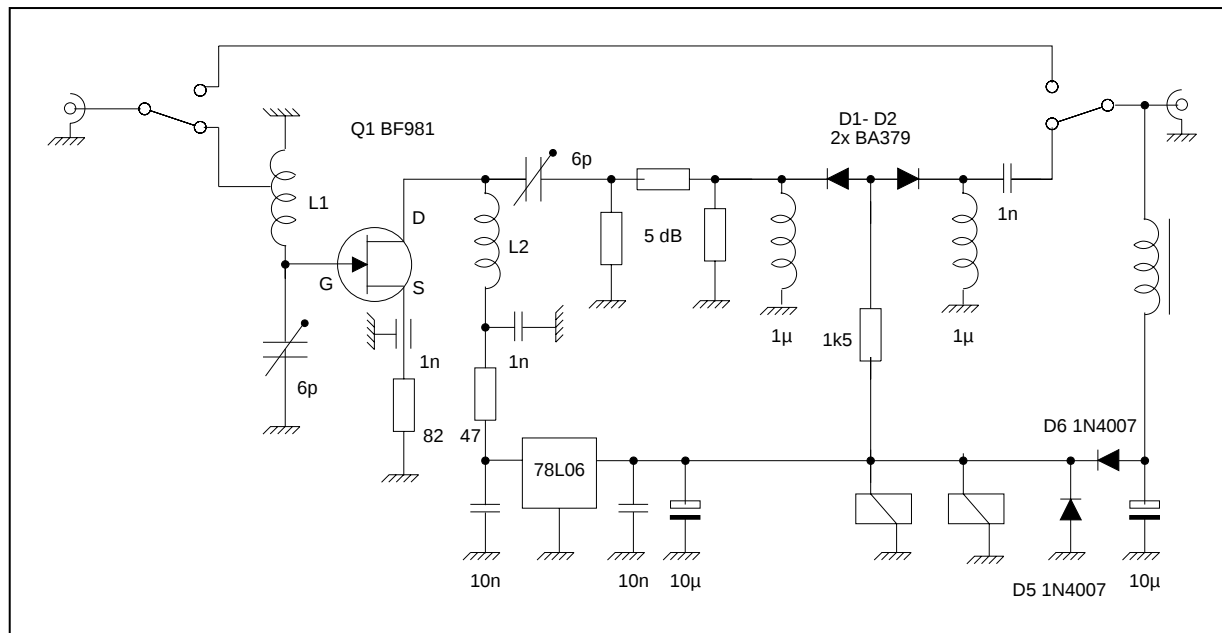
Mais il est encore plus facile d'utiliser des strip-lines c.-à-d. des lignes réalisées sur un circuit imprimé ordinaire ou sur un circuit imprimé téflon. Le circuit imprimé ordinaire convient jusqu'aux environ d'un GHz, au-delà le circuit imprimé téflon s'impose.



4.3.1.5. Les préamplificateurs d'antennes

Pour éviter les pertes dans les câbles coaxiaux et surtout pour éviter de détériorer le rapport signal/bruit (voir ????) on fait parfois appel à des préamplificateurs d'antennes. Il s'agit de préamplificateurs à très faible bruit montés dans un boîtier et placé près de l'antenne. L'alimentation en courant continu se fait par le câble et un système de relais permet de by-passer le préampli lorsqu'on est en émission.

Ci-dessous un ampli pour la bande 145 MHz, dont le gain est de 17 dB et un NF de 0,6 dB.



L'alimentation se fait par le câble coaxial lui-même.

L'entrée et la sortie de l'ampli sont accordées (L1 et 6 pF et L2 et 6 pF). L'atténuateur de 5 dB a pour but d'assurer une bonne adaptation de sortie et d'éviter les oscillations. La diode D6 protège des inversions de



tension. La diode D5 protège contre la pointe de tension négative à l'enclenchement (inductance des bobines des relais) et D1 et D2 protègent également la tension positive d'apparaître au déclenchement (suppression de 13,5 V sur le câble coaxial).

4.3.1.6. Remarques sur la réalisation pratique

Il est important de découpler correctement la tension d'alimentation et l'émetteur. Les condensateurs de découplage seront du type céramique et il faut éviter d'avoir des valeurs trop importantes pour ne pas introduire des selfs parasites. Ainsi,

- de 1 MHz à 10 MHz une valeur de 10 nF est amplement suffisante
- de 10 MHz à 100 MHz une valeur de 1 nF est amplement suffisante
- de 100 MHz à 1 GHz une valeur de 100 pF est amplement suffisante

Ces valeurs ne sont pas contraignantes, ce sont simplement des "ordres de grandeurs".

Il est important aussi de rassembler les points de masses le plus près possible les uns des autres et si possible de ne faire qu'un seul point de masse.



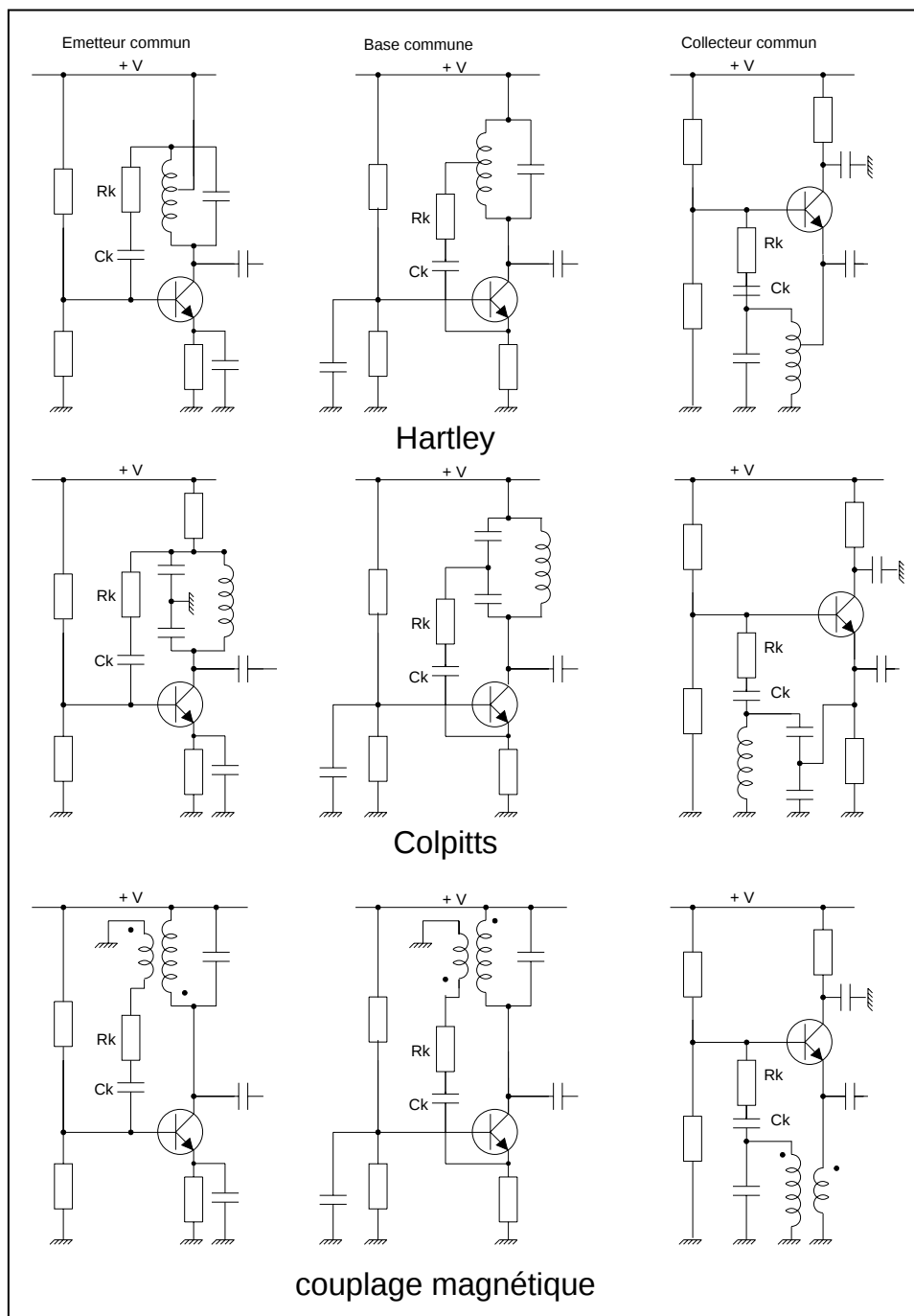
4.3.2. Oscillateurs fixe et variable

4.3.2.1. Les montages fondamentaux

Avec

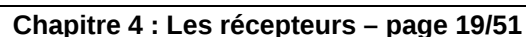
- les 3 types d'oscillateurs : Colpitts, Hartley et couplage magnétique (encore appelé Armstrong ou Messner)
- et les 3 montages EC, BC et CC

on obtient 9 types montages d'oscillateurs :





Pour simplifier on peut simplement retenir¹¹ la figure ci-contre :



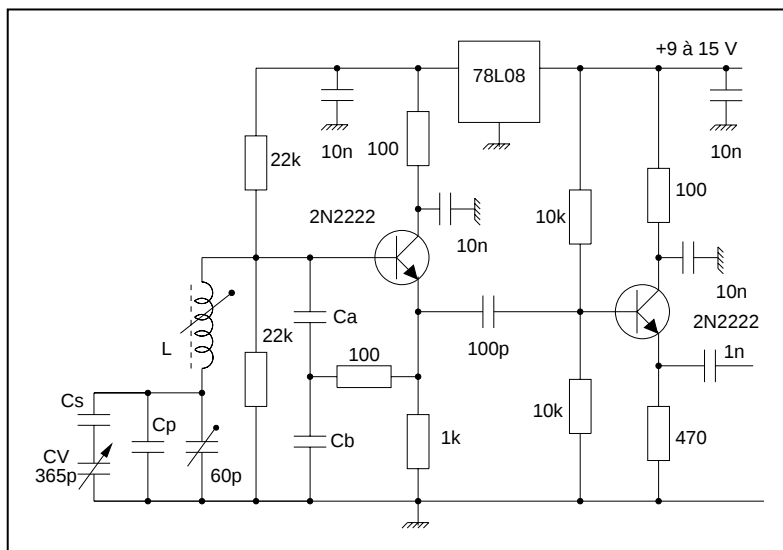


4.3.2.5. Un schéma pratique

Voici un schéma pratique d'un oscillateur pour les bandes amateur. Il s'agit d'un oscillateur Clapp suivi d'un étage tampon. Le condensateur variable est de 365 pF.

Afin de limiter la plage de réglage de fréquence on utilise un condensateur série C_s (qui déterminera essentiellement la fréquence basse) et un condensateur parallèle C_p (qui déterminera essentiellement la fréquence haute).

La self L est réalisée sur un mandrin de 6 mm et elle possède un noyau ajustable.



	L (spires)	Cs (pF)	Cp (pF)	Ca (pF)	Cb (pF)
160 m	50	330	270	1500	1000
80 m	36	100	100	1000	680
40 m	24	22	100	680	470
30 m	16	39	180	470	330
20 m	12	33	100	330	220
15 m					
10 m					

4.3.2.6. Oscillateurs à quartz

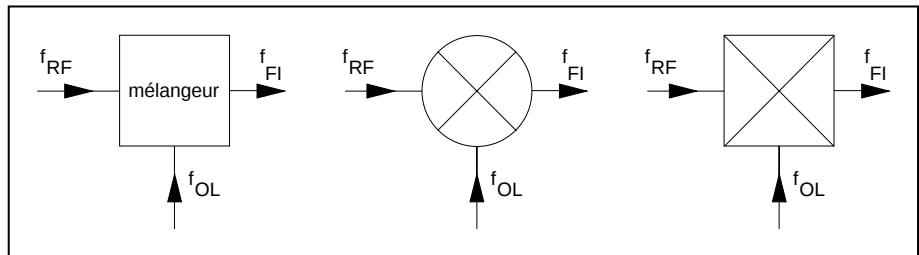


4.3.3. Les mélangeurs

4.3.3.1. Théorie

L'élément le plus important d'un récepteur superhétérodyne est certainement le mélangeur qui produit le changement de fréquence. Sans mélangeur pas de fréquence intermédiaire et donc pas de superhétérodyne.

Le mélangeur peut être représenté par un carré avec deux entrées et une sortie, mais il est aussi souvent représenté symboliquement par un rond avec une croix, deux entrées (signal et oscillateur local) et une sortie (fréquence intermédiaire) ou parfois aussi par un rectangle avec une croix.



Comme nous venons de le voir dans les schémas blocs des récepteurs superhétérodynes, l'un des procédés les plus couramment appliqués aux signaux HF est le changement de fréquence, il consiste à appliquer à un montage changeur de fréquence d'une part le signal original et d'autre part le signal de l'oscillateur local afin d'obtenir un signal à fréquence intermédiaire.

