

JOURNAL 'OM'

EMISSION : connaissance de la classe C

Le dernier étage d'un émetteur a pour mission de fournir une puissance à l'antenne émettrice, avec le maximum de rendement et le maximum de pureté. Sous cette bien anodine proposition se cachent bien des difficultés que le technicien doit savoir résoudre, en choisissant le meilleur compromis possible.

Cela passe par la connaissance de la « classe C », théorie par laquelle il est possible de tirer de la puissance d'un transistor ou d'un tube électronique et sans laquelle le compromis cité plus haut n'est pas possible.

On ne s'étonnera pas, en effet, de voir utiliser toujours, de nos jours, des lampes de radio, mais c'est encore le meilleur moyen d'obtenir en HF de la puissance à bon compte.

PROBLÈMES POSÉS PAR L'AMPLIFICATION DE PUISSANCE

Le processus d'amplification de puissance HF passe par les problèmes suivants :

- adaptation à une faible impédance (cas d'une antenne rayonnante)

- rendement élevé en puissance
- éventuellement, mise en évidence d'une composante harmonique (cas des étages doubleurs, tripleurs, etc.)
- accord sur une bande de fréquence réduite (pureté de l'onde émise)
- réjection des fréquences indésirables.

L'ensemble de ces propriétés débouche sur un schéma synoptique évident (fig. 1) où nous avons séparé, sous forme de bloc diagramme, les différentes parties des circuits.

DESCRIPTION DU SCHÉMA DE BASE

Le circuit d'adaptation a pour fonction essentielle de séparer l'antenne — qui est à basse impédance — du circuit sélectif. Ceci sous-entend un minimum d'amortissement du circuit accordé, faute de quoi la bande de fréquence amplifiée s'avère trop grande et risque d'englober des composantes nuisibles ou des harmoniques du signal HF que le

circuit de réjection ne parvient pas à éliminer (fig. 2).

L'amplificateur fournit une puissance P_o , mais nécessite une puissance d'alimentation supérieure

$$P_{AL} = \frac{1}{\eta} P_o$$

η étant le rendement en puissance de l'étage.

Le circuit d'entrée permet la liaison aux étages précédents sans qu'il y ait d'incidence sur leur fonctionnement. Cette séparation se justifie par le fait que le transistor consomme de l'énergie sur sa

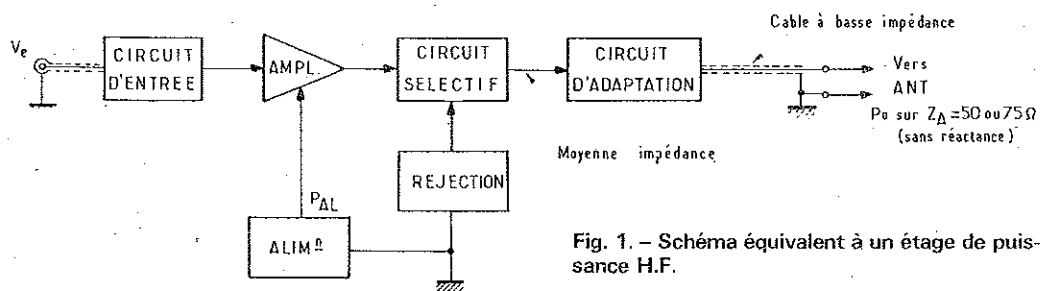


Fig. 1. - Schéma équivalent à un étage de puissance H.F.

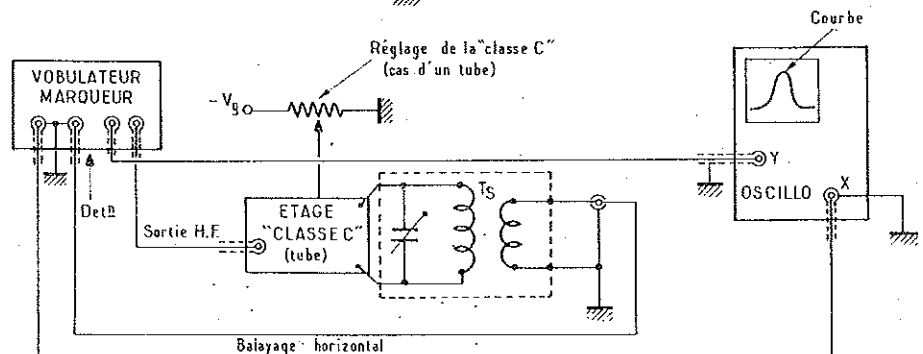


Fig. 2. - Contrôle de la sélectivité du circuit de sortie de l'étage « classe C » à tube.

base et le tube, également, par suite du courant grillé. A cause de la classe C, nous le verrons, cette consommation n'est pas constante en fonction du temps et n'apparaît que sur les crêtes des alternances positives.

Par ailleurs, l'entrée et la liaison aux étages précédents se font toujours à basse impédance; le circuit d'entrée a donc un double but: l'adaptation d'impédance et la séparation entre étages. L'ensemble des conditions qu'il faut remplir conduit à choisir un amplificateur spécial bloqué en absence de signal; son point de repos est, en effet, placé dans une région de conduction inverse pour le transistor ou au-delà du cut-off pour les tubes électroniques: c'est la classe C.

