

Radio-Club de la Haute Île



F5KFF / F6KGL

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

Bienvenue sur le cours de F6KGL

La séance de ce soir porte sur

Technique Chapitre 12

Les différents types de modulations

Ce document a servi pour le cours enregistré le **09/06/2023**.

Ce document (*PDF*), le fichier audio (*MP3*) et les liens des vidéos (*YouTube*)
sont disponibles sur la page <https://f6kgl-f5kff.fr/lespodcasts/>

Les documents de notre site Internet sont mis à disposition selon les termes de la
Licence <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

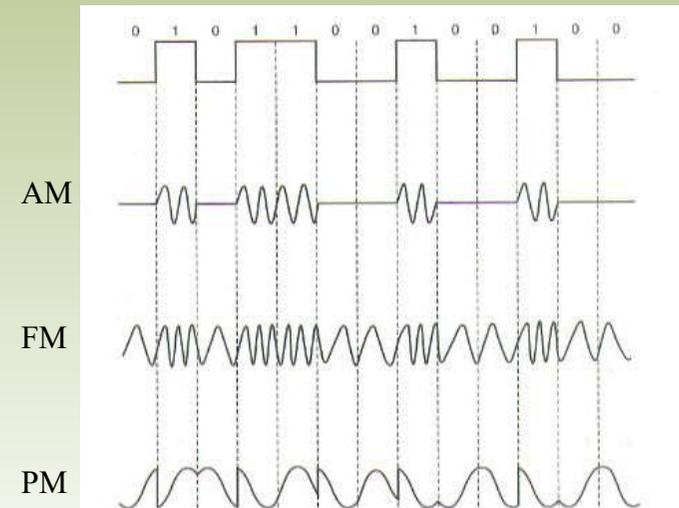
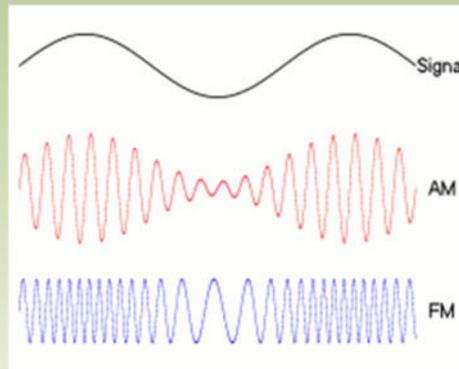


12-1) schématisation des différents types de modulations

- La tension instantanée en fonction du temps d'un signal sinusoïdal peut se caractériser par trois grandeurs qui varient au rythme de l'information transmise :

information

- amplitude
- fréquence
- phase

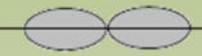
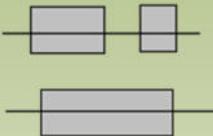


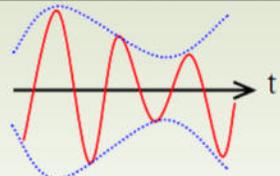
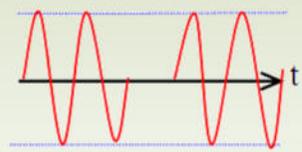
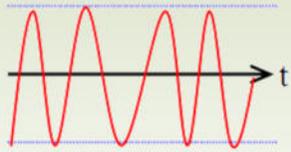
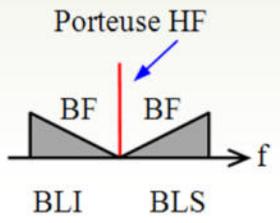
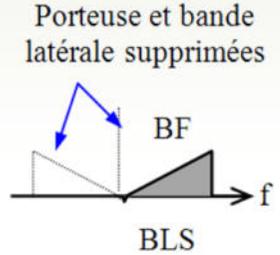
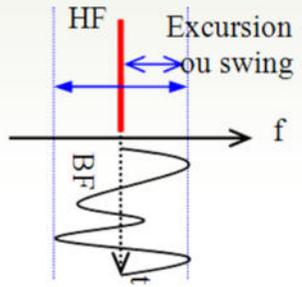
- Pour transporter une information grâce à ce signal, il faut le moduler en fonction de cette information.
- Moduler ce signal consiste à modifier une de ses trois grandeurs au rythme de l'information émise.

12-1) schématisation des différents types de modulations



Oscillogrammes dans les questions d'examen

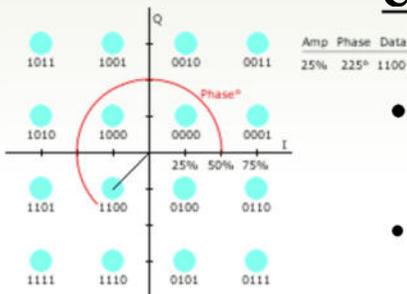
- Une modulation peut se représenter de deux manières :
 - en fonction du temps (**oscillogramme**):
 - en AM et CW, la partie grisée représente la HF ; 
 - en FM, la HF est représentée par un large rectangle grisé 
 - en fonction de la fréquence (**spectrogramme**):
 - moins courant (peu de questions recensées à l'épreuve de technique)

| Représentation | AM - A3E Modulation d'Amplitude | BLU - J3E Bande Latérale Unique | CW - A1A Télégraphie | FM - F3E Modulation de Fréquence |
|---|---|--|--|---|
| en fonction du temps/oscillogramme |  | La BLU ne peut pas être représentée en fonction du temps |  |  |
| en fonction de la fréquence spectrogramme |  |  | La CW ne peut pas être représentée en fonction de la fréquence |  |

12-1) schématisation des différents types de modulations

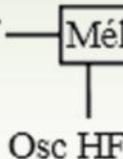
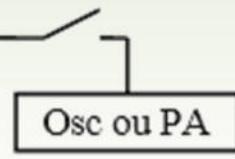
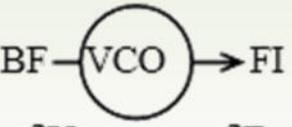


- Les **modes numériques** (*MGM : Modulation Générée par une Machine*) n'échappent pas à cette classification :
 - la **CW** est une modulation d'amplitude numérique à 2 états (*tout ou rien : j'émetts ou je n'émetts pas*)
 - le **FSK** (Frequency Shift Keying) est une fréquence modulée par une sous-porteuse contenant l'information numérique
 - *transmettre en AFSK sur un émetteur BLU équivaut à moduler en FSK*
 - le **PSK** (Phase Shift Keying) module la phase. Celle-ci peut prendre un nombre d'états possibles variable :
 - 2 états : 0 et π donnant du 2-PSK
 - 4 états : 0, $\pi / 2$, π et $3 \pi / 2$ donnant du 4-PSK
 - **combiner différents types de modulations** augmente le nombre d'états possibles (*qui sera toujours une puissance de 2*).
 - **exemple ci-contre** : *QAM16 = modulation de phase et d'amplitude permettant de coder 16 positions différentes (valence = 16)*
 - débit binaire (en bps) = nb de changement d'état par seconde (en bauds) \times valence
 - *le débit binaire est limité par la bande passante (Nyquist) et le rapport signal/ bruit (Shannon)*



