



La modulation de fréquence



Edwin H. Armstrong



Cygne de la toundra équipé d'un émetteur de télémétre



- 1- Structure d'un système de communication radio
- 2- Les différents types de modulations
- 3- Principe de la modulation FM
- 4- L'inventeur de la FM : Edwin H. Armstrong
- 5- Histoire de la radiodiffusion FM
- 6- Les modulations angulaires
- 7- Production d'un signal FM
- 8- Excursion en fréquence
- 9- Indice de modulation
- 10- Spectre d'un signal FM
- 11- Les fonctions de Bessel
- 12- Exemple de spectre de signal FM
- 13- Porteuse FM modulée par un signal analogique
- 14- Puissance transportée par un signal FM
- 15- Structure d'un émetteur FM
- 16- La préaccentuation du signal modulant
- 17- Modulateur FM à varicap
- 18- Modulateur FM à quartz
- 19- Le multiplicateur de fréquence
- 20- Exemple d'émetteur FM à 49 MHz
- 21- Modulateur FM à boucle à verrouillage de phase
- 22- Emetteur pour la bande FM (88 à 108 MHz)
- 23- Le récepteur FM
- 24- L'étage limiteur
- 25- Structure interne d'in ampli fi - limiteur
- 26- Les discriminateurs à filtres
- 27- Le discriminateur de Foster-Seely
- 28- Structure du démodulateur à quadrature
- 29- Fonctionnement du démodulateur à quadrature
- 30- Exemple de montage ampli fi - démodulateur
- 31- Démodulateur FM à PLL
- 32- Les démodulateurs FM et le bruit
- 33- L'émission FM stéréophonique : le codeur
- 34- Exemple de codeur stéréophonique
- 35- L'émission FM stéréophonique : le décodeur
- 36- La modulation par un signal numérique
- 37- Diagramme de l'oeil d'un signal binaire
- 38- La modulation bi-fréquence ou FSK
- 39- Modulation FSK par un signal binaire filtré
- 40- Exemple de modulation FSK : diagramme de l'oeil
- 41- Exemple de modulation FSK : spectres
- 42- Les modulations MSK et GMSK
- 43- Exemples et illustrations

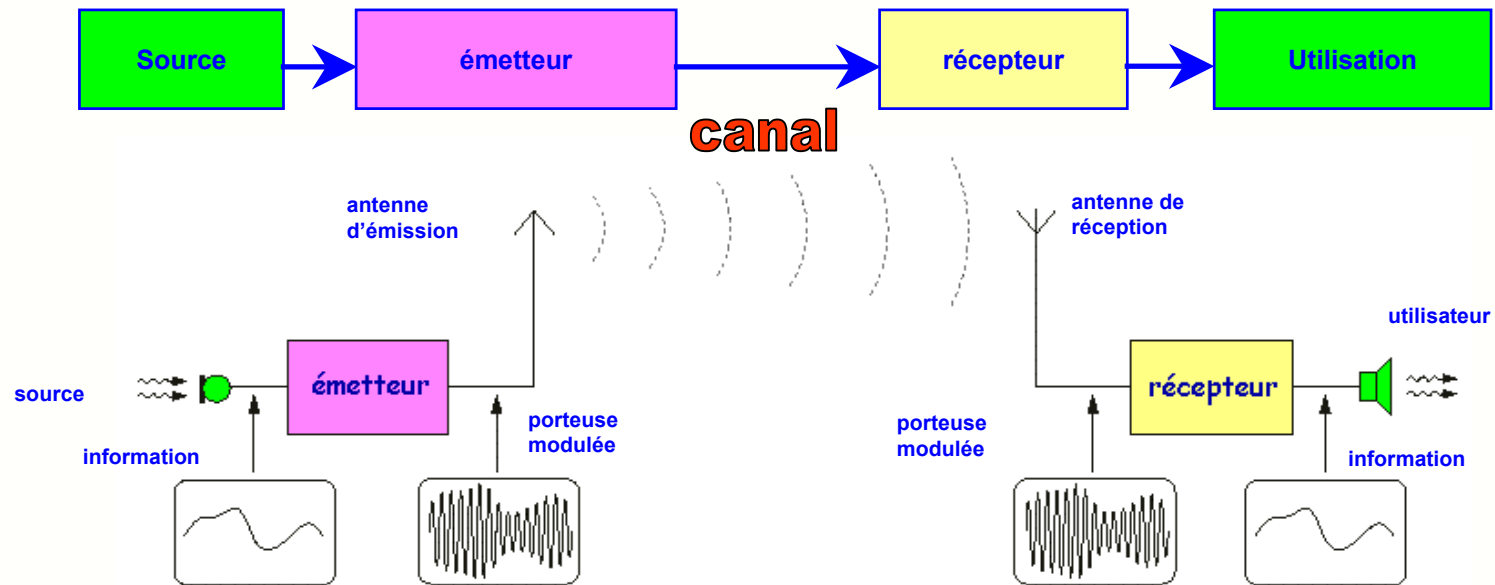




1- Structure d'un système de communication radio



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



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



2- Les différents types de modulations

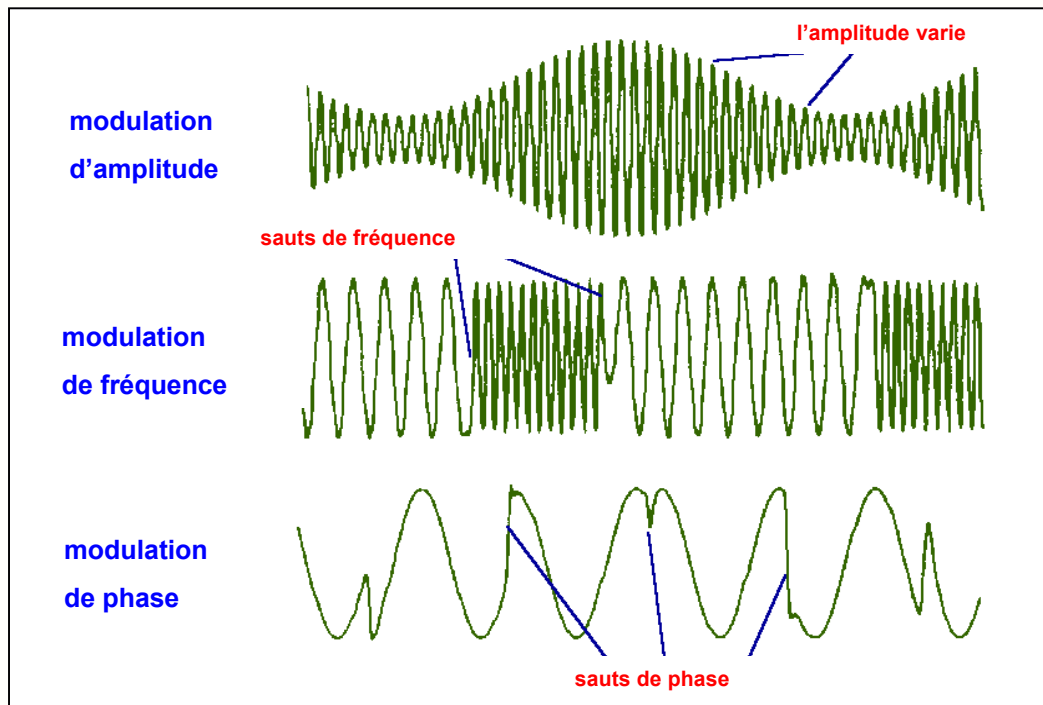


L'expression générale d'un signal sinusoïdal est :

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

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

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



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

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



3- Principe de la modulation FM



Pour produire un signal modulé en fréquence, il faut :

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

La fréquence instantanée de la porteuse modulée varie avec $s(t)$:

$$f(t) = f_o + k \cdot s(t)$$

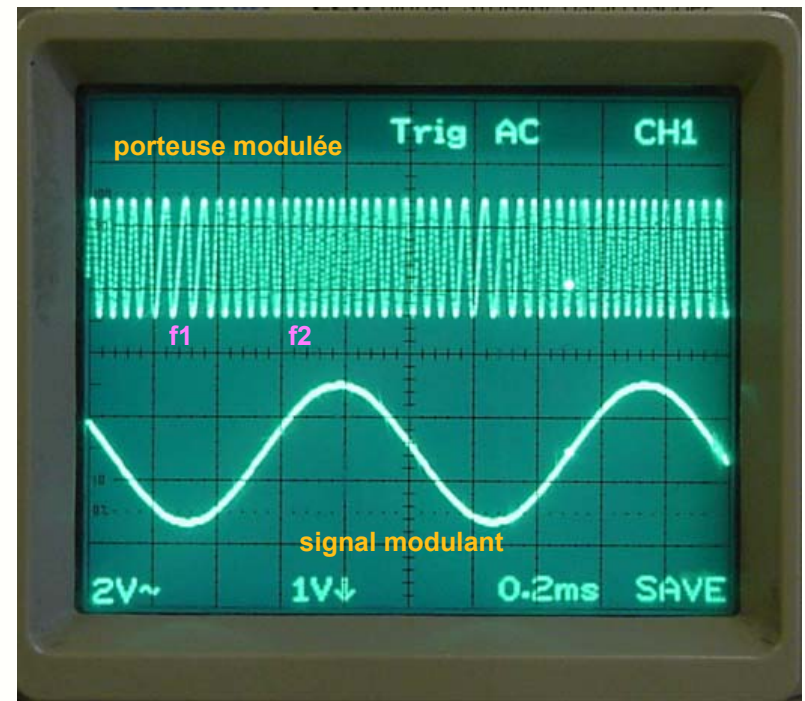
Les principales caractéristiques du signal FM sont :

- l'amplitude de la porteuse reste constante
- si $s(t)=0$, la porteuse émise est sinusoïdale de fréquence f_o
- si $s(t) < 0$, la fréquence f_1 de la porteuse est inférieure à f_o
- si $s(t) > 0$, la fréquence f_2 de la porteuse est supérieure à f_o
- la variation de fréquence par rapport à f_o s'appelle la déviation

Remarque :

Quand on parle de la **fréquence d'émission** d'un émetteur FM, on parle toujours de la fréquence f_o de la porteuse non modulée :

- l'émetteur de France-Inter émet à Mulhouse sur 95,7 MHz
- pendant un silence, il émet une sinusoïde à $f_o=95,7$ MHz
- modulé par la parole ou la musique, il émet une sinusoïde dont la fréquence est légèrement supérieure ou inférieure à f_o



4- L'inventeur de la FM : Edwin H. Armstrong



La FM a été mise au point en 1933 par **Edwin H. ARMSTRONG** qui a lutté toute sa vie pour son développement, fortement freiné à cause des intérêts financiers de l'entreprise RCA dans la radiodiffusion AM.

- 1890 – naissance à New-York City le 18 décembre
- 1912 – il invente le circuit à **réaction** qui donne des montages sélectifs à fort gain rendant possibles les liaisons à longue distance
- 1912 – un jeune télégraphiste **David SARNOFF** capte le SOS du Titanic et permet de sauver la vie de 865 passagers du Titanic
- 1917 – Armstrong invente, en même temps que le français L. Lévy, le **récepteur superhétérodyne** (à changement de fréquence)
- 1922 – invention du **récepteur à super-réaction**, technique qui n'est plus très utilisée aujourd'hui
- 1922 – Marion MacInnis est secrétaire de **David SARNOFF** devenu directeur du grand groupe **Radio Corporation of America**
- 1923 – Edwin tombe amoureux de Marion et construit pour elle, en cadeau de mariage, le **premier récepteur AM portable**
- 1933 – Armstrong met au point la **modulation de fréquence**, bien plus performante que la AM



Edwin H. Armstrong



David Sarnoff

Marion et Edwin en voyage de noces à Palm Beach (1/12/1923).
Edwin accorde le premier récepteur « portable », construit et offert en cadeau de mariage à sa jeune épouse.



- 1933 à 1948 – Armstrong se bat dans d'interminables et coûteux procès contre RCA qui lui vole ses inventions
- 1939 – il démarre la **première émission FM**, le public est enthousiasmé par la qualité des émissions
- 1941 – il autorise, sans compensation financière, l'utilisation de ses brevets par le Gouvernement US durant la guerre 39-45
- 1945 – RCA fait voter une loi qui déplace la bande FM de 44-50 MHz à 88-108 MHz, ce qui rend tous les récepteurs FM obsolètes
- 1952 – il développe, avec John Bose, la technique des **transmissions FM stéréophoniques** encore utilisée aujourd'hui
- 1954 – ruiné par ses procès, quitté par sa femme Marion, il se suicide le 1er février à New York City



5- Histoire de la radiodiffusion FM



Une bande dédiée à la radiodiffusion FM allant de 88 à 108 MHz a été définie de façon internationale en 1945.

Avantages de la FM sur la AM :

- moins d'interférences avec d'autres stations
- moins sensible aux parasites atmosphériques
- pas de problème de surmodulation
- respecte la dynamique du signal musical
- réception de toutes les stations avec le même volume sonore



Premier récepteur Sony
AM/FM à transistors (1958)

- le **premier programme** a été diffusé à Paris le **29 mars 1954** depuis un émetteur situé rue de Grenelle, remplacé en 1959 par un émetteur de 12 kW sur la Tour Eiffel
- l'année 1963 voit la naissance des trois stations d'État : France Musique, France Culture et France Inter
- les **premières émissions en stéréo** ont lieu en 1969 (France Musique)
- la première « **radio libre** » française **Radio Campus à Lille** démarre ses émissions en 1969 et entraîne rapidement l'éclosion de nombreuses stations aux quatre coins de France, souvent revendicatrices voire politisées
- l'ampleur prise par le phénomène finit par faire réagir l'État : saisies, traductions en justice contraignent les pirates à changer sans cesse de lieu d'émission et de fréquence pour échapper aux policiers
- après son élection, **François Mitterrand** autorise les radios libres à émettre en leur interdisant cependant la publicité, une trop forte puissance d'émission et la constitution de réseaux
- les restrictions concernant les recettes publicitaires ont été partiellement levées depuis



6- Les modulations angulaires



La fréquence instantanée de la porteuse modulée FM s'écrit :

$$f(t) = f_0 + k \cdot s(t)$$

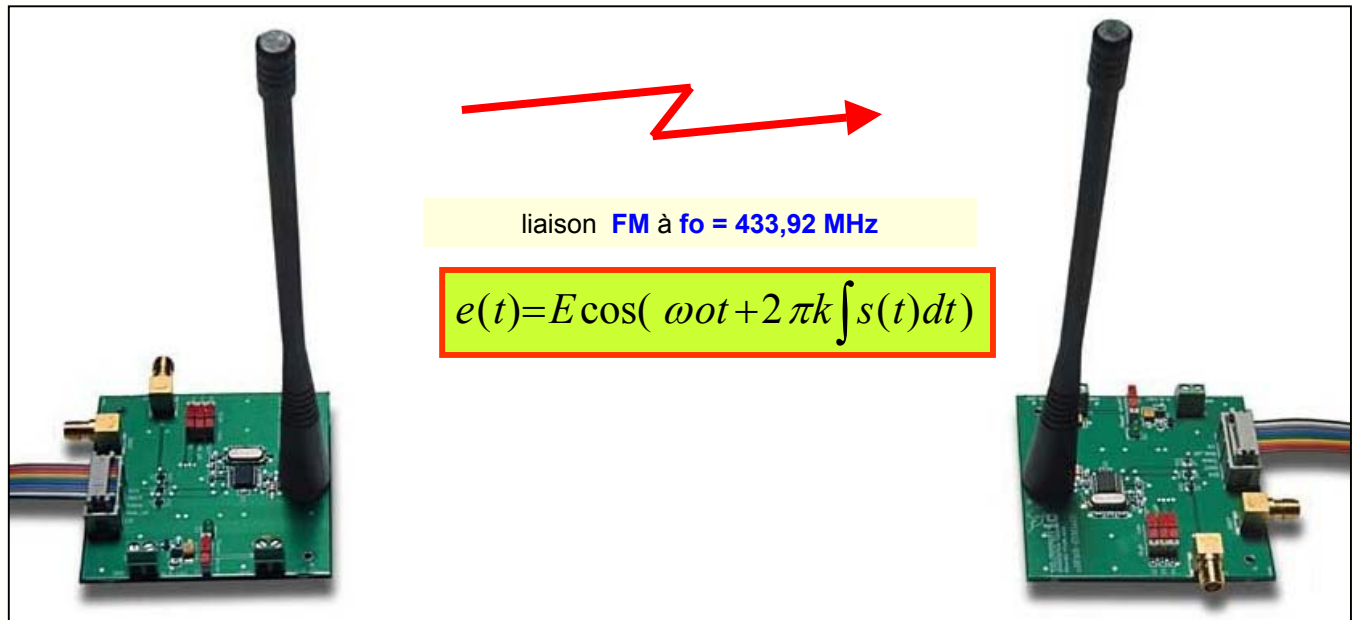
▪ on passe aisément de la fréquence à la pulsation instantanée :

$$\omega(t) = 2\pi \cdot f(t) = \omega_0 + 2\pi k \cdot s(t)$$

▪ puis à la phase en intégrant la pulsation :

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t + 2\pi k \int s(t) dt$$

▪ parce que l'information $s(t)$ est inscrite dans la phase $\theta(t)$ (ou **angle**), on dit que la FM est une **modulation angulaire**



Remarques :

- la **modulation de phase PM** utilisée pour les transmissions numériques, est aussi une modulation angulaire
- si on intègre le signal BF avant de moduler l'émetteur PM, la modulation de phase devient une modulation de fréquence

$$e(t) = E \cos(\omega_0 t + a \cdot s(t))$$

signal PM

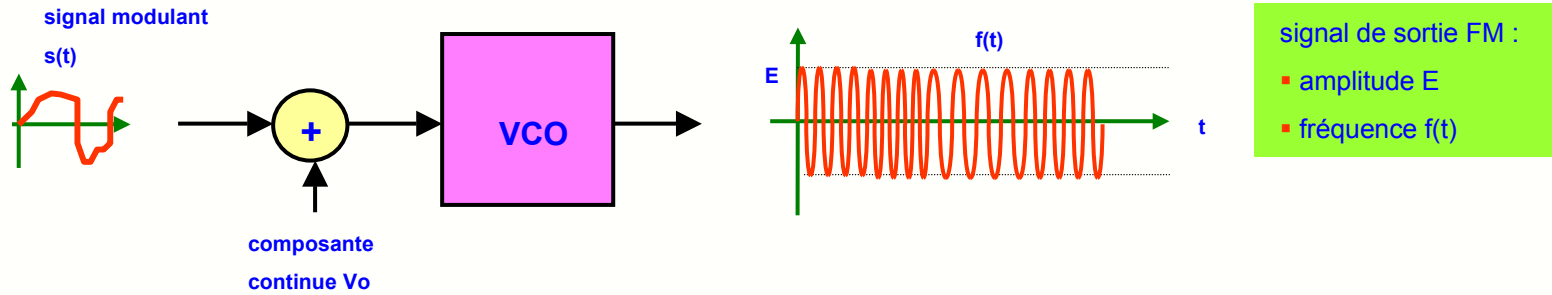


7- Production d'un signal FM



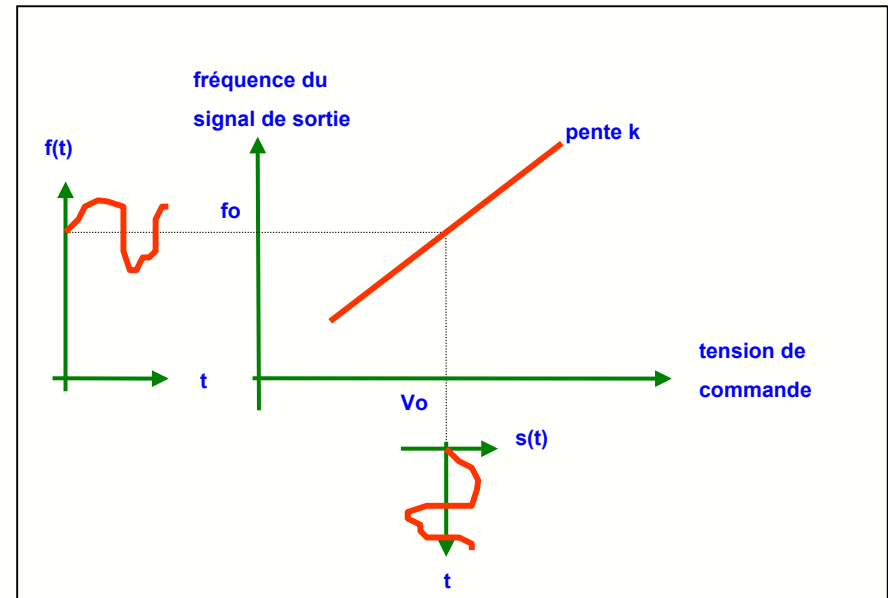
Pour émettre en modulation de fréquence il faut produire un signal sinusoïdal d'amplitude constante E et de fréquence $f(t)$ variable.

- ce signal est toujours produit par un oscillateur commandé en tension (Voltage Commanded Oscillator)
- une polarisation continue V_0 fixe le point de fonctionnement à $f(t) = f_0$
- en superposant le signal basse-fréquence $s(t)$, on fait varier la fréquence : $f(t) = f_0 + k \cdot s(t)$



Remarques :

- la fréquence d'émission f_0 dépend de la tension continue V_0
- pour que la variation de fréquence soit proportionnelle à $s(t)$, le VCO doit avoir une caractéristique linéaire autour de f_0
- la stabilité de la fréquence d'émission f_0 dépend de la stabilité de V_0 et des dérives thermiques du VCO
- l'utilisation d'un VCO stabilisé par un quartz ou mieux encore d'un synthétiseur permet de résoudre ce problème de stabilité.