En plaçant le point de repos juste à la limite de conduction de l'étage, on obtient la classe B. C'est souvent cette classe qui est retenue pour les transistors que l'on veut faire fonctionner sans mise au point particulière. Le courant que met en évidence le tube ou le transistor n'est donc pas sinusoïdal (fig. 4), mais se présente sous la forme d'impulsions de courant ou de crêtes de sinusoïdes. Ceci n'est pas gênant car tout signal périodique non sinusoïdal recèle, en substance, une fréquence pure égale à celle de la récurrence et une série d'harmoniques.

En effet, pour créer une onde HF, point n'est besoin d'attaquer un circuit accordé au moyen d'une onde pure mais par un signal périodique (alternances ou portion d'alternances ou, même, impulsions). Le circuit s'accordant sur la fondamentale, s'il est très sélectif, il reconstitue une onde pure.

Mais, en fait, si l'on observe la réponse réelle d'un étage, ce, au moyen du banc de vobulation de la figure 2 utilisé lorsqu'on polarise normalement l'étage en classe A, on risque de ne pas atténuer suffisamment les harmoniques: voir, figure 3, l'harmonique 2 dont l'atténuation est infé-

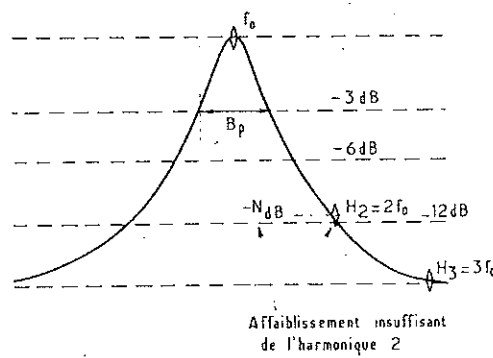


Fig. 3. — Exemple de courbe de réponse du circuit de sortie.

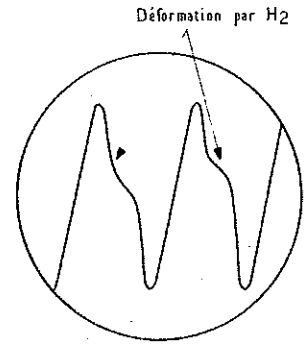


Fig. 4. — Oscillogramme d'un signal H.F. affecté par une harmonique 2.

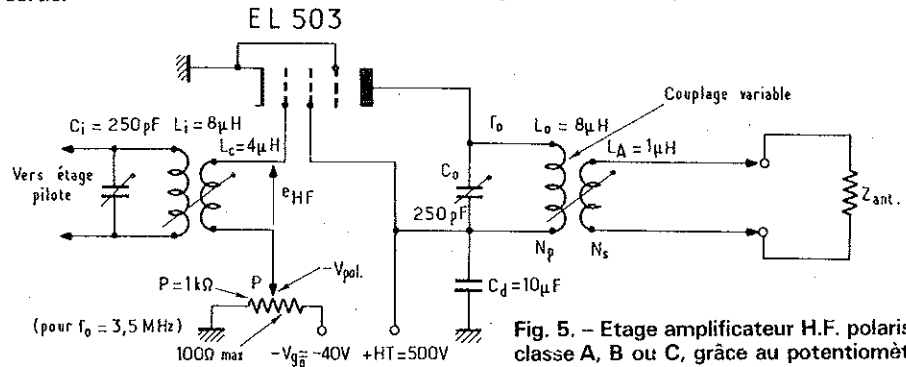


Fig. 5. — Etage amplificateur H.F. polarisable en classe A, B ou C, grâce au potentiomètre P.

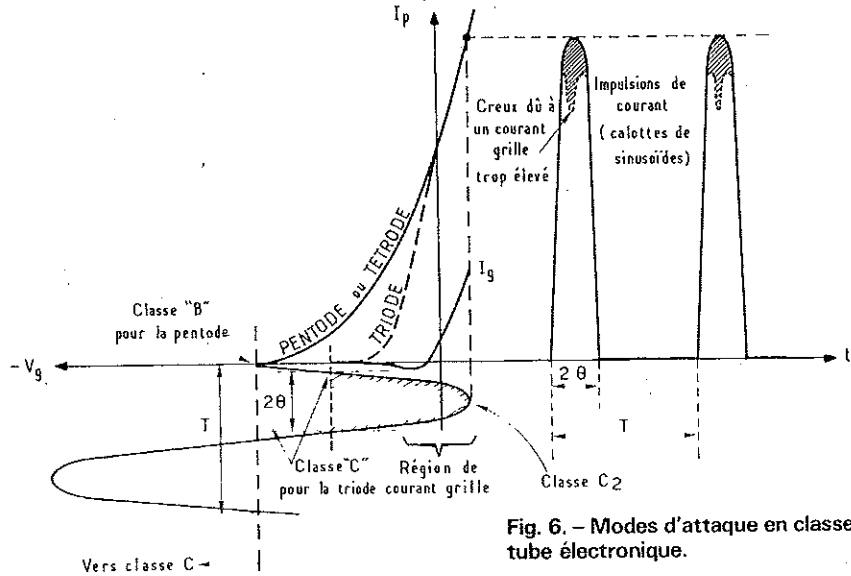


Fig. 6. — Modes d'attaque en classe B ou C d'un tube électronique.

rieure à 12 dB. Le signal résultant risque alors d'être déformé (fig. 4) par composition de l'harmonique 2 avec la fondamentale. Pour éviter cela on ajoute, souvent, dans le circuit de sortie des réjecteurs qui suppriment les harmoniques 2 et 3.

