

LE FETRON : « TUBE » SEMI-CONDUCTEUR

par F. JUSTER

INTRODUCTION

PARMI les nouveautés, en nombre considérable, qui voient le jour chaque mois, il en est certaines qui sortent de l'ordinaire.

Il en est ainsi des fetrons proposés par la société américaine **Teledyne** dont une description détaillée a paru dans *Electronics* (10 avril 1972) due à Bruce Burman, ingénieur de la société citée.

Le fetron est un ensemble de transistors à effet de champ du type J-FET, monté de façon à ce qu'il soit équivalent à un tube de type bien déterminé, par exemple le 12AT7 ou le 6AK5. Le montage de cet ensemble de J-FET est effectué sur une embase de tube électronique, avec le brochage du tube « simulé ».

La protection du fetron est assurée par un boîtier métallique ayant la hauteur du tube. Bien entendu, les broches-filament ne sont pas branchées mais toutes les autres effectuent les connexions originales et le fetron est étudié de telle façon qu'aucune modification du montage de l'appareil à tubes ne soit nécessaire; en particulier, on notera que les fetrons supportent des tensions « anodiques » de 200 à 300 V, l'« anode » étant l'électrode qui remplace la vraie anode de la lampe.

AVANTAGES DES FETRONS

Leur fabricant revendique pour ce nouveau composant actif, les avantages suivants :

1° Remplacement du tube correspondant et durée de vie supérieure. De plus, pas de détérioration des caractéristiques, en particulier de la pente, ce qui dispensera l'utilisateur de procéder à des remises au point périodiques ou au remplacement de « tubes » usés.

2° Caractéristiques meilleures que celles des tubes remplacés donc gains plus élevés et moins de signaux parasites qu'avec de vrais tubes.

3° Economie de puissance, le filament étant absent. La grille-écran, lorsqu'il s'agit d'une « pentode », est également supprimée d'où économie également sur l'alimentation haute tension. Le fetron fonctionne à 60° centigrades (Celsius) au lieu de 100° comme c'est le cas des tubes.

4° La durée de vie d'un fetron est, d'après son fabricant, de l'ordre de 30 millions d'heures, au lieu de 50 000 heures pour les lampes spéciales « longue vie ».

5° Montage extérieur tout-métal au lieu du verre qui est plus fragile.

Au point de vue commercial, les fetrons pourront trouver des acquéreurs parmi les utilisateurs des équipements d'Etat, par exemple celui des téléphones, radar, communications où l'emploi des tubes est maintenu. Il y a là la possibilité de placer 150 millions de fetrons et il ne s'agit que de 12AT7 et 6AK5. Par la suite, la création d'autres fetrons permettra le remplacement de nombreux tubes radio, T.V. et bien d'autres.

En adoptant la même terminologie pour les caractéristiques des lampes et celles des J-FET, on constate que les mêmes équations s'appliquent aux deux composants actifs considérés. On peut voir sur la figure 1 la manière dont les électrons passent dans le J-FET, de la **source** au **drain**.

Dans le cas d'un tube à vide, le nombre des électrons émis par la cathode est contrôlé par la grille de commande, c'est-à-dire par la tension de cette grille par rapport à la cathode. Dans le cas des J-FET les phénomènes sont analogues. On se souviendra des correspondances des électrodes :

porte équivalente à la grille
source équivalente à la cathode
drain équivalente à la plaque

En (a) figure 1, $E_b = 0$, $i_b = 0$. Il n'y a pas de **pincement**.

En (b) les conditions de fonctionnement sont telles qu'il y a commencement de pincement et en (c) celui-ci est complet et les électrons ne parviennent plus au drain.

Considérons aussi les courbes de la figure 2.

En (a) on a reproduit les courbes I_b/V_b du fetron type TS6AK5 (c'est-à-dire remplaçant un 6AK5). En ordonnées le courant « plaque » en milliampères et en abscisses la tension « plaque » en volts. Le paramètre correspondant à chaque courbe est la tension de « grille » E_c depuis 0 V jusqu'à des valeurs de -2.5 V et plus négatives.