8- Excursion en fréquence



Si on admet que le signal modulant ne dépasse pas S_{max} en valeur absolue, alors :

- la fréquence de la porteuse varie entre

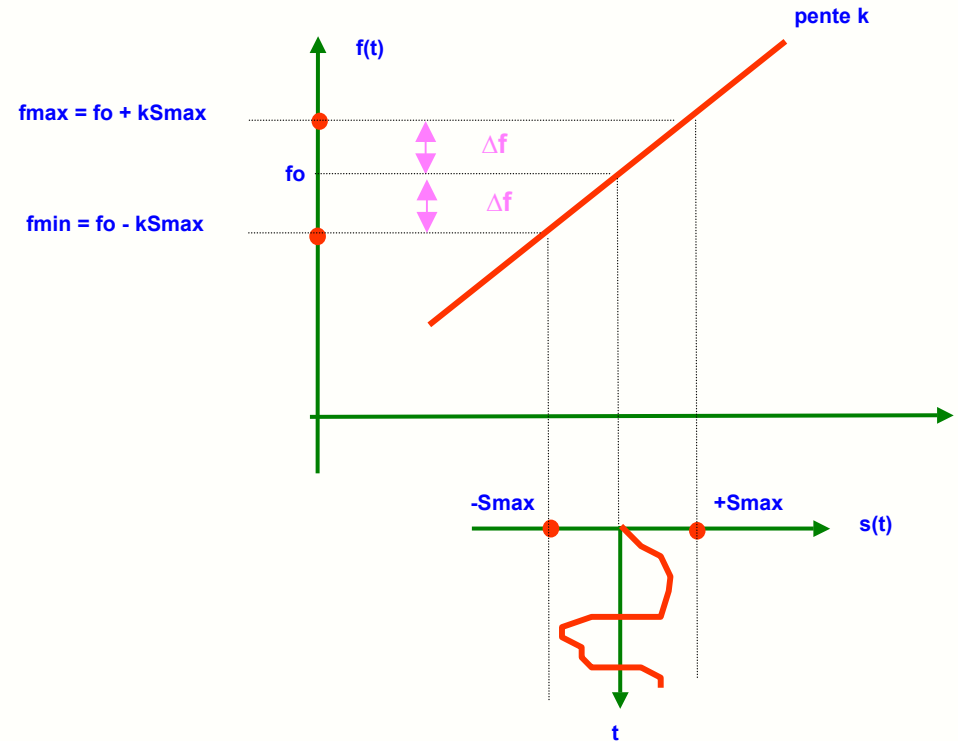
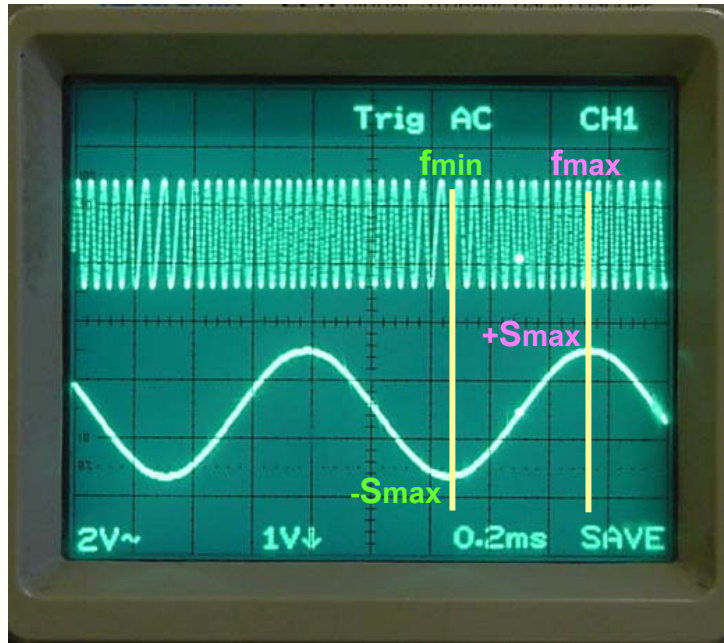
$$f_{min} = f_0 - k \cdot S_{max}$$

et

$$f_{max} = f_0 + k \cdot S_{max}$$

- la quantité kS_{max} est appelée **excursion en fréquence** et est notée Δf

$$\Delta f = \pm k \cdot S_{max}$$



Exemple :

- l'émetteur France-Inter Mulhouse est à $f_0 = 95,7$ MHz, et l'excursion standard en radiodiffusion est $\Delta f = +$ ou $- 75$ kHz
- la fréquence du signal émis varie donc entre $f_{max} = 95,775$ MHz et $f_{min} = 95,625$ MHz
- la valeur S_{max} n'est pas une limite absolue et est dépassée lors des pointes de modulation (musique *fff*, percussions ...)



9- Indice de modulation



Plaçons nous dans le cas particulier où le signal modulant $s(t)$ est sinusoïdal de fréquence F :

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

- la fréquence instantanée s'écrit :

$$f(t) = f_0 + k \cdot s(t) = f_0 + k a \cos(\Omega t) = f_0 + \Delta f \cdot \cos(\Omega t)$$

- la phase se calcule facilement :

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t + 2\pi \Delta f \frac{\sin(\Omega t)}{\Omega}$$

- et la porteuse modulée a pour expression :

$$e(t) = E \cos(\theta(t)) = E \cos\left(\omega_0 t + \frac{\Delta f}{F} \sin(\Omega t)\right)$$

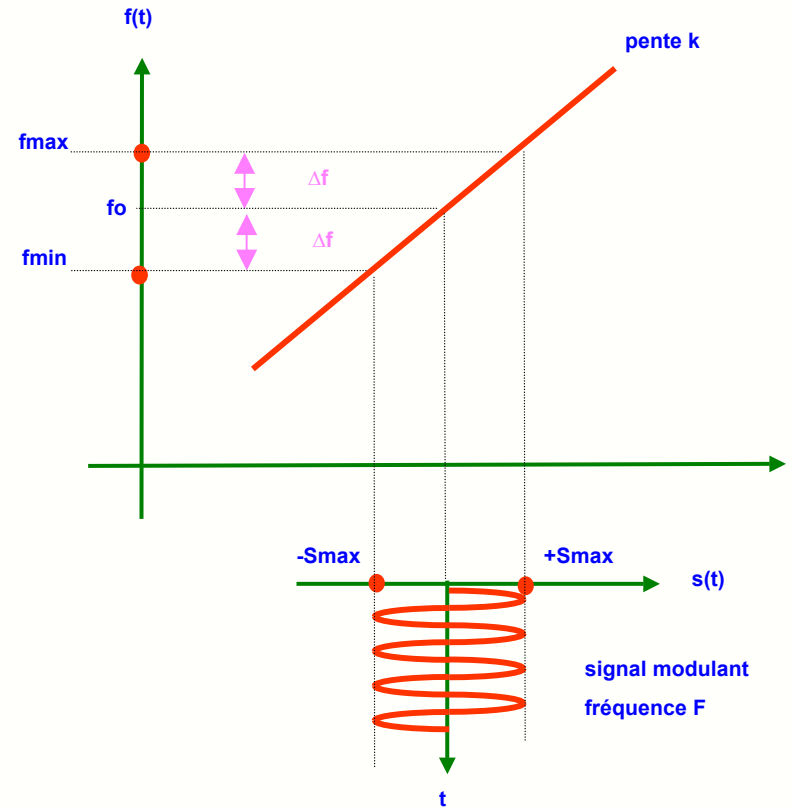
On définit l'indice de modulation par :

$$m = \frac{\Delta f}{F}$$

Pour une fréquence modulante F donnée, l'indice de modulation augmente donc avec l'excursion **en fréquence**.

Exemples :

- les émissions FM dans la **bande CB** sont dites à **faible excursion** : avec $\Delta f = \pm 1$ kHz et $F = 1$ kHz, alors $m = 1$
- les émissions de radiodiffusion dans la bande FM sont à **excursion moyenne** : avec $\Delta f = \pm 75$ kHz et $F = 10$ kHz, alors $m = 7$
- les satellites TV travaillent à **forte excursion** dans la bande des 10 GHz : si $\Delta f = \pm 9$ MHz et $F = 1$ MHz alors $m = 9$





10- Spectre d'un signal FM



Le spectre d'un signal FM est complexe et ne se calcule que dans le cas particulier où le signal basse-fréquence est sinusoïdal.

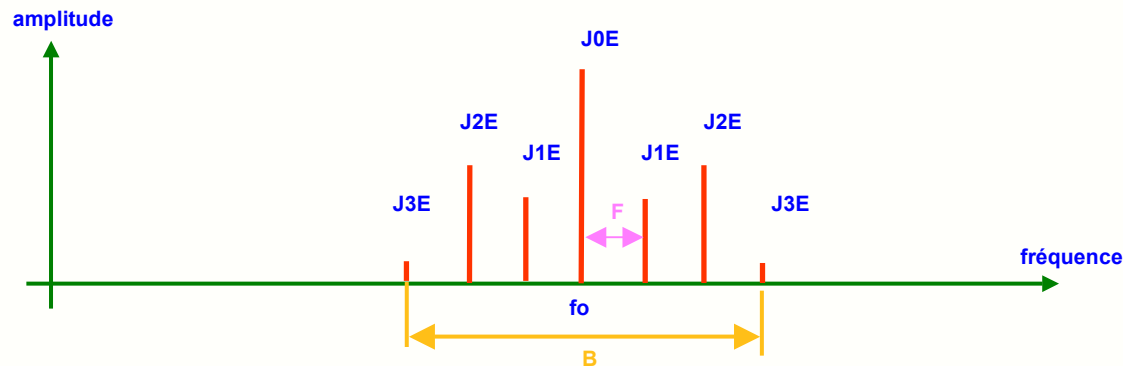
La porteuse modulée s'écrit dans ce cas :

$$e(t) = E \cos(\omega_0 t + m \sin(\Omega t))$$

Elle peut, dans ce cas particulier, se décomposer grâce aux fonctions de Bessel :

$$e(t) = E \cdot J_0(m) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + E \cdot J_1(m) \cdot \cos((\omega_0 \pm \Omega)t + \varphi_1) + E \cdot J_2(m) \cdot \cos((\omega_0 \pm 2\Omega)t + \varphi_2) + \dots$$

où $J_0(m)$, $J_1(m)$, $J_2(m)$... sont les **fonctions de Bessel** dont la valeur dépend de m .



formule de Carson

$$B = 2(\Delta f + F)$$

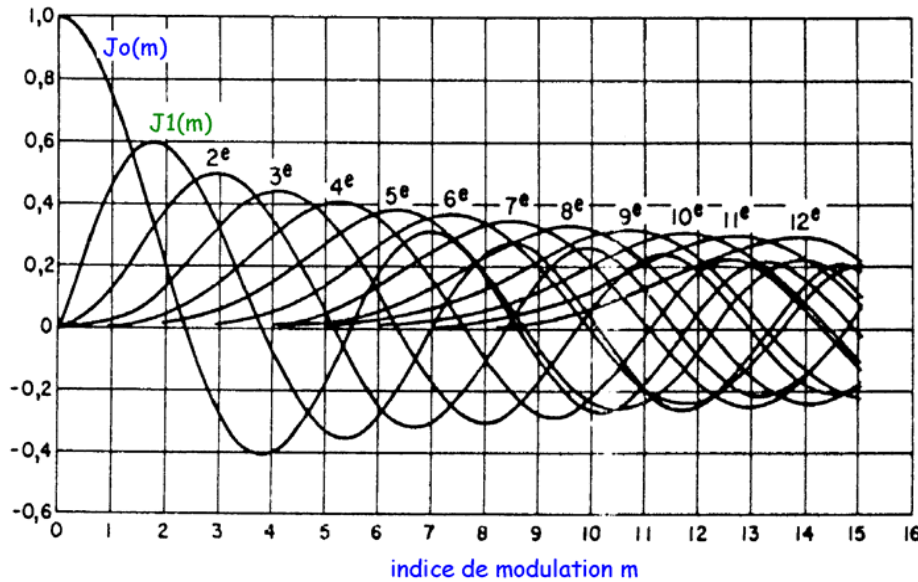
Une porteuse f_0 modulée par un signal basse-fréquence sinusoïdal de fréquence F a un spectre caractérisé par :

- une raie à la fréquence de la porteuse f_0 d'amplitude J_0E
- deux raies à $f_0 + F$ et $f_0 - F$ d'amplitude J_1E , deux raies à $f_0 + 2F$ et $f_0 - 2F$ d'amplitude J_2E ...
- le spectre est donc centré sur f_0 et symétrique et la **bande occupée** B se mesure sur le spectre
- si $m > 4$, B peut être calculée par la **formule de Carson** qui donne une estimation de B à 98% de la puissance totale

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



11- Les fonctions de Bessel



Les fonctions de Bessel sont données sous forme de courbes paramétrées en m ou par un tableau donnant les valeurs des fonctions pour quelques valeurs particulières de m.

m	J ₀	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆	J ₇	J ₈	J ₉	J ₁₀
0,00	1,00										
0,25	0,98	0,12									
0,5	0,94	0,24	0,03								
1,0	0,77	0,44	0,11	0,02							
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01						
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03						
2,5	-0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02					
3,0	-0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01				
4,0	-0,40	-0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02			
5,0	-0,18	-0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02		
6,0	0,15	-0,28	-0,24	0,11	0,36	0,36	0,25	0,13	0,06	0,02	
7,0	0,30	0,00	-0,30	-0,17	0,16	0,35	0,34	0,23	0,13	0,06	0,02
8,0	0,17	0,23	-0,11	-0,29	-0,10	0,19	0,34	0,32	0,22	0,13	0,06



12- Exemple de spectre d'un signal FM



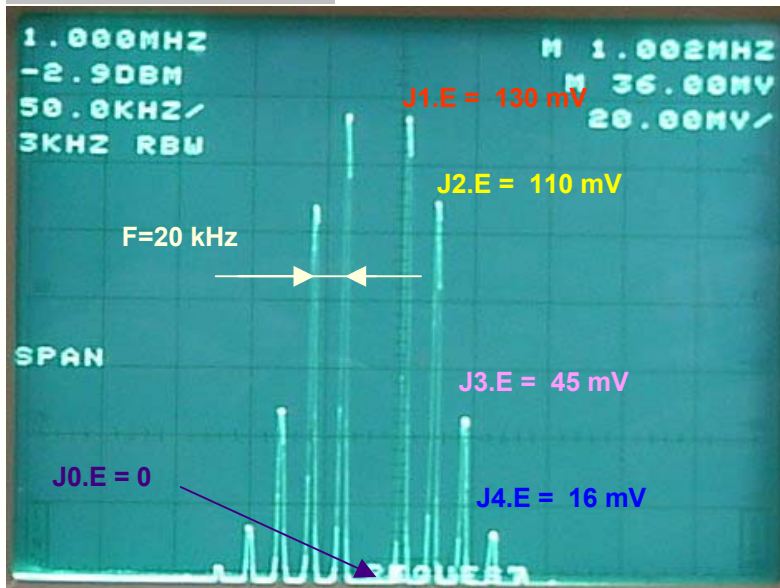
On module une porteuse par un signal basse-fréquence sinusoïdal :

- fréquence de porteuse $f_0 = 1 \text{ MHz}$
- valeur efficace de la porteuse $E = 0,25\text{V}$
- fréquence du signal modulant $F = 20\text{kHz}$
- indice de modulation $m = 2,3$
- excursion en fréquence $\Delta f = mF = \pm 46 \text{ kHz}$

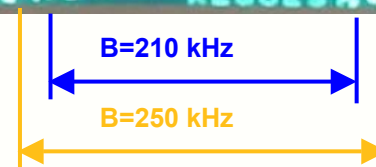
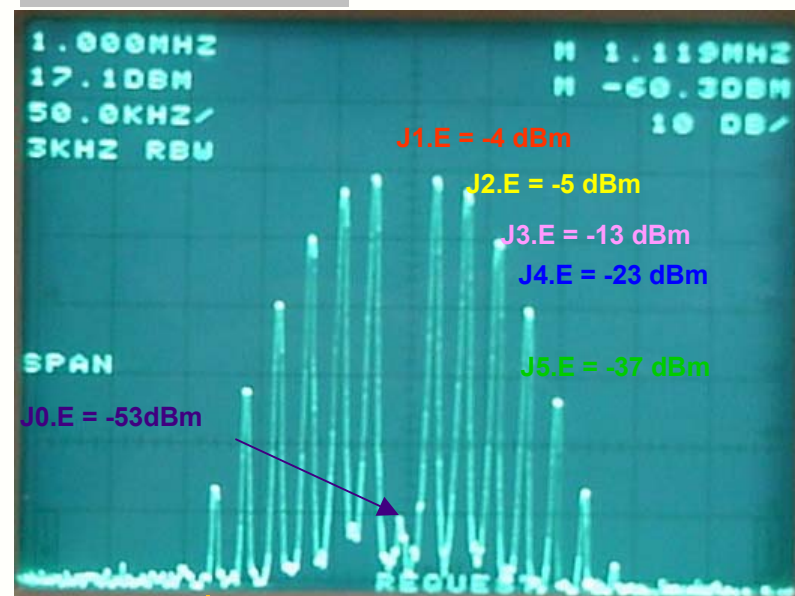
Fonctions de Bessel pour $m = 0,3$:

- $J_0 = 0$
- $J_1 = 0,53$
- $J_2 = 0,43$
- $J_3 = 0,2$
- $J_4 = 0,08$
- $J_{0E} = 0$
- $J_{1E} = 132\text{mV} = -4,5\text{dBm}$
- $J_{2E} = 107\text{mV} = -6,4 \text{ dBm}$
- $J_{3E} = 50\text{mV} = -13 \text{ dBm}$
- $J_{4E} = 20\text{mV} = -21 \text{ dBm}$

échelle linéaire



échelle dBm



Remarques :

- la bande occupée B vaut entre 210 et 250 kHz selon la façon dont on néglige les raies de faible amplitude.
- elle peut aussi être estimée, avec une erreur importante car $m < 4$, par la formule de Carson : $B = 2(\Delta f + F) = 132 \text{ kHz}$

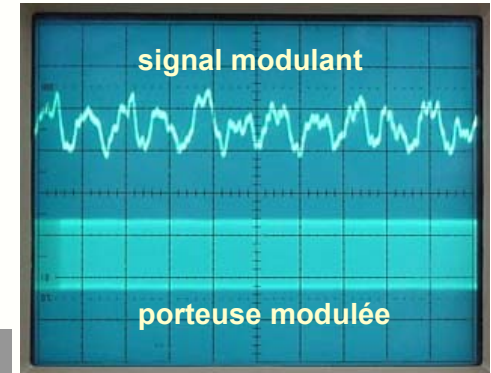


13- Porteuse FM modulée par un signal analogique

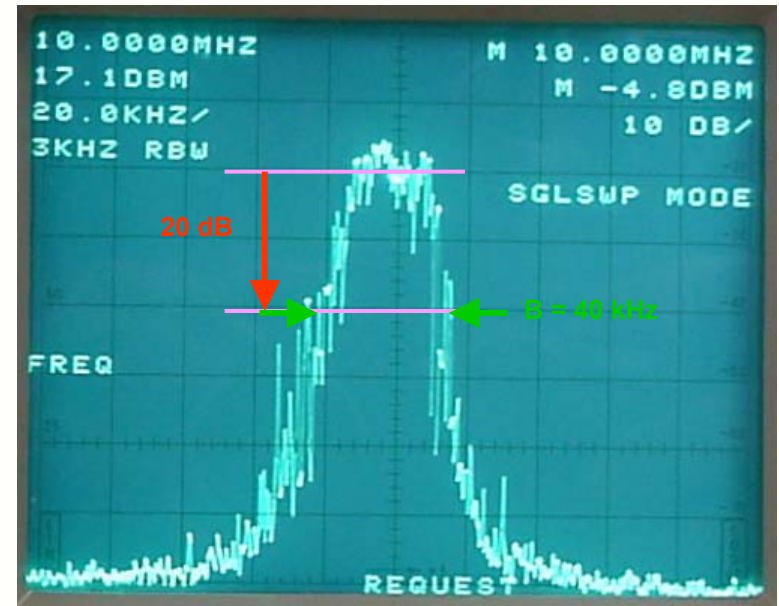
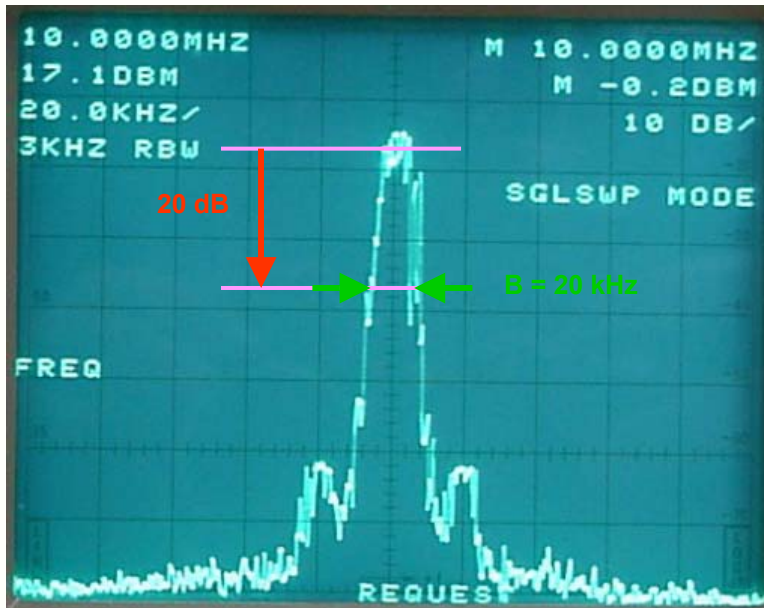


