

THEORIE

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

AMPLIFICATEURS DE PUISSANCE HAUTE FREQUENCE

Après avoir étudié les amplificateurs de tension HF, nous allons compléter le sujet relatif à l'amplification des signaux HF en traitant des amplificateurs de puissance HF.

Les amplificateurs de puissance HF sont surtout utilisés en TELECOMMUNICATIONS. Ils ont pour rôle de fournir à l'antenne d'émission, la PUISSANCE qu'elle doit rayonner dans l'espace.

Ces montages trouvent également quelques applications en ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE et plus particulièrement dans les systèmes de CHAUFFAGE HF (il ne s'agit plus vraiment de HF, les fréquences en jeu étant de l'ordre de 100 kHz, mais les principes restent les mêmes).

Dans le cas de l'amplificateur de puissance HF, nous retrouvons les mêmes problèmes déjà étudiés à propos de l'amplificateur de puissance en basse fréquence. Nous allons donc voir quelques notions fondamentales relatives à l'amplification de puissance et au rendement.

1 - AMPLIFICATION DE PUISSANCE ET RENDEMENT

Puisque la puissance électrique dépend soit de la tension soit du courant, un tube électronique, employé dans un circuit amplificateur quelconque produit une amplification de puissance.

Cependant, les courants qui circulent dans le tube sont très petits, de l'ordre du milliampère, et la charge anodique, aux extrémités de laquelle on obtient la tension amplifiée, est très élevée. Il est clair que dans ces conditions, il s'agit principalement d'une amplification de tension.

Les petites variations du courant anodique, provoquent aux extrémités de la charge, de fortes variations de tension par rapport aux variations de la tension appliquée à l'entrée (c'est-à-dire sur la grille) du tube amplificateur. L'amplification de puissance est donc insignifiante.

Pour obtenir une grande amplification de puissance, il faut réduire la charge anodique du tube électronique. D'après la Loi d'Ohm, la réduction de la charge provoque une augmentation du courant dans le tube électronique et dans la charge. Ainsi, la puissance de sortie obtenue n'est plus négligeable.

Naturellement, les amplificateurs de puissance demandent des tubes spéciaux, solides, pouvant débiter des courants anodiques de dizaines, parfois de centaines de milliampères et capables de supporter la température élevée qui en résulte.

En effet, ces amplificateurs ont un rendement limité : seule une partie de la puissance électrique fournie sous forme de courant continu anodique d'alimentation, est restituée sous forme de puissance de sortie.

Le reste est dissipé en chaleur, inutilement, et même d'une façon indésirable, car la chaleur est nuisible à de nombreux composants électroniques.

Par exemple, un amplificateur de puissance de 60 W pour un émetteur de radio-amateur (puissance fournie à l'antenne pour être rayonnée dans l'espace), réclame un courant continu d'environ 200 mA si la tension de l'alimentation de l'étage est de 500 V.

Puisque le produit du courant par la tension donne 100 W, il est évident que sur ces 100 W, 60 W seulement sont transformés en puissance HF, tandis que les 40 W restants sont dissipés en chaleur (exactement comme le ferait une lampe d'une puissance de 40 W).

Naturellement, dans la construction des amplificateurs de puissance, il faut chercher à augmenter le plus possible le rendement, pour augmenter la puissance de sortie et réduire les pertes dues à l'échauffement.

Plus la puissance en jeu est élevée, plus le problème est difficile.

Le rendement dont il s'agit, est donné par le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'alimentation. Il n'a donc aucun rapport avec la valeur de l'AMPLIFICATION DE PUISSANCE du circuit, qui est donnée au contraire, par le rapport entre la puissance de sortie et la puissance appliquée à l'entrée.

Par exemple, un amplificateur de puissance BF, équipé d'un tube pouvant fournir 4 W, réclame une puissance d'alimentation de 10 W. Son rendement n'est ainsi que de 40 %.

Au contraire, puisque la puissance du signal appliqué à la grille du tube est pratiquement négligeable (dans les conditions normales de fonctionnement, aucun courant ne parcourt la grille de commande d'un tube amplificateur fonctionnant en classe A), l'amplification de puissance est très élevée.

Même, si l'étage fonctionnait avec une tension de grille pas toujours négative, donc avec un courant de grille (c'est-à-dire fonctionnant en classe AB_2 ou bien en classe B_2), l'amplification de puissance serait toujours très importante.

2 - AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE EN CLASSE C

Le circuit théorique fondamental d'un étage amplificateur de puissance HF est illustré sur la *figure 1*. On peut voir qu'il comprend deux circuits d'accord, du type en parallèle, disposés l'un sur la grille, l'autre sur l'anode du tube. Ces circuits doivent être accordés sur la fréquence que l'on veut amplifier.

Au moyen du système de couplage illustré dans la *Théorie 23*, on obtient dans le circuit d'accord de grille, une tension HF dont la fréquence est égale à la fréquence de résonance des circuits accordés. Par exemple, sur la *figure 1*, les couplages d'entrée et de sortie sont du type inductif : l'énergie est donc transmise exactement comme dans un transformateur, l'enroulement L_1 doit être considéré comme le primaire d'un transformateur, et l'enroulement L_2 comme le secondaire. Il en est de même pour les enroulements L_3 et L_4 .

Le rapport entre le nombre des spires de L_1 et de L_2 (ou de L_3 et de L_4) est important. Pour augmenter la valeur de la tension HF d'entrée, l'enroulement L_2 comporte plus de spires que l'enroulement L_1 . Par contre, pour augmenter le courant de sortie, l'enroulement L_4 comporte moins de spires que l'enroulement L_3 .

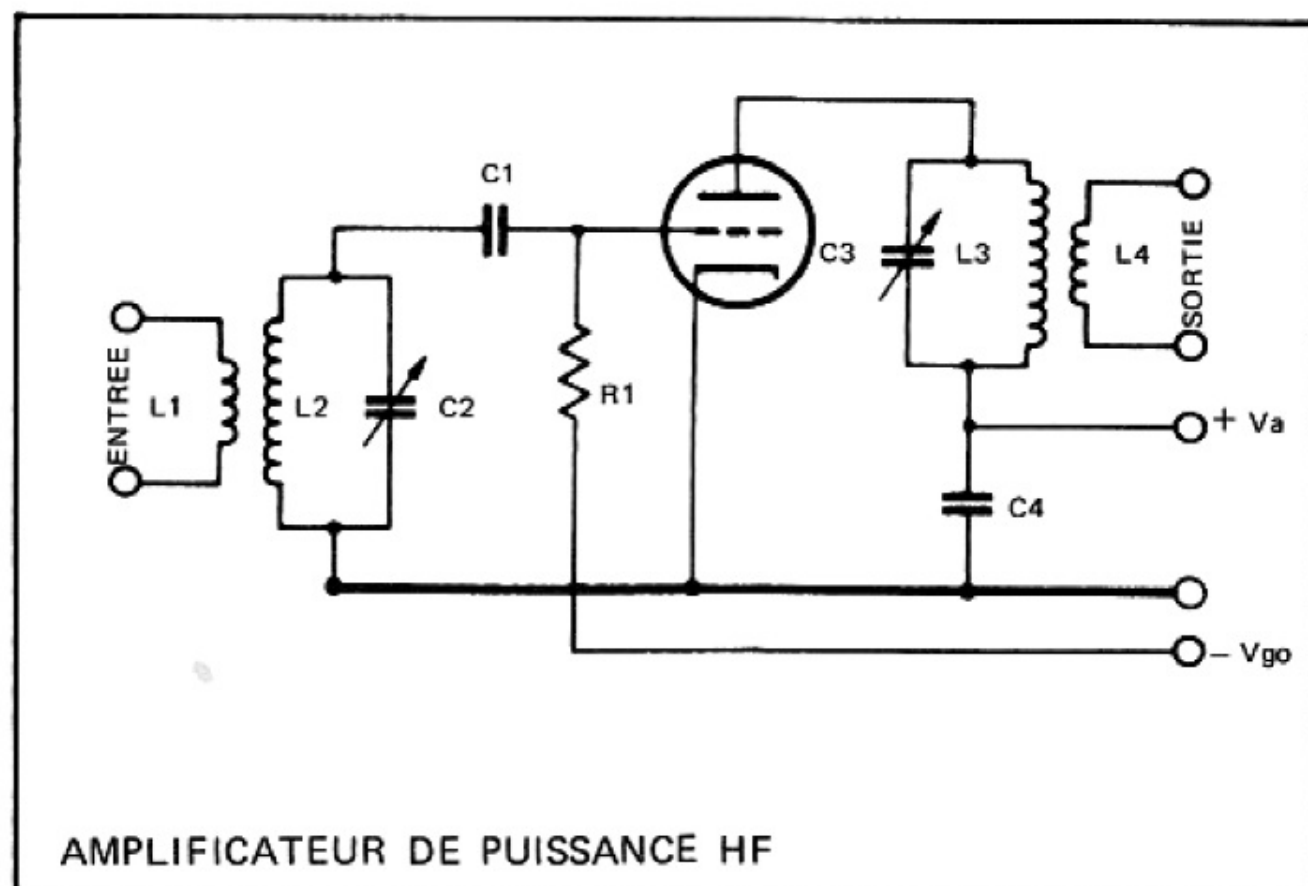


Figure 1

Le nombre de spires de L2 et de L3 dépend d'autre part de la fréquence de fonctionnement et doit être calculé en fonction de la valeur capacitive de C2 et C3.

Pour des raisons évidentes de mise au point, les condensateurs C2 et C3 sont variables : en réglant ceux-ci, on peut modifier la fréquence d'accord des circuits L2.C2 et L3.C3.

Sur le schéma de la *figure 1*, le tube électronique est une triode. Cependant, on utilise très souvent des tétrodes ou des pentodes, car elles fournissent une amplification plus stable.

