

Modulation et démodulation

Comme nous l'avons vu le mois dernier, la modulation "tout ou rien" ou bien encore CW est la plus facile à produire pour ce qui est de la réalisation de l'étage modulateur. Un simple interrupteur électronique suffit en effet. Malheureusement, elle ne permet pas de transmettre d'information analogique, c'est à dire d'information variable de façon continue dans le temps. D'autres procédés de modulation ont donc été mis au point au cours des ans avec le développement de la radio et, surtout, avec l'émergence de nouveaux composants et circuits qui ont rendu possible peu à peu ce que les théoriciens avaient imaginé.

La modulation d'amplitude ou AM

Si l'on oublie la CW, c'est le premier procédé de modulation qui a été utilisé en raison de sa relative facilité de réalisation à l'époque des lampes, qui étaient les seuls composants disponibles lors de sa mise au point.

Le principe utilisé est relativement simple et consiste à faire varier l'amplitude de la porteuse haute fréquence au rythme du signal basse fréquence à transmettre. Le synoptique d'un émetteur à modulation d'amplitude peut ainsi être représenté comme indiqué figure 1.

La porteuse est générée par un oscillateur stable, qu'il soit à quartz ou à synthèse de fréquence. A son niveau, et pour d'évidentes raisons de stabilité, il n'est évidemment pas question de parler de modulation.

Selon le cas un ou plusieurs étages multiplicateurs de fréquence peuvent suivre cet oscillateur si l'émetteur doit travailler sur des fréquences élevées, difficiles à produire directement avec un oscillateur à quartz.

Le signal à fréquence adéquate peut alors être appliqué au modulateur. Ce dernier est en général un amplificateur haute fréquence aussi linéaire que possible dont on fait varier la puissance de sortie au rythme de la modulation. Cette variation peut s'obtenir avec un transformateur comme indiqué figure 2a ou avec un transistor utilisé en résistance variable comme indiqué figure 2b. Dans un cas comme dans l'autre, la réalisation de cet étage est toujours délicate car, comme nous le verrons dans un instant, il est nécessaire d'approcher autant que possible un taux de modulation

de 100 % si l'on veut que l'émetteur ait un rendement acceptable.

Le signal modulé peut alors être appliqué à un ou plusieurs amplificateurs haute fréquence jusqu'à atteindre la puissance de sortie désirée (plusieurs centaines de kW sur certains émetteurs grandes ondes et petites ondes actuels). Ces amplificateurs doivent être réalisés avec le plus grand soin ; en effet comme ils traitent le signal modulé, ils doivent être parfaitement linéaires sous peine de détériorer la modulation et d'introduire alors une importante distorsion. Ceci complique évidemment d'autant la réalisation des émetteurs AM surtout lorsque l'on veut atteindre des puissances importantes.

Taux de modulation et spectre du signal

Pour comprendre les avantages et les inconvénients de la modulation d'amplitude, il est nécessaire de faire un peu de trigonométrie, fort simple rassurez-vous. Pour cela examinons la figure 3 qui présente le signal haute fréquence modulé en amplitude dans trois situations différentes.

En 3a, nous avons un signal modulé approximativement à 50 % c'est à dire encore que l'amplitude totale du signal modulé varie entre l'amplitude maximum que peut produire l'émetteur et la moitié de cette valeur.

En 3b nous avons la situation idéale en terme de rendement, mais qui est quasiment impossible à atteindre en pratique, où le taux de modulation est égal à 100 %. L'amplitude du signal modulé varie dans ce cas entre une amplitude nulle et une amplitude égale au maximum de ce que peut pro-