12-2) modulateurs et démodulateurs

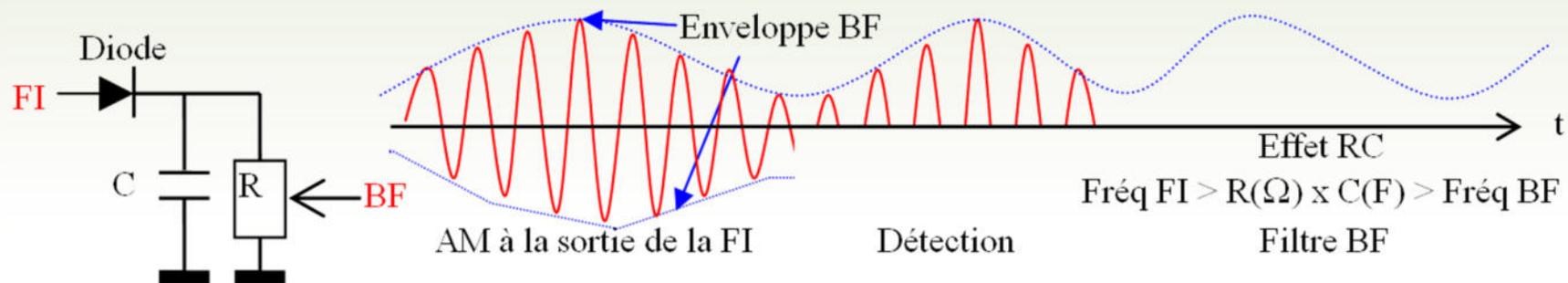
- Seuls les **noms des étages**, selon le type de modulation, et **quelques termes techniques** sont à connaître :

| | | AM | BLU | CW | FM |
|---------------|-------------------|---|--|---|--|
| Démodulateurs | Nom | Détection ou détecteur d'enveloppe | Oscillateur de battement de fréquence (BFO) et détecteur de produit (DP) ou mélangeur | | Discriminateur ou détecteur de pente |
| | Schéma synoptique | FI — Dét → BF | FI — DP ou Mél → BF  | | FI — Disc → BF |
| | Autres notions | Contrôle Automatique de Gain (CAG) | Fréquence BFO ≈ Fréquence FI | | Foster-Seeley ; Squelch ; limiteur et désaccentuateur |
| Modulateurs | Principe | la HF de l'oscillateur est mélangée à la BF | Le mélange HF +/- BF donne de la DBL qui est fortement filtrée pour former la BLU | Coupure de l'alimentation d'un étage ou entre les étages | La BF est appliquée à un VCO (oscillateur à réactance) |
| | Schéma synoptique | BF — Mél → FI  | BF — Mél éq → DBL → Q → FI  | +  | BF — VCO → FI  δU δF |
| | Autres notions | Taux de Modulation et surmodulation | Mélangeur équilibré et filtre à quartz (Q) | Piaulements et claquements | Indice de Modulation et Préaccentuateur |

- Voyons en détail ces notions par type de modulation

12-3) modulation d'amplitude (AM)

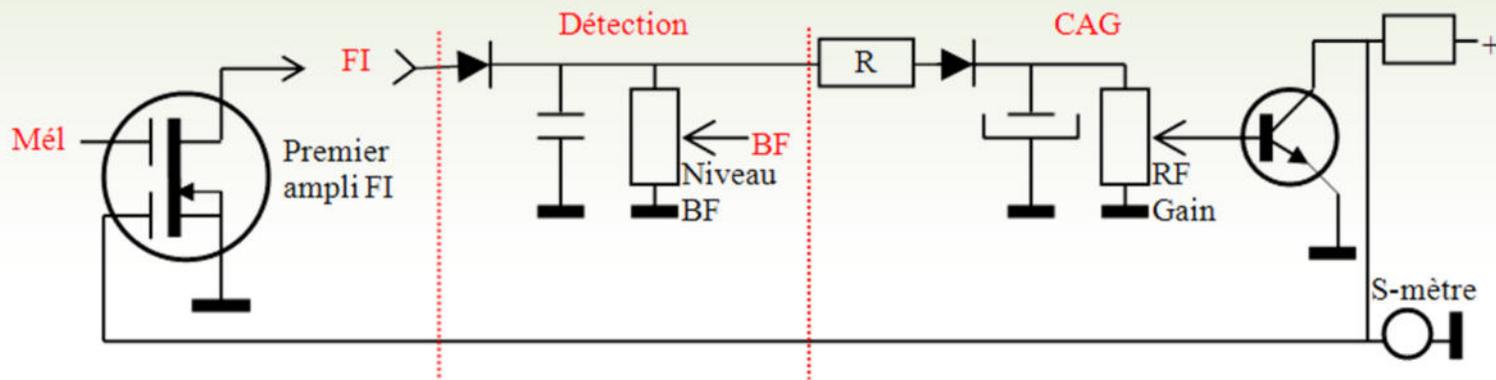
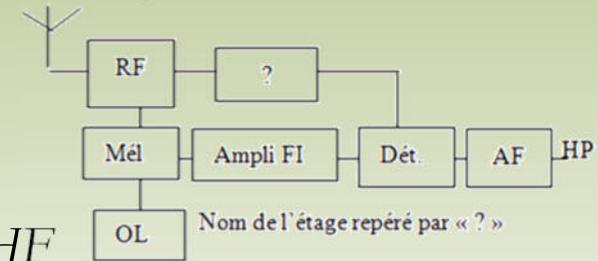
- La modulation d'amplitude (**AM**) reste la modulation la plus simple à mettre en œuvre tant en émission qu'en réception
- L'étage de démodulation se nomme détection (ou détecteur d'enveloppe) :
 - *il est constituée d'une diode suivie d'un circuit RC passe-bas pour filtrer (niveler) la H.F.*
 - *le niveau B.F. appliqué à l'amplificateur AF est ajusté sur le point variable du potentiomètre R*
 - *une diode au Germanium est préférable car sa tension de seuil (0,3 volt) restituera mieux l'enveloppe BF dans les creux*



voir aussi page **CNFRA** dans *Radio-REF* d'octobre 2011

12-3) modulation d'amplitude (AM)

- Le contrôle automatique de gain (**CAG**) est un dispositif qui permet d'obtenir le même niveau B.F. quelle que soit la force du signal H.F. à l'entrée du récepteur.
 - la tension à l'entrée de l'étage CAG est prélevée sur la détection à travers la résistance R.
 - la tension de sortie ajuste le gain d'un étage FI à transistor FET double porte.
 - la CAG peut aussi agir sur le premier étage HF comme dans le synoptique ci-contre où la CAG est l'étage repéré par « ? »*
 - c'est cette tension qu'indique le S-mètre du récepteur.



12-3) modulation d'amplitude (AM)

- La tension du signal AM en fonction du temps, $S(t)$, s'écrit ainsi :

Pas de question recensée à l'épreuve de Technique

$$S(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) \cdot [1 + K \cos(2\pi \cdot f \cdot t)]$$

- K = taux de modulation
 - P = tension crête de la porteuse sans modulation (ou $1/2$ de la tension maximum de sortie de l'amplificateur RF = B/2 du schéma de la page suivante)
 - F = fréquence de la porteuse
 - f = fréquence de la BF modulante
- L'AM peut être modulée de différentes façons :
 - en agissant sur la tension d'alimentation de l'étage RF (schéma 1)
 - en mélangeant HF et BF grâce à un MOS-FET (schéma 2)

