

THEORIE

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

Jusqu'à maintenant, nous n'avons vu que les circuits amplificateurs pris individuellement.

Or, dans de nombreux cas, le gain fourni par un seul étage est insuffisant, ce qui rend nécessaire l'emploi de plusieurs tubes en série.

Il convient donc d'examiner les types de liaisons entre étages et les charges d'utilisation de ceux-ci.

I - LIAISONS R.C.

Dans le cas le plus courant, la liaison entre deux ou plusieurs étages, se fait à l'aide d'un circuit R.C.

La figure 1 représentant deux étages amplificateurs avec triodes, illustre ce type de liaison (on dit aussi couplage entre étages). Entre les bornes A et B, on applique le signal d'entrée.

Cette tension variable est transmise sur la grille et plus précisément se retrouve aux bornes de la résistance R_{g1} .

On comprend aisément la nécessité de cette résistance reliant la grille à la masse.

EN EFFET, EN SUPPOSANT QUE R_g N'EXISTE PAS, IL N'EST

PAS POSSIBLE D'APPLIQUER UN SIGNAL SUR LA GRILLE, LA TENSION D'ENTREE ETANT APPLIQUEE ENTRE C1 ET LA MASSE.

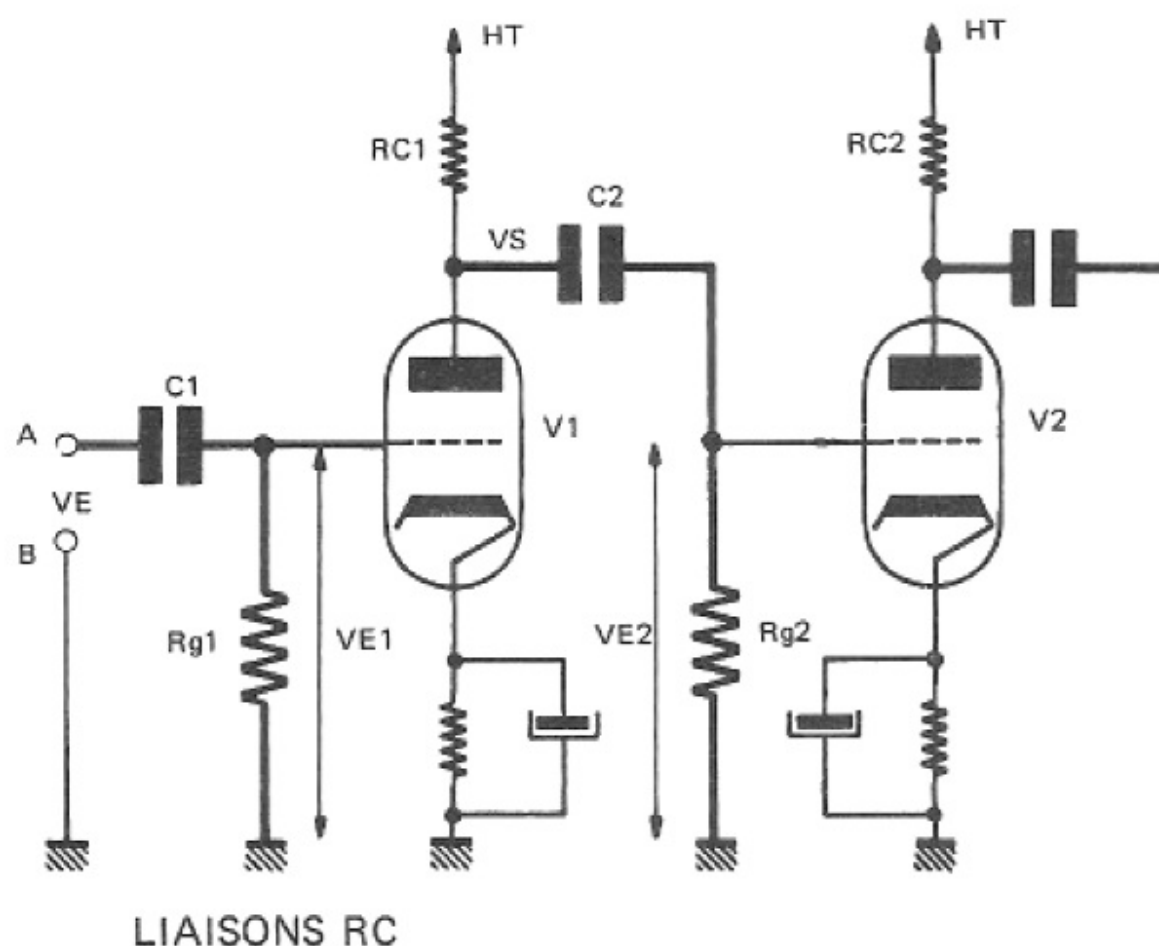


Figure 1

Or, une tension et dans le cas général un signal quelconque, ne peut apparaître qu'ENTRE DEUX POINTS d'un circuit. On appelle d'ailleurs précisément GRILLE EN L'AIR une grille n'étant pas reliée à la masse.

En supposant maintenant que la grille est reliée directement à la masse par un conducteur, il n'est pas possible non plus d'appliquer une tension sur cette électrode.

Il est évident, en effet, que dans ce cas, le potentiel entre grille et masse sera toujours nul.

Pour la première supposition (absence de R_g), on peut dire que la résistance est infinie. Pour la seconde au contraire, il s'agit d'une résistance nulle.

Entre ces deux extrêmes, il existe donc une valeur à adopter.

Celle-ci est habituellement indiquée par le constructeur et dans le cas d'un amplificateur, est comprise entre 0,3 et 2 M Ω (sauf dans le cas d'une polarisation par fuite de grille, où l'on peut trouver une valeur atteignant 10 M Ω).

Quant à C1 représentant à proprement parler, l'élément de liaison, il doit transmettre le signal sans l'atténuer.

Sa valeur est donc liée à la fréquence la plus basse à appliquer sur la grille.

Pour un amplificateur HF, on trouve pour C1 des valeurs de quelques centaines de picofarads.

Pour les basses fréquences, ces valeurs sont de l'ordre de plusieurs dizaines de nanofarads.

Pour en revenir à C1, précisons encore que sa valeur peut être approximativement calculée à l'aide de la formule suivante :

$$C = \frac{1}{F \times R_g} \quad \text{avec}$$

C en Farad

F en Hertz

R_g en Ohm

Exemple : soit un amplificateur BF dont la fréquence minimum de travail est de 50 Hz et dont la résistance de grille R_g est de 500 k Ω (cas le plus courant).

C_1 aura pour valeur :

$$C = \frac{1}{F \times R_g} = \frac{1}{50 \times 500\,000} = 40 \text{ nF}$$

Ce qui vient d'être dit pour R_{g1} et C_1 reste valable pour C_2 et R_{g2} .

Soulignons cependant que dans ce dernier cas, C_2 a un double rôle :

- a) bloquer la composante continue HT
- b) transmettre le signal au second tube.

Il faut remarquer que le signal d'entrée de V_2 n'est autre que le signal de sortie de V_1 , c'est-à-dire V_s .

Dans le montage de la figure 1, LES CHARGES de V_1 et V_2 sont constituées par les résistances R_{C1} et R_{C2} .

On trouve des CHARGES RESISTIVES et des LIAISONS RC dans tous les amplificateurs de tension non sélectifs (amplificateurs apériodiques), c'est-à-dire dans tous les amplificateurs travaillant sur une gamme de fréquences données.

Exemple : Un montage BF, devant amplifier toutes les fréquences comprises entre 50 et 15 000 Hz par exemple, est un amplificateur apériodique.

I - 1 - LIAISONS PAR TRANSFORMATEURS

Dans certaines applications, l'amplificateur ne travaille pas sur une bande de fréquences, mais sur une fréquence unique.

Dans ce cas, la liaison est assurée par un transformateur accordé sur la fréquence de travail. Le primaire du transformateur, constitue la charge du tube précédent et le secondaire assure la liaison avec le tube qui suit.

Le schéma de ce type de montage est représenté figure 2.

Cette méthode de liaison par transformateur est utilisée aussi bien en HF qu'en BF.

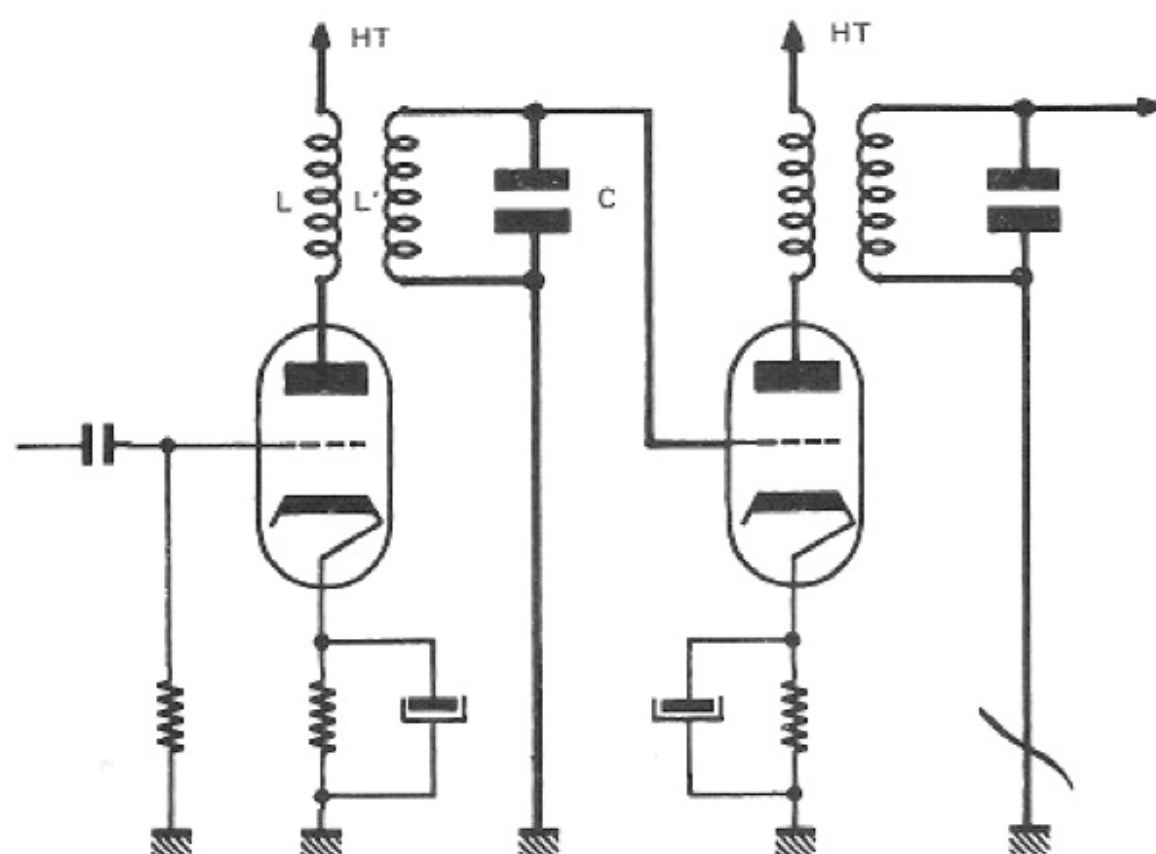
Dans le cas de la basse fréquence, on utilise un transformateur à circuit magnétique (figure 3).

En HF, on peut avoir un transformateur avec primaire et secondaire accordés ou un transformateur avec seulement le secondaire accordé (cas de la figure 2).

Il faut noter que le transformateur a le même rôle que le condensateur de liaison.

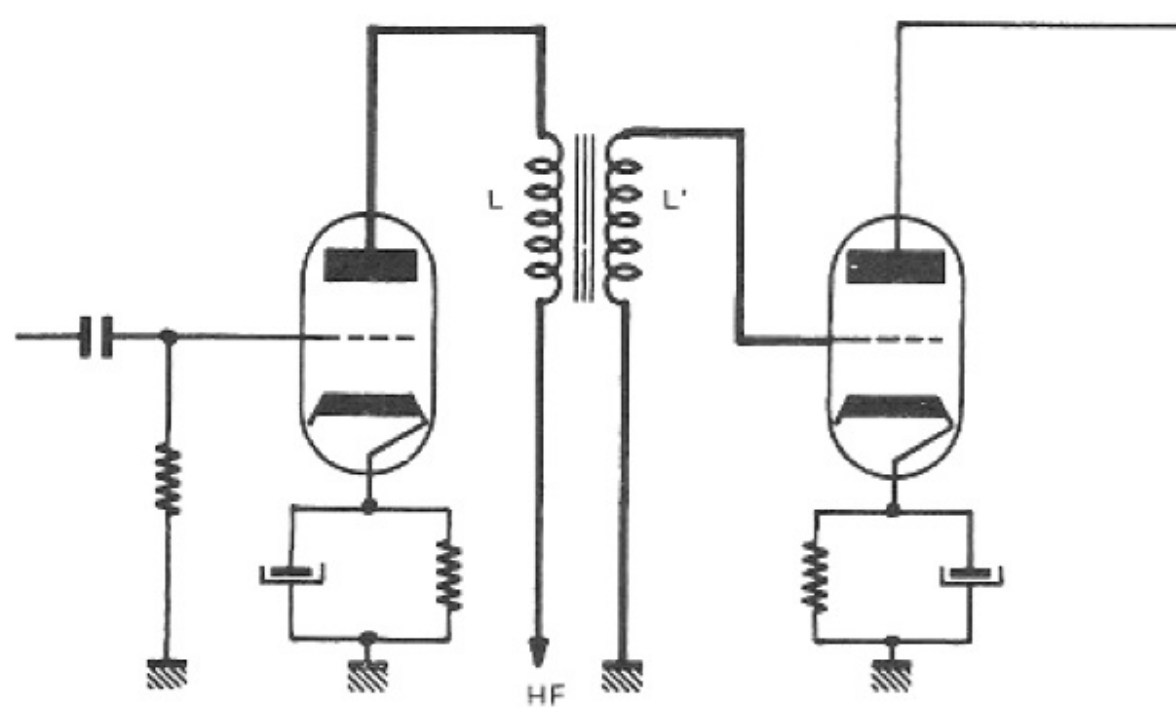
En effet, d'une part, il bloque la composante continue qui n'est pas transmise au secondaire et d'autre part, IL TRANSMET la tension de sortie (tension variable) par induction du primaire au secondaire.

