

CHAPITRE VI *bis*

CIRCUIT A CHARGE DE CATHODE

Du tube à charge anodique au tube à charge cathodique

Dans les circuits les plus courants, le tube électronique est utilisé de la façon suivante : La cathode est à la masse pour le courant alternatif, la tension d'entrée ΔV_g est appliquée entre grille et masse ou, ce qui revient au même, entre grille et cathode et la tension de sortie est recueillie aux bornes d'une charge placée entre plaque et cathode (Nous faisons abstraction ici des dispositifs destinés à l'alimentation du tube en courant continu qui sont supposés avoir une impédance nulle ou tout au moins négligeable en courant alternatif).

Si la charge n'est ni ohmique, ni réactive (pour ne pas avoir à tenir compte 1° des variations des coefficients ρ , K_a et S , quand I_p moyen varie, 2° de la fréquence) la tension V_a est égale à $K_a V_g$ (K_a étant égal,

rappelons-le à $K_a \frac{R_p}{R_p + \rho}$) ou plus exactement à $K_a \cdot V_{gk}$ (V_{gk} tension alternative grille-cathode).

Si nous changeons la masse de place, en la portant à l'autre extrémité de R_p , en A au lieu de B, la charge R_p est maintenant placée entre cathode et masse donc toujours entre cathode et plaque puisque, dans ce cas, on a affaire à un circuit « plaque à la masse ».

La tension d'entrée V_g reste appliquée entre grille et masse donc entre grille et plaque.

Gain du tube à charge cathodique

Si l'on excepte la position de la masse et si l'on examine le tube isolé, on retrouvera toujours aux bornes de R_p ou R_k une tension plaque-cathode égale à $K_a \cdot V_{gk}$. Mais si l'on remet la masse, on s'aperçoit que la tension d'entrée qui n'est plus V_{gk} , mais V_{gp} , est égale à la somme des vecteurs de phases opposées : V_{gk} et V_g et que V_a est inférieure à V_g , autrement dit, on recueillera, en sortie, moins de volts qu'on en a appliqués à l'entrée.

Admission grille du tube à charge cathodique

Si un tube a une tension de polarisation V_{gk} et un coefficient d'amplification K_a , il admettra à l'entrée une tension maximum théorique égale à $(K_a + 1) V_{gk}$.

La contre-réaction dans le circuit à charge cathodique

Il est bien évident que cette perte de gain de K_a à $G = \frac{K_a}{K_a + 1}$ n'est pas obtenue sans compensation. Si on y regarde d'un peu plus près, on voit que la tension de sortie est intégralement appliquée à l'entrée. On a donc affaire à une contre-réaction totale de tension dans laquelle le facteur $n = 1$. On sait que dans toute R.N.T le gain est divisé par le nombre : $1 + nK_a$, ici : $1 + K_a$ puisque $n = 1$. C'est bien ce que nous avons trouvé.

Nous avons vu que la distorsion produite par le tube est égale à $\frac{d}{1 + nK_a}$; avec le circuit à charge de cathode, elle sera divisée par $1 + K_a$. (C'est le maximum qu'on puisse espérer d'un seul tube, aussi ce circuit est-il appelé « à contre-réaction totale »).

Avec un tube EL84, $K_a = 45$ environ pour une charge de 4 K Ω . La distorsion est 10 % pour une puissance de sortie voisine de 6 watts. En montage à charge cathodique la même puissance de sortie sera obtenue avec $\frac{10\%}{45+1} = 0,2\%$ de distorsion, mais au lieu de fournir 5 v pointe à l'entrée, il faudra en fournir 46 fois plus soit 230 volts et c'est là que réside toute la difficulté mais nous verrons cela plus loin.

Impédance d'entrée du tube à charge cathodique

Examinons le schéma d'utilisation pratique du circuit à charge cathodique (figure VI bis 2), nous voyons le circuit de polarisation par résistance de cathode shuntée, la résistance grille-cathode, la charge de cathode, en somme un circuit normal transposé par le déplacement de la masse d'une extrémité à l'autre de la charge. Si nous examinons le montage normal, le courant alternatif dans R_g est égal à :

$$\frac{V_{gk}}{R_g} \text{ ou } \frac{V_e}{R_g}$$

Dans le montage à charge K, il est toujours égal à $\frac{V_{gk}}{R_g}$ et comme

$$V_{gk} = \frac{V_e}{1 + K_a}, \text{ on en déduit que le courant dans } R_g \text{ vaut } \frac{V_e}{(1 + K_a) R_g}.$$

Tout se passe donc comme si à l'endroit où V_e est appliquée, c'est-à-dire entre grille et masse, existait une résistance d'entrée équivalente à $(K_a + 1)$ fois R_g .

