

Dans les amplificateurs basse fréquence, les distorsions de phase ne jouent pas un rôle important. En effet, l'oreille ne fait aucune différence entre le son produit par les tensions des figures VI.13 *a* et *b* appliquées à un haut-parleur. Ceci s'explique physiologiquement; les différentes fréquences sont perçues par des terminaisons différentes du nerf auditif. L'oreille entend *en analysant le son*, dont les différentes composantes ont été perçues séparément.

Ce genre de distorsion est, par contre, très important dans les amplificateurs de télévision où c'est la forme même de la tension variable qui crée l'image.

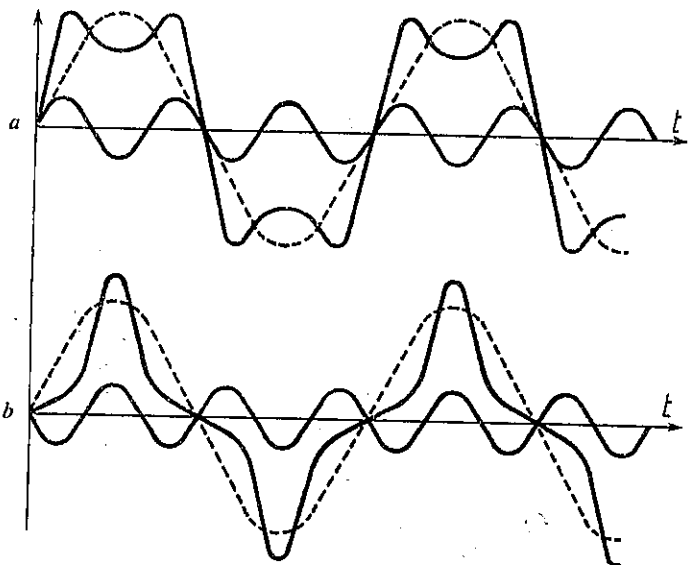


FIG. VI-13. — *a*) Distorsion de phase par harmoniques 1 et 3 en phase.
b) Distorsion de phase par harmoniques 1 et 3 en opposition de phase.

Distorsions par transmodulation. — C'est une forme particulière de la distorsion d'amplitude qui se produit lorsque deux tensions de fréquences différentes sont simultanément appliquées à l'entrée de l'amplificateur.

Si ces fréquences sont F_1 et F_2 , il se trouve à la sortie des partiels tels que $F_1 + F_2$, $2F_1 + F_2$, $2F_2 + F_1$, $F_1 - F_2$, etc., qui apportent une déformation profonde du son produit.

Cette formation de *partiels* est importante, surtout avec les tubes pentodes et faible avec les tubes triodes. Elle semble provenir de la forme de leur caractéristique. Ce mode de distorsion ne peut être apprécié avec les méthodes classiques de mesures qui sont effectuées avec un générateur basse fréquence produisant une onde sinusoïdale pure. Il est nécessaire d'utiliser deux générateurs accordés sur des fréquences éloignées et dont l'un fournit une tension très supérieure à l'autre. L'importance des partiels est mesurée sur l'écran d'un oscilloscope cathodique.

Il semble que les distorsions par transmodulation permettent d'expliquer pourquoi un amplificateur équipé de tubes triodes est souvent préféré par les spécialistes à un amplificateur équipé de tubes pentodes, même lorsque les mesures de distorsions habituelles démontrent l'inverse.

VI.2.2. L'étage de puissance par un tube triode.

Un étage de sortie utilisant un seul tube triode est obligatoirement un étage « classe A », ainsi que nous l'avons défini au début de ce paragraphe. Nous allons exposer maintenant le réglage du tube et la détermination des principaux éléments.

La figure VI.14 donne le schéma de principe de l'étage. Il s'agit, partant d'un tube donné, de déterminer les principaux éléments :

- tension anodique V_p ,
- impédance de charge Z ,
- tension de polarisation $V_g =$,
- tension de la modulation appliquée à la grille $V_g \sim$, pour obtenir le maximum de rendement, sans surcharger le tube et pour un taux de distorsion harmonique le plus faible possible.

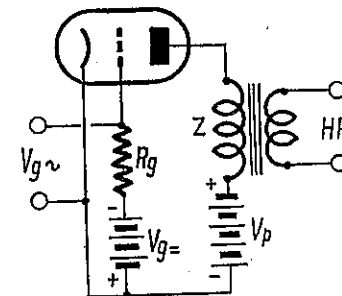


FIG. VI-14. — Schéma de principe d'un étage de puissance par tube triode.