Dans le cas d'un TRANSFORMATEUR ACCORDE, la fréquence de travail est liée à la self-induction de L et à la capacité de C.



LIAISON PAR TRANSFORMATEUR ACCORDE (HF)

Figure 2



LIAISON PAR TRANSFORMATEUR (BF)

Figure 3

Nous avons alors :

$$F = \frac{1}{2 \pi \sqrt{LC}} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} F = \text{Fréquence de travail en Hertz} \\ L = \text{Valeur de l'inductance en Henry} \\ C = \text{Capacité en Farad} \end{array}$$

En supposant par exemple que sur le schéma de la figure 2 on ait $L' = 170 \mu\text{H}$ et $C = 150 \text{ pF}$, la fréquence d'accord sera de :

$$F = \frac{1}{2 \pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \pi \sqrt{170 \cdot 10^{-6} \times 150 \cdot 10^{-12}}} = 1000 \text{ 000 Hz}$$

soit 1000 kHz.

Selon le DEGRE DE COUPLAGE du primaire par rapport au secondaire, c'est-à-dire en pratique, suivant la distance qui sépare ces deux enroulements, la largeur de la bande de fréquence sera plus ou moins importante.

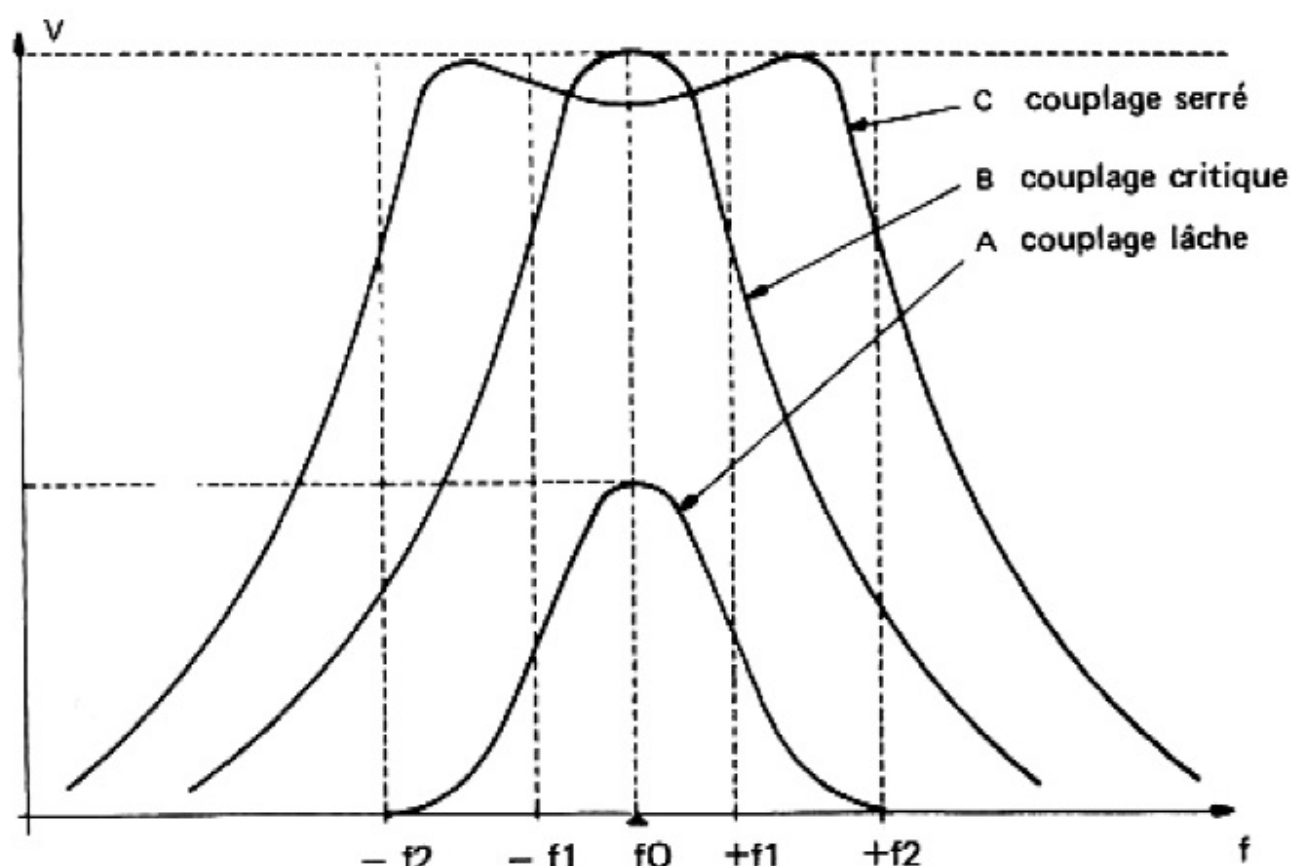
La figure 4 met en évidence la largeur de la bande par rapport à la fréquence centrale d'accord.

Quand, entre les deux enroulements du transformateur la distance est telle, que seule une petite partie des lignes d'induction embrasse les spires, on parle d'un COUPLAGE LACHE (courbe A).

La tension maximum correspond à la fréquence d'accord F_0 , mais pour les fréquences voisines ($-f_1 + f'_1$ etc...), la tension est très réduite.

En réduisant la distance séparant les deux enroulements, on obtient la courbe B correspondant au COUPLAGE CRITIQUE.

La tension maximum possible correspond toujours à la fréquence f_0 mais son amplitude est beaucoup plus grande que dans le cas précédent.



COURBES DE RESONANCE D'UN TRANSFORMATEUR AVEC
PRIMAIRE ET SECONDAIRE ACCORDES

Figure 4

Ainsi, avec un **COUPLAGE CRITIQUE**, la bande de fréquence amplifiée est plus large que dans le cas d'un couplage **LACHE**.

Sur la figure 4, on voit en effet que l'amplitude pour les fréquences $-f_1$ et $+f_1$ de la courbe relative au couplage **CRITIQUE**, est égale à l'amplitude de la fréquence f_0 de la courbe relative au **COUPLAGE LACHE**.

En diminuant encore la distance séparant les deux enroulements (courbe C), on remarque que la tension, après avoir atteint un maximum, diminue puis recommence à augmenter, présentant ainsi deux maximums symétriques par rapport à la fréquence f_0 .

Le couplage permettant d'obtenir cette bande de fréquence est dit **COUPLAGE SERRE** ou **COUPLAGE ETROIT**.

La bande passante est d'autant plus large que la distance entre les enroulements est petite.

En conclusion, pour n'amplifier qu'une fréquence déterminée, on adopte le **COUPLAGE LACHE**, pour amplifier une petite bande de fréquence, on utilise le **COUPLAGE CRITIQUE** et pour une plus large bande, le **COUPLAGE SERRE**.

La largeur de bande dépend évidemment du facteur de surtension du circuit (plus celui-ci est élevé, plus les flancs de la courbe sont raides, donc plus la bande est étroite) et aussi de la fréquence centrale de travail f_0 .

Par rapport à la courbe de résonance, le facteur de surtension Q est donné par la formule :

$$Q = \frac{f_0}{(-f_1) - (+f'_1)}$$

Donc la largeur de bande est à valeur égale de Q , proportionnellement plus grande pour une fréquence f_0 élevée, que pour une fréquence f_0 plus basse.

1 - 2 - CHARGE INDUCTIVE

Jusqu'à maintenant, nous n'avons examiné que des amplificateurs comportant une **CHARGE RESISTIVE** ou par **TRANSFORMATEUR**.

Dans certains cas, cependant, la charge peut être constituée par un **BOBINAGE**.

Le terme de **BOBINAGE** mérite quelques explications.

En effet, par métonymie la plupart des techniciens parlent d'une **INDUCTANCE**, désignant ainsi l'objet par son effet.

En toute logique, on devrait écrire "une bobine de self induction"; mais cette appellation est bien longue.

Dans d'autres cas, on parle de **SELF**, toujours pour désigner une bobine de self induction.

Nous ne voulons pas introduire ici une discussion étymologique, mais plus simplement attirer votre attention sur le fait que vous rencontrerez souvent, dans la lecture d'ouvrages techniques, les mots **INDUCTANCE**, **SELF** ou **BOBINE** pour désigner le même composant.

Rappelons pour mémoire que :

BOBINE = composant

INDUCTANCE = qualité de ce composant (L)

REACTION INDUCTIVE = effet de ce composant ($L\omega$).

Pour en revenir aux amplificateurs avec charge inductive, ceux-ci comportent une bobine entre anode et + HT.

Le schéma se présente comme sur la figure 5.

Cet étage, appelé également **AMPLIFICATEUR A IMPEDANCE**, offre l'avantage d'une amplification élevée, le tube pouvant travailler avec de fortes tensions plaque (la résistance ohmique de l'enroulement étant en effet très faible).

En électronique industrielle, on trouve ce genre de montage dans les circuits amplificateurs commandant un relais par exemple (figure 6).

Dans ce cas, le contact du relais peut être en position travail (con-

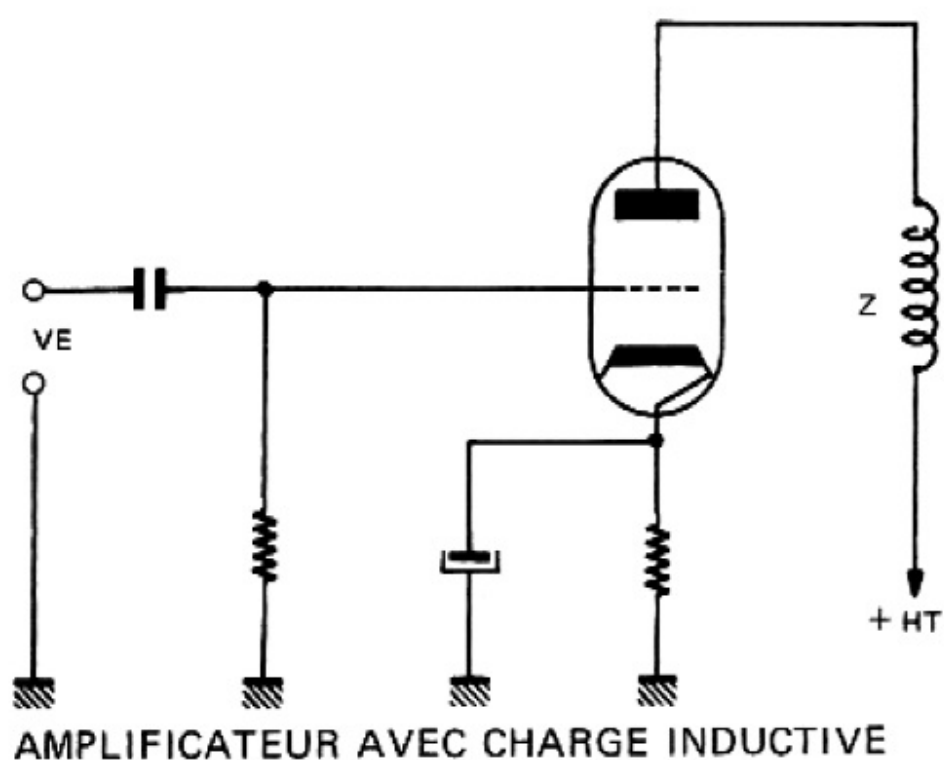


Figure 5

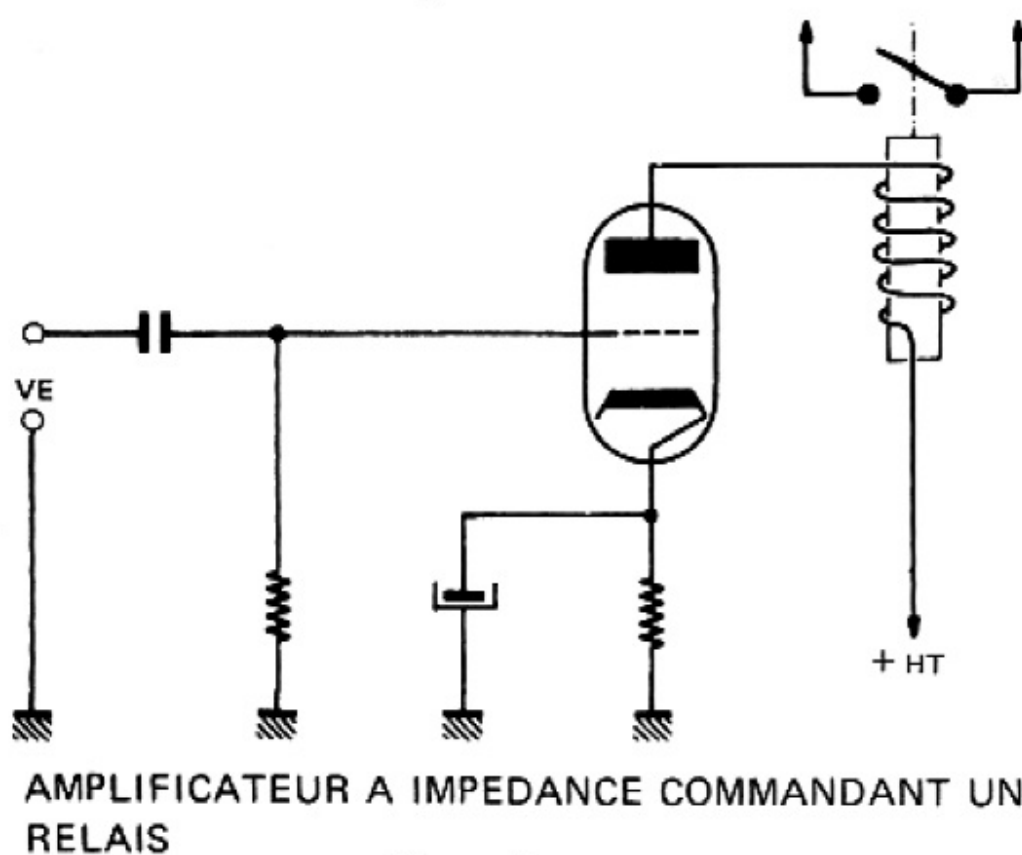


Figure 6

tact collé) lorsque le tube est au repos. Une impulsion négative sur la grille amène le tube au CUT-OFF et l'interruption du courant provoque le déclenchement du relais qui coupe ainsi le contact.

Inversement, le tube peut être normalement polarisé au CUT-OFF (relais non excité) et une impulsion positive sur la grille, peut alors commander la fermeture du contact.