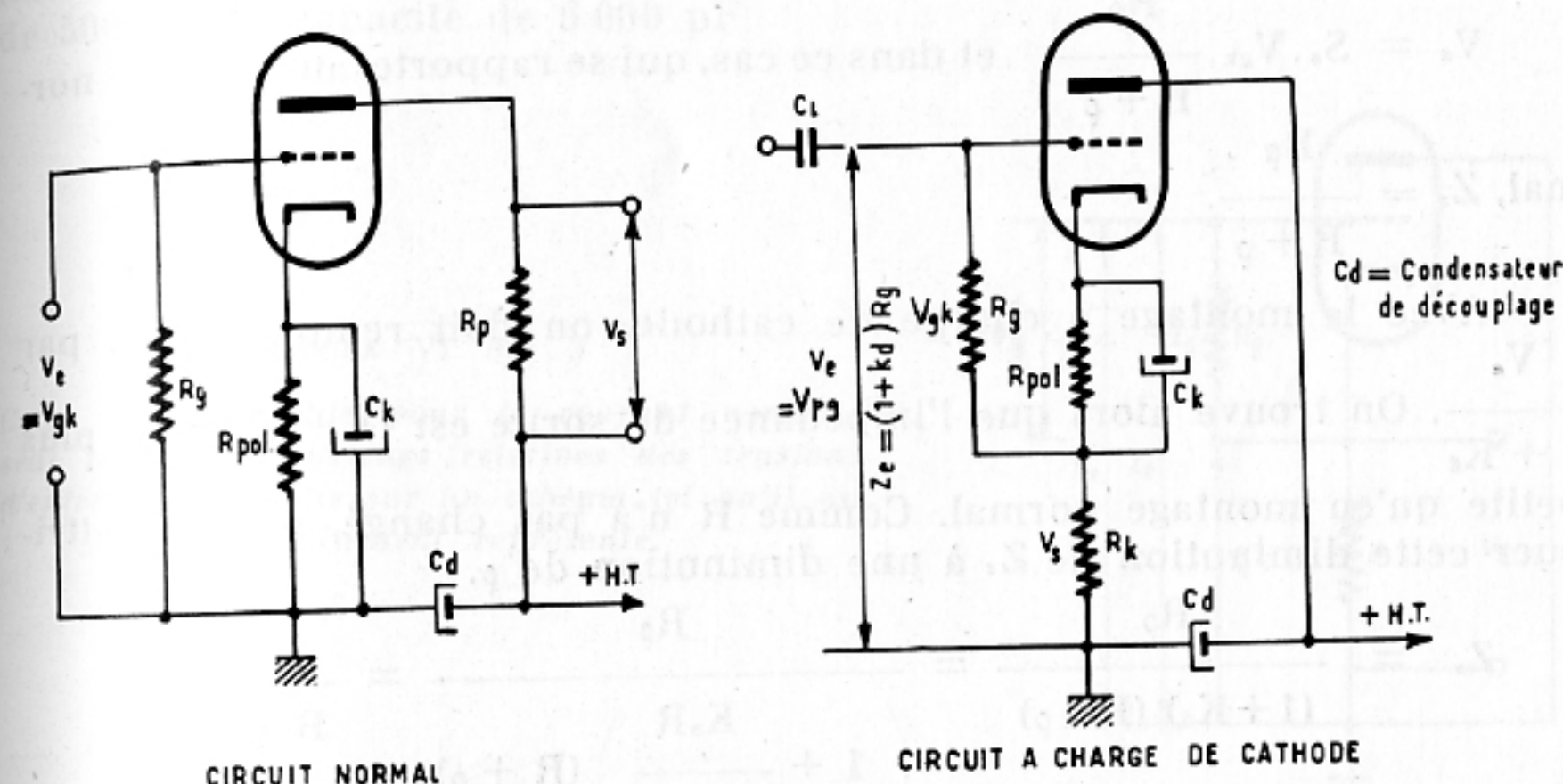


FIGURE VI bis 2

Dans le circuit habituel $V_e = \Delta V_{gk}$. Dans le circuit à charge cathodique, V_e vaut $\Delta V_{gk} (1 + K_a)$. Vis-à-vis de cette tension d'entrée, la résistance de grille apparaît comme multipliée par le facteur $(1 + K_a)$. C'est une propriété importante du circuit qui le fait utiliser comme étage d'entrée dans les voltmètres électroniques.