Cette précaution indispensable évite à l'émetteur de rayonner sur une fréquence double de la principale et d'engendrer inutilement la gamme de fréquences allouées, par des interférences inopportunes.

MONTAGE À TUBE ÉLECTRONIQUE

En émission, il est toujours justifié d'employer une lampe (fig. 5) que l'on débloque pour les pointes de tension e_{HF} .

La polarisation est donc importante et l'attaque se trouve conditionnée en niveau jusqu'à ce qu'apparaisse un courant grille. Ce courant grille est lui-même dosé de telle sorte que le rendement énergétique de l'anode ne

tombe pas en dessous de ce que permet une attaque sous courant grille et avec la meilleure polarisation que permet la forme de la caractéristique I_p/V_g (fig. 6).

Il se produit, en effet, une déformation du courant anodique en fonction de la courbure de la caractéristique et la composition du spectre diffère assez sensiblement selon le point de repos choisi: une mise au point est donc souhaitable pour obtenir la plus grande proportion de fondamentale ou d'harmoniques.

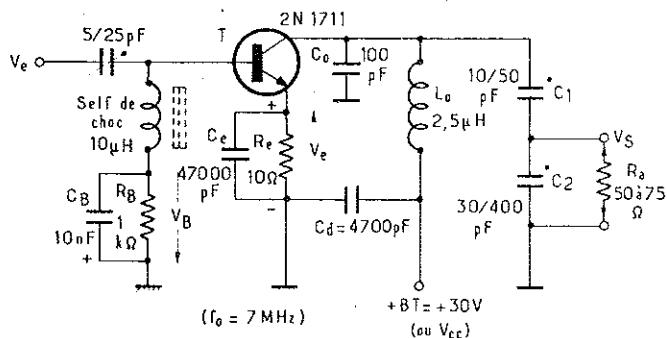


Fig. 7. - Schéma de base d'un étage « classe C » à transistor (driver).

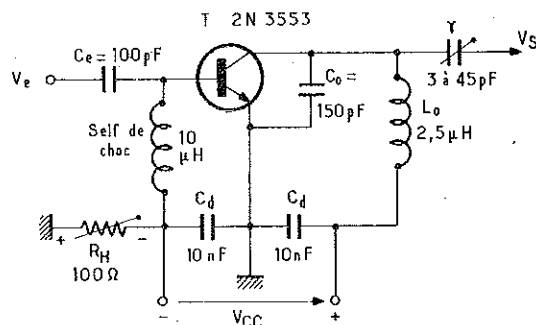


Fig. 8. - Mode d'attaque en classe C d'un transistor.

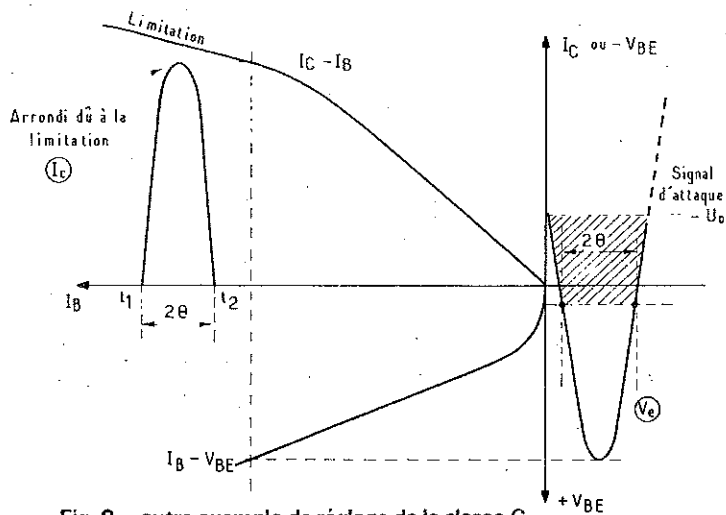


Fig. 9. - autre exemple de réglage de la classe C. R_H varie selon le type de transistor T.

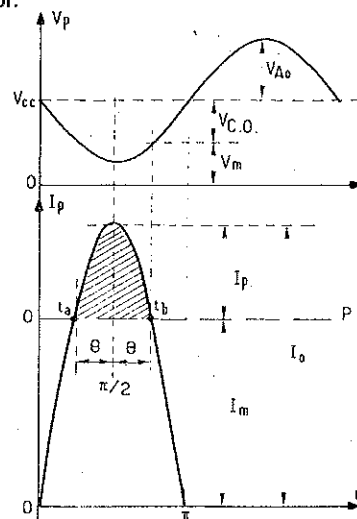


Fig. 10. - Analyse des signaux délivrés par un étage « classe C ».

Une attaque trop grande peut, notamment, creuser l'alternance et modifier les composantes ci-dessus de façon imprévisible.

