

THEORIE

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

I - AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE

Jusqu'à maintenant nous n'avons étudié que les AMPLIFICATEURS DE TENSION, c'est-à-dire les montages dont le rôle est de fournir une TENSION DE SORTIE (V_s) plus élevée que la TENSION D'ENTREE (V_e).

Un AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE, doit au contraire, en fonction d'une TENSION D'ENTREE (V_e) fournir un COURANT VARIABLE de valeur donnée.

Or, dans un amplificateur de tension la CHARGE est également parcourue par un courant variable, courant qui précisément fait apparaître des variations de tension.

A première vue on ne voit donc pas très bien la différence entre ces deux types d'amplificateurs, d'autant plus que le schéma électrique du montage est le même.

Les différences entre un AMPLIFICATEUR DE TENSION et un AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE résident dans le type du tube utilisé (ou du transistor) et dans la nature de la CHARGE.

En effet, dans un AMPLIFICATEUR DE TENSION on utilise généralement des COMPOSANTS ACTIFS (tubes ou transistors) pouvant fournir un courant relativement faible (1 dizaine de mA environ) et la CHARGE est toujours constituée par UNE RESISTANCE (R_c).

Dans un **AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE**, on utilise au contraire des **COMPOSANTS ACTIFS**, en mesure de fournir un **COURANT** de plusieurs dizaines de mA (ou même beaucoup plus en **ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE**) et **LA CHARGE** est constituée par un composant ou un appareil transformant généralement de façon directe le **COURANT** en une autre grandeur physique.

Par exemple un **AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE** peut actionner un **MOTEUR ELECTRIQUE**, **LE MOTEUR** constitue donc la **CHARGE** et transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

Dans cette leçon, nous prendrons une application connue de tous : un amplificateur de puissance BF, dont le rôle est d'actionner un **HAUT PARLEUR**.

Dans ce cas l'énergie électrique est transformée par le haut - parleur en énergie acoustique.

1 - 1 - CIRCUIT ET FONCTIONNEMENT D'UN AMPLIFICATEUR BF

La figure 1 représente le schéma électrique d'un **AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE BF**.

Sur celui-ci, le **HAUT - PARLEUR** a été représenté par son symbole graphique, au dessus duquel on a indiqué la valeur de 8Ω .

Nous supposerons donc pour le moment que cet élément se comporte comme une résistance de 8Ω .

Le tube utilisé est une **TETRODE** à faisceaux dirigés. Toutefois, dans ce type d'amplificateur on emploie très souvent la **PENTODE** et pratiquement jamais la **TRIODE**.

Le montage est par ailleurs identique à ceux que vous avez déjà

étudiés, sauf en ce qui concerne la CHARGE, qui ici est constituée par l'ensemble T.S/HAUT - PARLEUR.

L'abréviation T.S signifie TRANSFORMATEUR DE SORTIE (le secondaire constituant en effet la sortie de l'amplificateur par rapport à la grille du tube constituant l'entrée).

Notons également que la GRILLE ECRAN est reliée directement au +H.T. En effet, en général on applique à la GRILLE ECRAN des tubes amplificateurs de puissance, une tension légèrement plus élevée que celle de l'ANODE.

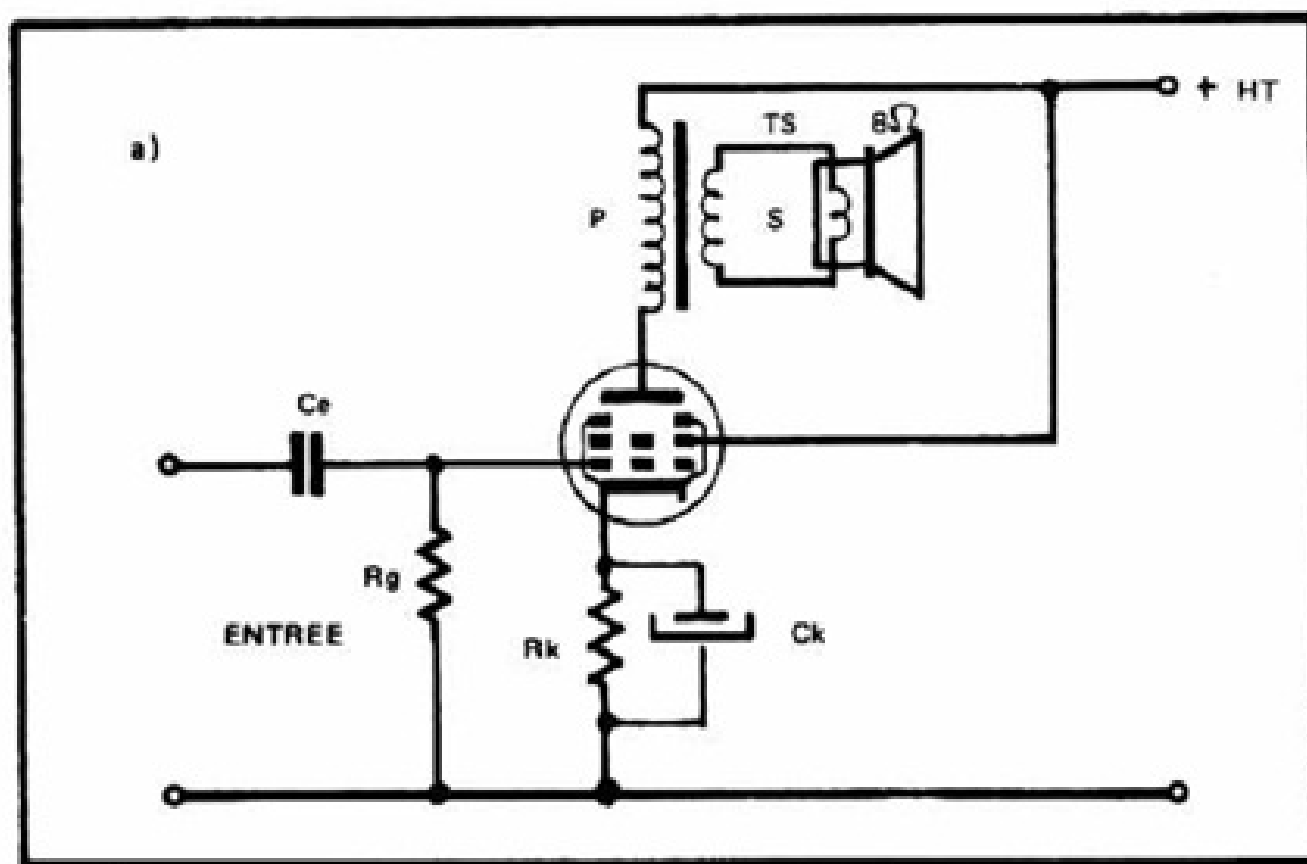


Figure 1

Il faut de plus souligner que la CHARGE (le HAUT - PARLEUR) est reliée au secondaire du transformateur de sortie.

Quel est le rôle de celui-ci ?

Ce transformateur n'est qu'un ADAPTATEUR d'IMPEDANCE.

En effet, pour les tubes de puissance, le constructeur indique toujours l'IMPEDANCE DE SORTIE (voyez à ce sujet le LEXIQUE DE LAMPES que vous avez reçu).

Pour le tube 6AQ5 par exemple que nous avons choisi pour le montage de la figure 1, l'IMPEDANCE DE SORTIE est de $5\text{ k}\Omega$.

Or l'IMPEDANCE d'un HAUT - PARLEUR est comprise entre quelques ohms et une centaine d'ohms environ.

Pour un fonctionnement normal, il convient d'ADAPTER L'IMPEDANCE DE SORTIE DU TUBE A L'IMPEDANCE DU HAUT - PARLEUR.

C'est précisément le TRANSFORMATEUR DE SORTIE qui réalise cette ADAPTATION.

Le PRIMAIRE présente une impédance de $5\text{ k}\Omega$ (pour le tube 6AQ5) et le SECONDAIRE une impédance correspondant à celle du haut - parleur ($8\text{ }\Omega$ dans notre cas).

On peut ainsi déjà noter que la CHARGE (haut - parleur) étant reliée au SECONDAIRE, il ne circule un courant dans celle-ci, que LORSQUE LE COURANT CIRCULANT DANS LE PRIMAIRE VARIE.

Ainsi, quand l'amplificateur de puissance est en condition de repos (aucun signal à l'entrée), il ne circule aucun courant dans la charge reliée au secondaire.

V_a	=	250 V
V_{g2}	=	250 V
V_g	=	- 12,5 V
I_a	=	45 mA
I_{g2}	=	5 mA
Z_a	=	5 k Ω
S	=	4,1 mA/V
W_a	=	4,5 W distorsion 8%
<hr/>		
Z_a	=	Impédance de sortie (impédance d'anode)
W_a	=	Puissance de sortie

Figure 2

Dans ces conditions, le haut - parleur ne produit aucun son.

Quand on applique un signal à l'entrée de l'amplificateur, le courant qui circule dans la primaire, varie. Il se superpose alors à la composante continue, une composante alternative (de même allure que le signal appliqué).

Cette composante est transmise au secondaire par induction, et un courant circule dans la charge. Bien entendu, ce courant a lui aussi la même allure que le signal appliqué.

Une certaine puissance électrique est cédée à la charge, et le haut - parleur transforme cette puissance électrique en puissance acoustique.

Pour bien comprendre l'utilité du transformateur de sortie, il faut étudier les conditions de fonctionnement du tube électronique de l'amplificateur.

Pour le tube 6AQ5, le constructeur fournit les indications reportées figure 2.

En considérant ces données, nous allons examiner le fonctionnement du tube amplificateur de puissance.

1 - 2 - IMPEDANCE DE CHARGE

On appelle RESISTANCE DE CHARGE d'un tube amplificateur, la RESISTANCE que doit présenter le circuit anodique à la COMPOSANTE ALTERNATIVE du courant anodique.

Lorsque la résistance est remplacée par une bobine (le primaire d'un transformateur par exemple) on parle d'IMPEDANCE DE CHARGE.

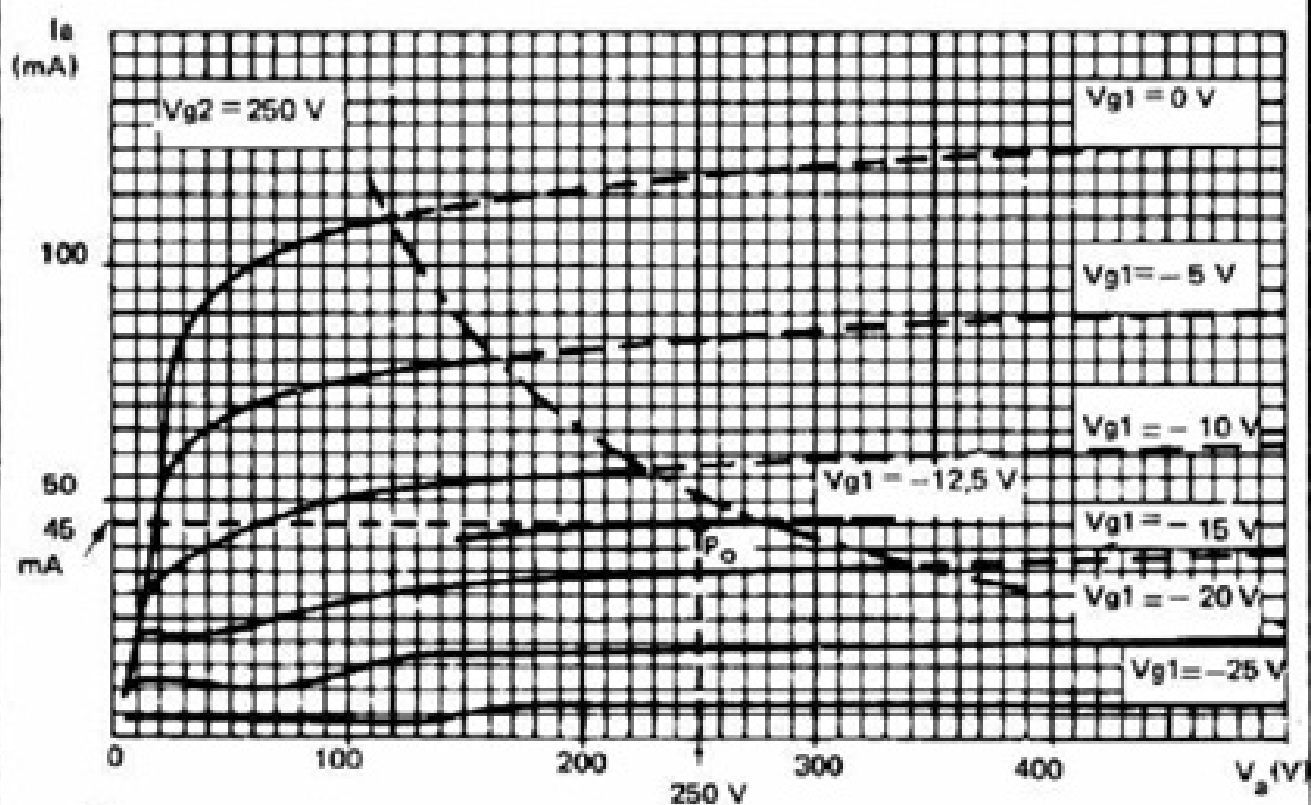
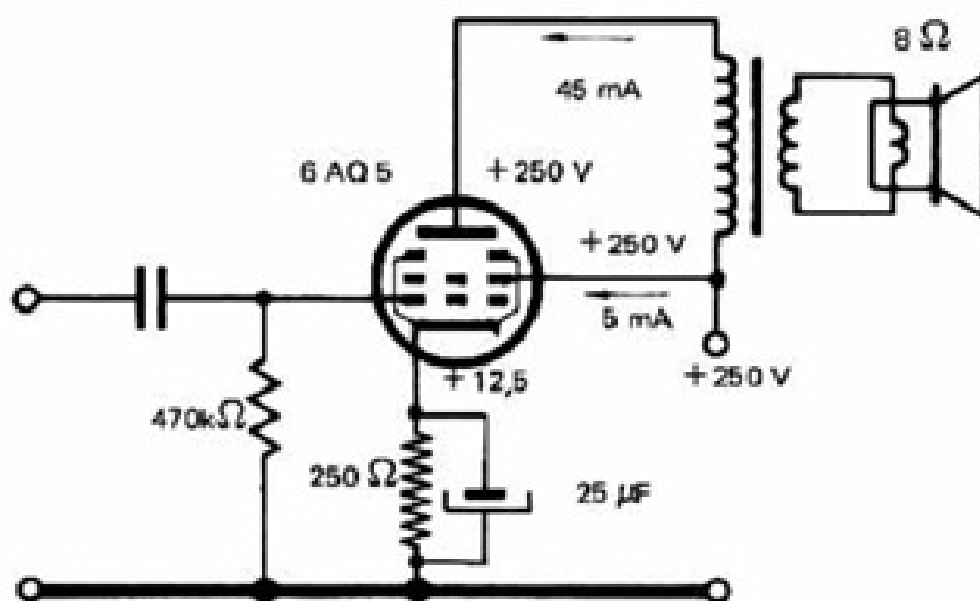
La valeur de cette IMPEDANCE est toujours indiquée par le constructeur (soit 5 k Ω pour le tube 6AQ5 équipant le montage représenté figure 3).

Etant donné que la composante continue du courant anodique ne rencontre que la résistance de l'enroulement primaire, et que celle-ci est négligeable, on peut considérer que la tension fournie à la sortie de l'alimentation HT est appliquée en totalité à l'anode du tube (ainsi qu'à la grille écran).

Sur le schéma de l'amplificateur de la figure 3-a, on peut voir que la valeur de la HT = 250 volts est appliquée intégralement à l'anode et à la grille écran du tube 6AQ5. Sur ce schéma, on a également indiqué les valeurs des autres grandeurs, relatives aux conditions de repos.

Ainsi, connaissant toutes ces valeurs, on peut noter sur les caractéristiques anodiques, le point de fonctionnement P_0 , qui correspond aux conditions de repos.

a)



b)

AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE DANS LES CONDITIONS DE REPOS

Figure 3

Ces conditions sont indiquées sur la figure 3-b. Pour une tension anodique de 250 Volts, et une tension négative de grille de 12,5 Volts, le courant anodique de repos est bien de 45 mA (voir figure 2).

Pour déterminer le comportement du tube en présence d'un signal à l'entrée, il suffit de tracer la droite de charge, comme on l'a déjà vu pour les amplificateurs de tension.

Nous savons que la tétrode doit fonctionner avec une impédance de charge de $5\text{ k}\Omega$. Nous supposons pour le moment que cette impédance de charge est une vraie résistance reliée entre l'anode et l'alimentation (figure 4-a).

Nous pouvons alors tracer la droite de charge. La "résistance" de $5\text{ k}\Omega$ représente un obstacle pour la composante continue du courant anodique. Elle introduit donc une chute de tension de $45 \times 5 = 225$ volts.

