

L'AMPLIFICATION EN CLASSE C⁽¹⁾

Par L. CHRÉTIEN, Ingénieur E. S. E.

Nous avons étudié précédemment l'amplification en CLASSE A qui est le régime le plus couramment utilisé dans les installations d'amateurs. C'est l'amplification en classe A qui est utilisée dans tous les circuits de haute, de moyenne fréquence et de pré-amplification.

Dans les étages de puissance en CLASSE A on peut arriver à obtenir une faible distorsion, à condition que le rendement énergétique soit très faible. De toutes manières, ce rendement ne dépasse guère pratiquement trente pour cent.

Ce qui explique ce faible rendement, c'est que le tube amplificateur dissipe une puissance d'autant plus importante que la puissance produite est plus faible. C'est quand la puissance utile est nulle que la lampe dissipe davantage...

Dans l'amplification en CLASSE B (que nous avons également étudiée ici même) la situation est bien meilleure puisque la consommation de l'étage de puissance est à peu près nulle quand la puissance utile est elle-même nulle. Et cette consommation augmente à mesure que la puissance utile est plus grande, il en résulte que le rendement énergétique (c'est-à-dire le rapport entre la puissance utile et la puissance consommée) peut demeurer bon à tous les régimes.

Le rendement théorique maximal est supérieur à soixante-quinze pour cent ; en pratique il est de l'ordre de soixante pour cent.

Toutefois, il est difficile d'obtenir un très faible taux de distorsion à faible niveau.

Dans l'article ci-dessous nous étudierons le cas de l'amplification en CLASSE C.

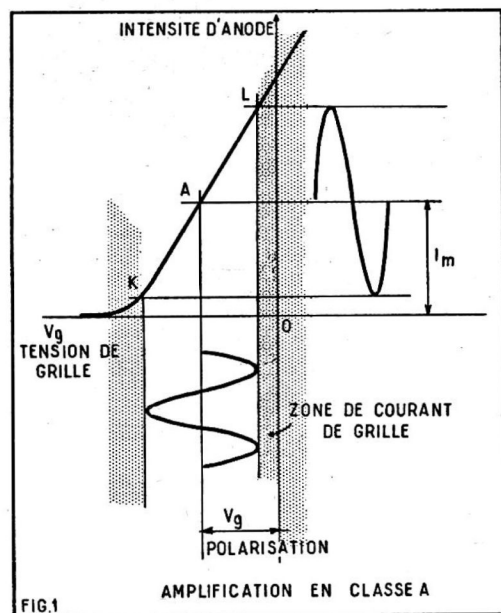


FIG. 1. — En classe A, la zone d'utilisation de la caractéristique est limitée à la partie droite comprise entre la courbure inférieure (point K) et le point L ou commence à se manifester le courant de grille.

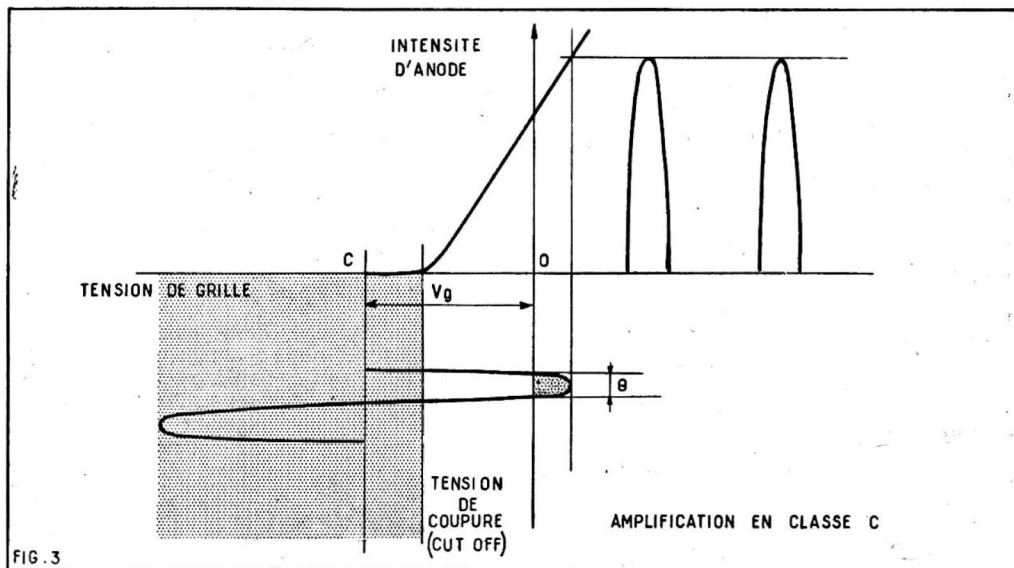


FIG. 3.