II - LE NEUTRODYNAGE

Nous avons vu que les tubes triodes présentent le défaut d'une capacité parasite GRILLE-ANODE (abréviation C_{ga}), rendant ceux-ci inutilisables normalement aux hautes fréquences.

Il existe une solution pour neutraliser cette capacité : le NEUTRODYNAGE.

Avant de voir ce circuit, rappelons brièvement les effets néfastes de la capacité C_{ga} .

Considérons l'amplificateur HF représenté figure 7. Sur ce schéma, on a représenté en pointillé entre la grille et l'anode, la capacité parasite.

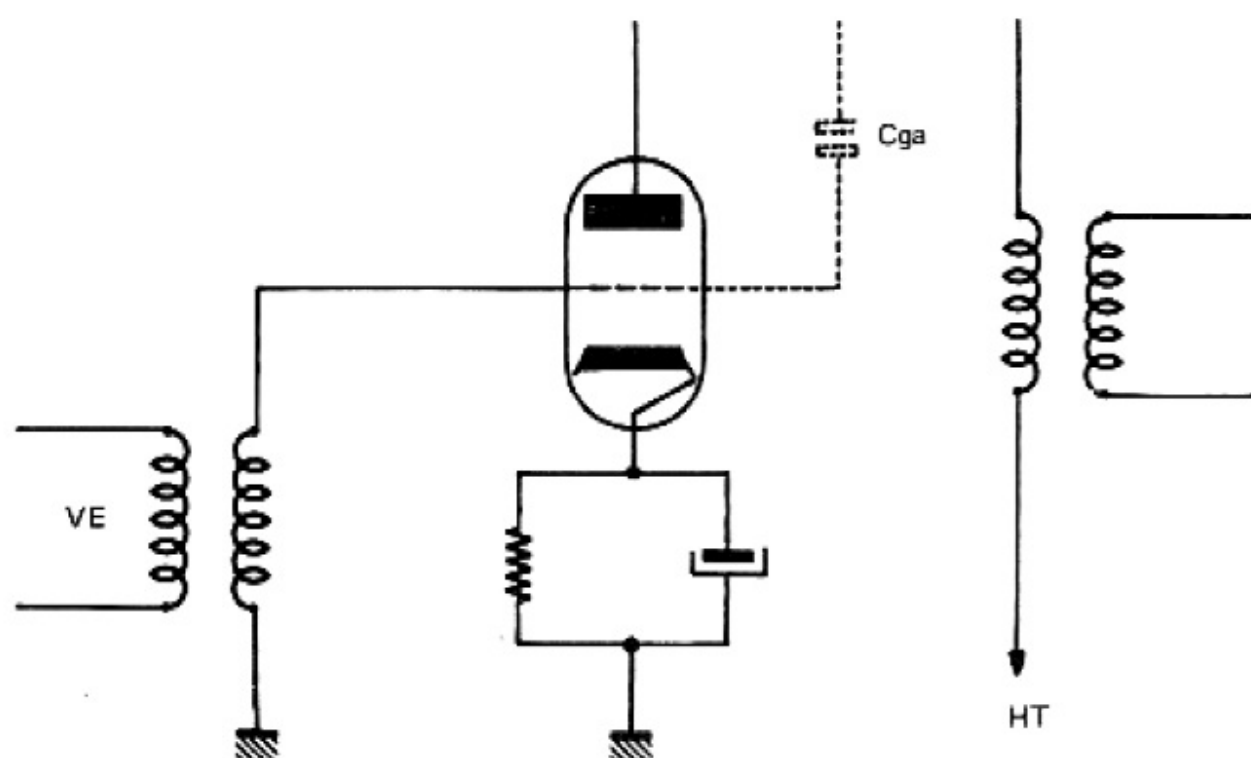
Par effet de C_{ga} , le signal appliqué sur la grille et amplifié par le tube, donc, présent sur l'anode, est réinjecté sur la grille.

L'EFFET EST D'AUTANT PLUS IMPORTANT QUE LA FREQUENCE DE TRAVAIL EST ELEVEE, LA REACTANCE CAPACITIVE DIMINUANT LORSQUE LA FREQUENCE AUGMENTE ($Z_c = 1/C\omega$).

Cette capacité étant de l'ordre de quelques picofarads, son INFLUENCE EST NEGLIGEABLE AUX BASSES FREQUENCES.

Par contre, aux fréquences élevées, le signal réinjecté est notablement plus important que le signal d'entrée VE, ce qui signifie que le tube est alors "pilote" par le signal provenant de Cga.

Pour remédier à ce défaut, il suffit cependant d'insérer entre la grille et l'anode, UN CIRCUIT de NEUTRODYNAGE, dont le rôle est d'APPLIQUER SUR LA GRILLE, UN SIGNAL DE MEME VALEUR QUE CELUI REINJECTE PAR Cga, MAIS EN OPPOSITION DE PHASE AVEC CELUI-CI.



CAPACITE GRILLE-ANODE DE LA TRIODE

Figure 7

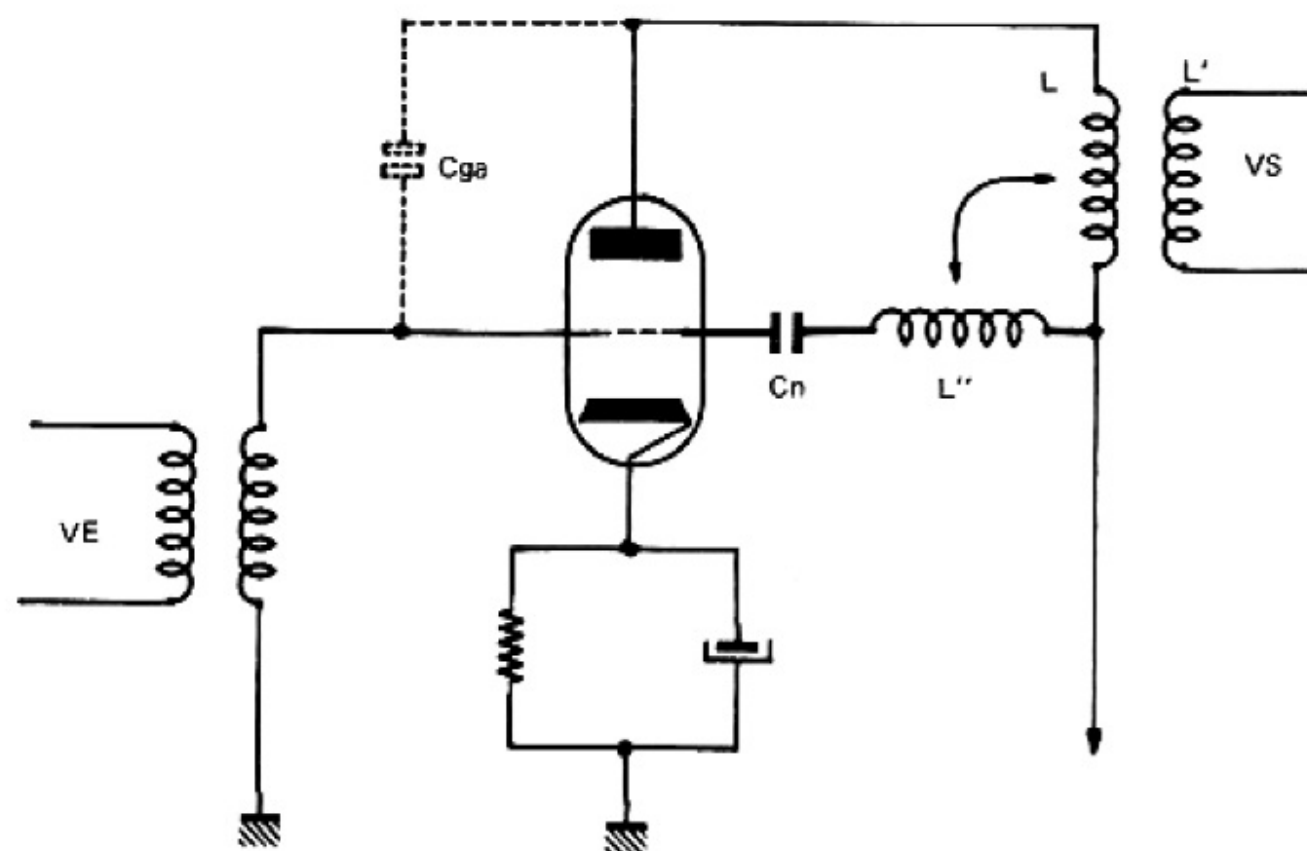
Ainsi, la résultante de ces deux signaux étant nulle, la capacité C_{ga} n'a plus aucune influence sur le fonctionnement du tube.

Un circuit de NEUTRODYNAGE EST REPRESENTÉ figure 8.

Par induction, le primaire du transformateur de sortie L , induit une tension dans L'' . Le sens du bobinage de L'' est tel, que la tension induite est en opposition de phase, par rapport à celle présente sur l'anode. Le condensateur C_n transmet cette tension sur la grille.

Ainsi, sur cette électrode, nous avons une tension C_{ga} et en opposition de phase, une tension C_n .

La résultante de ces deux tensions est donc nulle, et le tube fonctionne alors comme si la capacité C_{ga} n'existait pas.

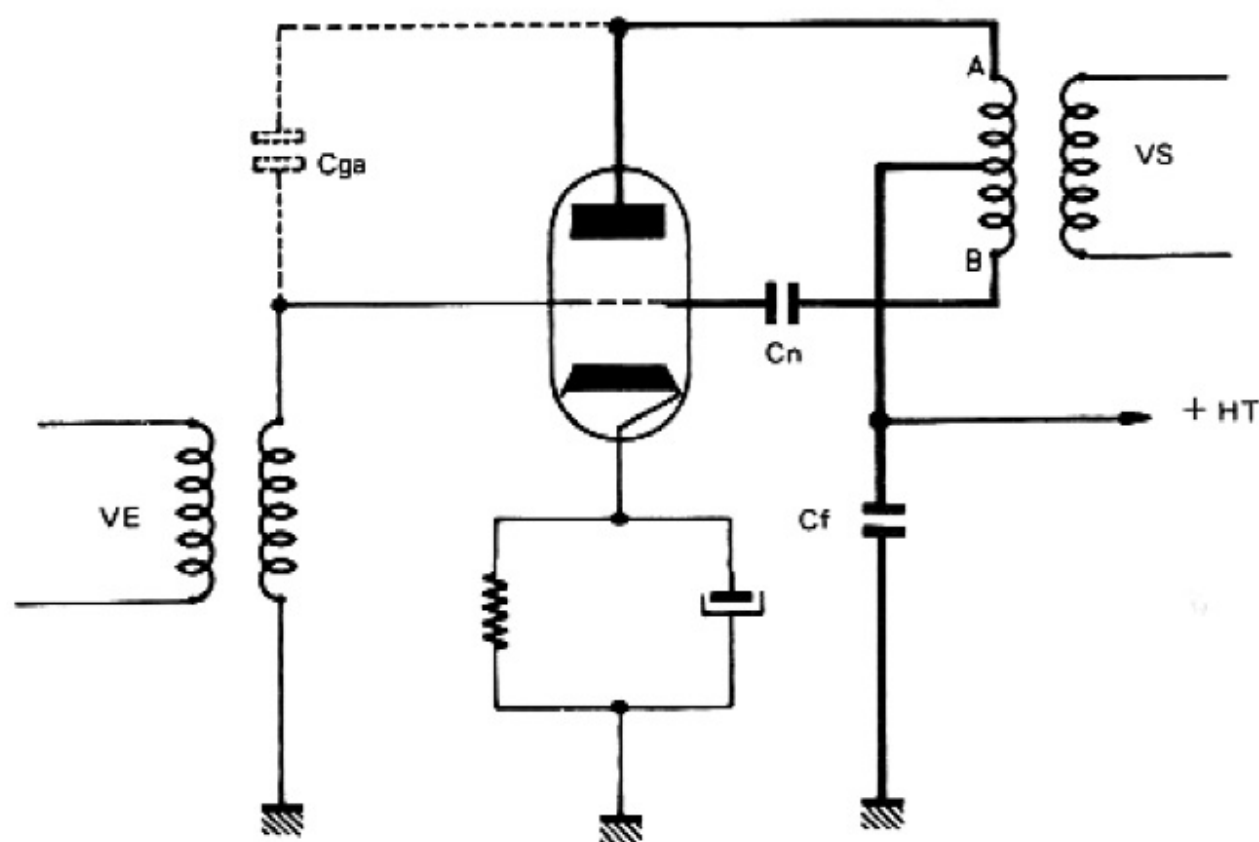


CIRCUIT DE NEUTRODYNAGE

Figure 8

Un autre type de montage très utilisé en HF pour le neutrodynage est représenté figure 9.

Dans ce montage, le point milieu sur le primaire fait apparaître entre les extrémités A et B, deux tensions en opposition de phase (comme nous l'avons vu lors de l'étude des montages redresseurs double alternance).



