

tensions des différent  
 on. Celle-ci est d'autant  
 trêt des pentodes où  $\rho$  est  
 sans capacité interne, m  
 tion est rigoureusement

## CHAPITRE IX

### LE MONTAGE « PUSH-PULL » B. F.

9-1. Principe. — Le but du montage est de donner au haut-parleur une puissance BF beaucoup plus grande, avec moins de distorsion.

Dans une liaison par transformateur entre la lampe de sortie et le HP, le courant plaque, qui traverse le primaire, est forcément intense, il y a donc des risques de saturation du fer. En tout cas le fer travaille dans une région où la courbe de magnétisme  $B = f(H)$  n'est plus linéaire : c'est une cause grave de distorsion. De plus  $\mu$  varie énormément.

On a donc inventé le « push-pull » (et c'est la principale revendication du brevet américain de la Western Co) pour éviter la saturation du fer. On s'est aperçu

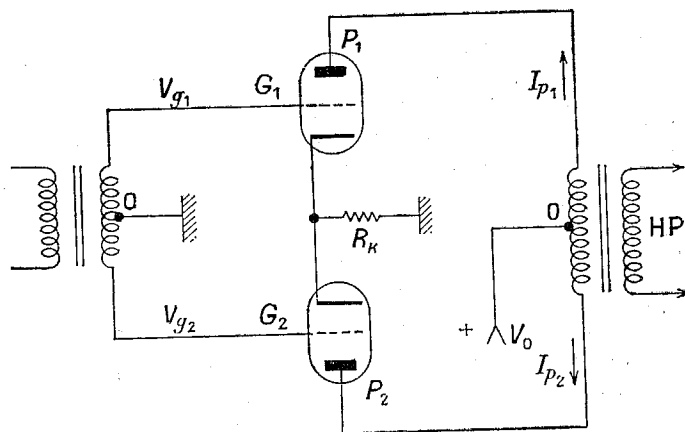


FIG. 9-1.

ensuite, ce qui arrive souvent lorsque l'on fait une invention, que ce montage avait d'autres propriétés précieuses.

On utilise un montage symétrique à deux lampes, attaquées par deux tensions en opposition de phase, par exemple par les deux extrémités d'un transformateur BF dont la prise médiane est reliée à la masse (fig. 9-1).

Supposons que chaque lampe soit polarisée en classe A. D'ailleurs la résistance

de cathode  $R_K$  peut être commune, et non shuntée par  $C$ , parce qu'il est facile de voir que  $R_K$  est parcourue par un courant constant pendant le fonctionnement.

En effet, si à un moment quelconque,  $V_{g_1}$  augmente de  $\Delta V_g$  ( $G_1$  devient plus positive),  $V_{g_2}$  diminuera de  $\Delta V_g$  ( $G_2$  devenant plus négative);  $I_{p_1}$  augmentera de  $\Delta I_p$  et  $I_{p_2}$  diminuera d'autant, donc le courant dans  $R_K$  est constant.

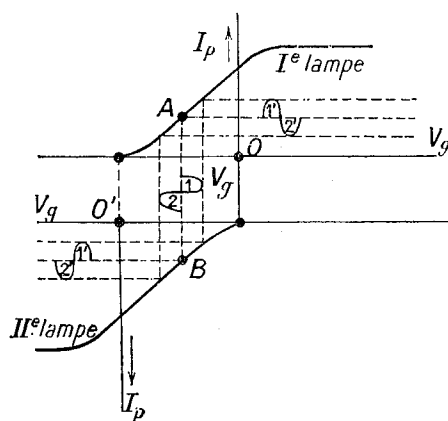


FIG. 9-2.

En somme on peut considérer que l'on a deux lampes montées en parallèle mais attaquées en opposition de phase. Il faut donc un transformateur d'entrée ayant un rapport de transformation double de celui d'un étage normal à transformateur, puisque l'on n'applique sur chaque grille que la moitié de la tension du secondaire. La puissance sera donc très augmentée.

La figure 9-2 montre graphiquement les variations des courants de plaque des deux lampes.