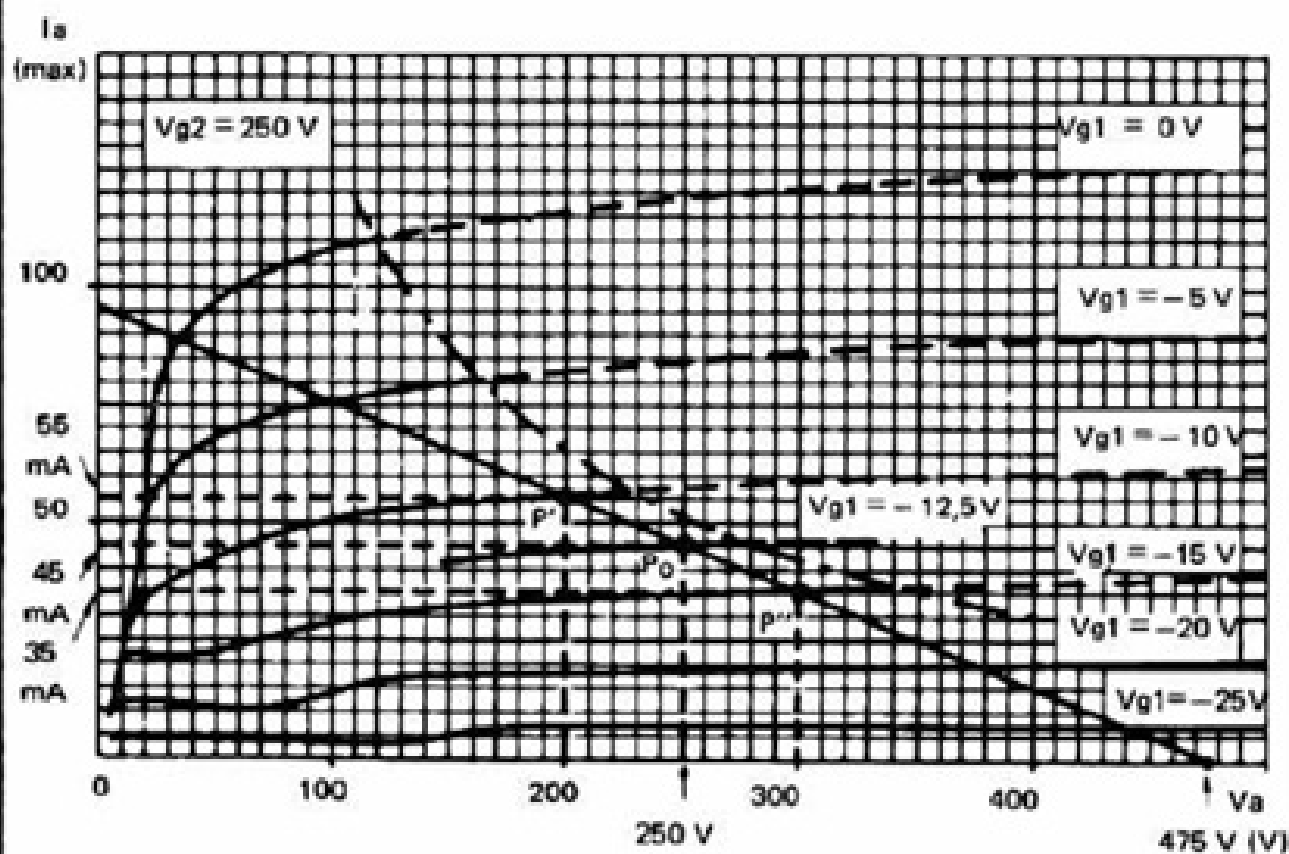
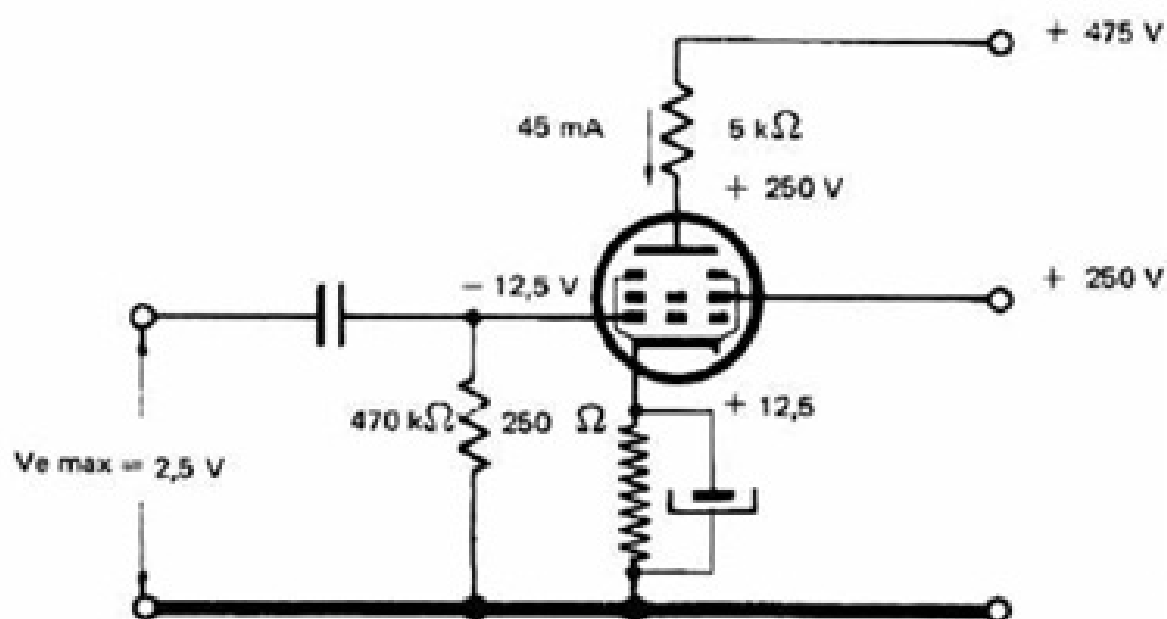
Pour que la tension appliquée à l'anode soit de 250 volts, il faut une tension d'alimentation de $250 + 225 = 475$ volts.

La droite de charge, devant rencontrer l'axe horizontal au point où est marquée la valeur de la tension d'alimentation, il suffit d'unir ce point au point P o (figure 4-b).

Si on applique à l'entrée de la tétrode, une tension alternative d'une valeur maximum de 2,5 volts, la tension de la grille de commande variera entre -10 volts et -15 volts.

En face des points P' et P'', où la droite de charge rencontre ces valeurs, on peut lire sur la figure 4-b, les valeurs prises par le courant et la tension anodique.

Ce courant anodique variant de 10 mA en plus et en moins, par rapport à sa valeur de repos de 45 mA, il s'ensuit que la composante alternative a une valeur maximum de 10 mA.



TRACE DE LA DROITE DE CHARGE

Figure 4

D'autre part, la tension anodique variant de 50 volts en plus et en moins, par rapport à sa valeur de repos de 250 volts, il en résulte que la composante alternative a une valeur maximum de 50 volts.

En divisant la valeur maximum de la composante alternative de la tension (50 volts) par la valeur maximum de la composante alternative du courant (10 mA), on obtient la valeur de la "résistance" anodique ($50 : 10 = 5 \text{ k}\Omega$).

On en déduit que cette "résistance" fait sentir sa présence non seulement pour la composante continue du courant anodique en introduisant une chute de tension de 225 volts, mais aussi pour la composante alternative, en provoquant une variation de tension de 50 volts.

Revoyons maintenant le circuit amplificateur de la figure 3-a. Puisque, à la place de la résistance anodique, nous avons le transformateur de sortie avec son haut-parleur, la composante continue ne rencontre aucune résistance.

La chute de tension est donc nulle. Mais la résistance présentée à la composante alternative doit toujours exister, et c'est précisément la charge du tube qui constitue cette résistance.

Pour que celle-ci ait une valeur de $5 \text{ k}\Omega$, comme l'a indiqué le constructeur, il faut que, pour la même valeur maximum de 10 mA de la composante alternative du courant anodique, on ait encore la valeur maximum de 50 volts.

Or, en remplaçant la résistance anodique de la figure 4-a par le transformateur de sortie, les composantes alternatives du courant et de la tension anodique conservent bien ces mêmes valeurs maximum.

Rappelons-nous à ce sujet que le courant anodique parcourt maintenant le primaire du transformateur de sortie.

Comme nous le savons, le courant alternatif qui parcourt le pri-

maire d'un transformateur, dépend du courant absorbé par la charge. Ce courant est égal au produit du courant primaire par le rapport de transformation, c'est-à-dire par le rapport entre le nombre de spires primaires et de spires secondaires.

Il faudra donc choisir un rapport de transformation de façon telle que, selon le courant secondaire absorbé par la charge, le courant primaire ait la valeur voulue (10 mA dans le cas présent).

On comprend ainsi qu'il est nécessaire de connaître le courant secondaire absorbé par la "résistance" de $8\ \Omega$ qui représente la charge, et remplace ici le haut-parleur.

Quand les composantes alternatives du courant anodique et de la tension anodique atteignent leurs valeurs maxima, la valeur correspondante de la puissance primaire est de $50 \times 0,01 = 0,5$ watt. Pour obtenir la puissance en watts, on a exprimé le courant en ampères ($10\text{ mA} = 0,01\text{ A}$) et la tension en volts (50 volts).

En négligeant les pertes, on peut considérer que cette puissance est transmise intégralement au secondaire, dont nous connaissons la résistance de charge ($8\ \Omega$).

La valeur de la puissance peut être trouvée, non seulement en effectuant le produit de la tension par le courant ($P = UI$), mais aussi en effectuant le produit de la résistance par le carré du courant ($P = RI^2$).

Ainsi, en divisant la valeur de la puissance (0,5 W) cédée au secondaire par la valeur de la résistance ($8\ \Omega$) de la charge, on obtient le carré de la valeur maximum du courant secondaire ($0,5 : 8 = 0,0625$).

Pour obtenir la valeur maximum de ce courant, il suffit d'extraire la racine carrée du nombre 0,0625, soit 0,25.

En conclusion, la valeur maximum du courant secondaire est de 0,25 A (voir figure 5).

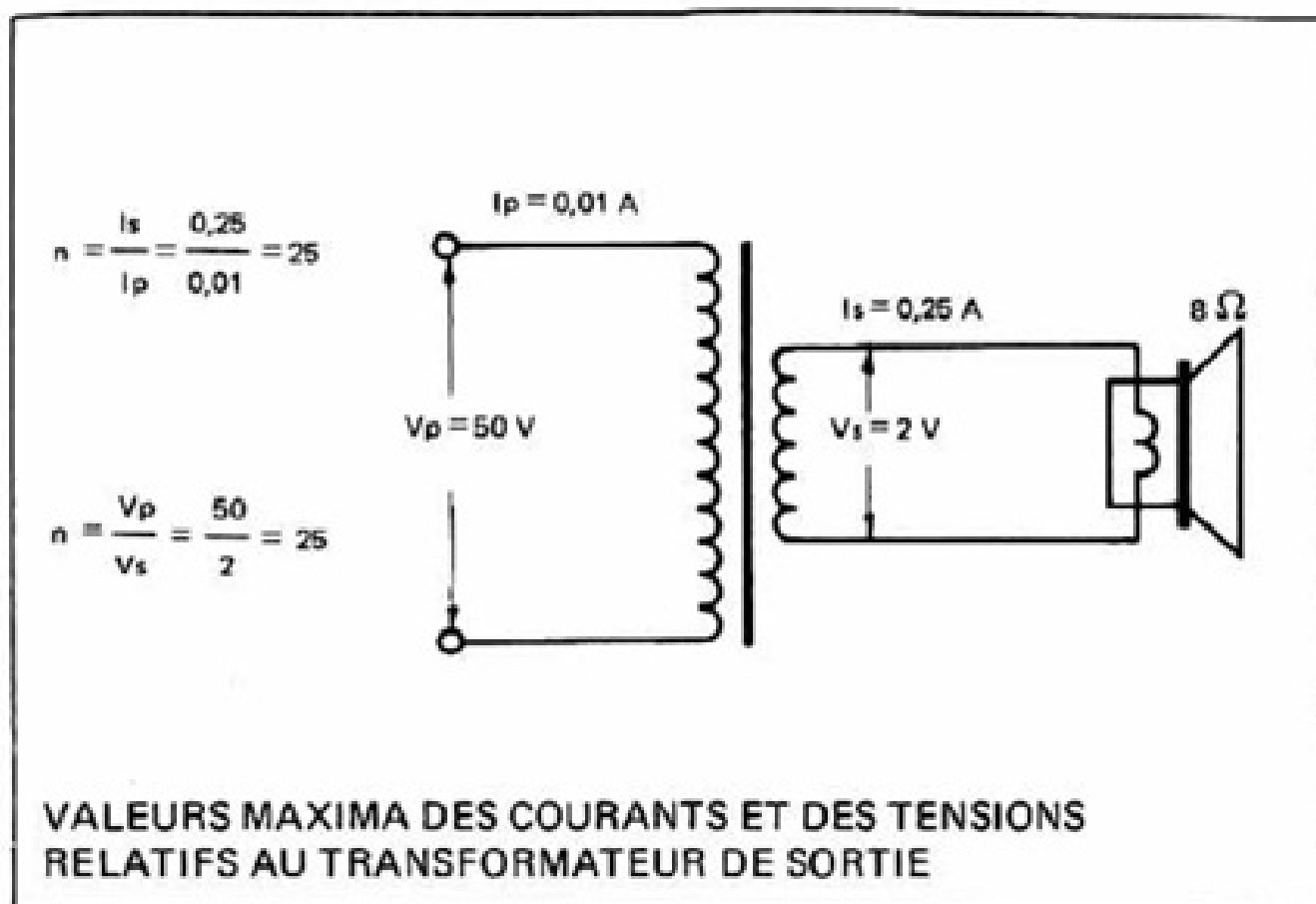


Figure 5

En divisant enfin la valeur de 0,01 A par la valeur de 0,25 A du courant secondaire on trouve le rapport du transformateur de sortie, soit :

$$0,01 : 0,25 = 0,04$$

Nous pouvons maintenant vérifier si, avec ce rapport, on trouve bien une tension primaire de 50 volts.

Calculons d'abord la tension secondaire en divisant la puissance de 0,5 watt par le courant secondaire de 0,25 A. On obtient :

$$0,5 : 0,25 = 2 \text{ volts}$$

En divisant cette valeur de la tension par le rapport de transformation, on trouve $2 : 0,04 = 50$ volts, valeur qui est précisément égale à la valeur de la tension alternative du primaire.

CONCLUSION : LE RAPPORT DE TRANSFORMATION DU TRANSFORMATEUR DE SORTIE SE CALCULE, EN DIVISANT LA RESISTANCE DE CHARGE DU SECONDAIRE PAR LA RESISTANCE DE CHARGE DU TUBE, ET EN PROCEDANT ENSUITE A L'EXTRACTION DE LA RACINE CARREE DU QUOTIENT OBTENU.

D'après cette conclusion, on comprend qu'il convient de considérer le transformateur de sortie, non comme un élément qui augmente ou diminue la valeur des tensions et des courants, mais **COMME UN ELEMENT QUI SERT A CHANGER LA VALEUR DES RESISTANCES SELON LE CARRE DU RAPPORT DE TRANSFORMATION.**

En effet, dans l'exemple étudié, on peut dire que la résistance de la charge de 8Ω du secondaire, est divisée par $0,04^2 = 0,0016$, ce qui permet d'obtenir la valeur de l'impédance de charge du tube ($8 : 0,0016 = 5 \text{ k}\Omega$).

Autrement dit, l'ensemble constitué par le transformateur de sortie et le haut-parleur équivaut à une résistance d'une valeur de $5 \text{ k}\Omega$ (pour les composantes alternatives du courant et de la tension anodique).

Rappelons enfin que la résistance ohmique du primaire d'un transformateur de sortie est de l'ordre d'une centaine d'ohms. La chute de tension est donc très faible, et la tension anodique ne varie pratiquement pas.

On peut donc appliquer une HT de 250 volts seulement à l'anode.

PAR CONTRE, CE MEME ENROULEMENT PRESENTE BIEN UNE IMPEDANCE ELEVEE POUR LE SIGNAL ALTERNATIF.

Dans l'exemple étudié, cette impédance a une valeur de $5 \text{ k}\Omega$ et

c'est elle qui provoque une variation de tension de 50 volts, quand la composante alternative, appliquée à l'entrée, provoque une variation de débit de 10 mA en plus et en moins par rapport au courant de repos.

1 - 3 - PUISSANCE DE SORTIE ET RENDEMENT

En étudiant les amplificateurs de tension, on a vu qu'il faut calculer le gain en tension, le rôle de ces montages étant justement d'augmenter l'amplitude du signal appliqué à l'entrée.

Le rôle des amplificateurs de puissance, est au contraire, de fournir la plus grande puissance possible au haut-parleur. Nous devons donc étudier cet amplificateur du point de vue de la puissance électrique.

Il faut toutefois bien préciser que, par puissance de sortie d'un amplificateur de puissance, on entend la puissance qui est transportée au haut-parleur par l'intermédiaire du transformateur de sortie. On désigne cette puissance par l'abréviation P_s .

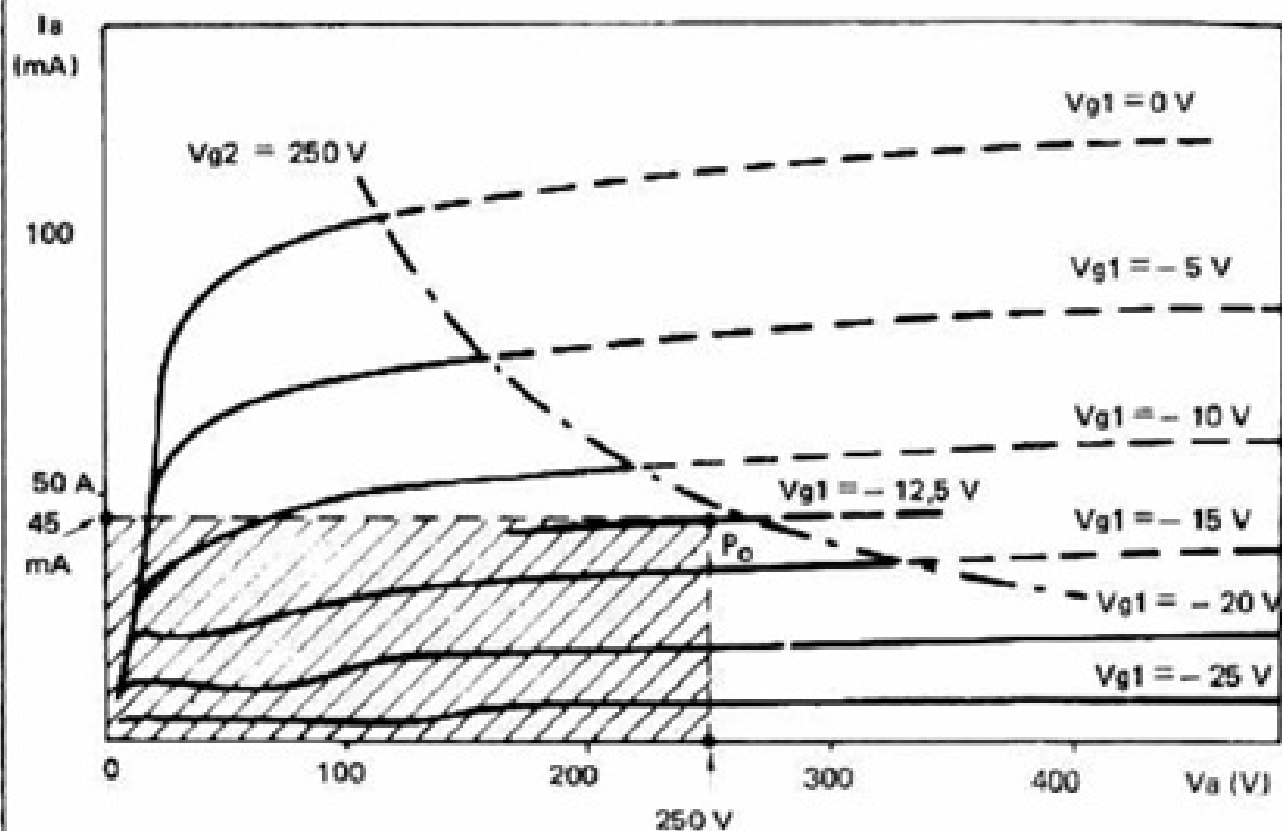
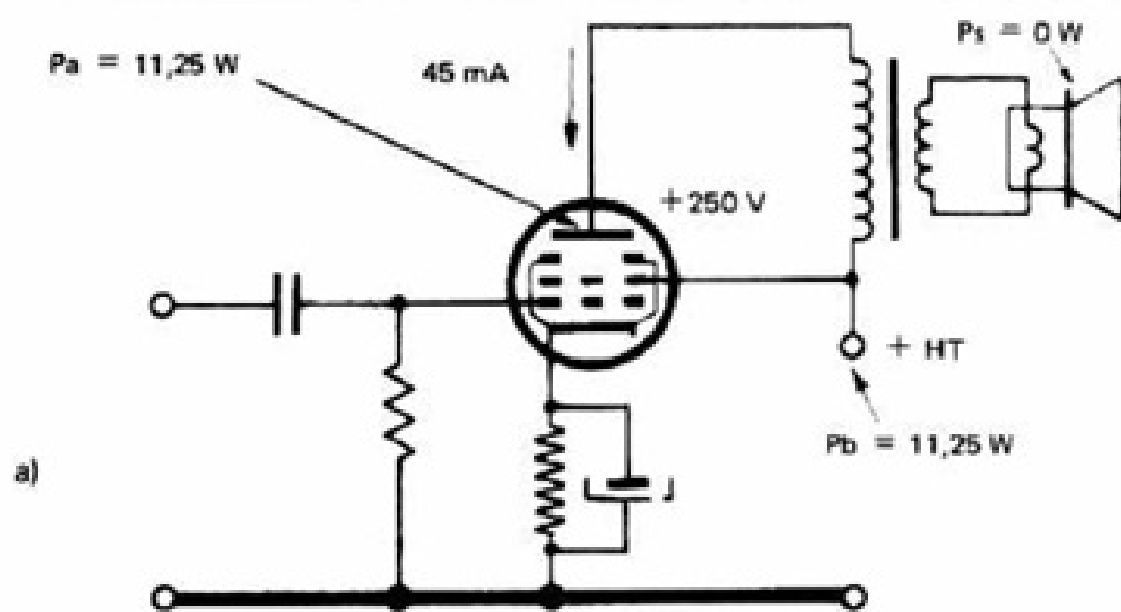
Commençons l'étude de l'amplificateur lorsque celui-ci en condition de repos, c'est-à-dire quand aucun signal n'est appliqué à l'entrée.