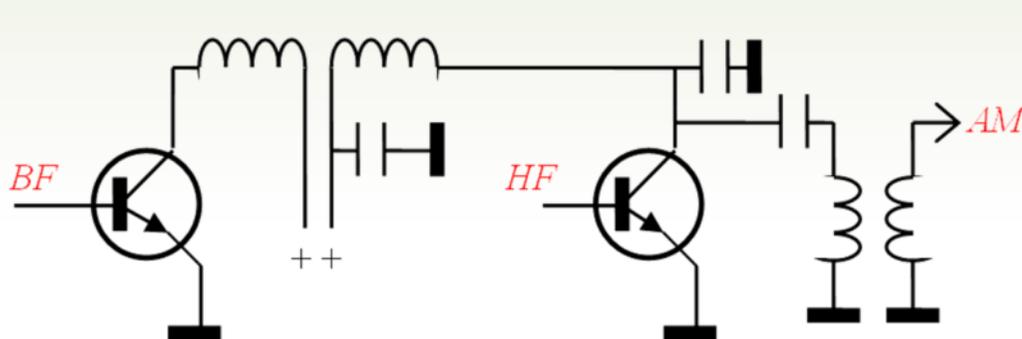


schéma 1

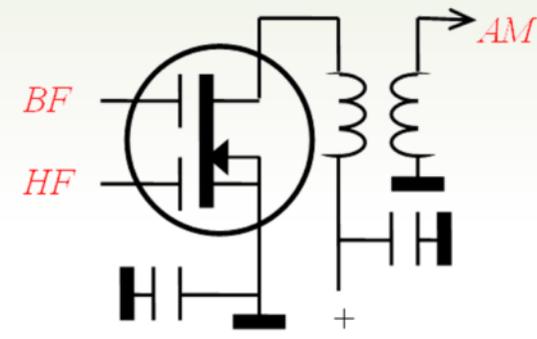
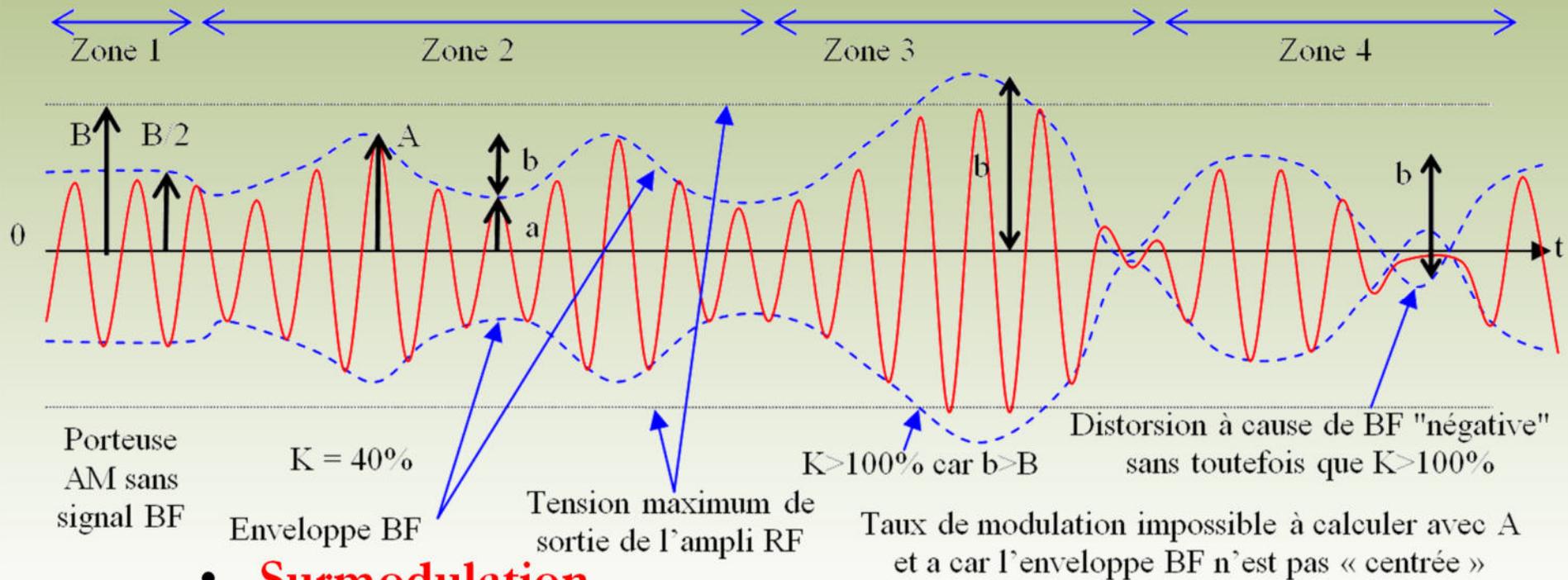


schéma 2

12-3) modulation d'amplitude (AM)

- **Taux de modulation**

$$K(\%) = (A - a) / (A + a) = b / B \text{ (zone 2)}$$



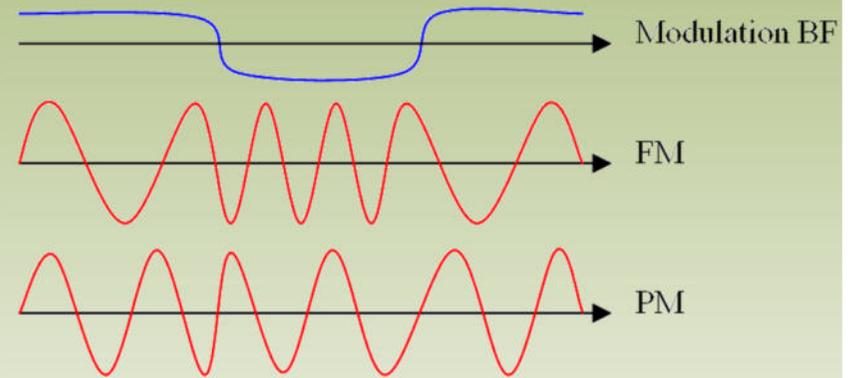
- **Surmodulation**

- lorsque l'enveloppe BF est écrêtée (zones 3 et 4)
 - pour éviter la surmodulation et optimiser le taux de modulation, un compresseur de modulation placé avant le modulateur atténue les pointes du signal BF alors que les creux sont, au contraire, amplifiés.

12-4) modulation de fréquence (FM)

- Les modulations de fréquence (**FM**) et de phase (**PM**) sont des modulations angulaires. Leurs caractéristiques sont très proches.

- les circuits de démodulation sont identiques
- nous parlons toujours de FM alors que nous avons souvent affaire à de la PM.



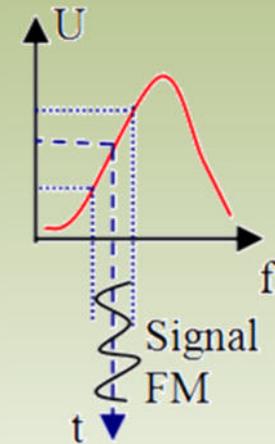
- L'étage de démodulation se nomme **discriminateur**
 - transforme les variations de fréquence HF en variations de BF.
 - *lorsque 2 signaux FM sont présents à l'entrée du démodulateur, seul le signal le plus fort sera démodulé (contrairement à l'AM et à la BLU)*

12-4) modulation de fréquence (FM)

- Il existe plusieurs types de discriminateur :

- détecteur de pente

- *est composé d'un filtre dont la fréquence de résonance est décalée par rapport au signal à démoduler*
- *la fonction de transfert du filtre transforme la variation de fréquence en variation de tension*
- *système très rudimentaire peu utilisé*



Pas de question recensée à l'épreuve de Technique

- discriminateur de type Travis (**FM**)

Modulation

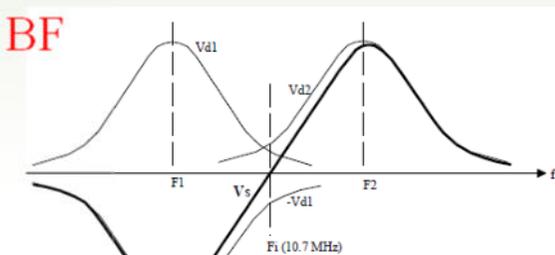
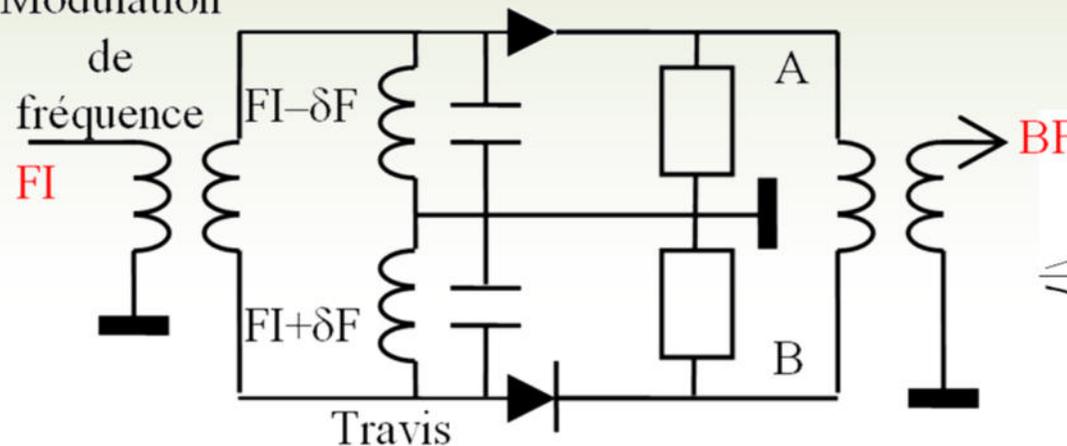
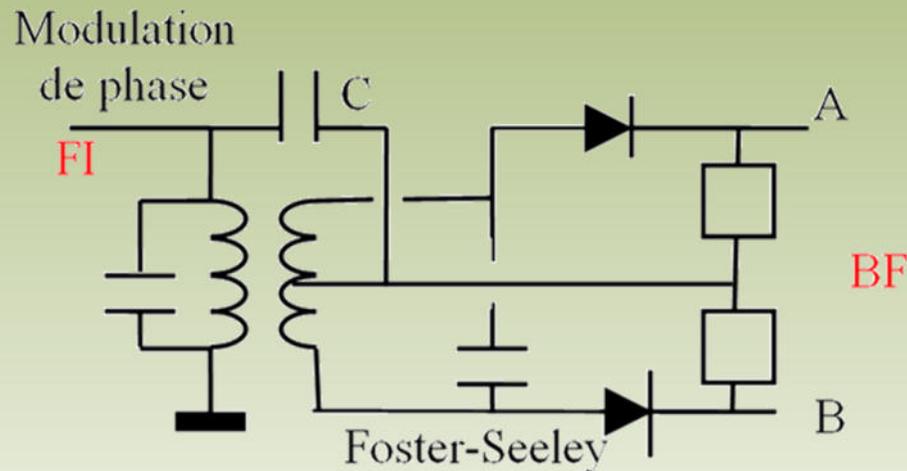