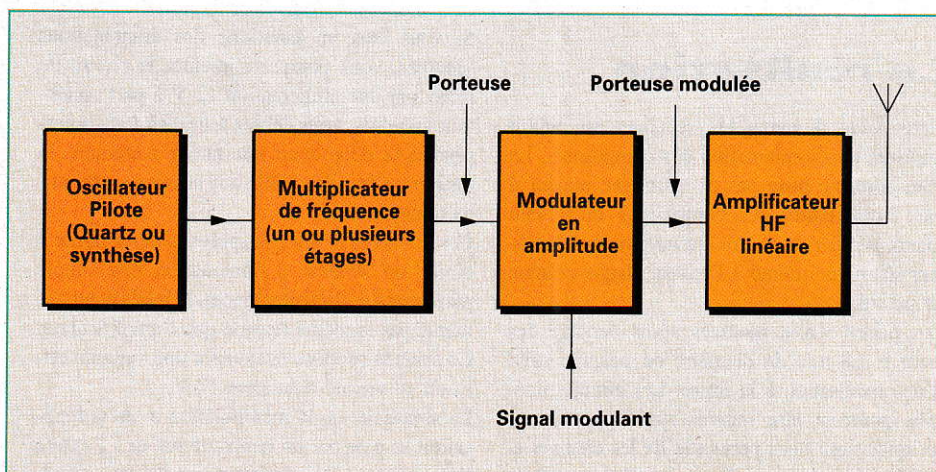


Figure 1 : Synoptique d'un émetteur à modulation d'amplitude.

duire l'émetteur.

En 3c enfin, nous avons la situation qui peut se produire lorsque l'on cherche à s'approcher des 100 % de modulation et qu'on les dépasse parce que l'on ne prend pas de précautions. On est en présence de surmodulation ; l'amplitude du signal modulant étant trop grande au niveau de l'étage modulateur. Il est évident que le résultat produit à la réception est très vite inaudible car présentant des taux de distorsion astronomiques ! Le taux de modulation que nous venons d'évoquer est défini par le rapport des amplitudes respectives des signaux HF non modulé et BF modulateur. L'examen de cette figure permet déjà de voir que les émetteurs AM vont poser quelques problèmes de réglages si l'on veut s'approcher du taux de modulation de 100 % surtout si l'amplitude du signal modulant est variable dans de grandes proportions comme c'est le cas lors de transmission de conversations ou de reproductions musicales par exemple. Bien sûr, il existe des compresseurs de modulation qui limitent ces variations d'amplitude mais ils nuisent à la fidélité du signal transmis.

Si nous nous intéressons maintenant à l'aspect fréquentiel des choses, on peut représenter le signal modulé en amplitude sous la forme :

$$S = (1 + m \cos \omega t) \cos \omega_p t \text{ où}$$

m est le taux de modulation pouvant varier de 0 à 1, ω est la pulsation ($\omega = 2\pi.f$) du signal modulant et ω_p est la pulsation du signal porteur haute fréquence.

Si l'on développe ce produit en appliquant les relations trigonométriques classiques, on obtient une expression de la forme :

$$S = \cos \omega_p t + 1/2 m \cos (\omega_p + \omega) t + 1/2 m \cos (\omega_p - \omega) t$$

En d'autres termes on constate que le signal modulé en amplitude est la somme de trois signaux de fréquence et amplitude bien distinctes :

- un signal à la pulsation ω_p , d'amplitude unitaire qui n'est autre que notre porteur haute fréquence ;
- un signal à la pulsation $\omega_p + \omega$ et d'amplitude au mieux égale à la moitié de celle de la porteur si le taux de modulation vaut 1 (ou 100 % si vous préférez) qui véhicule donc l'information modulante à la pulsation ω ;
- un signal à la pulsation $\omega_p - \omega$, d'amplitude elle aussi égale au mieux à la moitié de celle de la porteur et qui véhicule aussi l'information modulante à la pulsation ω .

Au vu de cette relation, nous comprenons pourquoi il est souhaitable de s'approcher du taux de modulation idéal de 100 % puisque c'est dans ce cas que la puissance des signaux utiles sera la plus importante. Si nous représentons cela sous forme "spectrale", c'est à dire pour parler plus simplement sur une échelle graduée en fréquences et en amplitudes, on obtient le diagramme de la figure 4. Notez que nous l'avons gradué en fréquence et non en pulsation ce qui revient au même puisque ces deux grandeurs sont proportionnelles dans le rapport 2π .