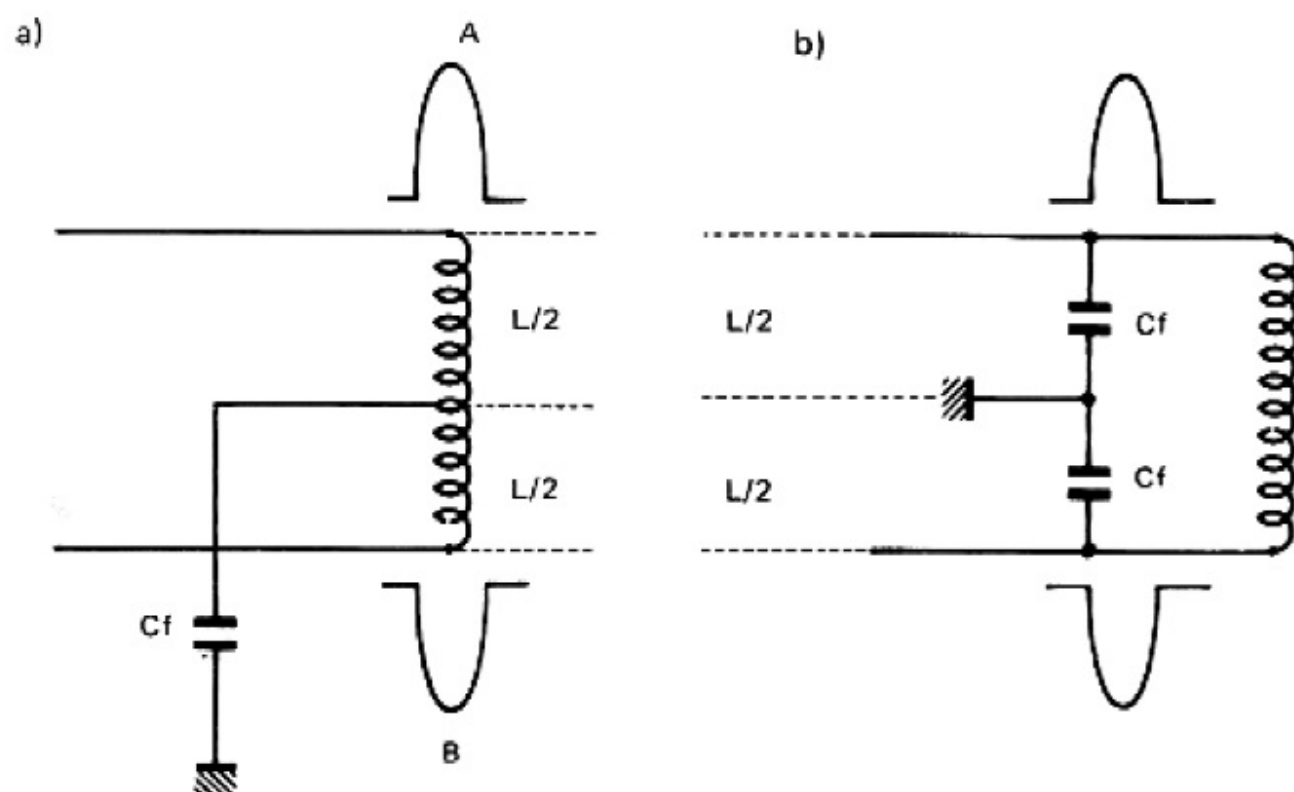
NEUTRODYNAGE AVEC TRANSFORMATEUR A POINT MILIEU

Figure 9

Le condensateur C_{ga} applique sur la grille la tension du point A et le condensateur C_n , la tension du point B.

Ces deux tensions sont de valeur égale mais opposée, donc s'annulent réciproquement.

La figure 10-a met en évidence l'opposition de phase existant entre les deux tensions.



NEUTRODYNAGE

Figure 10

On peut, par ailleurs, créer un point milieu en adoptant le montage de la figure 10-b.

Dans les deux cas, la présence des condensateurs C_f (CONDENSATEUR DE FUITE), sert à éliminer la tension HF, de façon à ce que la valeur de celle-ci soit nulle au point milieu.

III - INVERSEURS DE PHASE (ETAGES DEPHASEURS)

La liaison par transformateur dans le cas d'un amplificateur PUSH-PULL, comme nous l'avons vu dans la dernière leçon, n'est pratiquement plus utilisée (figure 11).

Le transformateur est en effet un composant volumineux, lourd et coûteux.

Cependant dans le montage PUSH-PULL le transformateur sert non seulement à COUPLER LES ETAGES, mais aussi à fournir DEUX SIGNAUX EN OPPOSITION DE PHASE.

Pour éliminer le transformateur de couplage, il est donc nécessaire de réaliser un circuit permettant d'obtenir deux signaux en opposition de phase de même amplitude (comme ceux fournis par les deux moitiés du secondaire du transformateur).

Etudions en conséquence la figure 12-a où est reporté l'amplificateur de la figure 11, sans le transformateur de couplage.

Notons que le primaire de ce transformateur a été remplacé par la résistance R_a , reliée à l'anode du tube V_1 , de façon à constituer la charge anodique.

Les deux moitiés du secondaire du transformateur de couplage ont été remplacées par les résistances $R_{g'}$ et $R_{g''}$ de façon à relier les grilles de commande des tubes V_2 et V_3 à la masse.

Le problème qui se pose maintenant est le suivant : ne possédant que le signal fourni par le préamplificateur, il faut appliquer à l'étage final deux tensions $v_{g'}$ et $v_{g''}$ d'amplitude identique et en opposition de phase.

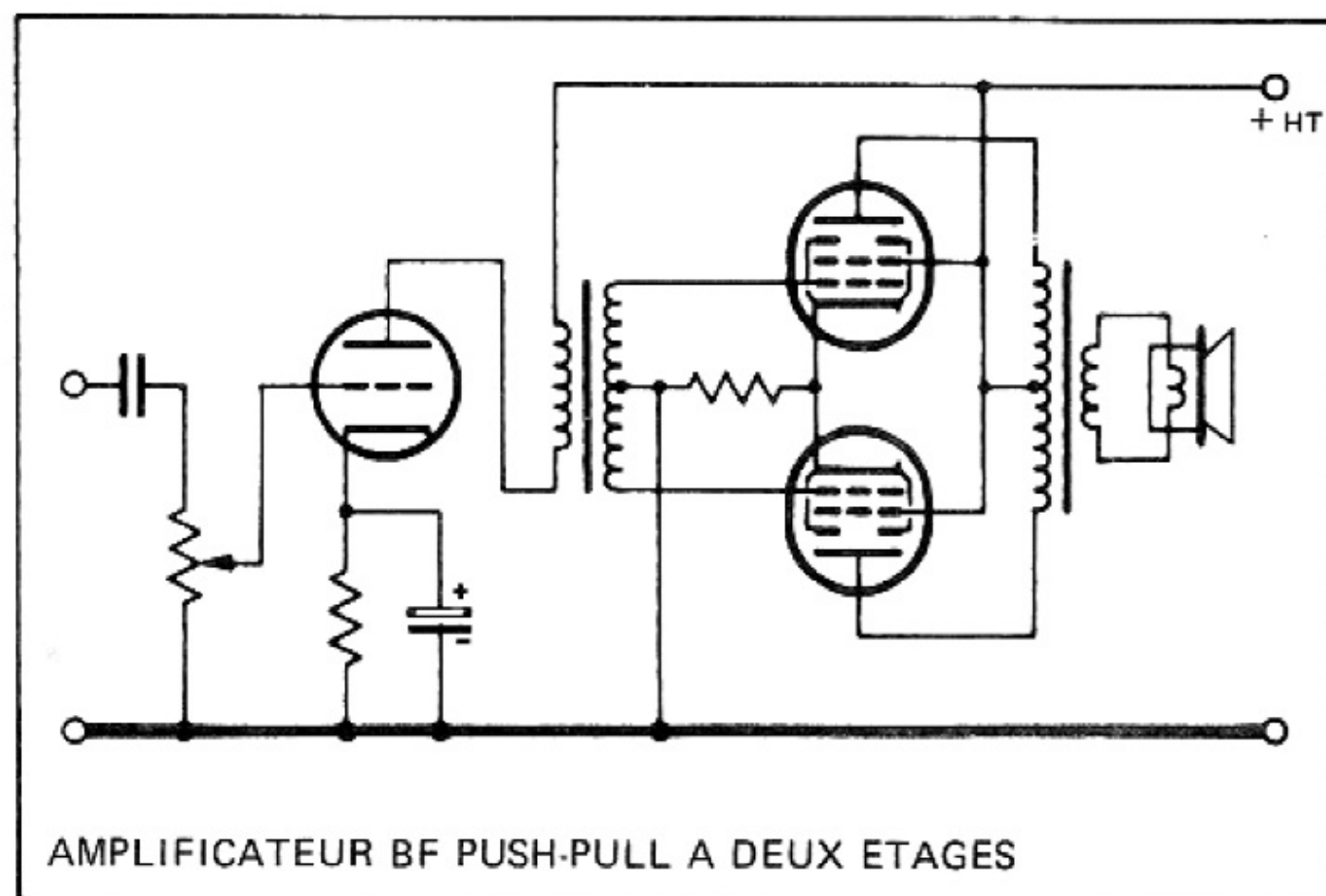


Figure 11

L'une de ces deux tensions (v_g' par exemple) peut provenir de l'anode du tube V_1 . Pour cela, il suffit de relier cette anode à la grille de V_2 par l'intermédiaire d'un condensateur C' (figure 12 b).

Pour obtenir la tension v_g'' nécessaire au tube V_3 , il faut utiliser un tube supplémentaire (V_4 de la figure 12-c).

Le circuit d'alimentation de ce tube ne diffère pas de celui d'un amplificateur de tension.

Il est constitué par une résistance anodique et par une résistance cathodique qui permet d'obtenir la tension de polarisation.

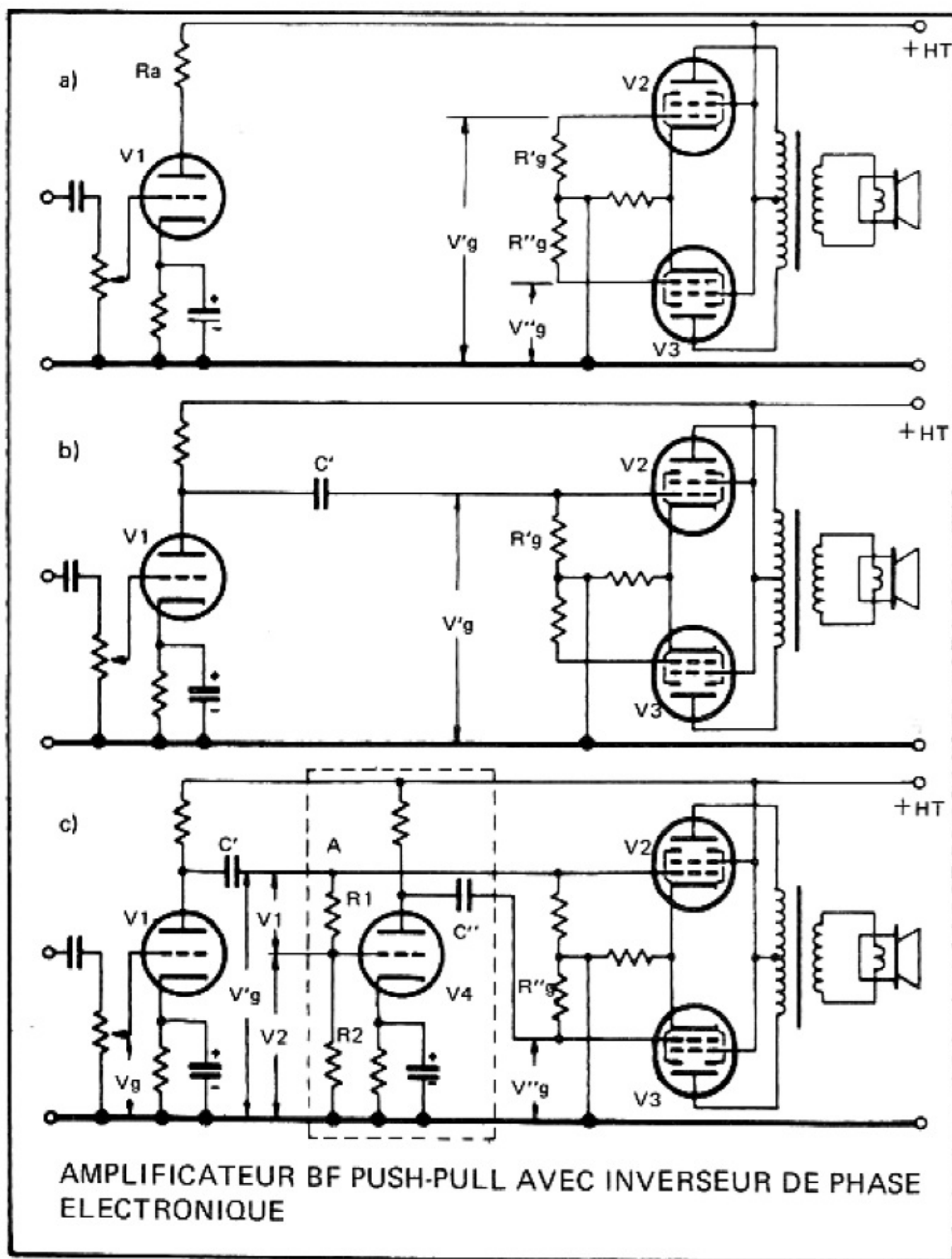


Figure 19

En ce qui concerne le signal, nous voyons qu'une partie de la tension v_g' est appliquée au tube V_4 .

En effet, cette tension présente au point indiqué par la lettre A sur la figure 12-c, est appliquée aux deux résistances R_1 et R_2 reliées en série.

La tension v_g' se subdivise donc entre ces deux résistances, produisant une tension V_1 aux extrémités de R_1 et une tension V_2 aux extrémités de R_2 .

Seule la tension V_2 est appliquée au tube V_4 , R_2 étant reliée entre la grille et la masse.

Au tube V_4 est ainsi appliquée une tension inférieure à la tension v_g' .

La tension v_2 est amplifiée par le tube V_4 , dont l'anode est reliée par l'intermédiaire du condensateur C'' à la grille de commande v_3 .

Nous rappelons que cette tension doit avoir la même valeur maximum que la tension v_g' et qu'elle doit être en opposition de phase avec elle.

Ces conditions sont ici respectées, comme nous allons le voir en nous référant à la figure 13.

L'amplitude de la tension v_g appliquée au tube V_1 est reportée sur le diagramme de la figure 13-a, sur lequel on voit que sa valeur est de 0,4 volt.

En supposant que le tube V_1 ait un gain de tension $G = 25$, on obtient en sortie une tension de $0,4 \times 25 = 10$ volts.

CETTE TENSION DE SORTIE EST EN OPPOSITION DE PHASE AVEC LA TENSION APPLIQUEE A L'ENTREE DE V_1 .