Fig. 8.22 : Caractéristique de transfert du discriminateur de Travis

12-4) modulation de fréquence (FM)

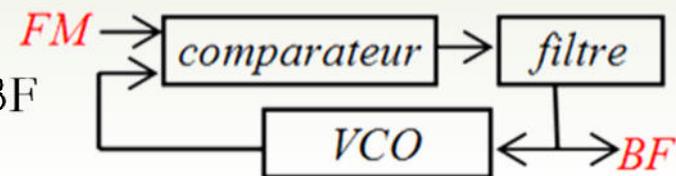
- discriminateur de type Foster-Seeley (**PM**)

Pas de question recensée à l'épreuve de Technique



- Les discriminateurs modernes utilisent souvent une boucle PLL :
 - le signal FM est comparé au signal HF issu du VCO.
 - après un filtre passe-bas, le signal issu du comparateur (qui est aussi le signal BF modulant) pilote la fréquence du VCO

Quelques questions (synoptique)



12-4) modulation de fréquence (FM)

- *La tension du signal FM en fonction du temps, $S(t)$, s'écrit ainsi :*

$$S(t) = \cos [2\pi.[F + M . \cos (2\pi.f.t)].t].P$$

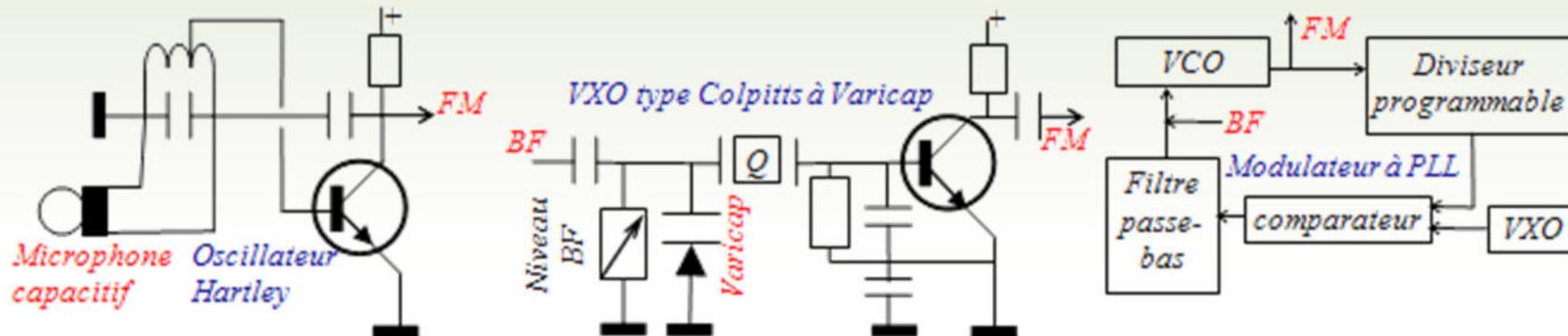
- *tandis que le même signal modulé en phase (PM) s'écrit ainsi :*

$$S(t) = \cos [2 \pi.F.t + M. \cos (2 \pi.f.t)].P$$

- M = niveau BF (déterminant l'indice de modulation)
- P = tension crête de la porteuse
- F = fréquence de la porteuse
- f = fréquence de la BF modulante
- *on voit que ces deux fonctions sont très proches l'une de l'autre : les oscillogrammes présentés au début du paragraphe le montrent bien.*
 - *le signal utilisé pour moduler de la PM est la dérivée du signal modulant utilisé pour générer de la FM.*

12-4) modulation de fréquence (FM)

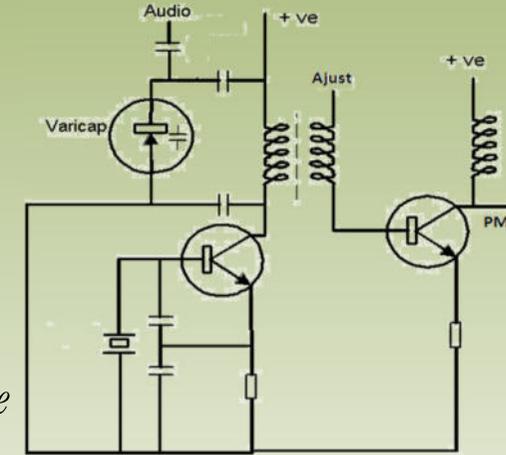
- Un modulateur FM est un oscillateur à réactance transformant les variations de la tension BF en variations de fréquence (*ou de phase*).
- *La réactance du modulateur peut être générée*
 - *par un micro capacitif (en parallèle sur un circuit bouchon) δU δF*
 - *par une diode Varicap (en série avec un Quartz, la capacité de la Varicap fait varier la fréquence de résonance du Quartz)*
 - *par une boucle PLL (la fréquence de coupure du filtre passe-bas sera très basse (< 10Hz)). La fréquence du VXO et le pas du diviseur seront adaptés à l'excursion souhaitée*



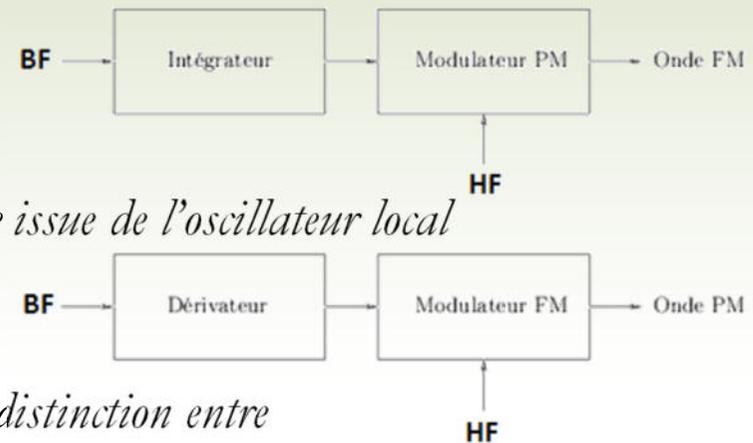
voir aussi page **CNFRA** dans Radio-REF de décembre 2011

12-4) modulation de fréquence (FM)

- les schémas précédents permettent de générer de la FM.
- la modulation de phase (**PM**) sera générée à partir de la dérivée du signal modulant
 - la Varicap est montée en série avec l'oscillateur (effet sur la phase en sortie) au lieu d'être montée en parallèle sur le quartz (effet sur la fréquence), voir 2^{ème} schéma de la page précédente



- cela revient aux synoptiques ci-contre avec :



- BF est le signal modulant
- HF est la porteuse non modulée issue de l'oscillateur local
- l'oreille humaine ne fera pas la distinction entre un signal FM et un signal PM mais la carte son d'un ordinateur la fera !