On constate donc qu'un signal modulé en amplitude comporte la porteur d'amplitude constante et deux bandes latérales de modulation, d'amplitude au plus égale à la moitié de celle de la por-

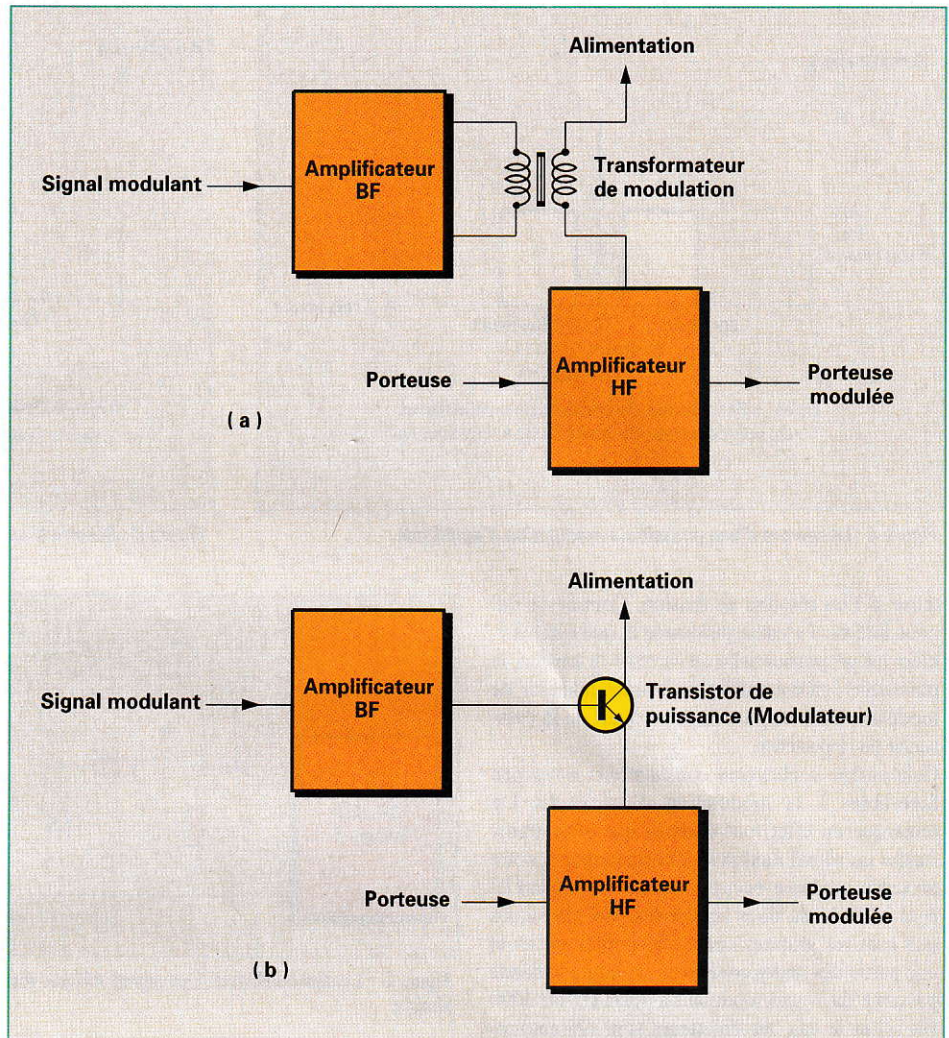


Figure 2 : Deux principes simples de modulateurs d'amplitude.