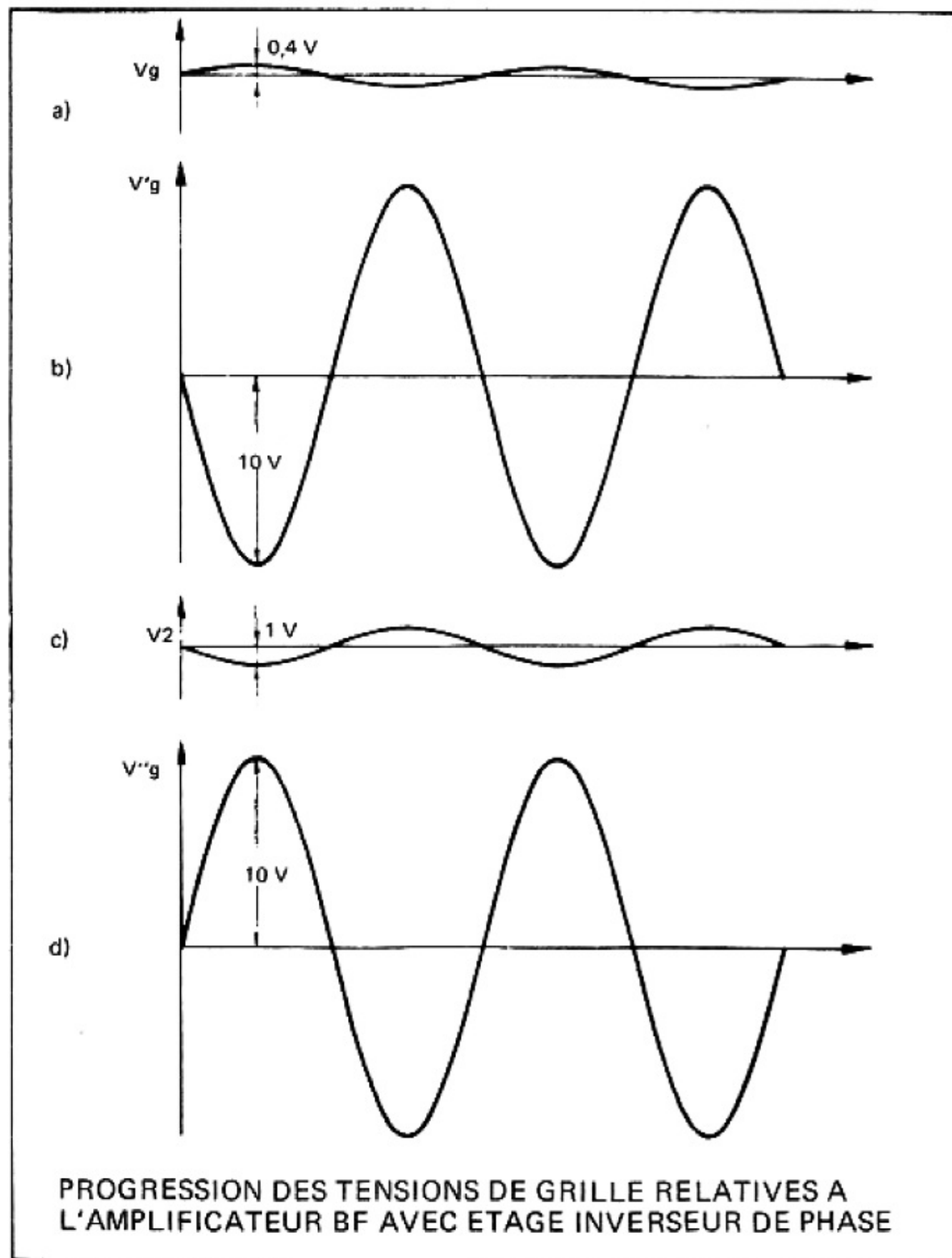


Figure 13

En considérant comme négligeable la réaction du condensateur C' , la tension v_g'' appliquée au tube V_3 a une valeur maximum de 10 volts (voir figure 13-b).

La tension v_2 que l'on applique au tube V_4 faisant partie de la tension v_g' a une amplitude propre (résultant du pont diviseur R_1/R_2).

Sur la figure 13-c, on a indiqué pour v_2 , une valeur maximum de 1 volt. On peut obtenir cette valeur au moyen d'une résistance R_1 neuf fois supérieure à R_2 , de façon à ce que la tension aux extrémités de R_1 ait une valeur neuf fois supérieure à la tension aux extrémités de R_2 .

Cette tension de 1 volt est amplifiée par le tube V_4 , et si le gain de celui-ci est de $G = 10$, on obtient en sortie une tension de 10 volts de valeur maximum.

CETTE TENSION DE SORTIE EST EN OPPOSITION DE PHASE AVEC LA TENSION APPLIQUEE A L'ENTREE DE V_2 .

En considérant comme négligeable la réactance du condensateur C'' , la tension v_g'' appliquée au tube V_3 a une valeur maximum de 10 volts (voir figure 13-d).

En comparant maintenant la tension v_g' avec la tension v_g'' , on voit que les valeurs maximum sont identiques (10 volts) et qu'elles sont en opposition de phase.

Remarquons que si on appliquait au tube V_4 la tension entière v_g' d'une valeur maximum de 10 volts, on obtiendrait en sortie une tension d'une valeur maximum de 100 volts.

C'est pour cette raison que la tension v_g' est réduite avant d'être appliquée à l'entrée du tube V_4 .

On comprend donc que le signal est appliqué au tube V_4 , non pour obtenir son amplification, mais seulement pour inverser sa phase.

Pour cette raison, le tube V_4 est appelé INVERSEUR DE PHASE ou DEPHASEUR).

Le circuit que nous venons de décrire présente cependant un inconvénient : en raison du vieillissement progressif des tubes, leur gain diminue et les tensions de sortie diminuent aussi.

Mais l'usure due au vieillissement diffère d'un tube à l'autre, et dans ces conditions, les tensions v_g' et v_g'' n'ont plus la même valeur.

Il se produit alors un DESEQUILIBRE DU CIRCUIT.

Pour éviter cet inconvénient, on a mis au point d'autres types d'inverseurs de phase électronique.

Un de ceux-ci est représenté figure 14. Pour en comprendre le fonctionnement, étudions le schéma de la figure 14-a.

On voit immédiatement qu'il s'agit d'un étage amplificateur de tension qui présente la particularité de ne pas avoir un condensateur relié en parallèle sur la résistance cathodique R_k .

Comme nous le savons, le rôle de ce condensateur est de maintenir la tension constante entre cathode et masse, quand le courant anodique varie.

L'absence du condensateur entraîne ainsi une variation de tension aux extrémités de la résistance R_k . Cette variation est proportionnelle à la variation anodique, et il se superpose à la tension continue entre cathode et masse, une composante alternative v_k .

Si la tension v_g appliquée à l'entrée de l'étage a la forme indiquée figure 14-a à droite, la tension v_a aura la forme indiquée sur cette même figure. Elle sera en OPPOSITION DE PHASE avec v_g .

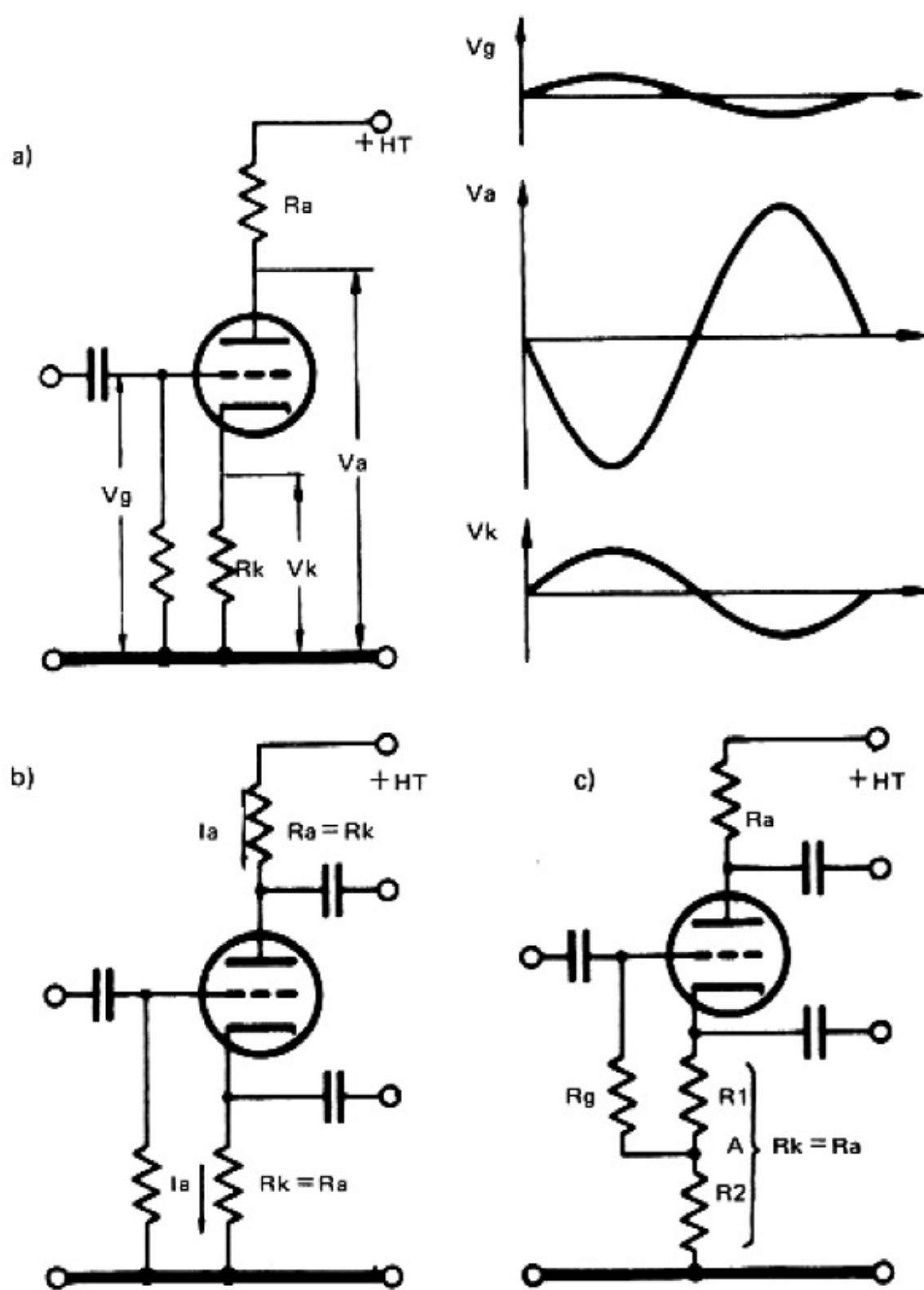


Figure 14

En effet, durant la demi-période pendant laquelle la tension v_g est positive, la grille devient moins négative et le courant anodique augmente.

EN RAISON DE CETTE AUGMENTATION DU COURANT, LA TENSION ENTRE ANODE ET MASSE DIMINUE, ET LA TENSION ENTRE CATHODE ET MASSE AUGMENTE.

La composante alternative V_a est donc négative et la composante alternative v_k est positive.

Pendant la demi-période suivante, le phénomène s'inverse. La grille devient plus négative et le courant anodique diminue.

EN RAISON DE CETTE DIMINUTION DU COURANT, LA TENSION ENTRE ANODE ET MASSE AUGMENTE, ET LA TENSION ENTRE CATHODE ET MASSE DIMINUE.

La composante alternative v_a est donc positive, et la composante alternative v_k est négative.

Ainsi, on peut obtenir entre cathode et masse, une tension v_k qui est en opposition de phase avec la tension v_a .

Ces deux tensions ne sont pourtant pas aptes à commander un étage final PUSH-PULL, car elles n'ont pas les mêmes valeurs maximales.

On peut surmonter cette difficulté en utilisant une résistance cathodique R_k de même valeur que la résistance anodique R_a (voir figure 14-b).

En effet, ces deux résistances étant traversées par le même courant i_a , donneront naissance à deux tensions de valeur égale.

Il convient de remarquer que l'on peut considérer la résistance R_a comme étant reliée entre anode et masse EN CE QUI CONCERNE LE SIGNAL.

Le positif HT comporte en effet un condensateur de filtrage (non indiqué sur la figure) de valeur capacitive élevée, et celui-ci présente une réactance négligeable pour le signal.

Les résistances R_a et R_k employées dans ce circuit inverseur de phase, ont une valeur généralement comprise entre 20 et 100 $k\Omega$.

Mais nous devons rappeler que la résistance R_k doit aussi servir à fournir la tension de polarisation nécessaire au tube, et qu'une valeur aussi élevée donnerait lieu à une tension de polarisation tellement élevée que le tube serait bloqué.

Pour résoudre le problème, on relie entre la cathode du tube et la masse, deux résistances en série (voir figure 14-c).

Pour ces deux résistances, on adopte des valeurs telles que leur somme est égale à la valeur de la résistance R_a de la figure 14-b. On obtient encore ainsi, la même tension que celle que l'on obtient entre l'anode et la masse.

Sur la figure 14-c, on voit que la résistance de grille R_g n'est plus reliée entre grille et masse, mais entre la grille et le point A (qui correspond à la jonction des deux résistances).

Avec ce procédé, la différence de potentiel entre grille et cathode est égale à la tension présente aux extrémités de la résistance R_1 .

Il suffit donc de choisir, pour cette résistance, la valeur permettant d'obtenir la tension normale de polarisation.

Soulignons enfin que le tube inverseur de phase ne fournit aucun gain de tension, car les signaux obtenus entre l'anode et la masse et entre la cathode et la masse ont pratiquement la même amplitude que celle du signal d'entrée.

Nous verrons pourquoi dans le prochain chapitre.

Ce type d'inverseur de phase est appelé **INVERSEUR CATHODYNE**.

Sur la figure 15, on voit comment cet inverseur (dessiné à l'intérieur du rectangle en pointillé) est relié à l'amplificateur BF.