Quand on a besoin d'une forte puissance de sortie, on peut utiliser deux tubes reliés en *PUSH-PULL*.

L'énergie HF fournie par l'intermédiaire de l'enroulement L1 au circuit accordé L2.C2 provoque des oscillations d'une fréquence déterminée ;

celles-ci donnent naissance à une tension HF assez élevée.

Cette tension est appliquée sur la grille du tube par l'intermédiaire du condensateur C1, qui, de valeur capacitive peu élevée, a une réactance basse pour le signal HF. En pratique, ce condensateur se comporte comme s'il était en court-circuit pour le signal HF.

La résistance R1 relie la grille du tube à un générateur de tension continue négative. Sa valeur est assez élevée pour constituer une charge normale pour le signal HF provenant de L2, C2, sans toutefois avoir une valeur trop élevée, de façon à ne pas modifier la tension négative de polarisation V_{g0} (en pratique, R1 vaut quelques dizaines de kilohms).

Dans ces conditions, la grille du tube est soumise à deux tensions : l'une continue et négative, l'autre alternative. Si la première est choisie beaucoup plus négative que la valeur d'interdiction du tube (*CUT-OFF*), et si la seconde a une valeur efficace légèrement supérieure à la première, le tube fonctionne obligatoirement en classe C.

En effet, supposons que la tension HF n'existe pas : dans ce cas, la tension V_{g0} rend la grille tellement négative que tous les électrons émis par la cathode, négatifs eux-aussi, sont repoussés. Le courant anodique est nul et le tube ne fournissant aucune puissance, ne s'échauffe pas.

Maintenant, supposons que l'on applique une tension HF : elle se superpose à la précédente, en s'ajoutant et en se soustrayant selon les ondes qui se succèdent très rapidement.

Pendant la demi-onde négative, la grille devient encore plus négative que précédemment. Le tube électronique reste donc bloqué et il ne circule aucun courant.

Pendant la demi-onde positive, la tension HF tend à annuler la polarisation négative. Si cette tension HF est d'une amplitude suffisante, il arrivera très vite un moment où la tension résultante appliquée sur la grille (c'est-à-dire la somme de la valeur instantanée de la tension HF et de la tension de polarisation) dépassera le potentiel d'interdiction du tube. Le courant commencera à circuler avec une intensité de plus en plus grande jusqu'à ce que la demi-onde positive atteigne sa valeur maximum.

A ce moment, non seulement la tension de polarisation est complètement annulée, mais la grille atteint des valeurs positives de l'ordre de 10 à 20 volts.

Dans ces conditions, le courant anodique devient très intense : il peut atteindre l'ordre de l'ampère.

Etant donné le temps très court de chaque alternance du courant HF, très vite la grille redevient de plus en plus négative et le courant anodique diminue rapidement, et enfin disparaît, jusqu'à la demi-onde positive suivante.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'amplificateur en classe C, il faut étudier la progression que prend le courant anodique du tube.

On peut déterminer cette progression en ayant recours à la caractéristique mutuelle dynamique, et en faisant la construction graphique que l'on a déjà décrite.

Cette construction est de nouveau reportée sur la *figure 2*, sur laquelle sont maintenant indiquées sur les axes de tous les diagrammes, les valeurs des grandeurs considérées. Il est ainsi possible de voir avec une grande précision, comment ces grandeurs varient dans le temps.

La progression de la tension v_g appliquée à la grille du tube, est représentée pour deux cycles complets, sur le diagramme dessiné sous celui de la caractéristique mutuelle dynamique. On peut voir que la tension a une valeur maximum de 80 V et une période de 1 microseconde ($1 \mu\text{sec}$), c'est-à-dire de 1 millionième de seconde.

Si la tension v_g a une période de 1 millionième de seconde, c'est-à-dire si elle emploie ce temps pour accomplir un cycle, cela veut dire qu'elle accomplira un million de cycles durant une seconde et donc qu'elle a une fréquence de 1 million de hertz, ou bien de 1 MHz.

Nous observons que, ayant choisi pour le tube une tension de polarisation $V_{g0} = -70 \text{ V}$, le diagramme de la tension v_g a été disposé de façon à ce que la valeur de 0 V corresponde à la valeur de 70 volts sur l'axe horizontal de la caractéristique mutuelle.

On peut voir ainsi que la tension de grille V_g varie durant une microseconde entre la valeur de +10 V et -150 V (valeurs obtenues en additionnant algébriquement la valeur de la tension de polarisation de -70 V à la valeur positive ou négative de 80 V du signal appliqué sur la grille).

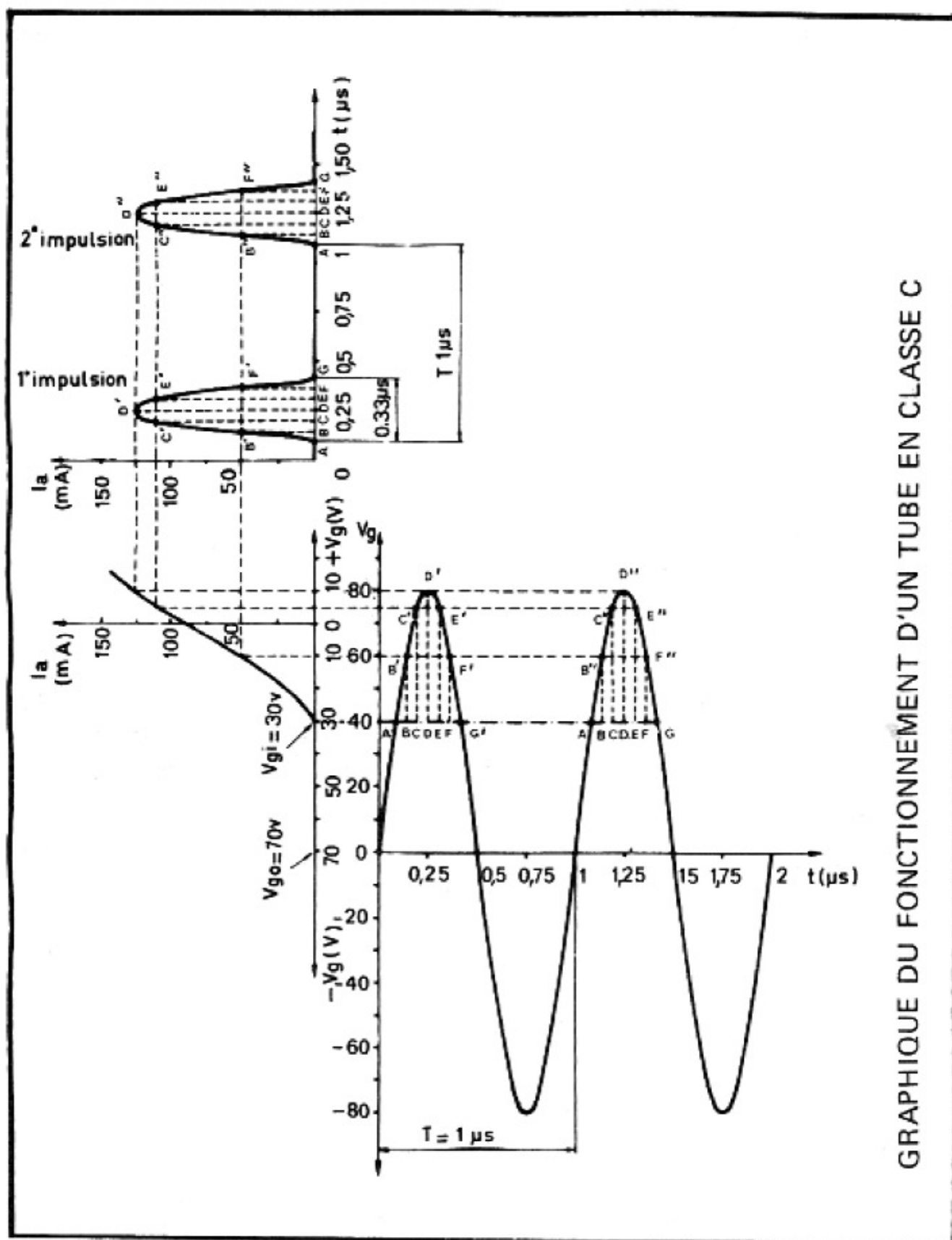


Figure 2

La valeur de la tension d'interdiction V_{gi} étant de -30 V , le courant ne circule dans le tube que lorsque la tension de grille V_g est comprise entre les valeurs de -30 V et de $+10\text{ V}$.

Pour déterminer la progression du courant anodique, il suffit de faire la construction graphique pour la seule partie de la sinusoïde, comprise entre les valeurs de $+40\text{ V}$ et de $+80\text{ V}$.

En effet, le courant ne peut circuler dans le tube, que lorsque le signal appliqué sur la grille atteint ces valeurs.

On prend sur la ligne tracée en traits et en points, les instants indiqués par les lettres A, B, C, D, E, F, G, et ensuite on fait la construction graphique.

Aux instants indiqués par les lettres A et G, la tension de grille a la valeur d'interdiction et le courant anodique est nul. Au contraire, aux instants indiqués par les autres points, la tension de grille prend les valeurs mentionnées par les lettres B', C', D', E', F' pour chacune desquelles on a déterminé la valeur correspondante du courant anodique.

On obtient ainsi sur le diagramme situé à la droite de la caractéristique mutuelle, les points B', C', D', E', F', qui, unis entre eux et avec les points A, et G, permettent de dessiner la progression du courant anodique du tube.

On a répété la même construction pour la deuxième demi-onde positive de la tension v_g , en considérant les valeurs indiquées par les points B'', C'', D'', E'', F'', et en déterminant les points correspondants sur le diagramme du courant I_a .

On peut voir ainsi clairement que le courant anodique est intense. Toutefois, celui-ci ne circule que pendant environ un tiers de période du signal appliqué, c'est-à-dire pendant $0,33\text{ }\mu\text{sec}$.