FIG. 3. — En classe C, le point de repos est choisi au-delà du point d'annulation du courant d'anode (point C). De plus, la tension d'attaque est suffisante pour rendre la grille positive par moment.

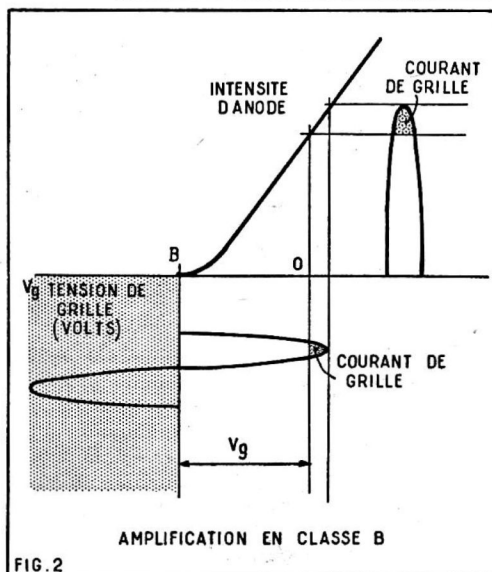


FIG. 2.

FIG. 2. — En classe B, le point de repos est choisi au pied de la caractéristique (point B). De plus, la tension d'attaque est suffisante pour rendre la grille positive par moment.

Rappel des définitions.

Revenons sur des définitions déjà données dans le premier article de cette série.

Dans l'amplification en classe A (fig. 1) le point de repos A est choisi au milieu de la partie droite de la caractéristique. Celle-ci est délimitée, d'une part, par la courbure inférieure, d'autre part par la région où commence à se manifester le courant de grille. Celui-ci commence à circuler pour une tension négative de l'ordre de 0,5 à 1 V. On admet toutefois assez souvent qu'il n'existe que dans les régions correspondant à une tension de grille positive.

Dans les conditions que nous venons de définir, l'intensité de courant moyenne I_m demeure absolument invariable au cours du fonctionnement, même quand la tension d'attaque est nulle.

Dans le fonctionnement en classe B la polarisation V_g (fig. 2) est choisie de manière que l'intensité anodique soit tout juste annulée. Le point de repos est B. De plus, la tension d'attaque peut être assez importante pour que le point de fonctionnement pénètre dans les régions positives. Il y a donc nécessairement une intensité de courant de grille pendant une fraction de la période.

L'intensité moyenne croît ainsi dans le même sens que la puissance utile. Toutefois, une seule alternance est reproduite par le tube amplificateur. Il faut utiliser un montage symétrique (ou push-pull) pour reproduire la période complète. L'emploi d'un tel montage est donc absolument indispensable pour la reproduction sonore.

La présence du courant de grille suppose naturellement la production d'une certaine puissance nécessairement produite par l'étage qui fournit la tension d'attaque. Il faut donc que le montage soit étudié pour éviter la production d'une distorsion excessive.

De plus, les variations de puissance instantanées empruntées à l'alimentation pouvant être considérables, il faut que la résistance interne de la source anodique soit très faible : c'est un problème difficile à résoudre simplement. Il faut aussi que la tension de polarisation soit parfaitement fixée.

Définition de l'amplification classe C.

Le principe se comprend immédiatement en examinant la figure 3. La polarisation est nettement plus importante que celle qui correspond à la coupure (en anglais : cut-off). Elle est de V_g dans l'exemple choisi et le point de repos est C. Il en résulte qu'une faible tension d'attaque serait insuffisante pour provoquer l'apparition du courant d'anode. Aussi prévoit-on une très forte

(1) Voir les nos 160 et 161 de Radio-Plans.

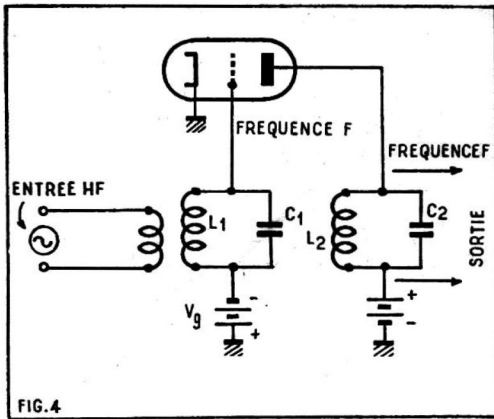


FIG. 4. — Principe de l'amplification en classe C. La charge d'anode est constituée par un circuit accordé sur la fréquence de fonctionnement.

tension d'attaque, non seulement suffisante pour provoquer le passage d'un courant d'anode, mais encore pour conduire le point de fonctionnement très loin dans la région des tensions positives.