Nous ne nous occuperons pas ici du choix du tube qui fera l'objet d'une étude détaillée (chapitre VII).

Ces éléments sont calculés à partir du réseau de courbes I_p/V_p concernant le tube choisi et des caractéristiques limites imposées par le constructeur. Soit, par exemple, figure VI.15, le réseau des caractéristiques I_p/V_p du tube 6A3, la puissance dissipée maximale W_{max} , indiquée par le constructeur, est de 15 watts.

— Commencer par tracer la courbe « iso-puissance limite » AB (fig. VI.15) dont tous les points ont un produit $W = V_p \cdot I_p$ égal à la puissance dissipée maximale de 15 W. Le point de réglage doit se trouver sur cette courbe pour utiliser le tube au maximum.

— Désirant utiliser le tube avec le minimum de distorsions harmoniques, il ne faut pas que le point figuratif vienne explorer les régions coudées de la caractéristique. En fait, la démarcation entre la partie droite et la partie coudée de la courbe est un peu imprécise, la partie droite étant toujours un peu courbe. Tracer, donc, sur le réseau I_p/V_p l'horizontale I_p minimum que le point figuratif ne doit pas dépasser.

Le point figuratif occupe sur le réseau une certaine position et se déplace selon une droite inclinée de pente $1/Z$ (inclinaison Z) variable avec la charge, sans jamais dépasser l'horizontale I_p minimum, ni la courbe correspondant

à $V_g = 0$. Nous savons qu'une grille de tube fonctionnant en classe A ne doit jamais devenir positive, sous peine de donner naissance à un courant grille engendrant des distorsions inadmissibles. Pour tirer le maximum du tube, il faut, lors des impulsions de grille maximales, que le dit point vienne buter, *à la fois*, contre les deux limites ci-dessus, explorant de bout en bout la zone permise, tout en étant tangent en un point de la courbe d'iso-puissance maximale AB .

— On démontre que le maximum de puissance disponible a lieu pour une impédance de charge Z égale à deux fois la résistance interne du tube :

$$Z = 2\rho.$$

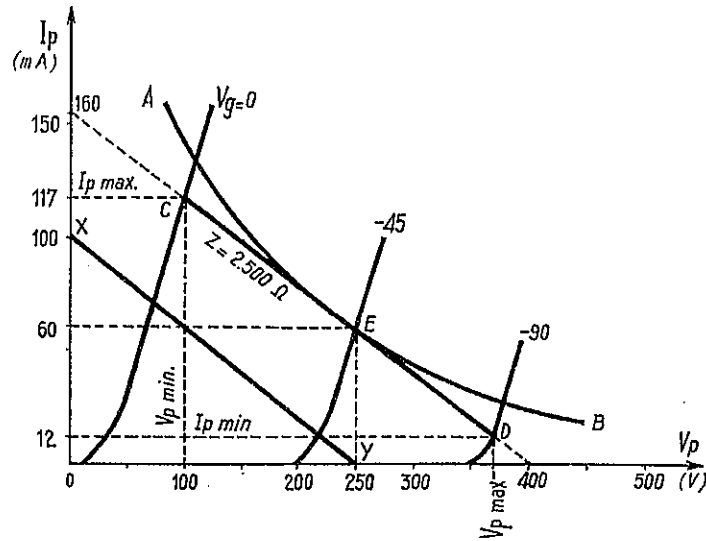


FIG. VI-15. — Calcul du réglage d'un étage triode de puissance.

Pratiquement, les constructeurs recommandent l'utilisation d'une impédance de charge un peu supérieure, aux environs de 3 fois la résistance interne du tube.

En supposant l'impédance de charge Z connue, il suffit de tracer la droite de pente $1/Z$ sur le réseau des caractéristiques.

Connaissant Z , tracer la droite XY en choisissant n'importe quelle tension plaque V_p et déterminer l'intensité plaque correspondante I_p par la formule :

$$I_p = \frac{V_p}{Z}$$

I_p en ampères.

V_p en volts.

Z en ohms.

Dans l'exemple du tube 6A3, il a été choisi, pour tracer la droite XY , une tension $V_p = 250$ volts, l'impédance Z étant fixée par le constructeur à $2\,500\ \Omega$, la droite coupe l'axe des intensités anodiques à la valeur :

$$I_p = \frac{250}{2\,500} = 0,1\ \text{A ou } 100\ \text{mA}$$

La droite de charge cherchée est parallèle au segment d'inclinaison convenable XY et remplit les conditions précédemment définies. Le segment CD (fig. VI.15) est la droite de charge cherchée car :

- elle est tangente au point E à la courbe d'iso-puissance limite,
- elle va de la courbe $V_g = 0$ à l'horizontale I_p minimum,
- elle est inclinée selon la charge Z prescrite par le constructeur.

