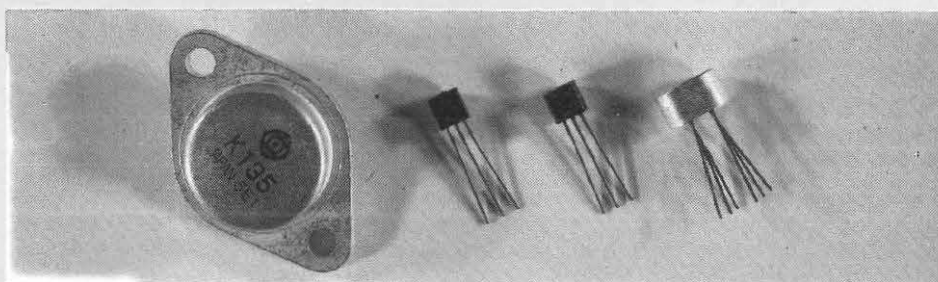


Les transistors à effet de champ

Chacun d'entre nous connaît les transistors à effet de champ. Ces transistors trouvent des applications très variées en électronique : haute fréquence, basse fréquence, oscillateurs, récepteurs, tuners, métrologie, applications audio de haute fidélité, télévision. Les premiers transistors à effet de champ sont apparus sur le marché vers 1960. De nombreux progrès ont été faits depuis dans ce domaine, sur les possibilités, les applications, les performances ou la miniaturisation. Nous aborderons son utilisation pratique en basse fréquence.



De gauche à droite : transistor MOS-FET de puissance 2SK 135, transistors FET à jonction canal N et P 2SK 30 AGR, 2N 5465, double transistor (paire) FET à jonction, canal N, de référence 2SK 240.

Les transistors à effet de champ sont de plus en plus utilisés en basse fréquence et surtout en haute fidélité. En plus des progrès technologiques spectaculaires, réalisés au cours des vingt dernières années, ces composants actifs présentent plusieurs avantages inhérents à leurs principes de fonctionnement. Contrairement aux transistors bipolaires, les transistors à effet de champ, appelés aussi « FET » (Field Effect Transistor) en anglais sont des composants que l'on peut commander en tension. La très grande impédance d'entrée (avantageuse dans de nombreuses applications) facilite l'attaque de la gate de ces transistors. L'attaque s'effectue non plus en puissance mais uniquement en tension, vu que le courant d'attaque est nul (ou négligeable), ce qui simplifie la structure des étages précédents. L'absence de courant dans le circuit d'entrée du transistor autorise la suppression du condensateur de liaison avec l'étage précédent. Les transistors à effet de champ récents bénéficient d'autre part d'un très faible bruit de fond, la haute impédance d'entrée en faisant un composant idéal pour un étage d'entrée

amplificateur de tension. Il peut ensuite assurer une très large bande passante associée à un faible taux de distorsion harmonique (harmoniques supérieurs à H_3).

Le coefficient de température négatif des transistors à effet de champ produit une baisse du courant de drain lors d'une augmentation de température, ce qui rend ces transistors plus robustes : pas de risque d'emballement thermique dont l'origine pourrait remonter soit à un court-circuit de la sortie, soit à un accrochage H.F., soit encore à une surmodulation.

Sans s'étendre sur les différents types de transistors à effet de champ ayant été créés jusqu'ici, les principales versions utilisées dans les applications audio sont :

- TEC (Transistors à Effet de Champ) de jonction N
- TEC de jonction P
- TEC de type MOS (Metal Oxide Semiconductor)
- TEC de type V-MOS
- TEC de type IES (Induction Electro-Statique) (SIT), canal N.