Un courant qui passe pendant un temps bref, durant lequel il atteint une valeur assez élevée, constitue une *IMPULSION* de courant.

C'est le cas pour la *figure 2*, où le courant anodique passe de la valeur zéro à la valeur maximum d'environ 125 mA et reprend la valeur zéro dans le temps très bref de $0,33\text{ }\mu\text{sec}$. Ce courant anodique est un *COURANT*

PULSE, car il est constitué par les impulsions qui se succèdent chaque microseconde.

La valeur maximum d'une impulsion de courant est aussi appelée *VALEUR DE POINTE* ou *VALEUR DE CRETE*.

Il est très important de se souvenir que la forme du courant anodique est très différente de l'onde sinusoïdale de grille. La distorsion en classe C est trop importante, quand on veut conserver les caractéristiques du signal à amplifier (comme nous l'avons vu dans le cas des amplificateurs BF, dans lesquels la forme du signal de sortie est parfaitement identique à la forme du signal d'entrée, provenant du microphone par exemple).

Heureusement, dans le cas de l'amplification de puissance HF, il n'est pas nécessaire de conserver la forme d'onde du signal d'entrée, et la forme pulsée du courant anodique garantit un bon rendement de l'étage, comme nous allons le voir.

LA TRANSFORMATION DE CE COURANT ANODIQUE PULSE, EN COURANT SINUSOIDAL HF EST OBTENUE PAR L'INTERMEDIAIRE DU CIRCUIT RESONNANT ANODIQUE.

Celui-ci est réglé sur la même fréquence que le circuit accordé de grille, ce qui signifie qu'il est également accordé sur la fréquence des impulsions.

Pour comprendre le fonctionnement du circuit accordé anodique sans avoir recours à des démonstrations mathématiques complexes, on se réfère au pendule. Dans une leçon précédente, on a déjà dit que c'est un dispositif analogue à un circuit électrique accordé avec inductance et capacité.

Pour faire osciller continuellement un pendule, il n'est pas nécessaire de le pousser continuellement : il suffit de "donner un petit coup", c'est-à-dire une impulsion à chaque cycle d'oscillation.

Le mouvement du pendule est alors très régulier, étant très peu influencé par les modalités d'application de l'impulsion. Celle-ci a uniquement pour but de compenser les pertes d'énergie mécanique, dissipé par frottement dans le cycle d'oscillation entier.

Dans le cas de l'amplification HF, les impulsions sont représentées par le courant anodique, et l'énergie HF absorbée par l'enroulement L4

représenté sur la *figure 1*, est comparable au frottement qui tend à freiner continuellement le pendule.

De l'analogie mécanique du pendule, on déduit encore une façon intéressante de faire fonctionner un étage amplificateur HF.

Supposons que l'on remplace le pendule étudié jusqu'à maintenant par un autre pendule en mesure d'osciller avec une fréquence deux ou trois fois plus grande.

On peut faire osciller ce deuxième pendule en lui appliquant seulement les impulsions nécessaires à l'entretien des oscillations du premier. Dans ce cas, le pendule recevra une impulsion toutes les deux ou trois oscillations, au lieu d'en recevoir une à chaque oscillation comme dans le cas précédent.

De la même façon, en remplaçant le circuit accordé L3.C3 par un autre, dont la fréquence de résonance est deux ou trois fois plus grande, il sera possible d'alimenter ce second circuit avec les impulsions provenant du premier. Dans ce cas aussi, le circuit recevra une impulsion toutes les deux ou trois oscillations, au lieu d'en recevoir une à chaque oscillation comme dans le cas précédent.

On voit ainsi qu'il est possible d'obtenir du circuit L3.C3 des oscillations de fréquence double ou triple de celle du signal d'entrée.

Un étage dont le fonctionnement est basé sur ce principe est appelé *DOUBLEUR* ou *TRIPLEUR DE FREQUENCE*.

On obtiendra encore une amplification de puissance, bien qu'elle soit inférieure à celle fournie par un amplificateur HF normal.

Le schéma d'un doubleur ou d'un tripleur de fréquence est identique à celui de l'amplificateur de puissance HF de la *figure 1*. Seule diffère la valeur des composantes L3 et C3 qui déterminent sa fréquence de résonance.

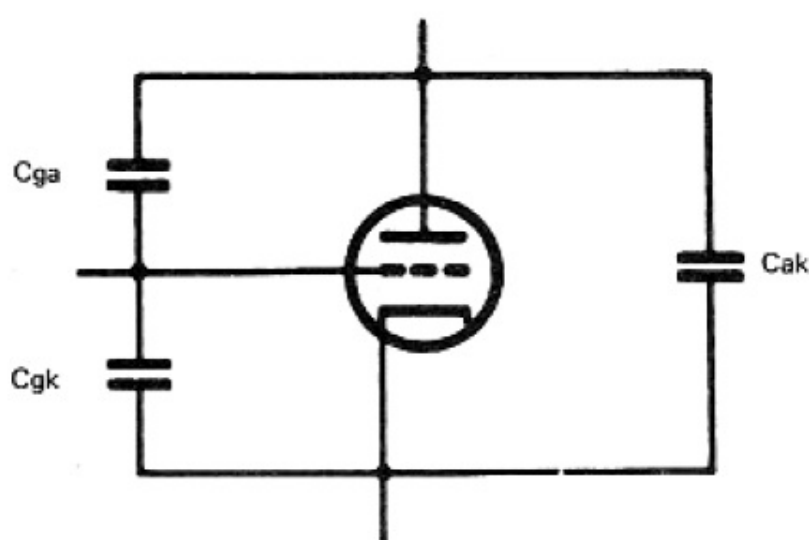
Théoriquement, rien n'empêche d'imaginer de la même façon les circuits quadrupleurs ou quintupleurs. Toutefois, les difficultés pour obtenir un fonctionnement satisfaisant augmentent tellement que ces circuits sont délicats et parfois très critiques. En pratique, on ne réalise donc le plus souvent, que des circuits *DOUBLEUR* ou *TRIPLEUR DE FREQUENCE*.

3 - NEUTRODYNAGE

Nous avons remarqué précédemment que, bien que les triodes puissent fonctionner parfaitement dans les amplificateurs HF, il est préférable d'employer des tétrodes ou mieux des pentodes.

Pour mieux en comprendre les raisons, nous devons reparler des *CAPACITES INTERELECTRODES*. Comme nous le savons, celles-ci sont dues à la conformation des tubes électroniques. Les électrodes isolées contenues dans l'enveloppe du tube, se comportent en effet comme les armatures d'un condensateur.

Comme on l'a dit dans les leçons précédentes, grâce aux dimensions réduites des électrodes, la capacité est très petite (quelques picofarads) et ne gêne pas le fonctionnement régulier du tube dans le domaine des basses fréquences. Par contre, si les fréquences sont élevées, les capacités interélectrodes peuvent avoir une influence considérable.



CAPACITES INTERELECTRODES D'UNE TRIODE

Figure 3

Les effets qui en dérivent se superposent aux phénomènes utiles de l'amplification électronique. La conséquence pratique est que le circuit devient instable, ou au lieu d'amplifier, il tend tout simplement à produire lui-même l'énergie HF, indépendamment du signal d'entrée.

Pour comprendre comment cette perturbation peut se produire, il faut rappeler brièvement en quoi consistent les capacités interélectrodes d'une triode.

Dans la triode, nous avons trois électrodes qu'on peut comparer à trois condensateurs, formés respectivement de la grille et de la cathode, de la cathode et de l'anode, de l'anode et de la grille. La *figure 3* montre comment ces trois capacités (intérieures au tube électronique et qu'on ne peut éliminer par des procédés constructifs) peuvent être mises en évidence dans les schémas électriques. Il est ainsi possible d'en étudier et évaluer les effets.

En ajoutant au schéma de la *figure 1*, les capacités interélectrodes du tube, on obtient le schéma de la *figure 4 - a*. On peut voir que la capacité grille cathode C_{gk} , étant en parallèle sur le condensateur $C2$, modifie la valeur capacitive du circuit, comme on le voit sur la *figure 4 - b*.

La même chose se produit pour la capacité anode cathode C_{ak} , qui se trouve en parallèle sur le condensateur $C3$.

Il reste encore la capacité grille anode (C_{ga}), qui relie directement la grille à l'anode. Par la réactance de C_{ga} , qui se réduit fortement quand la fréquence augmente, on établit une liaison électrique en parallèle sur la liaison électronique due au flux d'électrons qui est contrôlé par la grille.

A travers la liaison électrique, une partie du signal présent dans le circuit anodique peut aller dans le circuit de grille, et s'ajouter au signal d'entrée appliqué par L_1 .

Quand la capacité grille anode atteint une certaine valeur, ou encore si la fréquence de travail est très élevée, le signal HF qui retourne dans le circuit de grille est suffisant pour piloter la triode. Dans ces conditions, le circuit a une amplification infiniment grande (car un signal d'entrée très petit, presque inexistant, produit la puissance maximum que le tube électronique peut fournir).