Nous avons d'une part un signal $a = A \sin \Omega t$ de fréquence F et un oscillateur local ("hétérodyne") $b = B \sin \omega t$ de fréquence f .

Dans le mélangeur (changeur de fréquence ou hétérodyne) on fait subir à l'amplitude B une modulation en lui imprimant les variations $A \sin \Omega t$ au rythme de la fréquence F , c'est à dire que l'amplitude du signal HF sera proportionnelle à l'amplitude du signal BF . L'amplitude deviendra donc $B + A \sin \Omega t$

L'onde aura donc pour expression mathématique

$$v = (B + A \sin \Omega t) \sin \omega t$$

et en développant il vient alors

$$v = B \sin \omega t + (A/2) \cos (\omega - \Omega)t - (A/2) \cos (\omega + \Omega)t$$

Le signal comporte 3 composantes:

- une composante continue,
- une raie à la fréquence d'entrée et une raie à la fréquence de l'oscillateur local
- les raies aux fréquences harmoniques
- une raie à une fréquence égale à la différence de fréquences $\cos (\omega - \Omega)t$ et une autre raie à la somme des fréquences $\cos (\omega + \Omega)t$.

La raie à la fréquence égale à la différence des fréquences est la raie souhaitée, il suffira donc d'éliminer les autres par un filtrage approprié. La raie à la fréquence égale à la somme des fréquences est appelée la fréquence image.



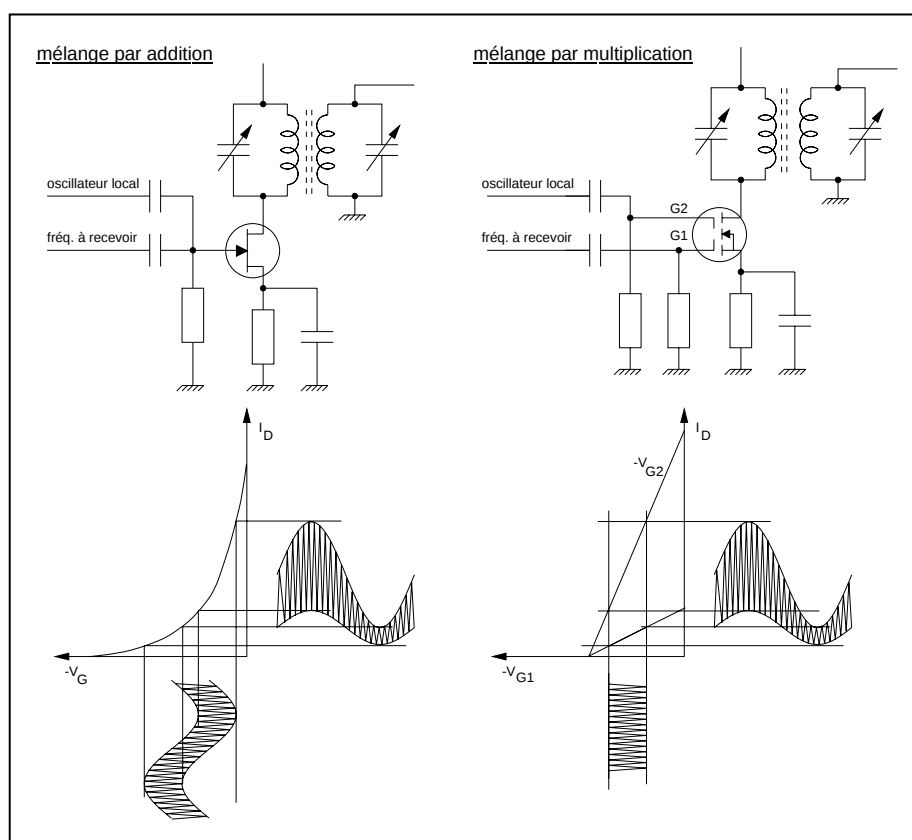
4.3.3.2. Mélangeurs à transistor MOSFET

La figure de gauche représente un mélangeur par addition. Les deux signaux sont directement mis ensemble et attaquent un élément non linéaire. C'est grâce à cette non linéarité qui peut s'exprimer sous

$$i = a u + b u^2 + c u^3 + \dots$$

que des produits en $\sin^2$, $\sin^3$, ... vont apparaître, ce qui finalement va conduire à des différences et des sommes de fréquences.

La figure de droite représente un mélangeur par multiplication. On applique les 2 signaux sur la G1 et la G2 d'un MOSFET à double grille. La caractéristique (la pente) va dépendre de U_{G2} et tout comme ci-dessus dans le signal de sortie apparaîtront des composantes de différences et des sommes de fréquences.

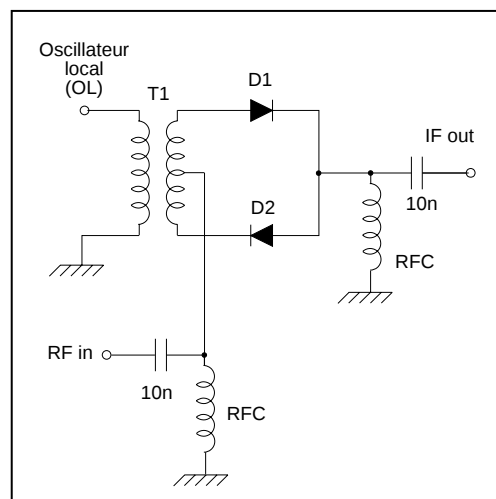




4.3.3.3. Le mélangeur symétrique

Le mélangeur symétrique et ses dérivés (modulateur en anneau, modulateur de produit permettent de supprimer la porteuse.

Le transfo T1 produit deux signaux en opposition de phase qui sont appliqués à D1 et D2. A la sortie apparaissent deux composantes aux fréquences somme et différence des fréquences.



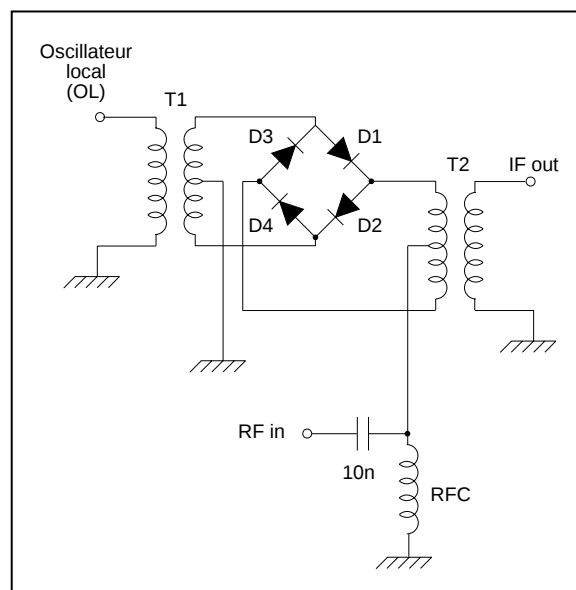
4.3.3.4. Le mélangeur symétrique double

En ajoutant deux diodes on obtient un modulateur en anneau encore appelé dual balanced mixer ou DBM ou ring-mixer .

Remarquez que l'anode d'une diode est reliée à la cathode de la suivante et ainsi de suite. Les diodes sont donc à la "queue-leu-leu", elles forment un anneau et cette configuration est totalement différente de celle du redresseur en pont !

Il est important que les quatre diodes aient les mêmes caractéristiques, on dit que les diodes doivent être paires. On peut prévoir dans le montage une compensation pour palier à cet inconvénient et grâce à cela on peut donc ajuster la réjection de la porteuse.

Mais les constructeurs peuvent aussi présenter sous forme d'un petit module les quatre diodes et les deux transformateurs. Ces DBM sont caractérisés essentiellement par la gamme de fréquence et par le niveau maximal de l'oscillateur local. Ces DBM sont extrêmement utilisés dans tous les montages VHF/UHF et SHF.



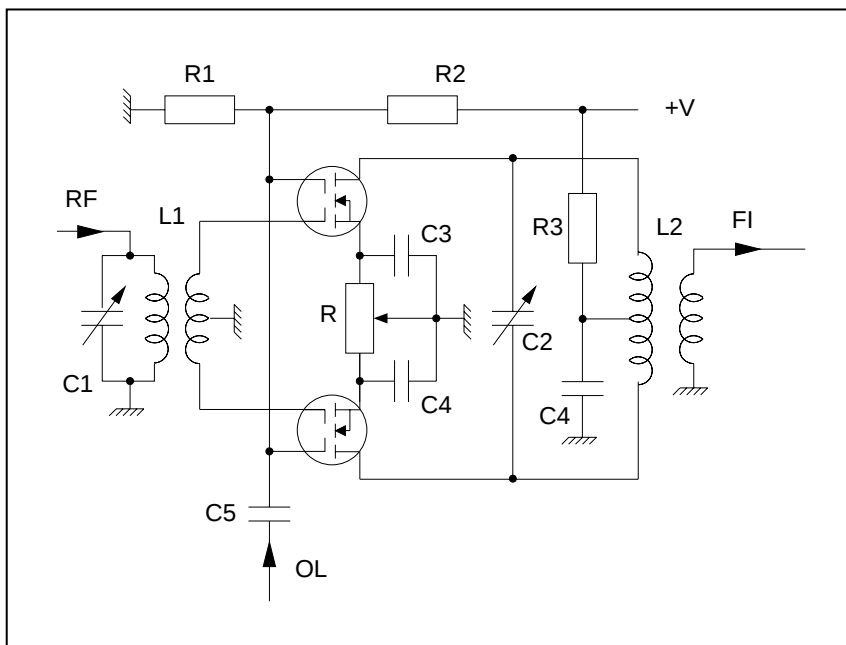
On distingue

- des DBM normaux avec une puissance d'oscillateur local de + 7 dBm,
- des DBM à haut niveau, qui requièrent une puissance d'oscillateur local de + 17 à + 23 dBm, ils permettent de diminuer les produits d'intermodulations dus aux forts signaux d'entrée.



On peut aussi réaliser un modulateur en anneau avec des transistors tel que représenté ci-contre. On obtient alors un certain gain appelé gain de conversion.

Mais ces transistors, ainsi que ceux servant à l'amplification FI peuvent aussi être intégrés dans des circuits intégrés tels que le TBA673, ou le très populaire SO42P.





4.3.4. Les amplificateurs de fréquence intermédiaires

Les étages amplificateurs à FI s'apparentent aussi aux ampli RF, mais ils sont accordés sur une fréquence bien spécifique, la fréquence intermédiaire ou FI.

Les niveaux que l'on rencontre ici sont sensiblement supérieurs à ceux des amplificateurs RF. L'entrée d'un amplificateur FI peut être de l'ordre de quelques μV , sa sortie de l'ordre d'une centaine de mV.

Un amplificateur à FI contribue ainsi en premier lieu à la sélectivité, c'est pourquoi on y trouve souvent un filtre. Ce filtre peut être un filtre LC, un filtre céramique, un filtre à ondes de surfaces ou un filtre à quartz.

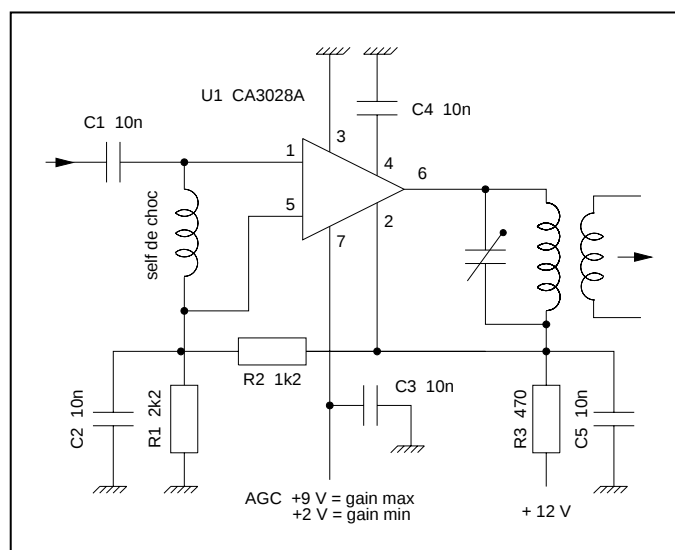
Mais le facteur d'amplification d'un amplificateur à FI dans un récepteur dépend aussi du niveau d'entrée. Un amplificateur FI est donc aussi un amplificateur dont on pourra faire varier le gain, ce gain est commandé par un circuit particulier appelé contrôle automatique de gain ou CAG (ou AGC pour Automatic Gain Control). Plus l'amplificateur FI comprend d'étages, plus grand sera la plage où on pourra ajuster le gain commandé par la tension de CAG. Au fait l'AGC est une tension détectée dans l'étage audio, et cette tension est proportionnelle à la force des signaux reçus.