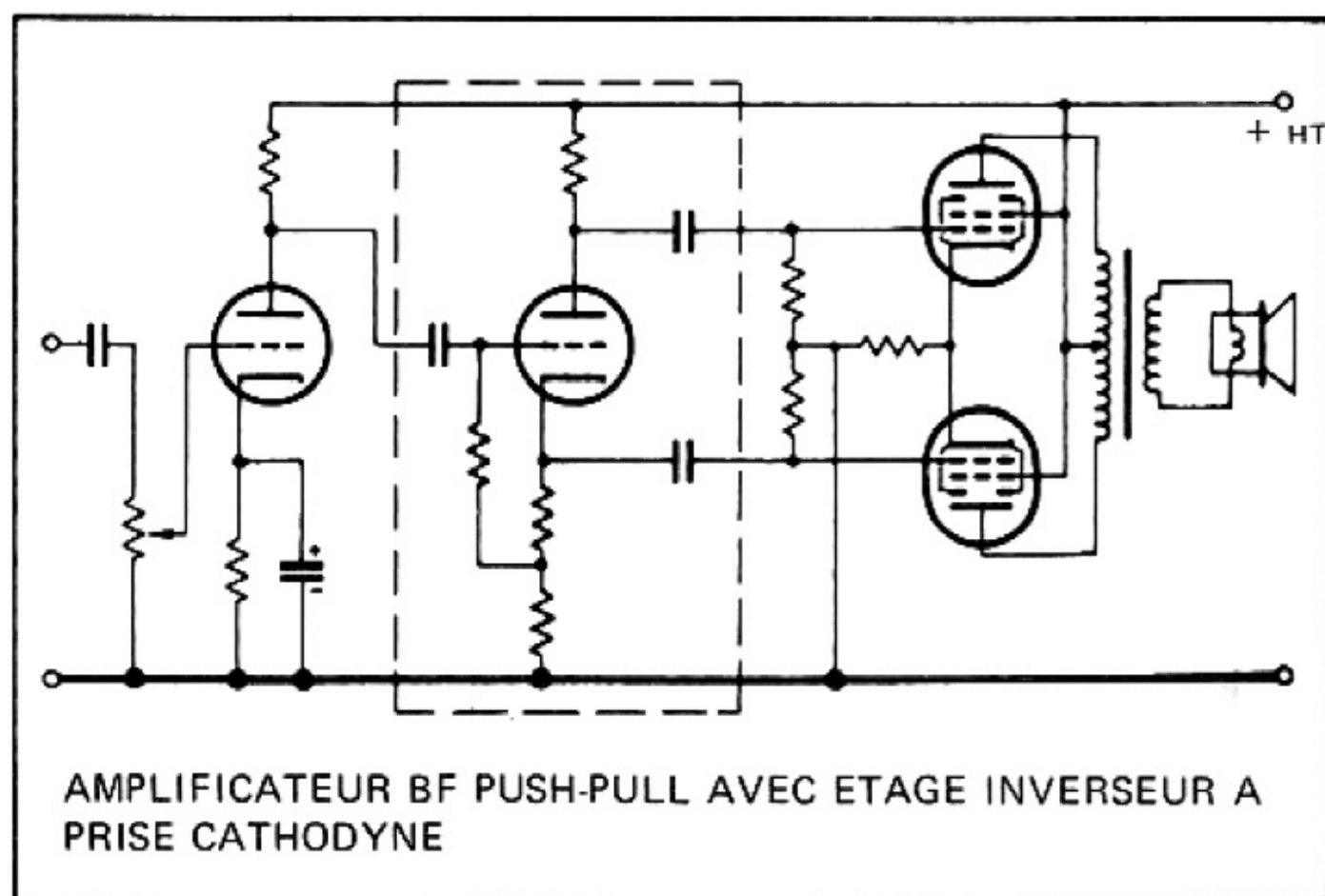


Figure 15

Cet inverseur reçoit le signal en provenance du préamplificateur, et délivre à son tour deux signaux en opposition de phase, d'amplitude identique. Ces deux signaux sont ensuite appliqués à l'étage final PUSH-PULL.

Avec ce montage, le vieillissement progressif du tube ne produit pas le **DESEQUILIBRE** de l'étage final.

En effet, quel que soit le degré d'usure du tube, le courant ano-

dique déterminera toujours une chute de tension de valeur égale aux bornes des résistances R_a et R_k .

Cette valeur sera plus ou moins élevée selon l'émission électronique, mais la valeur de la tension entre v_a et masse et v_k et masse sera identique.

Etudions enfin un autre type d'inverseur de phase appelé INVERSEUR A COUPLAGE CATHODIQUE.

Cette appellation provient du fait que les deux tubes qui constituent l'inverseur ont en commun la résistance cathodique (voir figure 16-a).

C'est par cette résistance que la variation du signal est transférée d'un tube à l'autre.

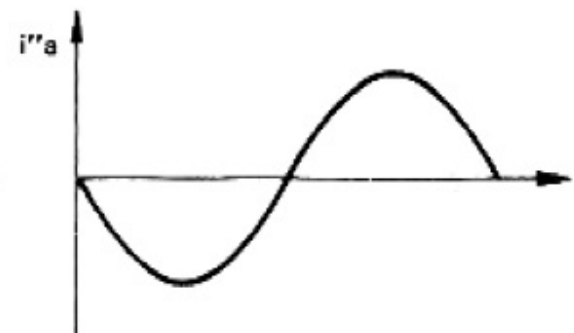
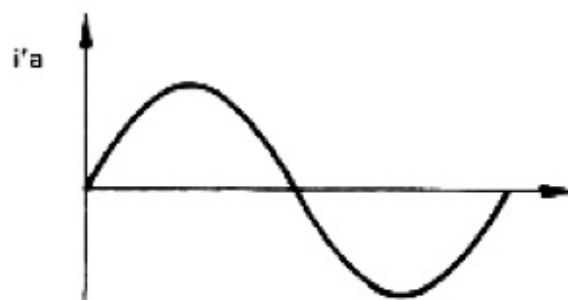
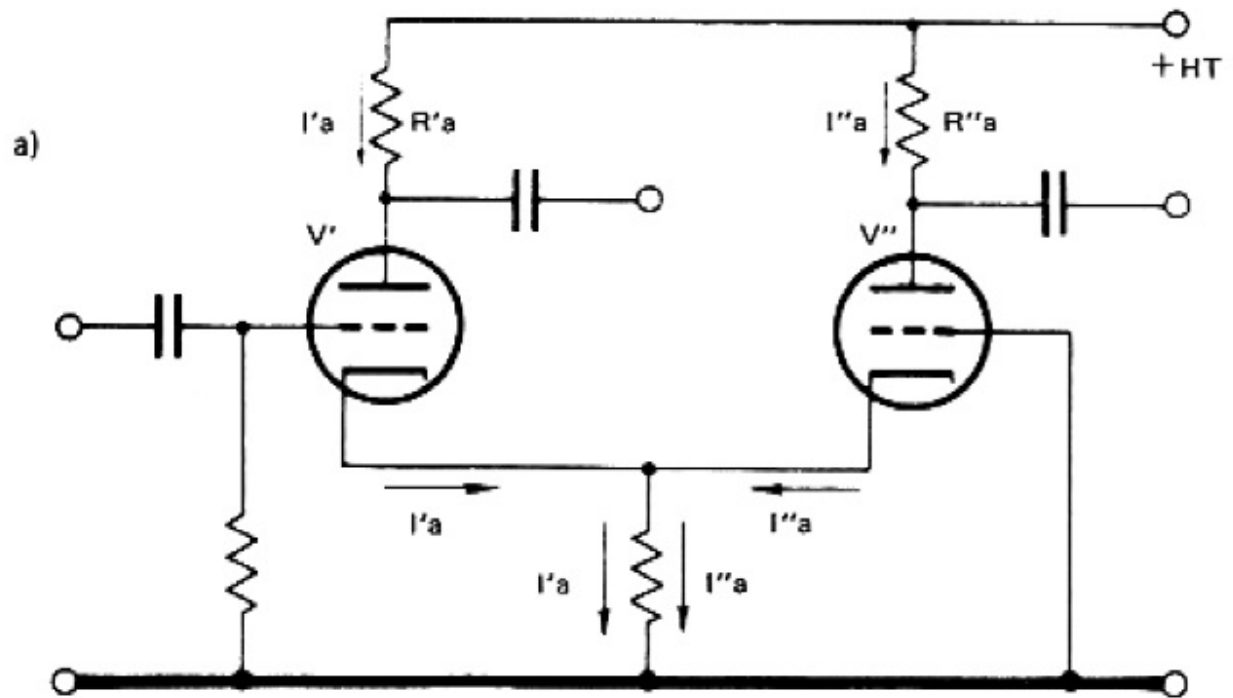
Nous pouvons d'ailleurs voir sur la figure 16-a, que le signal ne peut être appliqué qu'au tube V' , car la grille du tube V'' est reliée directement à la masse.

Pour comprendre le fonctionnement du circuit, supposons que le signal appliqué au tube V' fasse varier le courant anodique i_a' de façon à ce que sa composante alternative i_a' ait l'allure indiquée par le diagramme de la figure 16-b.

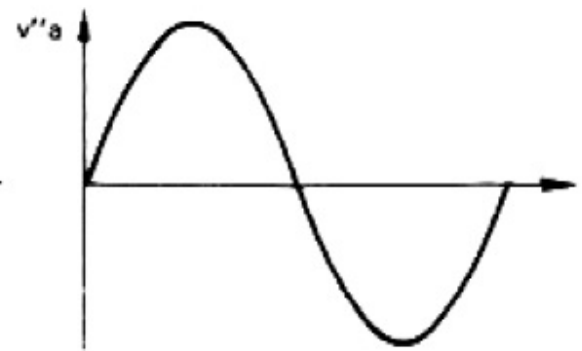
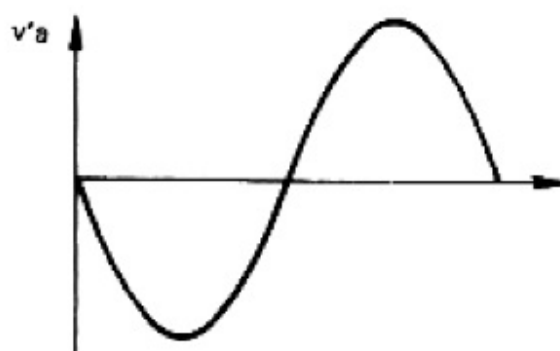
Pendant la demi-période positive, le courant anodique augmente et la chute de tension que ce courant produit aux extrémités de la résistance cathodique qu'il traverse augmente également.

En conséquence, le potentiel de la cathode du tube V'' augmente aussi.

La grille de ce tube étant reliée à la masse, son potentiel reste fixe, mais le potentiel de la cathode ayant augmenté, cela signifie que celle-ci est devenue plus positive par rapport à la grille.



b)



INVERSEUR DE PHASE A COUPLAGE CATHODIQUE

Comme le courant dépend du potentiel de la grille par rapport à la cathode, le tube V'' se comporte comme si le potentiel de la cathode était resté constant et si le potentiel de la grille avait diminué (c'est-à-dire grille plus négative par rapport à la cathode).

IL EN RESULTE UNE DIMINUTION DU COURANT ANODIQUE i_a'' du tube V'' .

Le contraire se produit pendant la demi-période négative du courant i_a' . Dans ce cas, la chute de tension produite par le courant i_a aux extrémités de la résistance cathodique diminue, et le potentiel de la cathode diminue également.

Le tube se comporte alors comme si le potentiel de la grille augmentait (grille moins négative par rapport à la cathode).

IL EN RESULTE UNE AUGMENTATION DU COURANT ANODIQUE i_a'' DU TUBE V'' .

En conclusion, le courant anodique i_a'' est en opposition de phase avec le courant i_a' .

Les composantes alternatives des courants i_a' et i_a'' et de la tension v_a' et v_a'' ont donc l'allure montrée sur la figure 16-b.

En utilisant pour cet inverseur, deux tubes du même type, et en insérant dans le circuit anodique de chacun d'eux, deux résistances (R_a' et R_a'') de même valeur, on obtient deux tensions v_a' et v_a'' d'amplitude égale et en opposition de phase.

A la différence des inverseurs de phase étudiés précédemment, l'inverseur à couplage cathodique amplifie le signal qui lui est appliqué.

Etant donné que le signal appliqué au tube V'' est également transféré au tube V' , le gain de tension de chaque tube est égal à la moitié du gain que fournirait le tube V' s'il fonctionnait seul.

La figure 17 représente un amplificateur PUSH-PULL complet, équipé d'un inverseur à couplage cathodique.

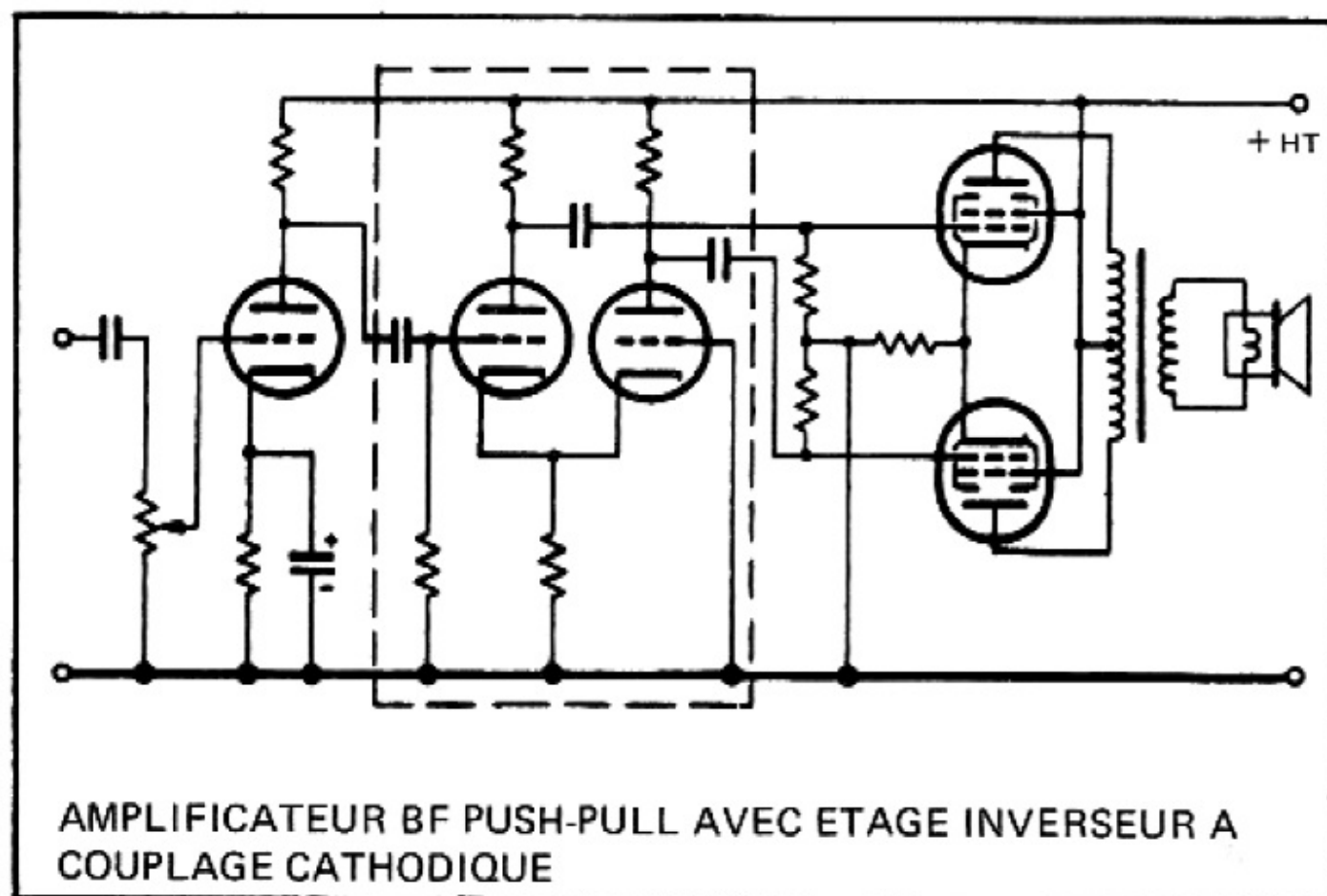


Figure 17

IV - MONTAGES TYPES FONDAMENTAUX

Dans le chapitre précédent, vous avez vu qu'il est possible de prélever le SIGNAL DE SORTIE d'un tube, non seulement sur L'ANODE mais aussi sur la cathode.

