Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

Band: 34 (1961)

Heft: 6

Artikel: La modulation de fréquence et sa technique

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-562691

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

wiederholt. Gewisse naive Chiffreure handeln so nachlässig, dass sie unverstandene Worte im Klaren durchgeben; das war seinerzeit die grosse Unvorsichtigkeit Napoleons, die zur Folge hatte, dass alle seine Meldungen vom Feinde dekryptiert wurden. Die Art und Weise wie ein Chiffrierverfahren angewendet wird, erhöht oder vermindert die Sicherheit desselben: ein stereotyp arbeitender, phantasieloser Chiffreur liefert dem Dekrypteur unwillkürlich bedeutend mehr Merkmale, als derjenige, der seine Spezialität beherrscht.

Schliesslich darf die Chiffrierung erst nach reiflicher Überlegung zur Anwendung gelangen; der Zeitbedarf und die Gefahr, den Arbeitsgang zu überladen, sprechen in vielen Fällen für die offene Sprache, insbesondere bei unsteter Lage und wenn der Inhalt einer Meldung sofort ausgewertet werden muss. Mit den Fortschritten der Elektrotechnik ist der Funk nicht mehr nur als Übermittlungsmittel zu betrachten. Die Impulsmodulation der Ultrakurzwellen verlangt ohnehin zwischen Sender und Empfänger eine Verständigung, die, ohne ausdrückliche Vereinbarung zwischen den Korrespondenten nicht realisierbar wäre.

Die Wahrung der Geheimhaltung verschiebt sich allmählich in die Übermittlungstechnik und es werden Übertragungsverfahren angestrebt, die eine Verständigung im Klartext ermöglichen, ohne dass ein Eindringen des Mithörenden befürchtet werden muss.

La modulation de fréquence et sa technique

Pour le technicien, la modulation de fréquence ne se limite pas à la radiodiffusion, c'est un procédé de modulation qui trouve des applications dans de nombreux autres domaines. Aussi nous paraît-il nécessaire d'en bien connaître les bases physiques, avant de passer à la technique pour finir aux réalisations; le sujet n'est pas si aride qu'un petit effort d'assimilation n'en triomphe.

Porteuse et modulation

Nous savons qu'un conducteur parcouru par un courant électrique continu engendre dans l'espace environnant un champ magnétique. Pour s'établir, ce champ emprunte de l'énergie au circuit, énergie qu'il lui restitue au moment de la rupture du courant: c'est le phénomène d'auto-induction ou self-induction.

Si c'est un courant alternatif qui parcourt le conducteur, le champ magnétique engendré est aussi alternatif à la fréquence du courant. Il se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière en soustrayant continuellement de l'énergie au circuit. On dit que ce circuit rayonne de l'énergie électromagnétique; cela est vrai pour tous les circuits. Mais la quantité d'énergie rayonnée est essentiellement fonction des dimensions du circuit par rapport à la *longueur d'onde* du courant alternatif qui le traverse.

La longueur d'onde est liée à la *fréquence* du courant par la relation connue: $\lambda = \frac{v}{f}$ ou en mètres: $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f \cdot c/s}$.

Ceci explique qu'une ligne de transport d'énergie électrique à 50 c/s, fréquence correspondant à $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^6 = 6000$ km, perd, par rayonnement, une quantité d'énergie infime quoique parcourue par des courants énormes, alors qu'à 100 Mc/s, par exemple ($\lambda = 3$ m), deux tiges de cuivre de 0,75 m peuvent rayonner des kilowatts.

Nous savons d'autre part que le phénomène réciproque du rayonnement électromagnétique existe. Il se traduit par le fait qu'un conducteur placé dans un champ électromagnétique est le siège d'un courant induit à la fréquence même du champ. Savoir mettre en évidence et utiliser ce courant induit, c'est être à même de réaliser une liaison radioélectrique.

Le champ électromagnétique est donc le «véhicule» assurant la liaison, l'onde correspondante est dite *onde porteuse*. Le message à transmettre constitue en quelque sorte la «charge utile» dont on veut lester la porteuse, la modulation étant l'art d'incorporer cette «charge» à la porteuse.