Reportons-nous à la figure 3 où sont indiquées les conditions de repos (point P_s) comme on le voit de nouveau figure 6.

Etant donné que la tension anodique a une valeur de 250 volts et le courant anodique une valeur de 45 mA, ou 0,045 A, la puissance fournie par l'alimentation est de $250 \times 0,045 = 11,25$ watts.

Cette puissance pourrait être fournie par une batterie par exemple, et nous la désignons par l'abréviation P_b .

Précédemment, nous avons vu que, dans les conditions de repos



PUISSANCES ELECTRIQUES RELATIVES A L'AMPLIFICATEUR
DANS LES CONDITIONS DE REPOS

Figure 6

aucune puissance n'était transférée au haut-parleur. Dans ce cas, la puissance P_s est égale à zéro, et toute la puissance fournie par l'alimentation est dissipée en chaleur sur l'anode du tube. Cette puissance est désignée par l'abréviation P_a .

Sur le schéma de la figure 6-a, ces trois puissances sont indiquées, ainsi que le point du circuit, où elles sont fournies ou dissipées.

Voyons maintenant les caractéristiques anodiques de la figure 6-b.

Nous observons que sur celles-ci, la tension anodique de 250 volts est représentée par le segment AP_o . La distance du point A au point P_o est en effet égale à la distance qui existe entre l'origine de l'axe horizontal et le point, qui sur cet axe correspond à 250 volts.

De la même façon, le courant anodique de 45 mA est représenté par le segment BP_o . Là aussi, la distance du point B au point P_o est égale à la distance qui existe entre l'origine de l'axe vertical et le point de ce même axe qui correspond à 45 mA.

La puissance étant donnée par le produit de la tension anodique par le courant anodique, elle sera représentée sur les caractéristiques, par la surface du rectangle, qui a pour côtés les segments AP_o et BP_o .

Cette surface a été hachurée sur la figure 6-b pour la mettre clairement en évidence. Nous verrons l'utilité de cette façon de procéder.

D'autre part, bien que toute la puissance fournie par l'alimentation du circuit anodique soit dissipée sur l'anode, celle-ci ne court aucun risque de destruction.

En effet, le point de fonctionnement P_o se trouve sous la courbe en traits et points qui délimite la zone de dissipation anodique maximum.

Ceci est confirmé par le fait que, pour le tube 6AQ5, la dissipation anodique maximum est de 12 watts.

Nous allons maintenant étudier le fonctionnement du tube, lorsqu'on applique à l'entrée un signal d'une valeur maximum de 2,5 volts.

En raison de ce signal, le courant anodique varie de 10 mA en plus et en moins par rapport à la valeur de repos de 45 mA. L'alimentation doit donc fournir ce courant variable, la tension continue restant de 250 volts entre le positif (+HT) et la masse.

Dans ce cas également, la puissance moyenne fournie par l'alimentation est donnée par le produit des valeurs de la tension et du courant en condition de repos. En effet, la plus petite puissance fournie par l'alimentation quand le courant est inférieur à 45 mA, est compensée par la plus grande puissance fournie quand ce courant est supérieur à 45 mA.

La puissance P_B est donc encore de 11,25 watts, comme l'indique le schéma de la figure 7-a. Le rectangle hachuré de la figure 6-b est évidemment représenté de la même façon sur la figure 7-b.

Etant donné que le courant anodique varie, une certaine puissance est transférée au haut - parleur par l'intermédiaire du transformateur de sortie.

La puissance de sortie P_s n'est donc plus égale à zéro.

Nous avons vu précédemment que la puissance maximum transférée au haut - parleur dans ces conditions est de 0,5 watt.

Mais maintenant, cette valeur n'a aucun intérêt. Elle n'est atteinte qu'en deux instants durant chaque période, et la valeur de la puissance de sortie est donnée par le produit DES VALEURS EFFICACES DES COMPOSANTES ALTERNATIVES (Tension et courant).

La puissance ainsi obtenue est égale à celle qui serait dissipée par une résistance, dans laquelle circulerait un courant continu, de valeur égale à la valeur efficace du courant alternatif lorsque, aux bornes de cette

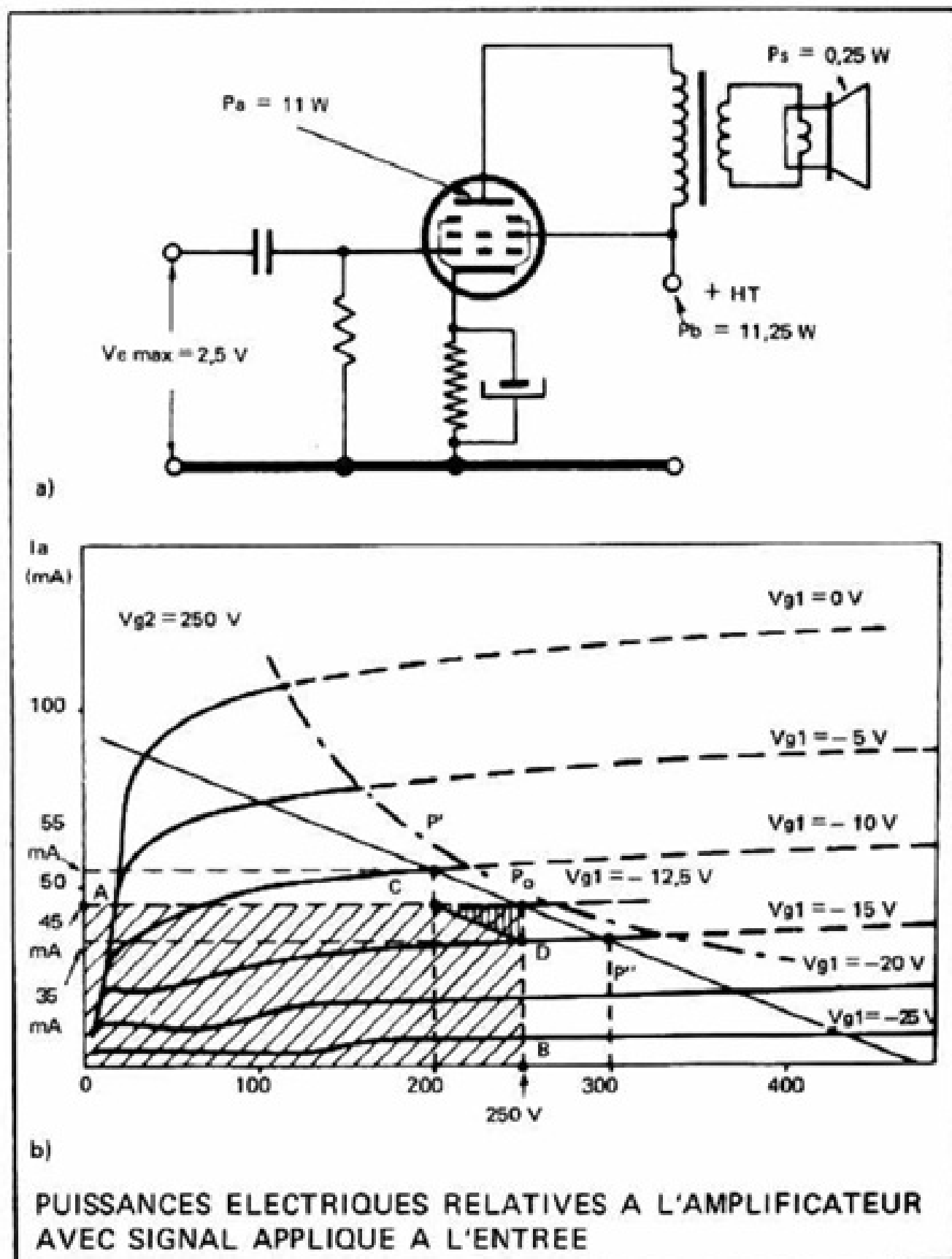


Figure 7

résistance, on appliquerait une tension continue, de valeur égale à la valeur efficace de la tension alternative.

On peut donc considérer la puissance de sortie, comme une puissance due à une tension et à un courant continu. Il sera donc possible de la comparer à la puissance fournie par l'alimentation qui, elle aussi, est donnée par le produit des composantes continues de la tension et du courant anodiques.

Les valeurs efficaces dont nous avons besoin pour le calcul de la puissance de sortie, s'obtiennent en divisant les valeurs maxima des composantes alternatives, par 1,41.

Ces valeurs maxima sont de 50 V et 10 mA = 0,01 A, comme nous l'avons vu précédemment.

La valeur de la puissance de sortie sera alors donnée par la formule :

$$P_s = \frac{50}{1,41} \times \frac{0,01}{1,41}$$

que l'on peut aussi écrire :

$$P_s = \frac{50 \times 0,01}{1,41 \times 1,41}$$

Or $1,41 \times 1,41 = 2$; 1,41 étant la racine carrée de 2, on peut donc écrire :

$$P_s = \frac{50 \times 0,01}{2} = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ Watt.}$$

On voit que la puissance de sortie est égale à la moitié de la valeur maximum (0,5 W)

CONCLUSION : LA PUISSANCE DE SORTIE SE CALCULE EN FAISANT LE PRODUIT DES VALEURS MAXIMA DES COMPOSANTES ALTERNATIVES DE LA TENSION ET DU COURANT ANODIQUES ET EN DIVISANT PAR 2 LE RESULTAT OBTENU.

Etudions maintenant le schéma de la figure 7-a. Nous observons que l'alimentation anodique fournit une puissance de 11,25 watts, et que le haut - parleur ne fournit qu'une puissance de 0,25 watt. Cela veut dire que la puissance restante est dissipée sur l'anode du tube.

Aussi, sur la figure 7-a, on a indiqué une puissance dissipée de 11 watts (11,25 – 0,25).

Du point de vue des puissances en jeu, on peut considérer l'amplificateur comme un dispositif qui convertit en puissance alternative, une partie de la puissance continue fournie par l'alimentation.

Il est intéressant de connaître la puissance transférée au haut-parleur, pour une puissance donnée, fournie par l'alimentation. Pour cela, on étudie le **RENDEMENT** de l'amplificateur. Celui-ci s'exprime en pourcentage de la puissance fournie par l'alimentation.

On calcule le **RENDEMENT D'UN AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE EN DIVISANT LA PUISSANCE DE SORTIE, PAR LA PUISSANCE FOURNIE PAR L'ALIMENTATION ET EN MULTIPLIANT PAR CENT LE NOMBRE OBTENU.**

Dans l'exemple traité figure 7-a, nous aurons :

$$\text{Rendement : } \frac{0,25 \times 100}{11,25} = 2,2 \%$$

Cela signifie que si l'alimentation fournit une puissance de 100 watts, la puissance transférée au haut-parleur sera de 2,2 watts seulement.

Pour déterminer le rendement d'un amplificateur de puissance, on peut avoir recours aux caractéristiques anodiques. Sur celles-ci, il est possible de représenter la puissance de sortie, en plus de la puissance fournie par l'alimentation HT (ou alimentation anodique).

Examinons la figure 7-b. Sur cette figure, la puissance fournie par l'alimentation est encore représentée par la surface du rectangle hachuré, et la puissance de sortie est représentée par la surface du triangle CDP_0 (hachuré verticalement).

La surface de ce triangle est égale au produit du côté CP_0 par le côté DP_0 divisé par 2. Or, le côté CP_0 représente la valeur maximum de la composante alternative de la tension, car sa longueur est égale à celle de l'espace sur l'axe horizontal, qui indique la variation maximum de la tension anodique (de 250 à 200 volts).

D'autre part, le côté DP_0 représente la valeur maximum de la composante alternative du courant, car sa longueur est égale à celle de l'espace sur l'axe vertical qui indique la variation maximum du courant anodique (45 à 35 mA).

La surface du triangle représente donc le produit des valeurs maxima des composantes alternatives de la tension et du courant divisé par 2.

Cette surface est précisément égale à la puissance de sortie.

En comparant les surfaces du rectangle et du triangle de la figure 7-b on peut ainsi établir immédiatement une comparaison entre la puissance de sortie et la puissance fournie par l'alimentation.

On voit clairement, que seule, une petite partie de cette dernière

est transférée au haut-parleur. La plus grande partie de cette puissance est dissipée sur l'anode du tube (puissance perdue).

Il convient évidemment de diminuer le plus possible la puissance perdue, c'est-à-dire d'augmenter le rendement.

Pour bien comprendre ce problème, étudions ce qui se produit si, à l'entrée de l'amplificateur, on applique une tension alternative d'une valeur maximum de 7,5 volts au lieu de 2,5 volts comme dans le cas de la figure 7.

La tension de grille va alors varier entre -5 et -20 volts, et par conséquent, les points P' et P'' se trouveront à l'intersection de la droite de charge avec les caractéristiques anodiques, relatives à ces valeurs de tension grille (voir figure 8-a).

On voit immédiatement que le triangle CDP_0 a une surface plus grande, ce qui signifie que la puissance de sortie est plus élevée. Etant donné que la puissance fournie par l'alimentation ne varie pas, elle est toujours représentée par le même rectangle.

CONCLUSION : EN AUGMENTANT L'AMPLITUDE DU SIGNAL APPLIQUE A L'ENTREE, LE RENDEMENT AUGMENTE.

Ce fait est confirmé par la figure 8-b, relative à un amplificateur où est appliquée une tension d'entrée de 12,5 volts. Dans ces conditions, la tension de grille varie entre 0 et -25 volts.

A cette augmentation du signal d'entrée, correspond une augmentation de la puissance de sortie, représentée par un triangle de surface plus importante que dans le cas précédent.

On peut noter que le point C se rapproche du point A, et que le point D se rapproche du point B.

Si ce point C se trouvait sur le point A, et le point D sur le

point B, le rendement serait de 50% .

En effet, dans ce cas, le triangle aurait une surface égale à la moitié de la surface du rectangle, et la puissance de sortie serait égale elle aussi, à la moitié de la puissance fournie par l'alimentation.

Les caractéristiques anodiques ont une forme telle que les points C et D ne peuvent jamais se trouver sur les points A et B.

On en déduit donc que l'amplification a toujours un rendement inférieur à 50%.

Ainsi, dans tous les cas, plus de la moitié de la puissance fournie par l'alimentation anodique est dissipée en chaleur sur l'anode du tube.

On sait maintenant qu'en augmentant l'amplitude du signal d'entrée, le rendement augmente. Toutefois, il ne faut pas que l'amplitude de ce signal soit telle que la grille deviennent positive par rapport à la cathode.

Dans le cas de la figure 8-b, la tension d'entrée d'une valeur maximum de 12,5 volts est déjà suffisante pour réduire à zéro la tension grille. On ne doit donc pas dépasser cette valeur du signal d'entrée.

Etant donné que la puissance de sortie dépend de l'amplitude du signal d'entrée, les constructeurs de tubes indiquent la puissance de sortie obtenue, avec la valeur maximum de la tension d'entrée qu'il est possible d'appliquer sans rendre la grille positive.

**CETTE VALEUR DE LA TENSION D'ENTREE EST EVIDEM-
MENT EGALE A LA TENSION DE POLARISATION DU TUBE.**

Pour la tétrode 6AQ5, le constructeur indique une puissance de sortie de 4,5 watts et une tension de polarisation de 12,5 volts. Il convient donc de comprendre que la puissance de 4,5 watts est obtenue lorsque le signal d'entrée a une valeur maximum de 12,5 volts.

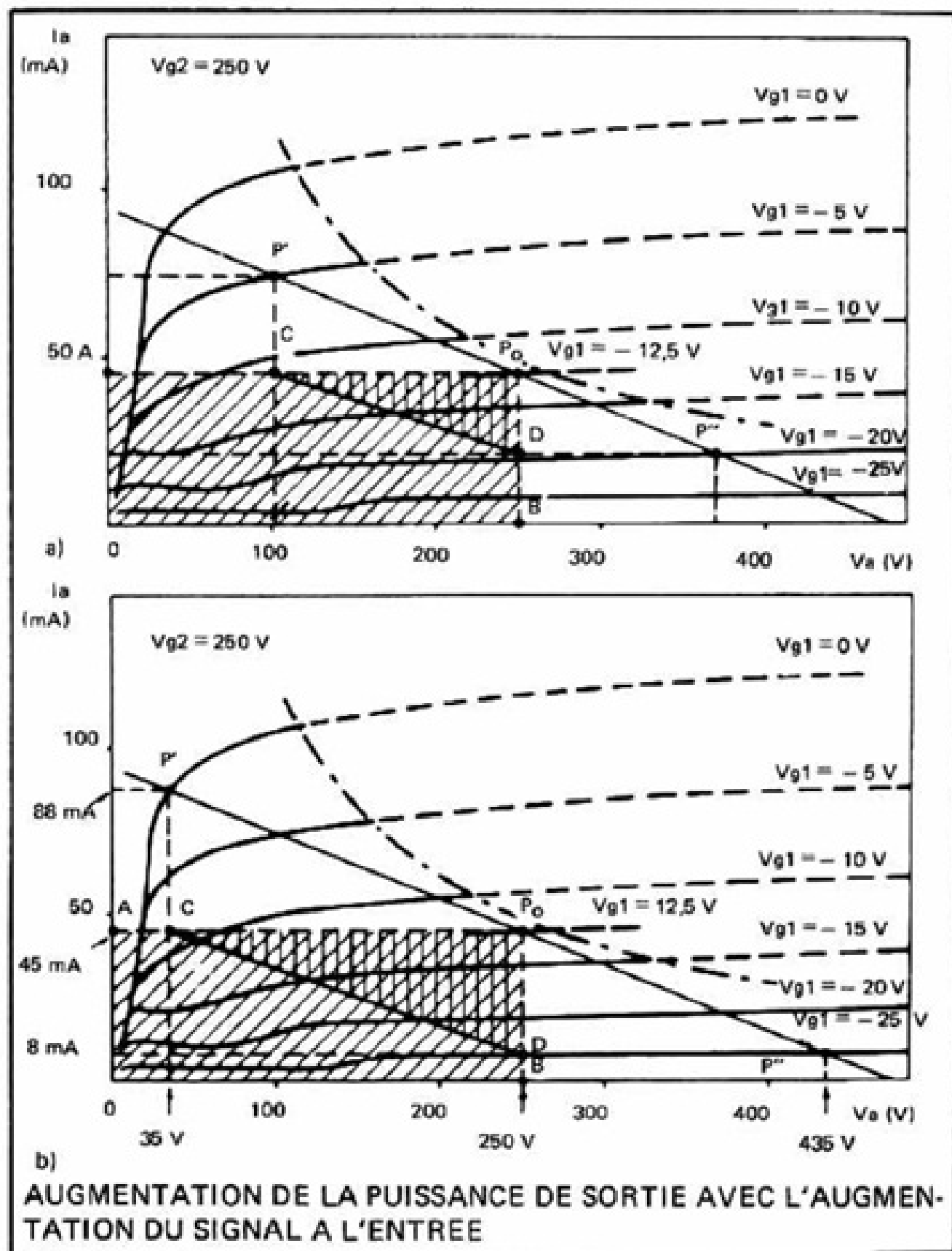


Figure 8

Observons enfin que, si l'on voulait calculer la puissance de sortie dans les conditions de la figure 8-b, en procédant de la même façon que pour le cas de la figure 4, on rencontrerait des difficultés.