Remarquons la tension « plaque »

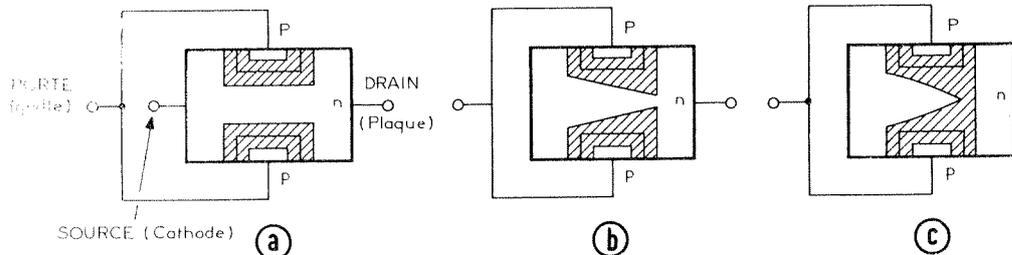


Fig. 1

PRINCIPE DU FETRON

Comme on l'a précisé plus haut, un fetron est constitué avec des transistors à effet de champ de la catégorie J-FET. On sait qu'il y a une grande analogie des caractéristiques des J-FET avec celles des tubes électroniques surtout si les J-FET sont de la catégorie « canal N ».

Lorsque la tension grille (porte) devient moins négative, le courant de plaque (drain) augmente.

Les régions P des J-FET reliées à la porte, provoquent un pincement qui arrête le parcours des électrons, tout comme dans une lampe, il se produit le blocage (cutoff).

Voici comment la tension négative de porte agit sur les régions P.

jusqu'à 250 V et le courant « plaque » jusqu'à 14 mA environ. Les courbes du dispositif à semi-conducteur sont presque parallèles à l'axe des abscisses.

En (b) de la figure 2 on donne les courbes du véritable tube électronique 6AK5. On notera qu'il s'agit d'une lampe pentode.

A remarquer que l'absence de filament du dispositif à semi-

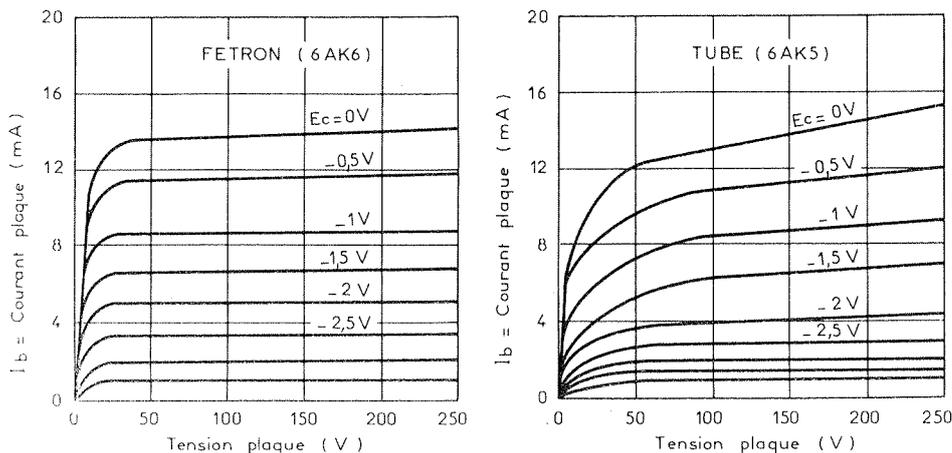


Fig. 2

conducteur, permet son fonctionnement immédiat.

Un autre avantage du fetron, dans des applications particulières, est la réduction de ses capacités interélectrodes et de ce fait, son emploi à la place du tube correspondant, permettra un fonctionnement à des fréquences plus élevées.