— Il est évident que le seul fait de la présence ou de l'absence de la porteuse au lieu de réception peut déjà avoir une signification. Il suffira de coder ces «présences» et ces «absences» de porteuse, le morse n'est pas autre chose, pour transmettre un message complet; c'est ainsi que furent obtenues les premières liaisons radiotélégraphiques. C'était une modulation par «tout ou rien», procédé par trop rudimentaire pour satisfaire longtemps les techniciens de l'époque. Aussi allait-on faire appel rapidement à des formes de modulations plus nuancées qui permettraient de transmettre la parole et les sons, puis les images.

Du point de vue physique, moduler une onde, c'est asservir une ou plusieurs de ses grandeurs caractéristiques au signal à transmettre. Voyons donc quels sont ces éléments caractéristiques, les procédés de modulation possibles en découlent immédiatement.

— Le courant alternatif à haute fréquence constituant l'onde porteuse est représenté graphiquement figure 1. On voit que le courant est tantôt positif, tantôt négatif, sa valeur *i* à un intant *t* quelconque est donnée par la relation:

$$i = a \sin \omega t + \varphi_0.$$

Dans cette expression, le terme *a* est l'*amplitude* de l'onde, soit 10 A, par exemple; le terme ω est la *pulsation* liée à la *fréquence* par la relation: $\omega = 2 \pi f$; à 100 Mc/s, $\omega = 2 \pi \cdot 10^8$; enfin φ_0 est la *phase* à l'origine, soit 90° sur la figure 1. Suivant que la modulation affectera le terme *a*, ω, ou $(\omega t + \varphi_0)$, on aura opéré une modulation d'amplitude, de fréquence ou de phase.

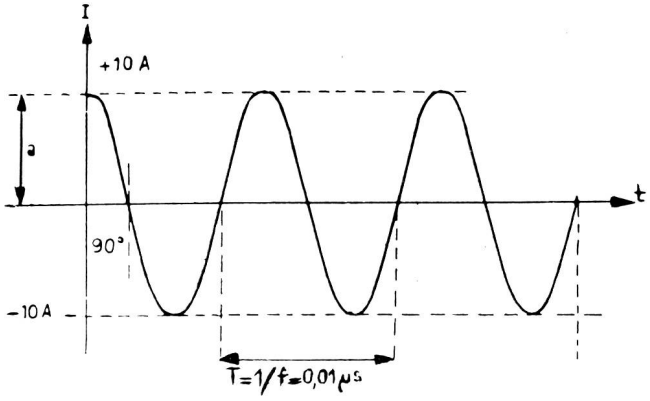


Fig. 1. L'onde HF et les grandeurs qui la caractérisent.

Nous envisagerons chacun de ces cas en supposant le signal de modulation lui-même sinusoïdal, sa fréquence sera toujours très inférieure à celle de la porteuse. Un cycle d'un signal à 1000 c/s couvre, par exemple, 100 000 c/s d'une porteuse à 100 Mc/s, on ne s'étonnera donc pas que les rapports de fréquence ne soient pas respectés sur les figures. D'autre part, un signal de modulation est rarement sinusoïdal mais en général beaucoup plus complexe, cela ne change rien au raisonnement. Il faudra cependant prendre en considération deux éléments caractéristiques du signal de modulation: son amplitude et sa fréquence qui ont évidemment la même définition que pour la porteuse.

L'amplitude du signal de modulation est liée à la puissance du son, la fréquence à sa hauteur; on admet en général pour limites 20 et 15 000 c/s. L'expression de ce signal est de la forme: $j = A \sin \Omega t$.

La modulation d'amplitude

Nous avons vu que l'amplitude de l'onde H.F. est représentée par le terme *a* qui vaut 10 A dans notre exemple de la figure 1. Moduler l'amplitude de la porteuse, c'est faire en sorte que ce terme *a* vaille plus de 10 A à certains moments et, à d'autres, moins de 10 A, ou, d'une façon plus rigoureuse, faire que ce terme, au lieu de rester constant, prenne la forme: $a (1 + A \sin \Omega t)$. Physiquement, cela se traduit par l'aspect de la figure 2 *b*, la figure 2 *a* représentant le signal de modulation.