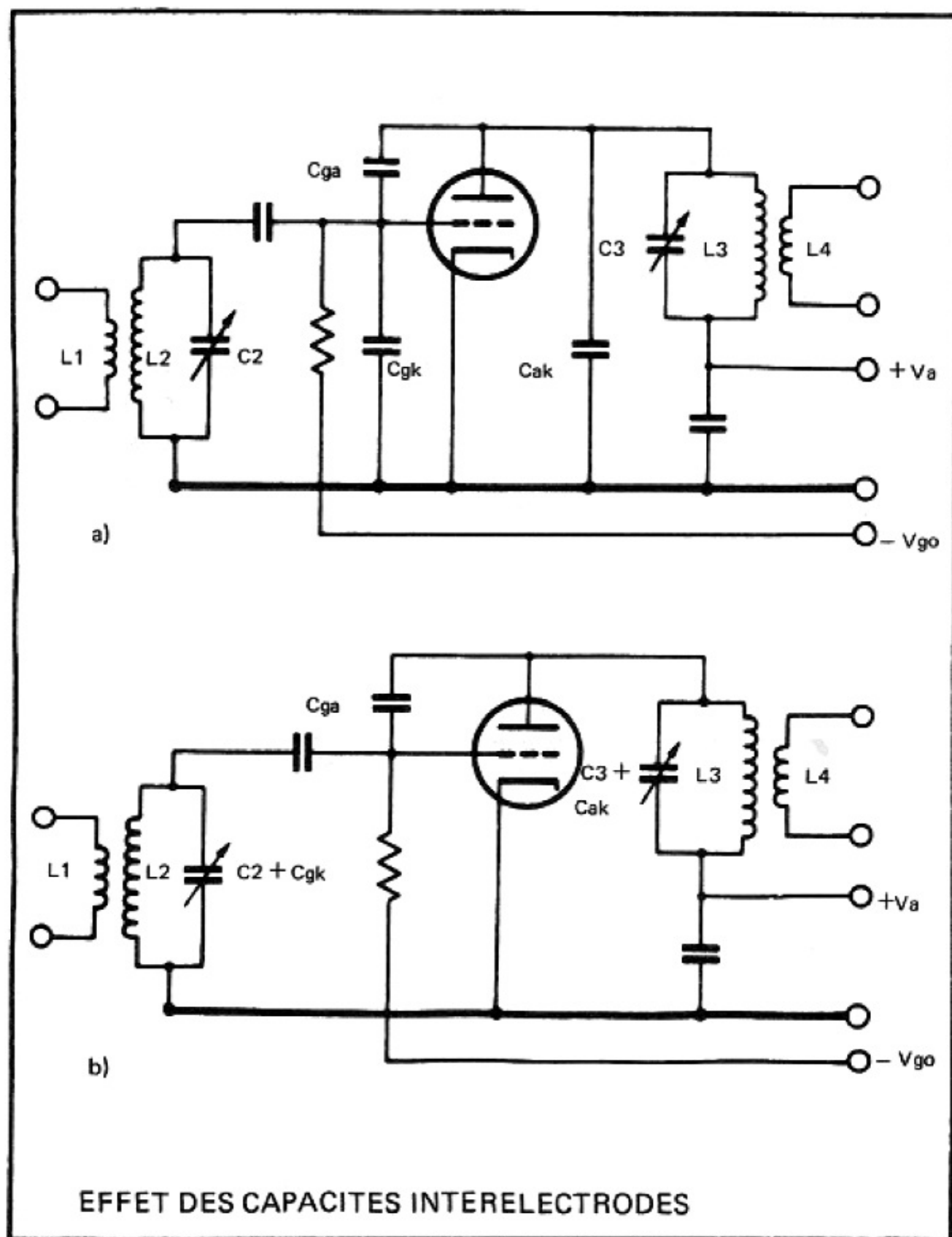


Figure 4

Nous avons déjà vu que pour éliminer cet inconvénient, on utilise les tétrodes et les pentodes. Dans ce type de tubes, une ou deux grilles supplémentaires réduisent à des valeurs très basses la capacité anode grille. On peut aussi employer l'artifice du *NEUTRODYNAGE* qui consiste à annuler la tension réinjectée sur la grille par la capacité C_{ga} . Pour obtenir ce résultat, on ajoute une tension HF égale et contraire, c'est-à-dire de même amplitude mais de phase opposée.

Le circuit de la *figure 1* doit être modifié dans ce cas, comme le circuit de la *figure 5*, où $C5$ est le condensateur de neutrodynage. Le circuit accordé de plaque $L3.C3$ est muni d'une prise médiane. Parfois cette prise se trouve vers l'extrémité du bobinage opposée à la liaison d'anode.

Dans le cas où $L3$ a une prise médiane, des tension HF égales, mais en opposition de phase, se manifestent aux extrémités du circuit $L3.C3$. Il faut alors que le condensateur de neutrodynage $C5$ ait la même valeur que C_{ga} .

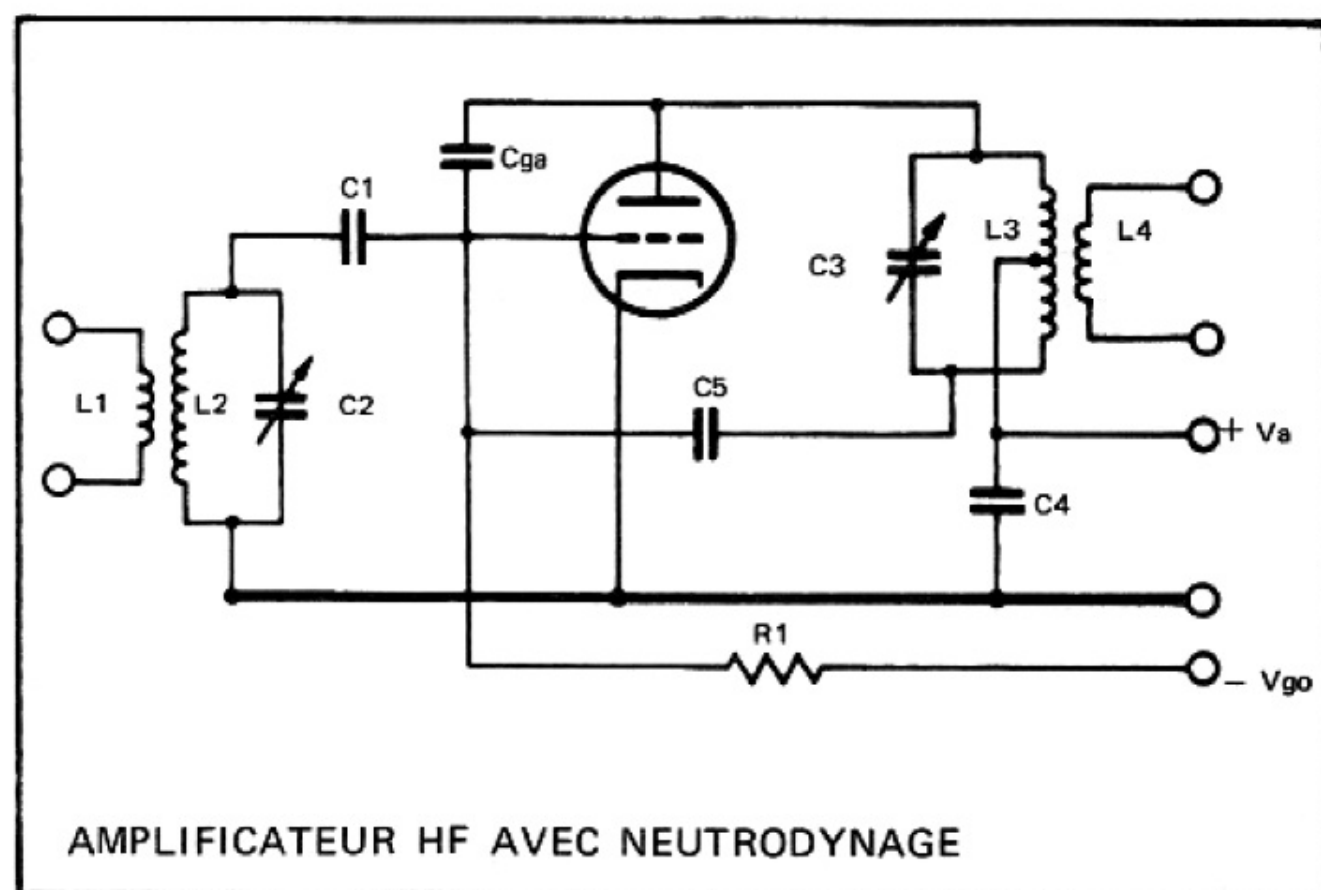


Figure 5

Pour comprendre pourquoi aux extrémités du circuit accordé L3.C3, se manifestent deux tensions HF égales et en opposition de phase, étudions un pendule constitué par une barre de bois munie d'un poids à une extrémité (*figure 6*).

En faisant un petit trou à l'extrémité A de la barre, on peut suspendre le pendule et le faire osciller (*figure 6 - a*). Le mouvement s'annule évidemment à l'extrémité A autour de laquelle se produit la rotation. Mais si nous suspendons le pendule en faisant un petit trou au milieu de la barre, on observera facilement que ses extrémités se meuvent toujours dans des directions opposées. Quand l'extrémité A atteint le point extrême gauche de son arc oscillatoire, l'extrémité B de la baguette est à l'extrême droite de sa course (*figure 6 - b*), et réciproquement quand l'extrémité A atteint l'extrême droite (*figure 6 - c*).