Remarquons aussi, sur les courbes de la figure 2, que celles-ci tombent beaucoup plus rapidement dans la région de blocage et de ce fait les applications en commutation en bénéficieront.

EMPLOI DE DEUX J-FET

Pour la simulation d'une pentode, une bonne solution du problème est d'utiliser deux J-FET étudiés pour fonctionner avec une tension élevée, comme celui dont les courbes sont données à la figure 2 (A). La pente du 6AK5 est de l'ordre de 5 mA/V et il faut obtenir pour le fetron une pente de cet ordre, de 3 à 7 mA/V. Le courant nécessaire est alors de 4 à 11 mA.

Dans un semi-conducteur, le fonctionnement aux fréquences élevées peut être empêché par l'effet Miller sur la capacité porte à source. Dans un amplificateur de gain A fois, la capacité entre porte et source et $C_{gs} = (1 + A) C_{gd}$, C_{gd} étant la capacité entre la porte G et le drain D.

Cette capacité est réduite dans les pentodes en raison de la grille-écran (grille 2), portée à une tension positive élevée.

Avec des J-FET, la solution du problème réside dans le montage

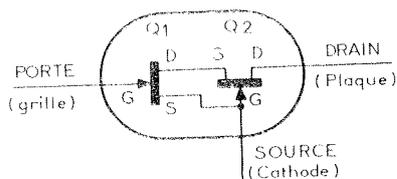


Fig. 3

en cascade de deux de ces transistors.

En tenant compte de la correspondance des électrodes FET-LAMPE, on obtient le montage cascade en montant le premier J-FET en source commune et le deuxième en porte commune ce qui revient à relier le drain du premier à la source du second. Il faut ensuite, appliquer le signal à amplifier à la porte du premier et prélever le signal amplifié sur le drain du deuxième élément ce qui conduit au montage intérieur d'un fetron représenté par la figure 3 sur laquelle on a indiqué entre parenthèses, les électrodes de la lampe simulée ainsi réalisée.

Les deux J-FET à utiliser sont

L'entrée possède une résistance de très forte valeur pouvant avoir son intérêt dans de nombreuses applications. L'impédance de sortie du fetron est du même ordre de grandeur que celle d'une pentode et dépend moins des courbes caractéristiques c'est-à-dire du point de fonctionnement choisi.

Grâce à la résistance d'entrée élevée, il sera possible de monter à l'entrée une source de signaux à forte résistance sans que celle-ci soit perturbée par le shunt constitué par la résistance d'entrée du fetron.

ÉQUATION DU GAIN

A la figure 4 on a indiqué en (A) le montage du fetron et en

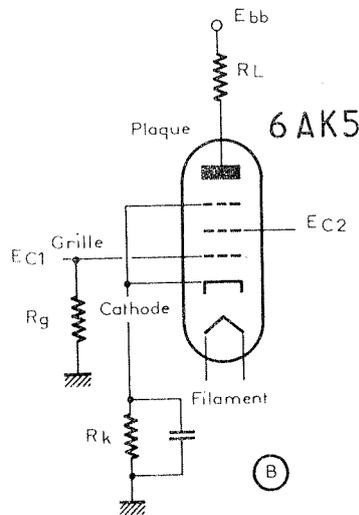
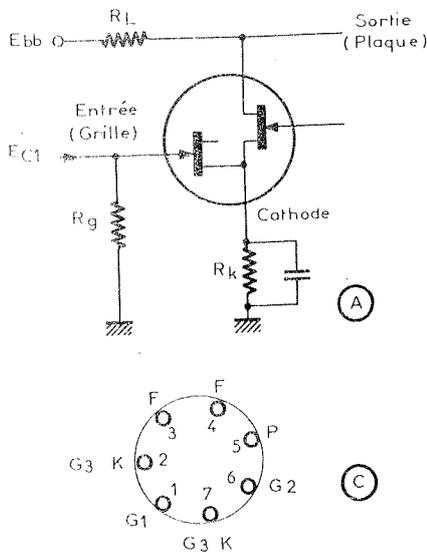


Fig. 4

$Q_1 = 2N3823$ sélectionné, $Q_2 = 2N4882$. Le type 2N4882 est un transistor FET fonctionnant avec tension élevée, tandis que le 2N3823 est étudié pour de faibles signaux. Ce transistor est à faibles capacités et pente élevée.