Nous voyons immédiatement que, pour qu'il y ait à chaque instant proportionnalité entre le signal de modulation et l'amplitude de l'onde H. F., en d'autres termes pour qu'il n'y ait pas de distorsion, il y aura une limite naturelle à l'amplitude du signal de modulation: c'est celle qui provoquera l'annulation de la porteuse dans les creux de modulation. On dit alors que la porteuse est modulée à 100 %; la conséquence est que, dans notre exemple, l'*amplitude* de la porteuse oscille 1000 fois par seconde entre 0 et

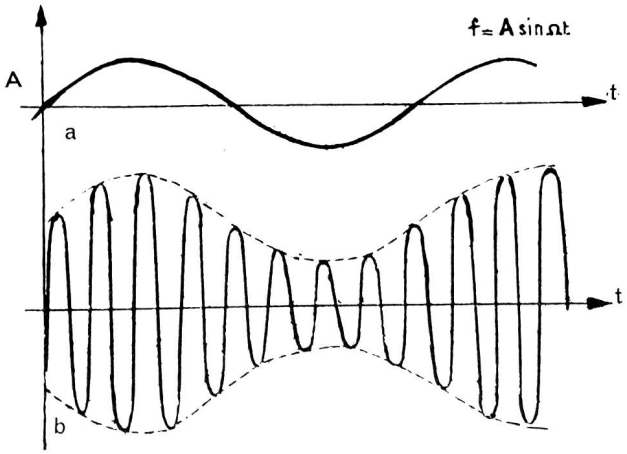


Fig. 2. a) signal de modulation; b) l'onde modulée en amplitude.

20 A, restant bien entendu que la *valeur instantanée* du courant H.F., *i*, oscille 100 millions de fois par seconde entre des limites variables ayant pour bornes 0 et + ou — 20 A. Mathématiquement, l'onde modulée en amplitude a pour expression:

$$i = a (1 + A \sin \Omega t) \sin (\omega t + \varphi_0)$$

dont la décomposition, délectation des «matheux», fait apparaître les *bandes latérales* situées de part et d'autre de la porteuse à la distance $\frac{\Omega}{2\pi}$. Ainsi, la modulation en amplitude d'une porteuse à 100 Mc/s par un signal à 1000 c/s provoque l'apparition de deux bandes latérales ayant pour fréquence, respectivement: 99,999 Mc/s et 100,001 Mc/s. Inutile de préciser qu'il ne s'agit pas là d'une abstraction mais d'un phénomène réel dont l'une des conséquences est la limitation à 4500 c/s du spectre B.F. en radiodiffusion, pour ne pas déborder de la bande de 9 kc/s allouée en principe à chaque canal d'émission.

On est allé plus loin en radiotéléphonie commerciale pour limiter la largeur de bande nécessaire à chaque station: on supprime délibérément, mais pas très simplement, à l'émission, l'une des bandes latérales et la porteuse pour réaliser une liaison dite à bande latérale unique (B.L.U.).

La modulation de phase

La phase étant un élément caractéristique de l'onde, il est possible de lui imprimer des fluctuations qui seront le reflet du signal à transmettre. Mais il est nécessaire de bien voir ce qu'est la phase et, pour cela, il est commode de passer par la représentation vectorielle.

Nous savons que la valeur instantanée d'une fonction sinusoïdale peut être assimilée à la projection d'un vecteur d'amplitude constante tournant à la vitesse angulaire uniforme $\omega = 2\pi f$, c'est-à-dire faisant f tours par seconde, soit 100 millions de tours/seconde à 100 Mc/s. Suivant ce vecteur par la pensée, ne voyons que sa position par rapport à l'origine (fig. 3): et c'est précisément cela sa phase; croît régulièrement de $360° = 2\pi$ à chaque tour.

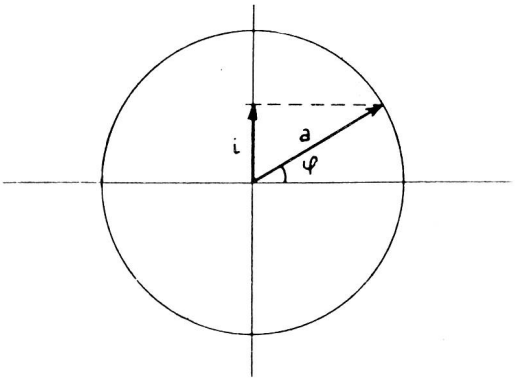


Fig. 3. Représentation vectorielle d'une fonction sinusoïdale; $i = a \sin \varphi$. Si a tourne à vitesse angulaire ω; $\varphi = \omega t$ et $i = a \sin \omega t$.

Pour l'onde entretenue pure $i = a \sin (\omega t + \varphi_0)$, la phase à l'instant t_1 est, par définition, $\varphi_{t_1} = \omega t_1 + \varphi_0$, c'est une fonction linéaire du temps que traduit la droite en pointillé sur la figure 4.