Quelques valeurs de FI typiques :

FT-100	68,985 MHz	11,705 MHz	455 kHz (FM)
FT-736R	47,43 MHz (70 cm)	13,69 MHz	455 kHz
FT-1000 MP	70,455 MHz	8,215 MHz	455 kHz
TM-221	10,7 MHz	455 kHz	
TM-421	21,6 MHz	455 kHz	
TS-850S	73,05 MHz	8,83 MHz	455 kHz

4.3.4.1. Circuit intégré

Outre les transistors bipolaires, les transistors FET et les transistors MOS des montages présentés dans la section 4.3.1. On peut aussi faire appel à des circuits intégrés pour la réalisation d'amplificateur FI.





4.3.5. Les filtres à FI

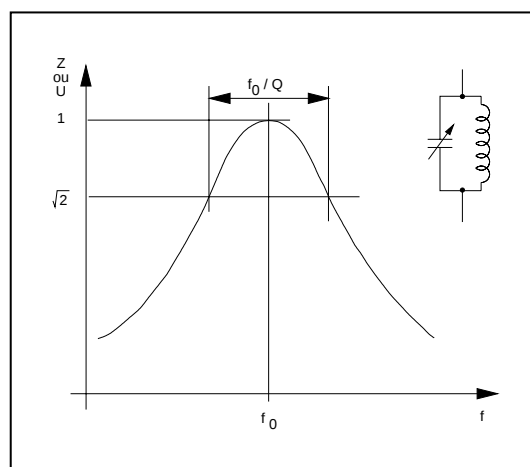
L'amplification à FI va déterminer la sélectivité, donc en quelque sorte la bande passante (HF) du récepteur. Dans cette fonction on fait appel à des filtres. La largeur du filtre FI est fonction du mode à recevoir. On peut distinguer

- les filtres discrets utilisant des circuits couplés, essentiellement utilisés pour la radiodiffusion en AM et en FM
- les filtres céramiques, utilisés dans les récepteurs pour la radiodiffusion en AM et en FM, mais aussi dans le domaine radioamateurs en VHF-UHF et tout particulièrement ceux en FM
- les filtres à quartz, utilisés essentiellement dans les récepteurs (transceiver) décimétrique
- les filtres mécaniques
- les filtres DSP

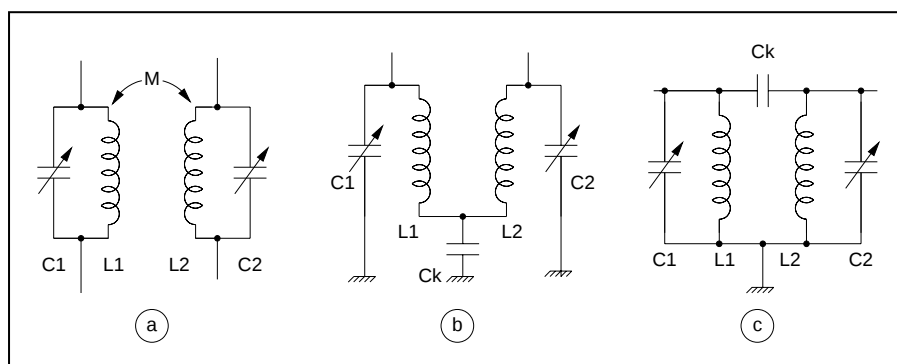
4.3.5.1. Filtre LC et circuits couplés¹²

La courbe de résonance d'un circuit LC est représentée ci-contre. Un tel circuit présente une certaine bande passante déterminée par le facteur de qualité : $B = f_0 / Q$.

Sachant que, pratiquement, le facteur Q se situe entre 50 et 300, un tel circuit, pour 9 MHz, aurait une bande passante entre 180 et 30 kHz, or dans un récepteur décimétrique (par exemple) on souhaite une bande passante de 3 kHz en SSB et 500 Hz en CW. De plus la raideur des flancs n'est pas très grande, mais si on a plusieurs étages, chacun avec un circuit accordé, la raideur des flancs va augmenter.



Par contre un circuit couplé présente l'avantage d'une bande passante qui est fonction du couplage entre les deux circuits accordés.

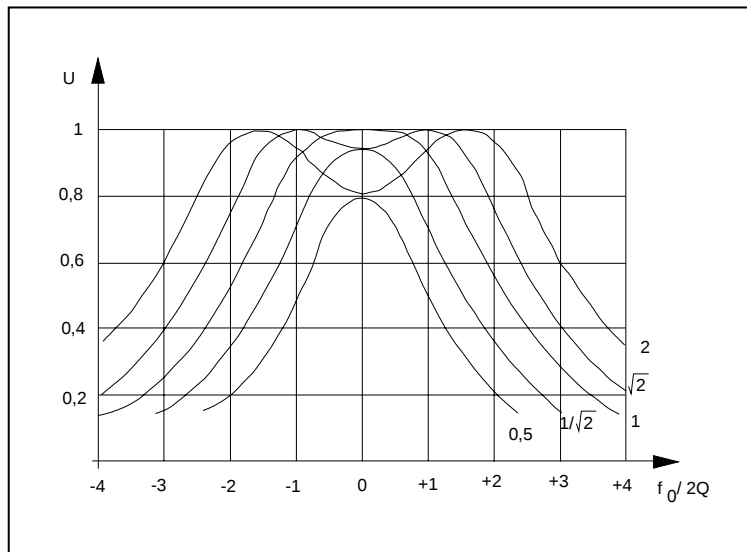


¹² Au fait on aurait déjà pu parler de ceci au § 4.3.1. Amplificateur et préamplificateur HF



Dans le cas du couplage magnétique (fig. a), les deux selfs des circuits oscillants sont proches l'une de l'autre et pour définir ce couplage, on définit un facteur kQ_0 .

- si $kQ_0 < 1$ on dit que le couplage est **lâche** ou que le circuit est sous couplé.
- si $kQ_0 > 1$ on dit que le couplage est **serré** ou que le circuit est sur couplé, et on voit apparaître 2 bosses dans la courbe de réponse, la distance entre les bosses (et donc la bande passante) a tendance à s'écarter lorsque kQ_0 augmente.
- si $kQ_0 = 1$ on dit qu'on a un couplage **critique**.



Le couplage peut être aussi être capacitif à la base.(fig. b) ou capacitif en tête (fig. c).

4.3.5.2. Filtres à quartz

On distingue

- les filtres monolithique où le filtre est réalisé sur un seul bloc de quartz, et,
- les filtres à composants discrets qui comportent plusieurs quartz avec éventuellement des selfs, des transfos et des condensateurs de couplage.

L'un et l'autre se présentent sous forme de boîtier métallique avec (au moins) 3 bornes (entrée, sortie et masse).

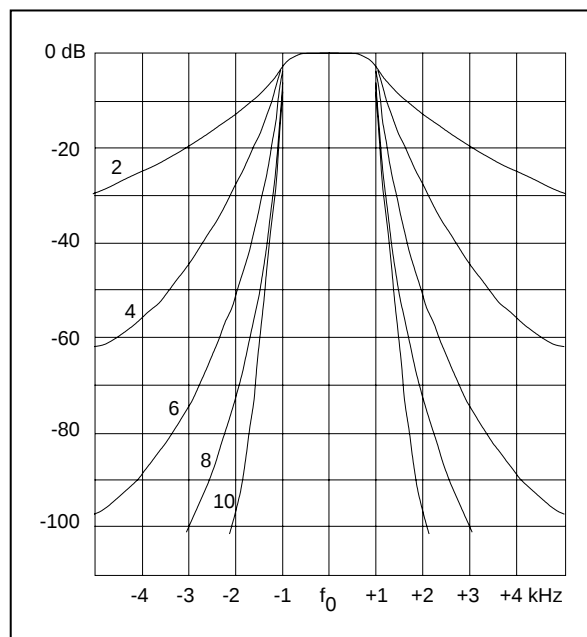
Les filtres sont caractérisés par leur bande passante à -6 dB, mais aussi par leur bande passante à -60 dB qui indiquera comment les signaux non désiré sont rejetés. Le rapport de ces deux bandes passantes est appelé **facteur de forme** ou shape factor, Un filtre parfait aurait donc un facteur de forme de 1 mais la plupart du temps ce facteur de forme se trouve aux environs de 1,5 à 3.

Exemple: La BP à -6 dB est de 2100 Hz, la BP à -60 dB est de 3100 Hz. Dans ce cas le facteur de forme est $3100/2100 = 1,47$



Un filtre à quartz est généralement composé de plusieurs quartz. La courbe de réponse d'un tel filtre répond à une équation mathématique caractérisée par des pôles et des zéros. Le nombre de "pôle" est égal au nombre de quartz. On parle ainsi de filtres à 2, 4, 6, 8 ou 10 pôles. Plus ce nombre est élevé, plus les flancs sont raides.

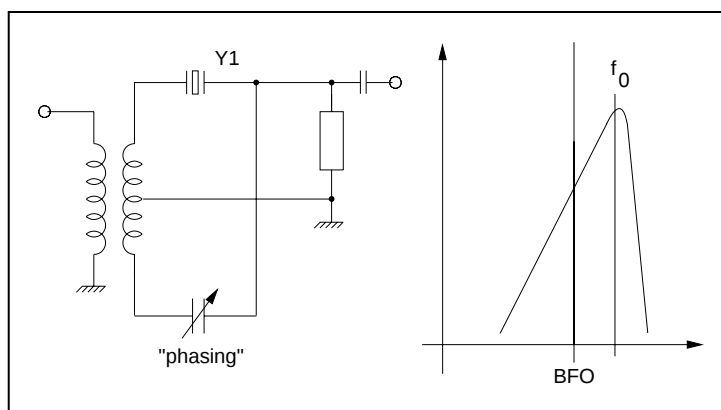
L'ondulation dans la partie "passante" de la courbe peut être plus marquée dans un filtre dont le nombre de pôles important. Cette déformation de la courbe de réponse dans la partie passante apporte une distorsion de l'audio appelée "ringing".



Dans la pratique:

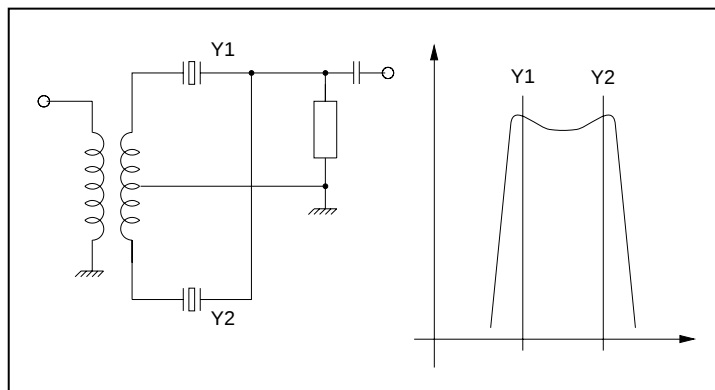
- tous les récepteurs décamétriques sont équipés d'un filtre SSB dont la largeur est de 2,1 à 2,7 kHz. Toutefois, pour le trafic dans des conditions difficiles, il est préconisé d'ajouter un filtre à 1,8 kHz ("SSB étroit").
- pour la CW il est recommandé d'utiliser un filtre dont la largeur est de 250 Hz, mais certains opérateurs préfèrent 125 Hz et d'autres 500 Hz.
- pour un récepteur FM (NBFM), la largeur de bande est de 12,5 kHz, mais dans les anciens équipements elle était de 20 à 25 kHz.
- en AM la largeur typique est de 6 kHz
- pour la radiodiffusion FM, la largeur est de 180 kHz

On peut réaliser un simple filtre à quartz pour la CW à l'aide du montage ci-contre. Le condensateur C1 (appelé "phasing") permet de faire varier la bande passante. La fréquence de l'oscillateur de battement BFO est placée légèrement en dessous de f_0 . Ce type de filtre permet une réjection de l'ordre de 30 dB du côté des fréquences élevées. La courbe de réponse est asymétrique.

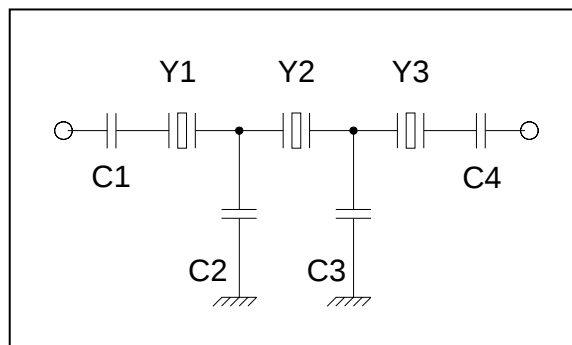




Le filtre FI ci-contre est symétrique, il conviendrait pour la SSB par exemple. Les fréquences de résonance propres des quartz Y1 et Y2, déterminent la bande passante. La BP à 3 dB est environ égale à $1,5 \times \text{l'écart } Y2-Y1$.