Avec ce montage, la capacité due à l'effet Miller est plus faible que celle d'un tube pentode. Dans le fetron la capacité est moindre que 0,02 pF entre le drain et la source pour le J-FET de sortie. Cette capacité est en série avec la capacité drain à porte du premier élément dont le gain de tension est égal à 1. Ce qui donne pour le tout une capacité de Miller de 0,02 pF.

(B) celui d'une 6AK5, en amplificateurs de tension. La même nomenclature a été adoptée pour les deux montages équivalents.

On remarquera l'absence, en (A) des connexions de filament et de grille 2 ce qui réduit à trois points le branchement pour le fetron au lieu de sept pour le 6AK5 qui possède aussi une grille 3 dite grille d'arrêt.

En réalité, dans un 6AK5, la cathode et la grille 3 sont connectées ensemble à l'intérieur et aux broches 2 et 7. Comme on le voit sur la figure 4 (C). Le culot est du type miniature sept broches et celui du fetron est évidemment le même.

Le courant plaque est donné, sur la relation :

$$I_b = I_{bo} \left[1 - \frac{E_c}{E_c(\text{off})} \right]^2 \quad (1)$$

dans laquelle :

I_{bo} = courant plaque pour $E_c = 0$ V.

I_b = courant plaque pour la tension E_c de la grille.

E_c = tension de la grille de commande (G_1).

$E_c(\text{off}) = E_c$ pour $I_b = 1 \mu$ A.

La pente est, comme le lecteur le sait sans aucun doute, le rapport de ΔI_b (faible variation de I_b) à ΔE_c (faible variation de E_c) c'est-à-dire :

$$S = \Delta I_b / \Delta E_c$$

valable lorsque la tension de plaque E_b est maintenue constante. On peut obtenir la valeur de S (ou g_m en terminologie américaine et anglaise) en prenant la dérivée de I_b par rapport à E_c , seules variables de l'équation (1) ce qui donne :

$$S = g_m = \left| \frac{\Delta I_b}{\Delta E_c} \right|_{E_c = K}$$

$$\text{ou } S = g_m = g_{mo} \left[1 - \frac{E_c}{E_c(\text{off})} \right]$$

expression dans laquelle

$$g_{mo} = \text{pente pour } E_c = 0 \text{ V.}$$

La caractéristique I_b/E_c représentant l'équation (1) est du second degré, ayant la forme

$$I_b = a + bE_c + cE_c^2$$

et dans le courant de sortie du fetron il y a peu de distorsion harmonique car on ne trouve aucun harmonique d'ordre supérieur à 2.

Par contre, le tube électronique engendre des harmoniques de rangs élevés et produisent l'intermodulation.

Il est intéressant de savoir que les transistors bipolaires créent plus d'harmoniques pairs (2, 4, 6... 2n) que les tubes. Le gain de tension d'un fetron est donné par la relation :

$$A_v = \frac{\mu R_L}{r_b + R_L} = \frac{g_m r_p R_L}{r_p + R_L}$$

dans laquelle :

$$= g_m r_p \text{ coefficient d'amplification.}$$

r_p = résistance interne.

R_L = résistance de charge de sortie.

Si r_p est très grande par rapport à R_L comme c'est souvent le cas, la valeur de A_v se simplifie et devient :

$$A_v = g_m R_L \quad (2)$$

expression connue de tous comme étant le gain de tension d'une pentode utilisée, par exemple en VF pour obtenir une large bande donc avec R_L faible (quelques milliers d'ohms) devant r_p de l'ordre du mégohm.