— Montrons maintenant d'une façon précise pourquoi le noyau de fer ne risque pas d'être saturé. La figure 9-3 montre en relief le transformateur à sortie. Par suite de la prise médiane  $O$  et du sens du courant  $I_0$ , on voit que la moitié supérieure de l'enroulement produit un flux  $\Phi_1$  égal, et de sens contraire, au flux  $\Phi_2$  produit par la moitié inférieure : le fer n'est donc pas saturé, il n'est même pas aimanté à l'état statique.

A l'état dynamique, si  $I_1$  augmente,  $\Phi_1$  aussi, mais comme au même instant  $I_2$  diminue de la même quantité,  $\Phi_2$  diminue; l'équilibre magnétique est alors détruit, le fer s'aimante et il y a induction d'une F.E.M. au secondaire.

9-2. Suppression des harmoniques pairs. — Supposons que, par suite de certaines causes de distorsions antérieures, les courants de plaque de chaque lampe ne soient pas sinusoïdaux, on peut donc les développer en série de FOURIER (voir le détail dans le Tome IV de notre *Cours élémentaire de Mathématiques supérieures*, Éditeur Dunod).

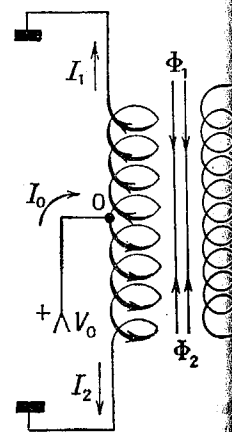


FIG. 9-3.

Comme il y a une composante continue qui se superpose à la composante alternative, on peut écrire, puisque :

$$\begin{aligned} v_{g_1} &= V_{g_1} \sin \omega t & \text{et} & & v_{g_2} &= V_{g_2} \sin (\omega t - \pi) = -V_{g_2} \sin \omega t, \\ I_{p_1} &= \frac{I_0}{2} + I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t + I_3 \sin 3\omega t + \dots \\ I_{p_2} &= \frac{I_0}{2} + I_1 \sin (\omega t - \pi) + I_2 \sin 2(\omega t - \pi) + I_3 \sin 3(\omega t - \pi) + \dots \\ &= \frac{I_0}{2} - I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t - I_3 \sin 3\omega t + \dots \end{aligned}$$

Mais, par suite de l'opposition des flux dans le fer, l'aimantation du fer est produite par la différence des ampères-tours  $N_1 I_{p_1} - N_2 I_{p_2} = N_1 (I_{p_1} - I_{p_2})$ , on aura donc

$$(I_{p_1} - I_{p_2}) = 2I_1 \sin \omega t + 2I_3 \sin 3\omega t + \dots$$

On voit ainsi que seuls subsistent le terme fondamental et tous les harmoniques impairs, *tous les harmoniques pairs ont disparu*. Or, c'est surtout l'harmonique 2 qui est le plus gênant pour la distorsion (il provient d'ailleurs en général de la courbure des caractéristiques, qui sont d'allure parabolique), on voit ainsi que la distorsion sera très diminuée.

Examinons les conséquences de ce fait, au point de vue de la distorsion :

a) *Cas de la triode (et de la tétrode à distance critique et à faisceaux dirigés) en classe A.*

La caractéristique dynamique de ces sortes de tubes est d'allure parabolique (courbure inférieure), ce qui favorise la production de l'harmonique 2 ; or, celui-ci étant éliminé par le push-pull, la distorsion correspondante sera négligeable.

b) *Cas de la pentode en classe A.*

La caractéristique dynamique présente deux courbures, l'une à l'extrémité inférieure, l'autre à l'extrémité supérieure (elle a la forme d'un S allongé), ce qui favorise la production de l'harmonique 3. Pour bien le voir il suffit d'additionner graphiquement une sinusoïde de fréquence  $f$  et une autre, de fréquence  $3f$ . Or, cet harmonique 3 n'est pas éliminé par le push-pull. La distorsion correspondante, contrairement au cas précédent, aura une valeur non négligeable et, seule, la contre-réaction pourra la réduire (Voir chapitre X).