Enfin, on peut utiliser plusieurs quartz tels que dans le montage ci-contre, il faut alors choisir judicieusement les fréquences de chaque quartz et les capacités pour obtenir la courbe voulue.



4.3.5.3. Les filtres céramiques

Les filtres céramiques sont fort semblables aux filtres à quartz, toutefois les caractéristiques des filtres céramiques sont moins bonnes. On n'emploie donc les filtres céramiques que pour la NBFM ou pour la FM (radiodiffusion).

4.3.5.4. Les filtres (électro)mécaniques¹³

Une des caractéristiques de ce type de filtre est son grand facteur de qualité (Q). Il consiste en un transducteur d'entrée, un résonateur et un transducteur de sortie. Le résonateur est une pièce de métal qui a la forme d'une barre ou d'un disque. Les filtres mécaniques requièrent un condensateur d'accord extérieur. Il faut donc suivre scrupuleusement le schéma proposé par le constructeur.

Les filtres mécaniques ont une très bonne stabilité, la fréquence centrale peut être comprise entre 60 et 600 kHz, les bandes passantes vont de 0,05% à 5 % de la fréquence centrale, et le nombre de pôle peut varier de 2 à 12 pôles.

4.3.5.5. Les filtres DSP

Les filtres DSP ont des flancs beaucoup plus raides que les filtres à quartz, mais la réjection des signaux indésirables doit être faite le plus tôt possible dans la chaîne de réception. L'idéal est donc une combinaison d'un filtre FI et ensuite un filtre DSP.

¹³ La firme Collins est spécialisée dans ce genre de filtre.



4.3.5. Les limiteurs

Les limiteurs ne sont utilisés qu'en FM.

Le problème de la plupart des démodulateurs FM est qu'ils sont également sensibles à la modulation d'amplitude. Pour cette raison, il faut éliminer toute trace de variation d'amplitude avant d'attaquer le démodulateur FM. En fait un limiteur n'est rien d'autre qu'un amplificateur qui travaille au seuil de la saturation, suivi d'un circuit accordé qui va redonner la forme sinusoïdale au signal.

Les circuits intégrés conviennent particulièrement bien à cette application.



4.3.6. Les détecteurs

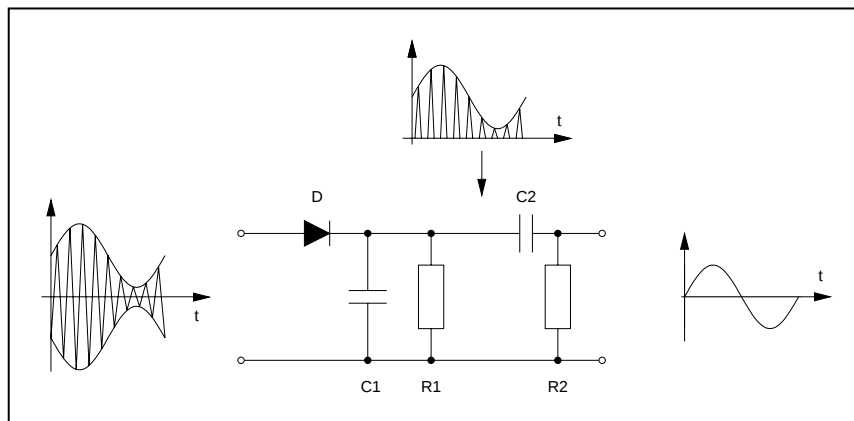
Nous avons déjà vu que sous ce nom générique on peut trouver

- les détecteurs proprement dits utilisés pour l'AM,
- les détecteurs de produits qui sont utilisés pour la CW et la BLU
- les discriminateurs utilisés en FM

4.3.6.1. Détection AM

La détection AM se fait au moyen d'une diode D qui ne laisse passer que les alternances positives (dans le cas de la figure ci-contre).

Soit donc un signal AM à l'entrée, la tension après la diode suit l'amplitude du signal RF. A chaque alternance, le condensateur C1 se charge à une valeur proche de la valeur de crête, puis se décharge dans R1. La constante de temps C1 R1 doit donc être élevée par rapport à la période du signal FI.



Pour restituer la symétrie du signal on doit alors ajouter le condensateur C2 et la résistance R2 et la constante de temps C2 R2 doit donc être élevée par rapport à la période du signal AF.

On appelle ce type de démodulation un **détection d'enveloppe**.

4.3.6.2. Détecteur de produit

Les détecteurs de produits sont utilisés pour démoduler des signaux AM et SSB, ils utilisent les produits de mélange entre le signal utile et un oscillateur local. Un détecteur de produit est en fait un mélangeur, mais à sa sortie on trouve le signal BF au lieu d'une FI.

Un détecteur de produit peut décoder un signal AM surmodulé, et le rapport signal/bruit est meilleur que celui produit par un détecteur d'enveloppe.

CA3028A

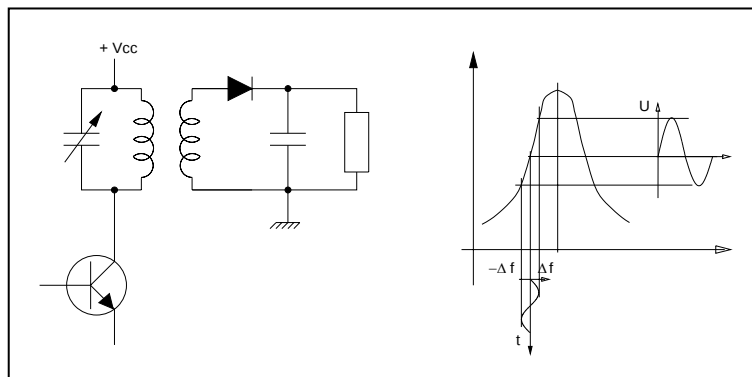


4.3.6.3. Les discriminateurs

Il existe plusieurs circuits qui permettent de démoduler de la FM.

Le discriminateur le plus simple est le **discriminateur de flanc**¹⁴. On utilise la courbe de réponse d'un circuit accordé LC, décalé en fréquence pour que la tension de sortie soit proportionnelle à la fréquence.

Dans un discriminateur de flanc on convertit donc la modulation de fréquence en modulation d'amplitude et le signal obtenu est alors "détecté", comme en AM.

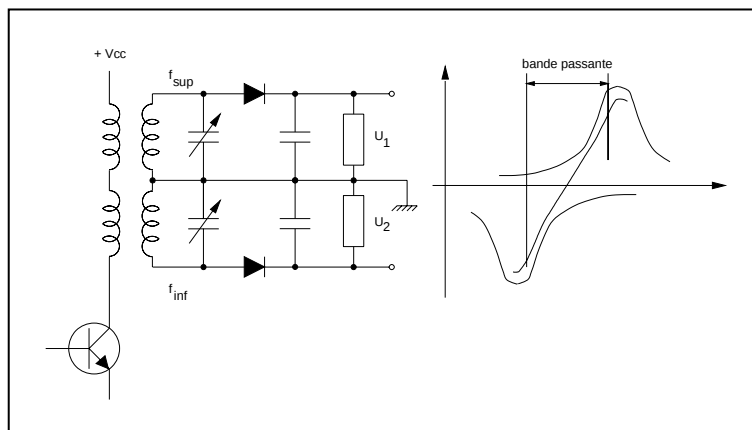


L'inconvénient majeur est le manque de linéarité, et comme la modulation FM se veut être une modulation de qualité, le discriminateur de flanc a été modifié et a donné lieu au discriminateur à deux circuits accordés.

Dans le **discriminateur à deux circuits accordés**¹⁵, on met deux discriminateurs de flanc "en opposition" de phase. La non linéarité s'annule donc, et on obtient une courbe caractéristique appelée **courbe en forme de "S"**.

La bande passante utile est sensiblement inférieure à la distance entre les deux sommets, c-à-d à la différence entre les deux fréquences d'accord des deux circuits.

Malheureusement si les circuits peuvent facilement être réglés séparément sur des fréquences f_1 et f_2 , pratiquement les deux circuits auront tendance à se synchroniser sur une fréquence moyenne. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'impédance de la source (impédance de sortie du transistor) est faible.



De plus, il est difficile d'obtenir des circuits LC légèrement décalés avec des courbes "vraiment" complémentaires.

¹⁴ En anglais "slope detector".

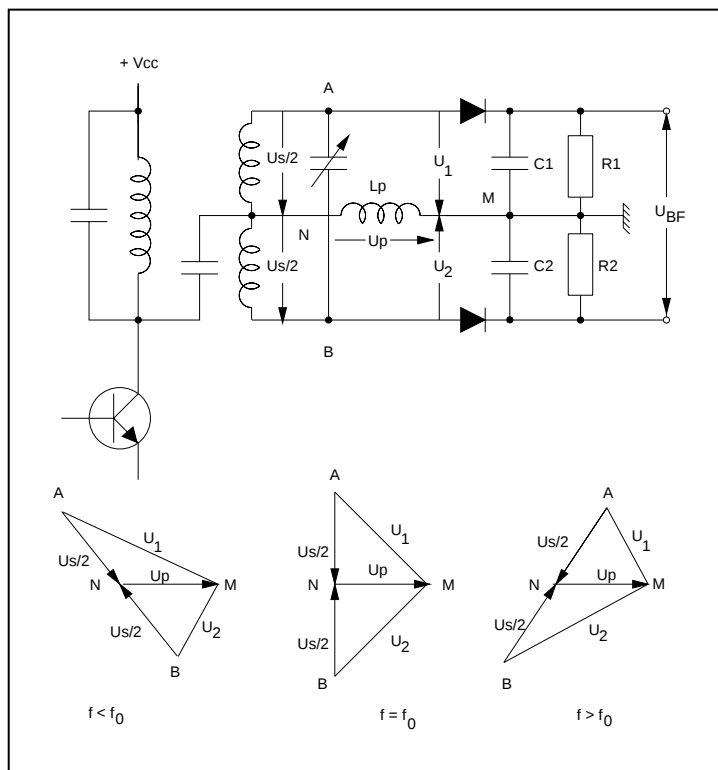
¹⁵ Encore appelé discriminateur Travis



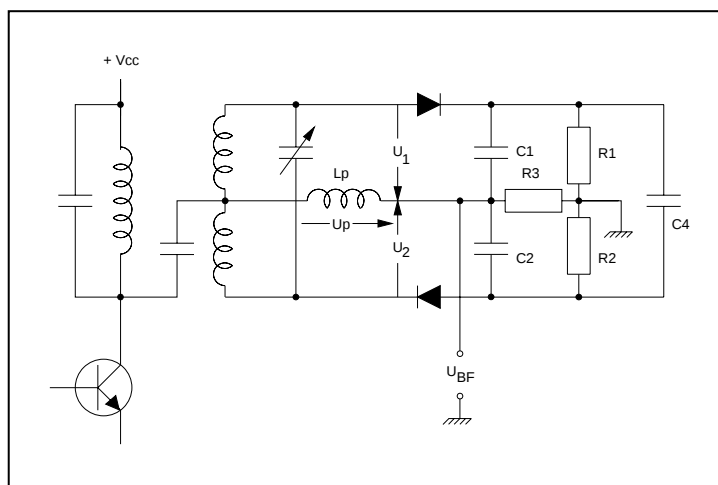
Une autre solution consiste en un **discriminateur de phase**¹⁶. Le circuit FI possède un secondaire avec prise médiane, produisant deux tensions $U_{s/2}$ en opposition de phase.

A la résonance, les tensions $U_{s/2}$ sont décalées exactement de $+90^\circ$ et de -90° par rapport à la tension sur la self de choc L_p . Les tensions U_1 et U_2 sont égales et en quadrature. Après détections les deux tensions sont égales et de signe opposé, la tension de sortie est nulle.

Si $f < f_0$ ou $f > f_0$ les tensions ne sont plus égales, et leur différence n'est plus nulle.



En inversant une des deux diodes, on arrive finalement au **détecteur de rapport**¹⁷. L'avantage du détecteur de rapport est qu'il ne nécessite pas de circuit limiteur.



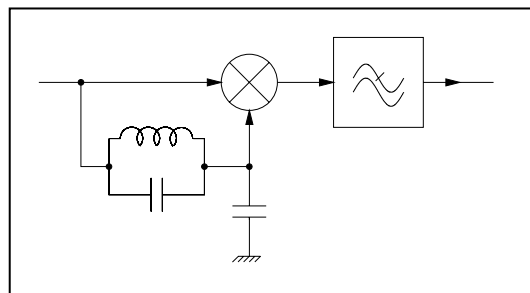
¹⁶ Encore appelé discriminateur Foster-Seeley

¹⁷ En anglais "ratio detector".