On choisit donc soit un tube pentode (ou une tétrode) soit un tube triode et l'on déplace l'attaque de la classe B (pied de la caractéristique) à la classe C ou à la C_2 (avec courant grille). Signalons que le tube triode n'est utilisé qu'en push-pull, ceci afin de faciliter le neutrodynage des capacités inter-électrodes.

Hormis ces précautions, aucune règle ne justifie l'emploi de l'une ou l'autre de ces lampes pour la création d'une porteuse non modulée. Par contre, si l'attaque de l'étage se fait au moyen d'un signal modulé, on choisira le tube triode, à cause de la linéarité de sa caractéristique.

Pour favoriser des harmoniques, on peut faire appel au tube pentode : sa non-linéarité (courbe parabolique : voir figure 6) peut justifier la créa-

tion de composantes nettement supérieures : jusqu'à l'harmonique 10 avec un rendement faible, toutefois...

Une caractéristique de triode permet, néanmoins, la création d'harmoniques : il suffit, pour ce faire, de doser judicieusement l'angle d'ouverture 2θ (voir fig. 6) et d'accorder le circuit d'anode sur l'harmonique souhaitée. La théorie de la classe C permet d'expliquer ce phénomène.

MONTAGE À TRANSISTOR

Le montage à transistor diffère par la forme et par les usages. Toutefois, le principe de la classe C est conservé car le transistor est bloqué, au repos, par l'autopolarisation

$$U_0 = V_B + V_e$$

créé par les circuits de base $R_B C_B$ et d'émetteur $R_e C_e$.

Cette tension résulte, en fait, de la valeur moyenne intégrée par les condensateurs et n'existe que lorsque l'étage est attaqué ; elle dépend directement de l'amplitude du signal d'attaque, lequel réagit également sur l'amplitude des impulsions de courant recombinaisonnées pendant l'intervalle de temps

$$t_2 - t_1 = 2\theta$$

La construction de la figure 8 explique le fonctionnement de l'étage : un signal d'attaque V_e débloque périodiquement le transistor qui ne supporte pas d'alimentation sur sa base ; il s'en suit des pointes de courant de base et des crêtes d'alternances dans le circuit collecteur/émetteur ; l'un et l'autre justifient l'apparition des tensions accumulées par C_B et C_e et la valeur moyenne U_0 qui décale la tension d'attaque et diffère l'apparition du courant collecteur. L'estimation de U_0 s'avère très délicate car toutes les grandeurs énon-

cées réagissent les unes sur les autres.

En général, on ajuste la tension U_0 au moyen d'un seul potentiomètre soit que celui-ci est situé en R_B , soit qu'il est figuré par R_e , soit, enfin, qu'on utilise une source auxiliaire.

Dans le montage de la figure 9, c'est le retour de courant qui bloque le transistor. R_4 permet de régler le niveau de la classe C. A noter qu'à cause de la courbure de la caractéristique I_B/V_{BE} , il n'est pas facile d'obtenir la classe B, à moins de disposer une source positive.

THÉORIE DE LA CLASSE C

La classe B étant un cas particulier de la classe C, nous entreprendrons directement la théorie de cette classe pour laquelle le courant traversant le circuit accordé de charge est

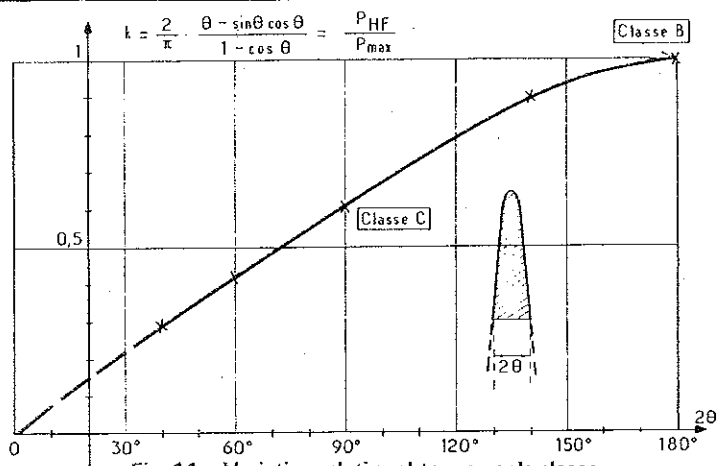


Fig. 11. - Variation relative obtenue par la classe C par rapport à celle maximale fournie par la classe B.

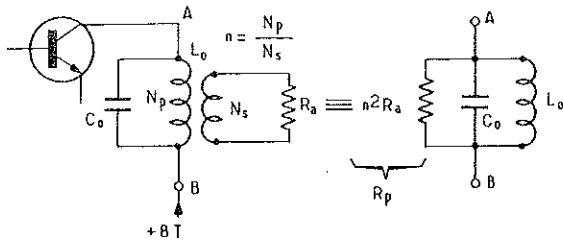


Fig. 13. - Mise en évidence de la résistance où est consommée l'énergie amplifiée par l'étage amplificateur classe B ou C.