Moduler la phase de l'onde par un signal $A \sin \Omega t$, c'est faire en sorte que son expression devienne: $\varphi = \omega t + KA \sin \Omega t + \varphi_0$. La progression de la phase en fonction du temps suit alors la courbe en trait plein sur la figure 4; le vecteur correspondant se trouve par moments en avance, à d'autres moments en retard, par rapport à la position qu'il occuperait en l'absence de modulation.

L'angle d'avance ou de retard sera d'autant plus grand que le signal de modulation sera plus intense. D'autre part, cette excursion de phase se fait à la fréquence du signal de modulation; elle sera donc d'autant plus rapide que cette fréquence sera plus élevée. Ceci nous montre que la *vitesse de variation de la phase* va dépendre à la fois de l'intensité du signal de modulation et de sa fréquence. Si, en effet, un signal à 1000 c/s provoque une excursion de phase de $\pm 30°$ (fig. 5), un signal deux fois plus intense provoquera une excursion de $\pm 60°$ qui devra s'effectuer dans le même temps (1 milliseconde), il faudra bien que les

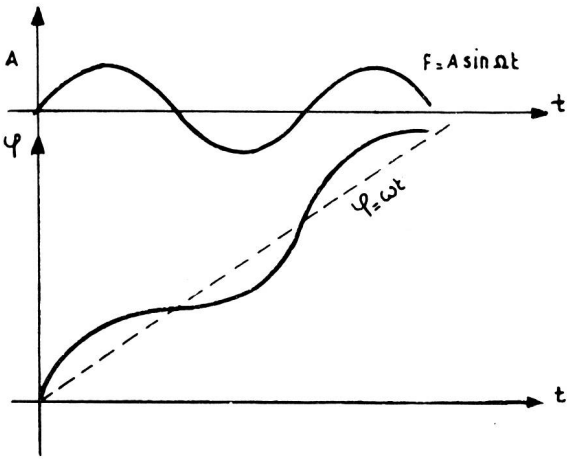


Fig. 4. Variation de la phase en fonction du temps avec et sans modulation

variations de position du vecteur soient deux fois plus rapides.

Si nous modulons maintenant avec un signal à 2000 c/s, d'intensité telle que l'excursion de phase soit encore de ± 30°, le cycle de modulation ne durera plus que 0,5 milliseconde et la vitesse de variation de la phase sera encore doublée par rapport au premier cas.

Si notre vecteur, sous l'influence de la modulation, arrive à prendre du retard à certains moments, de l'avance à d'autres, c'est que sa vitesse de rotation n'est plus uniforme. Cela revient à dire que la fréquence de l'onde n'est plus constante, puisque fréquence et vitesse de rotation sont rigoureusement proportionnelles.

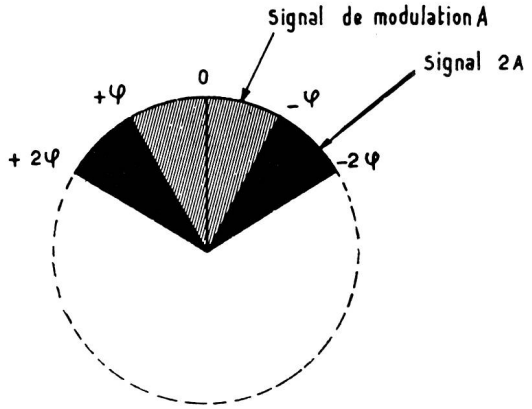


Fig. 5. L'excursion de plan est proportionnelle à l'amplitude du signal de modulation.

Moduler la phase d'une onde, c'est donc en même temps moduler sa fréquence, mais d'une façon assez particulière puisque la déviation de fréquence engendrée, elle-même liée à l'excursion de phase, est proportionnelle à la fois à l'amplitude et à la fréquence du signal de modulation. Nous verrons dans un instant qu'il est très facile de passer d'une modulation de phase à une modulation de fréquence pure.

Prenons un exemple pour fixer les idées. Soit une onde à 1 Mc/s que nous modulons en phase par un signal à 1000 c/s, d'amplitude telle que l'excursion de phase soit de ± 60°.