Il en résulte que l'alternance négative est supprimée ainsi qu'une partie de l'alternance positive. L'intensité d'anode est constituée par des impulsions séparées par une durée supérieure à une demi-période. Le cycle alternatif correspond à 360° (ou 2π) une alternance correspond à 180° (ou π) l'angle de passage du courant d'anode est ainsi θ (lettre grecque thêta) toujours inférieur à 180° .

Dans ces conditions, même avec deux tubes amplificateurs travaillant symétriquement, il est impossible d'éviter une distorsion considérable. L'emploi de l'amplification en classe C est limité à des cas spéciaux d'amplification de haute fréquence.

La charge est un circuit accordé.

Nous avons représenté sur la figure 4 un montage d'amplification en classe C. Il s'agit d'amplifier des courants de haute fréquence. Les émetteurs modernes comportent un grand nombre d'étages de cette sorte. En effet, il est impossible d'utiliser directement des auto-oscillateurs de grande puissance car la stabilité de la fréquence serait tout à fait insuffisante. Pour atteindre la très grande précision imposée par les conventions internationales, il n'est pas d'autres moyens que d'utiliser un étage oscillateur piloté par un cristal de quartz. Mais cet étage ne peut fournir qu'une très faible puissance. Il est donc suivi d'une série de circuits analogues à celui qui a été

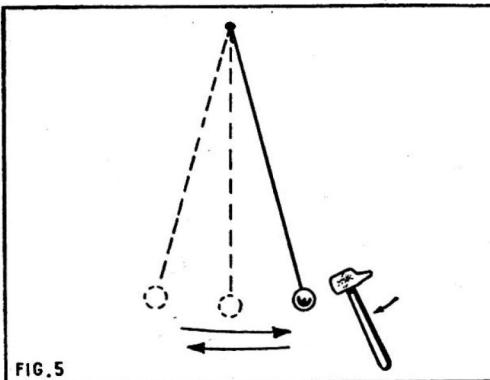


FIG. 5. — Dans le montage de la figure 4, le circuit accordé reçoit des impulsions de courant qui sont en phase avec ses oscillations propres. De la même manière, on peut entretenir les oscillations d'un pendule au moyen d'impulsions mécaniques ou de percussions appliquées au moment convenable.

représenté sur la figure 4. Pour d'évidentes raisons, il est du plus haut intérêt d'atteindre un rendement aussi élevé que possible. C'est ce qui permettra le montage en classe C.

On observera, sur la figure 4, que la charge anodique est constituée par un circuit oscillant. Excité par les impulsions du courant d'anode, celui-ci reconstituera les oscillations sinusoïdales. Pour qu'il en soit bien ainsi, il faut naturellement que les deux circuits, celui de la grille, comme celui de l'anode soient accordés sur la fréquence qu'il s'agit d'amplifier.

On peut exactement comparer le mode de fonctionnement, à l'expérience représentée sur la figure 5. En donnant des chocs convenablement rythmés à la masse d'un pendule, on peut obtenir des oscillations parfaitement régulières. Les coups de marteau représentent les impulsions de courant anodique. Le pendule représente le circuit accordé. Pour que l'expérience réussisse, il faut évidemment que la période des impulsions d'entretien soit exactement celle du pendule.

Polarisation par courant de grille.

Dans le montage donné comme exemple sur la figure 4, nous avons supposé que la polarisation était fournie par une source fixe V_g . En pratique on préférera souvent

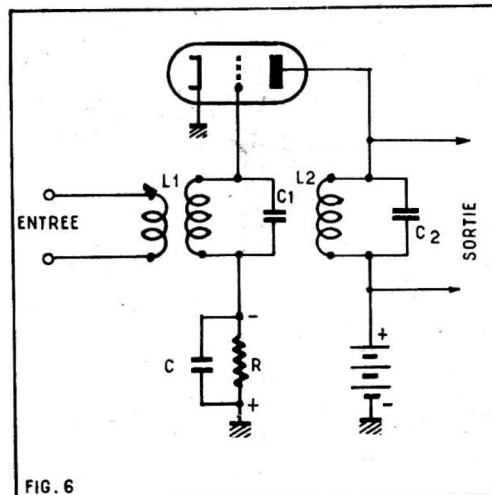


FIG. 6. — La polarisation pour le fonctionnement en classe C peut être obtenue au moyen d'une résistance insérée dans le circuit de grille puisque ce dernier est le siège d'un courant unidirectionnel.