On module une porteuse par un signal basse-fréquence analogique :

- fréquence de porteuse $f_0 = 1 \text{ MHz}$
- amplitude de la porteuse $E = 0,2\text{V}$
- l'excursion en fréquence dépend de l'amplitude maximale du signal modulant
- la bande occupée par le signal varie dans le temps



oscillogramme

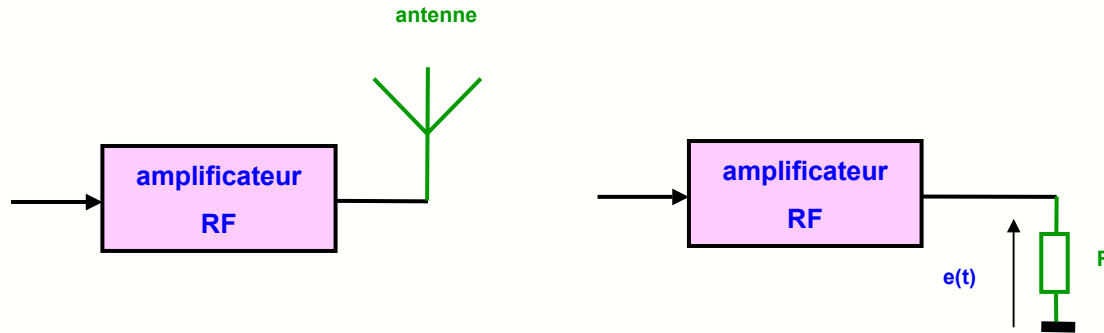


spectres à 2 instants différents

14- Puissance transportée par un signal FM



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



- le signal appliqué à l'antenne est constitué d'une tension sinusoïdale de fréquence variable :

$$e(t) = E \cos(\omega t + 2\pi k \int s(t) dt)$$

- la puissance dissipée dans une résistance ne dépend pas de la fréquence et vaut :

$$P = \frac{\left(\frac{E}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{E^2}{2R}$$

Exemple : $E = 50V$, $f_0 = 100 \text{ MHz}$, $\Delta f = \pm 75 \text{ kHz}$, antenne $R = 50\Omega$

La puissance totale émise vaut : $P = E^2 / 2R = 25 \text{ W}$

Remarque :

- les émetteurs FM émettent en permanence une puissance constante, même en l'absence de signal modulant
- ils ne sont donc pas particulièrement économiques au niveau de leur consommation, sauf si on prévoit une interruption de l'émission durant les silences (cas du GSM)

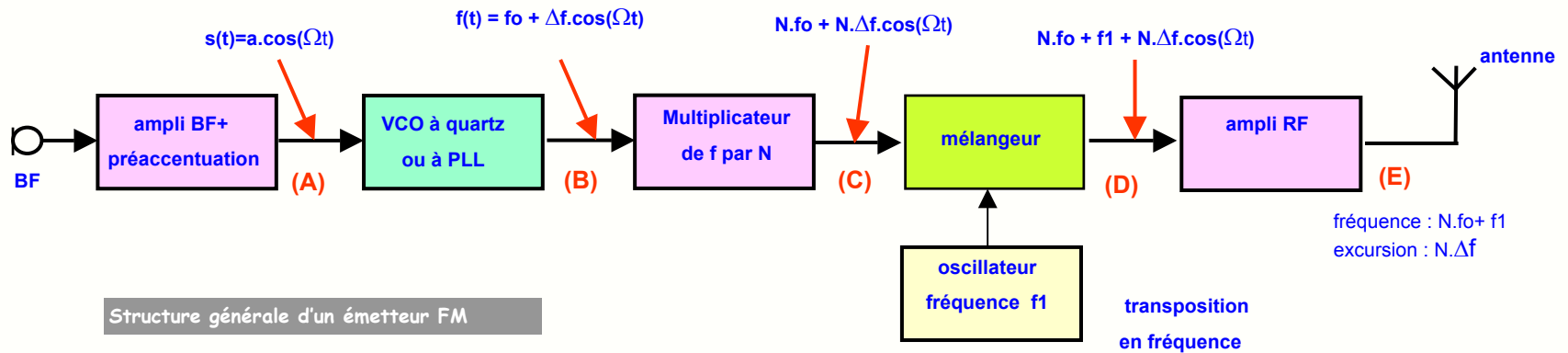


15- Structure d'un émetteur FM



La production d'un signal FM se fait à l'aide d'un VCO, avec une stabilisation de la fréquence d'émission f_0 par :

- l'utilisation d'un VCO à quartz ou
- le verrouillage du VCO sur un oscillateur à quartz dans une boucle à verrouillage de phase



- le signal modulant est filtré pour limiter le spectre, et éventuellement préaccentué (A)
- ce signal modulant est appliqué au VCO qui fournit à sa sortie (B) un signal de fréquence variable
- si l'excursion est insuffisante, un étage multiplicateur de fréquence multiplie la fréquence et donc l'excursion par N (C)
- un étage de transposition déplace la porteuse modulée vers la fréquence d'émission souhaitée (D)
- ce signal est enfin amplifié par l'ampli RF et envoyé sur l'antenne (E)



16- La préaccentuation du signal modulant

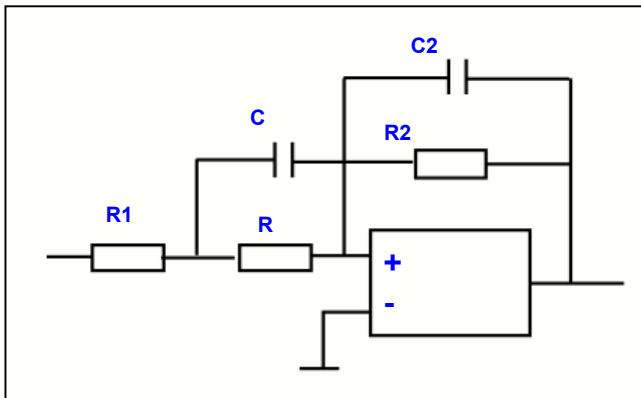
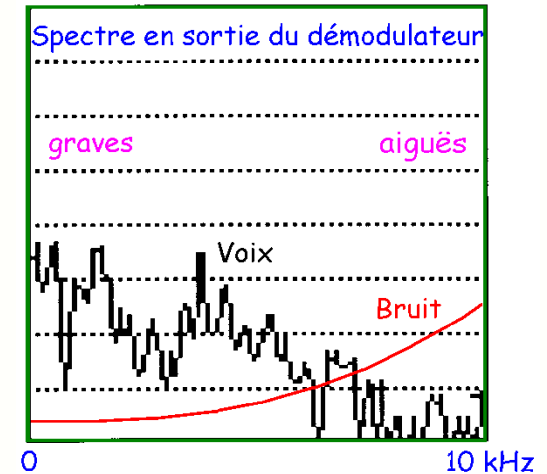


Lors d'une transmission FM, on montre que :

- le niveau de bruit en sortie de la chaîne est plus élevé aux fréquences aiguës
- pour la voix, le niveau du signal baisse aux fréquences aiguës
- le rapport S/B est donc moyen voire mauvais dans le haut du spectre BF

La **préaccentuation** permet d'améliorer globalement la qualité de la transmission :

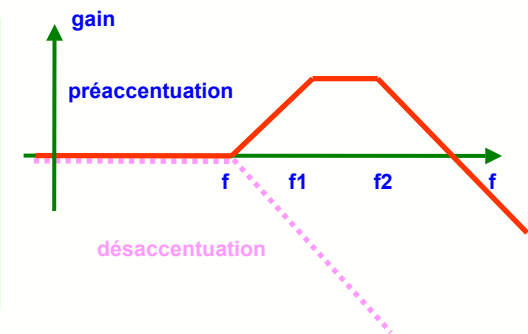
- à l'émission, le signal modulant est filtré pour favoriser les fréquences aiguës
- au cours de la transmission se rajoute du bruit radioélectrique
- à la réception, le bruit en sortie du démodulateur est élevé dans les aiguës
- le filtre de désaccentuation rabaisse les aiguës à leur niveau normal
- ce filtre de désaccentuation diminue simultanément le niveau du bruit



filtre de préaccentuation

Fréquences charnières :

- $f = 1/2\pi RC$
- $f1 = 1/2\pi(R//R1)C$
- $f2 = 1/2\pi R2C2$
- $RC = 50 \mu s$ soit $f = 3,183 \text{ kHz}$ ou
- $RC = 75 \mu s$ soit $f = 2,122 \text{ kHz}$



Ce type de filtre conduit à une accentuation des aiguës comprise entre 10 et 20 dB selon le choix de la constante de temps

Remarque : le niveau des aiguës étant faible, on peut augmenter leur niveau sans modifier sensiblement l'amplitude S_{max} du signal. La préaccentuation n'a donc pas d'effet sensible sur l'excursion en fréquence ni sur le spectre.

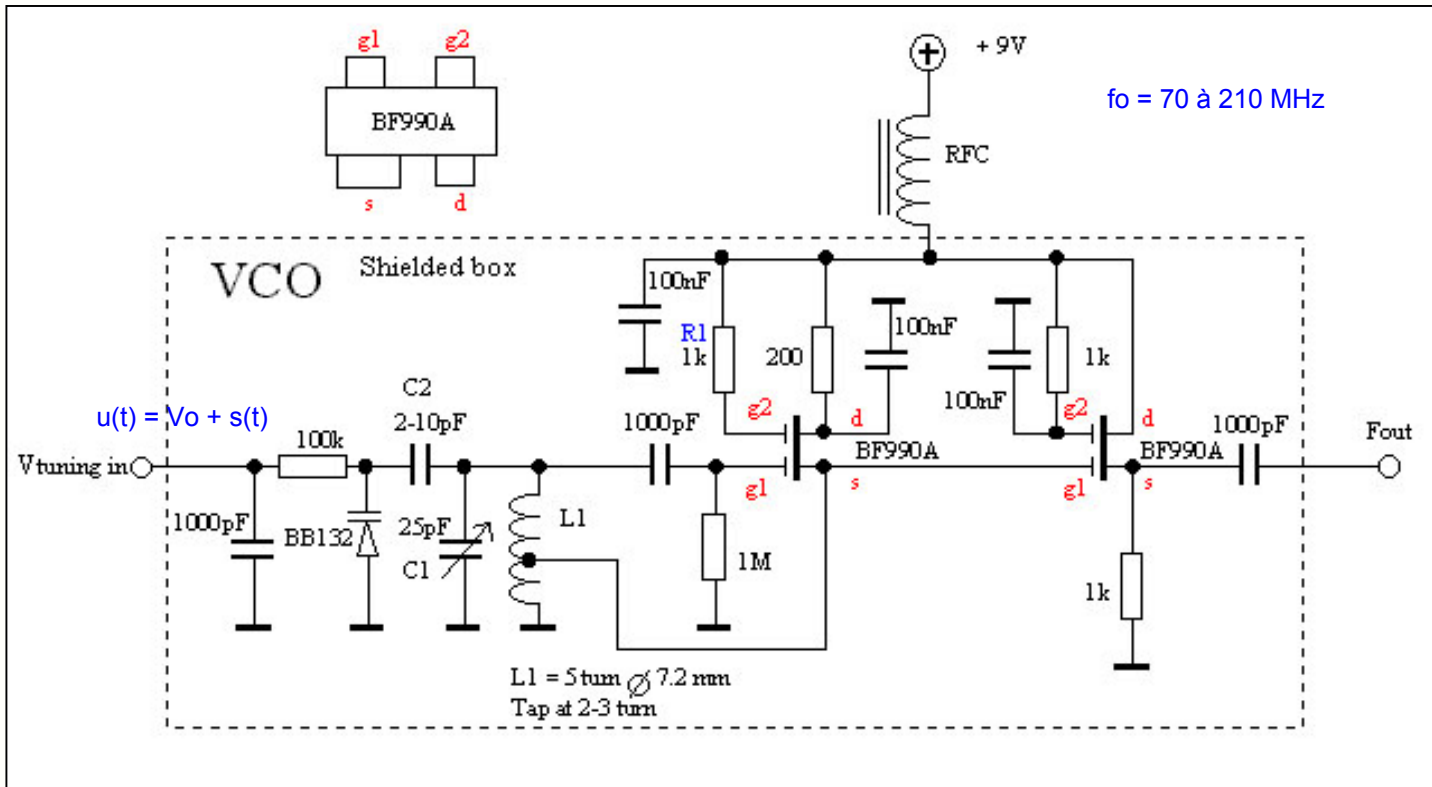
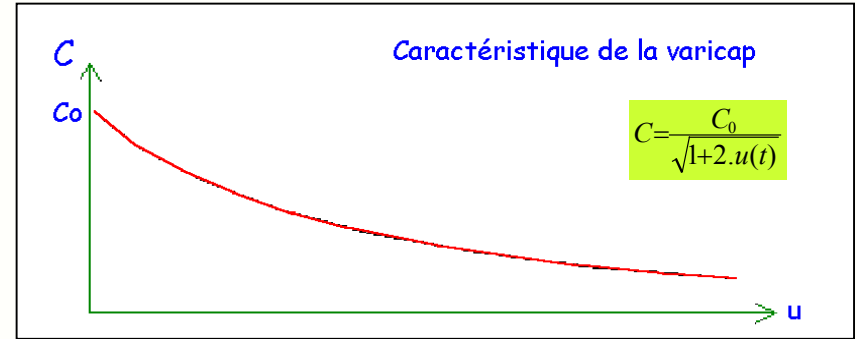


17- Modulateur FM à varicap



Le VCO ci-dessous est basé sur un montage oscillateur Hartley utilisant un TEC à double grille :

- la fréquence est fixée par L1, C1 et la branche varicap+C2
- la tension de commande V_{tuning} fait varier la capacité de la varicap BB132 et donc la fréquence d'oscillation
- la valeur de C2 joue sur la plage de variation de fréquence
- un 2ème étage à transistor sert d'adaptateur d'impédance qui évite que la charge ne vienne perturber l'oscillateur



signal FM
 $f(t) = f_o + k_s(t)$

exemple de VCO

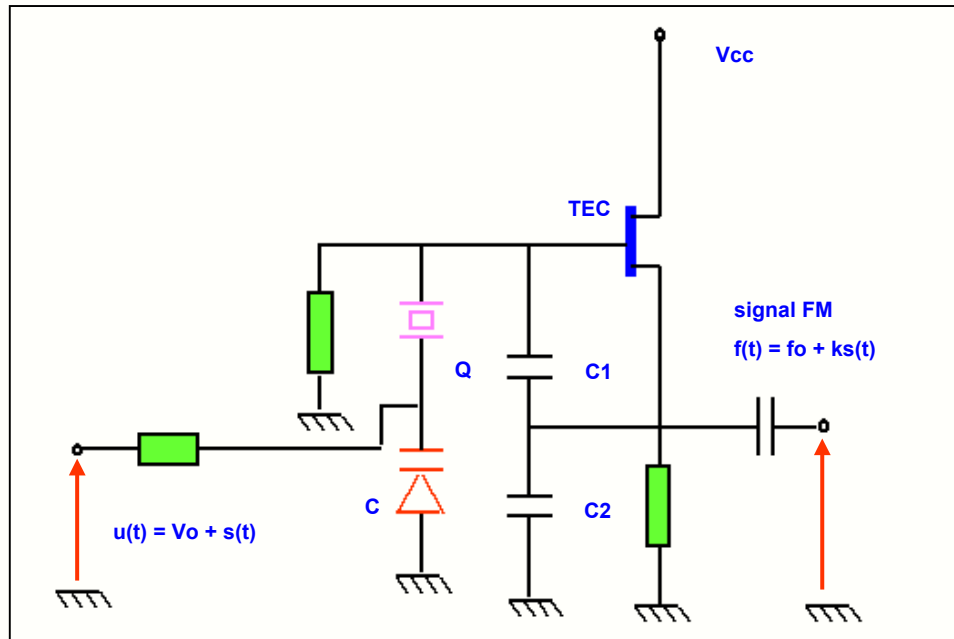


18- Modulateur FM à quartz



Pour stabiliser la fréquence centrale f_0 du modulateur FM, on peut utiliser un oscillateur à quartz commandé en tension :

- l'oscillateur s'appelle alors **VCXO** (Voltage Commanded Xtal Oscillator)
- la variation de fréquence se fait en utilisant une **diode varicap**
- la varicap a une capacité de jonction C qui dépend de la tension inverse appliquée $u(t)$



exemple de VCXO

- la fréquence d'oscillation est déterminée par les caractéristiques du quartz et la capacité C de la varicap
- l'application du signal modulant sur la varicap fait varier sa capacité C et donc la fréquence d'oscillation
- cette structure procure une excellente stabilité de f_0 , mais une **excursion en fréquence faible** limitée à 1 kHz, voire moins
- ce dispositif convient donc très bien à des émissions FM à faible excursion en fréquence (**Narrow Band Frequency Modulation**)
- l'excursion en fréquence peut être augmentée en utilisant des étages **multiplicateurs de fréquence**

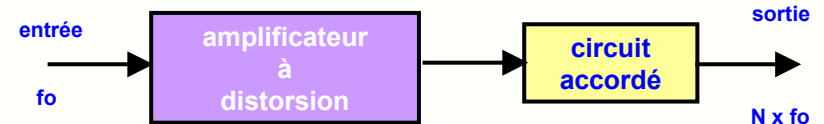


19- Le multiplicateur de fréquence

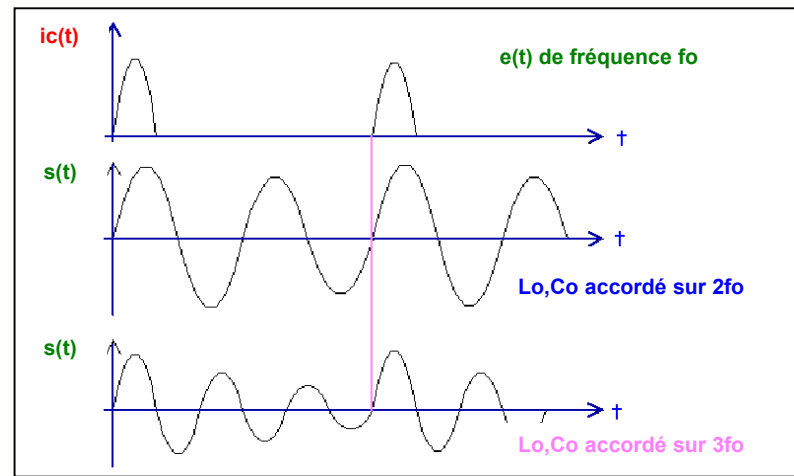
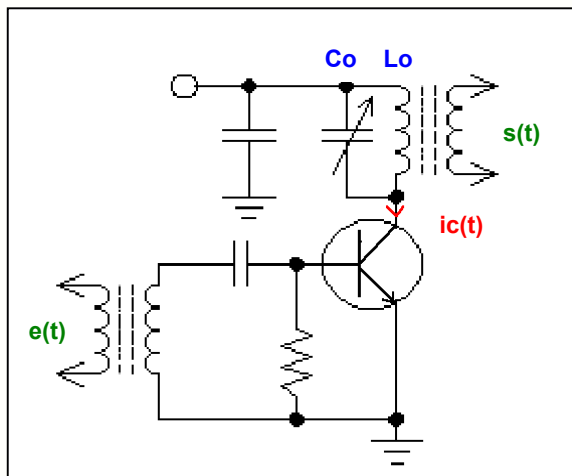


Pour augmenter l'excursion en fréquence en sortie d'un VCXO, on utilise un ou plusieurs étages multiplicateurs de fréquence :

- le signal de fréquence f_0 est amplifié par un montage apportant une distorsion importante
- cette distorsion importante se traduit par l'apparition d'harmoniques $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, $5f_0$
- un circuit accordé sur l'harmonique N permet de récupérer un signal quasi-sinusoïdal de fréquence Nf_0



En pratique, un simple étage à transistor en classe C sans pont de polarisation permet de réaliser cette fonction :



- le transistor ne conduit que lorsque la tension $e(t)$ sur la base dépasse $0,6V$
- le courant collecteur, formé de calottes de sinusoides, contient un grand nombre d'harmoniques
- le circuit accordé L_0, C_0 est dimensionné pour sélectionner l'harmonique désiré