En effet, pour la figure 4, on a vu que le courant anodique varie de 10 mA en plus ou en moins par rapport à sa valeur de repos de 45 mA. La tension anodique correspondante varie de 50 volts en plus ou en moins par rapport à sa valeur de repos de 250 volts.

En appliquant le même procédé au cas de la figure 8-b, on trouve que lorsque le courant augmente, sa valeur passe de 45 à 88 mA (point P').

Il varie donc de $88 - 45 = 43$ mA. Par contre, lorsque ce même courant diminue, sa valeur passe de 45 à 8 mA (point P''). Il varie alors de $45 - 8 = 37$ mA.

De la même façon, quand la tension anodique augmente, sa valeur passe de 250 volts à 435 volts (point P'') variant ainsi de $435 - 250 = 185$ volts.

Lorsque cette même tension diminue, sa valeur passe de 250 à 35 volts (point P') variant de $250 - 35 = 215$ volts.

Ces variations ne sont plus égales par rapport à leurs valeurs de repos, et les valeurs maximum sont différentes selon que les grandeurs augmentent ou diminuent. On ne sait donc pas quelle valeur prendre pour calculer la puissance de sortie.

On considère donc dans ce cas la valeur égale à la moitié de la variation entière de chaque grandeur. On calcule ensuite la puissance de sortie selon le procédé déjà étudié (produit de la tension par le courant, divisé par 2).

EXEMPLE POUR LA FIGURE 8-b : La variation totale de la tension anodique est de $435 - 35 = 400$ volts. La moitié de cette valeur

est donc de 200 volts. Pour le courant anodique, la variation totale en ampères est de :

$$0,088 - 0,008 = 0,080 \text{ Ampère}$$

La moitié de cette valeur est de 0,040 A. On effectue le produit $200 \times 0,040 = 8$ et l'on divise par deux, soit $8 : 2 = 4$ watts.

Cette valeur est différente de la valeur indiquée par le constructeur (4,5 watts) pour une raison que nous verrons dans le prochain chapitre.

Cette méthode est évidemment valable quand la tension et le courant anodiques varient de quantités égales par rapport aux valeurs de repos (exemple de la figure 4).

On peut donc en conclure que, dans tous les cas, la valeur de la puissance de sortie s'obtient en multipliant la moitié de la variation totale de la tension anodique, par la moitié de la variation totale du courant anodique, et en divisant par 2 le résultat obtenu.

1 - 4 - DISTORSION TOTALE

Sur le tableau de la figure 2, on note que le constructeur du tube n'a pas indiqué seulement la puissance de sortie, mais également la DISTORSION TOTALE.

Pour comprendre en quoi consiste cette distorsion, rappelons-nous tout ce qui a été dit précédemment sur la figure 8-b, c'est-à-dire que le courant anodique varie de 43 mA quand il augmente, tandis qu'il ne varie que de 37 mA quand il diminue.

La composante alternative du courant est donc déformée, c'est-à-dire n'a plus l'allure sinusoidale du signal appliqué à l'entrée de l'amplificateur. On dit que le montage produit une DISTORSION du signal.

Cette distorsion constitue un inconvénient, car les signaux à amplifier correspondent aux sons à reproduire. Elle se traduit donc en pratique par une déformation des sons diffusés par le haut-parleur.

Pour voir comment se produit cette distorsion, étudions l'allure du signal de sortie.

Celui-ci est représenté en trait continu sur la figure 9-a avec l'indication des valeurs maxima obtenues.

Sur cette figure, on a aussi indiqué en pointillé l'allure du signal que l'on obtiendrait, si l'amplificateur n'introduisait pas une distorsion.

On voit ainsi clairement la déformation du signal de sortie.

Pour expliquer cette déformation, on a recours aux mathématiques (qui sortent du cadre de ce cours).

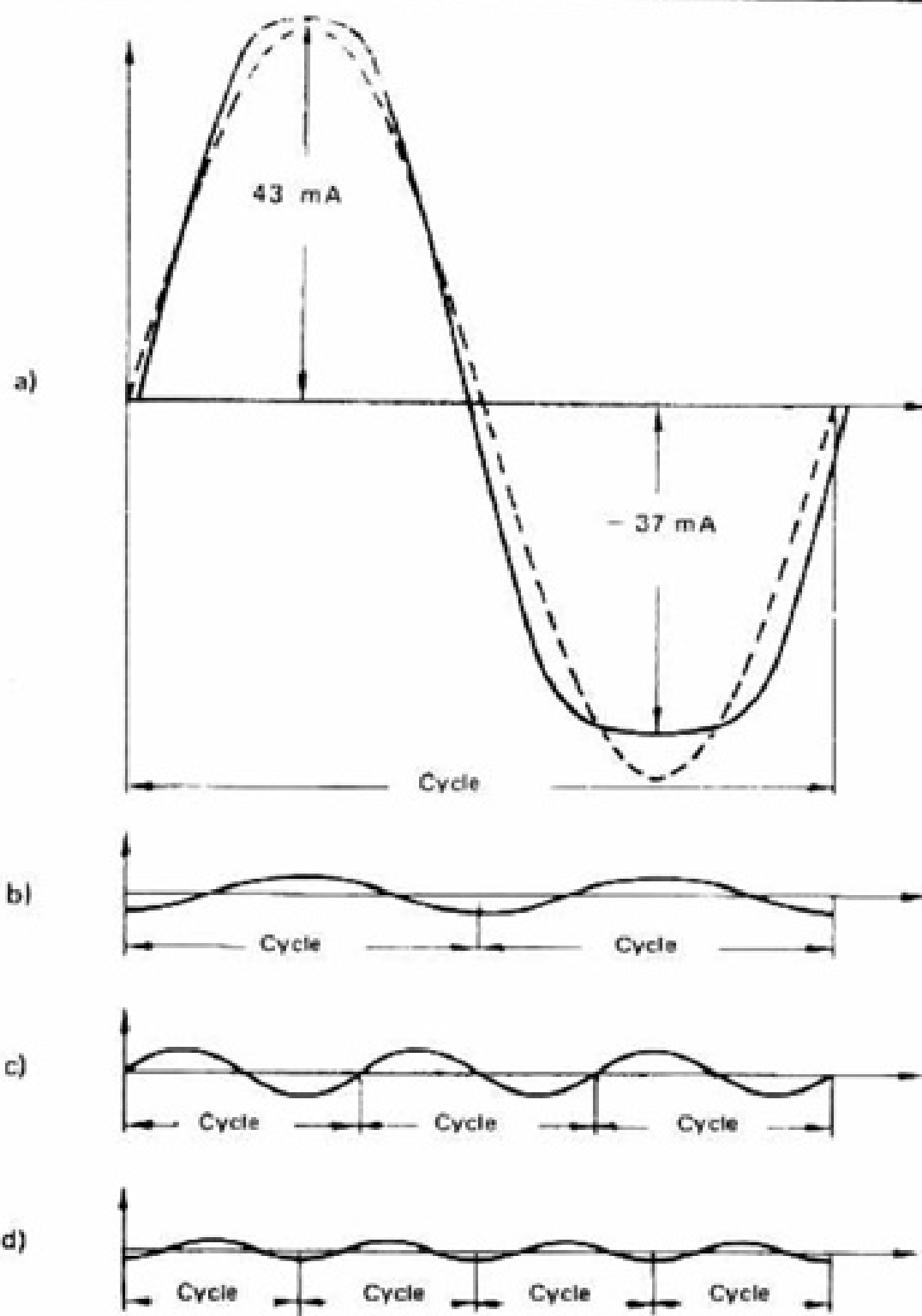
Celles-ci permettent de démontrer que, si l'on ajoute au courant représenté par la sinusoïde, un courant continu et trois autres courants alternatifs sinusoïdaux, d'amplitude et de fréquence déterminée, on obtient un courant qui a la même allure que le signal de sortie de la figure 9-a.

Les trois nouveaux courants alternatifs peuvent être représentés au moyen des sinusoïdes des figures 9-b, 9-c et 9-d.

La sinusoïde en pointillé, qui a la même allure que le signal, est appelée FONDAMENTALE.

La sinusoïde de la figure 9-b est appelée SECONDE HARMONIQUE. Elle accomplit deux cycles dans le temps mis par la fondamentale pour accomplir un cycle. Sa fréquence est donc égale au double de la fréquence de la fondamentale.

La sinusoïde de la figure 9-c est appelée TROISIEME HARMO-



FONDAMENTALE ET HARMONIQUES DU SIGNAL DE SORTIE

Figure 9

NIQUE. Elle accomplit trois cycles dans le temps mis par la fondamentale pour en accomplir un seul. Sa fréquence est égale au triple de la fréquence de la fondamentale.

Enfin, la sinusoïde de la figure 9-d est appelée QUATRIEME HARMONIQUE. Elle accomplit quatre cycles dans le temps mis par la fondamentale pour en accomplir un seul. Sa fréquence est égale au quadruple de la fréquence de la fondamentale.

La composante alternative du courant anodique qui constitue le signal de sortie peut donc être considérée comme étant formée de l'ensemble d'un courant continu et de quatre courants alternatifs (la fondamentale, la seconde, la troisième et la quatrième harmonique).

Le fait important est que, dans le signal de sortie, apparaissent les trois fréquences des harmoniques (une double, une triple et une quadruple par rapport à celle du signal).

Ces trois fréquences ne sont pas présentes dans le signal appliqué à l'entrée de l'amplificateur.

Les sons reproduits par le haut-parleur ont la même fréquence que les courants qui parcourent celui-ci, et l'oreille humaine reconnaît chaque son grâce à sa fréquence.

On comprend alors que la distorsion due à la présence de la seconde, la troisième et la quatrième harmonique, soit reproduite par le haut-parleur, en même temps que la fondamentale.

On ne doit pourtant pas penser que le haut-parleur reproduise quatre sons distincts de fréquences différentes. Le son obtenu est unique, mais il est déformé par rapport à l'original car il est dû non seulement à la fondamentale qui a la fréquence voulue, mais aussi aux trois harmoniques qui ont des fréquences égales au double, au triple et au quadruple.

Il est donc évident que l'altération du son est d'autant plus impor-

tante que l'amplitude des harmoniques est plus grande par rapport à la fondamentale.

Pour calculer la distorsion due à une harmonique donnée, on divise donc la valeur maximum de cette harmonique par la valeur maximum de la fondamentale. En multipliant ensuite le nombre obtenu par cent, on obtient la distorsion exprimée en pourcentage de la fondamentale.

Par exemple, si la fondamentale et la seconde harmonique avaient une valeur maximum de 42 mA et de 2 mA, on aurait : $2 : 42 = 0,0476$ et en multipliant ce nombre par 100, on trouverait que la distorsion de seconde harmonique est de 4,76% . Ceci signifie que si la fondamentale avait une valeur maximum de 100 mA, la seconde harmonique aurait une valeur maximum de 4,76 mA.

On peut faire le même calcul pour la troisième et la quatrième harmonique, et déterminer ainsi la distorsion de troisième et quatrième harmonique.

Pour connaître la distorsion due à la somme des trois harmoniques c'est-à-dire pour déterminer LA DISTORSION TOTALE, on élève au carré les nombres qui indiquent la distorsion de seconde, troisième et quatrième harmonique, on ajoute les trois carrés obtenus et on extrait la racine carrée de la somme.

La distorsion totale de 8% indiquée sur le tableau de la figure 2 peut être calculée de cette façon. Généralement pourtant, la distorsion totale est déterminée expérimentalement par le constructeur du tube à l'aide d'un DISTORSIOMETRE.

Cet appareil est équipé de circuits spéciaux, qui éliminent la fondamentale et laissent les harmoniques, dont l'amplitude peut alors être mesurée.

Il faut toutefois préciser que l'oreille humaine ne relève les distor-

sions que si elles dépassent 5%. On dit pour cela, qu'un amplificateur est en mesure de fournir une puissance déterminée **SANS DISTORSION** si celle-ci est inférieure à 5%.

On a constaté d'autre part que les distorsions ne sont pas excessivement gênantes si elles sont inférieures à 10%.

Cette valeur peut donc être considérée comme la limite maximum à ne pas dépasser.

Un relevé très précis des caractéristiques du tube montrerait que la valeur maximum du signal représenté en pointillé figure 9 est de 42,33 mA (en pratique, on prend 43 mA pour simplifier les calculs).

Ainsi, avec une charge de $5\text{ k}\Omega$, la valeur maximum de la composante alternative est de $42,33 \times 5 = 211,65$ volts.

En multipliant cette valeur par la valeur maximum du courant et en divisant par 2 le nombre obtenu, on détermine la puissance de sortie relative à la fondamentale, qui est d'environ 4,5 watts.

Nous retrouvons ainsi la valeur de la puissance de sortie indiquée par le constructeur. Nous voyons que cette valeur indique la puissance de sortie en l'absence de distorsion (c'est-à-dire si la composante alternative du courant anodique avait effectivement l'allure sinusoïdale de la fondamentale).

1 - 5 - CHOIX DE L'IMPEDANCE DE CHARGE

Après avoir étudié la puissance de sortie et la distorsion, voyons comment le constructeur du tube choisit l'impédance de charge. A ce propos, il faut se rappeler que la puissance de sortie comme la distorsion totale dépendent de la valeur de cette impédance.

L'influence de l'impédance de charge est illustrée figure 10.

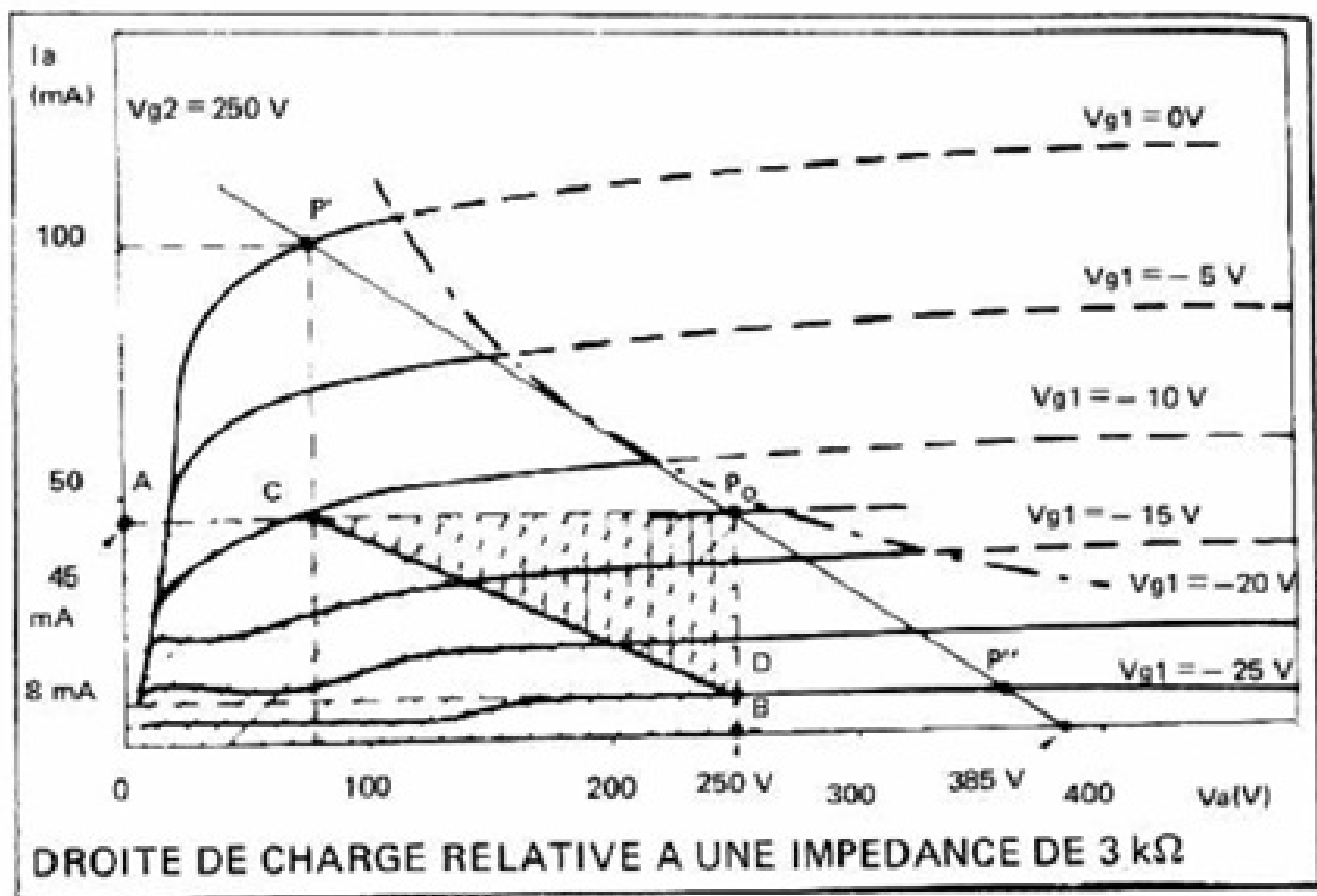


Figure 10

Cette figure concerne toujours le tube 6AQ5, pris dans les mêmes conditions que sur la figure 8-b, mais avec une impédance de charge de 3 kΩ au lieu de 5 kΩ.