Les impulsions unidirectionnelles sont intégrées, c'est-à-dire transformées en courant continu grâce à la présence du condensateur.

utiliser le courant de grille pour obtenir la polarisation (fig. 6). Celui-ci traversant la résistance R provoque l'apparition d'une tension dans le sens indiqué sur le schéma. Pour éviter l'effet de contre-réaction, la résistance R est shuntée par un condensateur C dont l'impédance doit être négligeable par rapport à R aux fréquences d'utilisation.

On préférera souvent le circuit de la figure 7 qui est absolument équivalent, sauf en ce qui concerne le circuit accordé. En effet, dans ce second cas, une des extrémités du circuit résonant est mise à la terre, ce qui peut présenter des avantages pratiques non négligeables.

Le circuit figure 8 est encore à peu près équivalent. Toutefois, la position de la résistance est différente. Dans de nombreux cas, ce dernier montage peut présenter des avantages non négligeables.

Dans tous les montages précédents, il est certain que la valeur de la polarisation

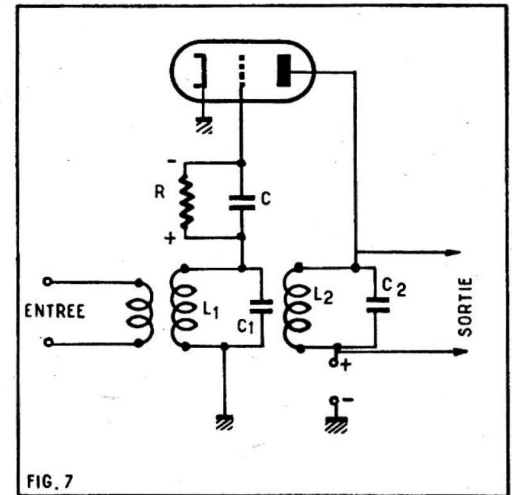


FIG. 7. — Ce montage équivaut à celui de la figure 6. Toutefois, on remarquera qu'une des extrémités du circuit accordé est au potentiel de la masse, ce qui peut présenter des avantages pratiques importants.

obtenue dépend de l'amplitude de la tension d'attaque. Il ne peut en être autrement, puisque la valeur moyenne du courant de grille est précisément déterminée par cette amplitude. Il faut, bien entendu, déterminer la valeur de R, en fonction du courant de grille, pour obtenir la polarisation voulue. C'est la valeur de cette polarisation qui détermine la grandeur de l'angle θ , paramètre essentiel du fonctionnement.

Le rendement et la puissance.

Dans ce mode de fonctionnement, le rendement dépasse largement la valeur correspondant au fonctionnement en classe B. On peut, en effet, atteindre et dépasser 85 %.

Ce rendement est d'autant plus grand que l'angle θ est plus petit. Il atteindrait 100 % à la limite, c'est-à-dire quand l'angle θ serait nul... Mais à ce moment-là la puissance produite par l'étage serait nulle... ce qui lui enlèverait toute raison d'être.

Si l'angle θ était de 180° , on retomberait dans le cas de l'amplification en classe B et le rendement théorique serait légèrement supérieur à 75 %. Dans ce cas, la puissance produite par le tube serait maximale.

Il faut donc savoir choisir... Ce choix est d'ailleurs déterminé entièrement par la manière dont le problème est posé. Pour l'utilisateur d'une station d'émission, il est fort intéressant d'avoir un bon rendement énergétique car la consommation de puissance électrique est moindre pour une puissance de rayonnement donnée. Mais il est également de la plus haute importance de

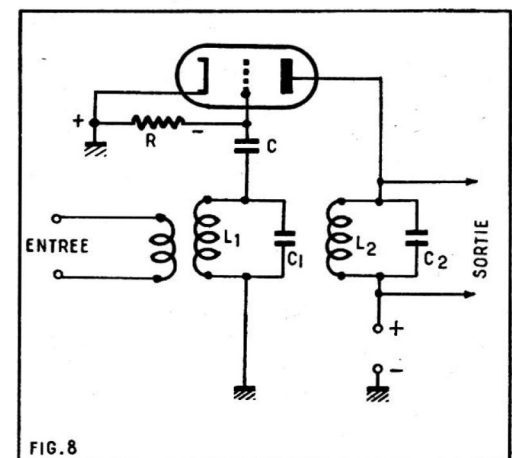


FIG. 8. — Ce montage équivaut encore à celui de la figure 6.