Ainsi avec un tube ECC82 pour lequel K_a vaut 14, une résistance de grille de 1 M Ω équivaut à une résistance d'entrée de 1 M Ω $(1 + 14) = 15$ M Ω . Si le couplage se fait par capacité avec la grille d'entrée, la constante de temps sera égale à $C_k R_g (1 + K_a)$. [On peut négliger dans ce cas l'influence des résistances de la source]. La transmission des fréquences basses sera donc très facilement assurée. Une telle impédance d'entrée ne perturbera pas le circuit sur lequel elle sera branchée. On utilise cette propriété pour réaliser des voltmètres électroniques à grande impédance d'entrée. Pour amplifier la tension issue d'un microphone électrostatique qui exige une très grande impédance en shunt, on pourra intercaler entre le micro et l'amplificateur de tension un étage à charge K. Si on branche une résistance R entre grille et masse, l'impédance d'entrée sera, bien entendu, égale à la mise en parallèle de Z. et R.

Impédance de sortie du circuit à charge cathodique

Un tube peut être assimilé soit à un générateur à tension constante $K_s \Delta V_{gk}$ débitant sur sa résistance interne et sa charge, en série, soit comme un générateur à courant constant, débitant son courant de court-circuit $S_s \Delta V_{gk}$ dans sa résistance interne et sa charge, cette fois, en parallèle.

L'impédance de sortie est le quotient de la tension de sortie par le courant qui y circule. On a dans le système à courant constant :

$$V_s = S_s \cdot V_{gk} \cdot \frac{R_\rho}{R + \rho} \quad \text{et dans ce cas, qui se rapporte au montage normal, } Z_s = \frac{R_\rho}{R + \rho}.$$

Avec le montage à charge de cathode, on doit remplacer V_{gk} par V_s . On trouve alors que l'impédance de sortie est $(1 + K_d)$ fois plus petite qu'en montage normal. Comme R n'a pas changé, on peut attribuer cette diminution de Z_s à une diminution de ρ .

$$Z_s = \frac{R_\rho}{(1 + K_d)(R + \rho)} = \frac{R_\rho}{\left(1 + \frac{K_s R}{R + \rho}\right)(R + \rho)} = \frac{R_\rho}{R + \rho + K_s R}$$

$$Z_s = \frac{R_\rho}{R(1 + K_s) + \rho} = \frac{R \frac{\rho}{1 + K_s}}{R + \frac{\rho}{1 + K_s}} = \frac{R \rho_{cc}}{R + \rho_{cc}} \quad \text{en posant } \rho_{cc} = \frac{\rho}{1 + K_s}$$

ρ_{cc} étant la résistance interne du tube à charge cathodique. On voit qu'elle est égale à la résistance interne du tube en montage normal divisée par $1 + K_s$. (On remarquera qu'il s'agit ici d'un facteur faisant intervenir le coefficient d'amplification *statique*, donc indépendant de la charge.)

Si K_s est suffisamment grand pour que $(K_s + 1)$ puisse être assimilé à K_s , on trouvera alors pour ρ_{cc} la valeur $\frac{\rho}{K_s}$ qui est l'inverse de la pente statique ; donc, dans le cas général, on peut dire que $\rho_{cc} = \frac{1}{S_s}$.

L'impédance de sortie Z_s est toujours inférieure à ρ_{cc} puisque R est en parallèle sur ρ_{cc} . C'est une propriété extrêmement intéressante du montage à charge K (et qui fait la popularité de ce circuit) d'avoir une impédance de sortie très faible. Voici à titre d'exemple les valeurs de ρ_{cc} pour divers tubes amplificateurs de tension : ECC82 - 500 Ω ; ECC81 - 200 Ω ; ECC83 - 600 Ω . Ce sont des valeurs approximatives car K_s et S_s dépendent de la tension d'anode et du courant plaque.

Sur des valeurs aussi faibles, des capacités mêmes très importantes sont sans effet sur la transmission des fréquences élevées. Pour une atténuation de 3 dB à 100 kHz, il faut mettre en parallèle sur une résistance de 500 Ω une capacité de 5 000 pF.