Par comparaison, on voit immédiatement que la surface du triangle est différente, de même que le courant anodique correspondant au point P'.

Pour tracer la droite de charge, on a procédé comme on l'a vu précédemment. On a d'abord multiplié la valeur de l'impédance par la valeur du courant anodique de repos de 45 mA ($3 \times 45 = 135$ volts).

Ensuite, on a ajouté cette tension à la tension anodique de repos

de 250 volts ($135 + 250 = 385$ volts). Enfin, du point de l'axe horizontal qui correspond à la tension de 385 volts, on a tracé la droite de charge de façon à la faire encore passer par le point P_0 .

Le constructeur du tube, ayant la possibilité de mesurer la puissance de sortie et la distorsion totale, peut déterminer les valeurs que prennent ces deux grandeurs selon la valeur donnée à l'impédance de charge.

Il peut donc indiquer quelle valeur d'impédance il faut choisir pour obtenir la puissance de sortie maximum et la distorsion minimum.

Les résultats des mesures sont reportés sur les diagrammes du type de la figure 11 pour le tube 6AQ5 auquel nous nous sommes référés dans cette leçon.

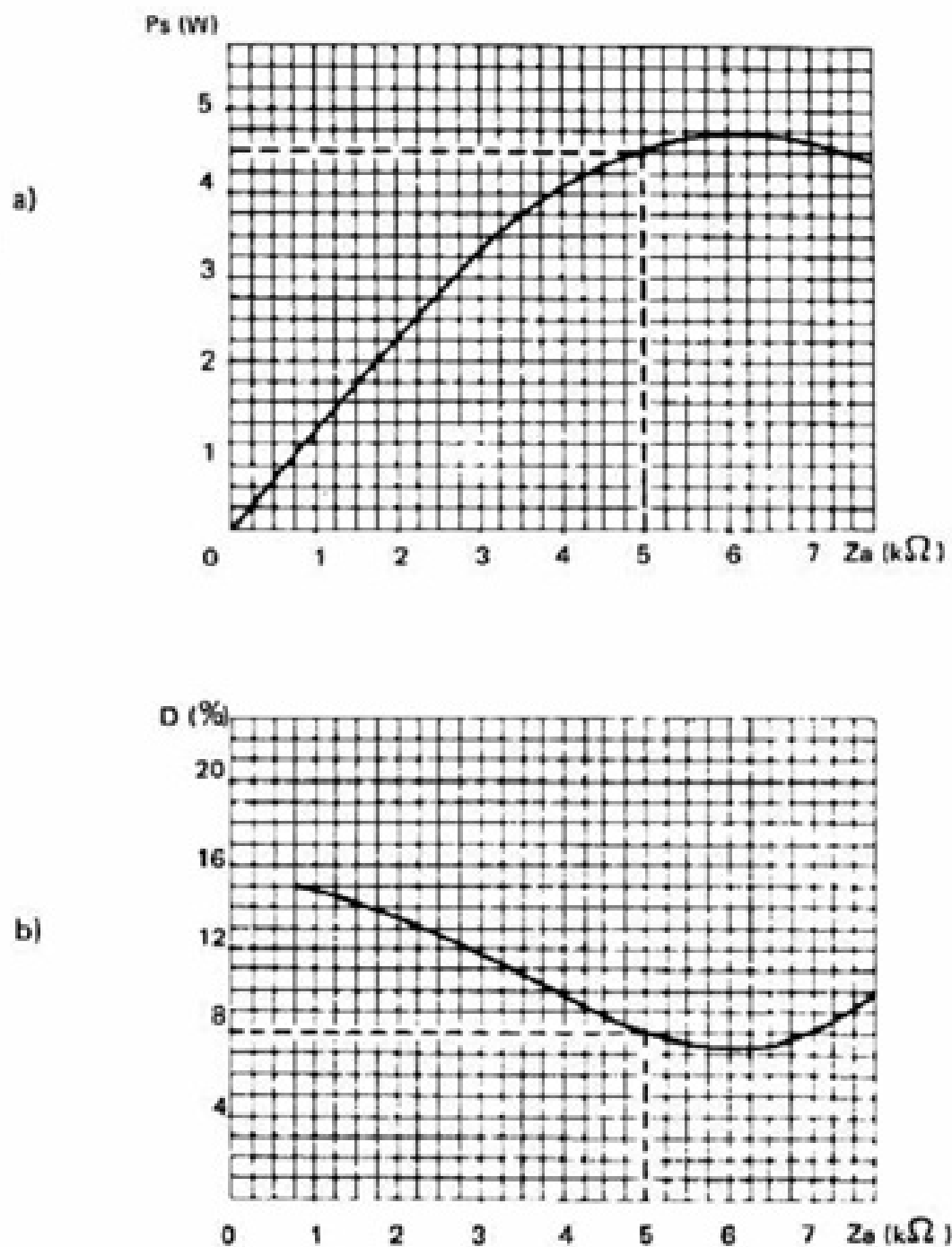
Sur le diagramme de la figure 11-a, on peut voir comment varie la puissance de sortie P_s , exprimée en watts, quand l'impédance de charge Z_A varie.

Le diagramme de la figure 11-b permet de voir comment varie la distorsion totale, exprimée en % quand cette même impédance de charge varie.

On constate ainsi que, avec l'impédance de charge d'une valeur de $5\text{ k}\Omega$, la puissance de sortie est effectivement de 4,5 W et la distorsion totale de 8% .

D'après les diagrammes, on peut noter qu'avec une impédance de charge de $6\text{ k}\Omega$, on obtiendrait une puissance de sortie encore plus grande et une distorsion totale inférieure.

La raison pour laquelle on n'adapte pas cette valeur, réside dans le fait que, dans ce cas, la distorsion de troisième harmonique est plus grande, bien que la distorsion totale soit inférieure.



RELATION ENTRE LA PUISSANCE DE SORTIE ET LA DISTORSION TOTALE DE LA RESISTANCE DE CHARGE

Figure 11

Or, c'est la distorsion de troisième harmonique qui produit l'effet le plus désagréable à l'oreille de l'auditeur.

Il est donc préférable d'avoir une distorsion totale un peu supérieure, qui ne dépasse pas toutefois 10% , tout en réduisant la distorsion de troisième harmonique.

On adapte donc une impédance de charge de 5 k Ω .

II - AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE PUSH-PULL

L'amplificateur de puissance que nous venons d'étudier, présente l'inconvénient d'introduire des distorsions.

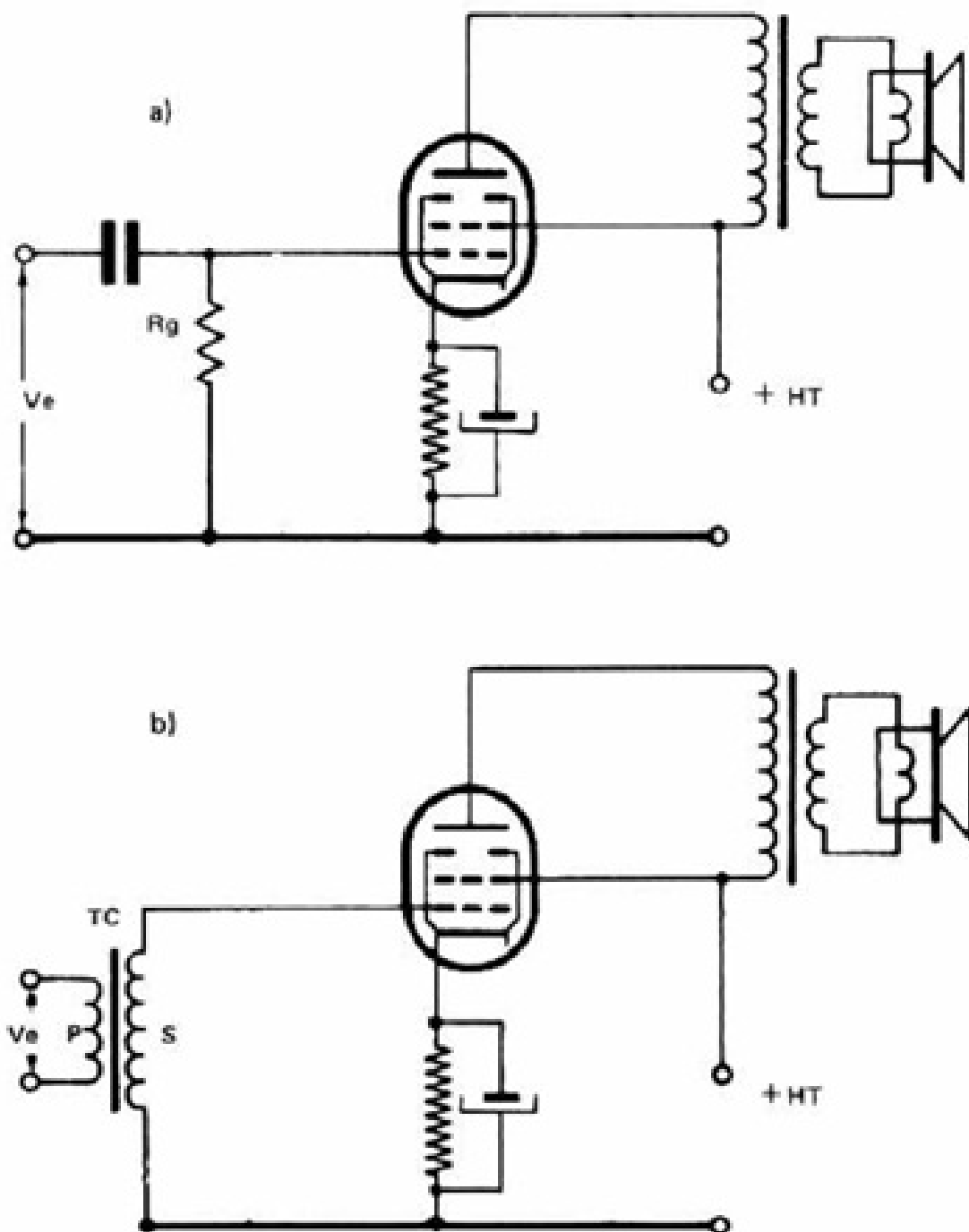
Nous avons vu que les distorsions sont proportionnelles à la puissance fournie par l'amplificateur.

Aussi, afin de pouvoir augmenter la puissance, tout en maintenant le taux de distorsions dans les limites acceptables, on a réalisé un autre type d'amplificateur.

Celui-ci est équipé de deux tubes électroniques identiques en montage symétrique ou PUSH-PULL (termes provenant de l'expression anglo-saxonne signifiant "pousse-tire").

Cet amplificateur est connu sous le nom d'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE "PUSH-PULL" (on dit aussi amplificateur symétrique de puissance).

Avant d'étudier ce montage, revenons encore à l'amplificateur précédent. Dans celui-ci, le signal d'entrée peut être appliqué non seulement



APPLICATION DU SIGNAL A L'ENTREE D'UN AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE

Figure 12

par l'intermédiaire d'un condensateur en série avec la grille de commande (figure 12-a), mais aussi par l'intermédiaire d'un transformateur spécial désigné par l'abréviation TC (figure 12-b).

Il s'agit d'un TRANSFORMATEUR DE COUPLAGE, dont le rôle est de transmettre à l'amplificateur de puissance, le signal provenant de l'amplificateur de tension.

Le fonctionnement des montages des figures 12-a et 12-b est identique.

En effet, dans le cas de la figure 12-a, le signal d'entrée V_e est appliqué aux extrémités de la résistance de grille R_g , où il donne naissance à la tension V_g (composante alternative de la tension de grille).

Dans le cas de la figure 12-b, le signal d'entrée V_e est appliqué au primaire P du transformateur de couplage. Sur le secondaire de celui-ci, on obtient la tension V_g entre la grille de commande et la masse.

Le condensateur de liaison n'est plus nécessaire, étant donné que le transformateur de couplage transmet la composante alternative, et bloque la composante continue provenant de l'amplificateur de tension.

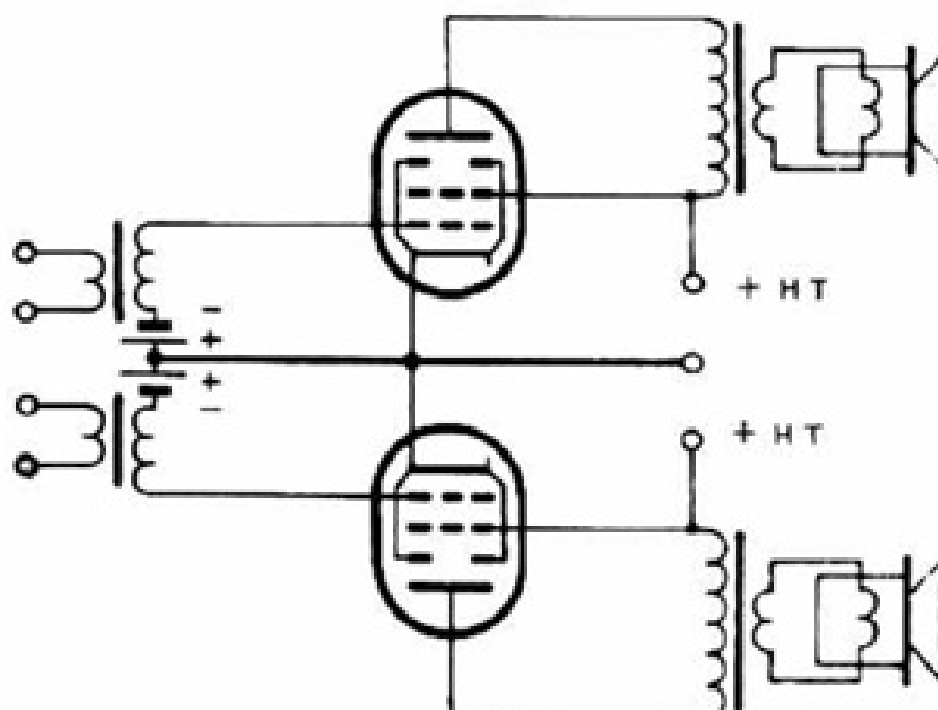
Etudions maintenant la figure 13 a, qui représente deux amplificateurs symétriques par rapport à la ligne de masse (dessinée en trait gras).

Ces amplificateurs sont alimentés séparément par une alimentation HT, (on dit aussi alimentation anodique). La tension de polarisation de la grille de commande est obtenue par deux batteries différentes.

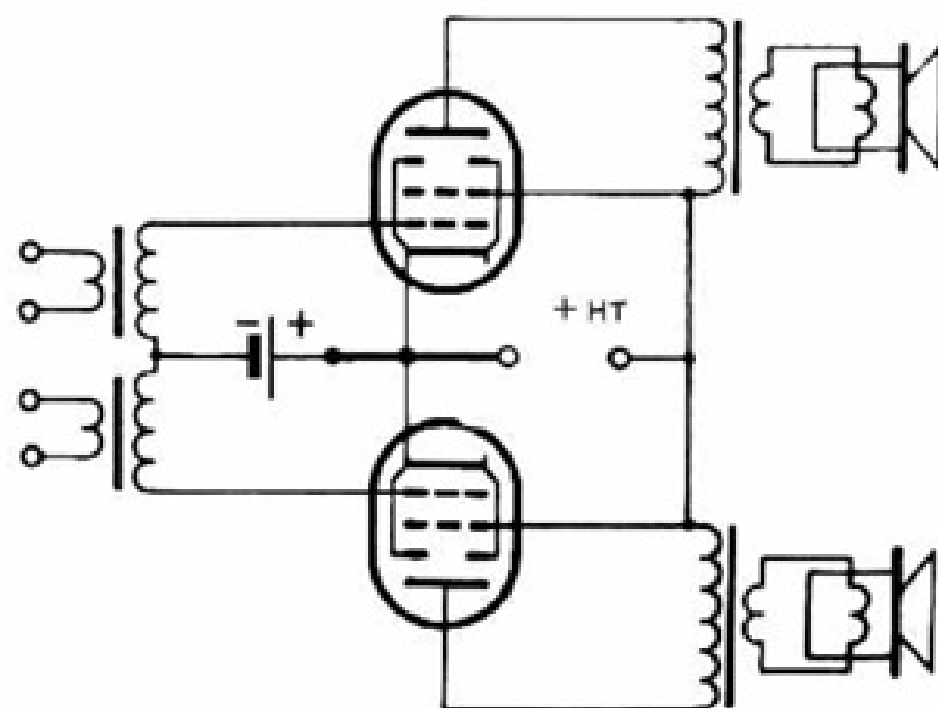
Il est cependant possible d'alimenter les deux amplificateurs avec une seule alimentation HT et d'obtenir la tension de polarisation en employant une seule batterie.

Il suffit, pour cela, de modifier le schéma de la figure 13-a, comme indiqué figure 13-b.

a)



b)



CIRCUIT AVEC DEUX TUBES AMPLIFICATEURS DE PUISSANCE

Figure 13

On peut donc considérer le schéma de la figure 13-b, comme un ensemble de deux amplificateurs de puissance avec une alimentation commune.

Toutefois, ces deux amplificateurs sont séparés en ce qui concerne l'amplification et la reproduction sonore. En effet, chaque montage peut reproduire indépendamment de l'autre, le signal appliqué à son entrée.

Les amplificateurs de ce type, peuvent ainsi reproduire deux signaux différents. Ils sont couramment utilisés actuellement pour la reproduction stéréophonique que nous étudierons plus tard dans ce cours.

Nous devons voir maintenant comment un circuit, avec deux amplificateurs symétriques, fournit une puissance de sortie élevée sans distorsions. On pourrait appliquer un seul signal aux deux primaires des transformateurs de couplage.