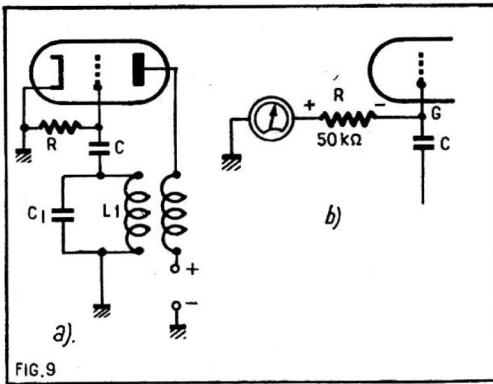


FIG. 9. — Un circuit générateur d'oscillations fonctionne généralement en classe C. On peut s'en rendre compte en mesurant l'intensité de courant qui traverse R (b). Il ne faut pas tenter de mesurer directement la tension continue au point G, en effet, on risquerait de faire « décrocher » les oscillations.

tirer le maximum de puissance d'un tube amplificateur donné. Les tubes d'émissions sont des engins fort coûteux et il serait absurde de ne tirer que quelques watts d'un tube pouvant fournir 50 kW, sous prétexte que le rendement est alors voisin de 100 %.

Les oscillateurs fonctionnent toujours en classe C

L'emploi de l'amplification en classe C est-il donc toujours réservé à l'émission ? Pas du tout. On peut même affirmer que, dans tout récepteur, il y a au moins un étage qui fonctionne en classe C. Cet étage et le tube fournissant les oscillations locales du changeur de fréquence.

En effet, le montage de base correspond à la figure 9, laquelle représente le même montage que les figures précédentes, à ce détail près que le circuit d'anode est couplé avec le circuit de grille.

Il en résulte qu'un étage oscillateur est un étage en classe C qui fournit sa propre excitation. Toutes les conditions exposées plus haut sont parfaitement respectées.

Ainsi, il y a un courant de grille. Il est bien facile de s'en assurer en branchant un microampèremètre (ou une boîte de contrôle) comme nous l'indiquons sur la figure 9 b. Pour éviter de perturber le fonctionnement, il faut brancher l'appareil du côté de la masse.

Nous pourrions ainsi déterminer, par exemple, que la valeur moyenne (c'est ce que mesure l'appareil à cadre) du courant de grille est de $200 \mu\text{A}$. Par une simple application de la loi d'ohm, nous en déduirons que la chute de tension dans la résistance R, de 50.000Ω est de :

$$0,0002 \times 50.000 = 10 \text{ V.}$$

Dans les conditions d'alimentation du tube amplificateur, il nous sera facile de vérifier que la tension de coupure est, par exemple, de 4,5 V. En conséquence, avec une polarisation de 10 V aucun courant anodique ne devrait pouvoir circuler... Or, en plaçant un appareil de mesure dans le circuit d'anode nous observerons que l'intensité de courant est de plusieurs milliampères...

Il s'agit donc bien indiscutablement d'un fonctionnement en classe C, c'est d'ailleurs grâce à cela qu'on peut obtenir un fonctionnement très stable et que la fréquence produite peut être presque totalement indépendante des variations d'alimentation.

Les formes des courants de grille et d'anode.

Nous avons admis précédemment et en particulier sur la figure 3, que le courant d'anode affectait la forme d'une fraction

de sinusoïde. En réalité, on peut observer expérimentalement qu'il n'en est pas ainsi, même si la caractéristique du tube est droite.

On observe, par exemple, qu'au lieu de suivre la forme sinusoïdale, l'intensité d'anode est conforme à la figure 10 a. Elle prend sensiblement l'allure d'une impulsion presque rectangulaire.

Ce phénomène est facile à comprendre si l'on considère la forme de l'intensité de