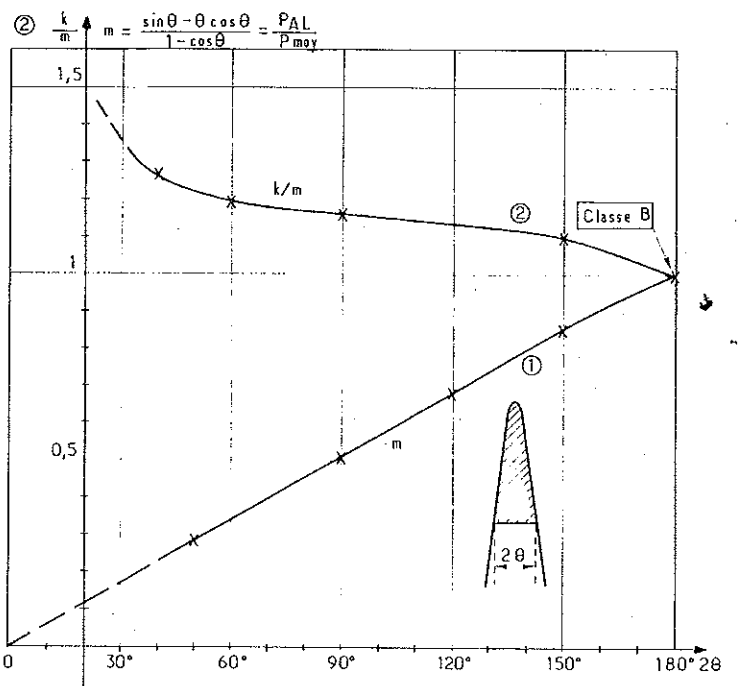


Fig. 12. - Courbe du facteur corrigeant la puissance moyenne consommée en classe B (m = 1) pour avoir celle obtenue en classe C et courbe du rendement.

une alternance de sinusoïde tronquée par le bas.

La tension aux bornes du circuit accordé est supposée sinusoïdale. Comme il s'agit d'une tension anodique (tube) ou de collecteur (transistor), elle est maximale lorsque I est minimum et vice-versa. Celui-ci n'existe, en effet, qu'entre les temps t_a et t_b car la conduction est différée (fig. 10).

On met donc en évidence ce qu'on appelle l'angle « d'ouverture 2θ » qui va nous permettre de calculer les expressions des tensions et courants recueillis sur le circuit accordé.

La figure 10 donne le détail des expressions nécessaires aux calculs. Notamment, la calotte de sinusoïde n'est définie qu'entre t_a et t_b , ce qui signifie qu'elle résulte de la différence existant entre l'expression sinusoïdale $I_0 \sin \omega t$ et le niveau OP, passant par les temps ci-dessus; ce niveau est égal à $I_m = I_0 \cos \theta$, d'où :

$$I_0 = I_p / (1 - \cos \theta)$$

et, en valeur instantané,

$$i_p = I_0 \sin \omega t - I_m$$

En remplaçant I_0 et I_m par leurs valeurs équivalentes, on aboutit à une formule (tableau A) qui n'est définie qu'entre t_a et t_b , mais qui va permettre de calculer la valeur moyenne sur une période complète.

PUISSANCE HF RECUEILLIE

Les composantes « courant » et « tension » sont mises en évidence par le circuit accordé d'anode ou de collecteur qui, par principe, présente une sélectivité suffisamment grande pour ne recueillir que la fondamentale. C'est à ce prix que la tension d'anode ou de collecteur reste sinusoïdale dans la convention de la figure 10.

La puissance recueillie aux bornes du circuit accordé résulte du produit $v_p \times i_p$, expressions instantanées de la tension et du courant (voir tableau A).

Comme ces expressions ne sont valables qu'entre les limites t_a et t_b , il faut faire une inté-

gration de $\pi/2 - \theta$ à $\pi/2$ répartie sur π . On aboutit, ainsi, à la formule :

$$P_{HF} = k \frac{V_{Ao} \cdot I_p}{4} = k \cdot P_{max}$$

avec P_{max} , la puissance qu'on obtient quand l'angle d'ouverture 2θ est égal à 180° , c'est-à-dire pour la classe B.

Dans ces conditions, $k = 1$. Dès lors que l'angle d'ouverture diminue, le coefficient k décroît selon la courbe de la figure 11. Cela signifie que la puissance recueillie descend progressivement à mesure que l'angle d'ouverture décroît. Il est évident que lorsque cet angle s'annule, la puissance recueillie disparaît.

Il est important de connaître la variation de k afin de justifier la puissance obtenue de l'étage lorsque $2\theta < 180^\circ$.

PUISSANCE D'ALIMENTATION

Le rendement d'un étage de puissance est une notion des plus importantes car elle permet de juger directement de

son intérêt. Toutefois, ce paramètre ne peut être déterminé qu'en calculant la puissance empruntée à la source lorsque l'étage fournit la puissance HF.