20- Exemple d'émetteur FM à 49 MHz



oscillateur FM 16,625 MHz

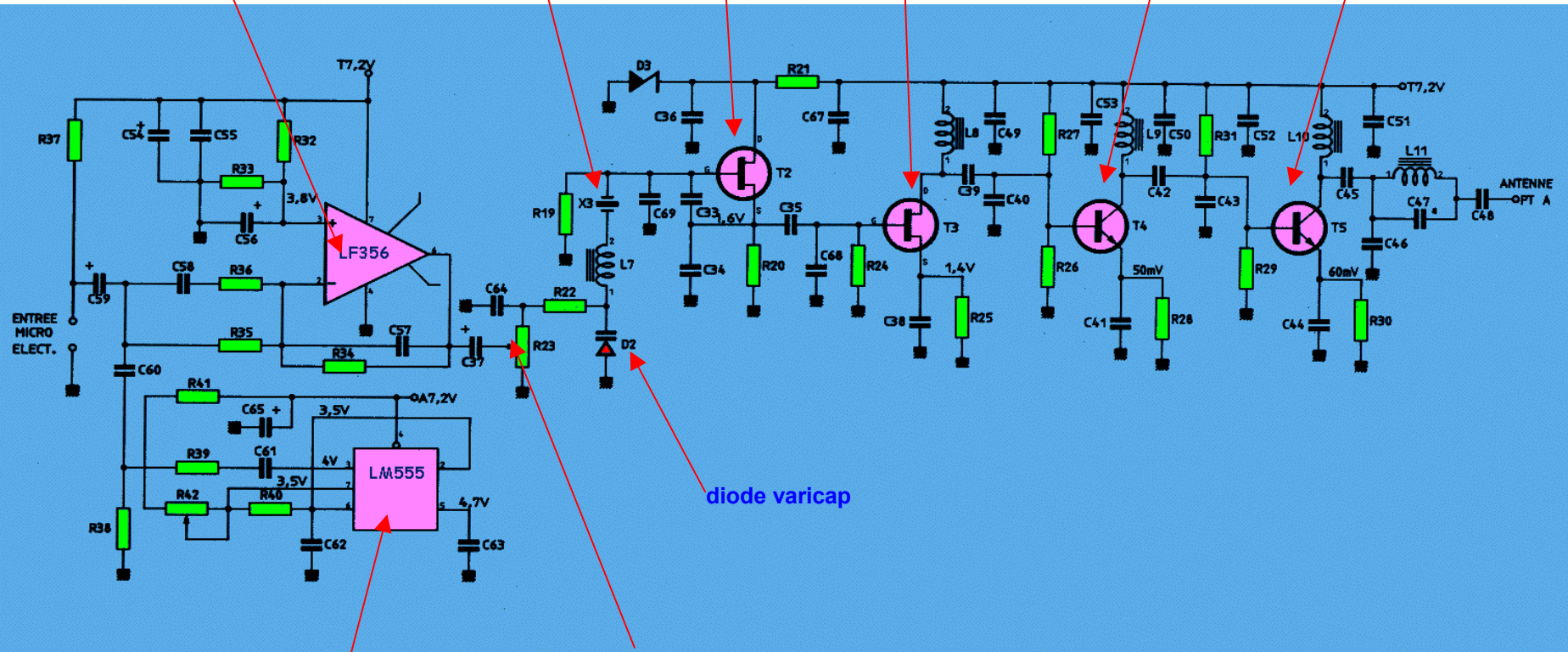
préampli micro
+ préaccentuation

quartz 16,625 MHz

étage tripleur
 $3 \cdot 16,625 = 49,875 \text{ MHz}$

ampli 1

ampli 2



diode varicap

générateur de tonalité

signal modulant

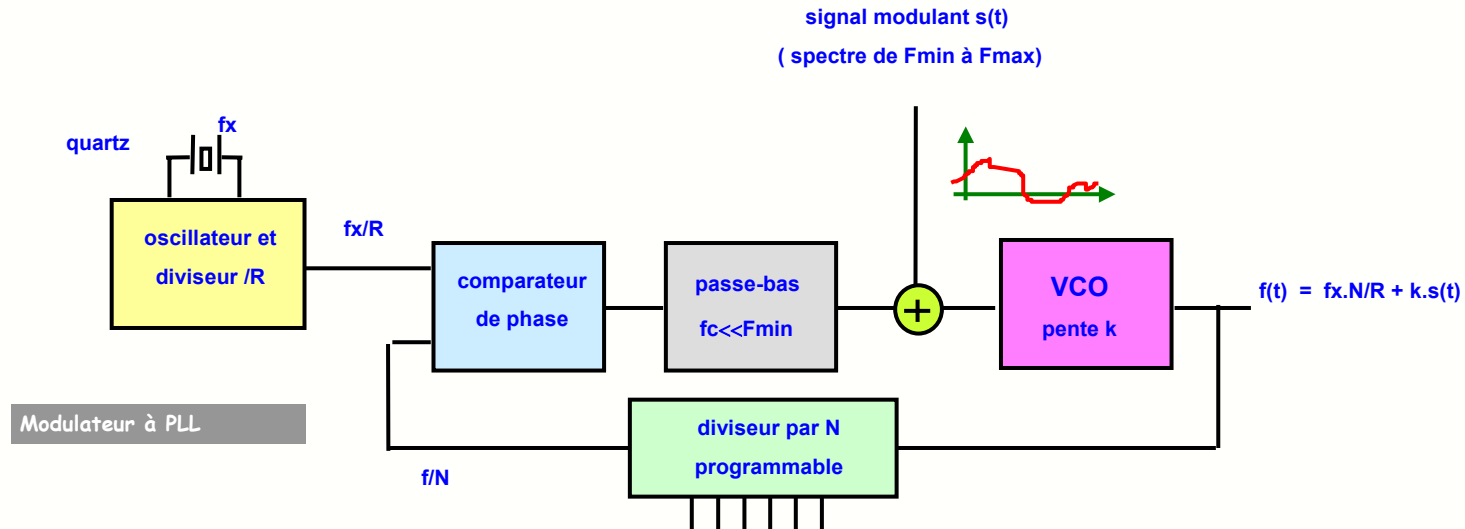


21 - Modulateur FM à boucle à verrouillage de phase



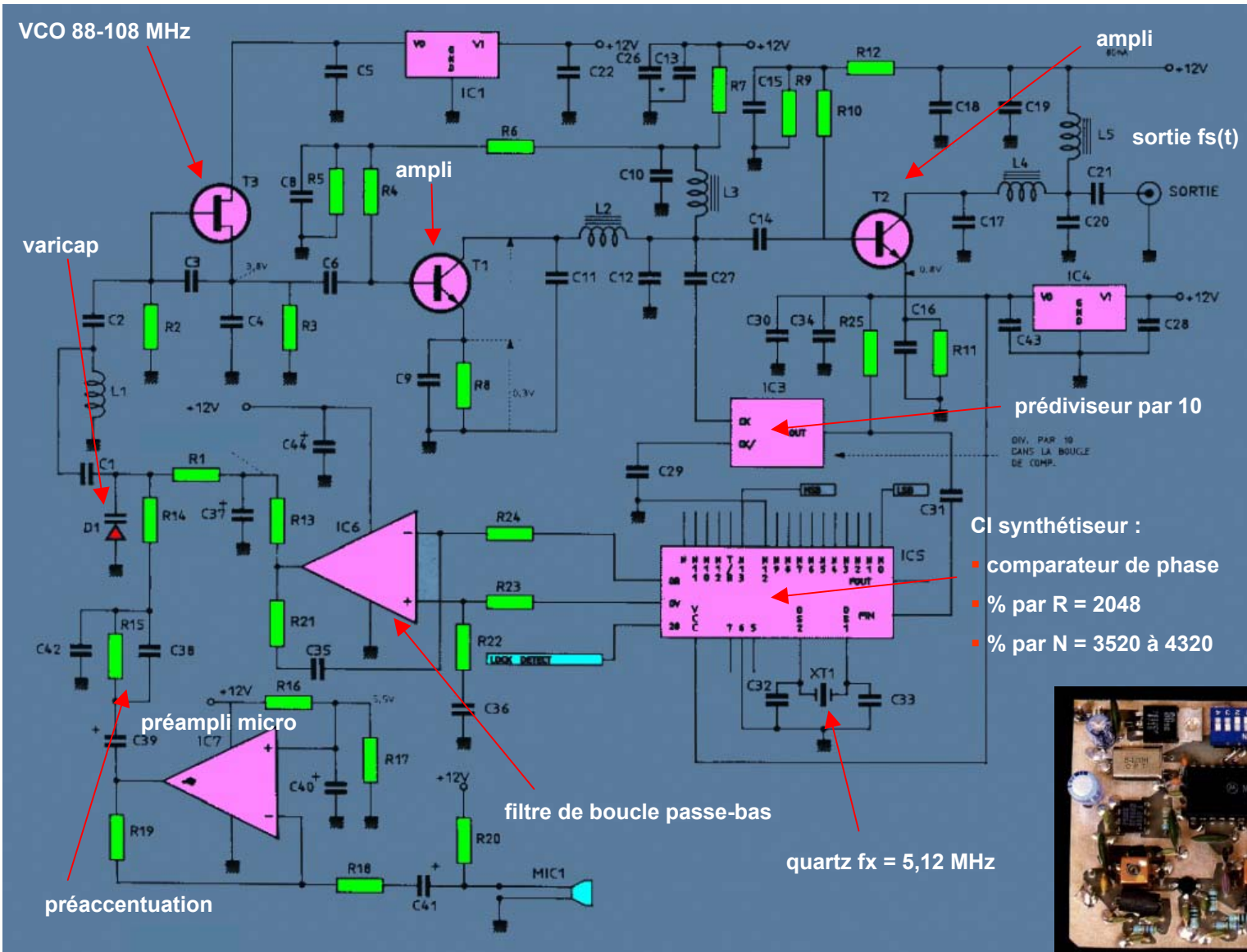
Pour la stabilité de f_0 , on peut aussi utiliser un modulateur à Phase Lock Loop qui présente des avantages par rapport au VCXO :

- la structure permet un changement facile de la fréquence centrale f_0 (changement de canal d'émission)
- l'excursion en fréquence peut être aussi grande qu'on le souhaite (le multiplicateur de fréquence n'est plus nécessaire)



- en l'absence de signal modulant, le VCO se verrouille sur l'oscillateur à quartz et on a : $f(t)/N = f_x/R$
- en présence de signal modulant, la fréquence du VCO varie proportionnellement à $s(t)$
- le filtre passe-bas de la boucle a une coupure très basse (par exemple 1Hz) qui empêche la PLL de réagir aux variations rapides de la fréquence de sortie $f(t)$ liées au signal modulant
- la PLL stabilise donc la fréquence centrale f_0 du VCO, son excursion par contre est libre à cause du filtre passe-bas
- pour changer de canal d'émission (CB, GSM...) il suffit de modifier le rapport de division N

22- Emetteur pour la bande FM (88 à 108 MHz)



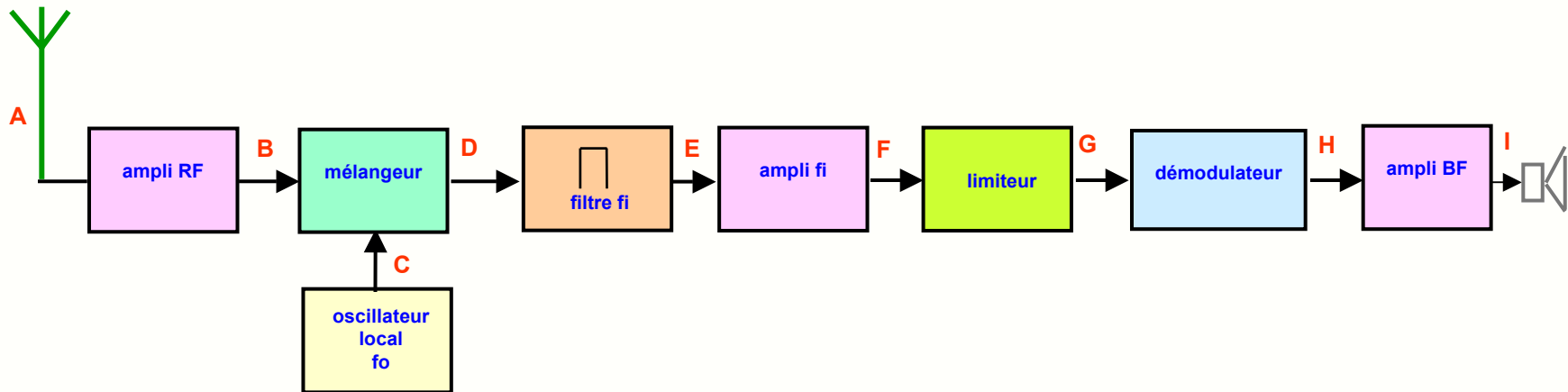


23- Le récepteur FM



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

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



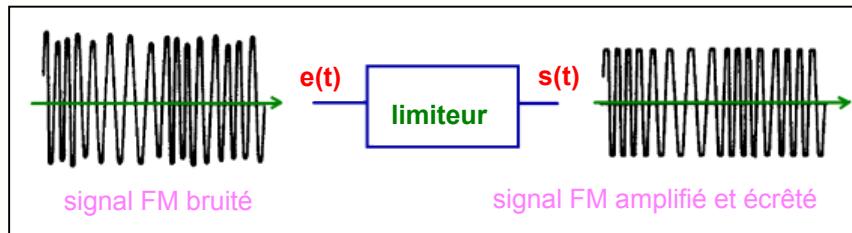
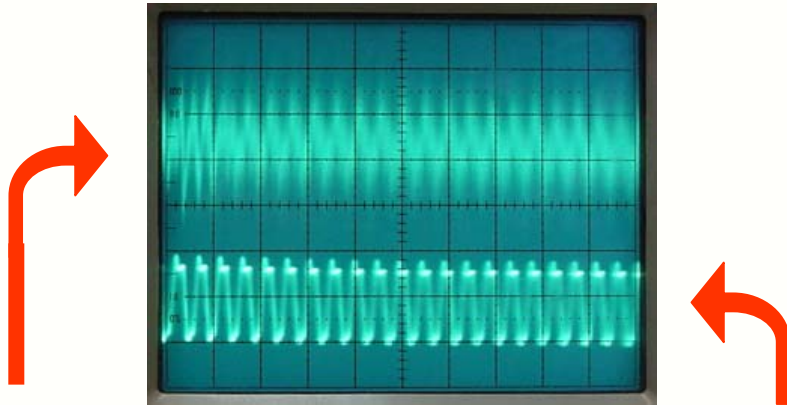
- en radiodiffusion FM, le standard est $f_i = 10,7 \text{ MHz}$ où on dispose de filtres céramiques performants et peu coûteux
- la bande passante de l'étage f_i va de 10 kHz pour les émissions en bande étroite (CB) à 300 kHz pour la radiodiffusion



24- L'étage limiteur



En sortie de l'amplificateur fi, le limiteur ramène l'amplitude du signal fi à une valeur constante, l'information se trouvant dans la fréquence instantanée du signal.



Remarque : dans les circuits intégrés destinés aux récepteurs FM :

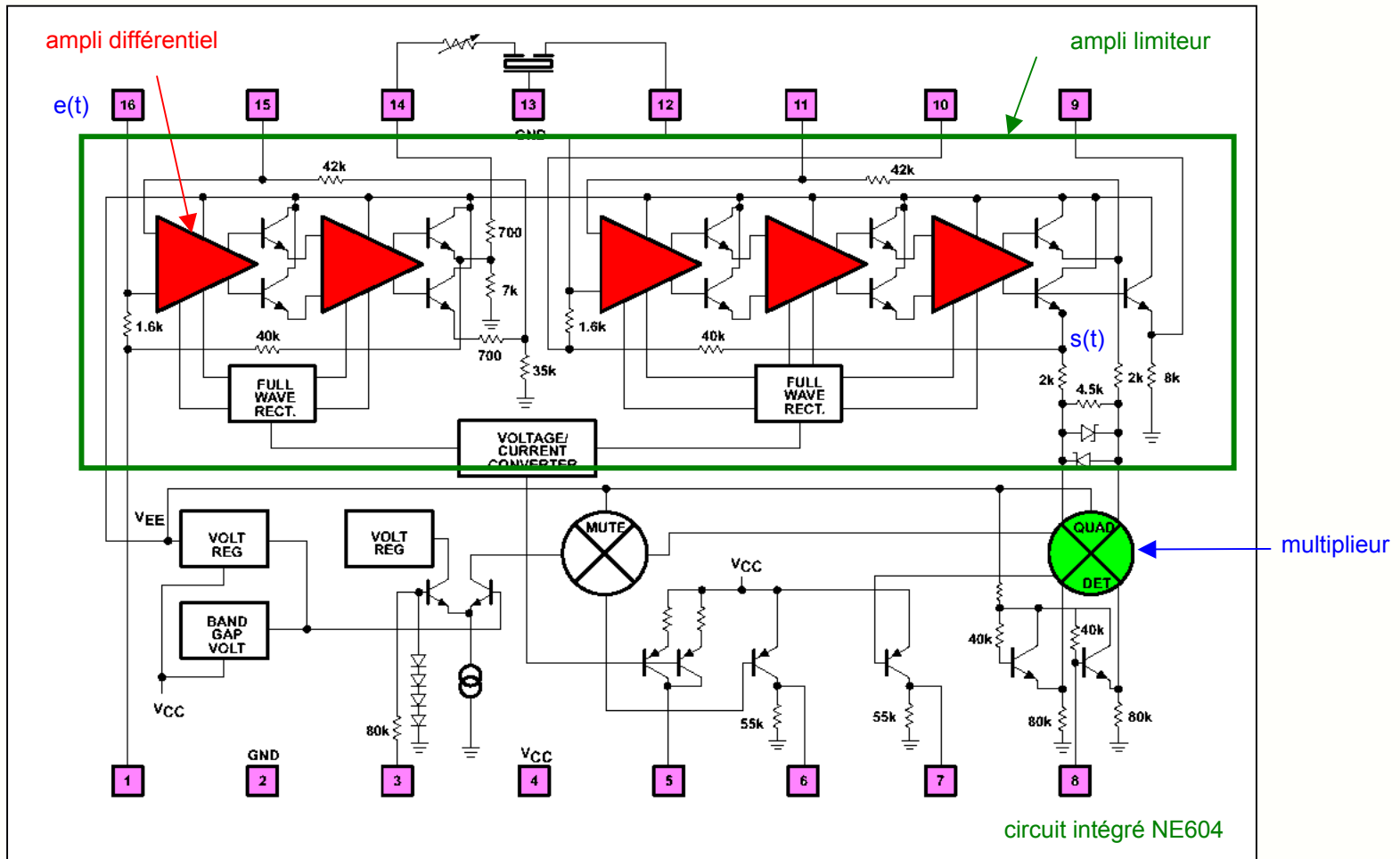
- le limiteur est constitué de plusieurs amplis différentiels en cascade
- le ou les derniers étages travaillent en régime de saturation
- cette saturation limite l'amplitude du signal en sortie

Les avantages apportés par ce limiteur sont nombreux :

- en écrétant le signal fi on supprime une grande partie des parasites qui se sont introduits lors de la transmission : c'est une des raisons pour lesquelles la qualité est meilleure en FM qu'en AM
- tous les émetteurs, faibles ou puissants, se retrouvent avec un niveau fi identique, donc un volume sonore comparable dans le haut-parleur : le limiteur remplace donc ici le circuit de contrôle automatique de gain des récepteurs AM
- certains démodulateurs FM sont sensibles à l'amplitude du signal et démodulent les variations d'amplitude comme les variations de fréquence : il est donc indispensable dans ce cas de maintenir une amplitude constante à l'entrée du démodulateur



25- Structure interne d'un ampli fi-limiteur-démodulateur



Le démodulateur à quadrature requiert un signal fi d'amplitude constante :

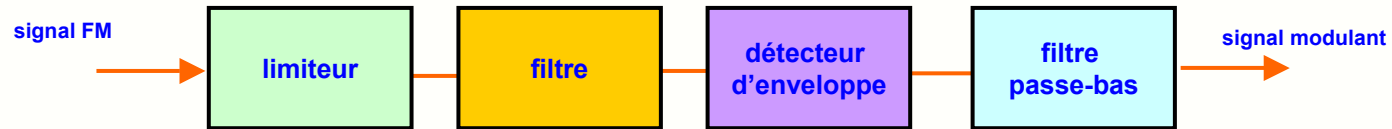
- l'amplificateur fi est à grand gain et il suffit d'un signal d'entrée $e(t)$ d'une fraction de millivolt pour l'amener à la saturation
- il est constitué d'une cascade de transistors montés en amplificateurs différentiels
- le SO41, introduit par SIEMENS vers 1970, est un des ancêtres de ces circuits
- tous les petits "nouveaux" lui ressemblent : MC3357, MC3361, MC3362 ... de Motorola, NE604, NE605 de Philips ...
- l'entrée fi est en 16, l'ampli à grand gain constitué de 5 paires différentielles en cascade, et la sortie est disponible en $s(t)$