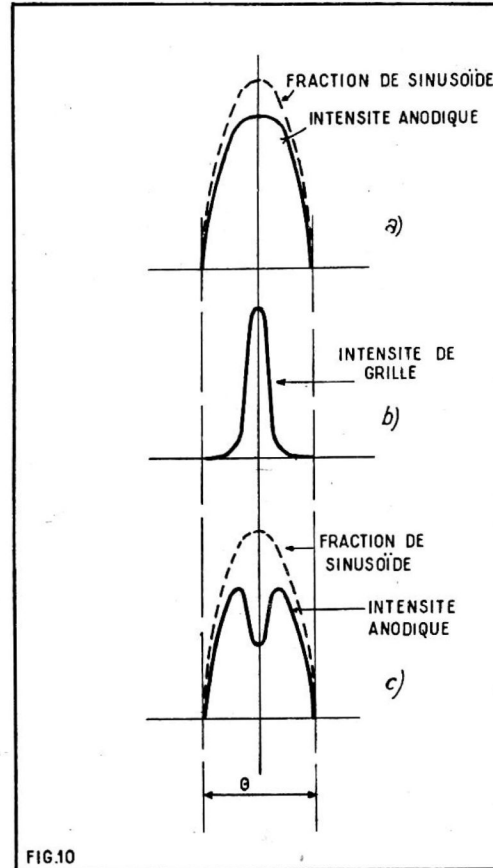


FIG. 10. — Forme d'onde : a) de l'intensité d'anode qui ne suit pas la forme sinusoïdale (en pointillé). b) De l'intensité de grille ; c) De l'intensité d'anode quand l'attaque de grille est de très grande amplitude.

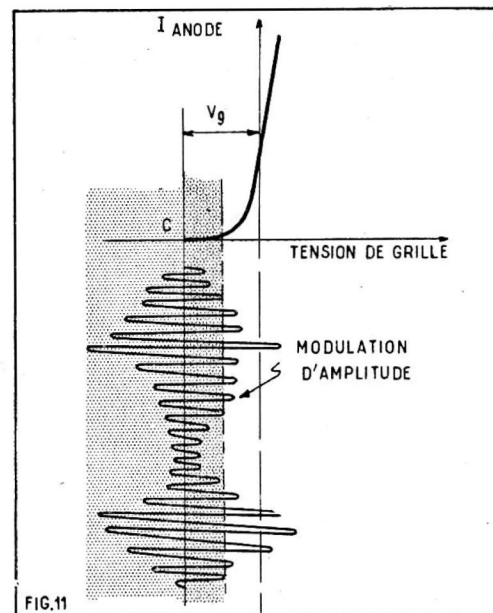


FIG. 11. — L'amplification en classe C ne peut convenir pour des courants à haute fréquence modulés en amplitude. Les « creux de la modulation ne seraient pas transmis ».

grille (fig. 10 b). Celle-ci est naturellement nulle au moment où apparaît le courant d'anode, elle s'amorce dès que la grille devient positive, puis croît de plus en plus. Il est évident que les électrons arrêtés au passage par la grille ne peuvent parvenir jusqu'à l'anode, ce qui contribue naturellement à une diminution de l'intensité d'anode. Cet effet est d'autant plus net qu'au moment de la crête de tension d'attaque se produit une plus grande chute de la tension instantanée d'anode. C'est évidemment à ce moment-là que se produit la chute de tension maximale dans la charge, c'est-à-dire dans le circuit accordé d'anode.

Enfin un phénomène supplémentaire peut encore provoquer un renforcement de cet effet si la tension de grille d'attaque atteint des valeurs très élevées. L'anode est alors le siège d'une émission d'électrons secondaire. Ceux-ci sont attirés vers la grille dont la tension instantanée peut être plus élevée que la tension instantanée d'anode. Il en résulte alors une baisse considérable du courant anodique.

Utilisation de l'amplification en classe C.

Nous avons expliqué plus haut que, pratiquement, tous les circuits oscillateurs fonctionnent en classe C. En dehors de cela, ce mode d'amplification est utilisé surtout dans les émetteurs. Il faut toutefois préciser qu'il ne peut pas convenir pour des émissions modulées en amplitude. Il suffit d'examiner la figure 2 pour voir que les « creux » de la modulation ne seraient pas reproduits, même si le circuit de charge était constitué par un ensemble résonnant.

Il faut donc, dans un émetteur à modulation d'amplitude, n'utiliser l'amplification en classe C que dans les étages précédant la modulation.

Au-delà, il est possible d'utiliser l'amplification en classe B qui prend alors, dans ce cas, le nom d'amplification linéaire. Le rendement en est nécessairement plus faible.

En revanche l'amplification en classe C convient parfaitement pour tous les étages, jusque et y compris l'étage de sortie quand il s'agit d'émissions faites en modulation de fréquence ou de phase. Dans les deux cas, en effet, l'amplitude demeure absolument constante (fig. 12). Cette possibilité constitue un avantage non négligeable de la modulation de fréquence par rapport à la modulation d'amplitude.