— Le point de réglage au repos $V_g = 0$ doit être au milieu de la droite de charge CD . Le point D est sur la courbe $V_g = -90$ volts. Le point de réglage E est sur la courbe $V_g = -45$, ce qui définit la tension anodique V_p à 250 volts et l'intensité anodique au repos, I_p à 60 mA.

— On voit que l'excitation de grille $V_g \sim$ pour la modulation complète du tube, doit être de 45 volts, c'est-à-dire que la tension de pointe d'une alternance doit être de 45 volts.

Le tracé graphique du réglage d'un tube de puissance fournit tous les renseignements nécessaires à son utilisation. On voit que pour le tube 6A3 pris comme exemple on peut définir, en outre :

— La variation instantanée de tension anodique autour de la valeur de la tension d'alimentation. Ici, $V_{po} = 250$ volts, V_p maximum = 400 V et V_p minimum = 100 volts, soit une oscillation de ± 150 volts autour du point de réglage.

— La variation instantanée d'intensité anodique de part et d'autre de l'intensité au repos, Ici $I_{po} = 60$ mA, I_p maximum = 117 mA, I_p minimum = 12 mA.

— La pente dynamique S' , en connaissant la pente statique S , l'impédance de charge Z et la résistance interne du tube ρ .

$$S' = \frac{S}{Z/\rho}$$

Ici, $Z/\rho = 2\,500/800 = 3$ environ.

$$S' = \frac{S}{3} = \frac{5,25}{3} = 1,75\ \text{mA/V.}$$

La puissance modulée fournie par le tube, en supposant que la tension alternative appliquée à la grille soit égale à la polarisation, est de :

$$W = \frac{(I_{\max} - I_{\min})(E_{\max} - E_{\min})}{8}$$

Ici :

$$W = \frac{(117 - 12)(400 - 100)}{8} = 3,9 \text{ watts}$$

ou encore par cette formule approchée plus simple :

$$W = \frac{1}{4} I_{po} \cdot V_{po}$$

Ici :

$$\frac{0,06 \times 250}{4} = 3,8 \text{ watts.}$$

— Le pourcentage de distorsion occasionné par le deuxième harmonique, le plus important dans les tubes triodes :

$$df2 \% = \frac{I_{p \max} + I_{p \min} - I_{po}}{I_{p \max} - I_{p \min}} \times 100$$

Ici

$$df2 \% = \frac{117 + 12 - 60}{117 - 12} \times 100 = 4,2 \% \text{ environ.}$$

Pour un bon réglage, le taux de distorsion d'un tube triode ne doit pas dépasser 5%.

— Le rendement du tube est le rapport entre la puissance modulée recueillie sur l'impédance de charge, à la puissance d'alimentation fournie ou puissance dissipée.

$$r = \frac{W_{\text{modulée}}}{W_{\text{dissipée}}} = \frac{\frac{1}{4} I_{po} \cdot V_{po}}{I_{po} \cdot V_{po}} \times 100 = 25 \% \text{ max,}$$

dans notre exemple, le rendement est de :

$$r = \frac{W_{\text{modulée}}}{W_{\text{dissipée}}} \times 100 = \frac{3,8}{15} \times 100 = 25 \%$$

VI.2.3. L'étage de puissance par un tube pentode.

Comme pour le tube triode, un étage de sortie utilisant un seul tube pentode fonctionne obligatoirement selon la « classe A ». La détermination des principaux éléments de l'étage s'inspire de la même méthode que celle qui a été développée dans le paragraphe précédent. C'est pourquoi nous passerons plus rapidement sur le détail des opérations.

Comme précédemment, partant d'un tube donné, nous déterminons les principaux éléments de l'étage pour obtenir le plus faible taux de distorsions harmoniques pour un rendement acceptable.

Le schéma théorique du montage est donné par la figure VI.16.

Le réseau de courbes I_p/V_p qui sert de base à la détermination graphique est celui de la figure VI.17. Le tube choisi comme exemple est la pentode 6F6. La puissance dissipée maximale, W_{\max} indiquée par le constructeur, est de 8,5 watts.