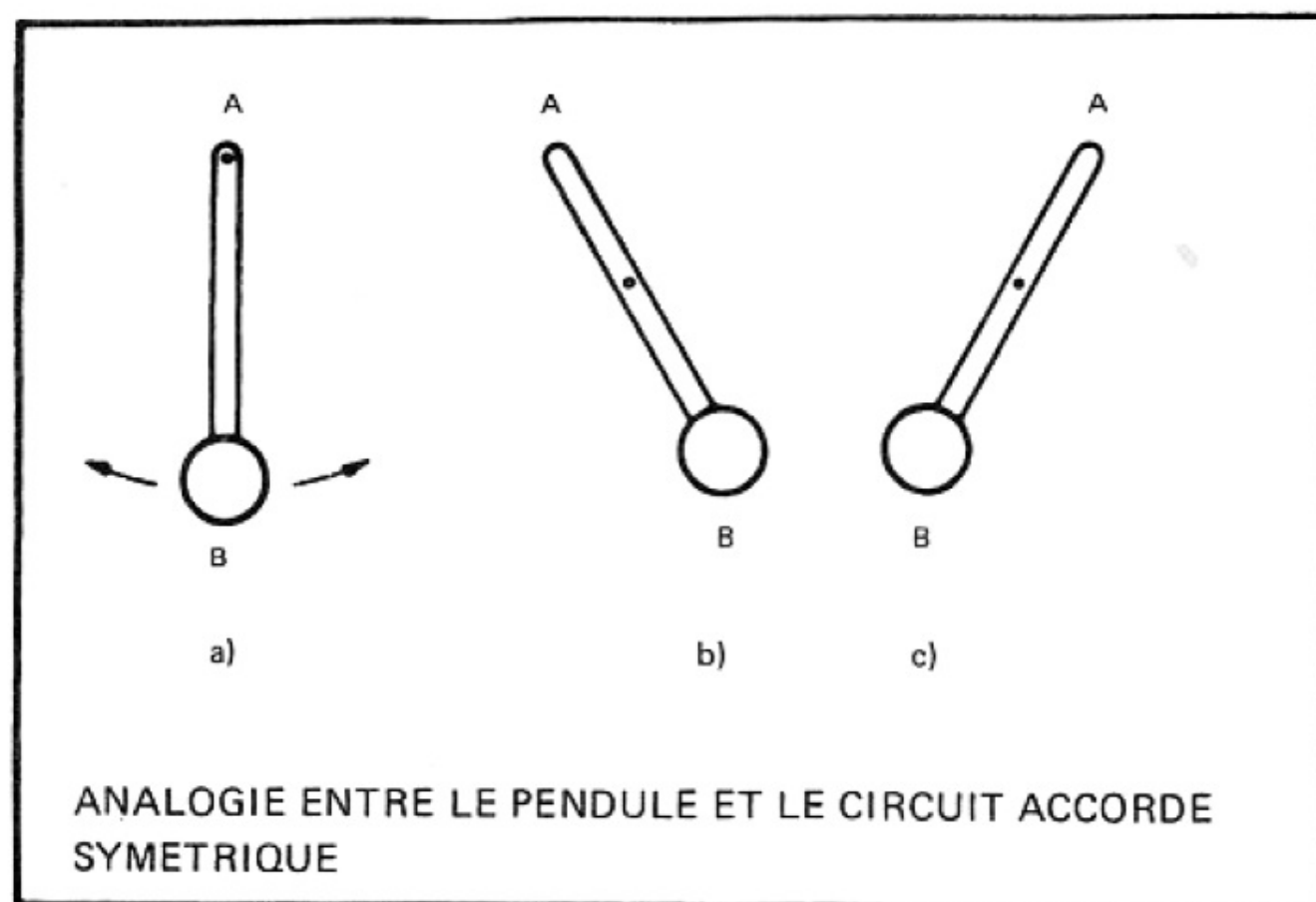


Figure 6

Quand le poids est au centre du pendule, l'extrémité A a un mouvement d'amplitude égale au mouvement de l'extrémité B, mais lorsque A va vers la droite, B va vers la gauche.

Pour conclure, les déplacements (ou les vitesses) des deux extrémités de la baguette peuvent être représentées par des sinusoïdes de même amplitude mais de phase opposée.

Il en est de même pour les tensions (ou les courants) d'un circuit accordé, muni d'une prise centrale sur le bobinage (comme L3 de la *figure 5*) ou qui comporte deux condensateurs, entre lesquels se trouve le point milieu raccordé à la masse (*figure 7*).

On peut aussi réaliser un circuit oscillant asymétrique, en déplaçant la prise du bobinage vers une extrémité du circuit, ou en modifiant le rapport des deux capacités. La tension qui apparaît sur l'extrémité du circuit accordé la plus proche de la prise, est alors inférieure à l'autre, mais toujours de phase opposée.

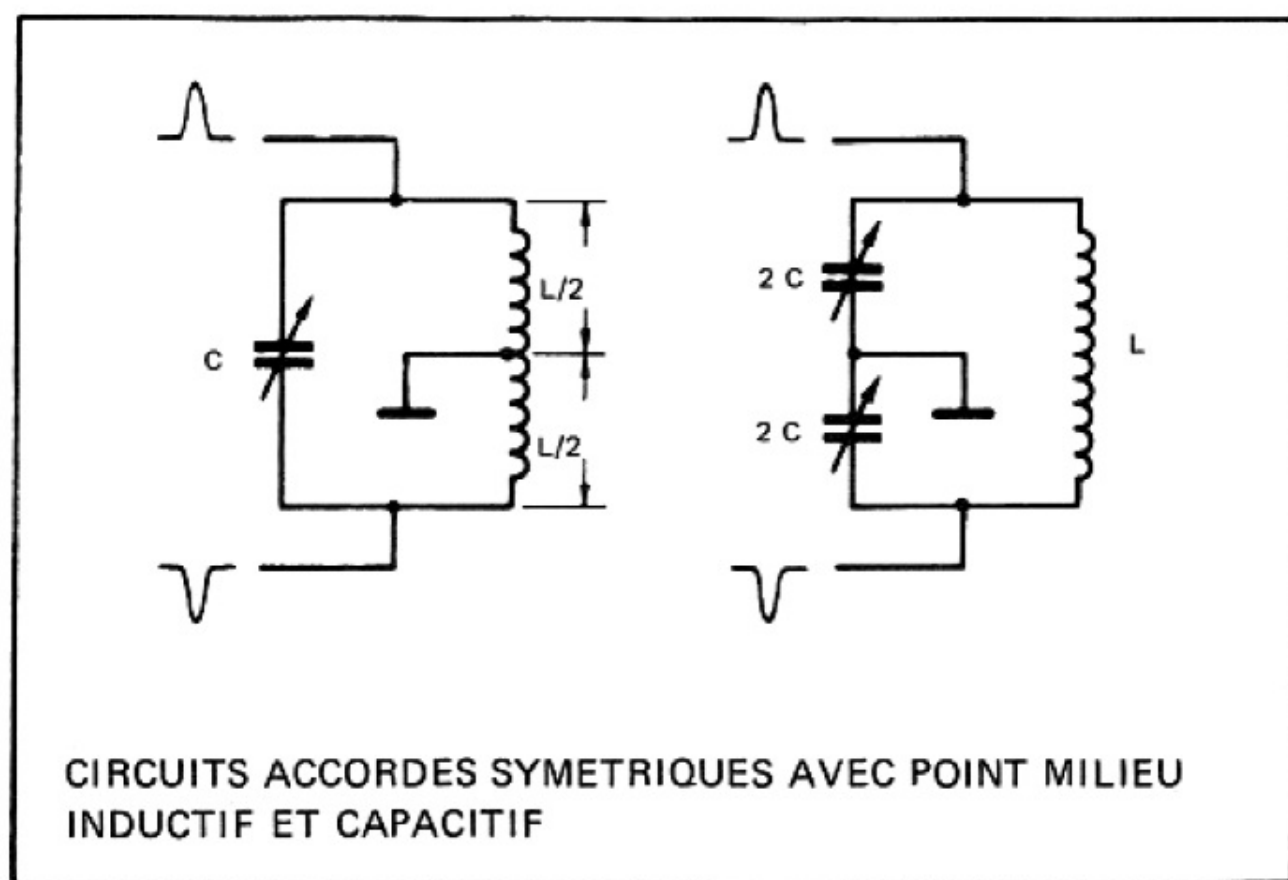


Figure 7

Quand la prise intermédiaire sur le bobinage n'existe pas, il s'agit d'un circuit simple, comparable au pendule suspendu à l'une de ses extrémités. Cependant, pour que ce circuit accordé se comporte de la même façon que le pendule, il faut qu'à son extrémité (côté opposé à l'anode) la tension HF soit nulle. Le condensateur C4 des schémas de la *figure 1* et de la *figure 5* sert justement à éliminer cette tension, et il est appelé *CONDENSATEUR DE FUITE* (on dit aussi condensateur de découplage HF).

Il est utile de noter que l'on ne peut pas réaliser en même temps la prise sur le bobinage et entre deux condensateurs. Il serait très difficile en effet d'obtenir l'équilibre entre les deux parties du circuit et par conséquent on aurait des pertes d'énergie élevées.