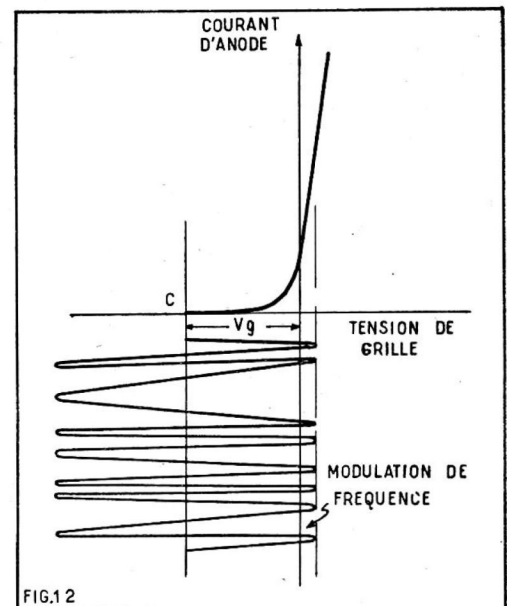


FIG. 12. — L'amplification en classe C convient parfaitement pour des courants modulés en fréquence ou en phase.

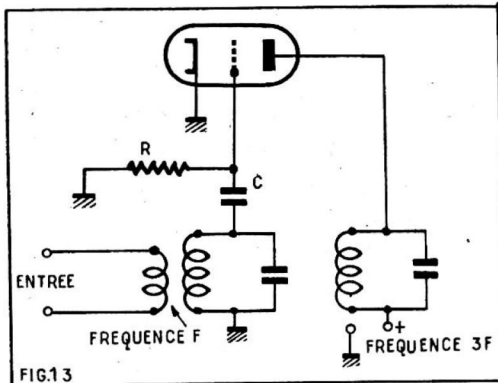


FIG. 13. — Dans un étage multiplicateur de fréquence, le circuit d'anode est accordé sur un multiple exact de la fréquence de la tension d'attaque.

Anomalies de fonctionnement.

La grille, recevant de très grandes pointes de tension positives est ainsi frappée par des électrons à grande vitesse. Elle peut être alors le siège d'une émission secondaire d'électrons. Ceux-ci peuvent donner lieu à un multiple inverse de grille pour peu qu'un champ électrique convenable existe au voisinage de l'électrode.

Ainsi le courant moyen de grille est la différence entre deux intensités de signe contraire constituées, d'une part, par les électrons primaires et, d'autre part, par les électrons secondaires. C'est cette intensité moyenne que révélera un appareil de mesure introduit dans le circuit.

Or, il peut se produire que, malgré que ce courant soit faible, la dissipation de grille soit excessive. En effet : elle reçoit des électrons primaires à très grande vitesse alors qu'elle libère des électrons secondaires à faible vitesse. Même si les quantités d'électricité reçues et cédées par seconde sont égales, il n'en résulte pas moins que la grille doit alors dissiper une très grande énergie.

Si le facteur de multiplication secondaire est supérieur à 1, il se peut même que le courant moyen de grille soit inversé.

Dans ces conditions, si la polarisation est obtenue par l'intermédiaire du courant de grille, il est clair que l'électrode est portée à une tension positive. Ce fonctionnement particulier peut être fort dangereux pour le tube électronique.

Notons qu'il est facile de prendre des mesures de sécurité. On peut prévoir, par exemple, un élément diode aux bornes de la résistance de polarisation. Celle-ci est pratiquement mise en court-circuit quand la tension a tendance à s'inverser.

L'intensité traversant le redresseur de protection peut commander un relais qui coupe automatiquement l'alimentation de l'étage.

Multiplication de fréquence.

Nous avons remarqué plus haut que le circuit d'anode n'était pas parcouru par une intensité de courant sinusoïdale, mais par des impulsions plus ou moins déformées.

Cela veut dire évidemment que l'intensité comporte de nombreuses composantes harmoniques. On sait, en effet, que toute intensité périodique non sinusoïdale de fréquence F peut être considérée comme étant la somme d'intensités sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples exacts de F . On trouve donc des composantes dont les fréquences sont : $2F, 3F, 4F, 5F, \text{etc.}$, etc. On peut utiliser cette remarque pour constituer des multiplicateurs de fréquence. Le schéma est, à peu de chose près, celui d'un étage en classe C, à cette différence près que le circuit d'anode est accordé sur un multiple de la fréquence du circuit de grille. Ainsi, le schéma de la figure 13

représente un étage tripleur de fréquence.

Il va sans dire que l'amplification en puissance ainsi obtenue est moins importante que s'il s'agissait d'un étage simple. Le rendement est moins bon. On cherche les meilleures conditions de fonctionnement en agissant sur l'angle θ , c'est-à-dire en réglant convenablement l'amplitude de la tension d'attaque et la grandeur de la polarisation de grille.