12-4) modulation de fréquence (FM)

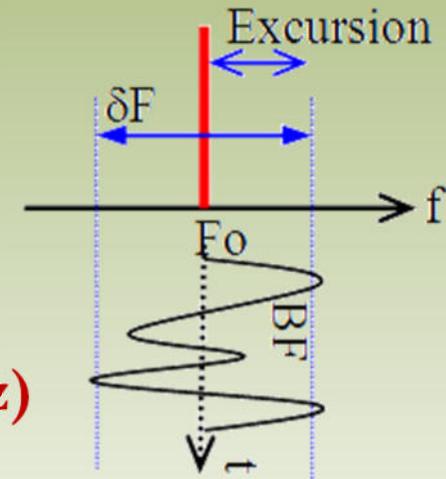
- L'**indice de modulation** (**m**) est le rapport obtenu en divisant

- l'excursion de fréquence (*soit la moitié de la bande passante du signal FM, δF*)
- par la fréquence maximum du signal modulant (BF)

$$m = \text{Excursion (Hz)} / \text{BF maxi (Hz)}$$

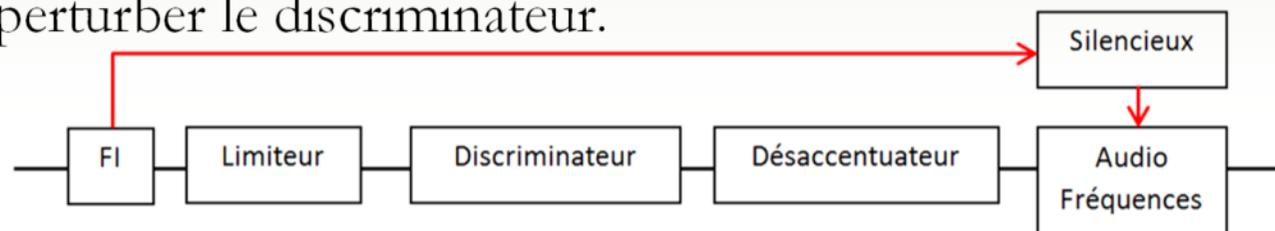
- *lorsque $m < 1$, on parle de NBFM*

- *le fait de passer le signal FM par un multiplicateur de fréquence change son excursion et son indice de modulation.*
 - *ainsi, un signal FM passant dans un doubleur de fréquence voit son excursion et son indice de modulation doubler*



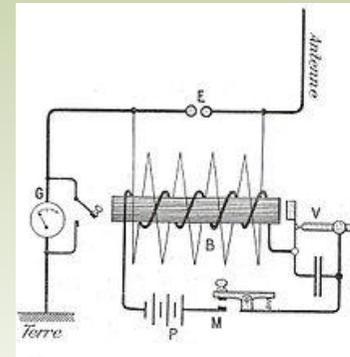
12-4) modulation de fréquence (FM)

- Lorsque l'indice de modulation est trop faible (<1) , la qualité de la transmission se dégrade (*bruit, surtout dans les aigus ; règle de Carson qui énonce que la largeur d'un signal FM ne peut être inférieure à 2 fois le signal BF maxi*). Pour réduire ce bruit, on renforce les aigus par deux filtres :
 - **En émission**, le **préaccentuateur** est situé avant le modulateur FM (*après l'ampli AF du microphone*)
 - **En réception**, le **désaccentuateur** suit le démodulateur FM et restitue la BF envoyée à l'étage d'amplification AF.
- En l'absence de signal sur son entrée ou en cas de fortes variations d'amplitude, le discriminateur génère du bruit.
 - pour éviter le souffle en l'absence de signal, on utilise un **sqelch** (ou **silencieux**) qui coupe l'alimentation d'un étage AF en l'absence de HF (*ou en cas d'un niveau HF trop faible*).
 - un circuit **limiteur** situé entre la FI et le discriminateur écrête les variations d'amplitude du signal FM dues aux parasites qui peuvent perturber le discriminateur.



12-5) manipulation par coupure de porteuse (CW)

- **CW** vient de l'anglais **Continuous Waves** (traduit en français par « ondes entretenues »).
 - *vers 1910, la technique de l'émission est passée de l'éclateur générant une onde amortie qui couvrait une gamme de fréquence très étendue à des oscillateurs générant une onde entretenue beaucoup plus pure. Ce terme est resté.*



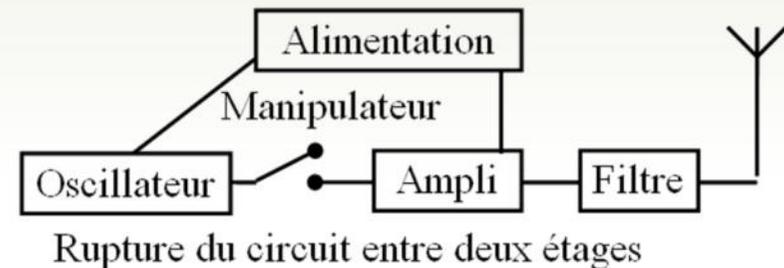
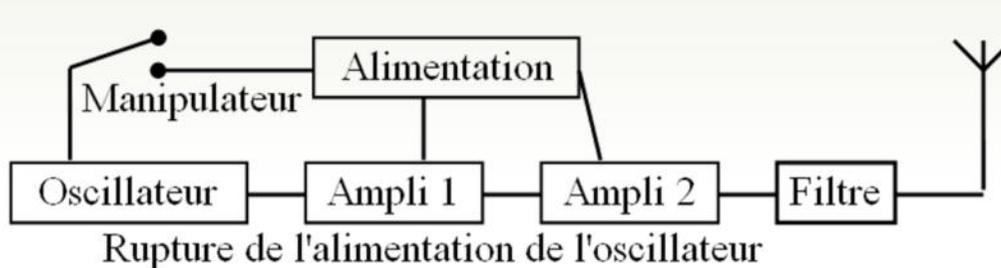
Émetteur à étincelles à bobine d'induction de Ruhmkorff (1900)

- La CW se démodule comme la BLU (*la différence entre la fréquence du BFO et la fréquence à recevoir génère un « battement » dont la fréquence est égale à la tonalité souhaitée qui est souvent autour de 800 Hz, voir §12-6)*)

12-5) manipulation par coupure de porteuse (CW)

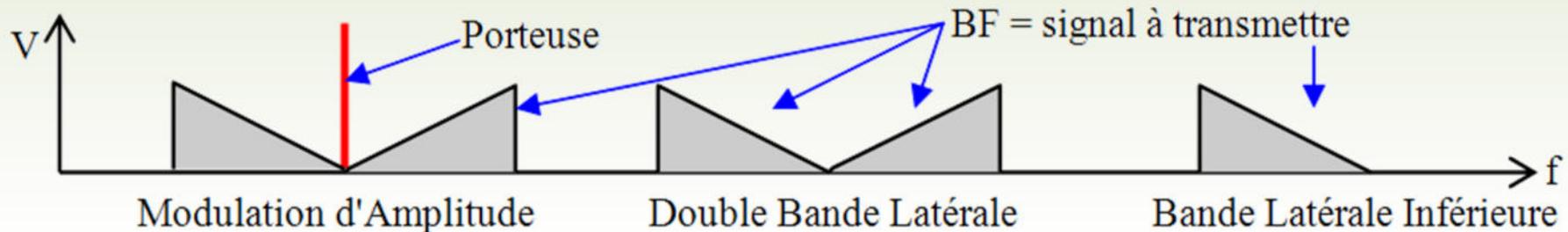


- La CW peut être **modulée** :
 - par **rupture d'alimentation** sur un ou plusieurs étages :
 - oscillateur
 - dans ce cas, la stabilité de l'oscillateur peut être détériorée ce qui génère des **piaulements** en réception
 - FI, étage d'amplification
 - amplificateur final
 - par **rupture de liaison** entre deux étages
 - dans ce cas, les variations d'impédance de charge peuvent générer des **claquements** en réception



12-6) bande latérale unique (BLU)

- La **BLU** est une forme de modulation d'amplitude
- En AM, si $K = 100\%$ (cas extrême), la tension de la porteuse est le double de celle des deux bandes latérales.
 - la porteuse contient les deux tiers de la puissance émise
 - les deux bandes latérales contiennent le reste.
 - sur 150 W émis et avec $K = 100\%$, la porteuse contient 100 W et chaque bande latérale contient 25 W.
 - la puissance des bandes latérales est donc au mieux 6 dB en dessous de la puissance de la porteuse (4 fois moindre).