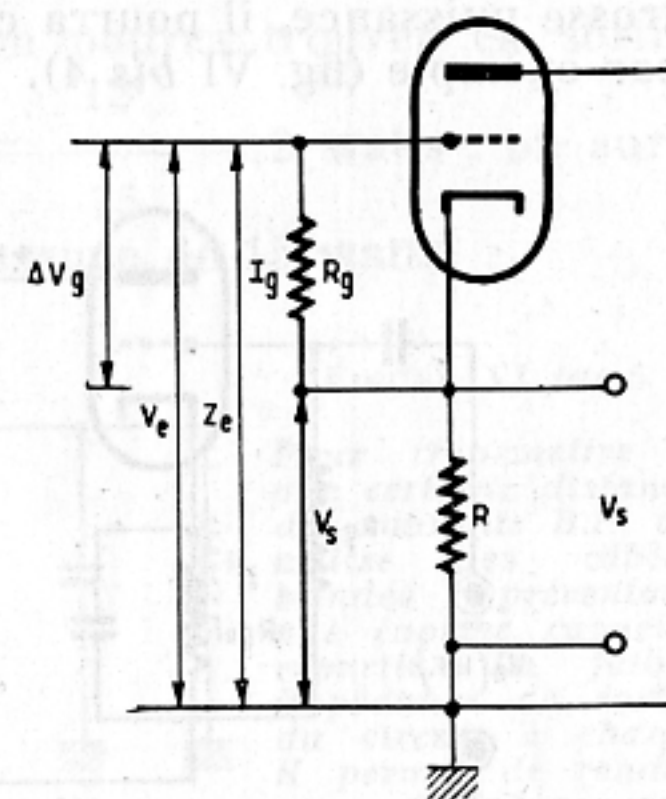


FIGURE VI bis 3

Cette figure valable pour le courant variable seul montre les valeurs relatives des tensions d'entrée et de sortie sur un schéma tel qu'il est habituellement représenté.

Aussi le circuit à charge K est-il très utilisé pour des liaisons entre préamplificateur et amplificateur où l'on a à utiliser fréquemment plusieurs mètres de fil blindé. Si ce câble fait 200 pF au mètre, on pourra en utiliser jusqu'à 25 m pour constater une atténuation de 3 dB à 100 kHz.

Comme le circuit à charge K a une grande impédance d'entrée et une faible impédance de sortie, il pourra être utilisé comme transformateur d'impédance. Il permet d'abaisser l'impédance sans perte de gain en tension (G est voisin de 1), alors qu'un transformateur abaisseur diminue

la tension de sortie et la réduit dans un rapport $n = \sqrt{\frac{Z_s}{Z_e}}$.

La faible résistance interne du tube peut s'adapter à l'impédance faible des lignes de transmission.

Ces lignes ont une impédance caractéristique dont la valeur s'étend de 50 à 600 Ω . Si on veut qu'elles fonctionnent avec le minimum de pertes, il faut que leur extrémité soit fermée sur une impédance égale à leur impédance caractéristique. S'il n'en est pas ainsi, elles sont le siège d'ondes stationnaires provenant de l'interférence entre les ondes d'aller et les ondes réfléchies. Si l'impédance du générateur est adaptée, il n'y

a pas réflexion des ondes de retour. Un fonctionnement parfait exige donc que les impédances d'entrée et de sortie de la ligne soient égales à son impédance caractéristique.

C'est d'ailleurs dans ces conditions que la puissance maximum peut être transmise.

Avec des lampes dont la pente varie de 1,6 mA/V à 20 mA/V, on obtient des ρ_{cc} s'étendant de 600 Ω à 50 Ω . On peut donc utiliser cette possibilité d'adaptation pour transmettre, dans les meilleures conditions, de l'énergie haute fréquence. Avec un tube dont la pente est 13 mA/V, on peut attaquer un câble co-axial d'impédance 75 Ω . Cependant nous allons voir que ce moyen séduisant ne permet pas de transporter une grosse puissance, il pourra convenir pour un générateur haute fréquence par exemple (fig. VI bis 4).