Aux fréquences basses moindres que 1 MHz, le gain simplifié (relation 2) est précis à 99% pour le fetron.

APPLICATIONS DU FET

Les deux principales applications du fetron en tant que tube simulé sont en montages amplificateurs et en montages oscillateurs. Conviennent bien, dans les deux, l'ensemble cascade de la figure 3.

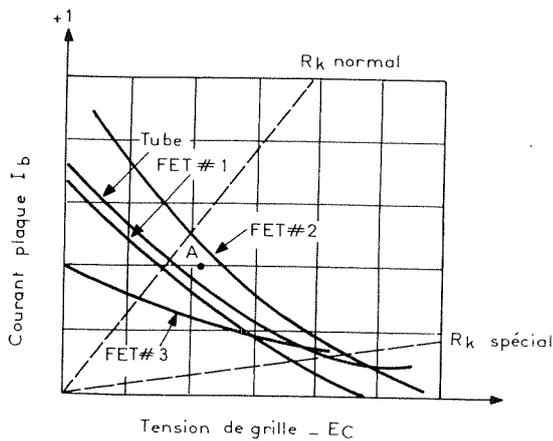


Fig. 5

Le choix judicieux des FET à utiliser, en montage simple (1 FET) ou en montage cascade (2 FET) est toutefois nécessaire.

A la figure 5 on donne des courbes I_p/E_c de plusieurs FET (1, 2 et 3) et d'un tube. La nomenclature I_p , E_c des lampes à vide a été adoptée, E_c étant la tension de la grille (ou porte) et E_p celle de plaque (ou drain).

La courbe FET 1 correspond à un montage à un seul transistor à effet de champ.

LE FET 1 convient dans les applications dont la nature est inconnue ou si le montage doit fonctionner sur un point de fonctionnement A. Dans ce dernier cas la courbe FET 1 devra être aussi voisine que possible de la courbe « TUBE » dans le régime du point de fonctionnement, par exemple le point A. Plus la variation de E_c sera grande, plus la correspondance du tube et du fetron sera valable.

Avec un choix minutieux, il est possible avec les FET actuels de faire coïncider sa courbe avec celle du tube en régime d'un point A donné.

Si le point de fonctionnement est B donc dans le régime de « cutoff » (blocage ou annulation du courant I_p) correspondant à une valeur plus négative de E_c , on choisira des courbes comme FET 2 et FET 3.

La courbe FET 2 correspond à un transistor à effet de champ permettant d'obtenir un courant plus élevé pour une même variation de E_c et la courbe passe par le point B avant le cutoff.

La courbe FET 3 correspond à un FET spécialement étudié pour avoir un faible courant I_p ou pour une région réduite près du point B proche du cutoff. Ce FET aura une pente plus faible avec un point de cutoff plus prononcé.

Lors de l'étude de la simulation d'un tube on devra faire attention aux caractéristiques dynamiques

obtenues près du point de fonctionnement requis. Selon l'application, on fera attention à la pente, au déphasage, à la marge de fonctionnement autour du point choisi, et à la neutrodynation s'il y a lieu.

Dans le cas des amplificateurs, les caractéristiques les plus importantes sont la neutrodynation (dite aussi neutrodynage ou neutralisation) et le point de fonctionnement.

Dans de nombreux montages la neutrodynation sert à annuler les effets de réaction des capacités, aux fréquences élevées.