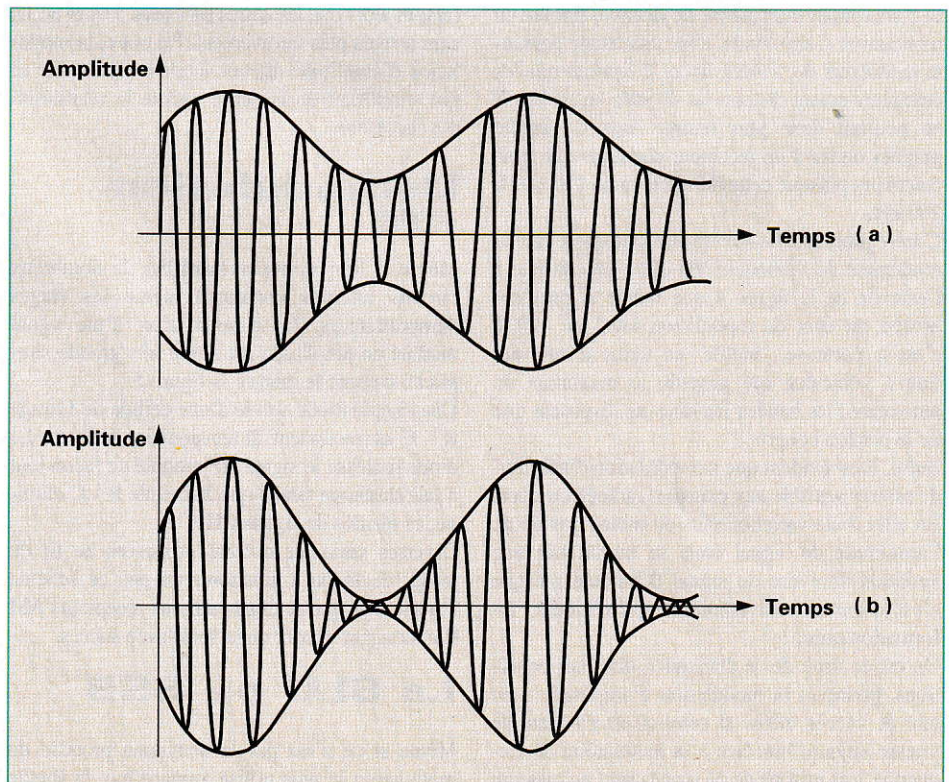


Figure 3 : Aspect d'un signal modulé en amplitude dans diverses situations.

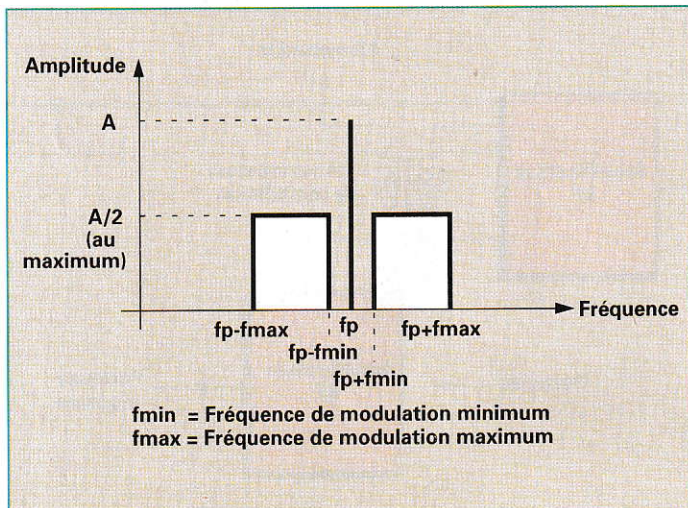


Figure 4 : Le spectre d'une émission à modulation d'amplitude.