— Tracer la courbe iso-puissance limite AB (fig. VI.17) dont tous les points ont un produit $W = V_p \cdot I_p$ égal à la puissance dissipée maximale de 8,5 W.

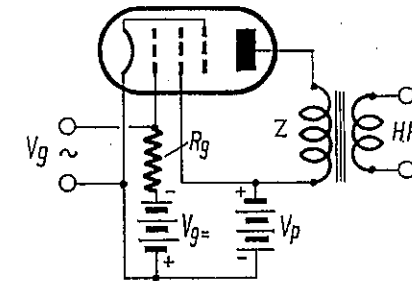


FIG. VI-16. — Schéma de principe d'un étage de puissance par tube pentode.

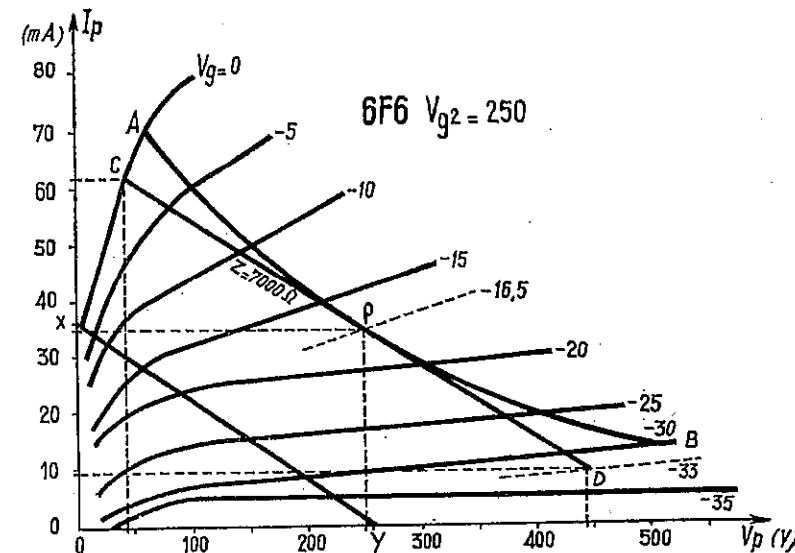


FIG. VI-17. — Calcul du réglage d'un étage pentode de puissance.

Il est beaucoup plus difficile, ici, de tracer l'horizontale I_p minimum qui délimite la partie droite de la partie courbe de la caractéristique. Les pentodes admettent des tensions et des intensités de plaque beaucoup plus faible que les triodes sans que le taux de distorsion soit exagéré. Cette horizontale $I_p \cdot \min$ sera donc tracée, par la suite, à titre de vérification.

Nous avons vu que la pente dynamique S' d'une pentode se confond, à peu près complètement, avec la pente statique S . Ceci parce que la charge Z est petite devant la résistance interne du tube. En réalité, avec les pentodes modernes à grande pente et à résistance interne relativement faible, cette façon de voir n'est pas toujours légitime. Toutefois, l'erreur introduite dans le calcul étant faible, nous adopterons cette simplification.

La puissance modulée croît avec l'impédance de charge Z , mais le taux de distorsion limite rapidement cette augmentation et il n'est pas possible d'approcher le maximum de rendement du tube. La détermination de la valeur de l'impédance de charge d'une pentode est uniquement fonction de la distorsion admissible.

On démontre que l'impédance de charge d'une pentode est donnée par le quotient de la valeur de la tension anodique par l'intensité de courant normale correspondante :

$$Z = \frac{V_{po}}{I_{po}}$$

Z en ohms lorsque V_{po} est en volts et I_{po} en ampères.

Ainsi, connaissant la tension normale d'utilisation et la puissance dissipée maximale, ou l'intensité anodique normale, il est toujours facile de déterminer la valeur de l'impédance de charge d'une pentode.

Dans l'exemple choisi du tube 6F6, nous savons que la tension maximale d'anode $V_{po} = 250$ volts et que la puissance dissipée maximale est de 8,5 W,

D'où :

$$I_{po} = \frac{W \max}{V_{po}} = \frac{8,5}{250} = 0,034 \text{ A}$$

et :

$$Z = \frac{V_{po}}{I_{po}} = \frac{250}{0,034} = 7\,000 \text{ } \Omega \text{ environ.}$$

Tracer une droite XY d'inclinaison Z ainsi qu'il a été expliqué pour les triodes.

La droite de charge cherchée est parallèle à XY , tangente à la courbe d'impédance limite et limitée par la courbe $V_g = 0$.