*Remarque au sujet de l'importance des harmoniques pairs et impairs.* — L'harmonique 2 revient à produire un son à l'octave supérieur (autrement dit à transposer).

L'harmonique 3, par contre, se traduit par un écrêtage du signal, ce qui modifie profondément le timbre des sons ; il est donc très gênant. L'emploi de la contre-réaction s'impose alors de façon impérieuse, lorsqu'on utilise à l'étage final d'un amplificateur BF des pentodes de classe A, même avec le montage symétrique du push-pull.

parce qu'il est facile  
pendant le fonctionne-

$V_g$  ( $G_1$  devient plus  
e) ;  $I_{p_1}$  augmente de  
inue d'autant, donc  
 $R_K$  est constant.

On peut considérer que  
lampes montées en  
attaquées en opposi-  
il faut donc un trans-  
rée ayant un rapport  
ion double de celui  
ormal à transforma-  
e l'on n'applique à  
que la moitié de la  
ndaire. La puissance  
augmentée.

2 montre graphique-  
ations des courants  
x lampes.

si le noyau de fer ne  
de transformateur de

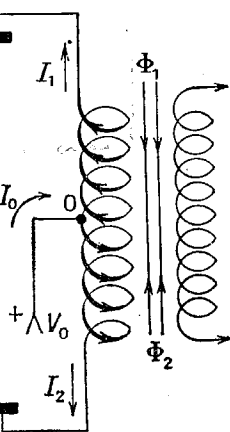


FIG. 9-3.

du primaire, c'est-à-dire la charge totale de plaque à plaque, elle est égale à :

$$R = \frac{Z_0}{\left(\frac{N_2}{2N_1}\right)^2} = \frac{4N_1^2 Z_0}{N_2^2}$$

(en supposant  $n = 100\%$ ), soit quelques milliers d'ohms, puisque  $N_1 \gg N_2$ . On a alors, comme schémas équivalents, ceux de la figure 9-5, où l'on voit

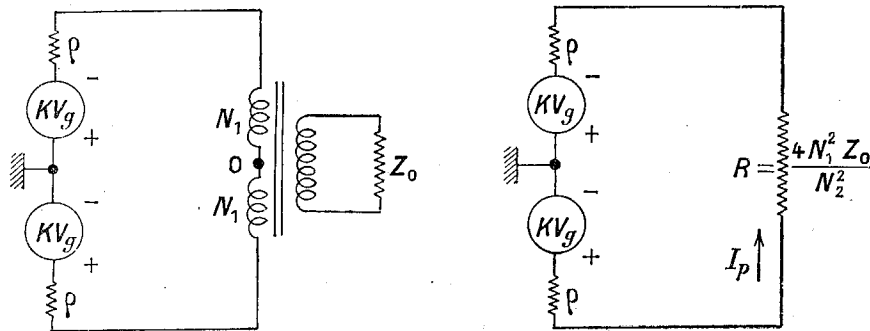


FIG. 9-5.

qu'il est plus simple de considérer, et d'étudier l'ensemble des deux tubes *en série*, fonctionnant comme un « tout », plutôt que de considérer un tube isolément. On en déduit le courant  $I_p$  efficace :

$$I_p = \frac{2KV_g \text{ eff.}}{2\rho + R}$$

La puissance fournie à la charge est donc :

$$P = RI_p^2 = R \frac{4K^2 V_g^2 \text{ eff.}}{(2\rho + R)^2}$$

Cette puissance sera maximum, pour une valeur de  $V_g$  donnée,  $R$  étant la variable, en annulant la dérivée de  $P$  par rapport à  $R$ . Prenons, pour simplifier le calcul, la dérivée de la fonction

$$y = \frac{R}{(2\rho + R)^2} = f(R),$$

on a :

$$y' = \frac{(2\rho + R)^2 - R \cdot 2(2\rho + R)}{(2\rho + R)^4} = 0$$

d'où :

$$2\rho + R - 2R = 0,$$

ce qui donne la valeur de  $R$  :

$$2\rho = R = \frac{4N_1^2 Z_0}{N_2^2}$$

Dans ce cas on a :

$$\begin{aligned} P_{\max.} &= 4K^2 V_g^2 \text{eff.} \cdot \frac{2\rho}{(2\rho + 2\rho)^2} \\ &= \frac{1}{2} \frac{K^2 V_g^2 \text{eff.}}{\rho} = \frac{1}{2} K \frac{K}{\rho} V_g^2 \text{eff.} \\ &= \frac{1}{2} K S V_g^2 \text{eff.} \end{aligned}$$