- les deux bandes latérales ne sont pas les enveloppes BF situées au dessus et au dessous de la représentation de l'AM en fonction du temps

12-6) bande latérale unique (BLU)

- Développement de la formule décrivant la tension d'un signal AM en fonction du temps pour arriver à la formule décrivant la BLU
- on vient de voir que la tension du signal AM en fonction du temps, $S(t)$, s'écrit ainsi:

$$S(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) \cdot [1 + K \cos(2\pi \cdot f \cdot t)]$$

Porteuse
BF

avec K = taux de modulation et $P = 1/2$ de la tension de sortie maximum de l'amplificateur final.

- donc :

$$S(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) + P \cdot K \cdot [\cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)]$$

Porteuse
Bandes latérales

- on sait par ailleurs que : $\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$ donc :

$$S(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) + 0,5 \cdot P \cdot K \cdot [\cos(2\pi \cdot F \cdot t + 2\pi \cdot f \cdot t) + \cos(2\pi \cdot F \cdot t - 2\pi \cdot f \cdot t)]$$

Porteuse
BLS
BLI

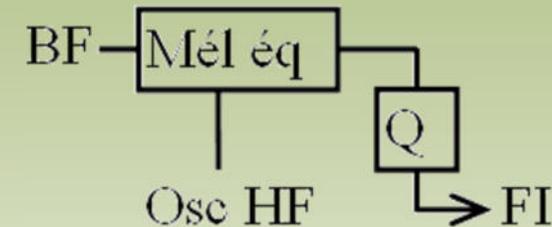
12-6) bande latérale unique (BLU)

- **Pour générer de la BLU**, on peut utiliser deux systèmes :

- un **mélangeur équilibré** suivi d'un **filtre à quartz**.

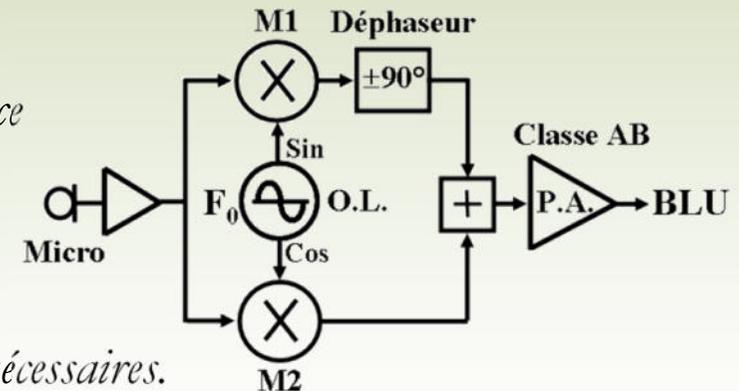
- le mélangeur équilibré génère de la **double bande latérale** (DBL = BLI + BLS)

- la bande latérale désirée est isolée grâce à un filtre à quartz



- modulation par **déphasage** des signaux HF et BF :

- le signal HF est scindé en deux sources déphasées de 90° et modulées par la source BF. Un des signaux HF modulé est ensuite déphasé de $+ ou - 90^\circ$ puis additionné au second signal HF modulé.



- deux déphaseurs de $+/- 90^\circ$ sont donc nécessaires.

- si le déphasage n'est pas parfait, la seconde bande latérale subsiste.

- la démonstration mathématique de cette technique dépasse largement le programme de l'examen et d'autres schémas de principe existent...

Pas de question recensée à l'épreuve de Technique

12-6) bande latérale unique (BLU)

- Les **mélangeurs équilibrés**

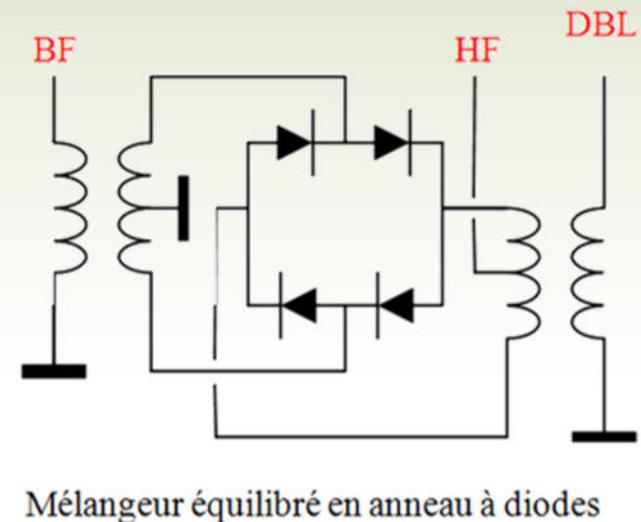
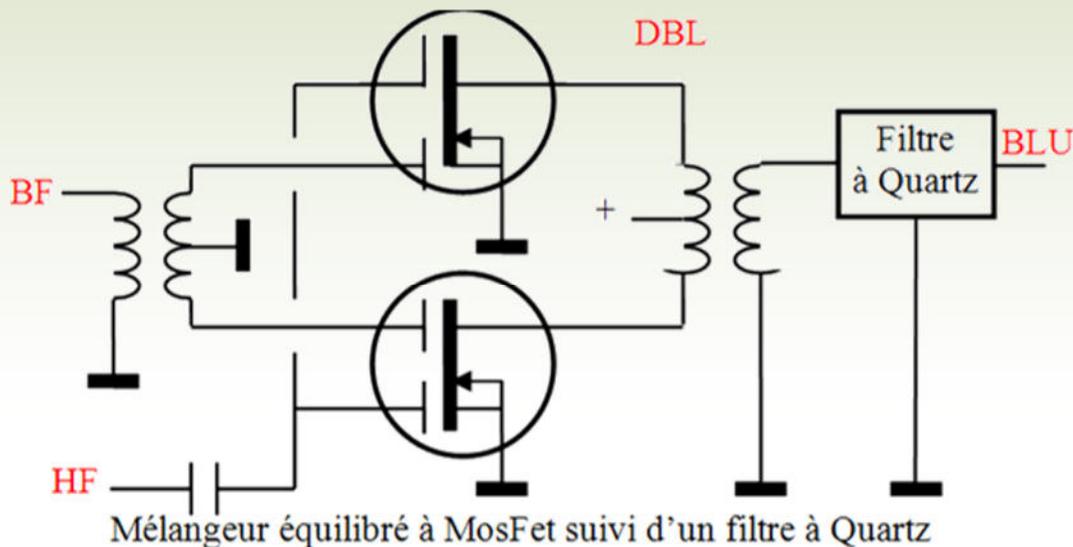
- deux montages sont courants :

- avec 2 transistors MOS-FET

- avec un pont de diodes en anneau (les diodes se suivent comme dans une boucle, montage différent du pont redresseur)

- sans signal BF, le transformateur de sortie est équilibré. Il n'y a donc pas de HF en sortie. Par contre, en présence d'un signal BF, l'ensemble est déséquilibré et la HF (DBL) passe.