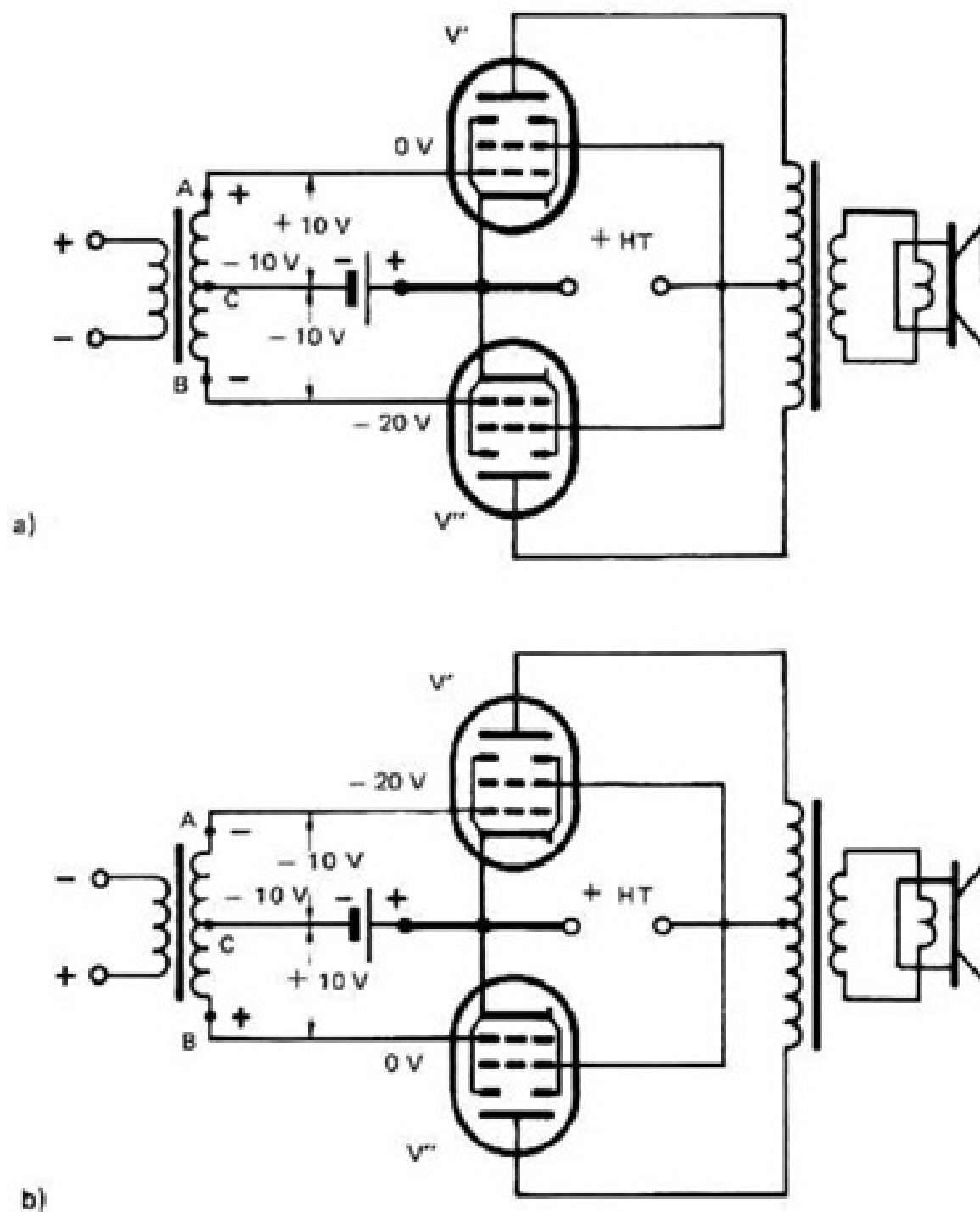
On obtiendrait effectivement une puissance de sortie double, mais la puissance due aux harmoniques, serait également doublée. Or, ce sont les harmoniques qui provoquent la distorsion du signal et cette solution n'est donc pas applicable.

Pour augmenter la puissance de sortie, sans augmenter la distorsion, il faut modifier le circuit de la figure 13-b, comme indiqué figure 14.

Nous voyons qu'il suffit d'utiliser un seul transformateur de couplage pour appliquer un même signal aux deux amplificateurs. D'autre part, pour la reproduction de ce signal unique, un seul haut-parleur est nécessaire. Donc, là encore, un seul transformateur de sortie est utilisé.

Toutefois, le transformateur de couplage doit comporter une prise centrale au secondaire. Cette prise est reliée au pôle négatif de la batterie, comme dans le cas de la figure 13-b.

Les extrémités des secondaires sont directement reliées aux grilles



AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE EN PUSH-PULL

Figure 14

de commande des tubes, de la même façon là aussi, que sur la figure 13-b.

Le transformateur de sortie unique comporte une prise centrale au primaire. On peut ainsi adopter un montage identique à celui de la figure 13-b.

En effet, la prise centrale est reliée au $+ HT$, et les extrémités des primaires sont branchées directement aux anodes des tubes.

EN CONCLUSION : LES DEUX CIRCUITS DE GRILLES ET LES DEUX CIRCUITS ANODIQUES, ONT UN ELEMENT EN COMMUN : LE FLUX D'INDUCTION DANS LES NOYAUX FERROMAGNETIQUES DU TRANSFORMATEUR DE COUPLAGE ET DU TRANSFORMATEUR DE SORTIE.

Chaque tube ne fonctionne donc plus indépendamment l'un de l'autre, et l'amplificateur PUSH-PULL de la figure 14 ne constitue plus un ensemble de deux amplificateurs distincts.

Il s'agit au contraire d'un seul amplificateur avec ses caractéristiques particulières de fonctionnement. Etudions ce fonctionnement en nous référant à la figure 14-a.

Voyons d'abord le comportement du circuit pendant la demi-période où la tension d'entrée (appliquée au primaire) produit aux extrémités du secondaire une tension dont les polarités sont indiquées sur la figure.

En supposant que cette tension atteigne la valeur maximum de 20 volts, la moitié de celle-ci, c'est-à-dire 10 volts, sera présente sur chaque demi-secondaire (10 volts entre A et C, et entre B et C).

Si l'extrémité A est positive par rapport à C, l'extrémité B est négative. On a donc marqué le signe $+$ en A et le signe $-$ en B.

Il convient de bien retenir que les polarités aux extrémités du

secondaire sont opposées par rapport à la prise centrale (comme c'est le cas par exemple pour le secondaire HT d'un transformateur d'alimentation utilisé sur un circuit redresseur à double alternance).

Remarquons maintenant que la prise C, étant reliée au pôle négatif de la batterie de polarisation, est à un potentiel de -10 volts par rapport à la masse.

Si l'extrémité A est à un potentiel positif de 10 V par rapport à la prise centrale, qui, elle, est à un potentiel de 10 V négatif par rapport à la masse, cela veut dire que l'extrémité A est à un potentiel de 0 V par rapport à la masse.

La grille de commande du tube V' étant reliée directement à l'extrémité A, se trouve donc, elle aussi, à un potentiel de 0 volts par rapport à la masse (figure 14-a).

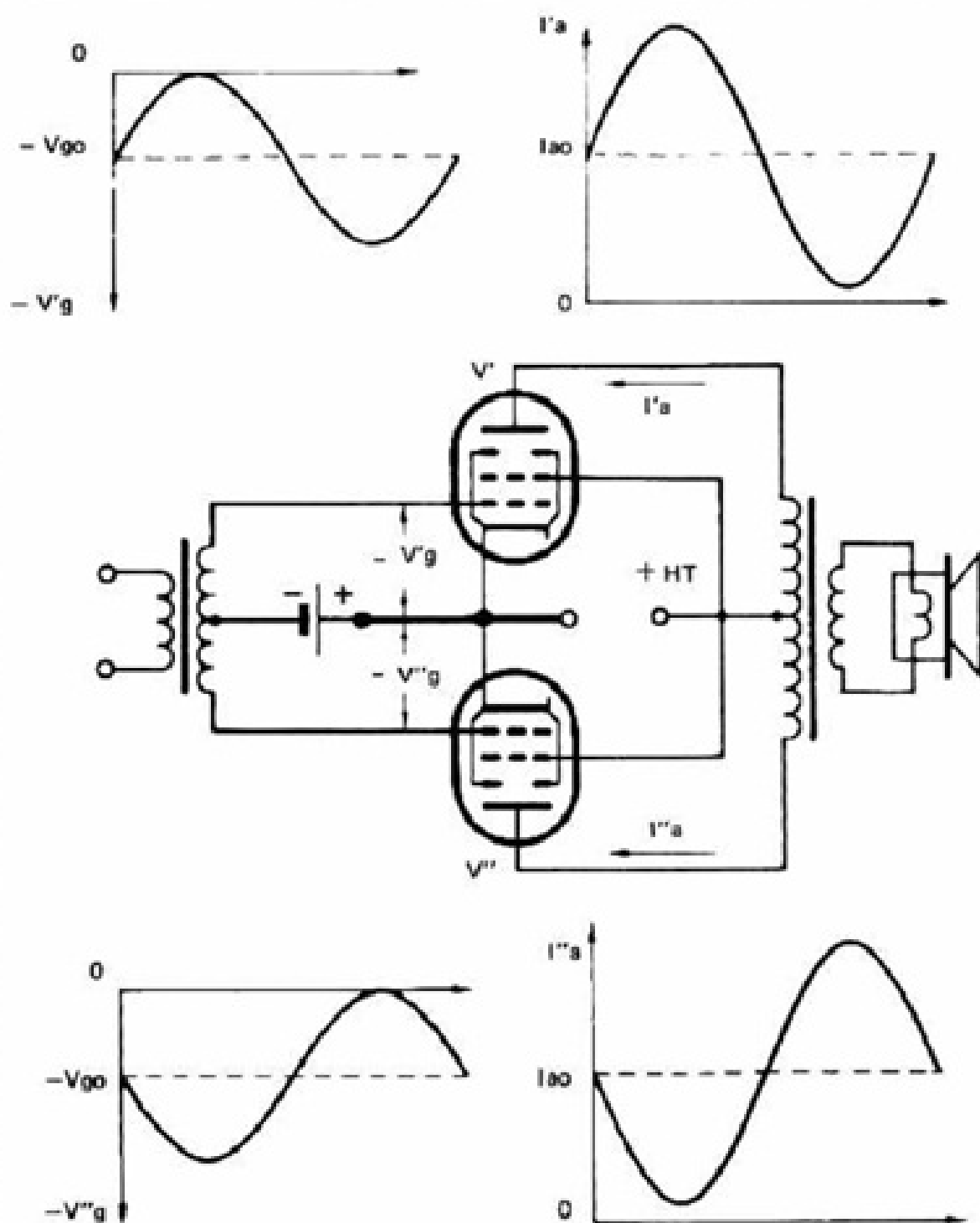
D'autre part, si l'extrémité B est à un potentiel négatif de 10 volts par rapport à la prise centrale, cela veut dire que l'extrémité B est à un potentiel négatif de 20 volts par rapport à la masse.

La grille de commande du tube V'', étant reliée directement à l'extrémité B, se trouve donc, elle aussi, à un potentiel négatif de 20 Volts par rapport à la masse.

A la demi-période suivante, les polarités s'inversent. L'extrémité A est portée au potentiel de -20 volts par rapport à la masse et l'extrémité B au potentiel de 0 volt par rapport à la masse (figure 14-b).

On voit que les tensions de grille des deux tubes varient entre 0 volt et -20 volts. Cette variation se produit toutefois en sens contraire pour les deux tubes. Quand la tension de grille d'un tube est de 0 volt, celle de l'autre tube est de -20 volts et vice versa.

La figure 15 illustre pour chaque tube, l'allure de la tension totale



ALLURES DES TENSIONS DE GRILLE ET DES COURANTS ANODIQUES

Figure 15

de grille V_g qui résulte de la superposition de la composante alternative sur la composante continue V_{g0} .

On peut voir ainsi que, pendant la demi-période où la tension V_g' a des valeurs supérieures à la tension de repos V_{g0} , la tension V_g'' a au contraire des valeurs inférieures à V_{g0} . Le contraire se produit pendant la demi-période suivante.

CONCLUSION : LES DEUX TENSIONS SONT EN OPPOSITION DE PHASE.

Observons maintenant que, puisque la cathode des tubes est reliée directement à la masse, la tension entre la grille et la masse coïncide avec la tension entre la grille et la cathode.

D'après l'allure des tensions de grille des deux tubes, il est facile de déterminer la progression du courant anodique i_a' du tube V' et du tube V'' .

L'allure de cette progression est reportée sur la figure 15 (en supposant pour le moment qu'il n'existe aucune distorsion, et qu'ainsi les courants anodiques ont une allure sinusoïdale, identique à celle des tensions de grille).

Pendant la demi-période où la tension de grille V_g' a des valeurs supérieures à la valeur de la tension de repos, la grille du tube V' devient moins négative par rapport à la cathode. Le courant anodique i_a' prend des valeurs supérieures à la valeur de repos i_{a0} .

Pendant la demi-période suivante où la tension de grille V_g' a au contraire des valeurs inférieures à la valeur de la tension de repos, la grille du tube devient plus négative par rapport à la cathode. Le courant anodique i_a' prend des valeurs inférieures à la valeur de repos i_{a0} .

On voit que le **COURANT ANODIQUE** du tube V' est en phase

avec la TENSION DE GRILLE de ce tube. Le même phénomène se produit évidemment pour le courant anodique et la tension de grille du tube V'' .

Toutefois, étant donné que la tension de grille du tube V' est en opposition de phase avec la tension de grille du tube V'' , LE COURANT ANODIQUE I_a' SERA AUSSI EN OPPOSITION DE PHASE AVEC LE COURANT I_a'' .

Le terme PUSH-PULL provient précisément de ce fonctionnement particulier en opposition de phase.

Nous allons voir enfin le comportement du transformateur de sortie, dont le primaire est justement parcouru par ces courants.

Etudions l'amplificateur dans les conditions de repos, c'est-à-dire quand aucun signal n'est appliqué à l'entrée.

Comme on le voit figure 16, les grilles des deux tubes sont au même potentiel de -10 volts.

Dans ces conditions, les courants anodiques des deux tubes sont égaux.

Chacun de ces courants, provenant du positif de la haute tension, parcourt la moitié du primaire du transformateur de sortie (dans le sens indiqué figure 16).

Ces deux courants circulent dans le primaire en sens contraire, et produisent dans le noyau ferromagnétique du transformateur, un flux d'induction, dont le sens dépend du sens de circulation de ces courants.

Ce flux d'induction a été indiqué figure 16 par des flèches en pointillé. Les deux flux Φ produits, sont dirigés en sens contraire, et sont égaux.

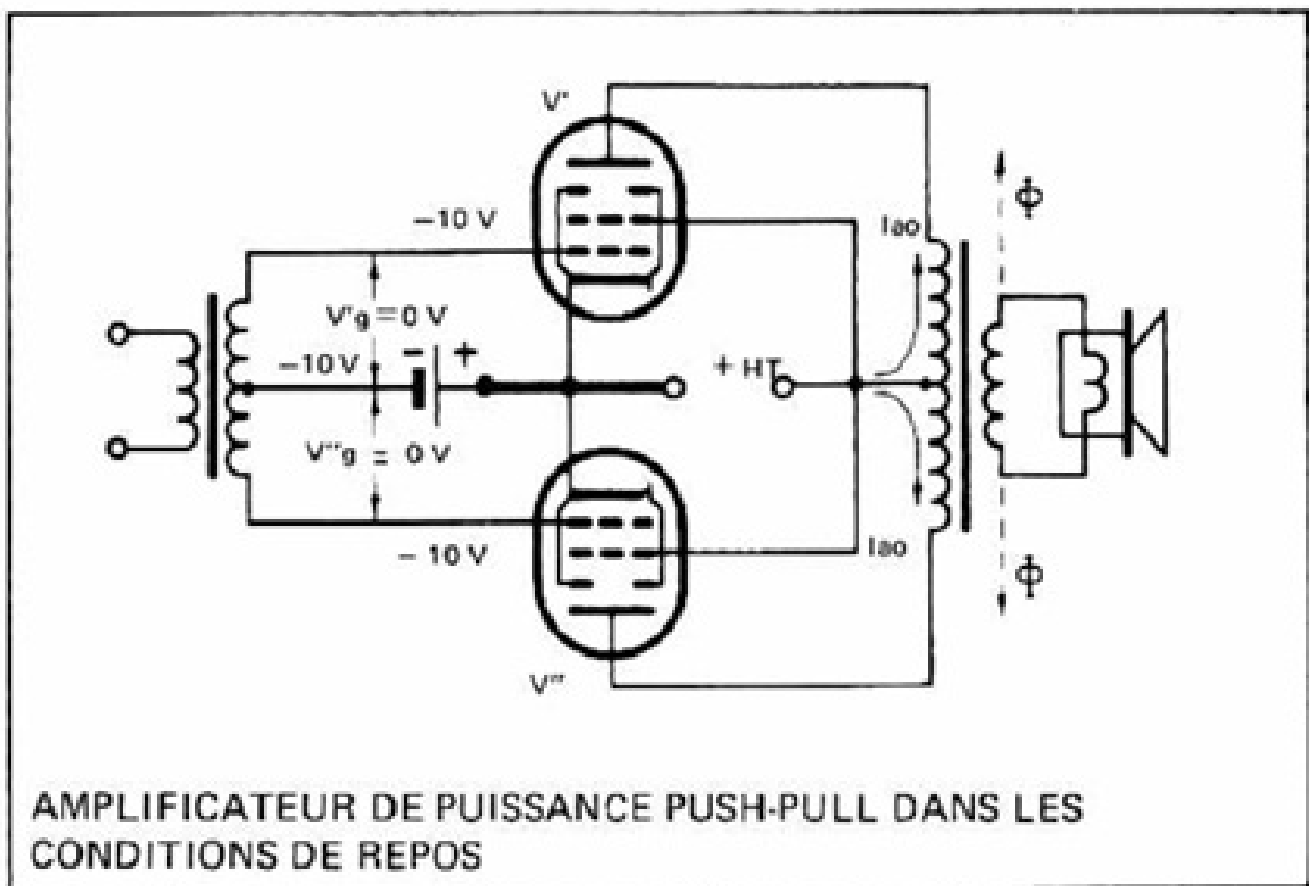


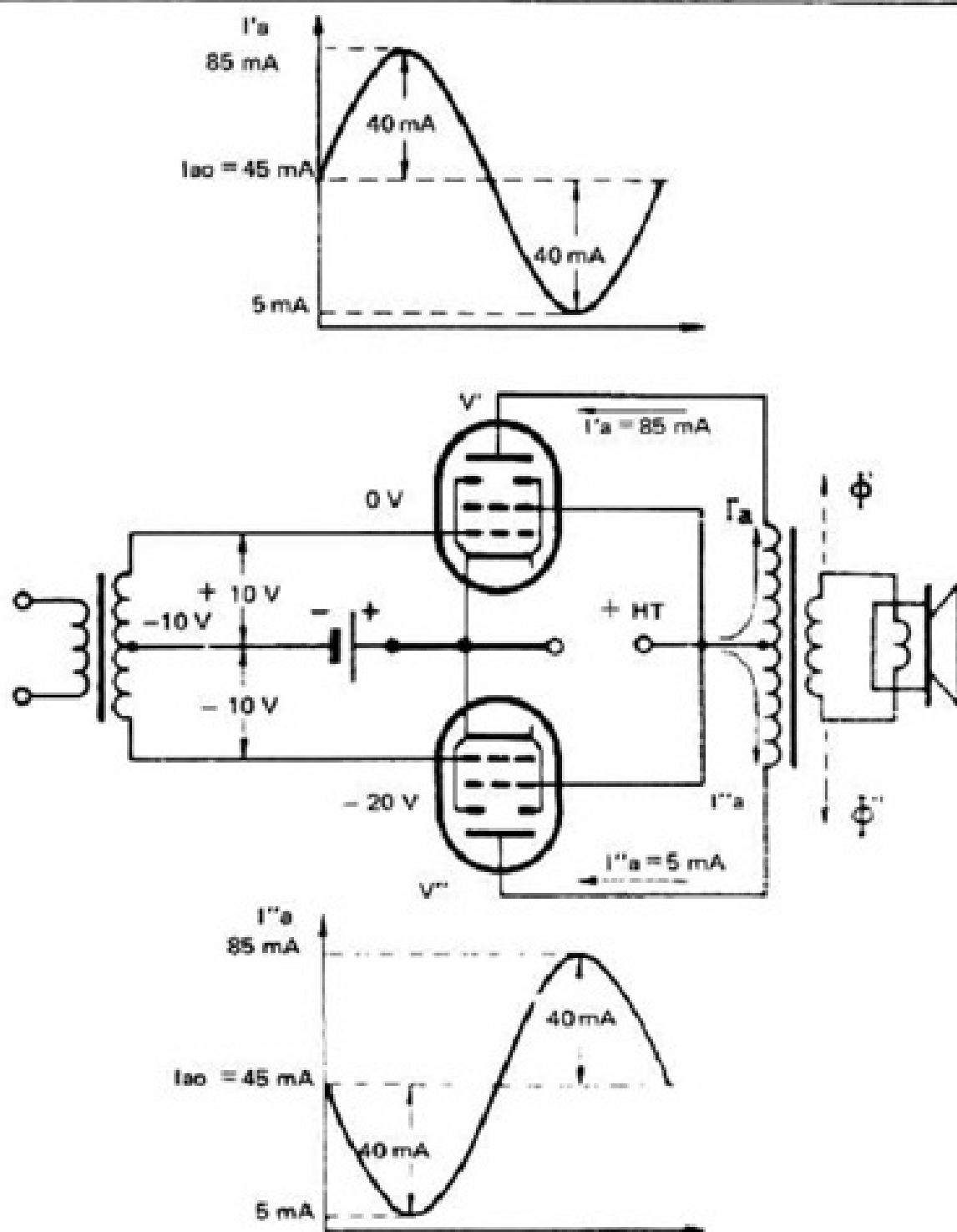
Figure 16

Dans le noyau du transformateur de sortie, on a donc deux flux d'induction égaux et dirigés en sens contraire. Ils se neutralisent réciproquement, et le flux résultant est nul.