Il est évident que le passage du maximum d'avance au maximum de retard, soit 120°, s'effectuera en un demi-cycle du signal de modulation, donc en 500 micro-secondes. Ces 120° seront répartis sur 500 cycles de porteuse, soit une variation de 1/4 de degré environ par cycle H.F. La variation de fréquence correspondante serait de l'ordre de $\frac{1}{1500}$, soit moins de 700 cycles ou environ ± 350 cycles autour de 1 Mc/s. Ces valeurs correspondent aux crêtes de modulation, mais il ne faut pas perdre de vue que la fréquence passe par toutes les valeurs intermédiaires.

La modulation de fréquence

Nous venons de voir que modulation de fréquence et modulation de phase sont intimement liées. Moduler une onde en fréquence, ce sera aussi moduler sa phase. Cependant, ces deux modes de modulation ne sont pas équivalents et il est nécessaire de bien voir ce qui les sépare physiquement; pour cela, il nous faut définir la notion de fréquence instantanée. Si nous prélevons sur une onde entretenue pure des «échantillons» de même durée, 10 microsecondes, par exemple, ils contiendront tous le même nombre d'oscillations, quel que soit le moment du prélèvement. Nous en compterons 1000 sur une onde à 100 Mc/s. Si nous répétons la même opération sur une onde modulée en fréquence, la fréquence centrale étant toujours 100 Mc/s, le contenu des divers échantillons successifs sera différent; nous compterons par exemple: 997, 1008, 1002, 992... oscillations et conclurons que la *fréquence instantanée* était, lors de ces diverses mesures: 99,7, 100,8, 100,2, 99,2 Mc/s. Si, au lieu de prélever des échantillons, nous avions compté le nombre de cycles au cours d'une seconde, nous serions arrivés à la conclusion que la *fréquence moyenne* est de 100 Mc/s.

La quantité maximum dont la *fréquence instantanée* s'éloigne de la fréquence *moyenne* est appelée: déviation ou excursion de fréquence, parfois «swing»; on la représente par ΔF et, dans l'exemple précédent, nous avions: ΔF = ± 800 kc/s (fig. 6).

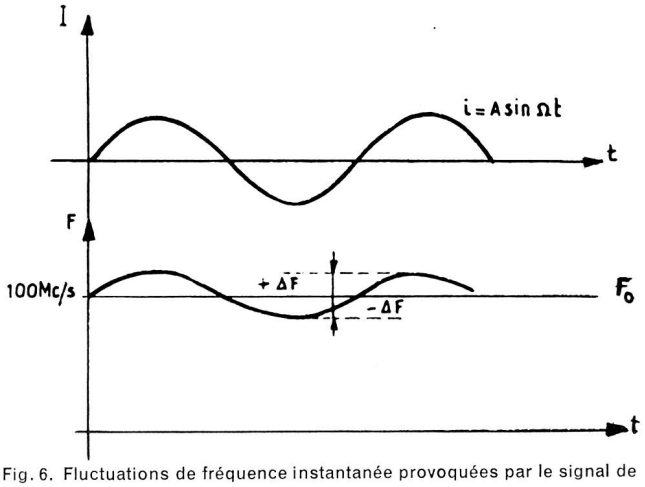


Fig. 6. Fluctuations de fréquence instantanée provoquées par le signal de modulations.

En modulation de fréquence, c'est ce ΔF qui est proportionnel à l'amplitude du signal de modulation; il est par contre indépendant de sa fréquence, alors qu'en modulation de phase la modulation de fréquence qui en résultait était liée aux deux paramètres à la fois.

L'expression mathématique de l'onde modulée en fréquence est:

$$i = a \sin \left(\omega_0 t - \frac{KA}{\Omega} \cos \Omega t + \varphi_0\right)$$

ω_0 correspondant à la fréquence centrale f_0; le terme $\frac{KA}{\Omega}$ rendant compte du fait que ΔF n'est plus proportionnel qu'à A, amplitude du signal B.F. de modulation. Il suffit pour arriver à cela d'intercaler dans le circuit de modulation

un filtre dont l'affaiblissement soit proportionnel à la fréquence. Cette fois, l'amplitude de l'onde H.F. est constante et *i* oscille entre les limites $+ a$ et $- a$ ampères. Par contre, la fréquence varie constamment, ce qui nous a amené à parler de fréquence instantanée. La conséquence de cette fréquence essentiellement mouvante est que nous ne sommes plus en présence d'une fonction périodique pure et que les méthodes de calcul habituelles ne peuvent plus s'appliquer. C'est aux fonctions de Bessel qu'il faudra faire appel pour calculer le spectre d'une onde modulée en fréquence.