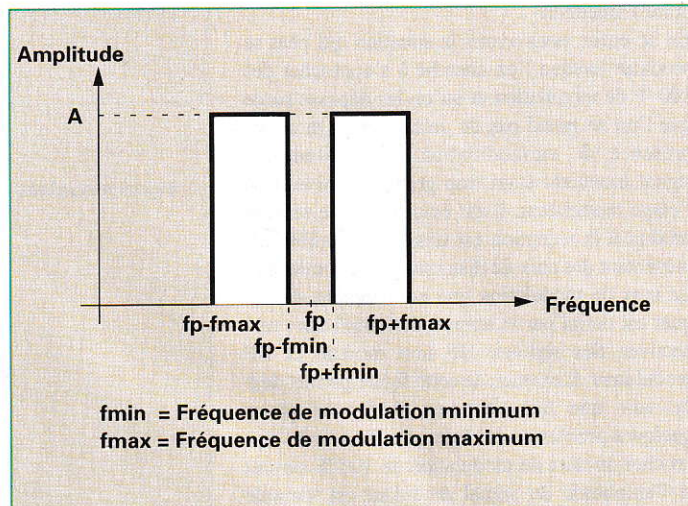


Figure 6 : Spectre d'une émission DSB ou à porteuse supprimée.

teuse si l'on résonne en tension. Comme ce qui nous intéresse c'est la puissance et que cette dernière est proportionnelle au carré de la tension, la puissance contenue dans les bandes latérales de modulation est au plus égale au quart de la puissance de la porteuse.

Cela amène à plusieurs constatations assez peu favorables à la modulation d'amplitude. On remarque en effet tout d'abord que pour transmettre un signal modulant à la fréquence f , notre porteuse modulée occupe un espace fréquentiel égal à $2f$. Ainsi, dans les bandes AM classiques que sont les grandes ondes, les petites ondes et une partie des ondes courtes où on limite la bande passante du signal modulant à 4500 Hz ou 3000 Hz selon le cas, les émetteurs sont obligatoirement distants de 9000 Hz ou de 6000 Hz si on ne veut pas que leurs émissions se chevauchent.

Si l'on voulait transmettre de la haute fidélité en modulation d'amplitude, avec une bande passante modulante de 20 kHz donc, il faudrait que les émetteurs soient distants de 40 kHz au moins. Il ne pourrait donc plus rentrer dans la gamme grandes ondes d'un récepteur classique que trois émetteurs puisque cette dernière va de 150 kHz à 260 kHz.

L'autre problème beaucoup plus critique a trait au rendement de l'émetteur. En effet, on constate à l'examen de la figure 4 que même si on s'approche du taux de modulation idéal de 100 % c'est la porteuse, "inutile" en terme d'information à véhiculer, qui gaspille le maximum de puissance ; les bandes latérales ne disposant que de la portion congrue !

Enfin, il est évident que la modulation d'amplitude est très sensible aux parasites radioélectriques. En effet toute variation plus ou moins brutale de l'amplitude du signal émis se traduit par une variation similaire du signal démodulé puisque c'est justement cette amplitude qui véhicule l'information utile.

On est en droit de se demander, dans ces conditions, pourquoi la modulation d'amplitude a eu tant de succès même si celui-ci est en perte de vitesse aujourd'hui face à la modulation de fréquence. Les raisons de ce succès sont en majeure partie historiques puisque, comme nous l'avons

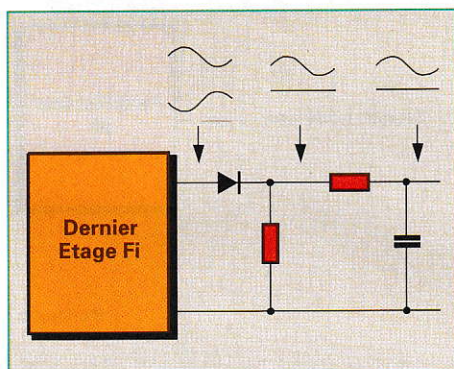


Figure 5 : La démodulation d'un signal AM est fort simple.

vu ci-dessus, la modulation d'amplitude était relativement facile à produire à l'époque des lampes alors que les autres procédés, FM et BLU, sont arrivés plus tardivement. En outre, la modulation d'amplitude est très facile à démoduler ce qui simplifiait et simplifie encore la réalisation des récepteurs.