CONCLUSION : QUAND UN AMPLIFICATEUR PUSH-PULL FONCTIONNE EN CONDITION DE REPOS, LE FLUX D'INDUCTION DANS LE NOYAU DU TRANSFORMATEUR DE SORTIE EST NUL.

Il n'en est pas de même quand un signal est appliqué à l'entrée de l'amplificateur.

Reportons-nous à la figure 17 qui représente un montage PUSH-PULL en présence d'un signal d'entrée. On suppose que celui-ci entraîne une variation du courant anodique, de plus ou moins 40 mA par rapport à la valeur de repos de 45 mA.



FLUX PRODUITS PAR LES COURANTS ANODIQUES DANS LE NOYAU DU TRANSFORMATEUR DE SORTIE

Figure 17

Sur le schéma de cette figure, sont indiquées les valeurs de toutes les grandeurs relatives au circuit, à l'instant où le courant I_a' atteint la valeur maximum de 85 mA, et le courant I_a'' la valeur minimum de 5 mA.

Les deux courants, tout en étant encore dirigés en sens contraire, ont cependant des valeurs différentes, et par suite, les flux produits ne sont plus égaux.

Il est évident en effet, que le flux produit par le courant I_a' de 85 mA sera plus grand que le flux produit par le courant I_a'' de 5 mA.

Le flux total dans le noyau est donc égal à la différence entre le flux Φ' et le flux Φ'' .

CONCLUSION : QUAND ON APPLIQUE UN SIGNAL A L'ENTREE D'UN AMPLIFICATEUR PUSH-PULL, LE FLUX D'INDUCTION DANS LE NOYAU DU TRANSFORMATEUR DE SORTIE EST EGAL A LA DIFFERENCE ENTRE LES FLUX PRODUITS PAR CHAQUE COURANT ANODIQUE.

Ce même flux Φ égal à la différence entre les flux Φ' et Φ'' pourrait être obtenu dans un transformateur de sortie, sans prise centrale au primaire, lorsque ce dernier serait parcouru par un courant I_a , égal à la différence entre les courants I_a' et I_a'' (voir figure 18).

On peut donc dire que les deux courants anodiques fournis par les tubes V' et V'' , correspondent à un seul courant anodique égal à leur différence.

CE COURANT CONSTITUE PRECISEMENT LE SIGNAL DE SORTIE DE L'AMPLIFICATEUR.

Il est intéressant de connaître son allure, pour voir si elle correspond bien à celle du signal appliqué à l'entrée.

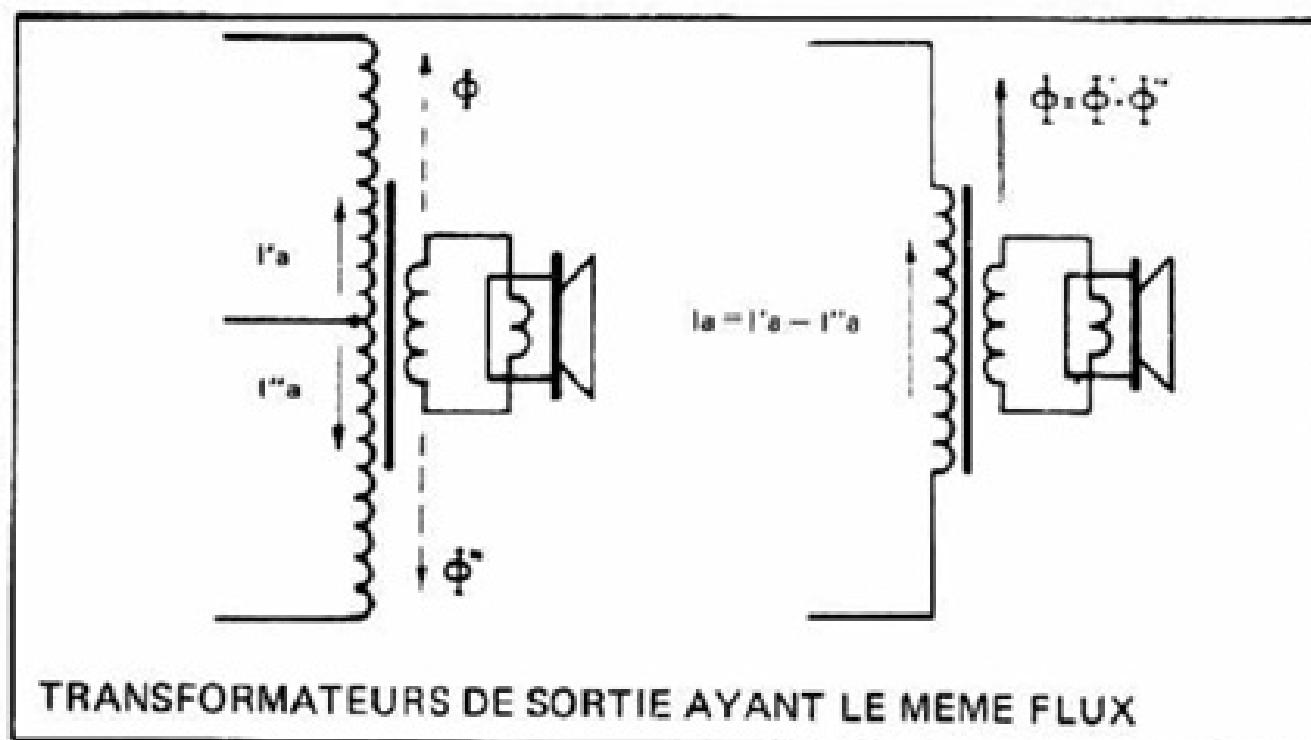


Figure 18

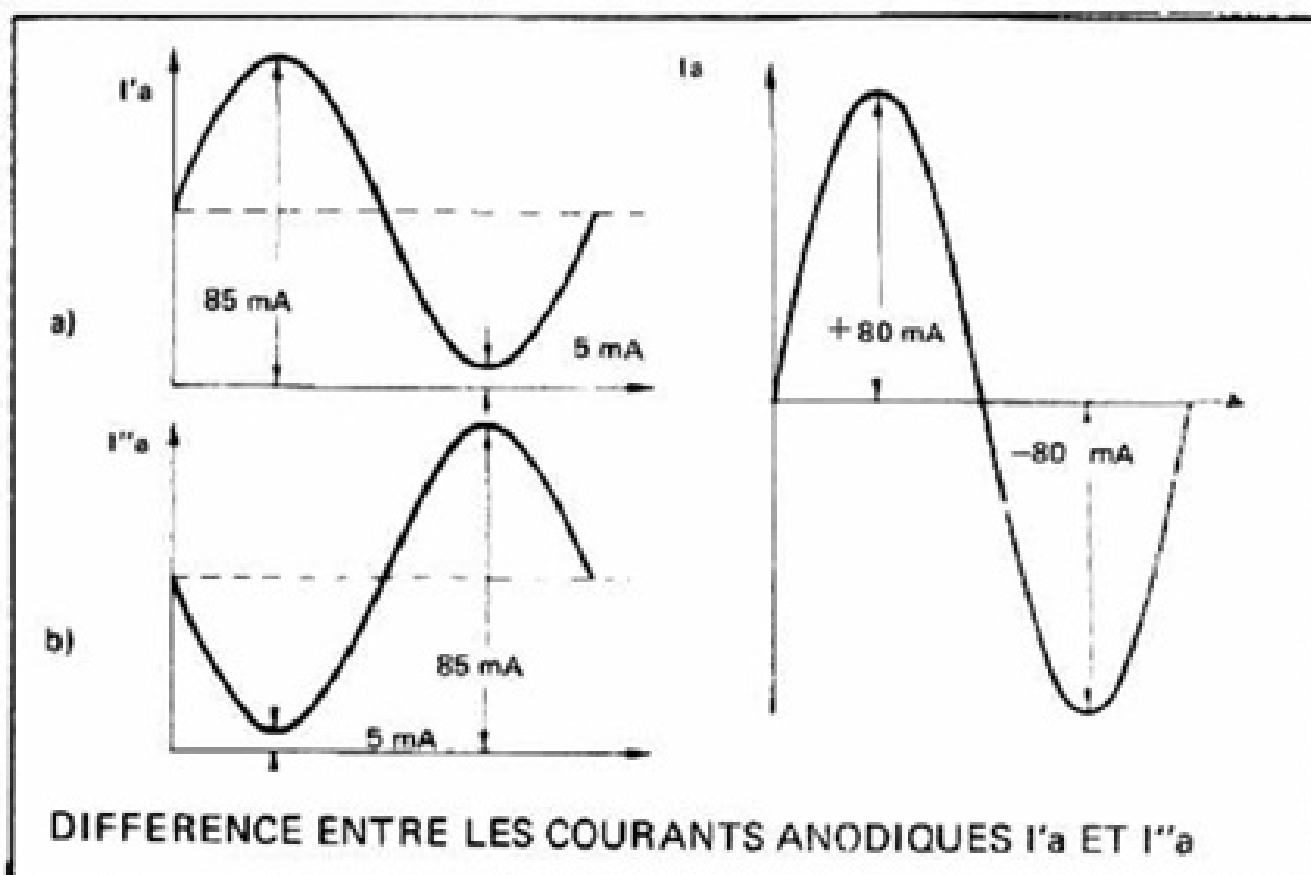


Figure 19

Sur les figure 19-a et 19-b, sont reportés les deux courants anodiques déjà vus figure 17, et sur la figure 19-c est illustrée l'allure du courant total obtenu (différence entre les deux courants).

A l'instant où le courant I_a' a la valeur maximum de 85 mA, et le courant I_a'' , la valeur minimum de 5 mA, la valeur du courant total résultant est de :

$$85 - 5 = 80 \text{ mA.}$$

De même, à l'instant où le courant I_a' a la valeur minimale de 5 mA et le courant I_a'' la valeur maximale de 85 mA, la valeur du courant total résultant est de :

$$5 - 85 = - 80 \text{ mA}$$

Dans ce cas, on obtient une valeur négative du courant.

En effectuant la différence entre les valeurs prises par les deux courants anodiques en divers autres instants, on a pu tracer l'allure complète du courant I_a (figure 19-c).

Il s'agit donc bien d'un courant alternatif sinusoïdal de forme identique à celle du signal appliqué à l'entrée de l'amplificateur.

Notons que, même en faisant la différence entre les deux courants anodiques totaux, c'est-à-dire constitués par les composantes alternatives superposées aux composantes continues, on obtient un courant alternatif.

En effet, les composantes continues des courants anodiques des tubes ont la même valeur, et leur différence est égale à zéro. On peut donc obtenir facilement le courant I_a en faisant la différence entre les composantes alternatives des deux courants anodiques.

Dans les conditions de repos, quand on n'a pas les composantes

alternatives des courants anodiques, le courant I_a est donc égal à zéro. Dans ce cas, le courant I_a est donné par la différence entre les composantes continues qui ont la même valeur.

AUCUN COURANT N'EST DONC INDUIT DANS LE SECONDAIRE DU TRANSFORMATEUR DE SORTIE, ET LE HAUT-PARLEUR NE PRODUIT AUCUN SON.

Au contraire, en présence d'un signal à l'entrée de l'amplificateur, le primaire du transformateur de sortie est parcouru par deux courants de valeurs différentes. Le courant total résultant est égal à la différence entre ces deux courants, et son allure est identique à celle du signal d'entrée.

DANS CES CONDITIONS, UN COURANT CIRCULE DANS LE SECONDAIRE, ET LE HAUT-PARLEUR REPRODUIT LE SON CORRESPONDANT AU SIGNAL APPLIQUE.

Jusqu'à présent, nous avons supposé que les tubes n'introduisaient aucune distorsion, et par conséquent, que le signal de sortie avait la même allure sinusoïdale que le signal d'entrée.

Nous devons maintenant étudier les conséquences des distorsions, produites en réalité par les tubes. Examinons pour cela, l'allure effective de la composante alternative I_a du courant anodique de chaque tube.

Cette allure est représentée figure 20-a, à gauche pour le tube V' (courant $I_{a'}$) et à droite pour le tube V'' (courant $I_{a''}$).

L'allure du courant $I_{a'}$ est la même que celle étudiée figure 9, tandis que l'allure du courant $I_{a''}$ a été obtenue, en tenant compte du fait que les deux courants sont en opposition de phase.

Autrement dit, l'alternance positive de $I_{a'}$ doit correspondre à l'alternance négative de $I_{a''}$ et vice versa.

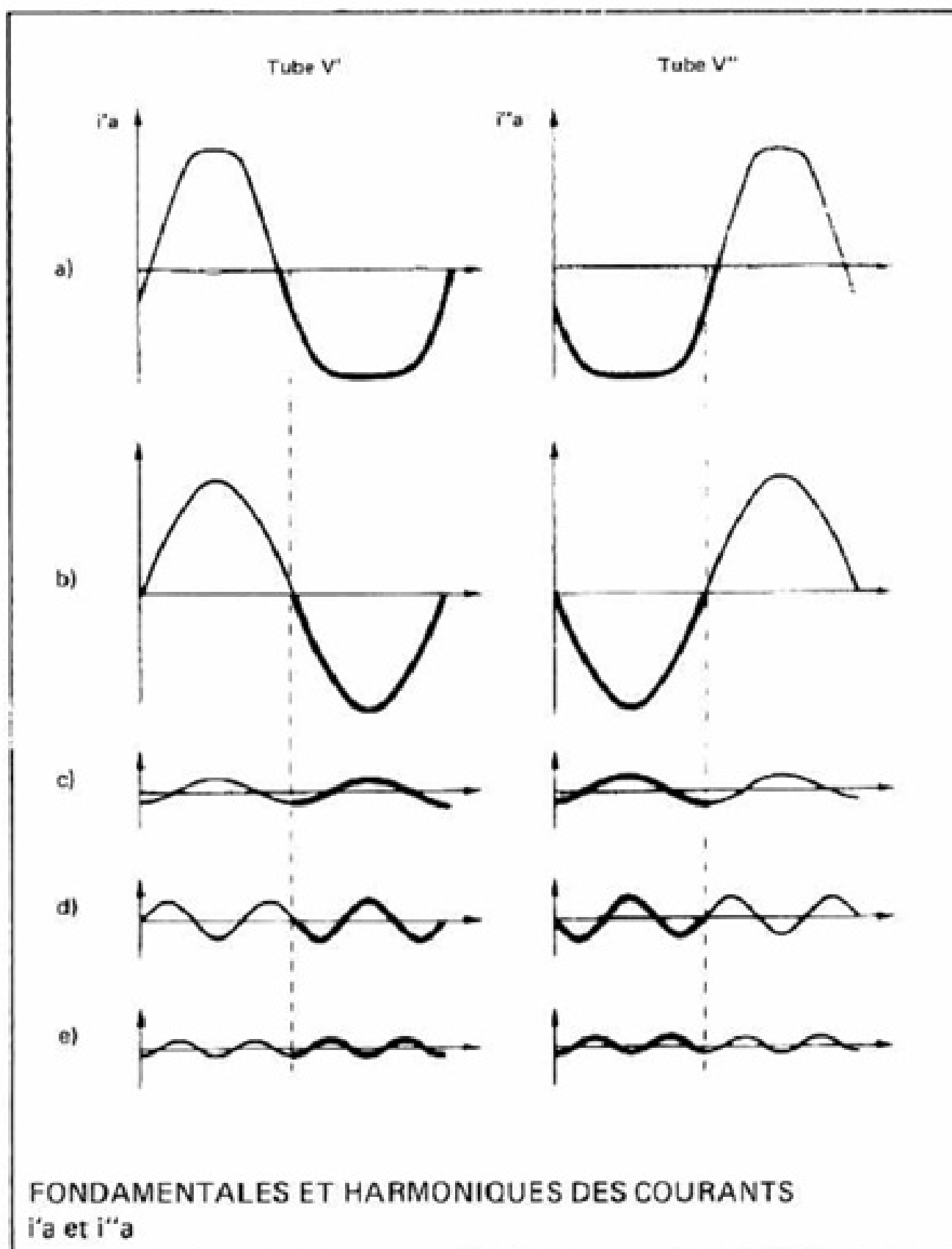


Figure 20

On doit pourtant observer que l'alternance positive et l'alternance négative du courant i_a' ont une allure différente. La distorsion produite par le tube, déforme en effet différemment les deux alternances.

La même déformation existe évidemment pour le courant du tube V'' qui fonctionne de la même façon que le tube V' .

Pour le courant i_a' , il a été possible de dessiner aussi la fondamentale (figure 20-b), la seconde harmonique (figure 20-c), la troisième harmonique (figure 20-d) et la quatrième harmonique (figure 20-e), puisque ces courants ont l'allure déjà étudiée figure 9.

Pour chacun des courants correspondants, on a dessiné en trait gras, la partie des courbes qui se trouve à la droite de la ligne verticale en pointillé.

Il est ainsi plus facile de déterminer l'allure de la fondamentale et des harmoniques du courant i_a'' .

En effet, il suffit d'observer que le diagramme du courant i_a' est formé de deux parties ; l'une tracée en trait fin et qui se trouve à la gauche de la ligne verticale en pointillé, et l'autre en trait plus épais et qui se trouve à la droite de cette même ligne.