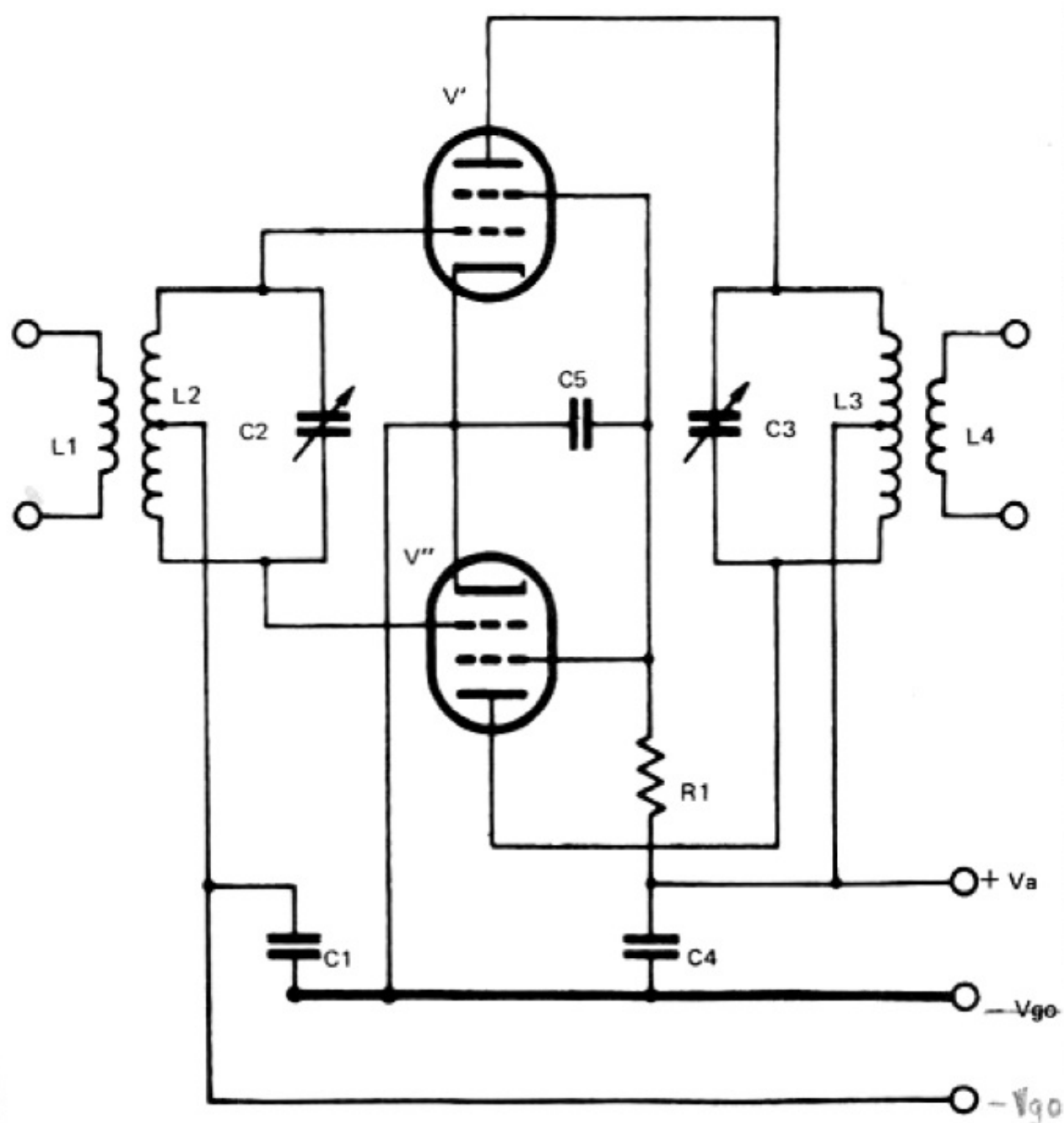
4 - AMPLIFICATEURS PUSH-PULL

Le rôle d'un étage amplificateur de puissance HF est de produire une certaine puissance, évaluée en watts. Etant donné les nombreux types de lampes fabriqués par les constructeurs, il est possible de choisir un tube électronique convenable, qui dépend de la puissance désirée. Cependant, on peut avoir besoin d'une puissance supérieure à celle pouvant être fournie par un seul tube d'un type déterminé. La solution adoptée dans ces cas consiste à utiliser deux de ces tubes en *PUSH-PULL*.

Les amplificateurs de ce type sont basés sur les principes étudiés dans la "*Théorie 18*".

On peut ainsi tracer le schéma fondamental de principe de la *figure 8*, constitué par deux circuits accordés de grille et d'anode, L2.C2 et L3.C3, et par deux tubes V' et V'', du type tétrode.

On note que le circuit accordé de grille, comportant une prise au point milieu, assure l'inversion de phase pour l'attaque des tubes. Pour le bon équilibre du circuit, la bobine d'excitation L1 doit être placée de façon parfaitement symétrique par rapport au point milieu de L2 (ainsi les capacités parasites seront égales dans chaque moitié du circuit).



AMPLIFICATEUR PUSH PULL DE PUISSANCE HF

Figure 8

Il en est de même pour L3_L4. Sur le schéma théorique, on a mis en évidence cette nécessité, en dessinant L1 et L4 près de la prise centrale de L2 et L3.

Les condensateurs C2 et C3 doivent être constitués de façon à présenter la même capacité par rapport à la masse. Ce résultat est obtenu en utilisant un condensateur à stator divisé, c'est-à-dire dont les armatures fixes sont divisées en deux parties symétriques comme on le voit sur la *figure 9*.

Il est intéressant d'observer que sur le schéma de la *figure 8*, la tension continue de polarisation est appliquée directement au circuit de grille, par l'intermédiaire de la prise centrale du bobinage L2. Le condensateur C1 et la résistance R1 de la *figure 1* sont ainsi inutiles sur ce montage.

L'amplificateur *PUSH-PULL* présente de nombreux avantages.

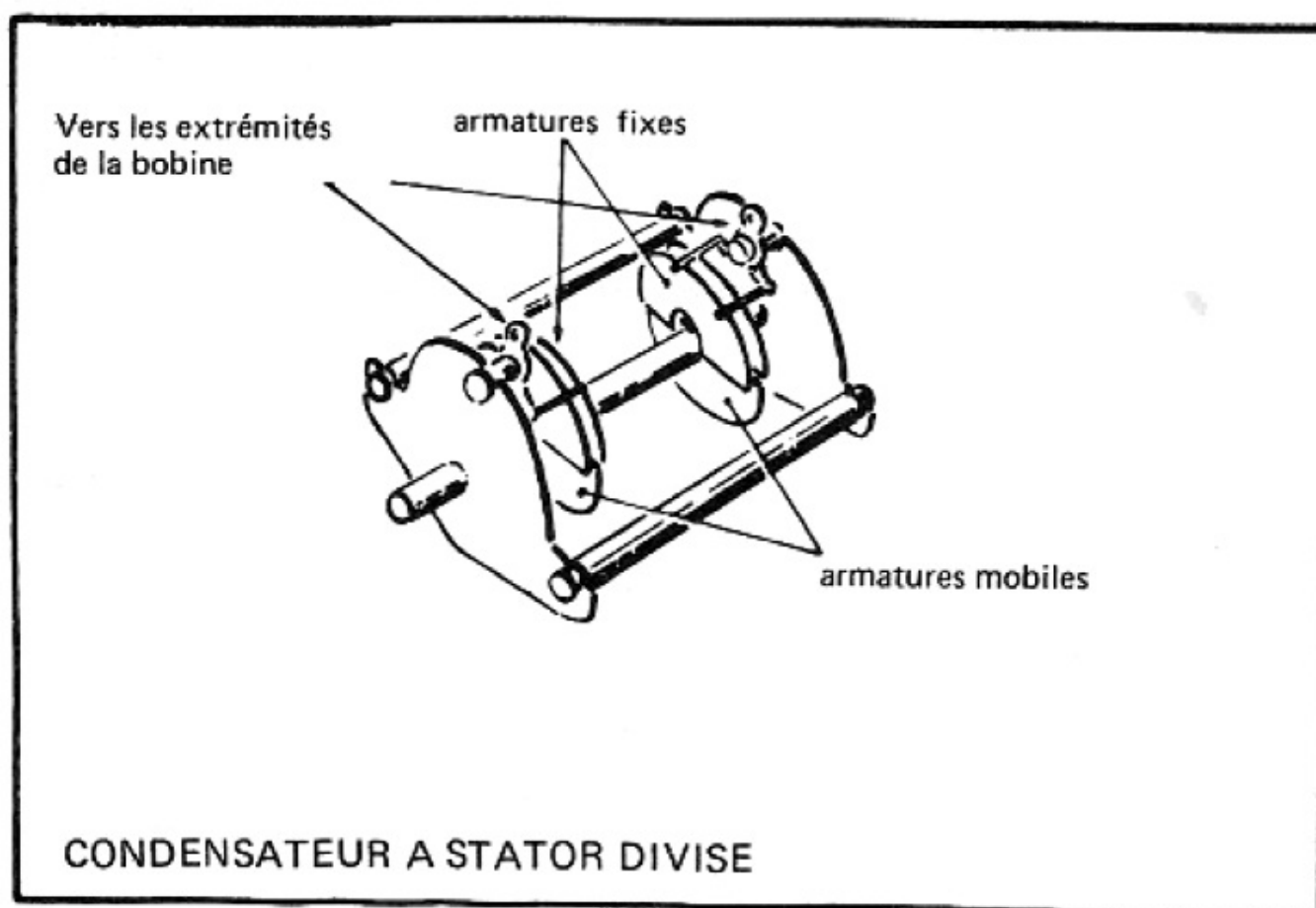


Figure 9

D'abord le rendement est sensiblement amélioré et la puissance obtenue est plus de deux fois plus grande que celle obtenue avec un seul tube.

D'autre part, les capacités interélectrodes ont moins d'influence, car elles n'agissent que sur la moitié du circuit accordé de grille et d'anode, et la symétrie du circuit accordé anodique permet un neutrodynage plus facile.

Enfin, la forme d'onde obtenue est améliorée, car la disposition en *PUSH-PULL* annule les harmoniques paires, comme nous l'avons déjà vu.

Pour cette raison, on ne pourra pas utiliser un amplificateur HF du type *PUSH-PULL* en doubleur ou quadrupleur de fréquence. Cette restriction dans l'utilisation de l'étage *PUSH-PULL* n'est pas gênante en pratique. En effet, les étages multiplicateurs de fréquence réduisent sensiblement l'amplification. Or les étages *PUSH-PULL* sont utilisés pour obtenir la puissance maximum. Il s'ensuit que ces étages sont presque exclusivement utilisés pour l'amplification "*en fondamentale*".

5 - LES TENSIONS D'ALIMENTATION

Pour le fonctionnement d'un amplificateur HF simple ou *PUSH-PULL*, les tensions continues d'alimentation suivantes sont nécessaires : la tension anodique V_a , la tension de polarisation $-V_{g0}$, et si les tubes sont des tétrodes ou des pentodes, la tension positive d'écran V_{g2} .

Les constructeurs de lampes précisent les valeurs usuelles de ces tensions. La tension anodique varie de 200 V pour les tubes de petite puissance à quelques milliers de volts pour les gros tubes émetteurs des stations de radiodiffusion. La tension de polarisation varie de quelques dizaines de volts à une centaine de volts. La tension de grille écran est normalement comprise entre 100 V et 300 V.