Ladite source V_{CC} débite une intensité moyenne « $i_{p \text{ moy}}$ » qui résulte de l'intégration de i_p dans l'intervalle « $t_a - t_b$ » (voir tableau A). On aboutit ainsi à une expression qui met en évidence la puissance d'alimentation nécessaire pour la classe B et un coefficient m qui dépend de l'angle d'ouverture 2θ . La courbe de la figure 12 exprime la variation de ce paramètre dans :

$$P_{AL} = m \cdot \frac{V_{CC} I_p}{\pi} = m \cdot P_{moy}$$

RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

En effectuant le rapport P_{HF}/P_{AL} à partir des formules précédentes, on obtient le rendement souhaité :

$$\eta = \frac{V_{Ao}}{V_{CC}} \cdot \frac{k}{m} \cdot \frac{\pi}{4}$$

Cette formule est très importante car elle montre que l'angle d'ouverture « 2θ » réagit sur le rendement ainsi que le rapport

$$\frac{\text{tension HF}}{\text{tension d'alimentation}}$$

A la limite, pour une attaque maximale, il n'est pas possible de faire dépasser V_{Ao} de V_{CC} ; le rapport V_{Ao}/V_{CC} tend donc vers 1.

Pour $2\theta = 180^\circ$ (cas de la classe B), le rapport k/m est, aussi, égal à 1. Il reste alors :

$$\eta = \frac{\pi}{4} = 78,6\%$$

Par contre, si 2θ tombe à des valeurs assez faibles le rapport k/m devient supérieur à 1 (voir fig. 2). Ainsi, en théorie, pour un angle d'ouverture de $2\theta \neq 40^\circ$, le produit

$$\frac{k}{m} \times \frac{\pi}{4}$$

devient égal à 1, ce qui signifie que le rendement peut atteindre 100%. Cette intéressante conclusion peut justifier le fait que la puissance de sortie tombe à 0,32 fois ce que peut donner l'étage fonctionnant en classe B.

CHARGE ÉQUIVALENTE

L'énergie amplifiée est dérivée puis consommée par l'antenne de résistance de rayonnement égale à R_a . Par l'intermédiaire du système d'adaptation ou bien, grâce au transformateur accordé L_o , de $n = N_p/N_s$ de rapport, faisant suite au transistor ou au tube de sortie, la charge utile, c'est-à-dire l'antenne, est équivalente à une résistance R_p aux bornes de $L_o C_o$.

On suppose que l'amortissement dû à la bobine est négligeable devant celui de R_p . C'est cette résistance qui met en évidence v_p pour le transistor et i_p pour le tube. Pour l'un et l'autre, il apparaîtra donc une puissance inversement proportionnelle à R_p :

$$P_{HF} = \frac{V_{Ao}^2}{2 R_p}$$

Le chiffre 2 permet le passage de la valeur de crête à la valeur efficace.

Si l'on prend pour P_{HF} la puissance calculée pour la classe C, on obtiendra la valeur optimale de la charge à conditionner aux bornes de $L_o C_o$:

$$R_p = \frac{V_{Ao}^2}{2 P_{HF}}$$

En remplaçant P_{HF} par la valeur calculée ci-dessus, on aboutit à la relation :

$$R_p = \frac{2 V_{Ao}}{I_p} \cdot n$$

« n » est un facteur correctif dont la variation est donnée, par la figure 14, en fonction de l'angle d'ouverture 2θ .

On constate que la charge peut être d'autant plus grande que l'angle d'ouverture est faible. Le rapport $2 V_{Ao}/I_p$ correspond à la résistance de charge lorsque l'étage fonctionne en classe B.

MISE EN APPLICATION DE LA THÉORIE

Toutes les formules énoncées ci-dessus n'ont de signification que si l'on connaît V_{Ao} , I_p et l'angle d'ouverture. On peut admettre que l'attaque de l'étage est suffisamment vigoureuse pour que l'on atteigne environ V_{CC} pour V_{Ao} ; c'est le cas pour les transistors.

Pour les tubes, à moins qu'on ne tolère un fort courant grille, on peut recueillir jusqu'à 80% de V_{Ao} . I_p dépend de l'attaque, donc de la polarisation - V_{g0} pour les tubes ou de l'autopolarisation pour les transistors. Toutefois, pour que l'équilibre soit complet, I_p doit aussi vérifier la relation :

$$I_p = \frac{2 V_{Ao}}{R_p} n$$

R_p est alors donné par la charge. On entrevoit le compromis : la polarisation, et l'attaque agissent sur l'angle d'ouverture et l'amplitude, le couplage « antenne-circuit accordé » sur la résistance de charge et, celle-ci, sur le courant de crête.

Le contrôle de la mise au point peut se faire en observant les impulsions de courant fournies par le tube (voir exemple de la figure 15) au moyen d'un oscilloscope branché sur une résistance de faible valeur placée dans le circuit collecteur ou le retour de cathode. Quant à l'amortissement R_p , il est dosé en couplant plus ou moins l'inductance d'antenne au circuit accordé de sortie.