Le diagramme du courant i_a'' est également formé de ces deux parties qui sont cependant inversées, car la partie tracée en trait fin est à la droite de la ligne verticale, tandis que la partie en trait plus épais est à la gauche de cette ligne.

On peut tout de suite noter que, pour la seconde harmonique (figure 20-c), les parties tracées en trait léger et en trait gras sont égales.

Par suite, même si on inverse ces deux parties, on ne change pas le diagramme représentant l'allure de ces courants.

La seconde et la quatrième harmoniques des courants i_a' et i_a'' sont en phase, alors que la fondamentale et la troisième harmonique sont

en opposition de phase, comme les courants i_a' et i_a'' .

Nous rappelons maintenant que, pour déterminer l'allure du signal de sortie, il faut faire la différence entre les courants i_a' et i_a'' . Il est toutefois possible de procéder autrement, car on peut faire la différence entre leurs fondamentales, leurs secondes, troisièmes et quatrièmes harmoniques, et faire la somme des résultats obtenus.

Etant donné que les secondes et quatrièmes harmoniques des courants i_a' et i_a'' sont en phase, leur différence est égale à zéro.

Par contre, les troisièmes harmoniques des courants i_a' et i_a'' sont en opposition de phase (voir figure 21-a). Il suffit donc d'ajouter la résultante de ces deux harmoniques, à la résultante des fondamentales des courants i_a' et i_a'' pour déterminer l'allure du signal de sortie (voir figure 21-b).

Evidemment, le signal de sortie est encore déformé, mais sa distorsion est due uniquement à la troisième harmonique. La seconde et la quatrième harmonique, bien qu'étant présentes dans les courants anodiques des deux tubes, s'annulent réciproquement.

Il convient de préciser également que, dans le signal de sortie d'un amplificateur de puissance, il existe non seulement la seconde, troisième et quatrième harmonique, mais aussi, la cinquième, sixième etc.. harmonique.

Toutefois, l'amplitude de ces dernières est très faible, et la distorsion qu'elles provoquent est négligeable.

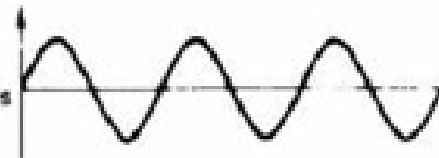
Rappelons également que les harmoniques dont la fréquence est donnée par la fréquence fondamentale multipliée par un nombre pair, (2 -4 etc...) sont appelées HARMONIQUES PAIRES.

Inversement, on appelle HARMONIQUES IMPAIRES, les harmoniques dont la fréquence est donnée par la fréquence de la fondamentale,

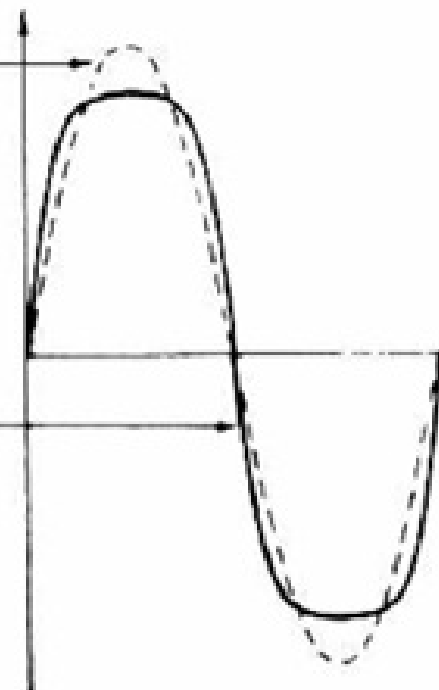
3ème harmonique du courant i_a 3ème harmonique du courant i_a' 

a)

Différence entre les troisièmes harmoniques

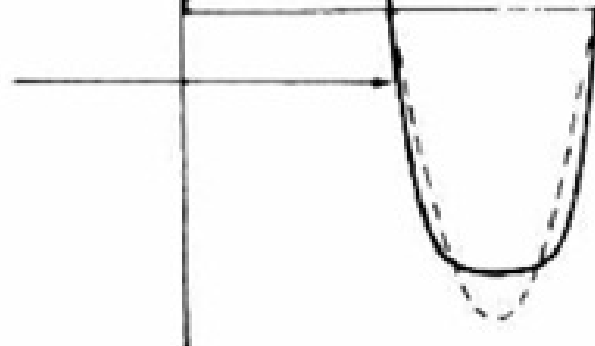


Différence entre les fondamentales



b)

Signal de sortie



ALLURE DU SIGNAL DE SORTIE

Figure 21

par un nombre impair (3 - 5 etc...).

Dans le cas d'un amplificateur de puissance "PUSH-PULL", toutes les harmoniques paires s'annulent, comme on l'a vu lors de l'étude de la seconde et quatrième harmonique.

Par contre, toutes les harmoniques impaires subsistent comme on l'a vu également lors de l'étude de la troisième harmonique. On doit donc retenir qu'un **AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE PUSH-PULL ELIMINE TOUTES LES HARMONIQUES PAIRES.**

Ainsi, avec ce type d'amplificateur, on obtient bien une puissance plus grande et une distorsion plus petite.

En effet, la puissance de sortie étant fournie par deux tubes, est le double de celle fournie par un amplificateur équipé d'un seul tube.

Quant à la distorsion, elle n'est due qu'aux harmoniques impaires, et son taux est inférieur à celui d'un amplificateur à tube unique qui amplifie aussi les harmoniques paires.

L'amplificateur de puissance "PUSH-PULL" présente également d'autres avantages par rapport à l'amplificateur muni d'un seul tube.

On a vu en effet, que les composantes continues des courants anodiques ne produisent aucun flux d'induction dans le noyau du transformateur de sortie.

Ce noyau peut donc être construit avec une section plus petite que celle nécessaire au transformateur de sortie d'un amplificateur simple, devant fournir la même puissance.

Dans ce dernier, la composante continue du courant anodique produisant un flux, il faut utiliser une section plus grande pour éviter la saturation du matériau ferromagnétique, quand le courant prend la valeur maximum.

Rappelons-nous que, dans les conditions de saturation, le flux dans le noyau n'augmente plus, même si le courant qui le produit continue à augmenter.

On comprend donc que, dans ce cas, le flux ne varie pas de la même façon que le courant anodique, et qu'il n'induit donc pas dans le secondaire, un courant de même allure que celle du signal appliqué. La saturation provoque alors des distorsions importantes.

Dans le cas de l'amplificateur PUSH-PULL, il suffit de dimensionner le noyau du transformateur de sortie, en tenant compte uniquement des composantes alternatives.

On doit également mentionner le fait qu'une éventuelle tension de ronflement, due à un faible filtrage HT, ne donne pas naissance à un ronflement dans la reproduction.

Cette tension de ronflement fait en effet varier de la même façon les courants anodiques, mais les effets de ceux-ci s'annulent dans le primaire du transformateur de sortie.

Voyons enfin comment doit être déterminé le rapport de transformation du transformateur de sortie.

Dans le cas d'un amplificateur simple, ce rapport se calcule en divisant la résistance de charge du secondaire par la résistance de charge du tube et en procédant ensuite à l'extraction de la racine carrée du quotient obtenu.

Dans un amplificateur "PUSH-PULL" où deux tubes sont utilisés, on considère la résistance de charge qu'il doit y avoir entre les anodes des deux tubes.

Cette résistance est indiquée par le constructeur des tubes, et sa valeur est toujours supérieure à celle qui est nécessaire pour un seul tube

(en général elle n'atteint pas toutefois le double de celle-ci).

La résistance de charge notée, on détermine le rapport de transformation en procédant de la même façon que pour l'amplificateur équipé d'un seul tube.

Observons également que, pour un amplificateur de puissance PUSH-PULL, on utilise aussi la polarisation automatique de grille (voir figure 22-a).

La prise centrale du secondaire du transformateur de couplage est reliée directement à la masse, et entre les cathodes des deux tubes et la masse, on trouve une résistance de polarisation et un condensateur de découplage.

La valeur de chaque résistance de cathode se calcule comme on l'a déjà vu pour l'amplificateur de puissance à tube unique.

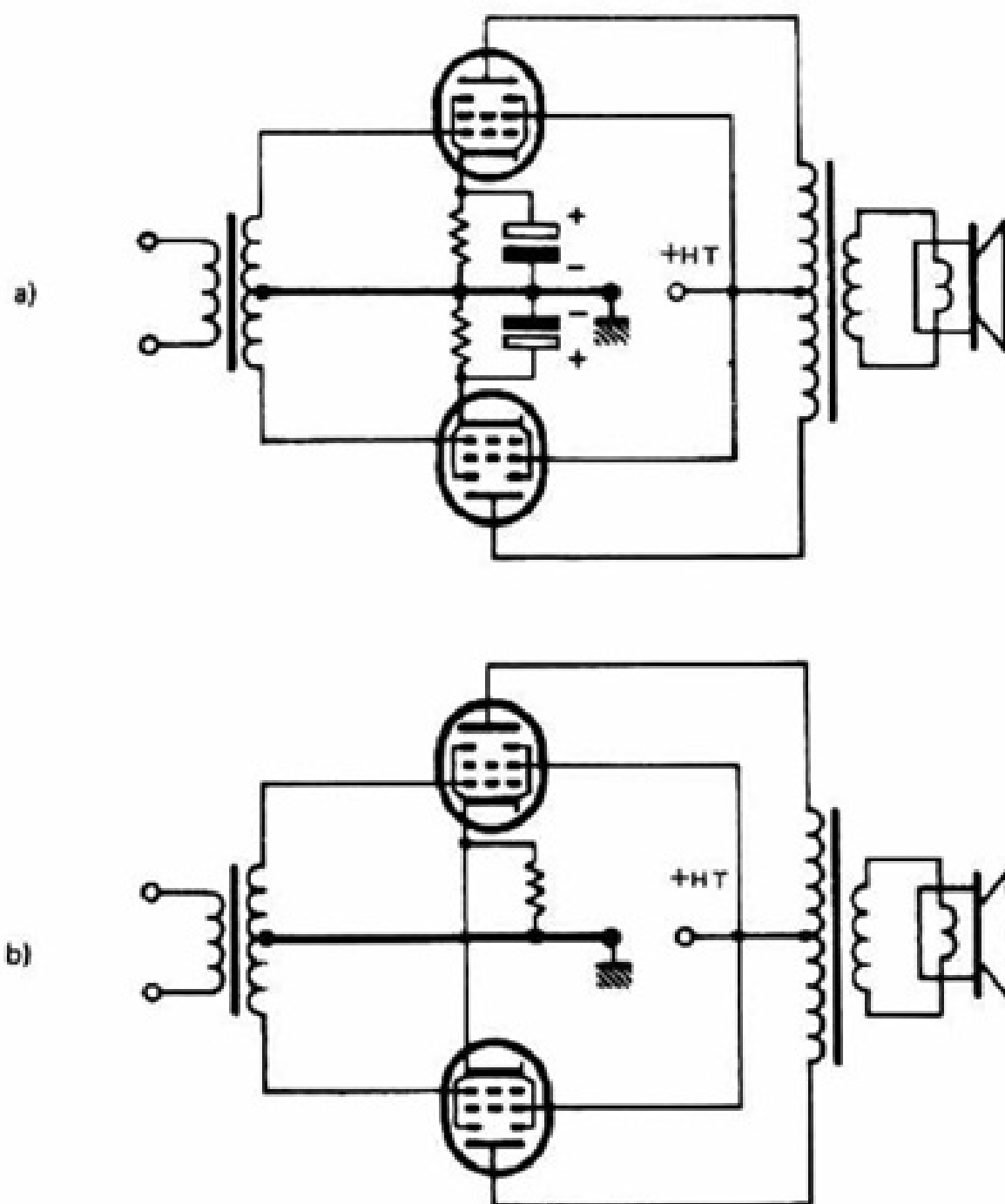
Cette polarisation automatique de grille peut aussi être obtenue comme indiqué figure 22-b, c'est-à-dire en reliant les deux cathodes entre elles, et en disposant une seule résistance entre les cathodes et la masse.

Cependant, cette résistance est parcourue par le courant anodique des deux tubes (de valeur deux fois plus élevée que celle du courant d'un seul tube).

Ainsi, pour provoquer la même chute de tension, cette résistance devra avoir une valeur deux fois plus petite que dans le cas précédent.

On doit noter d'autre part, l'absence du condensateur de découplage. Celui-ci n'est pas nécessaire, car le courant qui parcourt la résistance ne varie pas.

Celui-ci est égal à la somme des deux courants de grille écran (qui sont continus) et à la somme des deux courants anodiques qui ont l'allure montrée sur les figures 19-a et 19-b.



AMPLIFICATEURS PUSH-PULL AVEC POLARISATION DE GRILLE AUTOMATIQUE

Figure 22

Ces courants sont en opposition de phase, et leur somme reste donc constante. Lorsque l'un augmente, l'autre diminue et vice versa. Le courant dans la résistance des cathodes est donc rigoureusement continu.

En conclusion de cette leçon, il faut remarquer que l'amplificateur "PUSH-PULL" ainsi étudié est rarement utilisé. En effet, bien qu'il présente des avantages par rapport à l'amplificateur à un seul tube, il est plus coûteux, car il nécessite l'emploi de deux tubes et un transformateur de couplage et de sortie à prise centrale.

Il est cependant indispensable de connaître le fonctionnement de ce montage, car comme nous le verrons dans la prochaine leçon, cet amplificateur est largement utilisé quand on le fait fonctionner dans d'autres conditions qui permettent d'obtenir des avantages justifiant son coût supérieur.

NOTIONS A RETENIR

- Le TRANSFORMATEUR DE SORTIE d'un amplificateur de puissance a pour rôle D'ADAPTER l'impédance de sortie du tube à l'impédance de la charge.
- Le calcul du rapport de transformation de ce transformateur se fait à l'aide de la formule :

$$n = \sqrt{\frac{\text{impédance de charge}}{\text{impédance du tube}}}$$

EXEMPLE : si nous avons $Z_{\text{charge}} = 2,8 \, \Omega$
 et $Z_{\text{tube}} = 7000 \, \Omega$

Le rapport de transformation est de :

$$n = \sqrt{\frac{Z_c}{Z_t}} = \sqrt{\frac{2,8}{7000}} = 0,02$$

- On appelle RESISTANCE de charge, la résistance placée entre la source d'alimentation et l'anode d'un tube.
 Lorsque cette résistance est remplacée par un bobinage, on parle de l'IMPEDANCE DE CHARGE.
- La PUISSANCE DE SORTIE d'un amplificateur est la puissance transmise à la CHARGE (haut-parleur dans le cas d'un amplificateur B.F.) par l'intermédiaire du transformateur de sortie.
- Le RENDEMENT d'un AMPLIFICATEUR de puissance se calcule à l'aide de la formule :

$$R = \frac{P_s}{P_a} \times 100 \text{ avec}$$

P_s = Puissance de sortie en watts.

P_a = Puissance fournie par l'alimentation en watts.

EXEMPLE : $P_s = 6$ watts $P_a = 60$ watts

$$R = \frac{P_s}{P_a} \times 100 = \frac{6}{60} \times 100 = 10 \%$$

- La **DISTORSION** provient des fréquences **HARMONIQUES** du signal de sortie.
Celui-ci se compose en effet de la **FONDAMENTALE** et des **HARMONIQUES 2 - 3 - 4** (on dit **SECONDE, TROISIEME ET QUATRIEME HARMONIQUE**).
Au delà de la quatrième **HARMONIQUE**, l'amplitude est très faible et n'a donc qu'une influence négligeable.
- Une **DISTORSION** de 5 % est pratiquement inaudible et acceptable jusqu'à 10 %.
- L'**AMPLIFICATEUR PUSH-PULL** (ou **AMPLIFICATEUR SYMETRIQUE**) élimine **TOUTES LES HARMONIQUES PAIRES**.
Ainsi, avec ce type d'amplificateur on peut obtenir une **PUISSANCE IMPORTANTE** et une **DISTORSION REDUITE** (le double de la puissance maximum obtenue avec un seul tube).
L'**AMPLIFICATEUR PUSH-PULL** présente d'autre part l'avantage d'être insensible à la **TENSION DE RONFLEMENT** de la H.T.



EXERCICE DE REVISION SUR LA THEORIE 18

- 1) A quoi servent les amplificateurs de puissance utilisés dans les récepteurs ?
- 2) Qu'entend-on par impédance de charge d'un tube amplificateur de puissance ?
- 3) Comment calcule-t-on le rapport de transformation d'un transformateur de sortie ?
- 4) Quel est le rôle du transformateur de sortie ?
- 5) Comment calcule-t-on la puissance de sortie d'un amplificateur de puissance ?
- 6) En augmentant l'amplitude du signal appliqué à l'entrée d'un amplificateur de puissance, le rendement augmente-t-il ou diminue-t-il ?
- 7) Quel effet produit sur l'auditeur une distorsion inférieure à 5% ?
- 8) Comment applique-t-on aux grilles des deux tubes d'un amplificateur push-pull deux tensions en opposition de phase ?
- 9) Les courants anodiques des deux tubes d'un amplificateur push-pull sont-ils en phase entre eux ou bien en opposition de phase ?
- 10) Quand un amplificateur push-pull est dans les conditions de repos, quel flux d'induction y-a-t-il dans le noyau de son transformateur de sortie ?
- 11) Comment peut-on déterminer l'allure du signal à la sortie d'un amplificateur push-pull ?

- 12) Quelle particularité présente l'amplificateur push-pull par rapport aux harmoniques du courant anodique ?
- 13) Quels avantages présente un amplificateur push-pull par rapport à un amplificateur avec un seul tube ?
- 14) Comment calcule-t-on le rapport de transformation du transformateur de sortie d'un amplificateur push-pull ?



REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR LA THEORIE 17

- 1) Les trois classes fondamentales d'Amplification sont : la classe A, la classe B et la classe C.
- 2) Le rôle du condensateur de découplage de la grille écran est de maintenir la tension d'écran à une valeur constante, c'est-à-dire d'éliminer les effets de variation du courant.
- 3) En classe B, le point de fonctionnement est pris au CUT-OFF.
- 4) En classe C, le point de fonctionnement est pris au delà du CUT-OFF.
- 5) Non, car en classe C, seule une partie de l'alternance du signal appliqué rend le tube conducteur.
- 6) Avec le CUT-OFF à -20 V et une tension de polarisation $V_g = -10\text{ V}$, le tube fonctionne en classe A si le signal d'entrée est de 2 volts.
- 7) Avec le CUT-OFF à -15 V et une polarisation $V_g = -15\text{ V}$, le tube fonctionne en classe B2 si le signal appliqué est de 17 Volts.
- 8) Avec $V_e = 1\text{ V}$ et $V_s = 10\text{ V}$, l'AMPLIFICATION est de :

$$A = \frac{V_s}{V_e} = \frac{10}{1} = 10$$

Pour l'exemple ci-dessus, le GAIN en tension est de :

$$G = 20 \log \frac{V_s}{V_e} = 20 \log \frac{10}{1} = 20 \log \text{ de } 10$$

$$\text{soit } 20 \times 1 = 20 \text{ dB}$$