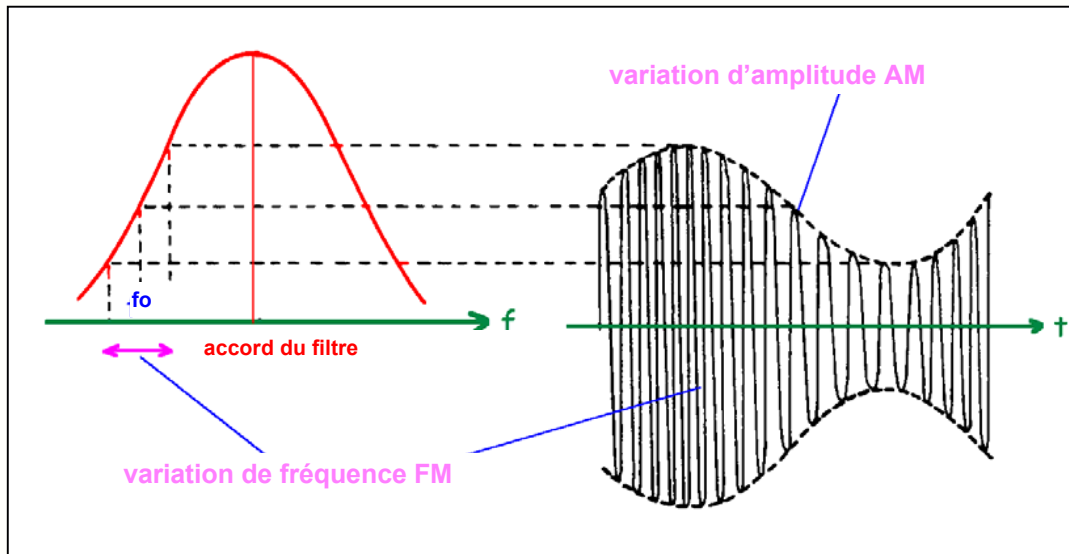
26- Les discriminateurs à filtres



Les démodulateurs à filtres, souvent appelés **discriminateurs** ont été historiquement les premiers démodulateurs FM utilisés :



- le signal FM est écrêté par un limiteur pour qu'il soit à amplitude rigoureusement constante
- ce signal écrêté traverse un filtre passe-bas ou passe-bande qui transforme la FM en FM+AM
- un détecteur crête démodule la AM ainsi obtenue et extrait le signal basse-fréquence



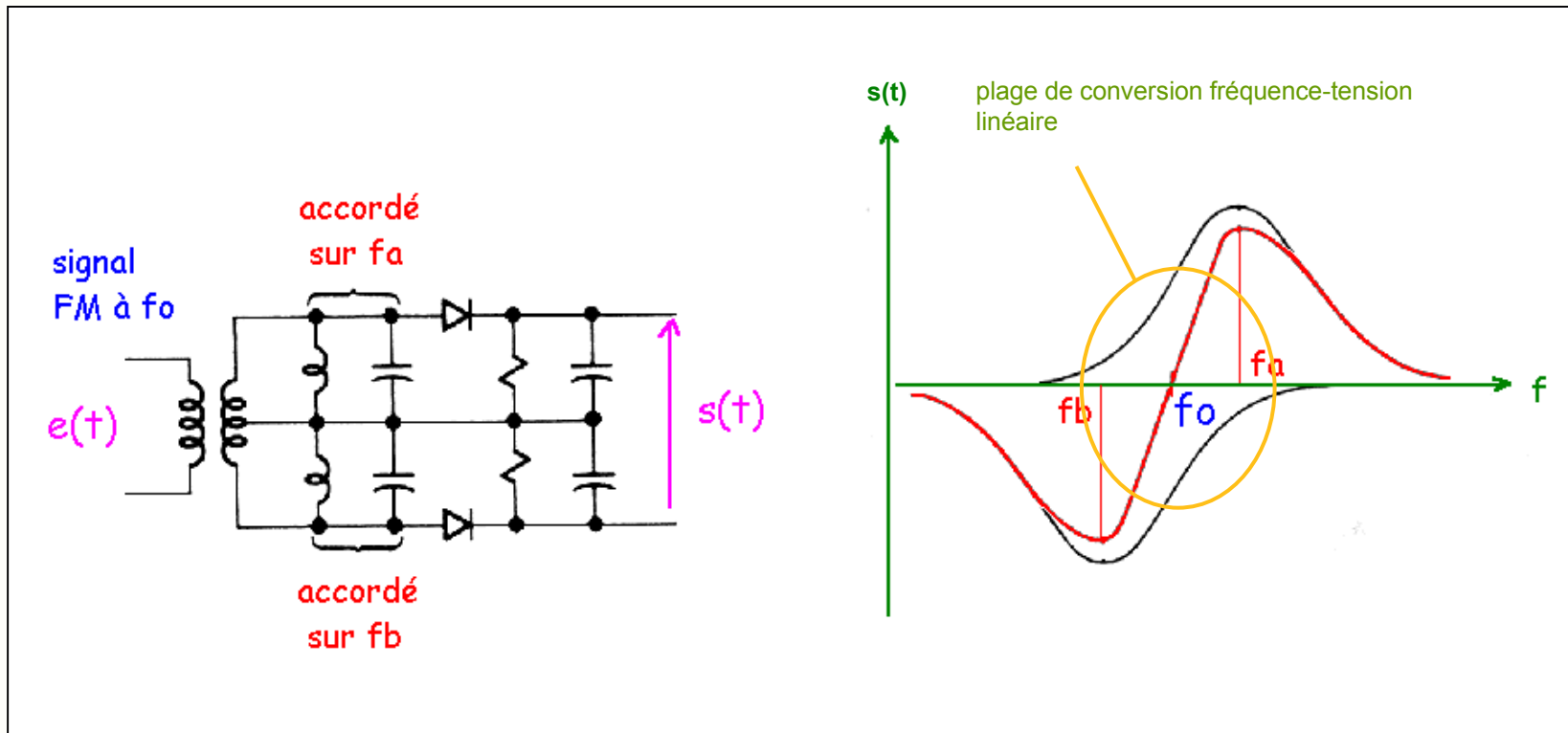


27- Le discriminateur de Foster-Seely



- le discriminateur de Foster-Seely est un circuit passif et donc robuste et fiable
- il est donc encore souvent utilisé dans les systèmes industriels
- il nécessite deux filtres à accords décalés peu pratiques dans les productions en grande série comme les récepteurs FM
- ce démodulateur n'est donc plus utilisé dans les récepteurs FM

Discriminateur de Foster-Seeley



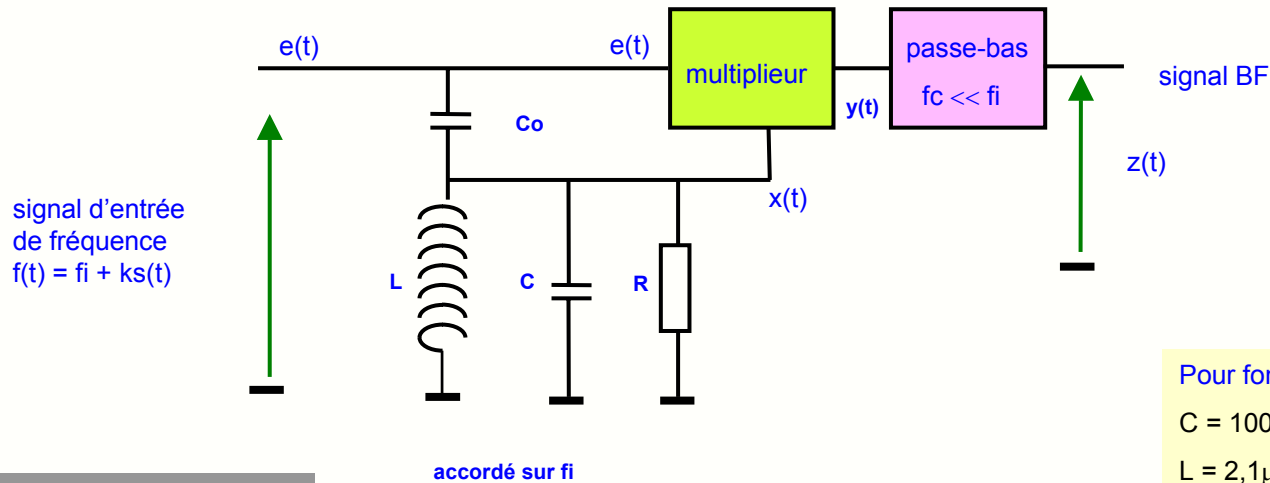


28- Structure du démodulateur à quadrature



Le **discriminateur à quadrature** (ou de phase ou à coïncidence) est un type de démodulateur FM très utilisé :

- le signal FM à démoduler $e(t)$ est traité par le filtre déphaseur R,L,C,Co pour produire le signal $x(t)$
- un multiplieur analogique multiplie le signal à démoduler $e(t)$ par le signal $x(t)$
- un filtre passe-bas conserve la partie basse fréquence du mélange



démodulateur à quadrature

- le signal FM à démoduler est sinusoïdal d'amplitude E et s'écrit : $e(t) = E \cos(\theta(t)) = E \cos(\omega_i t + 2\pi k \int s(t).dt)$
- le signal filtré $x(t)$ est sinusoïdal d'amplitude X et déphasé par rapport à $e(t)$: $x(t) = X \cos(\theta(t) + \varphi(t))$
- le déphasage $\varphi(t)$ dépend de la transmittance $\underline{I}(j\omega)$ du filtre déphaseur et de la fréquence instantanée du signal $e(t)$

Remarques :

- ce type de démodulateur FM est très utilisé dans les circuits intégrés puisqu'il utilise une structure courante : le multiplieur.
- le filtre déphaseur est externe et peut-être constitué par un circuit LC de même type que celui utilisé dans les filtres f_i



29- Fonctionnement du démodulateur à quadrature



Au voisinage de la fréquence centrale f_i le filtre introduit :

- une atténuation $T=0,33$ qui change très peu
- un déphasage $\varphi(t)$ qui se calcule facilement avec la pente r

$$r = \frac{\varphi(t) - \pi/2}{f(t) - f_i} \quad \text{d'où} \quad \varphi(t) = \pi/2 + r(f(t) - f_i) = \pi/2 + r.k.s(t)$$

Le multiplieur reçoit donc les deux signaux suivants :

$$e(t) = E \cos(\theta(t)) \quad \text{et} \quad x(t) = T_0.E \cos(\theta(t) + \pi/2 + r.k.s(t))$$

Le produit de ces deux signaux s'écrit après développement :

$$y(t) = 0,5.T_0.E^2 \left[\cos(2\theta(t) + \pi/2 + r.k.s(t)) + \cos(\pi/2 + r.k.s(t)) \right]$$

Le filtre passe-bas supprime la fréquence somme, soit :

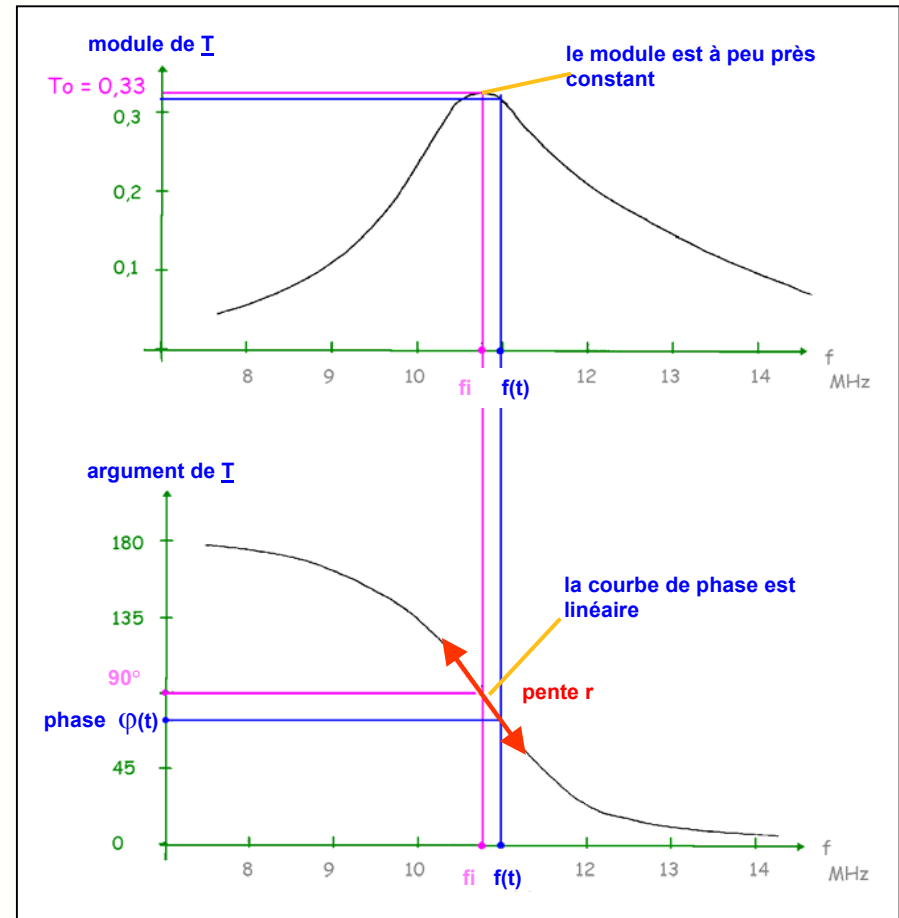
$$z(t) = 0,5.T_0.E^2 \cos(\pi/2 + r.k.s(t)) = -0,5.T_0.E^2 \sin(r.k.s(t))$$

En pratique $f(t)$ reste voisine de f_i , l'angle $r.k.s(t)$ reste donc petit et on peut assimiler le sinus de l'angle à l'angle, soit :

$$z(t) = -0,5.T_0.E^2.r.k.s(t) = A.s(t)$$

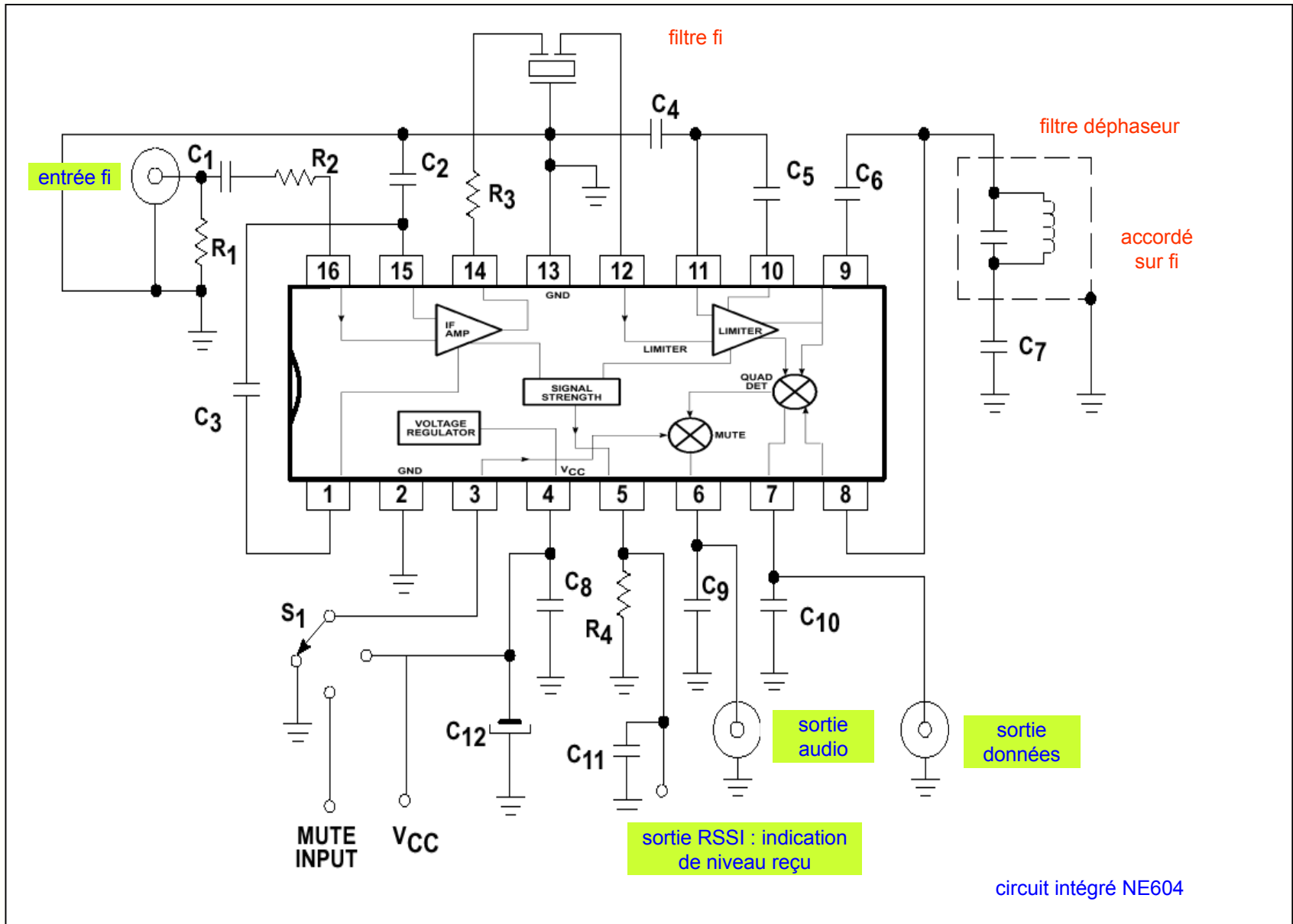
c'est le signal modulant basse-fréquence

Remarque : le signal de sortie dépend du carré de l'amplitude du signal à démoduler : il est donc important d'avoir une amplitude rigoureusement stable, ce qui justifie la présence du limiteur.





30- Exemple de montage ampli fi-démodulateur FM



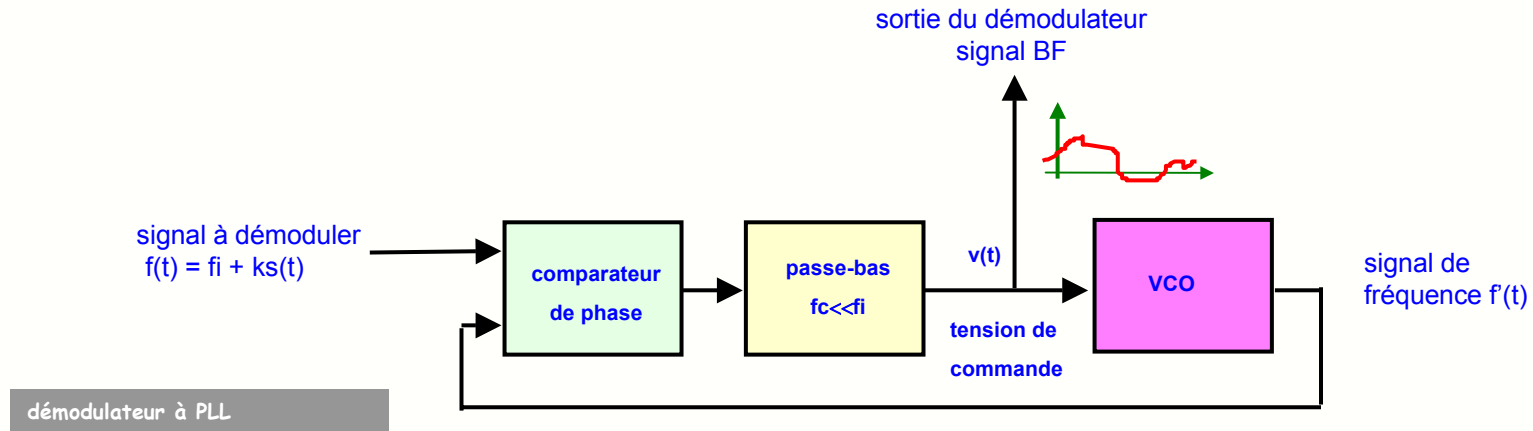
circuit intégré NE604



31 - Démodulateur FM à PLL



Le signal FM peut aussi être démodulé par un démodulateur à boucle à verrouillage de phase :



- lorsque la boucle fonctionne, le VCO se synchronise sur le signal injecté à l'entrée
- le VCO fournit donc à sa sortie un signal de fréquence égale à celle du signal d'entrée $f'(t) = f(t) = f_i + k_s(t)$
- si la fréquence $f(t)$ varie, c'est que la tension $v(t)$ à l'entrée du VCO varie
- en supposant que le VCO est linéaire et caractérisé par sa pente K_o , on a : $f'(t) = K_o.v(t)$

On en déduit aisément l'expression du signal $v(t)$: $v(t) = f'(t)/K_o = f_i/K_o + k_s(t)/K_o = V_o + A.s(t)$

La tension de commande du VCO comporte une **composante continue** V_o qu'il est facile d'éliminer à l'aide d'un condensateur de liaison et d'une tension variable proportionnelle au **signal modulant**.

Remarque : le démodulateur à PLL est meilleur que le discriminateur à quadrature lorsque le signal à démoduler est très bruité. Il sera donc utilisé pour la réception des signaux faibles issus d'émetteurs lointains comme les satellites par exemple.



32- Les démodulateurs FM et le bruit



On démontre que le rapport signal sur bruit après démodulation est amélioré d'un facteur qui dépend de l'indice de modulation :



P : valeur efficace de la porteuse
 S : valeur efficace du signal BF s(t)
 B : valeur efficace du bruit

- en FM il est toujours possible d'améliorer la qualité de la liaison en augmentant l'excursion en fréquence
- le prix à payer est évidemment une augmentation de l'encombrement spectral de l'émetteur
- comme le montrent les courbes, le seuil de démodulation de 10dB est abaissé à 5dB lorsqu'on utilise un démodulateur à PLL.