Prenons pour exemple de calcul le cas de l'étage push-pull de la figure 15. On a affaire à un tube 6 J 6 neutro-

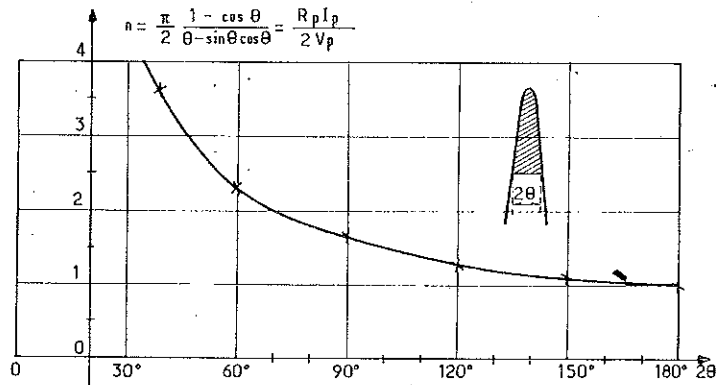


Fig. 14. - Coefficient qui définit la résistance optimale à prévoir sur le circuit accordé de charge d'un amplificateur classe C.

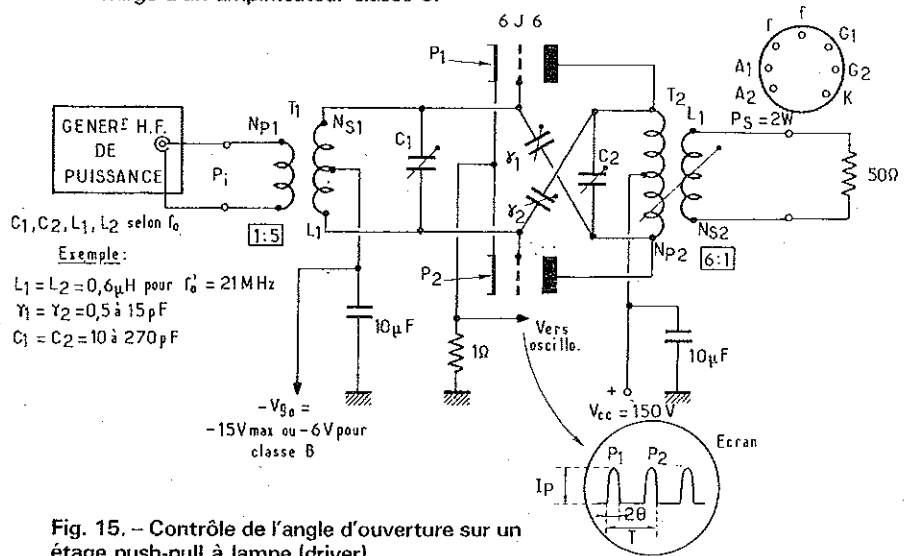


Fig. 15. - Contrôle de l'angle d'ouverture sur un étage push-pull à lampe (driver).

dyne par γ_1 et γ_2 et alimenté en 150 V.

En observant les caractéristiques, on relève :

$$V_{\text{CUT OFF}} = -6 \text{ V (pour 150 V)}$$

En choisissant $-V_{g0} = -8 \text{ V}$ et une attaque $e_{\text{HF}} = 10 \text{ V max}$, ce qui suppose une grille positive de 2 V, l'angle d'ouverture se calcule en observant les figures 6 et 10 et en consultant le tableau A.

Le « cut-off » définit, en effet, l'angle d'ouverture sur le signal de grille tout comme si l'on observait le courant anodique :

$$I_o = e_{\text{HF max}}$$

$$I_p = e_{\text{HF max}} - V_{\text{CUT OFF}}$$

$$I_m = V_{g0} - V_{\text{CUT OFF}}$$

On a donc :

$$\cos \theta = \frac{I_m}{I_o} = \frac{V_{g0} - V_{\text{CUT OFF}}}{e_{\text{HF max}}}$$

Soit :

$$\cos \theta = \frac{8 - 6}{10} = 0,2$$

... et un angle d'ouverture $2\theta = 157^\circ$.

Nanti de cet angle, on peut obtenir les divers coefficients suivants :

$$k \neq 0,95$$

$$m \neq 0,88$$

$$k/m \neq 1,08$$

$$n \neq 1,04$$

... et calculer les puissances en jeu dans l'étage, dès lors qu'on aura pu apprécier I_p à partir de la charge. Ceci ne pourra se faire qu'en respectant la sélectivité de l'étage à la fréquence considérée.

Admettons, pour commencer, la convention relative à $V_{A0} \approx 80\%$ de V_{CC} .

Ensuite, reportons-nous à la figure 16 qui nous définira l'excursion de courant I_p , soit, par conséquent :