Démodulation AM

Même si l'on trouve aujourd'hui de nombreux circuits intégrés contenant même les étages démodulateurs, la démodulation d'un signal modulé en amplitude est d'une très grande simplicité comme le montre la figure 5.

Une simple diode suivie d'une cellule de filtrage R - C correctement dimensionnée suffisent. La diode redresse le signal HF modulé de façon tout à fait classique tandis que la cellule R - C élimine les résidus de signaux HF.

Diverses variantes ont été proposées au fil du temps de façon à améliorer un peu ce schéma mais sachez que de très nombreux récepteurs AM fonctionnent encore de la sorte avec succès.

La BLU ou SSB

Même si ce n'est pas le deuxième procédé de modulation le plus utilisé aujourd'hui, la Bande Latérale Unique, souvent plus connue sous son

sigle anglo-saxon de SSB (Single Side Band) est le procédé de modulation qui découle le plus logiquement d'une simple analyse des "défauts" de la modulation d'amplitude.

Voici comment elle est née. Nous avons vu, grâce à la figure 4 et aux relations associées, que la majeure partie de la puissance de notre émetteur AM était "gaspillée" par la porteuse qui ne servait à rien pour ce qui est du signal modulant ou signal utile. Une première idée a donc consisté à supprimer purement et simplement cette porteuse laissant ainsi un signal dont le spectre est représenté figure 6. On est en présence d'un type d'émission assez rare appelé DSB ou Double Side Band, c'est à dire encore double bande latérale ou bien encore émission à porteuse supprimée.

Poussant plus loin l'idée de simplification, il a alors été remarqué que les deux bandes latérales véhiculaient la même information puisque l'une est à la fréquence (ou à la pulsation) $fp + f$ et l'autre à la fréquence $fp - f$.

Il est donc inutile de transmettre ces deux bandes puisqu'une seule doit suffire à reconstituer le signal utile. La BLU ou SSB était née. Son spectre est visible figure 7 mais vous l'aviez certainement déjà découvert vous-même à la lueur de notre exposé.

Remarquez qu'en réalité il n'existe pas une émission BLU mais bien deux émissions différentes selon que l'on décide de conserver la bande latérale inférieure - on travaille alors en BLI ou LSB - ou la bande latérale supérieure - on travaille alors en BLS ou USB.

Il va sans dire que ce procédé de modulation est d'une très grande efficacité. Son encombrement spectral est en effet strictement limité à la bande passante du signal utile et non à son double comme en AM. En outre, toute la puissance de l'émetteur peut être consacrée à l'émission du signal utile puisqu'il ne reste plus que lui !

On peut alors se demander pourquoi ce procédé de modulation, en apparence si merveilleux, est si peu employé de nos jours puisqu'on ne le trouve guère que chez les radioamateurs et sur certains appareils de communication professionnels. Il y a deux raisons majeures à cela. La première

est que les émetteurs BLU sont difficiles à réaliser. En effet, il n'est pas si simple que cela de produire un signal sans porteuse ne comportant qu'une seule bande latérale de modulation. Il faut faire appel à des étages appelés modulateurs équilibrés dont la réalisation, même aujourd'hui, est encore assez délicate. Mais le problème majeur est celui des récepteurs.

La démodulation BLU

Pour recevoir la BLU il faut disposer d'un étage démodulateur spécial, appelé détecteur de produit, muni de ce que l'on appelle un BFO pour Beat Frequency Oscillator ou oscillateur de battement. En effet, le seul signal reçu à la fréquence $f_p + f$ ne peut être démodulé. Il faut donc le mélanger avec le signal issu de cet oscillateur de battement comme cela est schématisé figure 8.