Le segment CD , qui répond à ces conditions, est la droite de charge cherchée.

— La tension anodique maximale $V_{po} = 250$ volts pour la 6F6 détermine le point de fonctionnement P situé sur la droite de charge et sur la courbe $V_g = -16,5$ qui est la valeur optimale de la polarisation pour ce tube. La droite de charge est limitée par le point C situé sur la courbe $V_g = 0$ et par le point D situé sur la courbe $V_g = -33$, valeur double de celle du point de fonctionnement $P(-16,5)$.

— L'excitation de grille $V_g \sim$ pour la modulation complète du tube doit être au maximum de 16,5 volts (tension de pointe).

— Le tracé graphique permet de définir en outre :

— *La variation instantanée de tension anodique.* Ici, $V_{po} = 250$ volts, V_p maximum = 430 V et V_p minimum = 40 volts. Remarquer que la tension instantanée minimale est beaucoup plus faible que pour le tube triode. Cela tient au fait que l'écran et le suppresseur maintiennent des caractéristiques rectilignes, à des tensions anodiques très faibles, par leur effet accélérateur.

— *La variation instantanée d'intensité anodique.* $I_{po} = 34$ mA, I_p max = 62 mA, I_p min = 9 mA.

— *La puissance modulée* fournie par le tube. La tension alternative modulée appliquée à la grille étant égale à la valeur de la polarisation.

$$W = \frac{[I_p \max - I_p \min + 1,41(I_x - I_y)]^2 Z}{32}$$

W en watts lorsque I est en ampère et Z en ohms.

La valeur I_x correspond à l'intensité anodique pour une tension de la grille de commande égale à 0,293 fois la valeur de la polarisation et la valeur I_y correspond à l'intensité anodique pour une tension $V_{g1} = 1,707$ fois la valeur de la polarisation normale (fig. VI.18).

Pour le tube 6F6 pris comme exemple, la polarisation normale est de $V = 16,5$ volts, l'impédance de charge est de $Z = 7\,000 \text{ } \Omega$.

I_x pour 0,293 $V = 58$ mA.

I_y pour 1,707 $V = 15$ mA.

I max étant de 62 mA.

Et I min de 9 mA.

$$W = \frac{[0,062 - 0,009 + 1,41(0,058 - 0,015)]^2 7\,000}{32} = 2,83 \text{ W}$$

La puissance modulée maximale fournie par un tube pentode est donnée par la formule théorique suivante :

$$W = \frac{1}{2} I_{po} V_{po}$$

Ici, pour le tube 6F6 $W_{\max} = \frac{1}{2} 0,034 \times 250 = 4,25$ watts.

Cependant, il faut remarquer que le taux de distorsion pour la puissance maximale est beaucoup trop élevé pour être utilisé pratiquement.

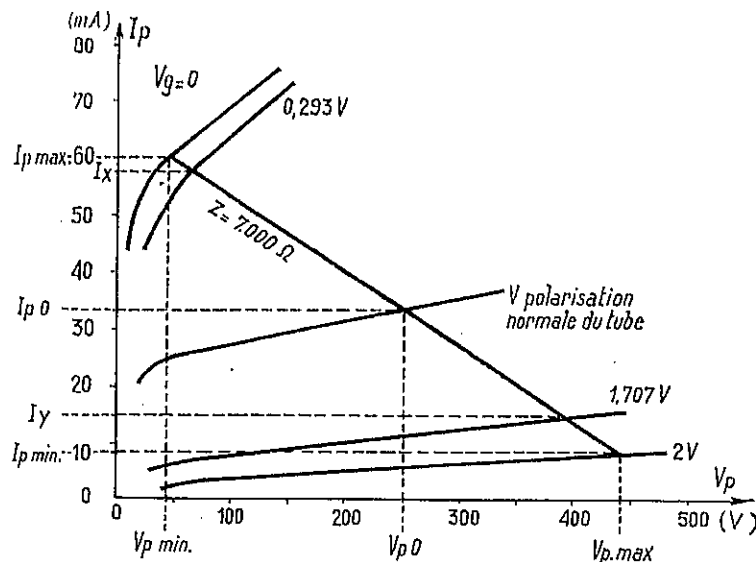


FIG. VI-18. — Calcul des distorsions d'un étage pentode de puissance.