4.3.6.4. Les démodulateurs à coïncidence

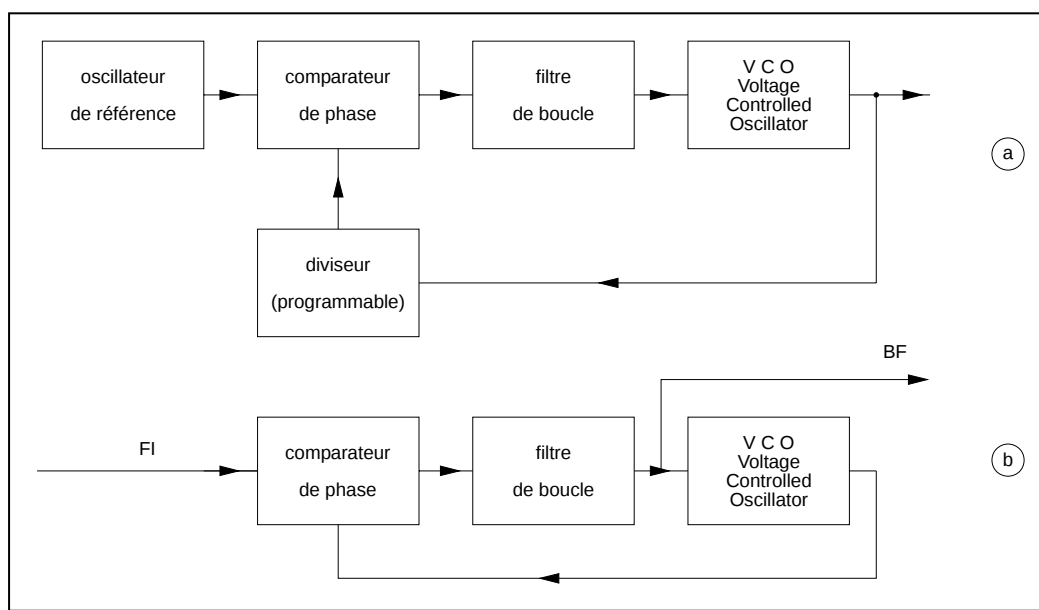
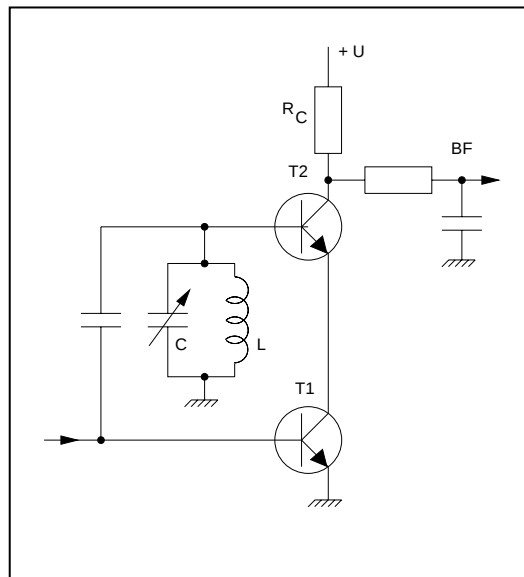
Dans un démodulateur à coïncidence¹⁸, on va convertir la modulation de fréquence en modulation de phase et ensuite un détecteur de phase va être utilisé. A la fréquence porteuse, le déphasage introduit par le circuit est de -90° . Le circuit passe bas supprime la fréquence somme.



4.3.6.5. Discriminateur à PLL

Ce type de démodulation est appelé démodulateur **cohérent**.

Dans une boucle à verrouillage de phase (PLL) la tension d'erreur est proportionnelle à l'erreur de fréquence, par conséquent si, à la place du VCO, on applique le signal modulé en FM en lieu et place de l'oscillateur de référence et la tension de correction (qui devient maintenant la tension de sortie) représente le signal qui a servi à moduler le signal FM. La figure ci-contre montre un PLL classique (a) et un discriminateur à PLL (b).



¹⁸ En anglais "quadrature demodulator".



4.3.7. Oscillateur de battement (BFO)

En télégraphie, on doit provoquer le battement entre le signal reçu (même si celui-ci a été converti en une autre fréquence) et un oscillateur local de sorte à produire une fréquence ("une note") audible.

Par ailleurs, pour recevoir de la BLU (J3E), il faut restituer la porteuse de façon à pouvoir on doit restituer l

4.3.8. Calibreur à quartz

Dans la plupart des récepteurs actuels, la fréquence de l'oscillateur est traitée par un microprocesseur et, en tenant compte de la valeur de la FI, de tous les oscillateurs et du mode de réception, il est possible de calculer et d'afficher la valeur de la fréquence de réception.

Ceci n'était pas le cas des récepteurs travaillant avec un VFO et des oscillateurs à quartz pour obtenir toutes les bandes radio amateur. Un oscillateur à quartz, spécialement conçu pour générer beaucoup d'harmoniques, permettait alors de calibrer le récepteur. Ce générateur est temporairement mis à l'entrée du récepteur et comme il fournit un signal de 3,5 MHz avec ses multiples, il est possible de se calibrer sur 3,5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 21 MHz et 28 MHz.

4.3.9. Amplificateur BF

Etant donné la faible puissance nécessaire à une réception normale via haut-parleur ou casque, plusieurs circuits intégrés peuvent convenir.

4.3.10. Contrôle automatique de gain

Le circuit de CAG fait en sorte que la tension à l'entrée du détecteur soit plus ou moins constante. On détecte donc le niveau de sortie, on produit une tension continue qui va contrôler le gain des premiers étages et le gain de l'amplificateur FI principal.

Les transistors MOSFET à doubles grilles sont particulièrement bien adaptés à ce genre de "contrôle".

La constante de temps avec lequel ce circuit réagit dépend du type de réception. En AM et en SSB on utilisera une grande constante de temps (c-à-d en position SLOW), tandis qu'en CW on utilisera une constante de temps plus faible (c-à-d la position FAST).



4.3.11. S-mètre

Les récepteurs sont généralement munis d'une indication du niveau reçu. Cette indication est établie en points "S" allant de 1 à 9.

L'échelle des points S a été définie dans les années 1940 et confirmé lors d'une réunion IARU :

- pour les récepteurs décimétriques S9 correspond à une f.é.m. de 100 μV , donc en cas d'adaptation, on aura 50 μV aux bornes du récepteur,
- pour les récepteurs VHF et UHF, S9 correspond à 5 μV aux bornes du récepteur.

Une variation de un point S correspond à 6 dB. Au-delà de S9, on utilise des pas de 10 dB

On peut alors établir la correspondance suivante :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9 ¹⁹	S9 +20	S
Décimétrique	$\approx 0,2$	$\approx 0,4$	$\approx 0,80$	$\approx 1,6$	≈ 3	6,125	12,5	25	50	500	μV
VHF/UHF	$\approx 0,02$	$\approx 0,04$	$\approx 0,08$	$\approx 0,16$	$\approx 0,3$	0,6125	0,125	2,5	5	50	μV

Mais en pratique l'indication du S-mètre n'est pas aussi précise. On peut bien sûr "calibrer" l'indication pour la valeur S9. Le S-mètre doit donc être considéré comme une indication relative du niveau de réception.

4.3.12. Silencieux (squelch)

Le silencieux ou squelch est essentiellement utilisé sur les récepteurs FM. En effet, en absence de signal, le gain est maximal et la tension à la sortie du discriminateur est un bruit d'amplitude relativement élevé qui est relativement désagréable. C'est pourquoi en absence de réception, le silencieux va bloquer la BF.

Le réglage du silencieux est généralement accessible à l'opérateur, il doit être très légèrement au dessus du point critique ????????????????

¹⁹ Seules les correspondances pour S9 en décimétrique et en VHF doivent être retenues, le reste se retrouve facilement.



4.4. Les caractéristiques des récepteurs

4.4.1. Le canal adjacent

4.4.2. La sélectivité

La sélectivité d'un récepteur est la faculté de pouvoir séparer le signal souhaité des autres signaux. La sélectivité est essentiellement déterminée par le filtre FI et elle est souvent donnée par les points à -6 dB et à -60 dB.

- en SSB avec un filtre 2,4 kHz, la bande passante à -6 dB est de 2,2 kHz, la BP à -60 dB est de 4,2 kHz
- en CW avec un filtre 500 Hz, la bande passante à -6 dB est de 500 Hz, la BP à -60 dB est de 1,8 kHz
- en FM avec un filtre 12 kHz, la bande passante à -6 dB est de 12 kHz, la BP à -40 dB est de 28 kHz

4.4.3. La sensibilité

La sensibilité d'un récepteur est la faculté de pouvoir recevoir des signaux très faibles. La sensibilité dépend essentiellement des étages d'entrées du récepteur.

- la sensibilité d'un récepteur décamétrique (1,8 à 30 MHz) est de l'ordre de 0,25 μ V pour un rapport S/B de 10 dB et pour les modes SSB et CW
- la sensibilité d'un récepteur VHF/UHF pour la NBFM est de l'ordre de 0,16 μ V pour un rapport S/B de 12 dB²⁰

4.4.4. La désensibilisation

L'un des problèmes les plus difficiles à résoudre avec les stations relais est la désensibilisation du récepteur.

La désensibilisation est due à la présence d'un émetteur proche. Le signal de cet émetteur atteint alors le récepteur avec un niveau tellement important que le récepteur devient moins sensible et ne reçoit plus les signaux qu'il devrait théoriquement pouvoir recevoir.

Il est donc important de construire un récepteur avec une très grande plage dynamique.

Dans le cas d'un relais, l'émetteur qui cause la désensibilisation n'est rien d'autre que l'émetteur du relais lui-même. La règle fondamentale pour éviter la désensibilisation est l'isolation. Parmi les mesures à prendre, il faut

- blinder correctement l'émetteur et le récepteur
- séparer physiquement l'émetteur du récepteur
- blinder correctement l'émetteur et le récepteur

On doit aussi faire les connexions avec du câble blindé de bonne qualité et si nécessaire utiliser du câble à double tresse ou du câble semi-rigide.

Pour diminuer le niveau du signal perturbateur, on peut aussi séparer les antennes d'émission et de réception. Mais souvent on désire utiliser la même antenne. On utilise à ce moment là des cavités montées dans un ensemble appelé duplexeur. Le duplexeur agit comme un filtre passe bande sur la fréquence à recevoir et atténue la fréquence de l'émetteur. La réjection peut facilement être de l'ordre de 80 dB.

Si la désensibilisation provient d'un émetteur puissant mais qui se trouve assez loin hors de la bande

²⁰ Remarquons que l'on exige d'une réception FM un meilleur rapport S/B que pour une réception CW ou SSB.



radioamateur, alors il est possible d'utiliser des filtres passe -haut et passe bas classiques, ou éventuellement des filtres hélicoïdaux.

4.4.5. La stabilité

La stabilité d'un récepteur est la faculté de pouvoir rester accordé sur la fréquence désirée.

Dans un récepteur superhétérodyne, la stabilité est essentiellement liée à la stabilité des oscillateurs locaux et du VFO. La stabilité est exprimée en partie par million (ppm). Si un récepteur est accordé sur 14 MHz, une stabilité de 10 ppm signifie une stabilité de 140 Hz. La stabilité dépend des coefficients de température des quartz ou, des selfs et des capacités dans la cas d'un oscillateur LC. Il est donc nécessaire de spécifier la plage de températures.

Pour un récepteur décamétrique, la stabilité est de l'ordre de 10 ppm. Toutefois, si on équipe le récepteur d'un oscillateur de référence à haute stabilité, on peut obtenir une stabilité de 0,5 ppm.

Pour un récepteur V/UHF, la stabilité est de

- 10 ppm pour un récepteur NBFM
- 1ppm pour un récepteur SSB/CW.

4.4.6. La fréquence image

Nous avons déjà évoqué le sujet ! (voir § 4.1.3.2)

Pour caractériser la fréquence image, on donne parfois la réjection de la fréquence image qui représente le rapport entre le niveau de la fréquence utile à celui de la fréquence image en un point donné du récepteur (par exemple en FI, juste avant le démodulateur).



4.5. Le rapport S/B , figure de bruit et seuil de bruit²¹

4.5.1. Le bruit thermique

Dans tout conducteur, les électrons sont animés d'un mouvement désordonné. Dès lors il apparaît aux bornes d'une résistance une différence de potentiel de valeur aléatoire. Comme cette d.d.p. est indépendante de la fréquence, on dit que ce bruit est "blanc" par analogie avec la lumière blanche dont l'énergie est aussi indépendante de la fréquence. La puissance de bruit est donnée par la formule de Nyquist (appelée formule de Johnson d'après d'autres sources)

bruit thermique

$$P = k T B$$

où k est la constante de Boltzman et vaut $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W /}^\circ\text{K}$

R est la résistance en ohms

T est la température absolue en $^\circ\text{K}$ ($0^\circ\text{C} = 273,15^\circ\text{K}$)²².