Dès que P/B dépasse 10dB, le rapport signal/bruit après démodulation est donnée par :

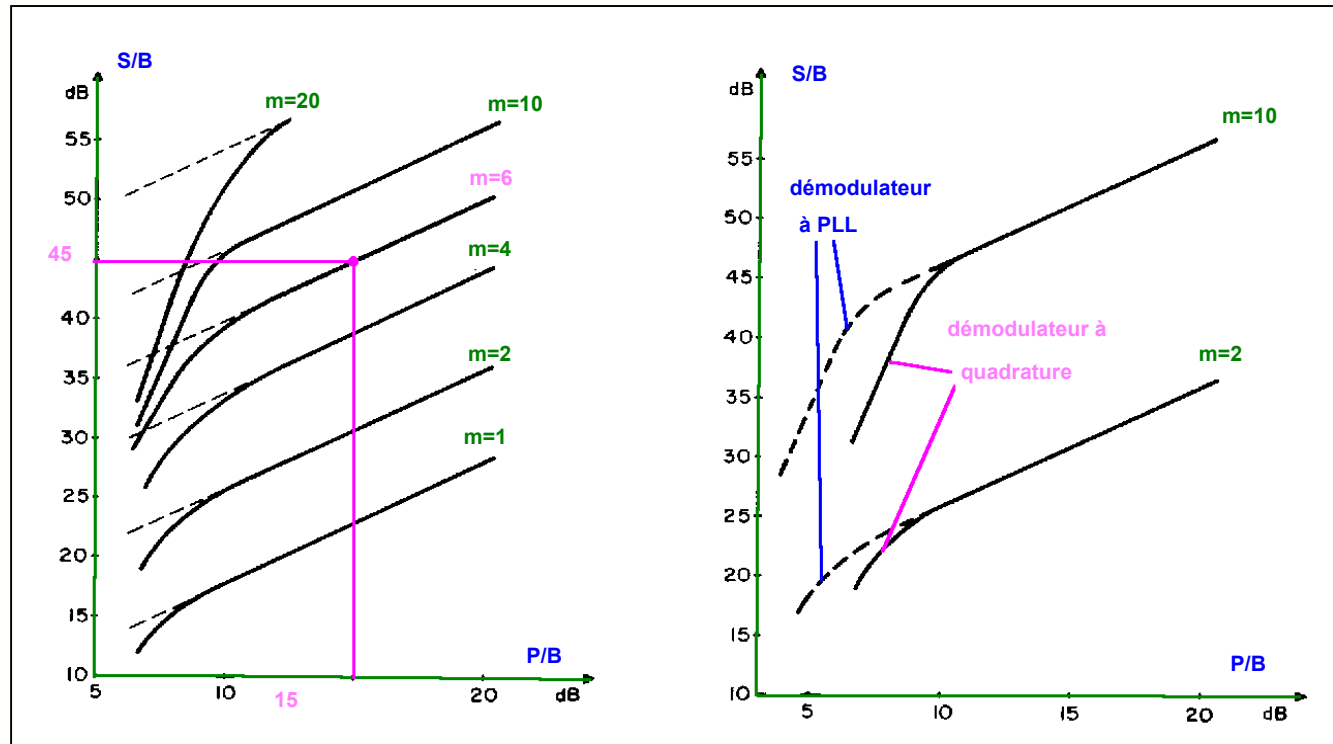
$$\frac{S}{B} = 3 \cdot m^2 \frac{P}{B}$$

Exemple :

- porteuse à P/B = 15 dB
- indice de modulation m = 6
- le S/B en sortie sera de 45 dB
- l'amélioration est de 30 dB

Remarque :

Pour une bonne qualité audio on utilise l'excursion assez élevée de ± 75kHz en radiodiffusion commerciale





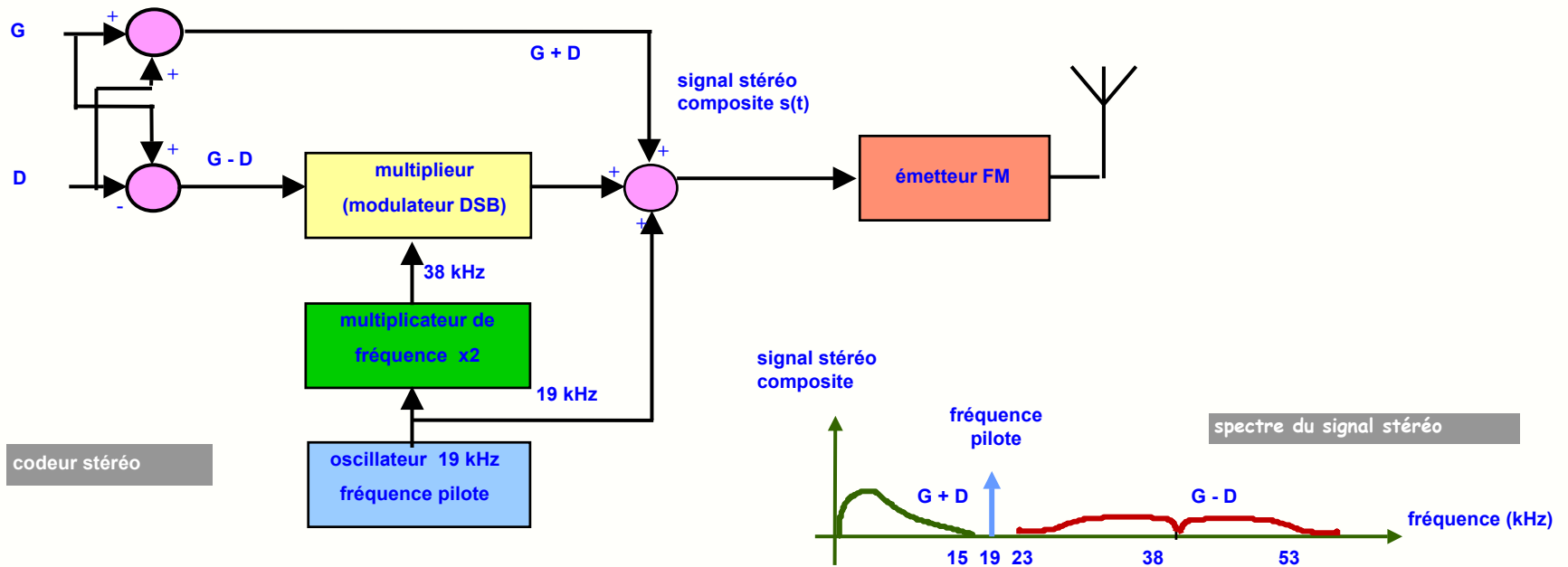
33- L'émission FM stéréophonique : le codeur



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

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

A l'émission, les deux signaux D et G sont combinés par le codeur pour produire le signal BF composite stéréo $s(t)$ qui modulera la porteuse de l'émetteur.



- le signal issu des deux microphones est limité en fréquence à $F_{max} = 15 \text{ kHz}$
- le signal somme $G+D$ est une constituante du signal composite $s(t)$
- le signal différence $G-D$ module en AM sans porteuse (bande latérale double ou DSB) une sous-porteuse à 38 kHz
- le signal composite contient aussi du 19 kHz pour faciliter la démodulation du signal DSB

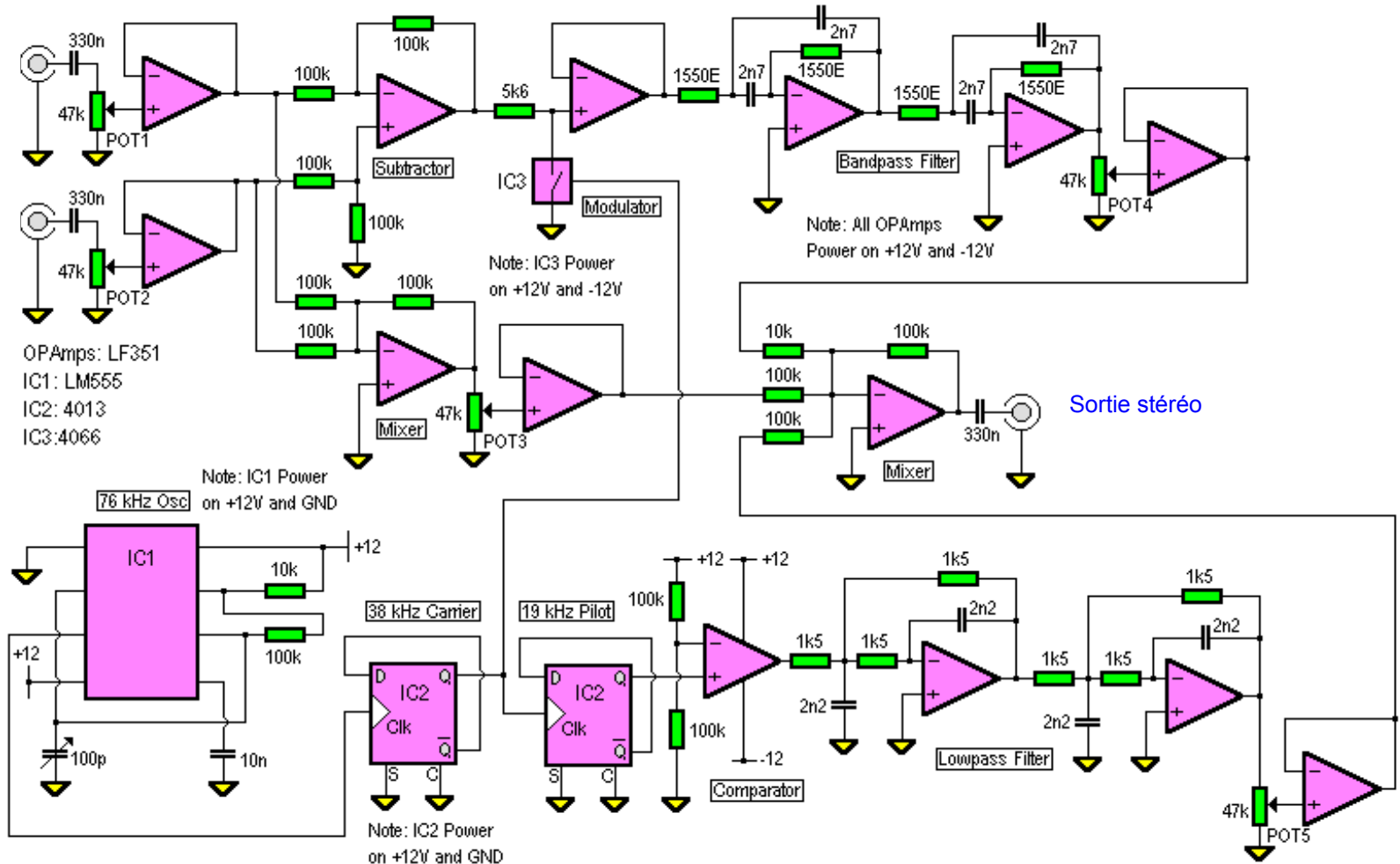


34- Exemple de codeur stéréo



canal gauche

canal droit

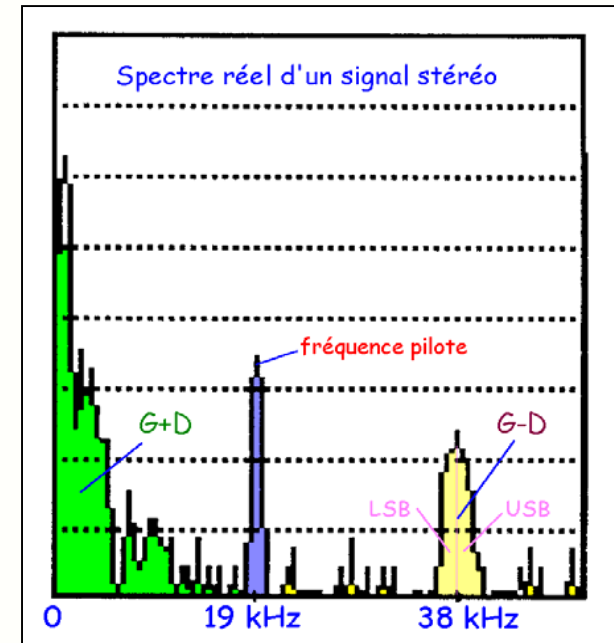
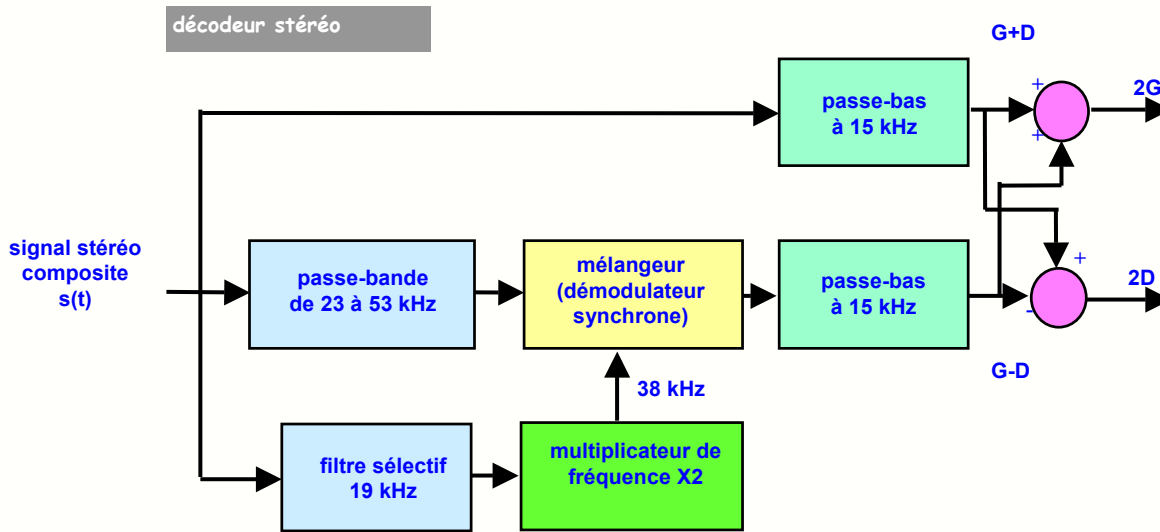


35- L'émission FM stéréophonique : le décodeur



A la réception, on retrouve ce signal stéréo composite en sortie du démodulateur et le décodeur va séparer les canaux D et G :

- un simple filtrage passe-bas récupère l'information G+D
- quand le décodeur détecte la présence de la fréquence pilote à 19 kHz, il allume le voyant « stéréo » et met en route le décodage
- un filtre passe-bande ou une PLL récupère la fréquence pilote pour produire le 38 kHz
- pour effectuer une démodulation synchrone, ce 38 kHz multiplie le signal DSB
- un filtre passe-bas en sortie du multiplieur récupère l'information G-D
- par addition et soustraction des 2 signaux G+D et G-D, on retrouve les 2 canaux G et D



Remarque : un récepteur FM monophonique filtre le signal composite (amplificateur de puissance, oreille) et l'information reçue correspond donc à la totalité de l'information basse-fréquence G+D.

Ce codage stéréophonique, mis au point par Armstrong en 1952, a ainsi pu être introduit en assurant la compatibilité avec le parc des récepteur monophonique existants.

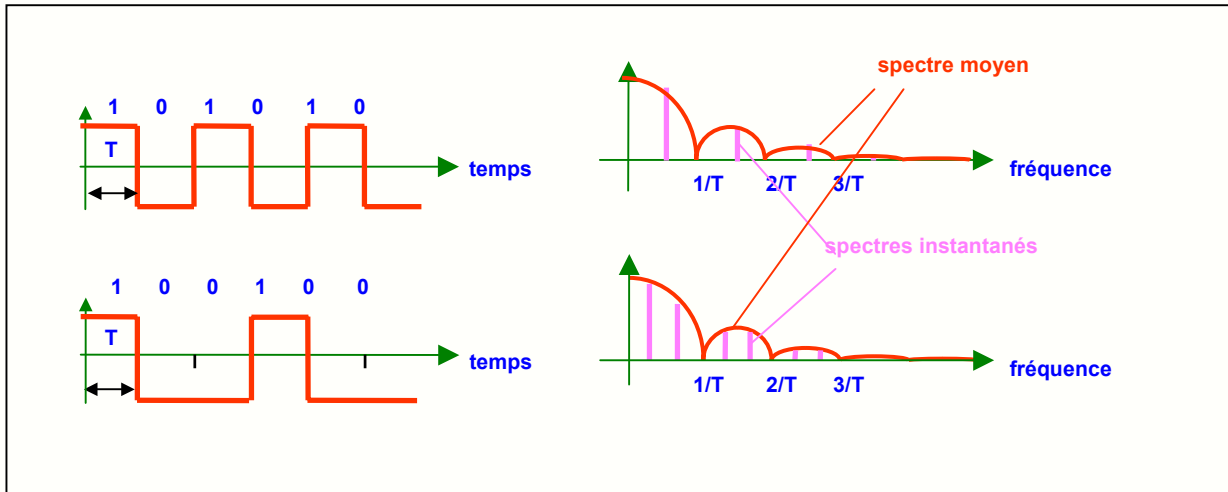


36- La modulation par un signal numérique



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

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

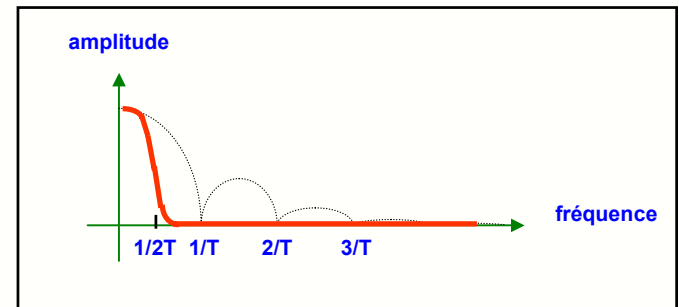


Spectre d'un signal binaire brut

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

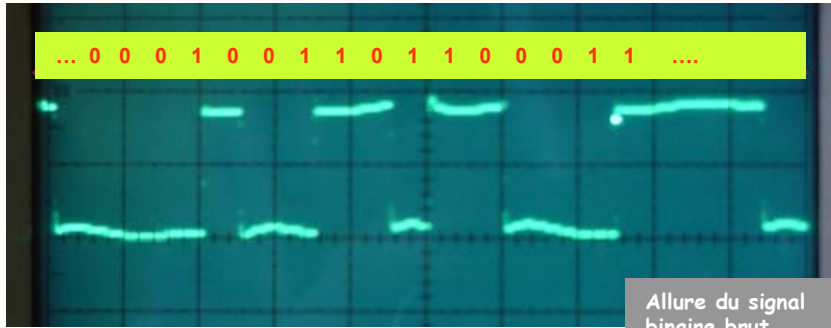
Le signal binaire est donc **toujours filtré**, souvent même assez sévèrement, avant d'attaquer le modulateur.

Spectre d'un signal binaire filtré

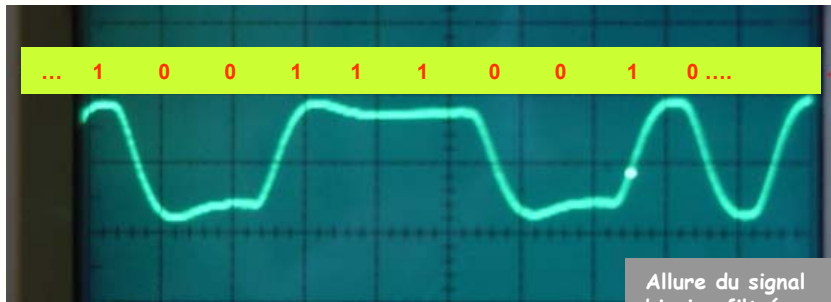




37- Diagramme de l'œil d'un signal binaire



Allure du signal binaire brut



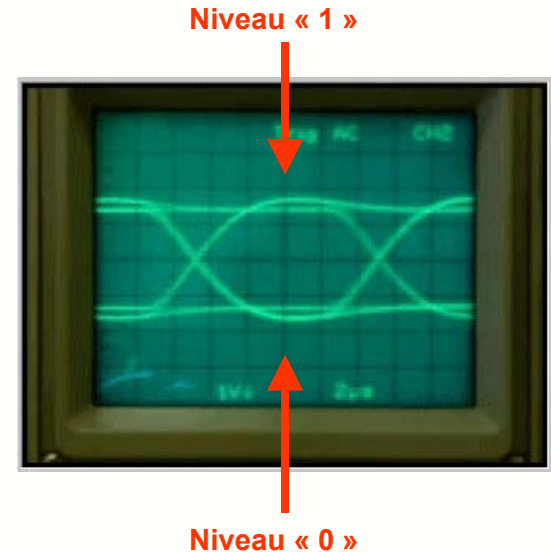
Allure du signal binaire filtré

Le filtrage du signal binaire modifie sa forme :

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

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

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



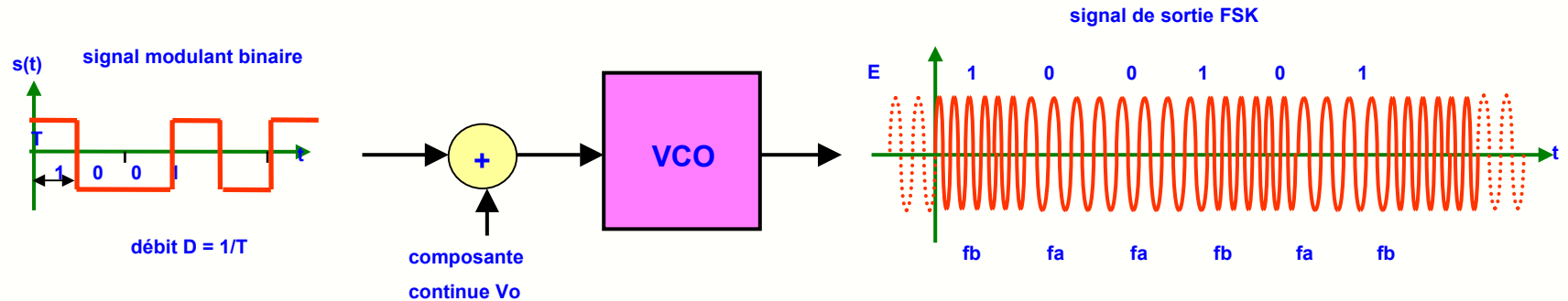
video



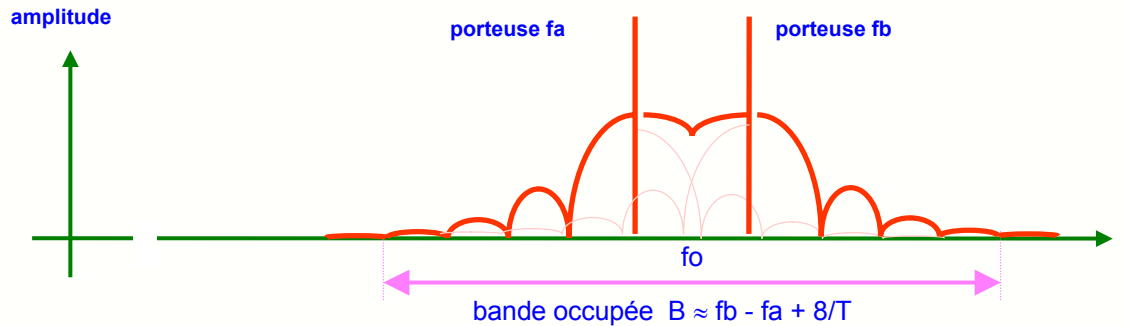
38- La modulation bi-fréquence ou FSK



Si la porteuse est modulée par un signal numérique, elle saute d'une fréquence f_a (« 0 ») à une fréquence f_b (« 1 »).