Le taux de distorsions harmoniques du tube pentode : le taux du deuxième harmonique est égal à :

$$df2\% = \frac{Ip_{\max} + Ip_{\min} - 2Ip_0}{Ip_{\max} - Ip_{\min} + 1,41(Ix - Iy)} \times 100$$

et le taux du troisième harmonique est de :

$$df3\% = \frac{Ip_{\max} - Ip_{\min} - 1,41(Ix - Iy)}{Ip_{\max} - Ip_{\min} + 1,41(Ix - Iy)} \times 100$$

Le taux de distorsion des deuxième et troisième harmoniques est :

$$d = \sqrt{(df2\%)^2 + (df3\%)^2}$$

Dans l'exemple choisi :

$$df2\% = \frac{0,062 + 0,009 - 0,068}{0,062 - 0,009 + 1,41(0,058 - 0,015)} \times 100 = 3\%$$

$$df3\% = \frac{0,062 - 0,009 - 1,41(0,058 - 0,015)}{0,062 - 0,009 + 1,41(0,058 - 0,015)} \times 100 = 3,25\%$$

Total des harmoniques 2 et 3 = $\sqrt{(3)^2 + (3,25)^2} = 4,5\%$ environ.

On peut en déduire que cet étage possède un taux de distorsion total de 5,25% environ, ce qui est très réduit. Ce réglage est le plus favorable qu'il est possible d'obtenir avec un tel tube.

— Le rendement du tube est le rapport de la puissance modulée à la puissance dissipée.

Le rendement théorique est au maximum de 50% lorsque la puissance modulée est de

$$W = \frac{1}{2} I_{p0} V_{p0}$$

En choisissant un réglage donnant un taux de distorsion faible, le rendement diminue ; il est dans notre exemple :

$$r = \frac{W_{\text{mod}}}{V_{p0} I_{p0}} = \frac{2,83}{8,5} \times 100 = 34\% \text{ environ.}$$

— La sensibilité du tube est un chiffre qui donne la valeur de l'excitation de la grille de commande nécessaire pour produire une puissance de 50 milliwatts dans l'impédance optimale du circuit plaque.

Les constructeurs indiquent ce chiffre dans les caractéristiques des tubes de puissance.

La sensibilité des pentodes est beaucoup plus grande que celle des triodes ; c'est-à-dire qu'il faut une plus grande excitation de grille pour produire 50 milliwatts dans un tube triode que dans un tube pentode.

Ainsi la sensibilité de la triode 6A3 est de 2,5 volts efficaces, tandis que la sensibilité de la pentode 6F6 est de 0,9 volt efficace. La pentode de puissance nécessite une préamplification en tension moins poussée ou possédant un étage de moins que dans le cas de l'utilisation d'une triode.



VI.2.4. L'étage de puissance par un tube tétrode à faisceaux électroniques dirigés.

Le réglage d'un étage de sortie classe A utilisant un tube tétrode de puissance s'effectue exactement de la même façon que pour un tube pentode. Les mêmes formules sont applicables.

Par la forme plus favorable du réseau des caractéristiques I_p/V_p , la pente dynamique S' est du deuxième degré limitant à une valeur très faible la création d'harmoniques de rang impair. Le tube tétrode de puissance réunit certains avantages de la pentode et de la triode.

De la pentode, il tient sa sensibilité élevée.

De la triode, il possède la faible production d'harmoniques de rang pair plus facilement acceptables pour l'oreille.

A titre d'exemple, voici le calcul d'un étage classe A utilisant le tétrode 6L6 (fig. VI.19).

— Tracé de la courbe d'iso-puissance limite. Courbe ~~AB~~ sachant que la puissance dissipée maximale supportée par le tube est de 20 watts.

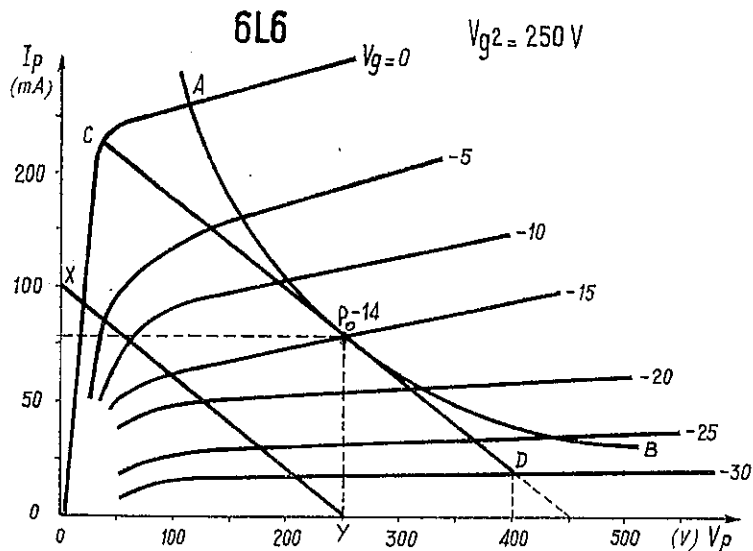


FIG. VI-19. — Calcul du réglage d'un étage par tube tétrode de puissance.