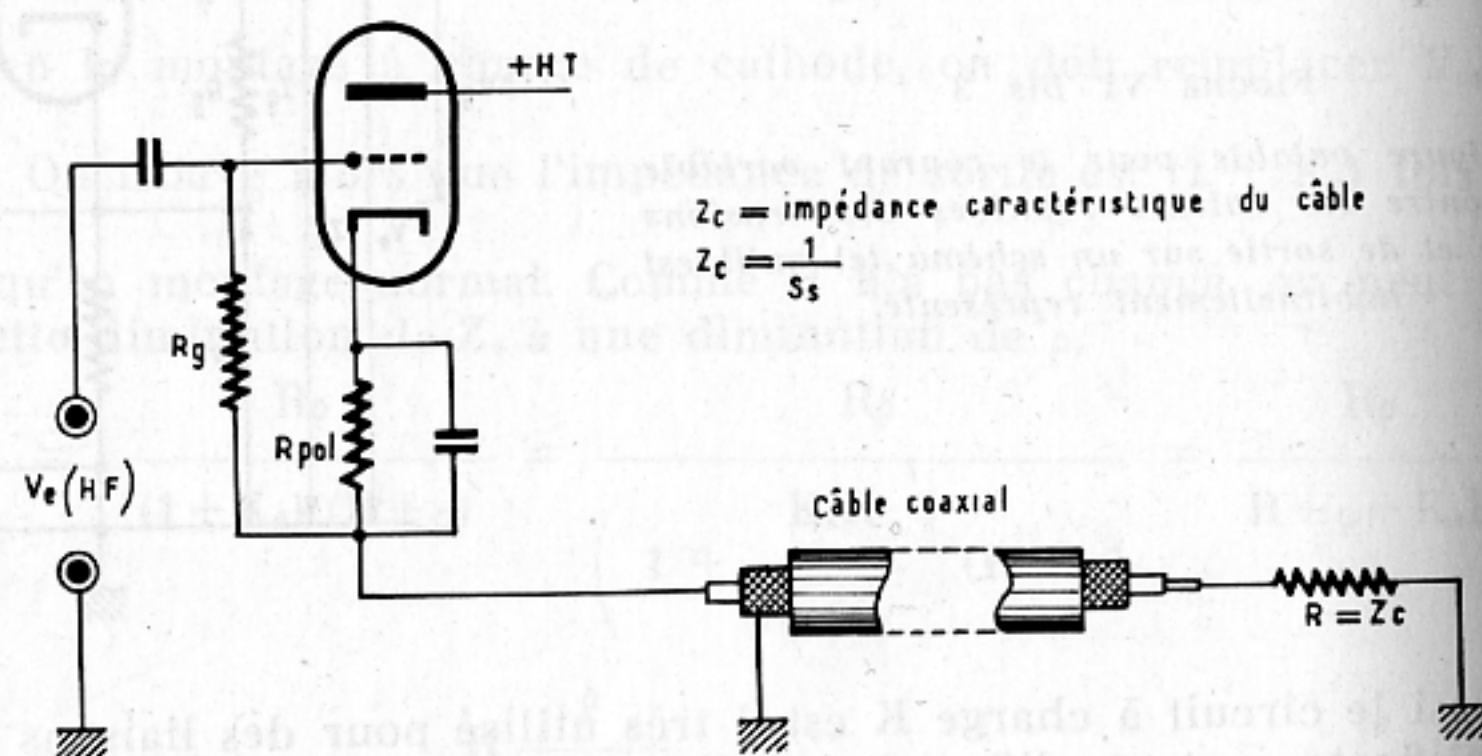


FIGURE VI bis-4

On peut adapter la faible impédance de sortie du tube à charge K, aux faibles impédances des lignes de transmission pour courants à haute fréquence. Ce système, s'il permet un fonctionnement parfait de la ligne, n'autorise que le transport d'une puissance insignifiante car la ligne adaptée représente une charge trop faible pour le tube.

En effet, prenons un tube ECC81 dont les 2 triodes sont en parallèle. Pour $V_{HT} = 200$ V, $S_s = 6,5$ mA/V et $\rho = 10$ k Ω pour chaque tube.

La pente du tube formé par les deux triodes en parallèle est $6,5$ mA/V $\times 2 = 13$ mA/V, ce qui donne pour ρ_{cc} , 75 Ω .

Si on attaque un câble co-axial 75 Ω fermé, comme il se doit, sur une impédance de 75 Ω , le tube est chargé par 75 Ω et le gain K_d est alors :

$$K_d = K_s \cdot \frac{R}{R + \rho} = 65 \cdot \frac{75}{75 + 5\,000} = 0,96 ; \text{ prenons } 1.$$

On ne pourra sortir une tension supérieure à la moitié de la tension d'entrée ou à la tension V_{gk} qui peut être, au maximum, la tension de polarisation : soit 1 V au maximum.

$$\text{La puissance maximum transmise sera au plus égale à } \frac{V_s^2}{R} = \frac{1^2}{75} =$$

13 milliwatts.

Avec le tube anglais G.E.C. — A 2293 — $S_s = 12$ mA/V, $\rho = 375$ Ω et $K_s = 4,5$. On aurait :

$$K_d = 4,5 \times \frac{75}{75 + 375} = 0,75.$$

Comme la polarisation est — 20 V, on pourra trouver en sortie 12 volts et la puissance transmise sera $W_s = \frac{12^2}{75} = 2$ watts ; on aura utilisé, pour cela, un tube dissipant une puissance de 15 watts.