Pour que cela fonctionne, cet oscillateur doit être réglé sur une fréquence f_p égale à la fréquence porteuse utilisée à l'émission. Le détecteur de produit réalise alors, comme son nom l'indique, le produit des signaux reçu et issu du BFO ce qui peut s'exprimer mathématiquement de la façon suivante :

$S = \cos(\omega p1 + \omega) t \times \cos \omega p2 t$ où $\omega p2$ est la pulsation du signal fourni par le BFO, $\omega p1$ est évidemment la pulsation de la porteuse et ω la pulsation du signal utile.

Un simple développement trigonométrique montre que cette relation peut se mettre sous la forme :

$$S = \frac{1}{2} [\cos(\omega p1 + \omega + \omega p2) t + \cos(\omega p1 + \omega - \omega p2) t]$$

Il est évident à l'examen de cette relation que si $\omega p1$ et $\omega p2$ sont rigoureusement égales, ce qui est la condition sine qua non du bon fonctionnement d'un démodulateur BLU, on récupère en sortie un signal à fréquence $2f_p + f$ qui est parfaitement inutile et éliminé par filtrage ainsi qu'un signal à fréquence f qui n'est autre que notre signal modulant utile.

Il est évident que le moindre décalage de fréquence entre l'émetteur et le BFO va produire un décalage de fréquence du signal f reçu qui va très vite rendre ce dernier inaudible. C'est pour cette raison que, si vous avez déjà entendu des liaisons en BLU (liaisons avec les navires en mer le plus souvent), la voix a parfois une sonorité à la "Bugs Bunny" lorsque le BFO du récepteur dérive. Tous les récepteurs BLU disposent donc d'un réglage d'accord de ce BFO pour rattraper un éventuel décalage. Si on peut demander à un utilisateur professionnel de retoucher régulièrement un tel réglage pour assurer la continuité d'une communication, il est bien évident que ce n'est pas envisageable sur un récepteur grand public. C'est en grande partie à cause de cela que la BLU n'existe pas dans les bandes de radiodiffusion destinées au grand public malgré son efficacité.

La modulation de fréquence ou FM

Procédé de modulation omniprésent aujourd'hui, surtout depuis la libéralisation de la bande FM et