La formule générale de  $P$  peut aussi s'écrire :

$$= 2 \left( \frac{K V_g \text{eff.}}{\rho + \frac{R}{2}} \right)^2 \frac{R}{2}.$$

Cette formule montre que cette puissance est le double de la puissance fournie par chaque tube, mais débitant sur une charge  $\frac{R}{2}$ , ce qui est normal.

Mais cette équation, pour un push-pull en classe A, peut encore s'écrire :

$$P = \left( \frac{K V_g \text{eff.}}{\frac{\rho}{2} + \frac{R}{4}} \right)^2 \cdot \frac{R}{4}.$$

*Interprétons cette équation.* Elle montre que l'ensemble des deux lampes est équivalent à un générateur de F.E.M.  $K V_g$ , ayant une résistance interne  $\frac{\rho}{2}$  et dont la charge serait  $\frac{R}{4}$ .

EXEMPLE :

$$\begin{aligned} K &= 4, & \rho &= 2800 \Omega, & V_g &= 30 \text{ V max.}, \\ Z_0 &= 125 \Omega & \text{et} & & \frac{2N_1}{N_2} &= 10. \end{aligned}$$

— On aura :

$$R = \left( \frac{2N_1}{N_2} \right)^2 Z_0 = 100 \cdot 125 = 12500 \Omega$$

$$\frac{R}{4} = 3125 \Omega,$$

et

$$P = \left( \frac{4 \cdot 30 \cdot 0,7}{1400 + 3125} \right)^2 \cdot 3125 = 1,1 \text{ watt.}$$

9-6. Calcul de la distorsion. — Prenons par exemple  $I_{p_1} - I_{p_2}$  sous la forme suivante :

$$I_{p_1} - I_{p_2} = 2I_1 \cos \omega t + 2I_3 \cos 3\omega t + \dots \quad (1)$$

Admettons que les harmoniques au-dessus du quatrième soient négligeables, c'est donc le troisième qui va produire la distorsion.

Calculons sa valeur et considérons les valeurs maxima des courants, soit  $I'_1 = 2I_1$  et  $I'_3 = 2I_3$ . Le pourcentage de distorsion due à l'harmonique 3 est donc :

$$d = \frac{I'_3}{I'_1} 100 = \frac{I_3}{I_1} 100.$$

Pour calculer  $I'_1$  et  $I'_3$ , remarquons que, *par exemple*, pour  $\omega t = 0$ , on a

$$I'_{\max.} = 2I_1 + 2I_3 = I'_1 + I'_3$$

et, *par exemple*, pour  $\omega t = \frac{\pi}{3}$ , on a d'après les courbes :

$$I'_x = I_1 - 2I_3 = 0,5 I'_1 - I'_3.$$

De ces deux équations on tire :

$$I'_1 = \frac{I'_{\max.} + I'_x}{1,5} \quad (2)$$

et

$$I'_3 = \frac{I'_{\max.} - 2I'_x}{3}. \quad (3)$$

Ces deux équations exigent simplement que l'on connaisse les valeurs de  $I_{p_1} - I_{p_2}$  pour  $\omega t = 0$  et pour  $\omega t = \frac{\pi}{3}$  dans l'équation (1), et de connaître  $I'_{\max.}$  quand  $V_g$  est maximum, et  $I'_x$  pour  $v_g = 0,5 V_{g \max.}$