Spectre de l'onde modulée en fréquence

On pourrait s'attendre à ce qu'une onde modulée en fréquence couvre tout l'intervalle $- \Delta F + \Delta F$ autour de la fréquence centrale f_0. Le calcul montre cependant que les choses ne se passent pas ainsi, on peut d'ailleurs le soupçonner intuitivement.

Puisque dans une émission F.M. l'amplitude de l'onde porteuse est constante, il en est de même de la puissance émise. Comment vont donc se manifester les variations d'amplitude du signal de modulation? Simplement en modifiant la répartition de l'énergie entre les raies des bandes latérales. Il est logique, d'autre part, de penser que la position des raies du spectre est liée à la fréquence du signal de modulation.

En effet, le calcul montre qu'une modulation à 1000 c/s fait apparaître des raies tous les 1000 c/s de part et d'autre de la fréquence centrale et que l'énergie contenue dans ces raies croît avec l'amplitude du signal de modulation. On arrive ainsi à la conclusion que le spectre occupé est d'autant plus large que l'on module avec un signal plus intense et à fréquence plus élevée, d'où la notion d'*indice de modulation:* $m = \frac{\Delta f}{F}$ qui renseigne immédiatement sur l'encombrement dû à une émission donnée.

Ainsi, dans le cas d'une émission de radiodiffusion avec $\Delta F = \pm 75$ kc/s et une fréquence acoustique maximum de 15000 c/s, l'indice de modulation est égal à: $\frac{75}{15} = 5$. Le tableau suivant donne la répartition de l'énergie entre les différentes raies, distantes de 15 kc/s les unes des autres, pour une modulation à 15000 c/s.

	Raie	*Intensité relative*
	f_0	17,76 %
N° 1	$(f_0 \pm F)$	32,76 %
N° 2	$(f_0 \pm 2 F)$	4,66 %
N° 3	$(f_0 \pm 3 F)$	36,48 %
N° 4	$(f_0 \pm 4 F)$	39,12 %
N° 5	$(f_0 \pm 5 F)$	26,11 %
N° 6	$(f_0 \pm 6 F)$	13,10 %
N° 7	$(f_0 \pm 7 F)$	5,34 %
N° 8	$(f_0 \pm 8 F)$	1,84 %

Ce tableau (extrait de «F. M. simplified», by Melton S. Kiver) appelle plusieurs remarques; la figure 7 le traduit graphiquement.

D'abord, la somme des intensités relatives est supérieure à 100 %. En réalité, les phases des diverses composantes étant quelconques les unes par rapport aux autres, c'est la somme quadratique de ces intensités, c'est-à-dire la racine de la somme des carrés qui nous donnera 100 %; il est facile de le vérifier.

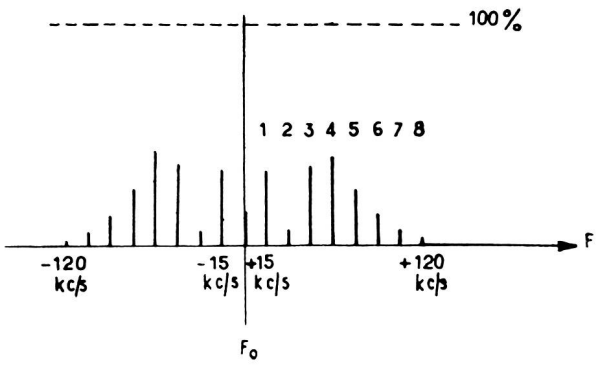


Fig. 7. Spectre d'une onde modulée en fréquence pour m = 5 (signal à 15000 c/s — ΔF = 75 kc/s).

D'autre part, nous voyons que la 7e raie est encore d'amplitude notable, en négligeant la huitième, la bande couverte atteint $\pm 15 \times 7 = 105$ kc/s, soit 210 kc/s. En fait, dans une émission normale, les fréquences extrêmes du spectre audible ont rarement une amplitude très importante, de sorte que l'indice de modulation tombe dans les aiguës à tel point qu'on le relève artificiellement à l'émission par la *préaccentuation*. Si nous faisons m = 3 à 15000 c/s, le spectre se limite pratiquement à la 5e raie, soit à $\pm$ kc/s.