Quand la puissance en jeu n'est pas trop élevée, on peut alimenter la grille avec la tension utilisée pour l'anode. On insère alors une résistance R_1 entre ces deux circuits (*figure 8*) et un condensateur de découplage C_5 ,

élimine les tensions HF (provenant des électrons captés par la grille écran).

Quant à la tension de polarisation V_{g0} , elle peut être fournie de la façon la plus économique par le tube amplificateur (ou par le couple des tubes *PUSH-PULL*). Il suffit de modifier le circuit de grille de la *figure 1* de la façon indiquée par la *figure 10 - a*.

Examinons le comportement du circuit à partir de l'instant où l'amplificateur commence à fonctionner.

Comme au début, il n'y a aucune tension de polarisation, la tension HF appliquée à la grille fait devenir cette électrode positive durant les demi-ondes positives.

Etant positive, la grille se comporte comme l'anode, attirant une partie des électrons émis par la cathode.

Ces électrons donnent naissance à un courant qui, selon le sens conventionnel, circule dans le circuit de grille dans le sens indiqué par les flèches de la *figure 10 - a*.

Le courant de grille, traversant la résistance R1, produit à ses extrémités une chute de tension avec les polarités indiquées sur la *figure 10 - a*.

On voit ainsi que la grille est négative comme cela se produit quand une tension de polarisation lui est appliquée.

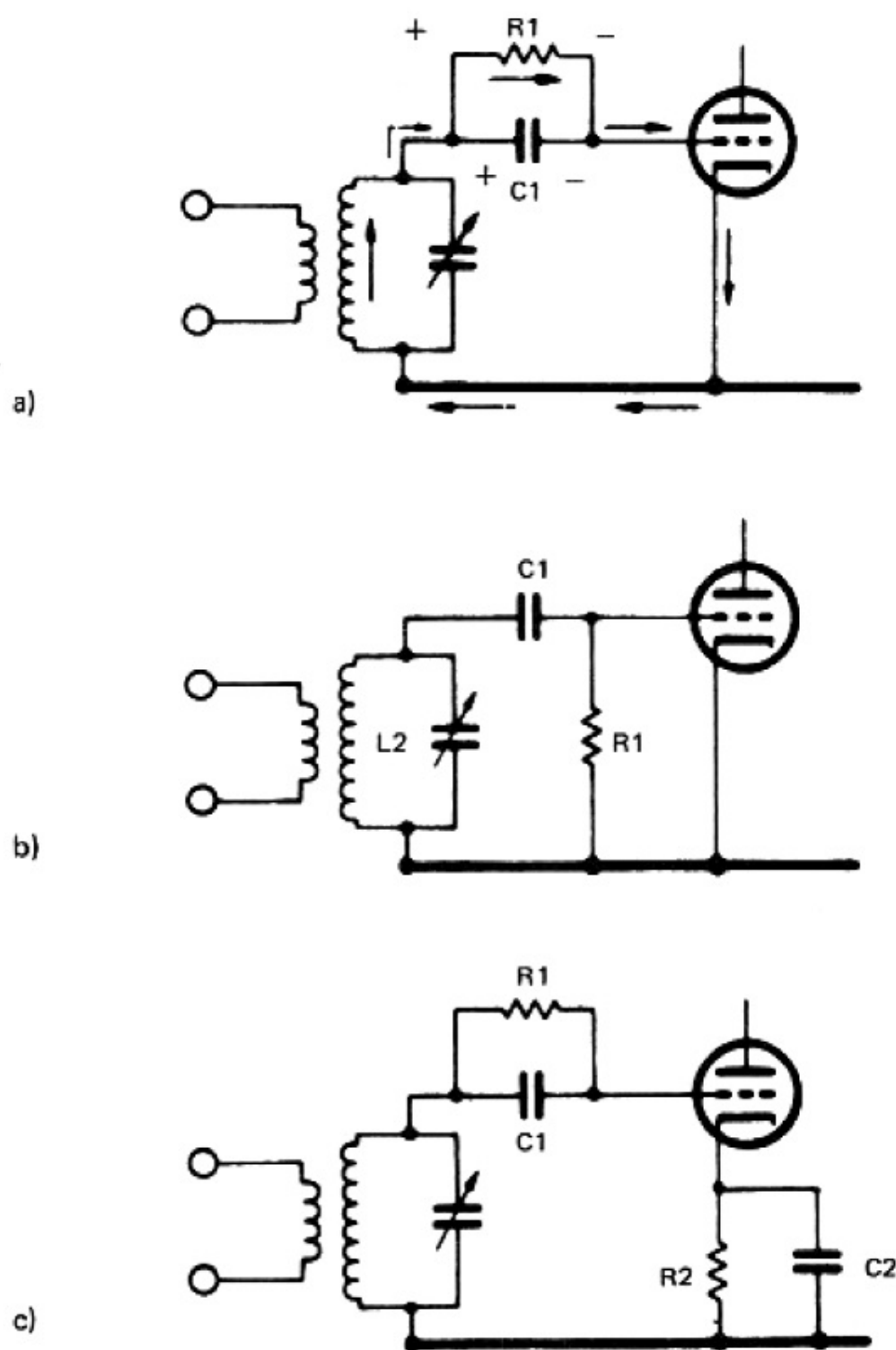
Durant les demi-ondes négatives de la tension HF appliquée à la grille, le courant de grille ne circule plus. Cependant, la tension aux extrémités de R1 ne s'annule pas, car elle est maintenue par le condensateur C1 qui s'est chargé lors du passage du courant.

Quand le courant de grille ne circule pas, le condensateur se décharge dans la résistance, mais si cette dernière a une valeur assez élevée, la tension diminue très peu.

D'autre part, cette tension est reportée à la valeur précédente durant les demi-ondes positives suivantes, et le courant recharge alors le condensateur.

On utilise aussi le circuit de la *figure 10 - b*, qui est équivalent à celui de la *figure 10 - a*. En effet, puisque la résistance R1 est maintenant reliée entre la grille et la masse, on a encore à ses extrémités la tension produite par le courant de grille.

D'autre part, le condensateur C1 est encore pratiquement relié aux extrémités de la résistance R1. En effet, l'enroulement L2 disposé entre



AUTOPOLARISATION ET PROTECTION CATHODIQUE

Figure 10

le condensateur et la masse a une résistance très faible, et le condensateur C1 peut être considéré comme étant relié entre la grille et la masse.

Cette méthode appelée AUTOPOLARISATION, est donc très économique, mais pas très recommandable.

En effet, si pour une raison quelconque le signal de commande venait à manquer, la grille du tube amplificateur serait privée de polarisation. Dans ces conditions, le débit du tube augmenterait très rapidement et atteindrait une valeur excessive. En quelques secondes, les électrodes du tube s'échaufferaient et rougiraient. Cet échauffement pourrait même provoquer la fusion des électrodes, donc la destruction du tube, et la détérioration des circuits d'alimentation.

Si l'on ne veut pas abandonner la méthode d'autopolarisation, sans toutefois s'exposer aux dangers signalés, il faut prévoir une protection du tube contre les surintensités anodiques qui peuvent se manifester en absence d'excitation.

On obtient cela au moyen d'une polarisation cathodique R2-C2, (figure 10-c). Le courant du tube qui passe dans R2 produit une tension positive sur la cathode. Par rapport à cette dernière, la grille est donc négative comme on l'a déjà vu dans les leçons précédentes. Dans les conditions normales, le potentiel négatif de grille s'ajoute à celui qui est produit par autopolarisation de la grille.

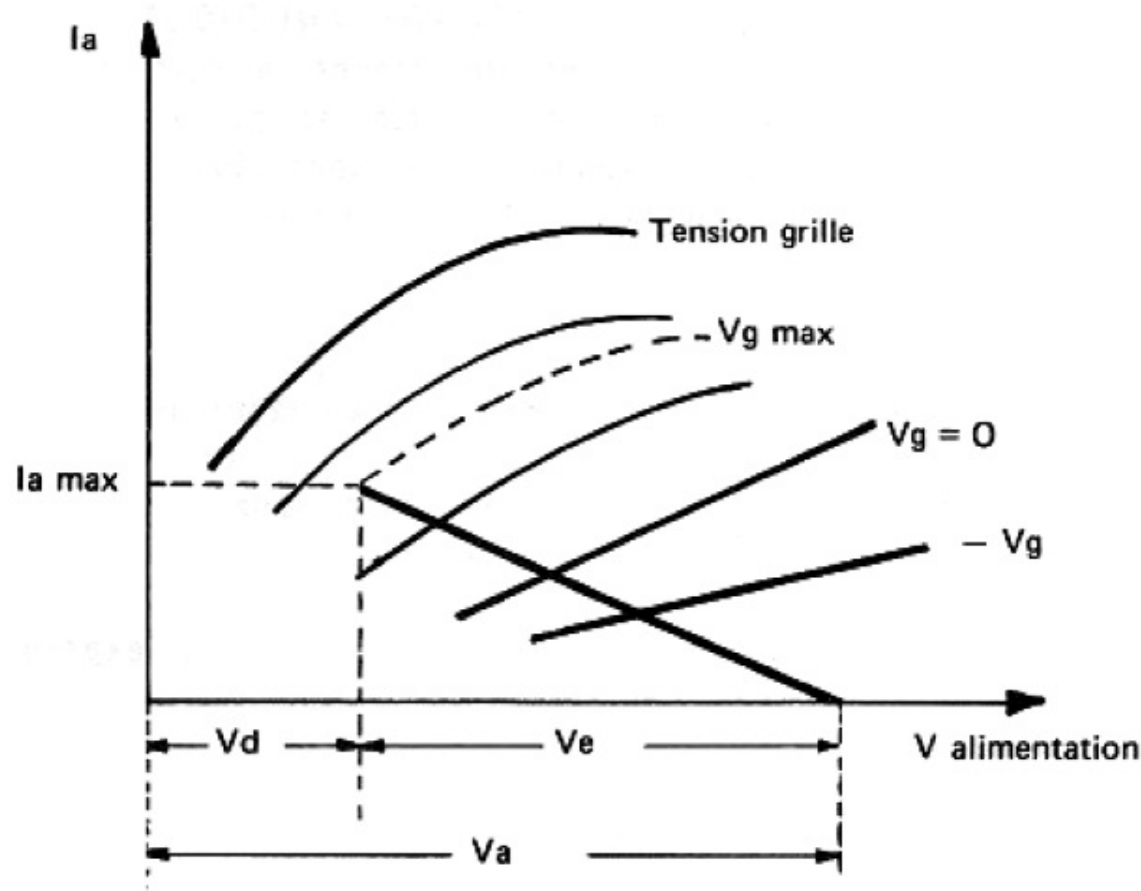
Si l'excitation venait alors à manquer, le courant anodique tendrait à augmenter fortement, mais l'important accroissement proportionnel de la tension de cathode s'y opposerait. La polarisation automatique a donc pour effet de limiter le courant anodique, et par suite, l'échauffement, de façon à écarter tout danger de destruction du tube et des circuits d'alimentation.