$$V_{A0} = 120 \text{ V}$$

$$I_p = 35 \text{ mA}$$

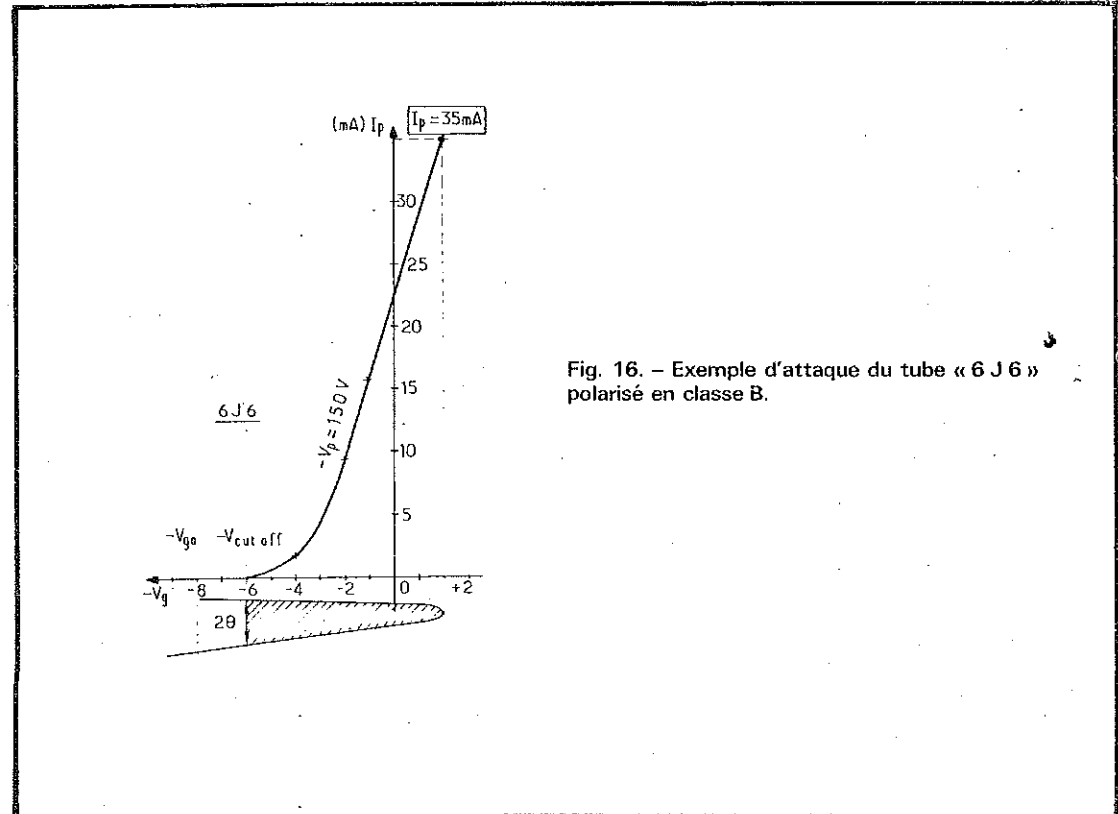


Fig. 16. - Exemple d'attaque du tube « 6 J 6 » polarisé en classe B.

Avec l'angle d'ouverture choisi, on obtiendra :

$$P_{\text{HF}} = k \frac{V_{A0} \cdot I_p}{4}$$

$$= 0,95 \frac{120 \cdot 35 \cdot 10^{-3}}{4} \neq 1 \text{ W}$$

$$P_{\text{AL}} = m \frac{V_a I_p}{\pi}$$

$$= 0,88 \frac{150 \cdot 35 \cdot 10^{-3}}{\pi} \neq 1,47 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{HF}}}{P_{\text{AL}}} = 68 \%$$

Ces puissances et ce rendement seront développés quand la charge R_p atteindra la valeur :

$$R_p = \frac{2 V_{A0}}{I_p} n$$

$$= \frac{2 \cdot 120 \cdot 1,04}{35 \cdot 10^{-3}} = 7,13 \text{ k}\Omega$$

Si nous accordons l'étage sur 21 MHz avec une capacité de 100 pF le coefficient de qualité s'élèvera à :

$$Q = R_p C_w$$

$$= 7130 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \pi \cdot 21 \cdot 10^6 = 94$$

Vérifions si l'affaiblissement de la composante harmonique 2 est suffisant. La formule de sélectivité

EXPRESSIONS DES SIGNAUX EN PRÉSENCE

TABLEAU A

I	$V_p = V_{CC} + V_{A0} \sin(\omega t + \pi)$ $I_p = I_o (1 - \cos \theta)$ $I_m = I_o \cos \theta$
II	$i_p = I_p \cdot \left[\frac{\sin \omega t - \cos \theta}{1 - \cos \theta} \right]_{\text{ia}}^{\text{tb}}$ $V_p = -V_{A0} [\sin \omega t]_{\text{ia}}^{\text{tb}}$

$S = \sqrt{1 + x^2}$ peut s'assimiler à x quand S est grand, d'où

$$S \neq \mu Q_o$$

$$\text{avec } \mu = \frac{H_2}{f_o} - \frac{f}{H_2} = 1,5$$

D'où : $S = 1,5 \times 94 = 141$
soit 43 dB

Ce résultat pourra être jugé satisfaisant ; néanmoins, on devra ajouter un réjecteur sur 42 MHz dans la liaison à l'antenne pour être dans les normes des émetteurs du commerce.

Notons que le résultat en puissance a été calculé pour 1

tube, il faut donc multiplier par 2 les chiffres trouvés.

Les tubes dissipent $P_{\text{AL}} - P_{\text{HF}} = 0,47 \text{ W}$, ce qui se trouve être le tiers, environ, de ce que la 6 J 6 est capable de dissiper.

En augmentant V_{CC} et l'attaque, on peut sans problème atteindre 3 Watts HF. Le montage proposé figure 15 est donc, selon les usages, un driver ou un étage de sortie.

Roger Ch. HOUZÉ
Professeur à l'ECE

Prochainement : « Applications de la classe C ».