EXEMPLE : Soit  $v_g = -60 + 60 \cos \omega t$ , avec

$$i_p = I_{\max.} = 63 \text{ mA} \quad \text{pour} \quad v_g = 0$$

et

$$i_p = I'_x = 29 \text{ mA} \quad \text{pour} \quad v_g = -30 \text{ V.}$$

— En prenant maintenant la valeur de crête de la fondamentale et du 3<sup>e</sup> harmonique du courant plaque *d'un seul tube*, on aura :

$$I_1 = \frac{I'_{\max.} + I'_x}{3} = \frac{63 + 29}{3} = 30,7 \text{ mA},$$

et

$$I_3 = \frac{I'_{\max.} - 2I'_x}{6} = \frac{63 - 58}{6} = 0,83 \text{ mA},$$

la distorsion est donc :

$$d_3 = \frac{I_3}{I_1} 100 = \frac{0,83}{30,7} 100 = 2,7 \text{ \%}.$$

9-7. Construction des courbes caractéristiques composées. — Pour l'étude graphique du montage push-pull (distorsion, puissance, gain, etc.) il est nécessaire de connaître la courbe résultante  $I_{p_1} - I_{p_2} = f(V_g)$ .

Les tensions de grille sont

$$v_{g_1} = V_{g_0} + V_g \quad \text{et} \quad v_{g_2} = V_{g_0} - V_g,$$

leur somme  $v_{g_1} + v_{g_2}$  doit donc toujours être égale à  $2V_{g_0}$ , soit le double de la polarisation statique.

Quant aux deux tensions plaques, l'une augmente de  $\Delta V_p$  et l'autre diminue de  $\Delta V_p$ ; il faut donc que les courbes composées correspondent à ces conditions.

Traçons donc le réseau  $I_p V_p$  du premier tube, puis en dessous de lui, et à l'envers, le réseau de l'autre tube, mais  $I_p$  et  $V_p$  variant en sens inverse; la position relative des deux réseaux doit être telle que les deux points statiques de fonctionnement  $P_1$  et  $P_2$  soient sur une même verticale et qu'il y corresponde sur l'axe horizontal deux valeurs identiques de  $V_p$ . La figure 9-6 montre deux réseaux pour des triodes :

celui de gauche pour  $V_{p_0} = 180$  volts, et  $V_{g_0} = -50$  V,  
celui de droite pour  $V_{p_0} = 180$  volts, et  $V_{g_0} = -40$  V.

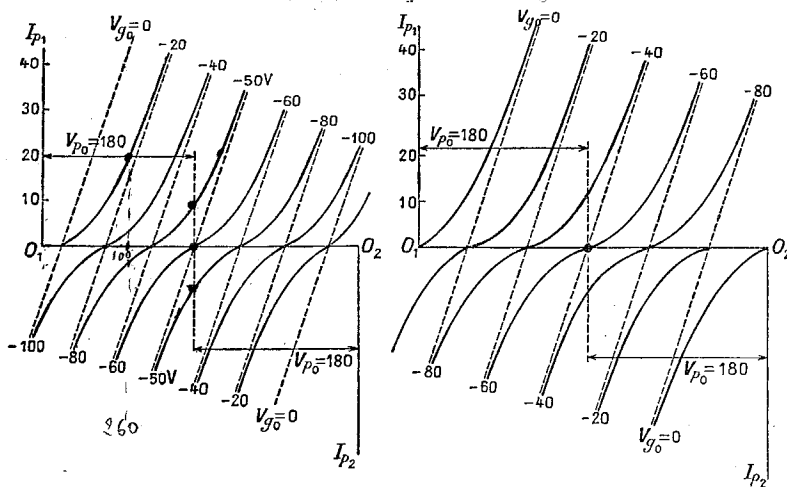


FIG. 9-6.

Comment obtenir un point  $C$  quelconque (fig. 9-7)?  $I_{p_1}$  correspond au point  $A$ ,  $I_{p_2}$  correspond au point  $B$  de même tension grille, et la différence  $I_{p_1} - I_{p_2}$  donnera le point  $C$ . Pour éviter toute confusion, signalons que le point  $B$  devrait être placé sur la courbe correspondant à la même tension grille que celle du point  $A$ , mais, les courbes étant parallèles, l'ordonnée  $DB$  ne change pas, et on a bien  $CD = I_{p_1} - I_{p_2}$ .