Dans la prochaine leçon, nous étudierons les OSCILLATEURS HF, qui permettent d'obtenir les signaux, appliqués aux circuits d'entrée des amplificateurs de puissance HF, mais qui sont aussi utilisés dans d'autres applications (en mesure par exemple dans les GENERATEURS HF modulés- en radio et TV dans les circuits CONVERTISSEURS DE FREQUENCE - en ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE dans de nombreux circuits d'asservissements).

NOTIONS A RETENIR

- Les amplificateurs de puissance HF sont surtout employés en télécommunications.
Ils ont pour rôle de fournir à l'antenne la puissance qu'elle doit rayonner dans l'espace.
- Les amplificateurs de puissance HF travaillent surtout en classe C.
Dans cette classe, le courant plaque ne circule que pendant environ un tiers de période (c'est-à-dire $0,33 \mu\text{sec}$ par exemple si le cycle est de $1 \mu\text{sec}$).
- En désignant par V_a la TENSION CONTINUE D'ALIMENTATION et par V_e la TENSION ALTERNATIVE DU SIGNAL AMPLIFIE, il faut toujours que V_e soit plus petit que V_a .
La différence $V_a - V_e = V_d$ se nomme TENSION DE DECHET.
Le potentiel minimum instantané d'anode, qui est égal à V_d , doit évidemment toujours conserver une valeur positive, SINON LES ELECTRONS N'ATTEINDRAIENT PAS LA PLAQUE.
La figure ci-après permet de bien comprendre cette explication.
D'autre part, comme en classe C, la grille de commande devient positive, LA TENSION V_d doit rester supérieure à la tension positive instantanée de grille, sinon celle-ci capterait trop d'électrons.
- En règle générale, on prend :
$$V_d = 0,2 V_a$$

Exemple : avec $V_a = 500$ volts, on a :
$$V_d = 0,2 V_a = 0,2 \times 500 = 100 \text{ volts}$$
- En classe C, le courant ne passe que pendant un temps très bref (voir figure 2 de cette leçon).



On obtient donc en sortie des **IMPULSIONS**.

La **TRANSFORMATION** de ce courant **PULSE** est obtenue par l'intermédiaire de circuit résonnant anodique.

Dans ce cas particulier, ce circuit prend le nom de **CIRCUIT ANTI-RESONNANT**.

L'**ANTIRESONANCE** est en effet la propriété d'un **CIRCUIT BOUCHON** à la **RESONANCE** ou l'**IMPEDANCE** tend vers l'infinie pour les **OSCILLATIONS FORCEES** de fréquence égale à la fréquence d'oscillation libre du circuit.

L'**ANTIRESONANCE** réside dans le fait que le **CIRCUIT BOUCHON** s'oppose au passage des oscillations forcées avec lesquelles il est en accord de résonance.

Ce **CIRCUIT EMMAGASINE** de l'énergie pendant les impulsions du courant plaque et restitue celle-ci progressivement pendant le reste de la durée du cycle.

- L'énergie reçue par le CIRCUIT ACCORDE ANODIQUE doit être dosée avec soin : si cette énergie est trop grande, les pertes par effet Joule, hystérésis etc, deviennent trop importantes ; par contre si cette énergie est trop faible, les oscillations ne sont plus sinusoïdales. On adopte donc un compromis acceptable donné par le rapport :

$$P_e / P_a > 2 \text{ avec}$$

P_e = énergie emmagasinée par le circuit accordé anodique

P_a = énergie fournie par le tube pendant une période.

Pratiquement on fait varier ce rapport entre 2 et 5.

- L'énergie fournie (P_a) pendant une période est donnée par l'expression:

$$P_a = W / f \text{ avec}$$

W = puissance HF du tube en watts

f = fréquence en hertz.

- Pour doser l'énergie emmagasinée on agit sur C (C_3 de la figure 1) étant donné que :

$$P_e = \frac{C.V^2}{2}$$

- On peut trouver la valeur approximative de C à l'aide de la formule :

$$C = \frac{14500 I \cdot \lambda}{V_a} \text{ avec}$$

I = courant anodique en ampère

λ = longueur d'onde de travail en mètre

V_a = tension continue d'alimentation d'anode

- Connaissant C on peut calculer L pour avoir l'accord en fréquence à l'aide de la formule :

$$L = \frac{1}{4 \pi^2 C f^2} = \frac{1}{C \omega^2}$$

- La méthode d'AUTOPOLARISATION consiste à insérer une résistance avec un condensateur en parallèle entre la grille et la masse. Cette méthode a un inconvénient : en l'absence d'un signal d'entrée la polarisation disparaît et le débit du tube devient excessif. On prévoit donc une protection au moyen d'une POLARISATION AUTOMATIQUE (RK CK entre cathode et masse).

EXEMPLE : Pour le tube TRIODE d'amplification de puissance HF 3T50 A1G (OREGA-CIFTE) le constructeur donne les caractéristiques suivantes :

$V_a = 750 \text{ V}$
 $I_a = 125 \text{ mA}$
 $W = 35 \text{ watts}$
 $V_{g1} = - 100 \text{ Volts}$
 $I_{g1} = 25 \text{ mA}$

Avec une AUTOPOLARISATION seule, on aurait :

$$R_{g1} = 100/0,025 = 4000 \Omega$$

En effet :

$$V_{g1} = R_{g1}.I_{g1} = 4000 \times 0,025 = - 100 \text{ volts}$$

En adoptant une PROTECTION par POLARISATION AUTOMATIQUE, on peut prendre :

$V_K = + 50 \text{ Volts}$. On a alors

$$V_{g1} = 100 - 50 = - 50 \text{ Volts}$$

Pour R_{g1} la valeur devient :

$$R_{g1} = 50/0,025 = 2000 \, \Omega$$

Pour R_K :

$$R_K = 50/0,125 = 400 \, \Omega$$

- Si le signal de commande est absent le débit tend à augmenter, mais la tension positive de cathode augmente également.

En effet, avec un signal de commande et avec $I_a = 125 \, \text{mA}$ on a une tension de polarisation de $V_{g1} = -50 \, \text{Volts}$.

Si en l'absence d'un signal de commande le débit tend à passer de $125 \, \text{mA}$ à $150 \, \text{mA}$, la tension de polarisation tend à passer de $-50 \, \text{volts}$ à :

$$400 \times 0,150 = -60 \, \text{Volts}$$

et ainsi de suite.

Le débit du tube est donc limité.



EXERCICE DE REVISION SUR LA THEORIE 24

- 1) Quelle est la différence entre amplification de puissance et rendement ?
- 2) Quelle relation y-a-t-il entre la puissance d'alimentation, la puissance dissipée et le rendement ?
- 3) Pour quelle raison ne peut-on pas utiliser les amplificateurs en classe C pour la basse fréquence ?
- 4) Pourquoi la tension de polarisation de grille d'un étage en classe C doit-elle être fortement négative ?
- 5) Pourquoi utilise-t-on le neutrodynage ?
- 6) Les pentodes nécessitent-elles le neutrodynage ?
- 7) Qu'est ce qui limite la fréquence de fonctionnement d'un amplificateur ?
- 8) Dans quel cas utilise-t-on les condensateurs à stator subdivisé ?



**REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR LA LECON
THEORIE 23**

- 1) Une onde carrée est caractérisée par son amplitude, son facteur de forme et son rapport cyclique.
- 2) Les condensateurs de liaison dans un multivibrateur ABRAHAM BLOCH, transmettent les variations de tension anodique sur la grille qui leur est reliée et permettent le déblocage des tubes par leurs décharges successives.
- 3) Le multivibrateur CHARBONNIER délivre une onde parfaitement symétrique, quelle que soit la fréquence.
- 4) On améliore la stabilité en fréquence d'un multivibrateur astable, en reliant les résistances de fuite de grille à la haute tension.
- 5) Les deux états d'un UNIVIBRATEUR, sont un état STABLE et un état INSTABLE.
- 6) Les trois modes d'injection des impulsions de commande d'un univibrateur à tube sont :
 - a) Par impulsions positives sur la grille du premier tube
 - b) Par impulsions négatives sur l'anode du premier tube
 - c) Par impulsions négatives sur la grille du second tube.
- 7) Il faut deux impulsions de commande pour obtenir une période complète en sortie d'un montage bistable.
- 8) Le rôle d'une bascule de SCHMITT est de transformer des signaux quelconques (dents de scie, sinusoïdes, etc) en tensions rectangulaires.

- 9) Dans une bascule de SCHMITT, les deux tubes ne conduisent pas de la même façon ; l'un conduit à la saturation alors que l'autre conduit normalement.
- 10) On modifie le rapport cyclique de l'onde délivrée par une bascule de SCHMITT, en réglant la TENSION DE SEUIL.