Pas de question recensée à l'épreuve de Technique





12-6) bande latérale unique (BLU)

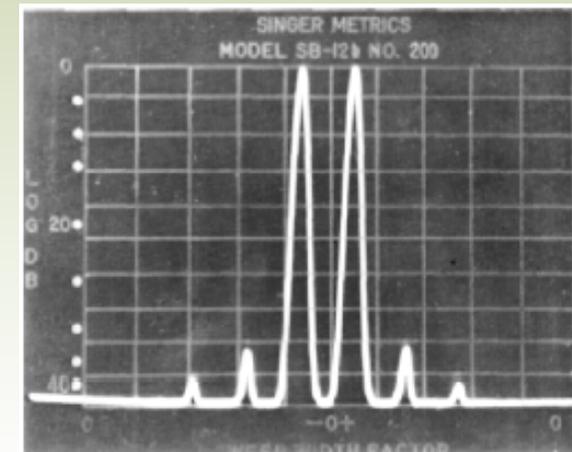
- A la suite du mélangeur équilibré, la bande latérale désirée est filtrée grâce à un **filtre à quartz**
 - un filtre à quartz est composé de condensateurs à quartz montés en série et taillés pour une fréquence proche de celle du signal à filtrer.
 - ce type de filtre possède des pentés très raides car un signal adjacent à 200 Hz (*écart entre la BLI et la BLS*) doit pouvoir être ramené à -60 dB par rapport au signal utile





12-6) bande latérale unique (BLU)

- Le **générateur deux tons** permet de vérifier la linéarité de l'émetteur :
 - deux signaux BF sinusoidaux, de même niveau et non harmoniques (par exemple : 900 et 1700 Hz) sont appliqués à l'entrée de l'émetteur
 - un analyseur de spectre, branché à la sortie de l'émetteur, ne devra faire apparaître
 - aucune distorsion de fréquences (les deux signaux auront le même niveau)
 - ni aucun autre signal parasite, signe du manque de linéarité d'un étage
 - *ci-contre, les 2 signaux issus du générateur 2 tons ont le même niveau de puissance mais il y a 2 signaux parasites de chaque côté (le plus fort à -33 dBc environ (distorsion harmonique du 3^{ème} ordre) et le second à -40 dBc (5^{ème} ordre), voir les distorsions harmoniques au §7.4)*





12-6) bande latérale unique (BLU)

- Le **BFO** (**Oscillateur de Battement de Fréquence**) permet de **démoduler la CW et la BLU** .
 - le BFO est un oscillateur fixe qui génère une fréquence proche de la fréquence à démoduler.
 - il **rétablit la porteuse supprimée** à l'émission pour générer de l'AM ou une note audible en CW.
 - le mélangeur du BFO est suivi d'une détection AM (ensemble formant un **détecteur de produit**)



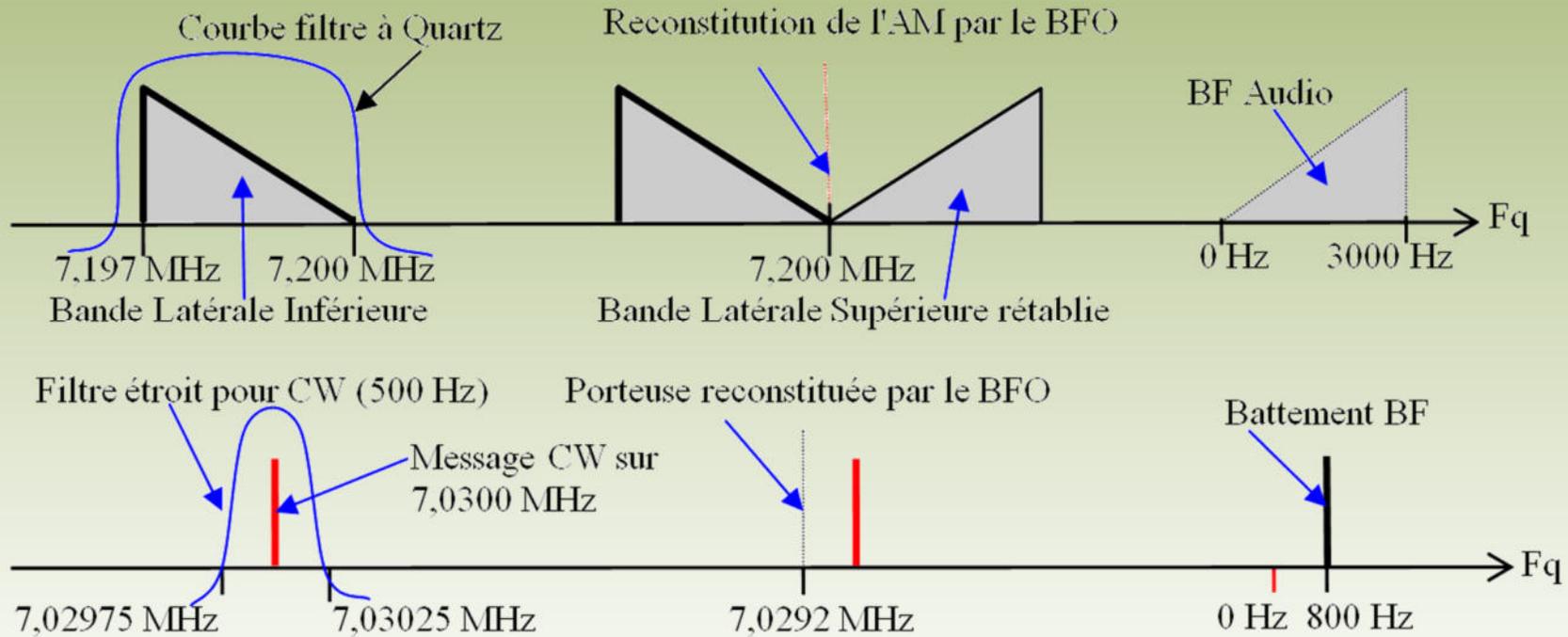
Fréquence BFO \approx Fréquence FI



12-6) bande latérale unique (BLU)

- La **démodulation de la BLU** et de la CW

Démodulation BLU
Démodulation CW

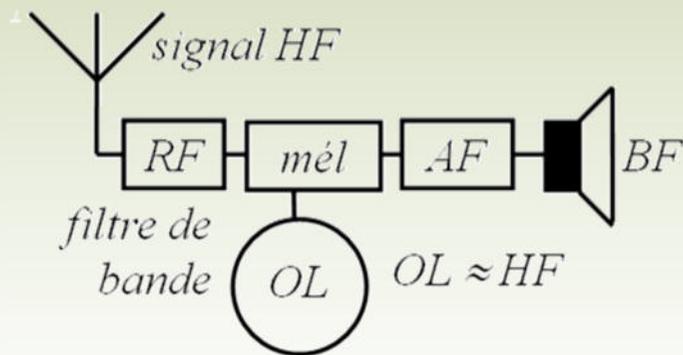


- dans ces schémas, le spectre BF de la BLU est représenté par un triangle ce qui permet de différencier le bas et le haut du spectre BF (0 Hz et 3000 Hz) mais cette représentation ne préjuge pas de la puissance du signal HF ou BF aux fréquences indiquées.
- en BLU comme en CW, la fréquence affichée par l'émetteur est la fréquence de la porteuse
 - en BLU, il n'y a pas d'émission sur la fréquence affichée (7,200 MHz)
 - alors qu'en CW, l'émission se fait sur la fréquence affichée (7,030 MHz)

12-6) bande latérale unique (BLU)

- Dans un **récepteur à conversion directe**, la fréquence de l'oscillateur local est proche de la fréquence à recevoir.
 - *le filtre de bande (étage RF) est suivi d'un mélangeur à la sortie duquel on trouve un signal issu des bandes latérales, qui est le signal modulant lui-même (translation en bande de base).*
 - *le démodulateur et les étages FI ont disparu ainsi que les problèmes liés à la Fréquence Intermédiaire (notamment la fréquence image).*
 - *ce récepteur simple à mettre en œuvre nécessite un amplificateur AF à grand gain et ne démodule que des signaux modulés en amplitude (AM, BLU ou CW, principe assimilé au BFO).*