B est la bande passante exprimée en Hz

Remarques:

- le bruit n'est pas seulement généré par les résistances (composant discret) mais aussi par les résistances de connexions, les résistances de surface des circuits résonnants, par les tubes électroniques, par les semi-conducteurs
- la bande passante d'un système n'a pas de limite très nette, c'est pourquoi on définit la bande passante équivalente où le bruit serait identique. Dans la pratique toutefois la bande équivalente est proche de la bande passante à -3 dB
- à 0°K (donc à -273°C) plus aucune résistance ne générerait du bruit ! C'est pourquoi des préamplis à très faible bruit utilisé pour des applications spéciales (recherche spatiale, etc ...) travaillent à température TRÈS basse (quelques 10°K)

Si on calcule cette puissance de bruit dans une bande passante de 1 Hz, on trouve

$$P = 1,38 \cdot 10^{-23} \times 290 = 4,002 \cdot 10^{-21} \text{ W / Hz soit } -203,98 \text{ dBW/Hz soit } -173,97 \text{ dBm/Hz soit } \approx \mathbf{-174 \text{ dBm/Hz}}$$

Pour une bande passante déterminée, il suffit alors d'ajouter $10 \log(B)$ où B est la bande passante en Hz, ainsi

mode	Bande passante	$10 \log B$	P dans cette BP
CW	250 Hz	23,98 dB	-149,99 dBm
SSB	2700 Hz	34,31 dB	- 139,66 dBm
FM	12 kHz	40,79 dB	- 133,18 dBm
TV	6 MHz	67,78 dB	- 106,19 dBm

Ceci explique pourquoi on peut plus facilement trouver des petits signaux en CW que dans les autres modes de modulation. Ceci explique pourquoi on a intérêt à utiliser un filtre étroit en CW plutôt que de conserver le filtre SSB.

²¹ Le bruit dans les récepteurs et les phénomènes d'intermodulation sont les deux problèmes fondamentaux des récepteurs. C'est la raison pour laquelle nous avons séparé ces 2 chapitres par rapport au programme HAREC.

²² On considère généralement que la température ambiante est de 17°C , ce qui permet d'arrondir et d'obtenir $T_0 = 290^\circ\text{K}$



4.5.2. Facteur de bruit d'un amplificateur

Le facteur de bruit d'un amplificateur, noté F, est une mesure de la détérioration du rapport (S/B) optimum à l'entrée par suite des bruits engendrés dans le circuit amplificateur donc

$$\text{facteur de bruit} \quad \boxed{F = (S/B)_{\text{optimum}} / (S/N)_{\text{réel}}}$$

donc F est toujours >1 . Mais le facteur de bruit est aussi exprimé en décibel $NF = 10 \log F$

4.5.3. Le bruit extérieur

Lorsqu'on raccorde un récepteur à une antenne extérieure, elle capte du bruit. Ce bruit trouve son origine dans plusieurs sources, il est notamment dû

- à l'atmosphère
- au bruit thermique de la terre
- au bruit dû aux émissions solaires et cosmiques
- au bruit occasionné par l'homme : allumage des autos, appareils électrodomestiques, etc ...

On peut trouver une courbe donnant la valeur moyenne typique de ce bruit dans différentes circonstances.



On constate que :

- au dessus de 100 MHz, le bruit est essentiellement limité par le bruit du récepteur
- qu'en dessous de 30 MHz le bruit atmosphérique est relativement prépondérant.

On remarque aussi, qu'il vaut mieux avoir une station à la campagne qu'en pleine ville

Exemple: En supposant que l'on utilise la SSB, déterminer le bruit maximum en 145 MHz ?

en ville : $k T_0 + 34,31 \text{ dB} + 35 \text{ dB} = -174 + 34,31 + 35 = -104,69 \text{ dBm}$

à la campagne : $k T_0 + 34,31 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = -174 + 34,31 + 20 = -119,69 \text{ dBm}$

On gagne donc 15 dB en allant vivre à la campagne !



Exemple : En supposant que l'on utilise la SSB, déterminer le bruit maximum sur 20 m en CW ?

en été : $k T_0 + 23,98 \text{ dB} + 35 \text{ dB} = -174 + 23,98 + 35 = -115 \text{ dBm}$

en hiver : $k T_0 + 23,98 \text{ dB} + 32 \text{ dB} = -174 + 23,98 + 32 = -118 \text{ dBm}$

4.5.4. Seuil de sensibilité d'un récepteur

Le seuil de sensibilité d'un récepteur est la plus faible tension d'entrée nécessaire pour obtenir un rapport de la puissance nécessaire à l'entrée (P_e), à la puissance de bruit (P_b) égal à 1.

Donc pour un récepteur "sans bruit", $P_b = kTB$ et si la source de bruit a la même impédance que l'entrée du récepteur alors $U_b = \sqrt{Z k T B}$

Exemple: $t = 17^\circ\text{C}$, $Z = 50 \Omega$, calculons $U_b = \sqrt{Z k T B}$ pour 3 cas typiques

$B = 250 \text{ Hz}$	$B = 2700 \text{ Hz}$	$B = 12 \text{ kHz}$
$U_b = 0,00707 \mu\text{V}$	$U_b = 0,00232 \mu\text{V}$	$U_b = 0,049 \mu\text{V}$
transformons en $\text{dB}\mu\text{V}$		
-43 $\text{dB}\mu\text{V}$	-32 $\text{dB}\mu\text{V}$	-26,2 $\text{dB}\mu\text{V}$
transformons en dBm		
-150 dBm	-139 dBm	-133,2 dBm

mais un tel récepteur idéal n'existe pas, il possède un facteur de bruit F , donc il faudra une tension supérieure $U_{b \text{ seuil}} = \sqrt{F Z k T B}$

Continuons donc notre exemple et supposons un facteur de bruit F de 6 dB (soit 4 x) :

$B = 250 \text{ Hz}$	$B = 2700 \text{ Hz}$	$B = 12 \text{ kHz}$
$U_{b \text{ seuil}} = 0,0141 \mu\text{V}$	$U_{b \text{ seuil}} = 0,00464 \mu\text{V}$	$U_{b \text{ seuil}} = 0,098 \mu\text{V}$
-37 $\text{dB}\mu\text{V}$	-27 $\text{dB}\mu\text{V}$	-20 $\text{dB}\mu\text{V}$
-143 dBm	-133 dBm	-127 dBm

Le facteur de bruit (exprimé en dB) se retrouve ici directement dans la sensibilité exprimée en $\text{dB}\mu\text{V}$ ou en dBm ... il fallait s'y attendre !

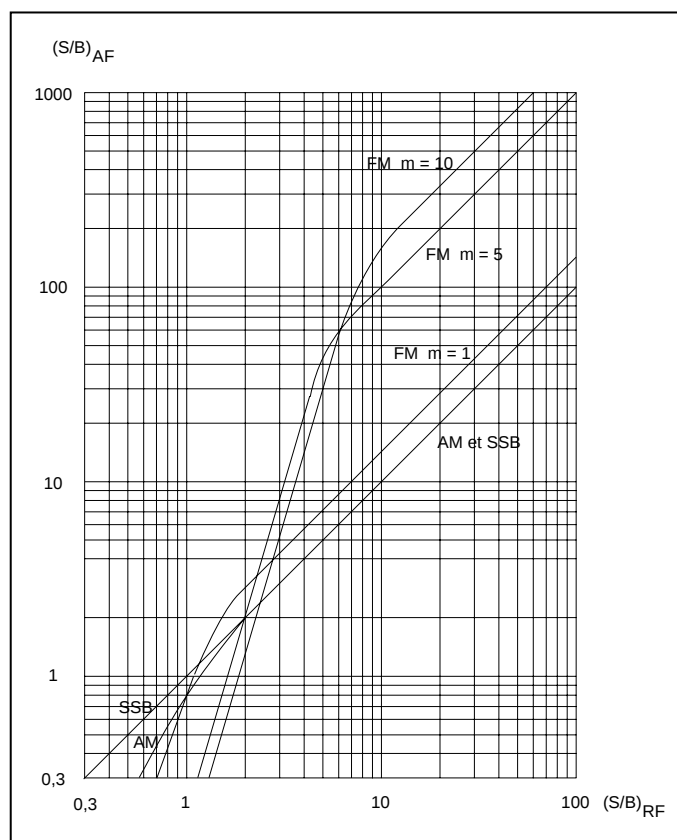


4.5.5. Seuil de sensibilité pour un rapport (S/B) donné

Le seuil de sensibilité donné plus haut correspond juste au niveau du bruit. Dans la littérature anglaise on trouve le terme "noise floor" qui est peut être plus significatif.

Mais l'utilisateur veut un certain "confort" d'écoute, il souhaite donc un certain rapport S/B à la fin de la chaîne et par conséquent il est plus intéressant de donner la tension d'entrée pour obtenir un rapport S/B donné.

Dans la plupart de cas, on donne cependant le rapport S/B mesuré au niveau de l'ampli AF. Pour la SSB et pour l' AM, si $S/B > 2$ dB, alors on peut dire que le rapport $(S/B)_{AF}$ est pratiquement égal au rapport $(S/B)_{RF}$. Pour les autres modes on peut se rapporter à la courbe ci-contre pour obtenir le rapport entre le $(S/B)_{AF}$ et le rapport $(S/B)_{RF}$



Reprenons notre exemple :

B = 250 Hz F = 6 dB télégraphie	B = 2700 Hz F = 6 dB modulation SSB	B = 12 kHz F = 6 dB modulation NBFM avec une déviaton de 4 kHz, une $f_{MOD} = 1,75$ kHz, la bande passante RF est de 12 kHz,
en télégraphie, on peut se contenter d'un $(S/B)_{AF}$ de 3 dB (soit 2x)	en SSB, un radioamateur se contente d'un $(S/B)_{AF}$ de 10 dB (soit 10 x)	Si on fait de la FM, c'est pour profiter de la qualité, donc il faudra atteindre par exemple un $(S/B)_{AF}$ de 20 dB
la courbe montre que $(S/B)_{AF} = 3$ dB implique $(S/B)_{RF} = 3$ dB	la courbe montre que $(S/B)_{AF} = 10$ dB implique $(S/B)_{RF} = 10$ dB	la courbe montre que $(S/B)_{AF} = 20$ dB implique $(S/B)_{RF} = 12$ dB
$U_{b \text{ seuil}} = \mu V$	$U_{b \text{ seuil}} = \mu V$	$U_{b \text{ seuil}} = \mu V$
- 37 dB μV	-27 dB μV	-20 dB μV
- 143 dBm	-133 dBm	- 127 dBm

Le facteur de bruit (exprimé en dB) se retrouve ici directement dans la sensibilité exprimée en dB μV ou en dBm
... il fallait s'y attendre !



Exemple: $t = 17^{\circ}\text{C}$, $Z = 50 \Omega$, modulation NBFM avec une déviation de 4 kHz, une $f_{\text{MOD}} = 1,75 \text{ kHz}$, la bande passante RF est de 12 kHz, le $F = 3 \text{ dB (2x)}$, Quelle est la sensibilité pour un rapport S/B de 12 dB (16 x) ?

$$U_{b(26 \text{ dB})} = \sqrt{2 \times 50 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290 \times 12 \times 10^3} = 0,07 \mu\text{V}$$

$$M = 4 / 1,75 = 2,3$$

$$(S/B)_{\text{AF}} = 20 \text{ dB avec } M = 2,3 \text{ d'où } (S/B)_{\text{RF}} = 12 \text{ dB (x16)}$$