— Détermination de l'impédance de charge. En utilisant la formule donnée pour les pentodes de puissance, on constate que la valeur trouvée est trop forte :

$$Z = \frac{V_{po}}{I_{po}} = \frac{250}{0,076} = 3\,300 \, \Omega.$$

Cela provient de la faible résistance interne des tubes tétrodes de puissance.

A ce moment, la pente dynamique S' ne peut plus se confondre avec la pente statique S :

$$S' = \frac{K}{\rho + R_p} = \frac{135}{22\,500 + 2\,500} = 5 \text{ environ } S = 6,5 \text{ mA/V.}$$

La pente dynamique S' est inférieure de 25 % à la pente statique S . L'impédance de charge optimale est à peu près 25 % inférieure à la valeur trouvée, soit 2 500 Ω (valeur recommandée par le constructeur).

au S/P \Rightarrow pour la plaque à plaque
 → voir page 211

Calcul de la droite XY. En choisissant la tension de 250 volts et l'impédance de charge de 2 500 Ω , l'intensité correspondante :

$$I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{250}{2\,500} = 100 \text{ mA.}$$

— Tracé de la droite de charge. Sachant que la tension V_{po} est de 250 volts, correspondant à une intensité plaque $I_{po} = 76 \text{ mA}$, on détermine le point P sur la courbe d'iso-puissance limite. La droite de charge est une ligne parallèle à XY passant par la pointe P et limitée par le point C sur la courbe $V_g = 0$ et par le point D sur la courbe $V_g = -28$ double de la tension de polarisation du point P ($V_g = -14$).

— Calcul de la puissance modulée.

$$W = \frac{[(I_p \text{ max} - I_p \text{ min} + 1,41(I_x - I_y))^2 Z]}{32} = \frac{[0,160 - 0,015 + 1,41(0,135 - 0,030)]^2 2\,500}{32} = 6,5 \text{ W}$$

— Le taux des distorsions harmoniques est égal :

pour l'harmonique 2 :

$$df_2 \% = \frac{I_p \text{ max} + I_p \text{ min} - 2I_{po}}{I_p \text{ max} - I_p \text{ min} + 1,41(I_x - I_y)} \times 100 = 7,5 \%$$

pour l'harmonique 3 :

$$df_3 \% = \frac{I_p \text{ max} - I_p \text{ min} - 1,41(I_x - I_y)}{I_p \text{ max} - I_p \text{ min} + 1,41(I_x - I_y)} \times 100 = 1 \%$$

On remarque le très faible taux de distorsion pour l'harmonique 3. Pour cette puissance de 6,5 watts, le taux de distorsion total n'atteint pas 8 %, ce qui est acceptable.

— Le rendement global du tube est égal :

$$r = \frac{W \text{ mod}}{V_{po} I_{po}} = \frac{6,5}{250 \times 0,076} = 36 \%$$

ce qui est légèrement supérieur au rendement calculé précédemment pour un tube pentode de puissance.

→ pour un taux de distorsion minimum.

Triode.

Soit un tube triode 6A3, de résistance interne $\rho = 800 \Omega$ et d'impédance de charge $Z_a = 2\,500 \Omega$. La transmission subit une diminution d'amplitude maximale de $1/\sqrt{2}$ ou 0,707 à 30 Hz et à 12 000 Hz :

Fréquences basses :

$$\omega Lp = \frac{Z_a \times \rho}{Z_a + \rho} \text{ (à 30 Hz),}$$

$$\omega Lp = \frac{2\,500 \times 800}{2\,500 + 800} = 600 \Omega \text{ environ,}$$

$$Lp = \frac{600}{2\pi \times 30} = 3,22 \text{ henrys.}$$

La valeur de la self-induction du primaire est de 3,22 henrys, ce qui est facilement obtenu.