TABLEAU I
 $R_k = 200 \Omega$ $E_b = 120 V$

Paramètre	Unité	6AK5 (à vide)	TS6AK5 (fetron)
V_p max.....	V	350	350
Rés. interne.....	M Ω	0,5	5
Pente.....	$\mu A/V$	5 000	4 500
I_b ($R_k = 200 \Omega$).....	mA	7,5	7
E_c (pour $I_b = 10 \mu A$)...	V	- 8,5	- 5,3
Coeff. d'amplification ...	-	2 500	22 500
Capacité d'entrée.....	pF	4	6,5
Capacité de sortie.....	pF	0,02	0,02
Fréquence limite.....	MHz	400	600

TABLEAU II
 $(R_k = 240 \Omega$ $E_b = 130 V)$

Paramètre	Unité	12AT7 (à vide)	TS12AT7 (semi-conductrice)
Pression plaque limite max.	V	400	350
Résistance interne.....	k. Ω	15	250
Pente.....	$\mu A/V$	4 000	3 000
Courant plaque ($R_k = 250 \Omega$).....	mA	5	9
Tension grille pour $I_b = 10 \mu A$	V	- 7	- 7
Coefficient d'amplification.....	-	60	750
Capacité d'entrée.....	pF	2,2	2,5
Capacité de sortie.....	pF	1,5	3,5

Comme oscillateur, le fetron doit être apte à créer la réaction positive entre la sortie et l'entrée.

A la figure 6 on donne le montage intérieur d'un fetron cascade auquel on a adjoint un circuit RC parallèle et qui permet la simulation d'une grille-écran.

Dans l'autre fetron, seule la capacité est disposée afin que la réponse en fréquence soit la même que celle obtenue avec le tube à vide.

Au tableau I on donne les caractéristiques comparées d'un fetron type TS6AK5 et d'un tube à vide 6AK5.

SIMULATION D'UNE TRIODE

Voici maintenant comment on a pu réaliser un composant semi-conducteur susceptible de remplacer, sur son support, une triode comme la 12AT7 type choisi, en premier parmi les nombreuses triodes existantes parce qu'il est très répandu dans certains montages, donc pour lequel il y aura un débouché pour les fetrons 12AT7.

En premier lieu, il est clair que le remplacement d'une triode à vide par une seule triode FET, semble tout à fait raisonnable, aussi bien

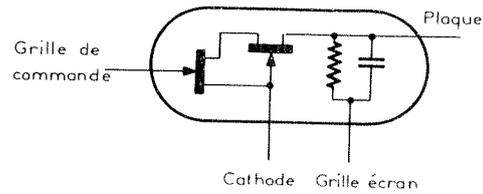


Fig. 6

Sur le tableau I on remarquera des différences importantes, notamment sur la résistance interne et le coefficient d'amplification, mais la pente qui est leur rapport ne change presque pas.

La sensibilité du fetron est donc plus grande, le gain est augmenté de 4 à 5 décibels, il y a moins de souffle et moins de distorsion.

comme amplificateur que dans la fonction d'oscillateur.

L'impédance de sortie du FET étant toutefois plus élevée que celle d'une triode comme celle citée, il y aurait risque d'instabilité en fonction amplificateur mais comme la résistance de R_L insérée entre plaque (ou drain) et + alimentation est beaucoup plus faible que la résistance r_p du circuit, il n'y a pas de difficulté soulevée par cette particularité.

A noter que la 12AT7 est une lampe double triode (connue aussi sous le nom de ECC81) et que l'on a beaucoup employé dans les amplificateurs BF, les multivibrateurs, etc. Elle est à culot noval avec le brochage suivant :

- 1 : plaque élément 2
- 2 : grille élément 2
- 3 : cathode élément 2
- 4 : filament élément 2
- 5 : filament élément 1
- 6 : plaque élément 1
- 7 : grille élément 1
- 8 : cathode élément 1
- 9 : filament point commun.