On démontre que le spectre de ce signal modulé est en $\sin(X)/X$ autour des deux fréquences f_a et f_b :



Exemple : une porteuse à $f_0=1$ MHz est modulée en FSK par un signal de débit $D = 10$ kbits/s avec une excursion $\Delta f = \pm 4$ kHz

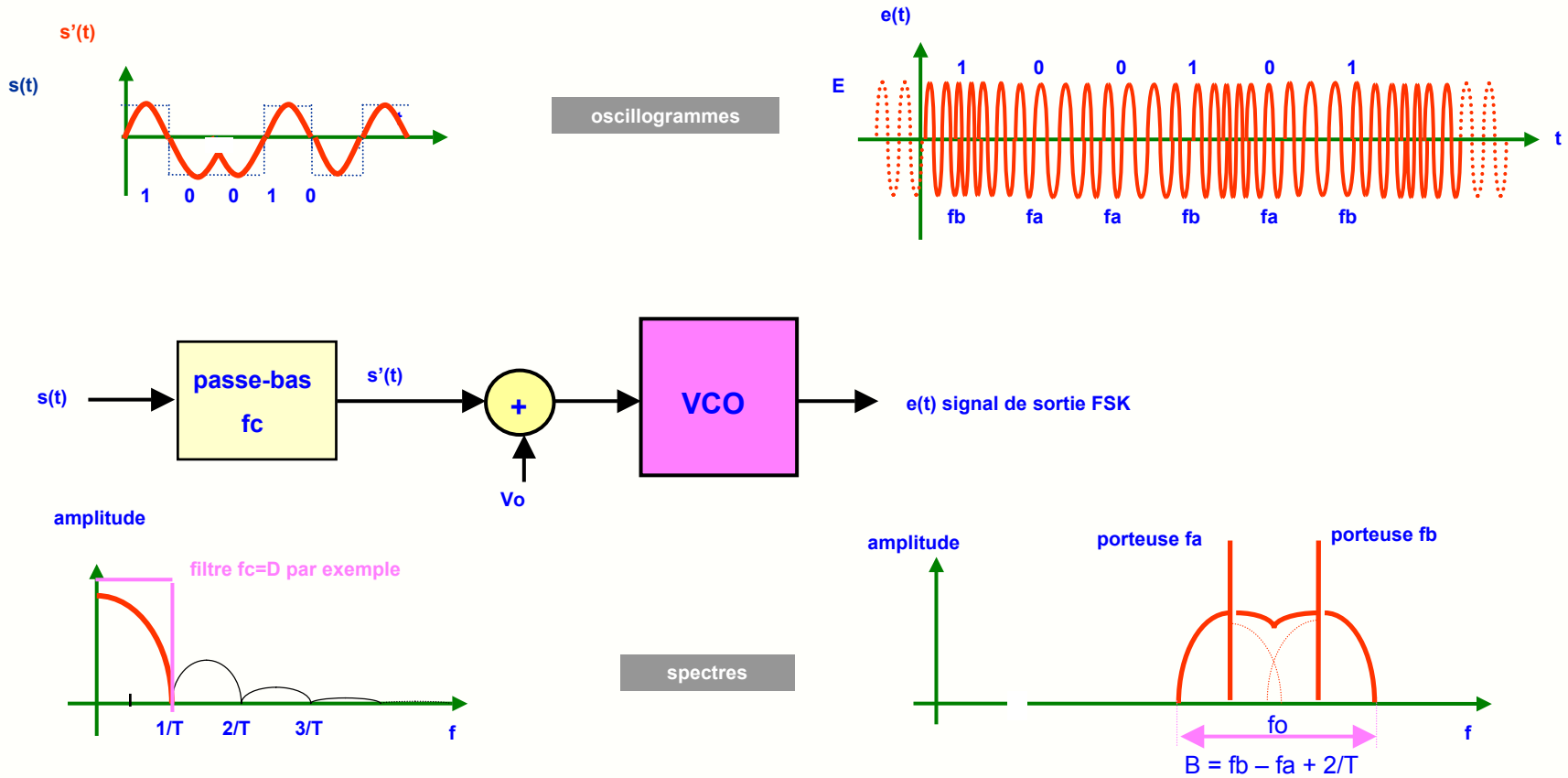
- la fréquence du signal émis varie entre $f_a = f_0 - \Delta f = 996$ kHz et $f_b = f_0 + \Delta f = 1004$ kHz
- le spectre de la porteuse modulée va environ de $f_a - 4D = 956$ kHz à $f_b + 4D = 1044$ kHz
- l'encombrement spectral de cette émission FSK est donc de $B = 88$ kHz



39- Modulation FSK par signal binaire filtré



Pour limiter l'encombrement spectral d'un signal modulé FSK, on filtre toujours les signal binaire avant la modulation :



Exemple : porteuse à $f_0=1$ MHz modulée FSK par un signal $D = 10$ kbits/s filtré à $f_c = 10$ kHz avec une excursion $\Delta f = +$ ou $- 4$ kHz

- la fréquence du signal émis varie entre $f_a = f_0 - \Delta f = 996$ kHz et $f_b = f_0 + \Delta f = 1004$ kHz
- le spectre de la porteuse modulée par la porteuse modulée va environ de $f_a - D = 986$ kHz à $f_b + D = 1014$ kHz
- l'encombrement spectral de cette émission FSK est donc de $B = 28$ kHz



40- Exemple de modulateur FSK : diagramme de l'œil



Un signal musical est converti en numérique par un convertisseur analogique-numérique à sortie série :

- le débit du signal binaire est de $D = 270 \text{ kbits/s}$
- le signal binaire peut être utilisé brut ou être filtré par un filtre passe-bas du second-ordre coupant à $f_c = 80 \text{ kHz}$ environ

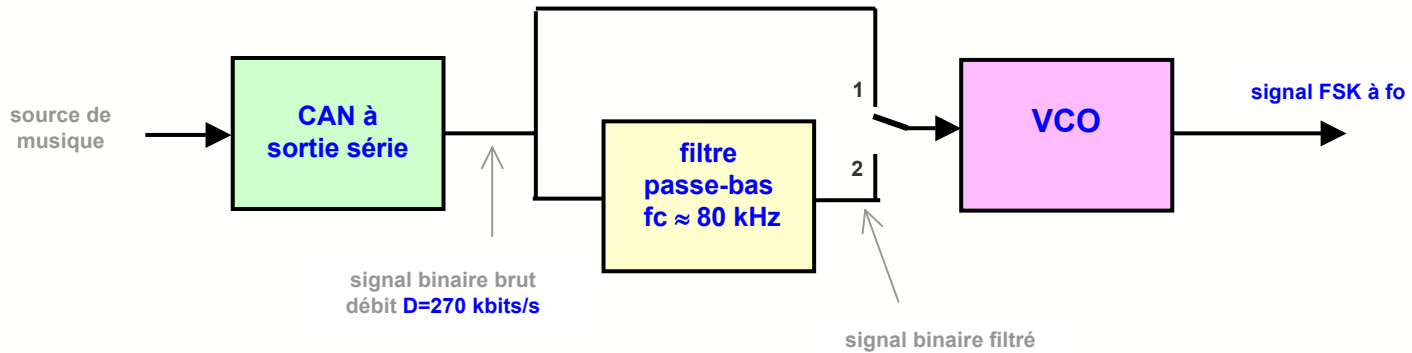
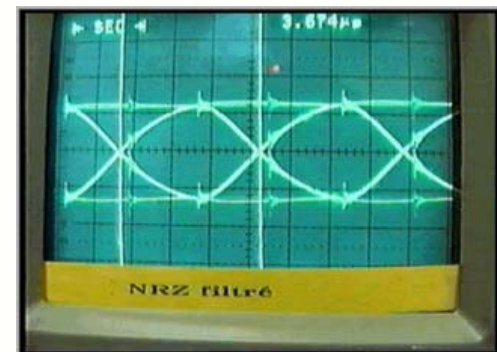
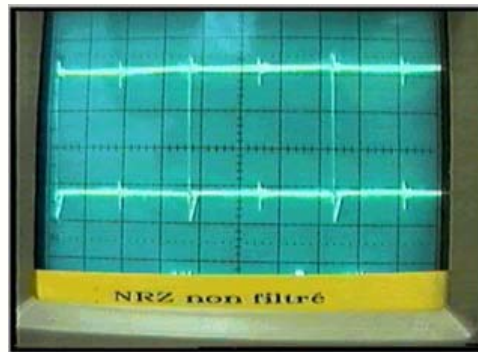


Diagramme de l'œil

durée d'un symbole :

$$T = 1/D = 3,7 \text{ microsecondes}$$

- à gauche : signal binaire non filtré
- à droite : signal binaire filtré

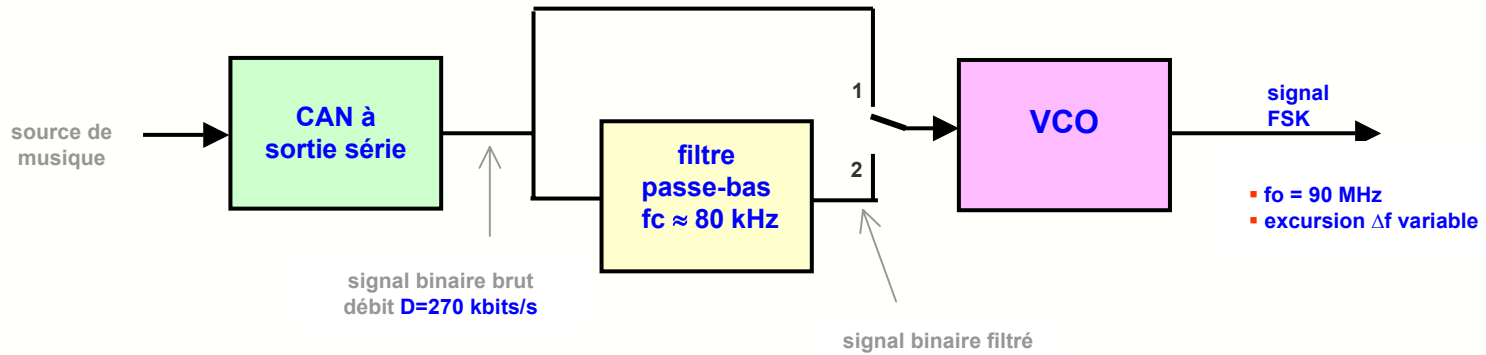


[Vidéo : diagramme de l'œil de signaux binaires](#)

41 - Exemple de modulateur FSK : spectres

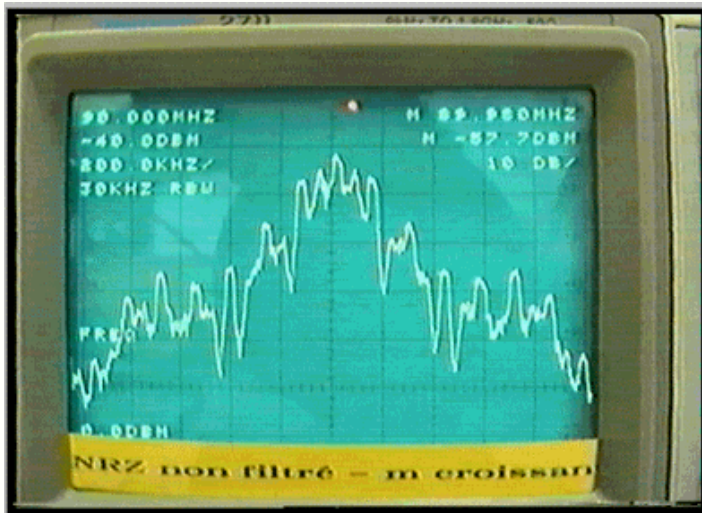


Le signal binaire de débit $D = 270 \text{ kbits/s}$, filtré ou non, module en fréquence une porteuse à $f_0 = 90 \text{ MHz}$

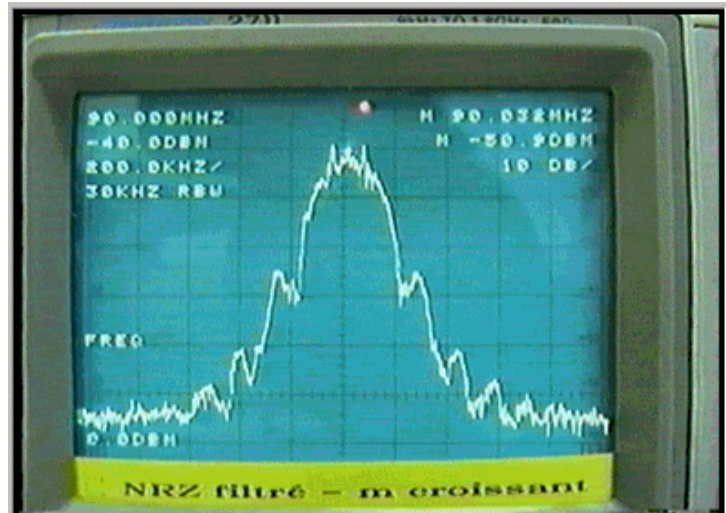


Les vidéos suivantes montrent l'évolution du spectre du signal FSK avec une excursion en fréquence croissante, puis décroissante.

Vidéo : spectre FSK avec signal binaire non filtré



Vidéo : spectre FSK avec signal binaire filtré



Calibres :

- 200 kHz/division
- 10 dB/division



42- Les modulations MSK et GMSK



Parmi les valeurs d'excursions en fréquence possibles pour un débit D donné, il existe une valeur particulière intéressante :

- si le signal binaire de débit D est la séquence « 10101010101... », c'est un signal carré de fréquence $F=D/2$
- si le signal binaire est filtré efficacement, il a une forme quasi sinusoïdale
- l'indice de modulation m le plus intéressant au niveau spectral est $m = 0,5$
- cette valeur de m correspond à l'appellation Minimum Shift Keying (GMSK si le filtre passe-bas est Gaussien)
- l'excursion en fréquence vaut alors $m.F=D/4$ et l'encombrement spectral donné par la formule de Carson $B = 3D/2$

Exemple du GSM :

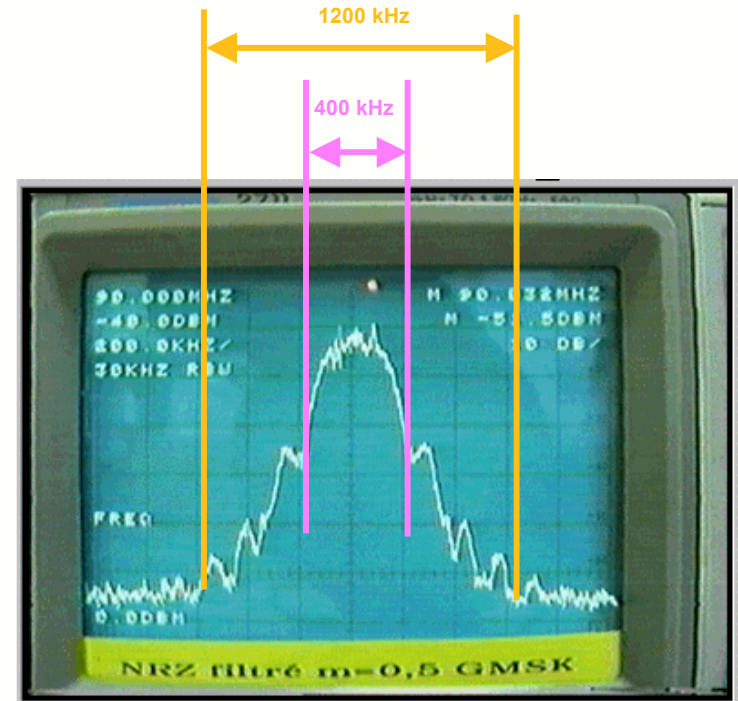
- débit binaire $D = 270$ kbits/s
- basse-fréquence $F = 135$ kHz pour « 101010... »
- excursion $\Delta f = \pm 68$ kHz
- $m = \Delta f / F = 0,5$ et $B = 400$ kHz

Exemple du téléphone sans fil DECT :

- débit binaire $D = 1152$ kbits/s
- basse-fréquence $F = 576$ kHz pour « 101010... »
- excursion $\Delta f = \pm 300$ kHz environ
- $m = \Delta f / F = 0,52$ et $B = 1,73$ MHz

Exemple du BIBOP :

- débit binaire $D = 72$ kbits/s
- basse-fréquence $F = 36$ kHz pour « 101010... »
- excursion $\Delta f = \pm 19,5$ kHz (14 kHz $< \Delta f < 25$ kHz)
- $m = \Delta f / F = 0,54$ et $B = 108$ kHz



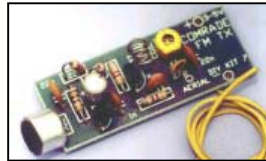
[video](#)



43- Exemples et illustrations



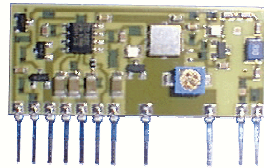
- un émetteur FM simple



- micro HF



- modules d'émission réception FM



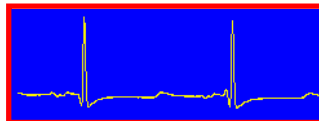
- un émetteur FM de radiodiffusion



- un récepteur FM didactique



- transmetteur d'activité nerveuse et cardiaque



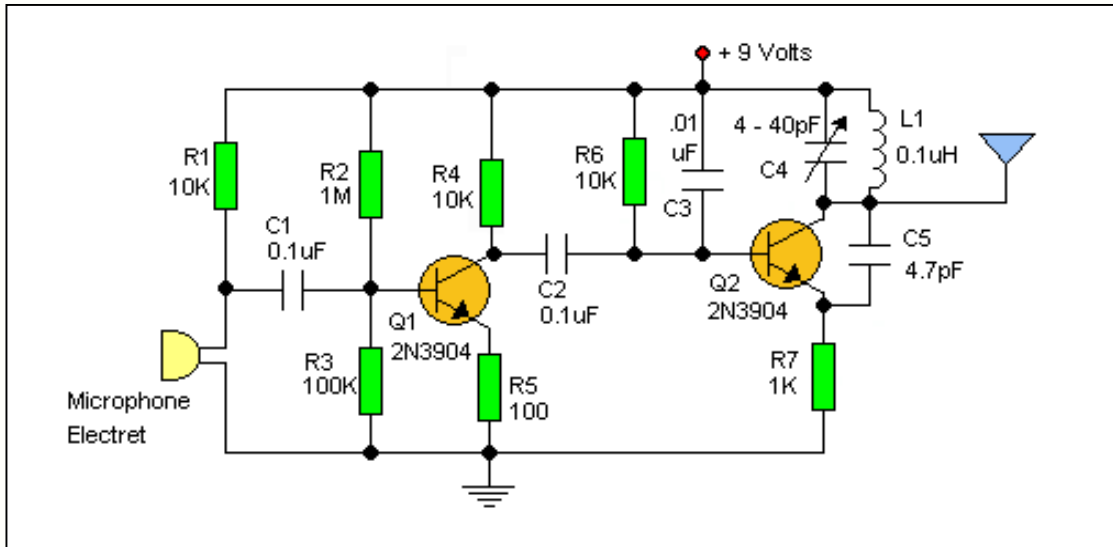


Émetteur FM simple



Il est relativement simple de construire un émetteur pour la bande FM de 88 à 108 MHz et le schéma ci-dessous montre qu'une poignée de composants courants suffit :

- un microphone à électret transforme les sons en signal électrique de quelques dizaines de mV
- ce signal est amplifié par un étage à transistor à résistance d'émetteur non découplée ($Av \approx -Rc/Re \approx -100$)
- le transistor Q2 est monté en oscillateur grâce à la **réaction sortie-entrée** due à C5
- la fréquence d'oscillation dépend de L1, C4 et C5, mais aussi des **capacités de jonctions internes Cbc et Cbe** du transistor
- ces capacités parasites dépendent du point de fonctionnement (I_b , I_c , V_{be}) et varient donc en fonction du signal BF appliqué sur la base à travers C2



Avantage du montage : sa simplicité

Défauts du montage :

- la fréquence d'émission est mal connue
- la fréquence d'émission dépend de toutes les capacités parasites, et change si on approche la main du montage
- le point de repos de Q2 dépend de la température et la fréquence d'émission a une dérive importante

Remarque : ce type d'émetteur reste toutefois intéressant pour la surveillance de la sieste de bébé. En effet, les dérives du montage nécessitant une retouche régulière de C4, on pourra en profiter pour jeter un coup d'œil dans le berceau....