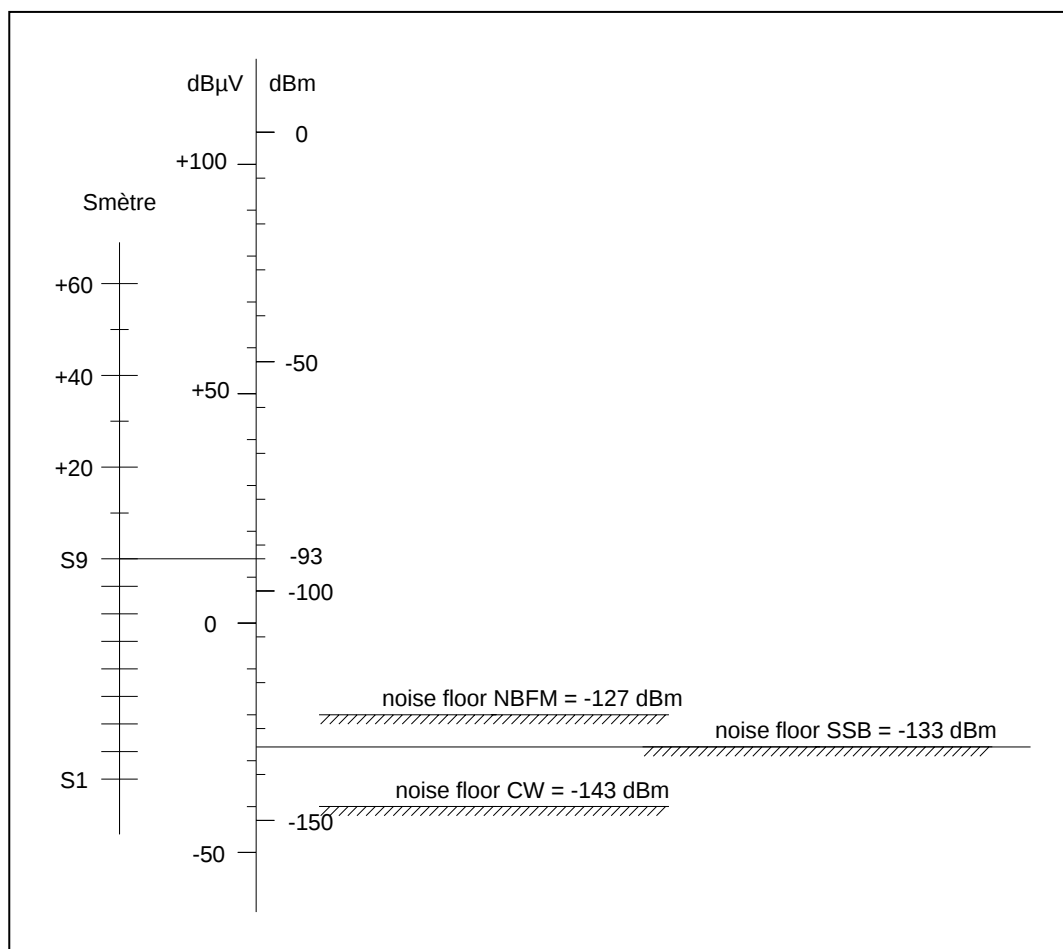
$$\text{donc } U_{b(20 \text{ dB AF})} = 0,07 \times \sqrt{16} = 0,28 \mu\text{V}$$

0,28 μV convertit en dB μV devient -5,5 dB μV soit -118 dBm

Remarques :

- il faut savoir que le rapport S/B des amplis audio ne dépasse jamais 100 dB, et que les courbes ont été tracées au-delà de cette valeur.
- en FM, la courbe présente deux pentes

Une représentation intéressante consiste en une échelle verticale où le bruit de fond serait tout en bas (le "noise floor" comme disent les anglais) et où le signal fort serait en haut. A partir des exemples ci-dessus nous pouvons donc faire la représentation ci-dessous :





4.5.6. La température de bruit

La température de bruit d'un amplificateur est la température à laquelle il faudrait porter une résistance (égale à la résistance d'entrée) pour produire la même puissance de bruit.

$$F = \frac{p_e + p_i}{p_e} = 1 + \frac{p_i}{p_e} = 1 + \frac{G k T_i B}{G k T_e B} = 1 + \frac{T_i}{T_e}$$

Donc

$$T_i = (F - 1) T_0$$

Application: La figure de bruit d'un préampli est de 0,8 dB. Calculez la température de bruit ?

Partons de $f = 10^{(NF/10)} = 10^{(0,8/10)} = 10^{0,08} = 1,202264$, et comme $f = 1 + T_i / 290$, $T_i = (f - 1) 290 = (1,202264 - 1) 290 = 58,6^\circ \text{K}$

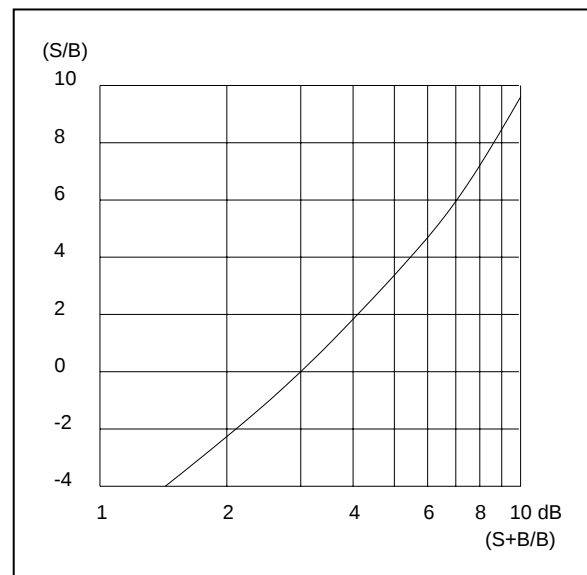
4.5.7. Rapport (S+B) / B

Le rapport signal/bruit est un paramètre que l'on peut mesurer au niveau du haut-parleur c.-à-d. à la sortie du récepteur. On peut mesurer la tension produite par le bruit, puis le signal utile et en déduire le S/B.

Lorsque le rapport signal/bruit est de l'ordre de 60 dB, on n'entend presque pas le bruit, cette valeur est requise pour toute bonne installation audio (haute fidélité). Pour des communications téléphoniques, un rapport de l'ordre de 20 à 30 dB signifie une transmission normale. En dessous de 16 dB le souffle devient nettement audible et pour 10 dB la communication est franchement perturbée par le bruit.

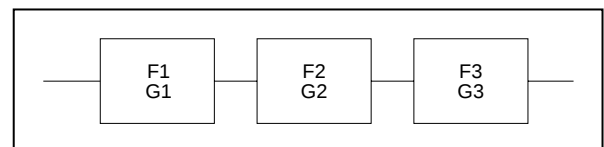
Mais en mesurant le bruit tel qu'indiqué plus haut, on fait une erreur car on a mesuré en fait le rapport S+B/B (S+N/N), lorsque le rapport S+B/B est grand il n'y a pratiquement pas de différence avec le rapport S/B; par contre en dessous de x dB, la figure ci-dessous permet de trouver le rapport S/B à partir du S+B/B

Toutefois on a pas encore tenu compte de la distorsion et en fin on a mesuré le S+B+D/B, ce que l'on appelle encore le **SINAD** pour Signal Noise And Distorsion.



4.5.8. Mise en cascade de plusieurs amplificateurs

On peut se demander ce que devient le rapport S/B ou la facteur de bruit lorsqu'on connecte n amplificateurs en cascade tel qu'indiqué à la figure ci-contre.



$$F_t = F_1 + \frac{F_2}{G_1} + \frac{F_3}{G_1 G_2} + \frac{F_4}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n}{\prod_{i=1}^{n-1} G_i}$$

Ceci montre que l'influence du facteur de bruit du premier étage est primordiale.



4.5.9. Influence d'un atténuateur

Jusqu'à présent nous avons parlé d'étage d'amplification, mais il nous manque un élément de première importance pour évaluer une installation, ce sont les lignes de transmissions (coaxial, bifilaires...).

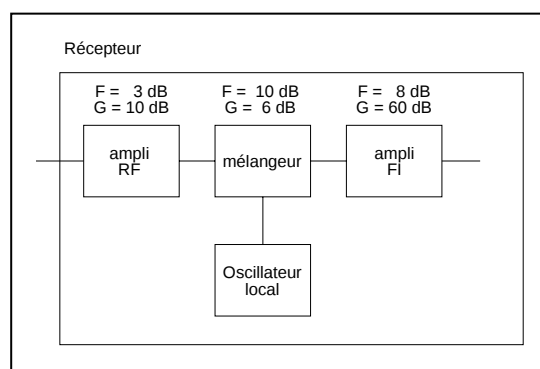
Une ligne est en principe caractérisée du point de vue qui nous intéresse par la perte qu'elle introduit. Mais, comme pour un étage d'amplification, il nous faut connaître son facteur de bruit. Nous admettrons que celui-ci est égal à l'atténuation engendrée par le câble.

Par exemple, une ligne dont la perte est de 3 dB aura un facteur de bruit de 3 dB.

Ainsi une ligne ayant une perte de 3 dB, sera considérée comme un étage ayant un gain de -3 dB et un facteur de bruit de 3 dB.

4.5.10. Applications et choix de la meilleure solution

4.5.10.1. : Soit un récepteur qui comporte un ampli RF, un mélangeur actif (donc avec un composant actif), et un amplificateur FI



1.	Ampli RF	$F_1 = 3 \text{ dB (2 x)}$	$G_1 = 10 \text{ dB (10x)}$
2.	Mixer	$F_2 = 10 \text{ dB (10 x)}$	$G_2 = 6 \text{ dB (4 x)}$
3.	Ampli FI	$F_3 = 8 \text{ dB (6,3 x)}$	$G_3 = 60 \text{ dB (x } 10^6)$
4.	reste du récepteur	$F_4 \text{ est négligeable}$	

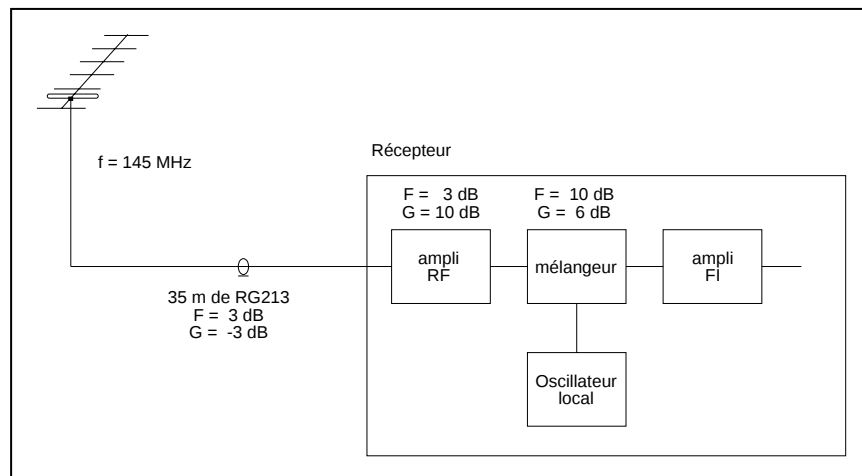
Calculons le facteur de bruit total :

$$F_t = 2 + \frac{10^{-1}}{10} + \frac{6,3^{-1}}{4 \times 10} + \frac{\text{négligeable}}{10^6 \times 4 \times 10} = 2 + 0,9 + 0,132 + \text{négligeable} = 3,03 \text{ soit } 4,8 \text{ dB}$$

Le facteur de bruit total est donc (légèrement) supérieur au facteur de bruit du premier étage.



4.5.10.2 : On fait précéder ce récepteur par un câble avec une perte de 3 dB (35 m de câble RG213 à 145 MHz par exemple) :



1.	Câble	$F_1 = 3 \text{ dB (2 x)}$	$G_1 = -3 \text{ dB (0,5 x)}$
2.	Ampli RF	$F_2 = 3 \text{ dB (2 x)}$	$G_2 = 10 \text{ dB (10x)}$
3.	mixer	$F_3 = 10 \text{ dB (10 x)}$	$G_3 = 6 \text{ dB (4 x)}$
4.	ampli FI	$F_4 = 8 \text{ dB (6,3 x)}$	$G_4 = 60 \text{ dB (10}^6 \text{ x)}$
5.	reste du récepteur	F_5 est négligeable	

Calculons à nouveau le facteur de bruit total :

$$F_t = 2 + \frac{2-1}{0,5} + \frac{10-1}{0,5 \times 10} + \frac{6,3-1}{0,5 \times 4 \times 10} + \dots = 2 + 2 + 1,8 + 0,265 + \dots = 6,265 \text{ soit } 7,8 \text{ dB}$$

4.5.10.3 : On a souvent entendu dire que pour éviter l'intermodulation (voir paragraphe consacré à ce sujet) il valait ne pas utiliser d'amplificateur d'entrée et qu'il valait mieux utiliser un mélangeur en anneau ("balanced ring mixer"). Refaisons le calcul :



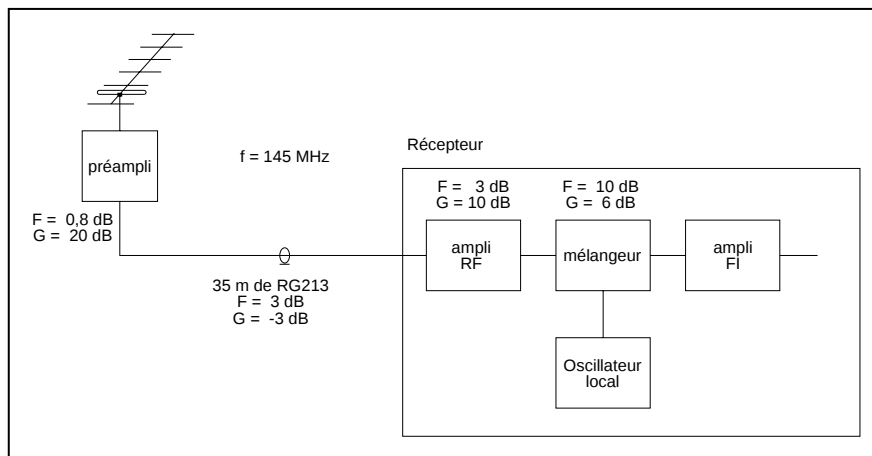
1.	mélangeur en anneau	$F_1 = 6 \text{ dB (4 x)}$	$G_1 = -7 \text{ dB (0,2 x)}$
2.	ampli FI	$F_2 = 8 \text{ dB (6,3 x)}$	$G_2 = 60 \text{ dB (10}^6 \text{ x)}$



$$F_t = 4 + \frac{6,3 - 1}{0,2} = 4 + 26,5 = 30,5 \text{ soit } 14,8 \text{ dB}$$

Cette configuration est peut être excellente pour avoir peu d'intermodulation, mais la facteur de bruit est assez décevant.