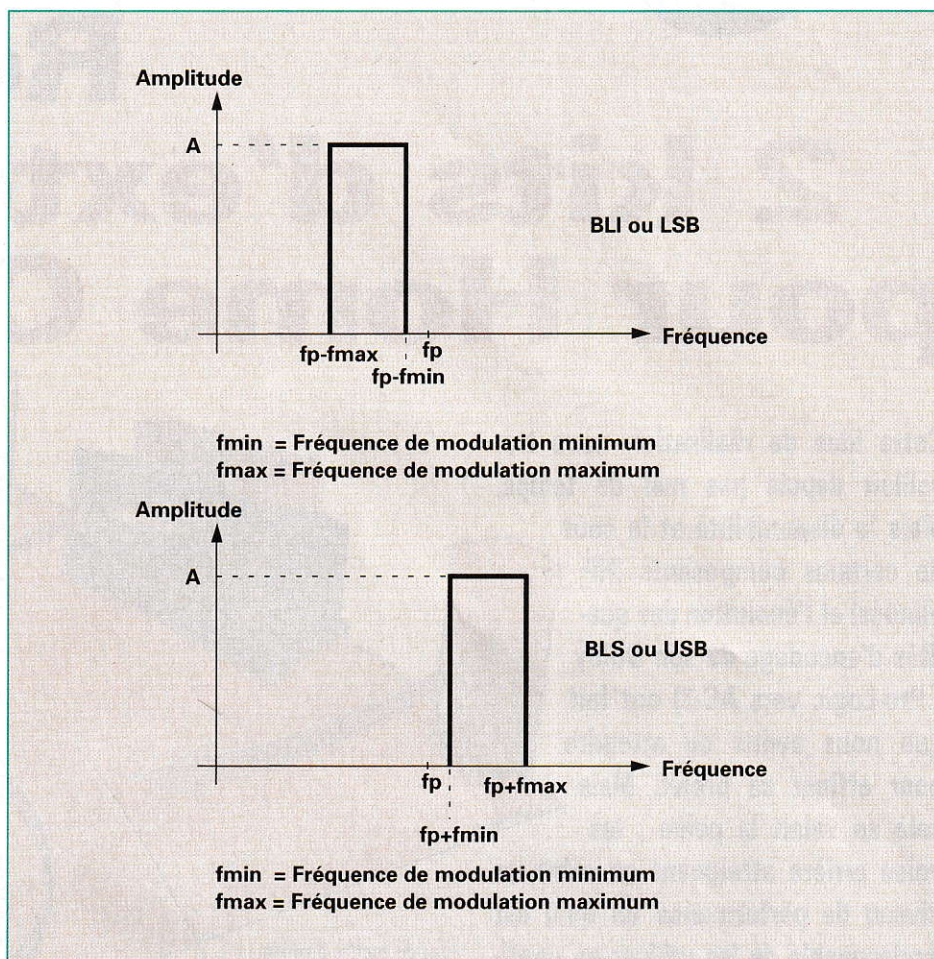


Figure 7 : Spectre d'une émission en BLU ou SSB.

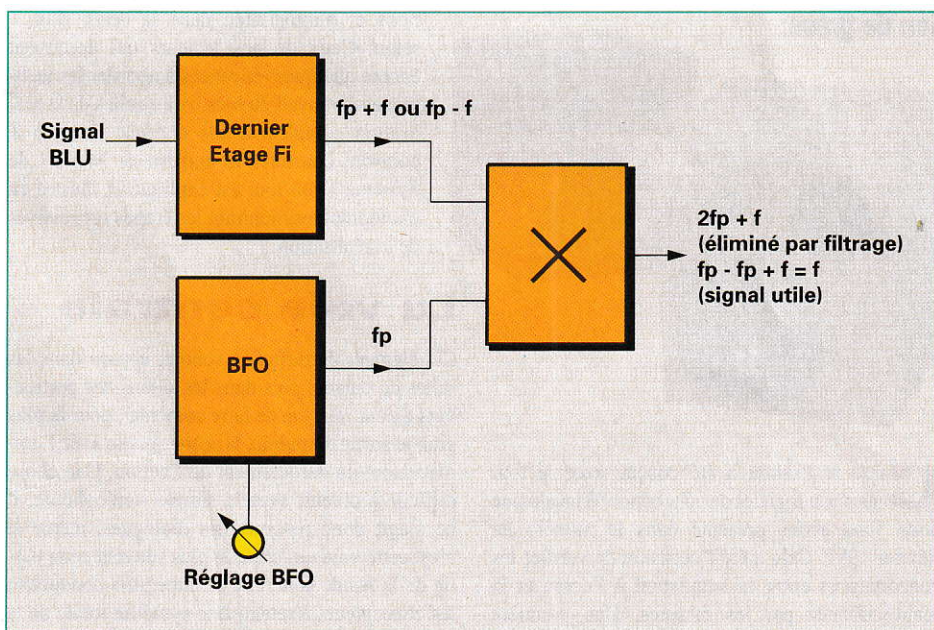


Figure 8 : Synoptique d'un démodulateur BLU.

son ouverture aux radios locales, la modulation de fréquence, même si elle est loin d'être parfaite en termes de rendement et d'occupation spectrale, présente des caractéristiques particulières qui ont vite assuré son succès.

Les deux principales sont la possibilité de transmettre des signaux en haute fidélité et la quasi

insensibilité aux parasites radioélectriques. Malgré cela, la compréhension du procédé de modulation n'est pas plus complexe que ce que nous avons vu jusqu'à présent comme vous pourrez le constater dans notre prochain numéro.

C. Tavernier