Sennheiser EW135 Wireless Microphone System

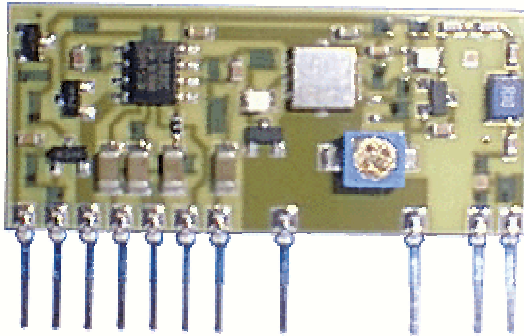
- nombre de canaux : 1280 canaux
- microphone : dynamique cardioïde
- bandes : 518-550, 630-662, 740-772 MHz
- audio Frequency Response : 60-18 kHz
- distorsion à 1KHz : $d < 0.9\%$
- frequency presets : 4
- sorties : 1/4" jack
- maximum Output Level : +4 dBu Unbalanced
- modulation : Wideband FM
- compander system : Sennheiser HDX
- alimentation : 10,5 – 16,0 VDC



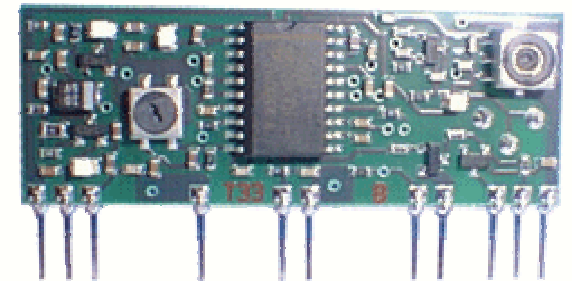
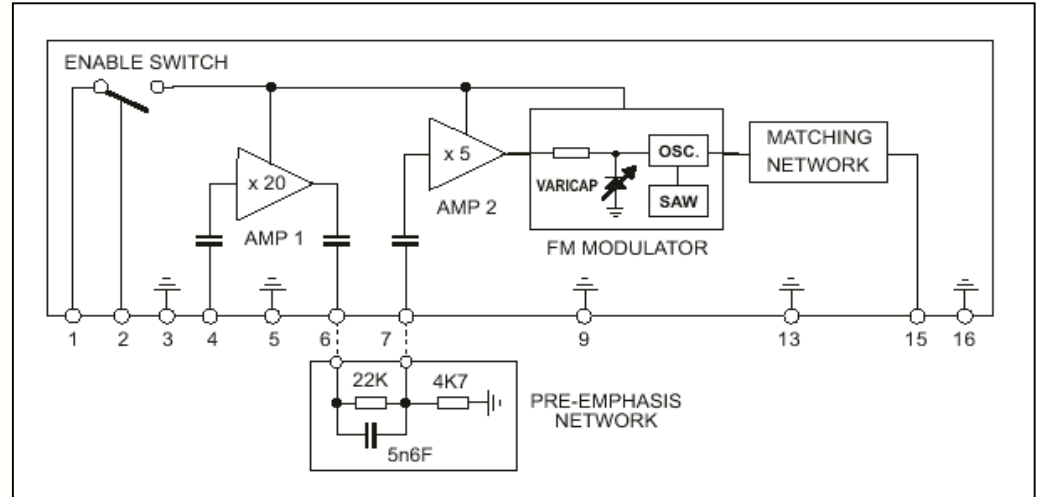
Modules d'émission-réception



Émetteur : TX FM AUDIO

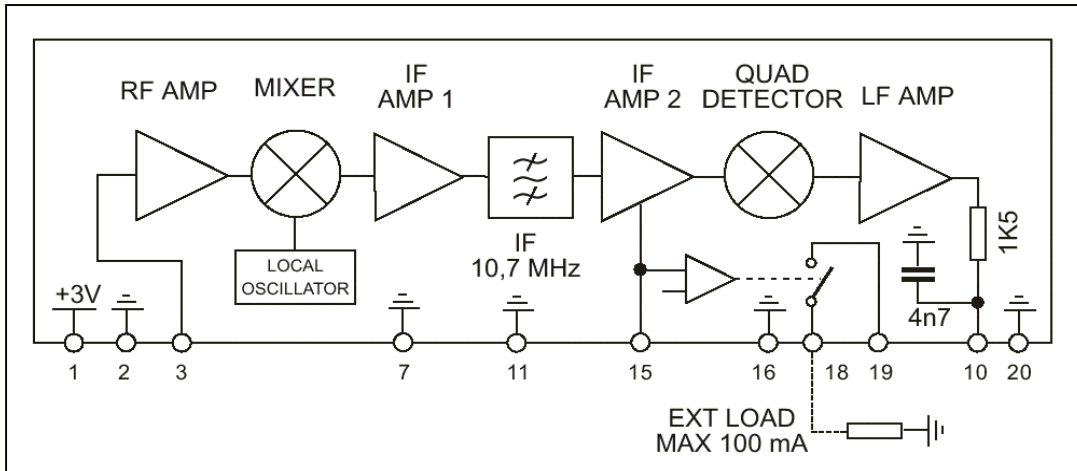


- puissance de sortie : 10mW sur 50W
- modulation : FM
- excursion : $\Delta f = \pm 75$ kHz pour une BF de 100 mVcc
- bande passante : 20Hz à 30kHz
- alimentation : 12VDC/15mA
- fréquence émission : 433MHz (résonateur SAW)
- dimensions : 41 x 19 x 4 mm



Récepteur : RXFM AUDIO

- modulation : FM
- sensibilité HF : -100dBm
- fréquence : 433MHz
- bande passante : 20 à 20kHz
- alimentation : 3V / 15mA
- sortie BF : 100mV pour $\Delta f = \pm 75$ kHz
- dimensions : 51 x 20 x 4,5 mm





QUANTUM 1000E 1 kW FM Transmitter

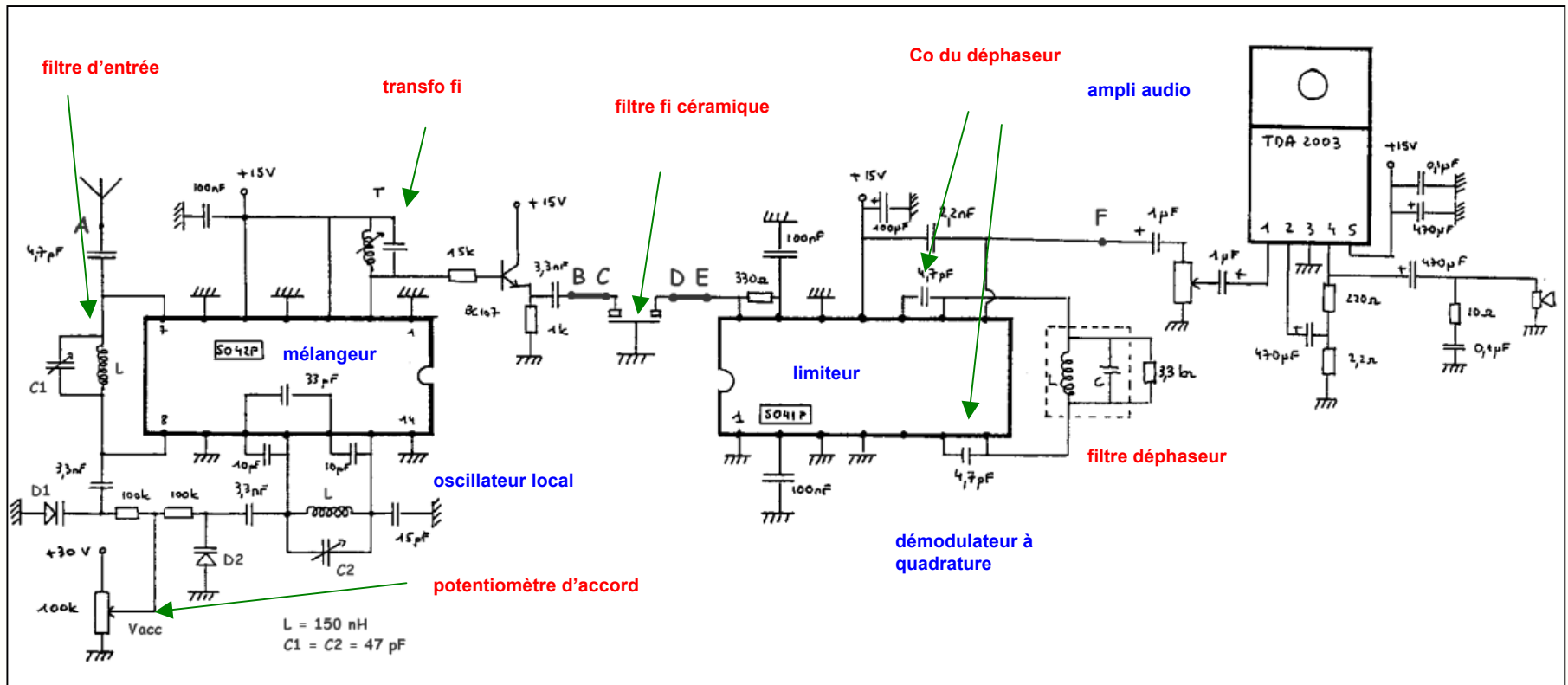
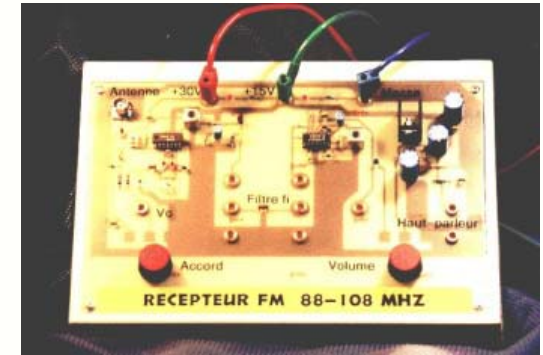
- puissance de sortie 100 à 1000 Watts
- gamme de fréquence 87,5 à 108 MHz
- impédance d'antenne : 50 ohms
- impédance d'entrée BF : 600 ohm
- niveau d'entrée : +10 dBm pour ± 75 kHz à 400 Hz
- réponse en fréquence à $\pm 0,5$ dB : 30 Hz to 15 kHz
- distorsion $< 0,02$ % à 400 Hz
- rapport S/B = -80 dB pour ± 75 kHz à 400 Hz, dans la bande 50 Hz à 15 kHz avec préaccentuation
- génération numérique de la pilote à 19 kHz
- séparation des canaux : >60 dB



Récepteur FM didactique



- le signal f_1 reçu par l'antenne est sélectionné par un premier circuit accordé par L, C1 et la varicap D1 commandée par la tension V_{acc}
- ce signal est ensuite mélangé par le S042P au signal de l'oscillateur local accordé sur f_0 grâce à L, C2 et D2 par la même tension V_{acc}
- en sortie du mélangeur apparaissent les fréquences $f_1 + f_0$ et $f_1 - f_0$
- si f_0 est bien choisie, le signal différence tombe à $f_i = 10,7$ MHz et est filtré par le transformateur T accordé sur 10,7 MHz, puis par le filtre céramique
- l'ampli f_i du SO41P fonctionne en limiteur, et le démodulateur à quadrature restitue le signal BF qui sera amplifié par le TDA2003 et envoyé sur le haut-parleur

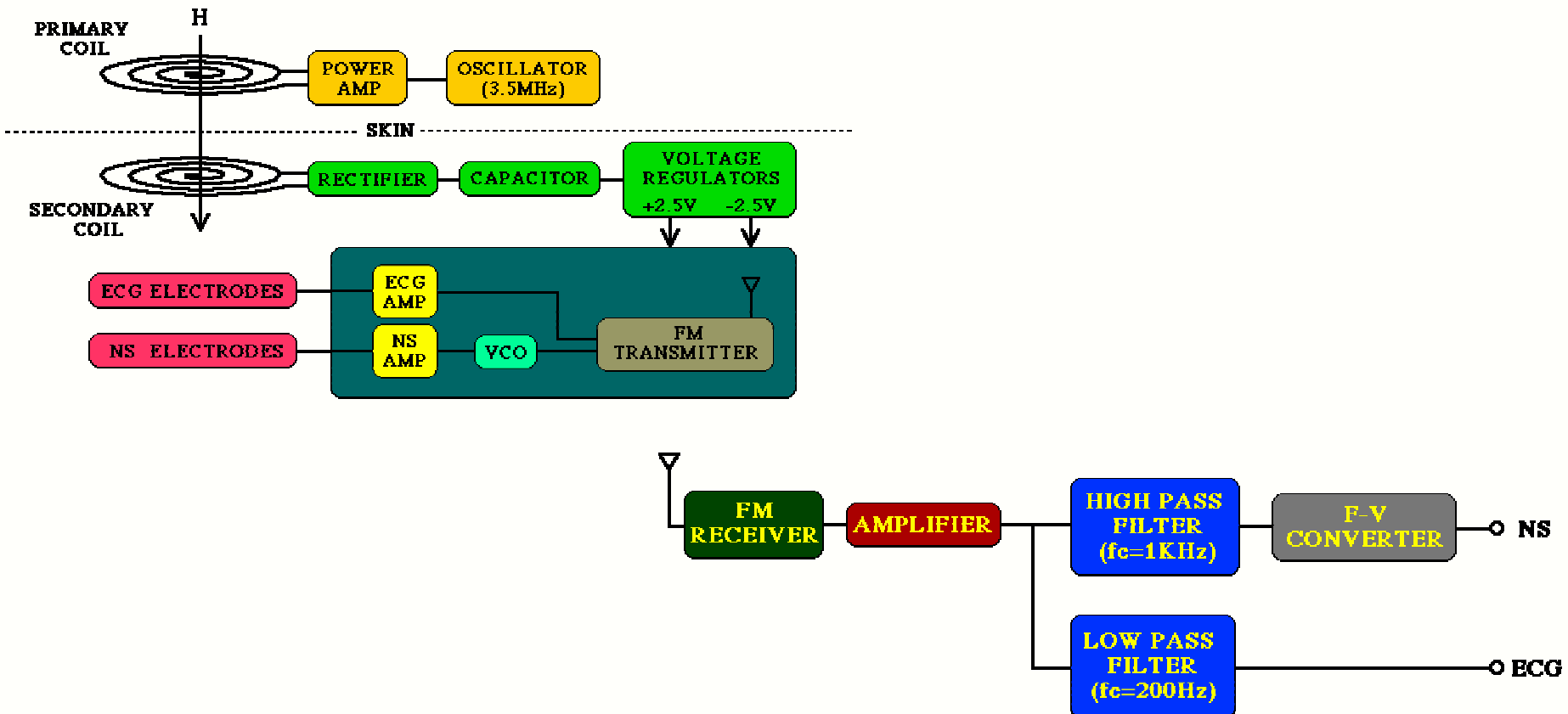


Transmetteur d'activité nerveuse et cardiaque



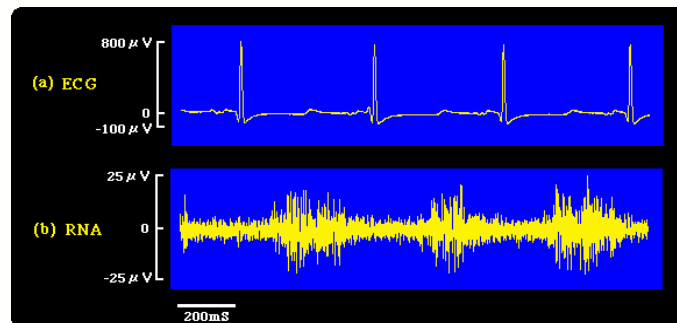
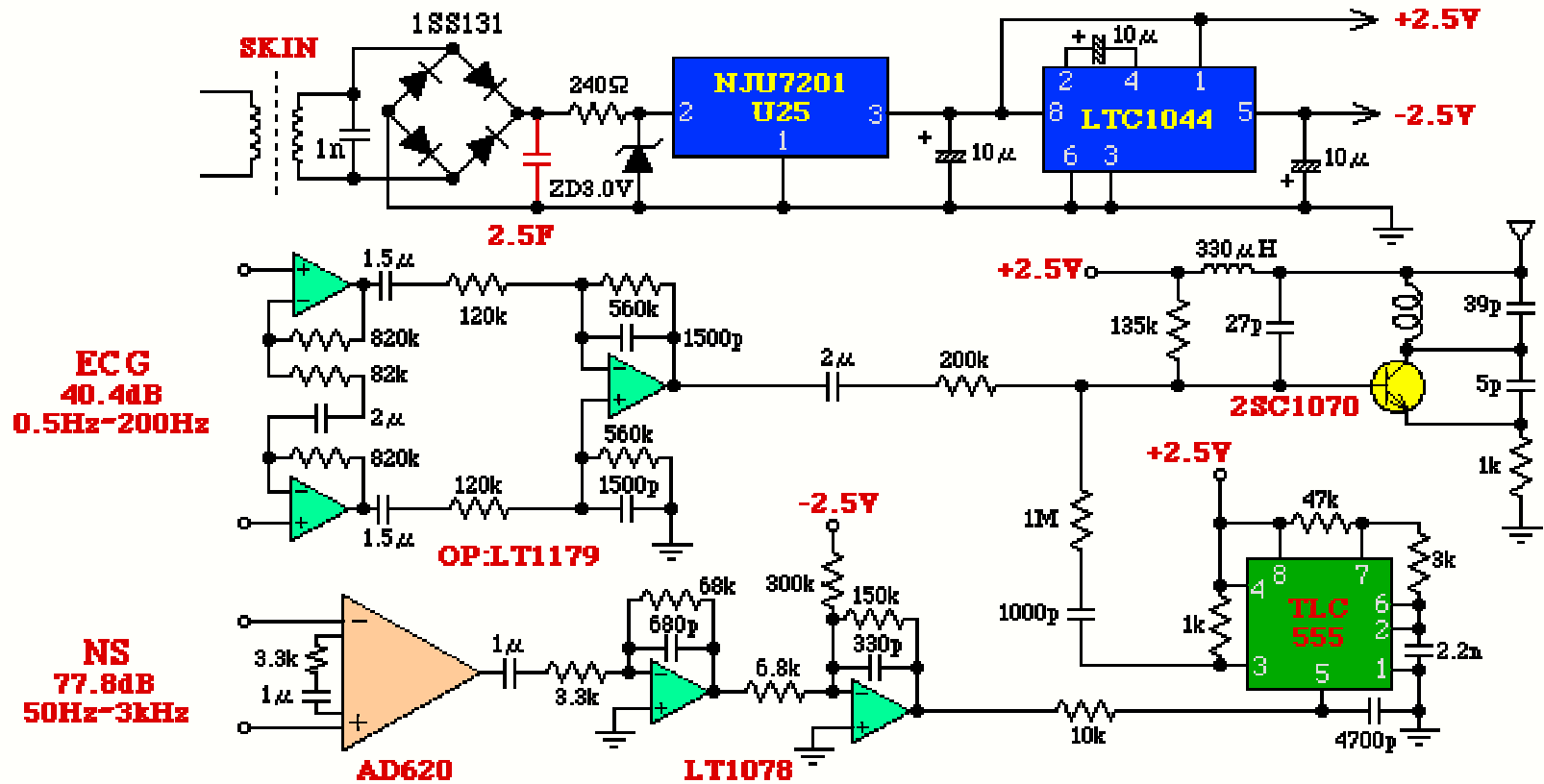
Ce dispositif de télémessure implantable permet de suivre l'activité nerveuse et cardiaque :

- le signal du nerf NS module en FM une sous-porteuse à 5 kHz produite par le TLC555 et on y ajoute le signal ECG
- la somme de ces deux signaux module en FM un oscillateur dans la bande 88-108 MHz
- le signal peut être reçu par un récepteur de radiodiffusion ordinaire
- après réception, un passe-bas isole l'ECG et un passe-haut suivi d'un démodulateur FM récupère le signal d'activité nerveuse
- l'ensemble est télé alimenté à travers la peau par un oscillateur à 3,5 MHz





Transmetteur d'activité (schéma)





Maquette de récepteur TV SECAM