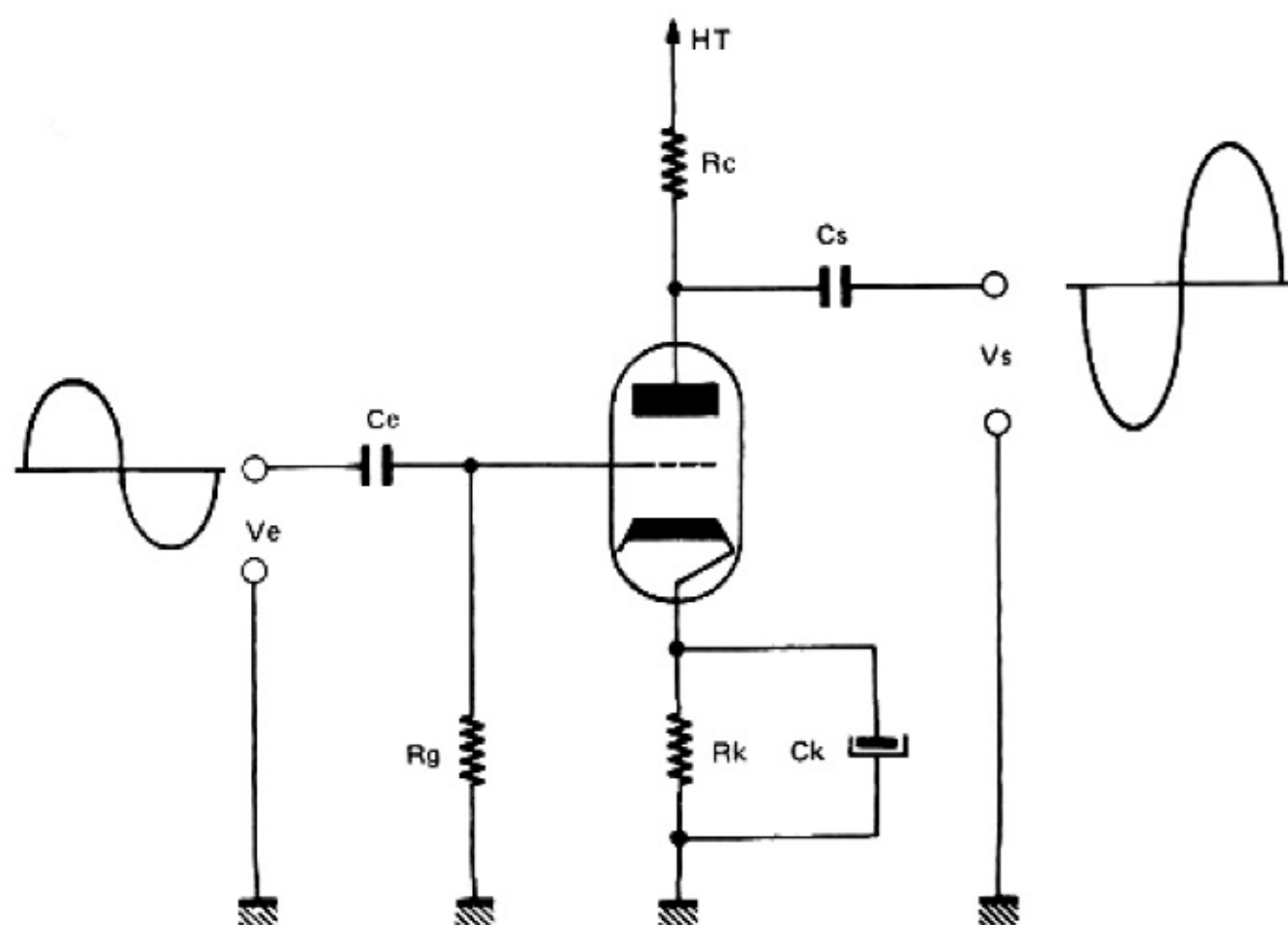
Les tubes électroniques offrent encore d'autres possibilités.

Il existe en effet TROIS MONTAGES FONDAMENTAUX.

- a) MONTAGE CATHODE A LA MASSE
- b) MONTAGE GRILLE A LA MASSE
- c) MONTAGE ANODE A LA MASSE ou CATHODE FOLLOWER
(cathode suiveuse).

IV - 1 - MONTAGE CATHODE A LA MASSE

Le montage cathode A LA MASSE est le circuit le plus courant (figure 18).



MONTAGE CATHODE A LA MASSE

Figure 18

Il se rapporte à l'amplificateur conventionnel.

La polarisation de grille est obtenue par une résistance entre cathode et masse (RK), découplée par un condensateur CK, RAMENANT LA CATHODE A LA MASSE en ce qui concerne la composante alternative amplifiée par le tube.

La grille est reliée à la masse par l'intermédiaire d'une résistance RG, aux bornes de laquelle apparaît le signal d'entrée (Ve).

Le signal de sortie Vs est transmis par le condensateur Cs, laissant passer la composante alternative et bloquant la tension continue d'alimentation.

Entre la borne de sortie de Cs et la masse, on retrouve donc la forme d'onde appliquée à l'entrée, mais d'AMPLITUDE PLUS GRANDE ET EN OPPOSITION DE PHASE.

Ce montage est surtout utilisé en basse fréquence, avec DES TUBES PENTHODES.

IV - 2 - MONTAGE GRILLE A LA MASSE

Pour l'amplification haute fréquence, le tube triode est préférable au tube penthode, car le premier a "beaucoup moins de souffle".

Le souffle se traduit par un "bruit parasite", dû en grande partie à la structure interne des tubes.

Il provient du fait que le nombre des électrons émis par la cathode, varie (très légèrement bien sûr) d'un moment à un autre.

Par conséquent, le courant anodique engendré par ces électrons

n'est pas constant et tout se passe comme si un signal variable en amplitude et en fréquence, était appliqué au tube.

Le fait que la structure interne ait une influence sur ce "bruit" s'explique en rappelant que dans un tube penthode la variation du courant anodique est due non seulement à la variation de l'émission cathodique, mais aussi à la présence de la grille-écran.

En effet, les électrons recueillis par cette électrode sont en nombre différent d'un instant à un autre et ainsi, la variation de l'émission cathodique s'ajoutant à l'influence de la grille-écran, le "souffle" d'une penthode est supérieur à celui d'une triode.

Il faut souligner que le signal dû au souffle s'étend sur une large gamme de fréquence et que son action est d'autant plus marquée que la largeur de bande de l'amplificateur est importante.

Le souffle est d'autre part d'autant plus sensible, que le signal d'entrée est faible.

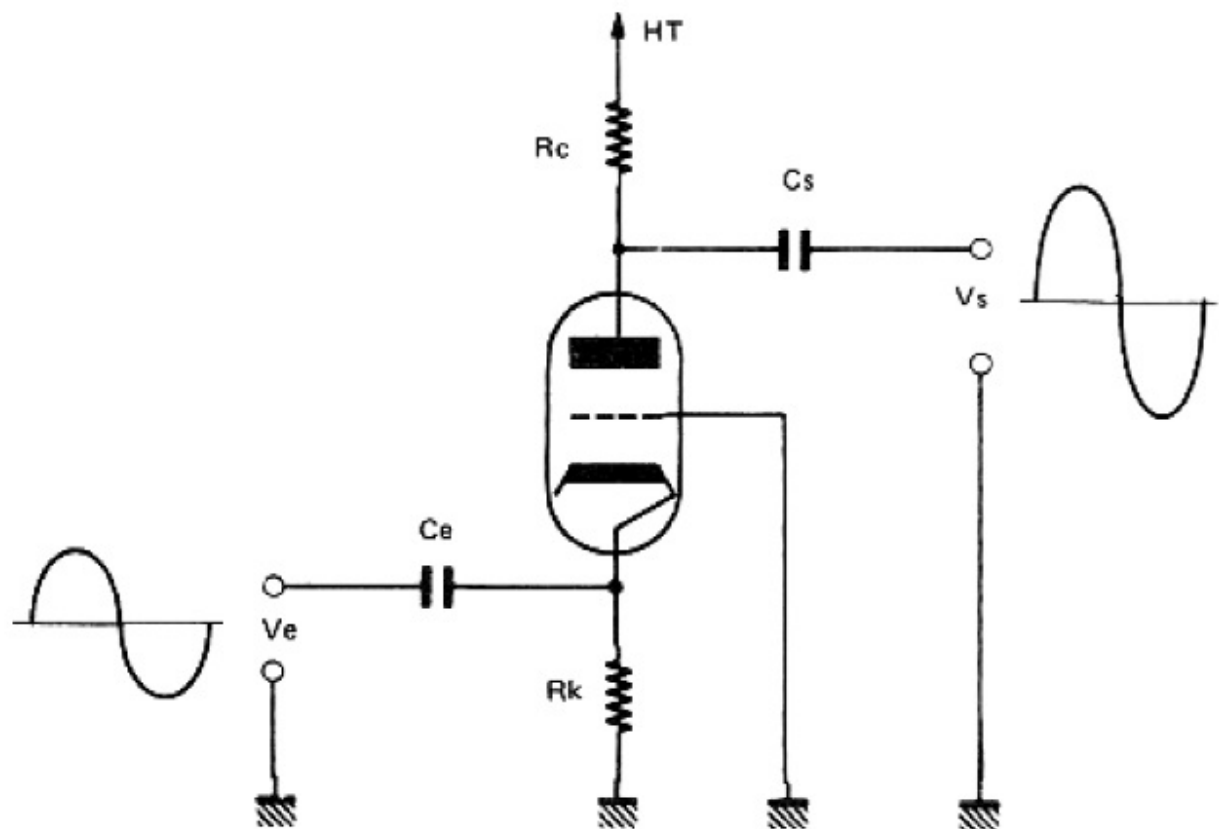
C'est le cas par exemple pour le signal HF recueilli par une antenne, qu'il s'agisse de radio-télévision ou système de radio-commande.

Pour ce type de circuit, on utilise donc de préférence une triode.

Dans ce tube cependant, la capacité grille-anode est importante (voir leçons précédentes).

Aussi, afin d'utiliser la triode tout en éliminant les effets néfastes de cette capacité, on a réalisé un montage particulier dit GRILLE à la MASSE (figure 19) encore appelé GROUNDED-GRID.

Dans celui-ci, le signal d'entrée est appliqué à la cathode du tube et la grille est reliée directement à la masse.



MONTAGE GRILLE A LA MASSE (GROUNDED-GRID)

Figure 19

Le signal de sortie est prélevé comme précédemment, à l'aide d'un condensateur (C_s).

La grille étant à la masse, constitue un écran, interdisant le couplage entre le signal de sortie et le signal d'entrée.

Il faut remarquer que même dans ce circuit, la grille contrôle toujours le débit du tube.

En effet, lorsque le signal appliqué rend la cathode plus positive, on peut dire que la grille devient plus négative par rapport à la cathode.

Inversement, si le signal appliqué rend la cathode moins positive, la grille devient moins négative.

Dans le premier cas, la grille étant plus négative, le DEBIT DIMINUE, de même que la chute de tension dans la résistance de charge RC.

Par conséquent, la TENSION DE SORTIE AUGMENTE.

Dans le second cas, la grille étant moins négative, le DEBIT DU TUBE AUGMENTE, de même que la chute de tension dans RC.

Par conséquent, la TENSION DE SORTIE DIMINUE. Ainsi, lorsque le signal augmente la tension de sortie augmente aussi.

Par contre, si le signal diminue, il en est de même de la tension de sortie.

CONCLUSION : DANS UN MONTAGE GRILLE A LA MASSE, LE SIGNAL D'ENTREE EST EN PHASE AVEC LE SIGNAL DE SORTIE.

L'amplification obtenue avec ce montage est relativement réduite.

La polarisation fixe, varie en effet en sens inverse du signal appliqué, ce qui correspond en pratique à une réduction du signal d'entrée.

Supposons qu'à un moment donné, le signal d'entrée détermine une AUGMENTATION de la tension de cathode. La grille deviendra alors plus négative ; le débit du tube DIMINUERA, de même que la tension fixe de polarisation, dépendant de la valeur de RK et du courant du tube.

Il s'agit d'une sorte de contre-réaction, réduisant le gain.

EXEMPLE. Soit $R_K = 1000 \Omega$ et $I_A = 5 \text{ mA}$ (au repos).

La tension fixe de polarisation a donc pour valeur :

$$U = R_I = 1000 \times 0,005 = 5 \text{ Volts}$$

En appliquant un signal positif de 1 volt sur la cathode, celle-ci devrait se trouver à un potentiel de 6 volts.

Or, du fait que la grille devient plus négative, le débit du tube tombe à 4,5 mA par exemple.

La tension de polarisation n'est donc plus que :

$$U = RI = 1000 \times 0,0045 = 4,5 \text{ Volts}$$

La cathode se trouve donc à un potentiel de :

$$4,5 + 1 = 5,5 \text{ Volts}$$

Tout s'est donc passé comme si le signal appliqué à la grille, n'avait qu'une valeur de 0,5 volt. Nous reviendrons sur cette question dans la prochaine leçon.

Il faut enfin remarquer que ce montage a une ENTREE en BASSE IMPEDANCE et une sortie en HAUTE IMPEDANCE (dans le montage précédent, l'entrée et la sortie sont en haute impédance).

Cette différence est facile à comprendre, en se rappelant que l'impédance d'entrée est donnée par la relation $Z_E = \frac{V_e}{I_e}$ et l'impédance de sortie par la relation $Z_s = \frac{V_s}{I_s}$

Pour la puissance maximum, la valeur de RC doit être égale à la résistance interne du tube.