4.5.10.4. : On fait précéder la 1ere configuration par un préampli, puis un câble avec une perte de 3 dB (35 m de câble RG213 à 145 MHz par exemple) :



1.	préampli	$F_1 = 0,8 \text{ dB (1,2 x)}$	$G_1 = 20 \text{ dB (100 x)}$
2.	Câble	$F_2 = 3 \text{ dB (2 x)}$	$G_2 = -3 \text{ dB (0,5 x)}$
3.	ampli RF	$F_3 = 3 \text{ dB (2 x)}$	$G_3 = 10 \text{ dB (10x)}$
4.	Mixer	$F_4 = 10 \text{ dB (10 x)}$	$G_4 = 6 \text{ dB (4 x)}$

$$F_t = 1,2 + \frac{2 - 1}{100} + \frac{2 - 1}{0,5 \times 10} + \frac{10 - 1}{0,5 \times 4 \times 10} + \dots = 1,2 + 0,01 + 0,2 + 0,18 + \dots = 1,59 \text{ soit } 2,01 \text{ dB}$$

La meilleure solution consiste donc

- à mettre un préamplificateur directement tout près de l'antenne de réception. Ce préamplificateur aura le meilleur facteur de bruit possible (0,5 ... 2 dB). Son gain n'est pas très critique, mais il devrait être compris entre 10 et 20 dB,
- le câble aura le moins de pertes possibles,
- le récepteur aura si possible un amplificateur RF,
- un mélangeur en anneau donnera un moins bon résultat qu'un mélangeur actif (mélangeur à transistor par exemple). Ceci est d'autant plus marqué si ce mélangeur en anneau est mis directement près de l'antenne (sans préampli et/ou sans ampli RF).

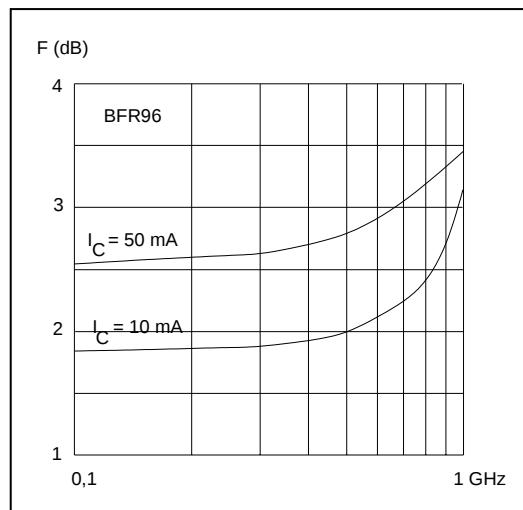


4.5.11. Retour sur les composants actifs

Le composant actif (souvent un transistor ...) du premier étage du récepteur ou du préamplificateur joue donc un rôle essentiel. Des facteurs de bruits se situent entre 3 dB et 0,3 dB.

Plus le courant de collecteur est faible, plus le facteur de bruit est faible.

On constate aussi, que pour un transistor donné, le bruit augmente avec la fréquence de travail.





4.6. L'intermodulation et transmodulation²³

4.6.1. Le problème d'intermodulation en VHF-UHF

Habituellement en 2 m, et plus particulièrement en SSB, les radioamateurs essaient d'avoir des récepteurs avec le plus petit facteur de bruit possible. Pour un relais on pourrait avoir tendance à essayer de faire un relais qui puisse faire du "DX". Mais comme les problèmes d'intermodulation sont plus importants, il vaut mieux se contenter d'un facteur de bruit "moyen" et de soigner l'intermodulation.

Ceux qui font du DX dans les bandes basses (40, 80 et 160 m) savent très bien ce que "intermodulation" veut dire, mais toutefois, il est intéressant de s'arrêter ici quelques instants et de reprendre cette partie de la théorie qui est souvent mal assimilée.

4.6.2. La théorie

La distorsion d'intermodulation ("intermodulation distortion" ou IMD) apparaît quand un élément non linéaire (ampli, mélangeur, etc.) est attaqué simultanément par deux signaux. Or dans un récepteur le mélangeur est a fortiori un élément non linéaire sinon il n'y aurait pas de mélange !

Soit donc un élément non linéaire, celui-ci répond à la relation

$$i = a u + b u^2 + c u^3 + \dots \times u^n$$

si, à l'entrée de cet élément, on applique deux signaux tels que

$$u = (A \sin \omega_1 t) + (B \sin \omega_2 t)$$

alors les termes se développent de la manière suivante

$$\begin{aligned} i = & a A \sin \omega_1 t + a B \sin \omega_2 t \\ & + b A^2 \sin^2 \omega_1 t + 2 b A B \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t + b B^2 \sin^2 \omega_2 t \\ & + c A^3 \sin^3 \omega_1 t + 3 c A^2 B \sin^2 \omega_1 t \sin \omega_2 t + 3 c A B^2 \sin \omega_1 t \sin^2 \omega_2 t + c B^3 \sin^3 \omega_2 t \\ & + \text{etc.} \end{aligned}$$

La première ligne représente la partie linéaire, la deuxième la partie quadratique, la troisième la partie cubique etc.

D'une façon générale, on peut dire que les produits de mélange sont de la forme $(p \omega_1 \pm q \omega_2)$. On appelle $(p + q)$, l'ordre du produit de mélange. C'est ainsi que l'on trouve des termes en

$\omega_1, \omega_2, 2\omega_1, 2\omega_2, 3\omega_1, 3\omega_2$	ce sont les fréquences fondamentales et les harmoniques,
$(\omega_1 \pm \omega_2)$	... les produits de mélange du 2 ^{ème} ordre,
$(2\omega_1 \pm \omega_2)$ et $(2\omega_2 \pm \omega_1)$	... les produits de mélange du 3 ^{ème} ordre,
$(3\omega_1 \pm \omega_2), (2\omega_1 \pm 2\omega_2)$ et $(3\omega_2 \pm \omega_1)$	... les produits de mélange du 4 ^{ème} ordre,
et ainsi de suite.	

²³ C'est, avec le bruit, le deuxième problème fondamental dans un récepteur.



Au laboratoire de l'ARRL, par exemple, on fait les mesures avec deux signaux espacés de 20 kHz, on pourrait par exemple utiliser 145,000 et 145,020 MHz, nous aurons

145 , 145,02 , 290 , 290,04 , 435 , 435,06 , etc ...	les fréquences fondamentales et les harmoniques,
290,020 et 0,020	... les produits de mélange du 2 ième ordre,
144,980 , 435,020 , 145,040 , 435,040	... les produits de mélange du 3 ième ordre,
289,98 , 580,02 , 580,04 , 0,04 , 290,06 , 589,06	... les produits de mélange du 4 ième ordre,
et ainsi de suite.	

On constate que les produits d'ordre pair sont très éloignés des fréquences centrales qui nous intéressent (145,000 et 145,020), tandis que ceux d'ordre impair sont distribués symétriquement autour des deux fréquences. De plus parmi les produits d'intermodulation du 3 ième ordre, certains sont très près des fréquences qui nous intéressent : 144,980 et 145,040 MHz.

Pratiquement donc :

FIGURE 2.

L'analyse spectrale montre que l'amplitude diminue rapidement avec l'ordre des produits et on ne considérera que l'IMD du 3 ième ordre.

Si nous traçons $P_{FI} = f(P_{\text{entrée}})$, le signal évolue selon une loi $P_{FI} = k' P_{\text{entrée}}$ où k' représente le facteur d'amplification de l'étage d'entrée, du mélangeur et de l'ampli FI. Tandis que la puissance d'intermodulation mesurée au même point évolue selon une loi $P_{FI} = k'' (P_{\text{entrée}})^3$ pour les produits du 3 ième ordre. L'écart entre ces deux courbes s'appelle l' **écart d'intermodulation**.

La courbe supérieure s'infléchit à un moment donné à cause de la saturation, on définit ainsi le point de compression à 1 dB comme étant le point où il existe une différence de 1 dB entre la droite prolongée théoriquement et la réalité.

Si on prolonge les deux droites, on peut définir un point appelé le point d'interception (ou IP) Cette valeur n'est pas mesurable directement, il faut la lire sur le diagramme par interpolation. Plus cet IP est élevé, meilleur est le récepteur.

Le point d'interception peut-être donné en faisant référence à l'entrée (c-à-d à l'entrée du récepteur ou à l'entrée d'un mélangeur), mais dans certains cas il est donné en faisant référence à la sortie (à la sortie de l'ampli FI, ou à la sortie d'un mélangeur). Ces deux nombres ne sont évidemment pas égaux, la différence représente le gain (soit le gain du récepteur entre l'entrée RF et la sortie FI, soit le gain du mélangeur). Il faut donc être prudent en comparant les points d'interception. Dans le cas qui nous intéresse plus particulièrement, c'est le point d'interception qui fait référence à l'entrée qui est le plus significatif...

Lorsque les signaux à l'entrée atteignent le niveau de ce point d'interception, les produits de mélange du 3 ième ordre sont au même niveau que le signal utile il ne sera plus possible de démoduler (dans notre cas démoduler en FM) le signal. Il faut donc convenir d'une marge en dessous du point d'interception où la démodulation est encore possible. Dans le cas de la NBFM, cette marge est de l'ordre de 20 dB. Donc si le point d'interception est à +30 dBm, il faut que le signal ne dépasse pas +10 dBm pour que le démodulateur puisse fonctionner correctement.

Il en résulte un autre paramètre : la plage dynamique relative aux produits d'intermodulation du 3 ième ordre (en anglais c'est plus simple : "two-tone, Third order IMD dynamic range"), qui est l'écart entre le seuil de bruit et le niveau maximum utilisable (donc 20 dB en dessous du point d'interception).

4.6.3. Mesure du point d'interception



Le montage est donné à la figure 2. Il faut utiliser un mélangeur hybride qui ne produise pas d' IMD et des câbles avec un excellent blindage (fuites < 90 dB).

Que vaut le point d'interception en pratique ? Pour les transceivers commerciaux, l'ARRL a fait une série de tests (voir les "Product Review" du QST) qui reprend la sensibilité et la plage dynamique en FM. Pour connaître le point d'interception, l'ARRL utilise une méthode simplifiée : il suffit de multiplier la plage dynamique d'interception par 1,5 et d'ajouter le SINAD à 12 dB exprimé en dBm.

	ALINCO DR112	AZDEN PCS7000H	ICOM IC229	KENWOOD TM241	YAESU FT2400
sensibilité à 12 dB SINAD	0,16 μ V -123 dBm	0,19 μ V -121 dBm	0,16 μ V -123 dBm	0,15 μ V -124 dBm	0,2 μ V -122 dBm
plage dynamique à 20 kHz	73 dB	66 dB	71 dB	71 dB	75 dB
point d'interception calculé	-13,5 dBm	-22 dBm	-16,5 dBm	-17,5 dBm	-9,5 dBm

Ces résultats ne sont pas très brillants. En effet, la firme allemande Braun fabrique un module mélangeur à haut point d'interception qui atteint +27 dBm ! Ce module est donc 40 dB meilleur que les transceivers commerciaux ! Mais pour atteindre un tel résultat il faut un oscillateur local avec un très haut niveau. En général, le niveau de l'oscillateur local est de + 17 dBm (voire + 23 dBm), ce qui est une puissance considérable pour un mélangeur de réception, en effet cet oscillateur local fournit 200 mW c.-à-d. presque autant de puissance que le driver de l'émetteur ! Le problème avec un oscillateur local si puissant, est qu'il "repasse" par le mélangeur et est émis par l'antenne or nous devons veiller que les spurious soient inférieure à -57 dBm.

Comme point de comparaison, en HF, sur des transceivers "haut de gamme", on arrive à des valeurs d' IP de +10 à + 16 dBm, et à des plages dynamiques de 85 à 100 dB .

Variante : La firme Siliconix fabrique des mélangeurs équilibrés avec des transistors FET, ce qui réduit considérablement le niveau de l'oscillateur local.