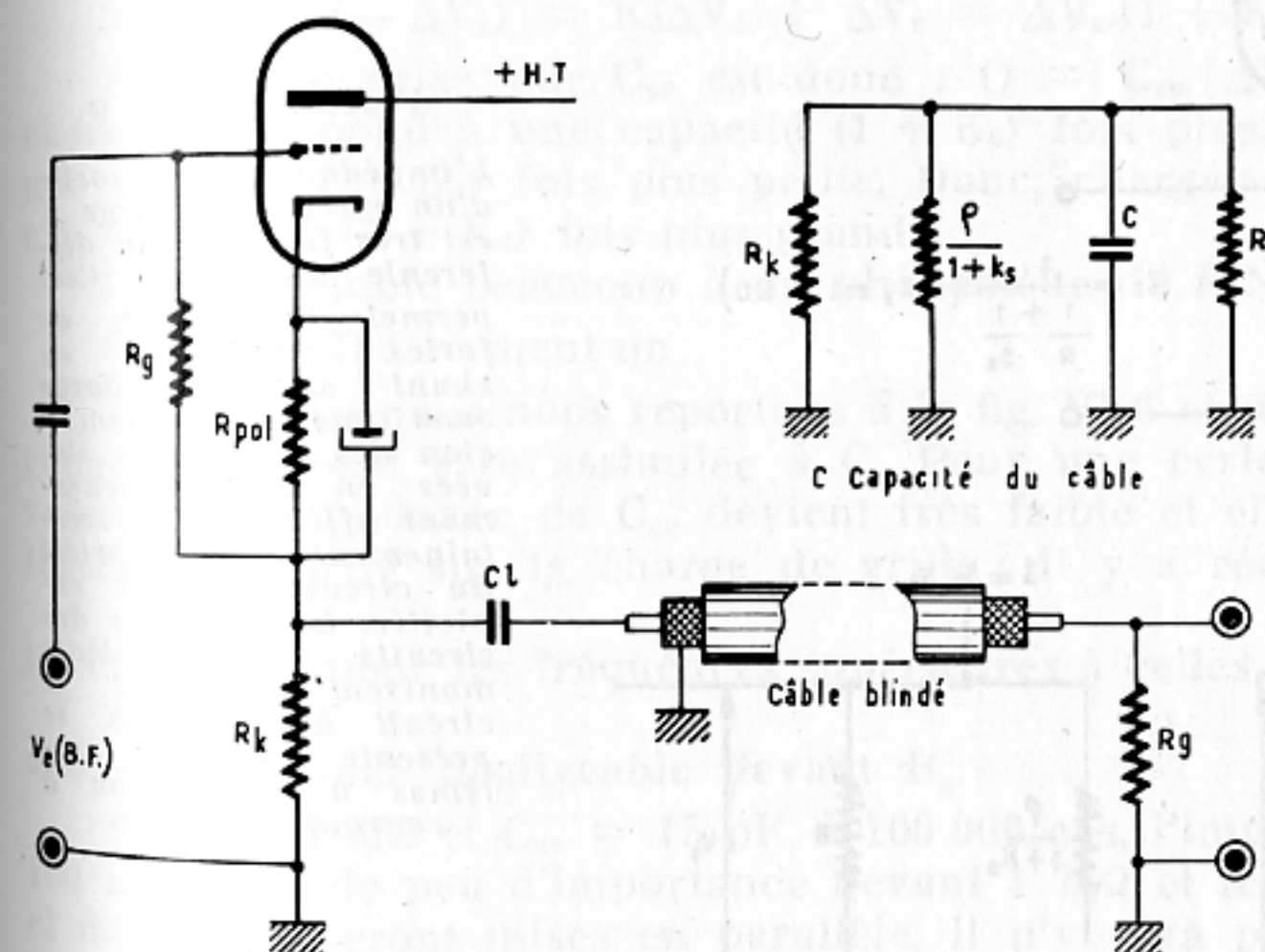


FIGURE VI bis-5

Pour transmettre à une certaine distance des courants B.F. on utilise des câbles blindés présentant une énorme capacité répartie. La faible impédance de sortie du circuit à charge K permet de rendre sans influence sur la transmission des fréquences élevées, cette capacité importante du câble. La charge terminale du câble shuntant la charge de cathode du tube devra être suffisamment importante pour ne pas changer le gain interne du tube.

Quand on utilise le tube à charge K pour éviter la chute du gain aux fréquences élevées, on devra, si on veut transmettre une tension importante, terminer le câble blindé sur une grande impédance afin de conserver toute sa valeur à la charge de cathode et celle-ci devra être importante pour que K_d soit grand car c'est de sa valeur que dépend l'admission grille-masse du tube, donc la tension de sortie (fig. VI bis-5).

Un exemple le fera bien voir.

Soit un tube ECC83, utilisé avec charge cathodique. Pour ce tube alimenté à partir d'un HT de 250 V, on a les valeurs suivantes :

Pour $R_p = 100$ k Ω , $K_d = 55$, $V_g = -1,3$ V.

Pour $R_p = 1 \text{ k}\Omega$, $K_d = 1,7$, $V_g = -2 \text{ V}$.

Avec $R_k = 100 \text{ k}\Omega$ et 56 V à l'entrée on aura 55 volts en sortie et 1 V entre grille et cathode.

Avec $R_k = 1 \text{ k}\Omega$ et $4,6 \text{ V}$ à l'entrée, on aura $2,9 \text{ V}$ en sortie et $1,7 \text{ V}$ entre grille et cathode.