Le rendement devient de moins en moins grand ainsi que la puissance utile que peut fournir un tube donné à mesure qu'on veut obtenir un facteur de multiplication plus élevé. Cela veut dire que l'amplitude des harmoniques décroît à mesure que leur rang devient plus élevé. C'est une règle à peu près générale. C'est pour cette raison qu'on ne dépasse pratiquement jamais une multiplication par 5. Il est beaucoup plus avantageux de prévoir plusieurs multiplications successives.

Principe d'un émetteur moderne.

Le procédé de multiplication de fréquence dont nous venons d'expliquer le principe est largement appliqué dans les émetteurs modernes de grande puissance, comme ceux qui sont employés en radiodiffusion par exemple. Il s'agit d'obtenir une fréquence ou — ce qui revient au même — une longueur d'onde parfaitement stable.

La fréquence doit non seulement ne pas varier au cours du fonctionnement, mais elle doit être exacte à moins d'un millionième près. Une telle précision, reportée dans le domaine de la chronométrie, correspondrait à une montre dont la variation serait de l'ordre de 15 s par année...

Ce résultat extraordinairement précis peut être obtenu en utilisant les propriétés piézo-électriques et élastiques du quartz. Le chef d'orchestre est un cristal convenablement taillé qui ne peut guère contrôler qu'une puissance de l'ordre du watt. D'autre part, il y a intérêt à tailler des cristaux correspondants à des fréquences relativement basses : la stabilité est meilleure.

Aussi on peut représenter la disposition schématique d'un émetteur moderne comme sur la figure 14.

L'étage piloté par quartz est réglé sur la fréquence F . Il est suivi d'un étage séparateur donnant une très faible gain, mais évitant le retour des courants de haute fréquence vers le quartz (ce qui pourrait l'endommager).

On trouve ensuite des étages multiplicateurs par 3, par 2, puis par 3 (dans l'exemple choisi). Ces étages fournissent un gain en puissance relativement faible. Ils sont montés comme nous l'indiquons sur la figure 13.

Lorsque la fréquence désirée est atteinte (ici $18 \times F$) on prévoit le nombre d'étages nécessaires pour atteindre la puissance que l'on veut donner à l'étage final. La modulation n'est — dans le cas présent — introduite que dans l'étage de sortie.

La puissance d'excitation d'un étage représente entre 6 et 10 % de sa puissance nominale. Si l'étage de sortie fournit une puissance de 1 kW, il faut qu'il soit précédé par un étage qui peut donner entre 50 et 100 W. Ce dernier est à son tour excité par un étage de 10 W, etc.

Dans une chaîne amplificatrice comme celle de la figure 14, il est évident que les différentes fréquences conservent nécessairement le même rapport. Ainsi, la précision relative de la fréquence $18 \times F$ est exactement la même que celle de la fréquence F qui est contrôlée d'une manière rigoureuse par le cristal de quartz.

L'amplificateur classe C en modulation de fréquence.

Nous avons reconnu plus haut que l'amplification en classe C peut parfaitement convenir pour les courants modulés en fréquence ou en phase.

Il en résulte que le schéma d'un émetteur en modulation de fréquence est tout à fait différent de celui d'un émetteur à modulation d'amplitude. En effet, la modulation est introduire dès le début et avec une très faible déviation de fréquence. On ne pourrait absolument pas obtenir du premier coup, les déviations de ± 75 kHz qui caractérisent les émissions de radiodiffusion. Pour que la déviation soit parfaitement linéaire, il faut nécessairement qu'elle soit faible.

On fait donc subir une faible déviation à une fréquence de départ qui est beaucoup plus petite que celle qu'on veut finalement obtenir. Après quoi, on fait subir un très grand nombre de multiplications successives. Les coefficients de multiplication totale peut être de plusieurs centaines.

Si ce coefficient est, par exemple, de 200, il est certain qu'une déviation de fréquence finale de 75 kHz ne correspondra plus, au départ, qu'à une déviation de $75.000/200$ ou 375 Hz, ce qui est relativement facile à obtenir...

Dans la modulation de fréquence il n'y a pas d'onde porteuse, il y a une fréquence centrale. L'amplitude de la composante correspondante varie constamment. Mais sa fréquence doit demeurer rigoureusement constante. C'est absolument essentiel si l'on veut obtenir une transmission à haute fidélité musicale. Le procédé dont nous venons d'esquisser le principe permet précisément de stabiliser cette fréquence au moyen d'un oscillateur piloté par quartz...

On peut d'ailleurs considérer qu'il est pour le moins curieux de stabiliser rigoureusement une fréquence dans un procédé où il s'agit précisément de faire varier cette... fréquence. La technique présente parfois de ces paradoxes étonnants.

FIG. 14. — Disposition schématique des circuits d'un émetteur à modulation d'amplitude.