Pour des triodes en classe  $A$  on obtient ainsi des lignes droites et parallèles; les lignes en pointillé de ces figures.

Cette construction s'applique en classes A, AB, ou B, quel que soit le type de lampe, triode ou pentode.

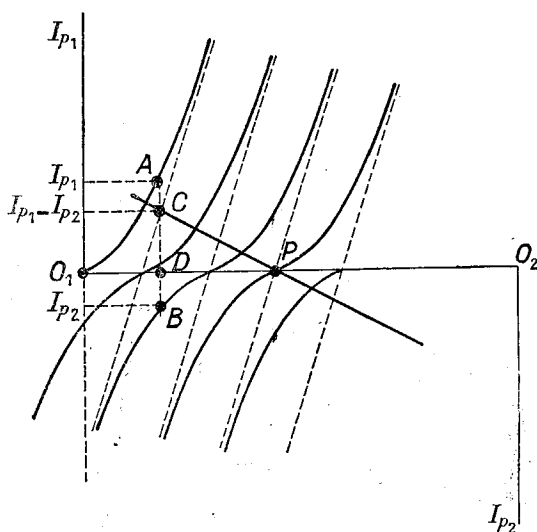


FIG. 9-7.

9-8. **Tracé de la droite de charge.** — Considérons le point P correspondant à la tension plaque  $V_{p_0}$  à l'état statique, et soit un point C correspondant à  $I_{p_1} - I_{p_2}$  et aux variations extrêmes de  $V_g$  pendant le fonctionnement. On a (fig. 9-7) :

$$CD = I_{p_1} - I_{p_2}$$

et

$$DP = (I_{p_1} - I_{p_2}) \cdot R$$

d'où :

$$\frac{CD}{DP} = \frac{1}{R}$$

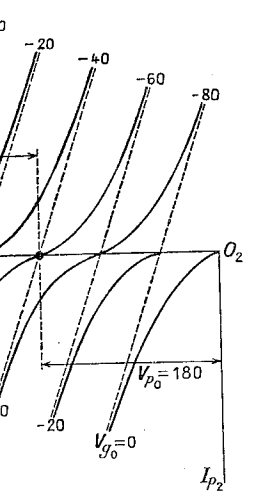
donc la droite CP, dont la pente est négative et égale à  $-\frac{1}{R}$ , représente le lieu de tous les points correspondant à  $I_{p_1} - I_{p_2}$ , pour cette tension plaque avec une charge R bien déterminée (DP étant la variation  $\Delta V_p$  des tensions des deux plaques) : c'est la droite de charge. Elle sert, de même que les droites de charge ordinaires, à étudier graphiquement le fonctionnement, connaissant les limites extrêmes entre lesquelles varie la tension grille  $V_g$ .

L'effet de la courbure des courbes est pratiquement éliminé si la tension  $V_{p_0}$  de polarisation est bien choisie.

La droite de charge doit être tracée comme si elle correspondait à une charge qui soit  $\frac{R}{4}$ . Ainsi, si la charge du haut-parleur, vue du primaire, est par exemple 5 000  $\Omega$ , on devra tracer la droite de charge correspondant à 1 250  $\Omega$ .

$-V_g$ ,  
 $V_{g_0}$ , soit le double de la  
 e  $\Delta V_p$  et l'autre diminue  
 ondent à ces conditions.  
 s en dessous de lui, et à  
 t en sens inverse ; la posi-  
 deux points statiques de  
 le et qu'il y corresponde  
 a figure 9-6 montre deux

$V_{g_0} = -50$  V,  
 $V_{g_0} = -40$  V.



$I_{p_1}$  correspond au point A,  
 et la différence  $I_{p_1} - I_{p_2}$   
 signalons que le point B  
 a même tension grille que  
 , l'ordonnée DB ne change  
 lignes droites et parallèles :