Dans le premier cas, la tension de sortie maximum sera 18 fois plus grande que dans le deuxième.

A tension de sortie égale, la distorsion sera beaucoup plus faible que dans le deuxième cas, car il n'y aura pour $R_k = 100 \text{ k}\Omega$ et 3 V en sortie que $3 \text{ V}/55$ entre grille et cathode, soit $0,05 \text{ V}$, ce qui est insignifiant. D'autre part, dans le premier cas, la distorsion sera divisée par 56 alors que dans le second cas, elle est divisée seulement par $2,7$.

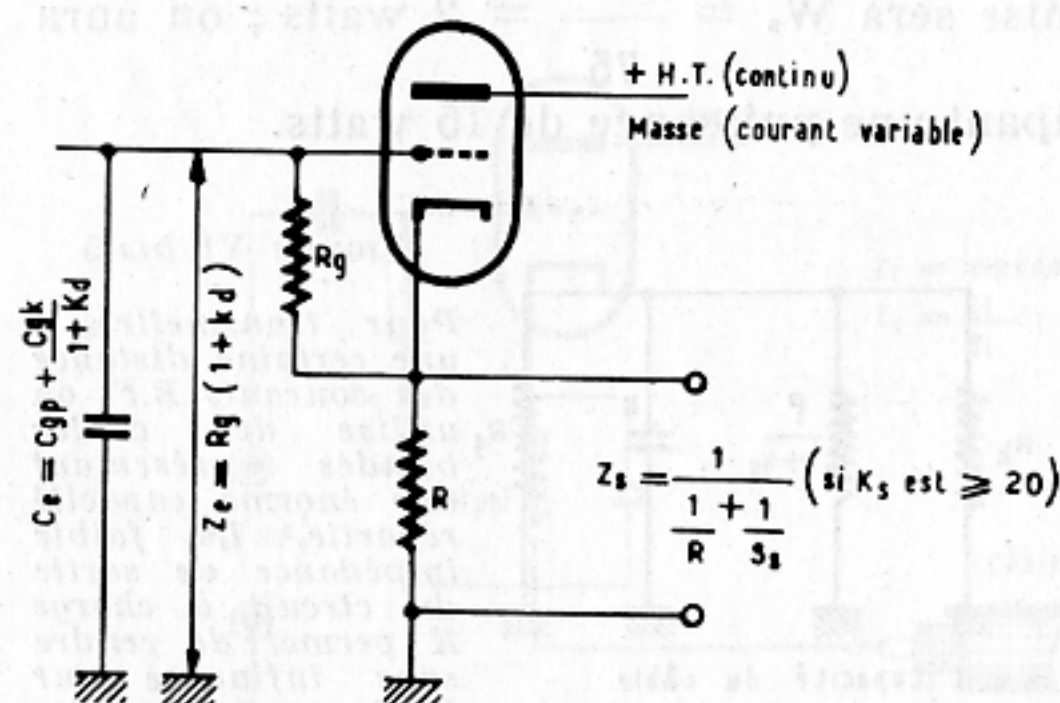
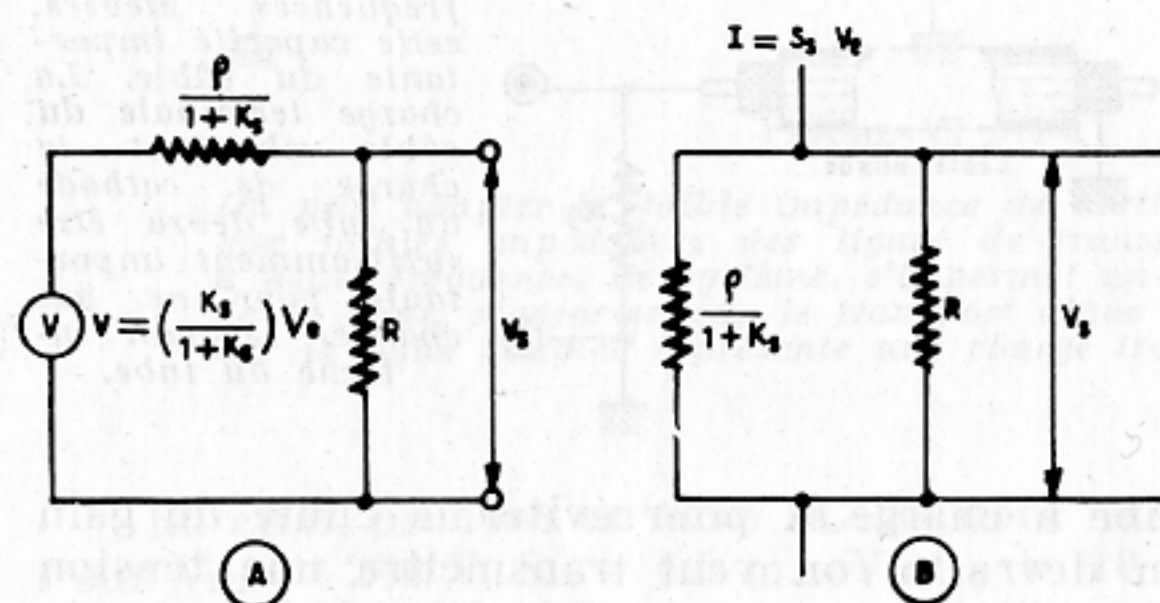