Par mesure de sécurité, il a été alloué à chaque canal F.M. une bande de 200 kc/s. La déviation de fréquence généralement admise étant $\pm$ 75 kc/s, il reste une garde de 25 kc/s de part et d'autre, justement destinée à éviter les risques de débordement d'une émission sur les liaisons adjacentes.

On remarquera, d'autre part, qu'à amplitude constante du signal de modulation, donc à ΔF constant, l'indice de modulation croît quand la fréquence du signal B.F. diminue. La largeur de bande occupée augmentant avec *m*, il se produit une espèce d'auto-compensation et l'on admet en général que, pour $m > 1$, la bande nécessaire est égale à deux fois la somme: ΔF + fréquence de modulation.

Mérites compares de la modulation de fréquence et de la modulation d'amplitude à l'émission

Le tableau de la page suivante, qui est donné à titre comparatif, met en évidence un inconvénient important de la modulation d'amplitude. La puissance à émettre peut être multipliée par 4 dans les crêtes d'une modulation à 100 %. Tous les éléments de l'émetteur doivent être conçus en fonction de cette puissance qui finalement n'est que rarement atteinte, le taux moyen de modulation se situant vers 30 %. Par contre, la modulation d'amplitude est relativement sobre en largeur de bande. Celle-ci, limitée aux deux bandes latérales, est indépendante du taux de modulation.

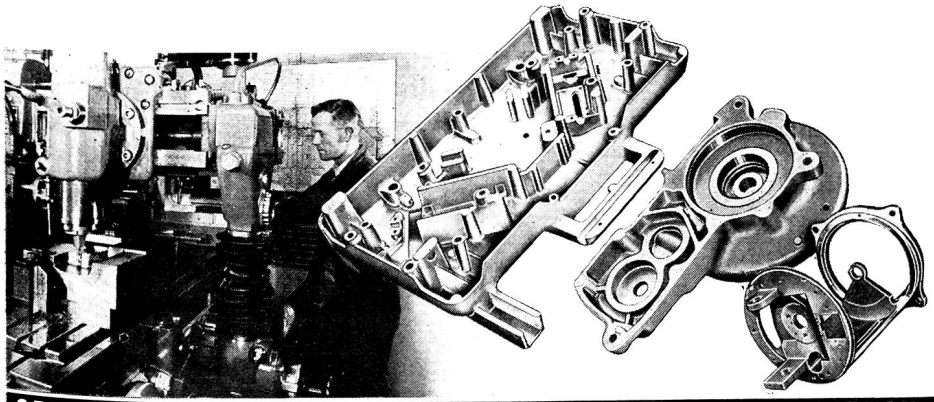
En modulation de fréquence, c'est l'inverse; la puissance émise est constante, l'émetteur peut donc travailler en permanence au rendement optimum. D'autre part, la linéarité d'amplitude n'étant plus impérative, tous les étages H.F. peuvent fonctionner en classe C. La modulation de fréquence est, par contre, assez dispendieuse en largeur de bande et celle-ci croît avec la «profondeur» de modulation.

A cause de cela, le procédé de modulation n'est pratiquement utilisé qu'en V.H.F.; cela n'est d'ailleurs pas un inconvénient et nous verrons d'autre part que c'est précisément à la grande déviation de fréquence utilisée que la modulation de fréquence doit une bonne part de ses qualités à la réception.

Signal de modulation fréquence: f amplitude	Modulation d'amplitude			Modulation de fréquence		
	Taux	Puissance crête	Spectre	ΔF	Puissance	Spectre
0	0 %	1	raie F° seule	0	1	raie F° seule
5	50 %	2,25	raie F° { raie F° + f raie F° — f	± 37,5 kc/s	1	F° { + 8 raies distantes de f — 8 raies
10	100 %	4	raie F° { raie F° + f raie F° — f	± 75 kc/s	1	F° { + 13 raies distantes de f — 13 raies

Batterien und Elemente für militärische Zwecke

LECLANCHÉ S.A. YVERDON



INCA

Präzision, Sauberkeit und Wirtschaftlichkeit sind die Hauptmerkmale des INCA-DRUCKGUSSES.

Verlangen Sie bei Bedarf den Besuch unserer Fachleute, die Sie unverbindlich beraten werden.

SPRITZGUSS PRESSGUSS WARMPRESSTEILE APPARATEBAU

INJECTA AG
Teufenthal / Aarau ✆ (064) 38277