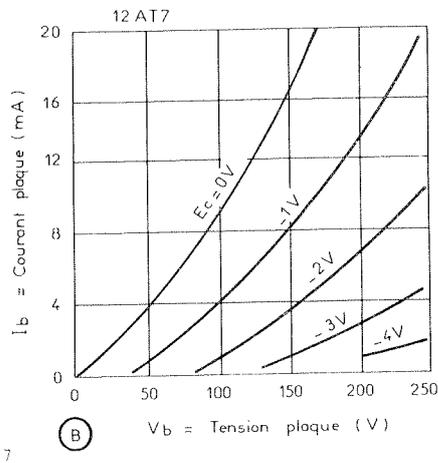
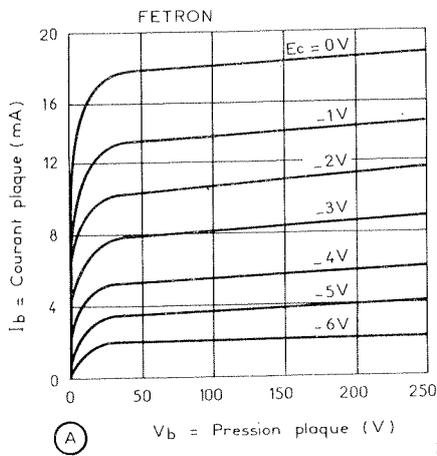


Fig. 7

Pour 12,6 V on branche la source de tension entre les broches 4 et 5 et pour 6,3 V on branche la source de tension filament entre le point 9 et les points 4 et 5 réunis. Les deux triodes sont identiques. Voici à la figure 7, en (A), les courbes I_b/V_d (courant drain à tension drain) pour diverses valeurs de la tension de porte.

En (B) les courbes I_d/V_b (courant plaque à tension plaque), pour diverses valeurs de la polarisation de grille d'un élément de 12AT7.

figure 7 B tandis que dans un FET, le courant plaque est presque indépendant de la tension plaque, comme dans une pentode ; donc, avec un fetron, la régulation de tension sera moins nécessaire.

DURÉE DE VIE DES FETRONS

Des tubes à vide type sélectionnés pour une vie très longue peuvent fonctionner pendant $5 \cdot 10^4$ heures (50 000 heures).

fonctionné pendant 20 heures avec leur dissipation normale qui est de 1 760 mW. Les exemplaires défectueux étaient de 3,5 % donc beaucoup moins qu'avec les tubes.

D'autres fetrons ont été essayés par les compagnies de téléphone et au bout de 8 mois, il y a un déchet négligeable. Enfin, on a essayé des fetrons à 170 °C avec une puissance de 1,2 W. La température de

normal de fonctionnement est de 7 mA et qu'il fallait un courant de 30 mA à 350 à 400 V pour déceler des défauts. Des surcharges jusqu'à 6 A ont pu être obtenues.

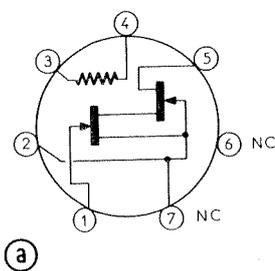
D'autres caractéristiques comme les chocs et d'autres essais physiques ont montré que le boîtier métallique est incassable.

VERSIONS DE FETRONS

A la figure 8 on montre en (a) un fetron « 6AK5 » à utiliser comme amplificateur. Dans ce montage, il y a généralement une résistance de cathode ajustable pour rechercher le point de fonctionnement le meilleur. Aux fréquences dépassant 30 MHz, une capacité ajustable est montée pour la neutrodynamation. Elle est de l'ordre de 2 pF. Elle peut être montée intérieurement au fetron ou extérieurement.