Fréquences élevées :

$$\omega Ld = \rho + Z_a \text{ (à 12 000 Hz),}$$

$$\omega Ld = 800 + 2\,500 = 3\,300 \Omega,$$

$$Ld = \frac{3\,300}{2\pi \times 12\,000} = 0,05 \text{ henry environ.}$$

Il est plus difficile de réaliser un transformateur ayant une faible valeur de self-induction de dispersion.

Rapport de la self-induction de dispersion avec la self-induction primaire :

$$\frac{Ld}{Lp} = \frac{0,05}{3,22} = 1,5 \%$$

En conclusion, un transformateur de sortie pour pentode (ou tétrode) est lourd et encombrant, mais il peut être réalisé avec moins de soins qu'un transformateur pour triode. Le transformateur de sortie pour triode est moins encombrant, moins lourd, mais il doit être réalisé avec beaucoup de soins, toujours en bobinages fractionnés.

VI.2.7.3. Impédance réelle d'un haut-parleur électrodynamique.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la charge du secondaire du transformateur de sortie était une résistance ohmique R , donc invariable avec la fréquence. Or, dans la pratique, la charge est constituée par la bobine mobile d'un haut-parleur électrodynamique. L'impédance donnée par le cons-

tructeur est celle mesurée à 1 000 Hz. La variation de l'impédance d'une bobine mobile en fonction de la fréquence est donnée par la figure VI.42.

Le haut-parleur, pris comme exemple, possède une bobine mobile dont la

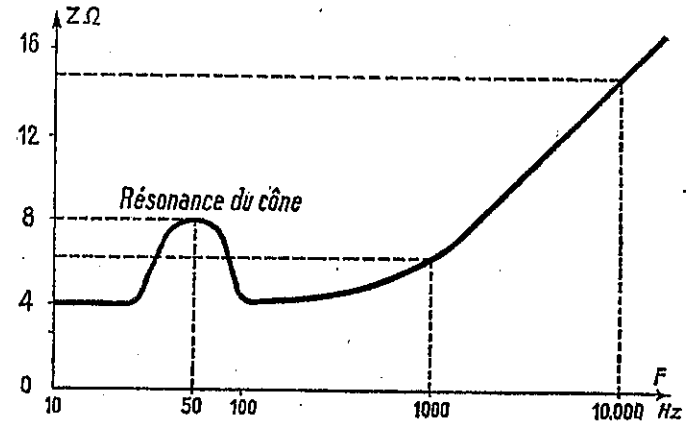


FIG. VI-42. — Impédance de la bobine mobile d'un haut-parleur.

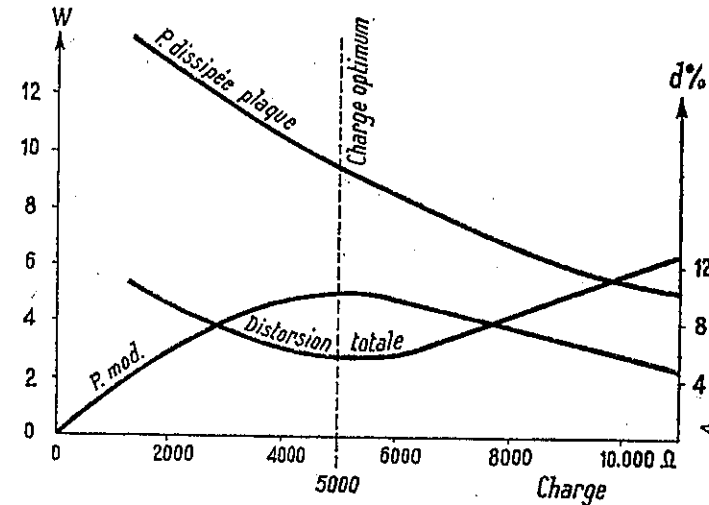


FIG. VI-43. — Caractéristiques d'un tube 6L6 en fonction de l'impédance de charge.

résistance en courant continu est de 4 Ω . L'impédance à 1 000 Hz donnée par le constructeur est de 6 Ω ; à 10 000 Hz, l'impédance est de 14 Ω . Le système mobile composé de la membrane de la bobine et de sa fixation entre en résonance mécanique à 50 Hz augmentant l'impédance jusqu'à 8 Ω .

On voit que l'impédance primaire du transformateur de sortie subit la répercussion de ces variations et qu'en définitive la charge du tube est fonction

Il est peu probable qu'il y ait une erreur dans l'échelle de l'impédance, cela correspondrait à un P/P mais peu probable, ou veut dire que la charge optimale est 1/2 son seuil ou 1/2 son seuil l'erreur due au calcul — d% minimum