FIGURE VI bis 6

L'impédance de sortie d'un circuit à charge K est très faible ; peu différente de $1/S_s$. Ceci permet l'utilisation de fortes capacités en shunt sur la charge sans que la transmission des fréquences élevées en soit sérieusement affectée. C'est certainement la propriété du circuit la plus exploitée. Les schémas des circuits équivalents montrent comment le circuit à charge K se présente dans les systèmes à tension ou à courant constants.



Le seul avantage qu'on pourrait trouver à choisir pour R_k la valeur de $1 \text{ k}\Omega$ serait de l'utiliser comme résistance de polarisation et de pouvoir ainsi faire une liaison directe avec la grille, la résistance de grille étant reliée à la masse, mais ceci ne peut améliorer que la réponse aux fréquences basses et on sait que, étant donné la grande impédance d'entrée du circuit, les basses sont facilement transmises avec une liaison par capacité.

La résistance qui est à l'autre extrémité du câble blindé est en parallèle sur la charge et il faudra qu'elle soit, au moins, 10 fois égale à celle-ci, pour ne pas en diminuer sensiblement la valeur (VI bis 5).

N.B. — Dans ce qui a été dit, il est bien entendu que R_k est la charge de cathode et non la résistance de polarisation (R_{pol}).

EFFET MILLER

Dans un tube utilisé normalement la capacité C_{gp} est multipliée par $(1 + K_d)$, nous allons voir pourquoi.

Quand la tension de grille varie de ΔV_g , la tension de plaque varie de $K_d \Delta V_g$. Ces deux tensions sont en opposition de phase puisque toute diminution du potentiel négatif de grille augmente le courant de plaque, donc la chute dans R : ce qui diminue V_p qui est égale à $V_{HT} - R I_p$. La différence de potentiel entre la plaque et la grille sera :

$$K_d \Delta V_g - (-\Delta V_g) = K_d \Delta V_g + \Delta V_g = \Delta V_g (1 + K_d).$$

La charge prise par C_{gp} est donc : $Q = C_{gp} [\Delta V_g (1 + K_d)]$. Cette charge correspond à une capacité $(1 + K_d)$ fois plus grande chargée à une tension $(1 + K_d)$ fois plus petite. Donc, chargée par ΔV_g , la capacité C_{gp} paraît $(1 + K_d)$ fois plus grande.

Ceci ressemble beaucoup à un phénomène de R.N.T. quand $n = 1$.

C'en est effectivement un.

En effet, si nous nous reportons à la fig. VI-6 et si on fait $n = 1$, la capacité C_{gp} peut être assimilée à C . Pour une certaine fréquence, la valeur de l'impédance de C_{gp} devient très faible et elle reporte toute la tension de sortie sur la charge de grille ; il y a réaction négative de

tension totale pour les fréquences supérieures à celles pour laquelle $\frac{1}{C_{gp}}$

a une impédance négligeable devant R_g .

Si $R_g = 1 \text{ M}\Omega$ et $C_{gp} = 15 \text{ pF}$, à $100\,000 \text{ c/s}$, l'impédance de C_{gp} sera $100 \text{ k}\Omega$, donc de peu d'importance devant $1 \text{ M}\Omega$ et les charges de grille et de plaque seront mises en parallèle, il n'y aura plus aucun gain en tension du tube à partir de cette fréquence, le signal d'entrée passant à la sortie directement.

Pour les fréquences inférieures, cette capacité constitue une fuite plus ou moins grande de la tension d'entrée vers la sortie qu'elle atteint sans être amplifiée.

L'effet est le même que si la charge d'entrée était diminuée par l'effet de shunt de la capacité sur R_g : cette capacité multipliée par $(1 + K_d)$ étant, chargée par ΔV_g , équivalente à C_{gp} chargée par V_{gp} qui vaut $(1 + K_d) \Delta V_g$.

La capacité d'entrée est donc C_{gk} chargée par ΔV_g et $C_{gp} (1 + K_d)$ chargée aussi par ΔV_g auxquelles il faut ajouter les capacités parasites