Le montage oscillateur, figure 8 (b) comporte un circuit RC parallèle intérieur simulant la grille-écran à la broche 8 de la « 6AK5 » semi-conductrice. La réaction vers

AMPLI. PENTODE



OSC. PENTODE

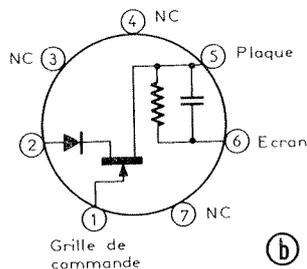


Fig. 8

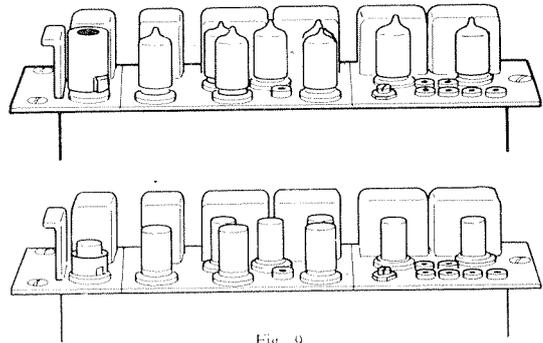


Fig. 9

Les échelles des ordonnées et des abscisses étant les mêmes on voit aisément que les deux familles de courbes sont très différentes, celles du FET se rapprochant des courbes d'une pentode.

Voici au tableau II les caractéristiques comparées d'une triode de vraie 12AT7 et celle d'une triode simulée TS12AT7 :

La pente du fetron est plus faible lorsque celui-ci est réalisé avec un seul FET. Par contre, si l'on examine les caractéristiques du fetron réalisé avec deux FET, on voit sur le tableau I que la pente de ce fetron « pentode » est $4\,500 \mu\text{A/V}$ donc supérieure à celle d'une triode de 12AT7.

Il est donc préférable d'adopter, pour simuler un élément triode 12AT7 d'utiliser le fetron « pentode ».

Remarquons qu'il y a un avantage intéressant dû à l'emploi d'un fetron en ce qui concerne la régulation de tension.

Dans une triode à vide, le courant plaque dépend de la tension plaque comme on peut le voir à la

jonction a atteint 215 °C, l'essai a duré 450 heures.

A 100 °C, les essais ont indiqué une durée de vie de 10^{11} heures.

Les essais de destruction ont permis de conclure que le courant

Des essais de durée ont été faits avec 1 000 fetrons par une méthode dite à essais accélérés et on a trouvé une possibilité de $3 \cdot 10^6$ heures, soit 300 années !

Sur les mille échantillons essayés, 787 ont été blindés et ont

Des essais de durée ont été faits avec 1 000 fetrons par une méthode dite à essais accélérés et on a trouvé une possibilité de $3 \cdot 10^6$ heures, soit 300 années !

Sur les mille échantillons essayés, 787 ont été blindés et ont

ANCIENS Ets FRANÇOIS

MAISON FONDÉE EN 1927

38, rue d'Hauteville - PARIS-10^e

TUBES RADIO - TÉLÉ - TRANSISTORS

Agent Dépositaire **MINIWATT-DARIO**

SAPHIRS - DIAMANTS - CELLULES POUR TOURNE-
DISQUES TOUTES MARQUES - FICHES DIN -
FUSIBLES - BANDES MAGNÉTIQUES B.A.S.F. -
CORDONS ET PROLONGATEURS POUR HI-FI

Tél. : 770-71-73

(MAGASIN FERMÉ LE SAMEDI)

l'entrée est réalisable à partir de la broche 6.

Une autre version est la « pentode » à gain réduit avec un seul FET. La double triode peut être simulée avec deux FET, un par élément ou avec deux cascades de deux FET chacun.

Les « pentodes » fetrons ont donné des résultats à 500 MHz sans présenter le souffle des vrais tubes 6AK5 ni d'effet microphonique.

On envisage pour l'avenir la création de fetrons simulant d'autres lampes comme les suivantes : 6AQ5, 6V6, 6BA6.

Avec une production importante, les fetrons pourront devenir un composant de remplacement à prix réduit.

La figure 9 montre deux montages : en haut à lampes, en bas à fetrons.

Référence : Vacuum tubes yield sockets to hybrid J-FET devices, par Bruce Burman, *Electronics*, 10 avril 1972, Vol. 45, N° 8, p. 85.

F. JUSTER

N° 1 360 - Page 125