On peut donc dire que, en général :

$$Z_s = RC \text{ et}$$

$$Z_E = RK \text{ (ou } RG \text{ dans le montage CATHODE A LA MASSE).}$$

Pour fixer un ordre de grandeur, on peut donner :

$$RC = 50 \text{ k}\Omega \text{ environ}$$

$$RK = 1 \text{ k}\Omega \text{ environ}$$

Le montage GRILLE A LA MASSE, malgré son amplification relativement basse est donc très utile, d'une part pour éliminer les effets dus au souffle, d'autre part pour réaliser un dispositif avec ENTREE A BASSE IMPEDANCE. (Ce cas se présente toutes les fois que le générateur du signal d'entrée est lui-même à basse impédance).

1-3 - MONTAGE ANODE A LA MASSE

Le montage ANODE à la MASSE, encore appelé CATHODE FOLLOWER ou CATHODE SUIVEUSE, est représenté figure 20.

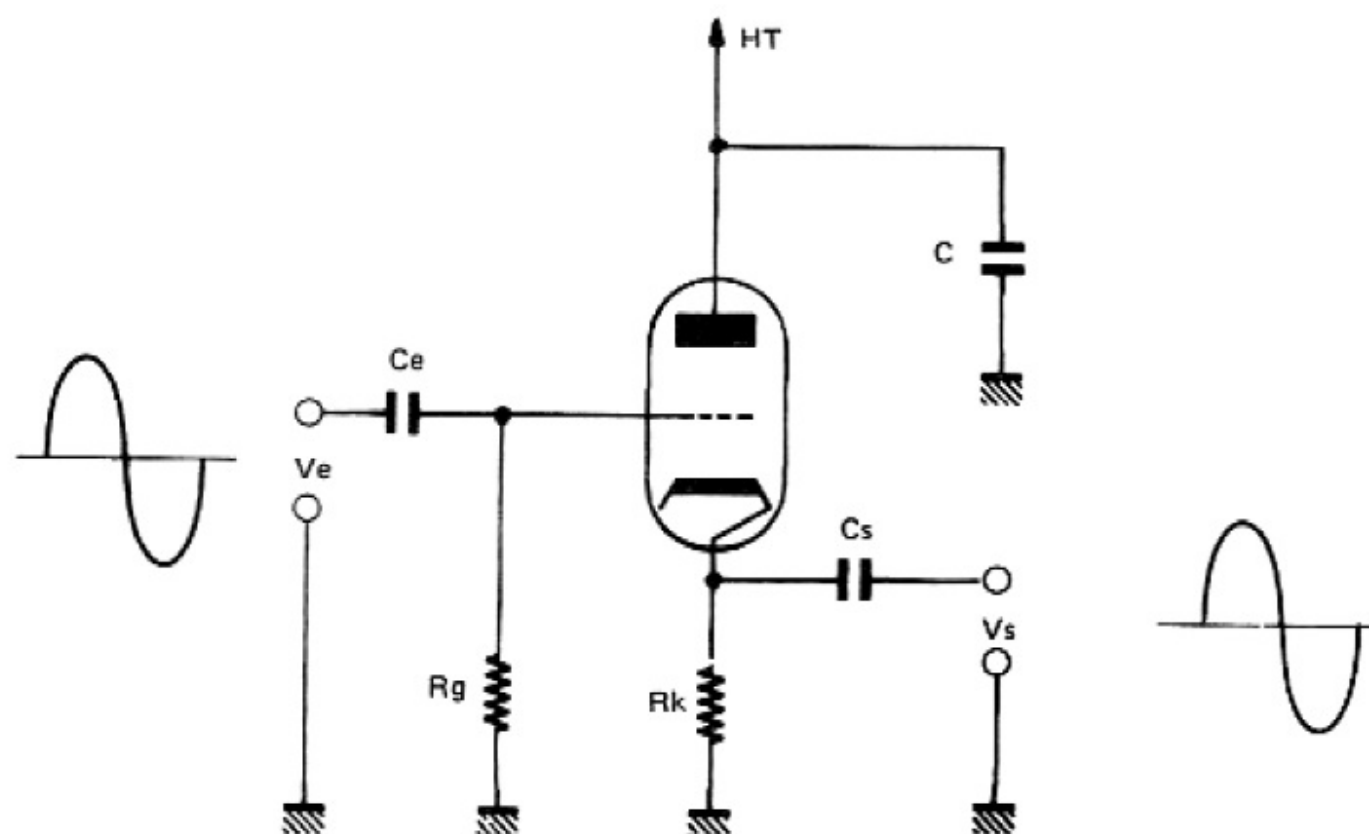
Le condensateur C, assure la mise à la masse de l'anode du point de vue ALTERNATIF.

Le signal d'entrée VE, est appliqué entre la grille et la cathode comme dans un montage ordinaire ; le signal de sortie est prélevé, par l'intermédiaire d'un condensateur (Cs), entre la cathode et la masse.

Comme dans le montage précédent, la TENSION D'ENTREE est en PHASE avec la TENSION DE SORTIE.

En effet, lorsque le signal appliqué sur la grille AUGMENTE, c'est-à-dire rend celle-ci moins négative, le débit du tube AUGMENTE aussi, de même que la tension entre la cathode et la masse.

Si le signal appliqué rend la grille plus négative, le débit du tube DIMINUE, de même que la tension entre cathode et masse.



MONTAGE CATHODE FOLLOWER

Figure 20

Ainsi, à une augmentation du signal d'entrée correspond une augmentation du signal de sortie et inversement, à une diminution du signal d'entrée correspond une diminution du signal de sortie.

Il faut remarquer que dans le montage CATHODE FOLLOWER, l'ENTREE est à haute impédance et la sortie à BASSE IMPEDANCE (l'inverse du montage précédent).

L'amplification est très réduite et toujours inférieure à 1 (le montage se comporte donc comme un ATTENUATEUR).

EXEMPLE : en appliquant un signal de 1 volt à l'entrée, supposons que le débit du tube varie de 0,5 mA.

Si la résistance de cathode est de $1000\ \Omega$, la tension de sortie sera de :

$$U = RI = 1000 \times 0,0005 = 0,5 \text{ Volt seulement}$$

Or, il n'est pas possible d'augmenter au-delà d'une certaine valeur la résistance R_K .

En effet, en admettant un débit au repos de 5 mA comme dans le cas présent et en prenant pour R_K une valeur de $4000\ \Omega$ par exemple, la tension de repos de la cathode serait de :

$$U = RI = 4000 \times 0,005 = 20 \text{ Volts}$$

La grille se trouverait donc à $- 20$ volts par rapport à la cathode et le tube serait bloqué (CUT-OFF).

Le montage CATHODE-FOLLOWER est donc uniquement employé en ADAPTATEUR D'IMPEDANCE ou en SEPARATEUR, c'est-à-dire en étage de liaison, établi en vue d'éviter les réactions entre deux circuits devant rester indépendants l'un de l'autre, (par exemple pour séparer un oscillateur d'un amplificateur, afin que les variations de ce dernier, n'affectent pas la stabilité du premier).

Dans la prochaine leçon, nous étudierons des circuits spéciaux : les circuits de REACTION et de CONTRE REACTION.

NOTIONS A RETENIR

- Pour le **COUPLAGE** entre deux étages, on utilise le plus souvent une liaison R.C.
Plus la **FREQUENCE MINIMUM** de travail est faible, plus la valeur de C doit être élevée.
En BF, la valeur de C est de l'ordre de 10 à 50 nF environ.
En HF par contre, cette valeur ne dépasse pas quelques centaines de picofarads.
- On peut aussi **COUPLER** deux étages à l'aide d'un transformateur.
Cette méthode peut être utilisée aussi bien en BF qu'en HF, cependant en BF ce mode de liaison n'est pratiquement plus utilisé.
La liaison par transformateur est par contre très courante en HF, lorsque le montage travaille sur une **FREQUENCE** bien déterminée.
Dans ce cas le **PRIMAIRE** du **TRANSFORMATEUR** constitue la **CHARGE** d'un tube et le **SECONDAIRE** la **SORTIE**.
La **FREQUENCE DE TRAVAIL** dépend de la valeur de L et de C et se calcule à l'aide de la formule :

$$F = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L.C}} \quad \text{avec}$$

F = fréquence de travail en HERTZ

L = valeur de l'inductance en HENRY

C = valeur du condensateur d'accord en FARAD

EXEMPLE : Si L = 1 H et C = 625 pF nous avons :

$$F = \frac{1}{2 \pi \sqrt{1 \times 625.10^{-12}}} = 6,3 \text{ kHz environ}$$

- Selon le **DEGRE DE COUPLAGE** du primaire par rapport au secondaire, la **LARGEUR DE LA BANDE** de fréquence transmise sera différente. Nous avons en effet :

COUPLAGE LACHE : Travail sur une fréquence déterminée.

COUPLAGE CRITIQUE : Travail sur une très petite bande de fréquence.

COUPLAGE SERRE : Travail sur une petite bande de fréquence.

- Le **NEUTRODYNAGE** est l'opération consistant à éliminer d'une triode, les effets néfastes de la capacité **GRILLE-ANODE**.
On arrive à ce résultat en appliquant sur la grille, un signal de même valeur que celui réinjecté par la capacité parasite, mais en **OPPOSITION DE PHASE**.
- Dans un montage **PUSH-PULL**, le **TRANSFORMATEUR** de **COUPLAGE** peut être remplacé par un **INVERSEUR DE PHASE ELECTRONIQUE**.
- L'**INVERSEUR CATHODYNE** est très utilisé mais présente le défaut de ne pas amplifier le signal.
- L'**INVERSEUR à COUPLAGE CATHODIQUE** au contraire, peut **INVERSER ET AMPLIFIER** le signal qui lui est appliqué.
- Les tubes électroniques peuvent être utilisés comme amplificateur, de trois façons différentes :
 - **MONTAGE CATHODE A LA MASSE**
 - **MONTAGE GRILLE A LA MASSE**
 - **MONTAGE ANODE A LA MASSE**
- En comparant ces trois montages aux montages similaires à transistors, on a l'équivalence suivante :

CATHODE A LA MASSE = BASE A LA MASSE
GRILLE A LA MASSE = EMETTEUR A LA MASSE
ANODE A LA MASSE = COLLECTEUR A LA MASSE

- Dans un montage CATHODE A LA MASSE, L'AMPLIFICATION EST ELEVEE, mais LE SIGNAL DE SORTIE est en OPPOSITION DE PHASE par rapport AU SIGNAL D'ENTREE.
- Dans un montage GRILLE A LA MASSE, L'AMPLIFICATION EST RELATIVEMENT REDUITE, mais le SIGNAL D'ENTREE est en PHASE avec le SIGNAL DE SORTIE.
- Dans un montage ANODE A LA MASSE, L'AMPLIFICATION EST NULLE (le montage se comporte comme un ATTENUATEUR), mais LE SIGNAL DE SORTIE EST EN PHASE AVEC LE SIGNAL D'ENTREE.



EXERCICE DE REVISION SUR LA THEORIE 19

- 1) Pourquoi le COUPLAGE par TRANSFORMATEUR n'est-il plus très employé ?
- 2) Quel est le ROLE d'un ETAGE INVERSEUR ELECTRONIQUE ?
- 3) Dans quelles conditions un étage PUSH-PULL est-il déséquilibré ?
- 4) Entre quels points prélève-t-on les deux tensions fournies par un INVERSEUR CATHODYNE ?
- 5) Qu'est-ce qu'un TRANSFORMATEUR accordé ?
- 6) Sur quelle électrode prélève-t-on le signal de sortie dans un amplificateur du type CATHODE A LA MASSE ?
- 7) Dans un montage GRILLE A LA MASSE, sur quelle électrode applique-t-on le signal d'entrée ?
- 8) Dans un montage ANODE A LA MASSE, sur quelle électrode applique-t-on le signal d'entrée ?
- 9) Sur ce même montage, sur quelle électrode prélève-t-on le signal de sortie ?
- 10) Le montage ANODE A LA MASSE se comporte-t-il en amplificateur ou en atténuateur ?



REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR LA THEORIE 18

- 1) Les amplificateurs de puissance utilisés dans les récepteurs fournissent la puissance électrique nécessaire au haut-parleur pour la reproduction des sons.
- 2) L'impédance de charge d'un tube amplificateur de puissance est la résistance que doit présenter le circuit anodique à la composante alternative du courant anodique.
- 3) Le rapport de transformation d'un transformateur de sortie, se calcule en divisant la résistance de charge du tube par la résistance de charge du secondaire, et en procédant ensuite à l'extraction de la racine carrée du quotient obtenu.
- 4) Le transformateur de sortie doit adapter la résistance présentée par le haut-parleur à la résistance de charge du tube amplificateur de puissance.
- 5) La puissance de sortie d'un amplificateur de puissance se calcule 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 nombre obtenu.
- 6) En augmentant l'amplitude du signal appliqué à l'entrée d'un amplificateur de puissance, on augmente le rendement.
- 7) Une distorsion inférieure à 5% ne produit aucun effet sur l'auditeur, car l'oreille humaine ne relève pas les distorsions inférieures à 5 %.
- 8) Aux grilles des deux tubes d'un amplificateur push-pull, on applique deux tensions en opposition de phase au moyen d'un transformateur de couplage pourvu d'un secondaire à prise centrale.

- 9) Les courants anodiques de deux tubes d'un amplificateur push-pull sont en opposition de phase entre eux.
- 10) Quand un amplificateur push-pull est dans les conditions de repos, il n'y a dans le noyau de son transformateur de sortie aucun flux d'induction.
- 11) L'allure du signal de sortie d'un amplificateur push-pull peut être déterminée en faisant la différence entre les courants anodiques des deux tubes.
- 12) L'amplificateur push-pull présente la particularité d'éliminer toutes les harmoniques paires, ne laissant que les harmoniques impaires.
- 13) Par rapport à un amplificateur à un seul tube, l'amplificateur push-pull présente l'avantage de fournir une plus grande puissance de sortie avec une distorsion plus petite, d'être équipé d'un transformateur de sortie avec un noyau d'une section plus petite, et de ne pas donner lieu à la reproduction des éventuelles tensions de ronflement.
- 14) Le rapport de transformation du transformateur de sortie d'un amplificateur PUSH-PULL, se calcule en divisant la résistance de charge du secondaire par la résistance qu'il doit y avoir entre les 2 anodes et en procédant ensuite à l'extraction de la racine carrée.

$$n = \sqrt{\frac{\text{charge secondaire}}{\text{charge d'anodes}}}$$