Pas de question recensée à l'épreuve de Technique



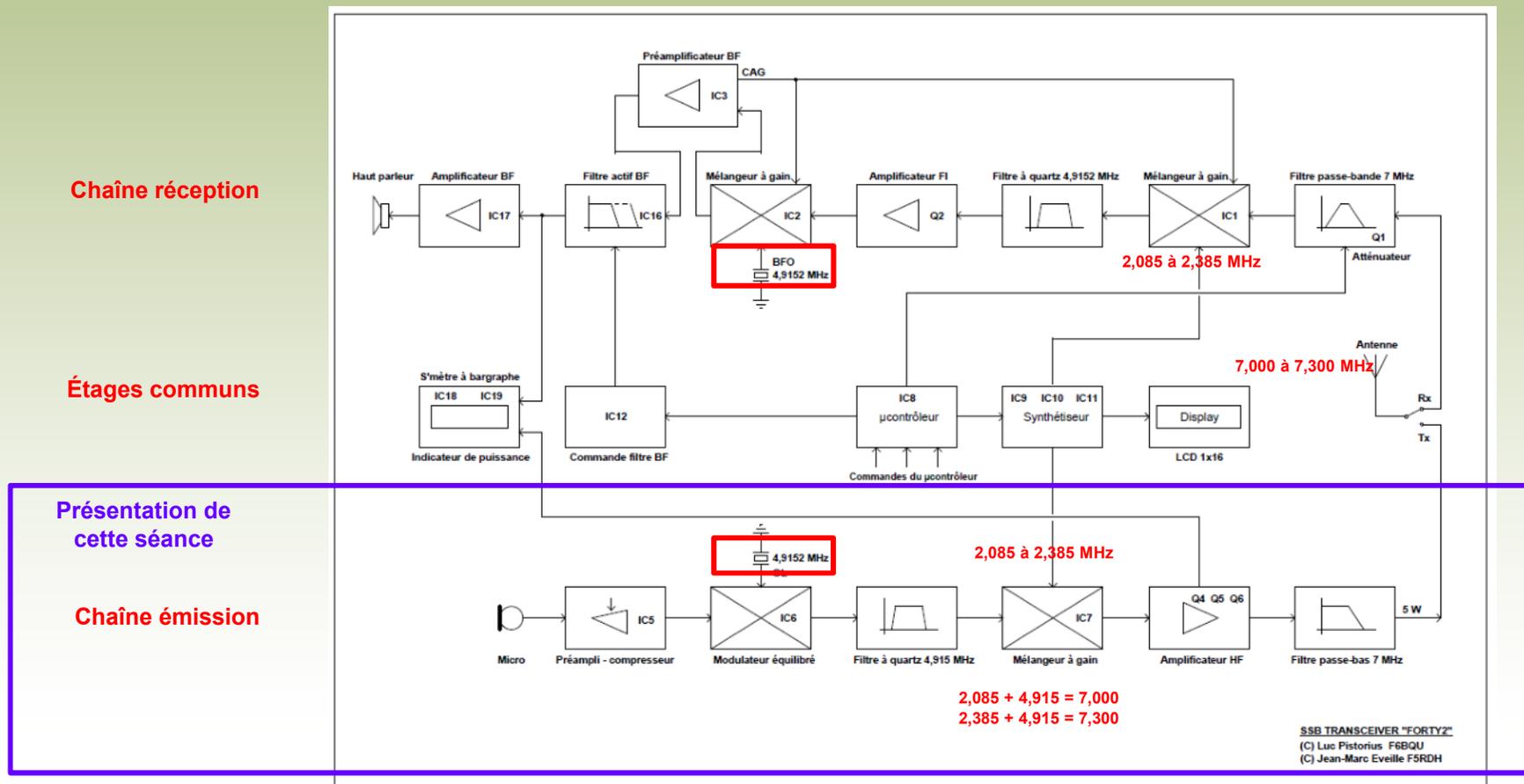
- *pour les modulations angulaires (en FM et PM), le signal AF sera traité numériquement (démodulateur I-Q et traitement du signal en bande de base via la carte son d'un ordinateur par exemple) avant d'être appliqué au haut-parleur (voir aussi vidéo **Tech11** et § 11.2 du cours).*

Le montage de la soirée

Le transceiver FORTY (2ème partie)



- Rappel du synoptique présenté lors de la dernière séance
 - URL du synoptique présenté : <http://f6kgl.free.fr/Forty2-synopt.pdf>



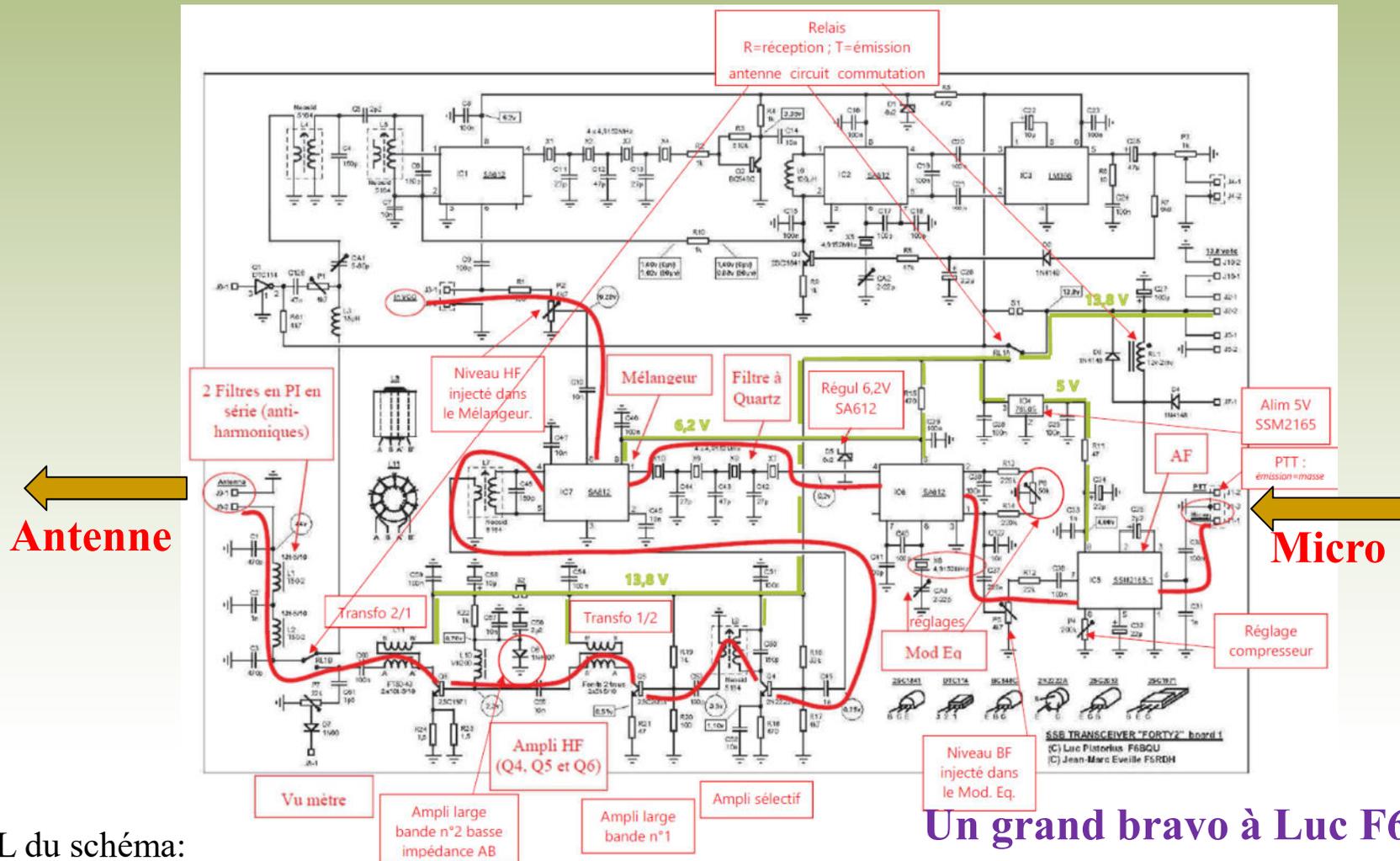
Lien vers la page du FORTY : <http://lpistor.chez-alice.fr/forty2s.htm>

Le montage de la soirée

Le transceiver FORTY (2ème partie)



- La partie Émission BLU du Forty2 (<http://lpistor.chez-alice.fr/forty.htm>)



URL du schéma:

<http://f6kgl.free.fr/mp3/EmetteurForty2.pdf>

**Un grand bravo à Luc F6BQU
 pour son superbe travail !**

Radio-Club de la Haute Île



F5KFF / F6KGL

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

Le cours de F6KGL

était présenté par F6GPX

Bon week-end à tous et à la semaine prochaine !

**Retrouvez-nous tous les vendredis soir au Radio-Club
de la Haute Île à Neuilly sur Marne (93) F5KFF-F6KGL,
sur 144,575 MHz (FM) ou sur Internet.**

Tous les renseignements sur ce cours et d'autres documents sont disponibles sur notre site Internet, onglet "*Les cours*" puis "*Certificat Radioamateur*"

f6kgl.f5kff@free.fr

<https://www.f6kgl-f5kff.fr>