LES TRANSISTORS FET

A JONCTION N ET P

Les versions à jonction P et N sont

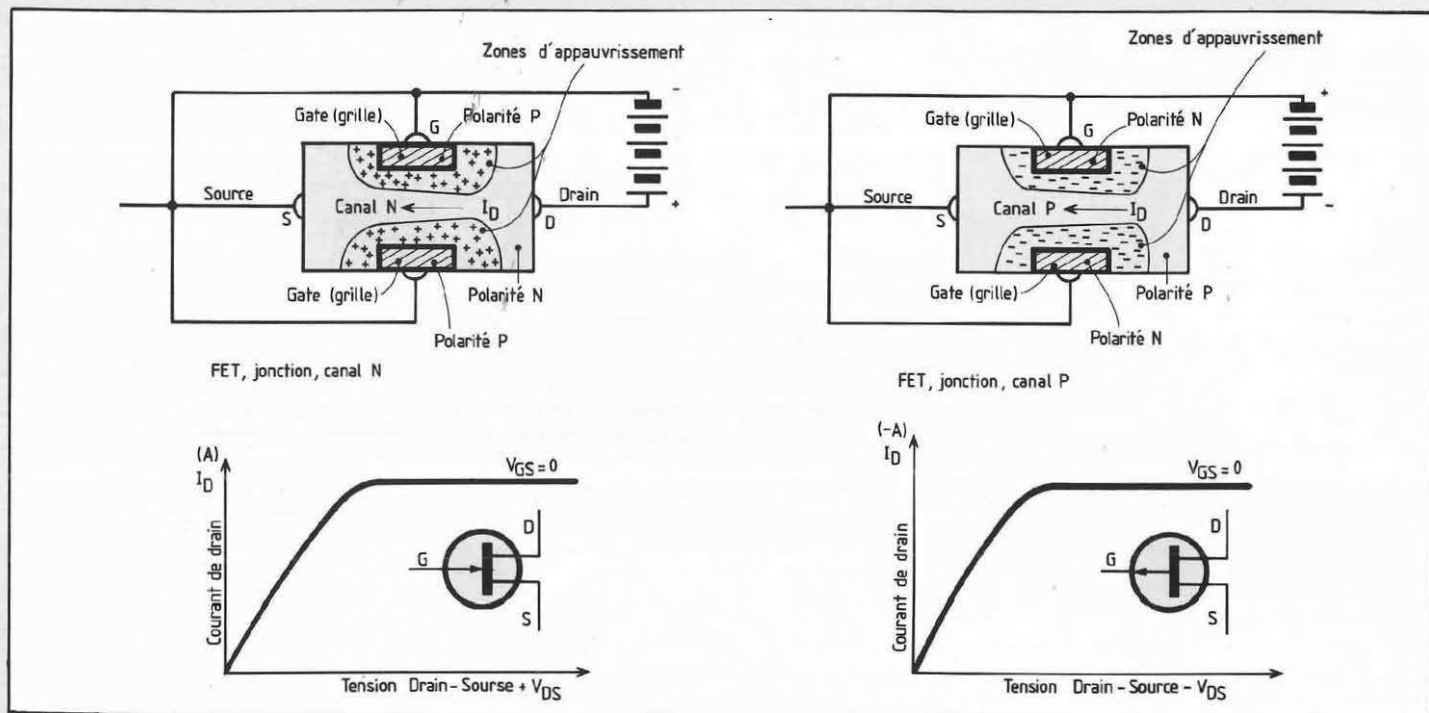


Fig. 1 : Structure des transistors à effet de champ à jonction, canal N et P.

représentées sur la figure 1. La version à canal N est composée d'une base allongée de polarité N sur laquelle viennent prendre place de part et d'autre les connexions de drain et de source. Dans le sens transversal viennent prendre place de part et d'autre et de façon symétrique les deux gates. Ces deux gates sont reliées en parallèle à l'intérieur du boîtier du transistor. Selon la polarisation appliquée à la gate, on obtient un « effet de pince » plus ou moins prononcé, une variation de la largeur du canal dû à l'effet dit « d'appauvrissement », dont l'effet sera une modification du courant circulant entre le drain et la source. En appliquant une tension V_{DS} (Tension drain-source), le courant I_D croît jusqu'à une valeur de saturation appelée I_{DSS} , état de saturation du canal, pour lequel une augmentation éventuelle de la tension V_{DS} ne produit plus d'augmentation du courant de drain. Pour un transistor à effet de champ de canal N, la gate, de type P se polarise négativement par rapport à la source. Pour une valeur de polarisation nulle

(gate portée au potentiel de la source) et à partir d'une valeur donnée de V_{DS} on obtient la valeur du I_{DSS} , courant de drain pour un V_{GS} (tension gate-source) égal à zéro. Si l'on augmente la valeur de la polarisation négative, le courant I_D va diminuer progressivement pour atteindre finalement une valeur nulle, celle-ci déterminant la valeur V_{GSX} , ou tension de blocage gate-source. Normalement, la gate est polarisée négativement. Sur de rares circuits, la valeur de la polarisation peut être nulle, la gate et la source étant référencées au même potentiel. Le transistor à effet de champ de canal N s'utilise comme une lampe triode. Les électrons émis par la source (cathode sur les tubes) se dirigent vers le drain (plaque sur les tubes) après avoir été contrôlés par la gate (grille sur le tube). Bien que le transistor à effet de champ à jonction canal N ne comporte que trois électrodes, les caractéristiques I_D/V_{DS} en fonction de différentes polarisations de gate V_{GS} prennent l'allure de celles d'un tube pentode, comme sur la figure 2.

Les principaux paramètres du transistor à effet de champ sont :

I_D : courant de drain
 V_{DS} : tension drain-source
 V_{GS} : tension de polarisation grille-source
 V_{GSX} : tension de blocage grille-source
 $V_{(BR) DSS}$: tension de claquage drain-source pour $V_{GS} = 0$
 $V_{(BR) DSX}$: tension de claquage drain-source (avec blocage de la gate)
 I_{GDO} : courant de gate (avec courant de source nul)
 I_{GSO} : courant de gate (avec courant de drain nul)
 μ (ou g_m) : coefficient d'amplification
 C_{11SS} : capacité d'entrée (sortie en court-circuit)
 C_{22SS} : capacité de sortie (entrée en court-circuit)
 r_{DS} : résistance de sortie drain-source
 r_{GS} : résistance d'entrée gate-source
 R_{GS} (ou R_G) : résistance d'entrée (de fuite) de gate (placée entre la gate et la source ou la masse)
 NF : figure de bruit
 T_{on} : temps d'établissement du signal (attaque)

Les transistors à effet de champ

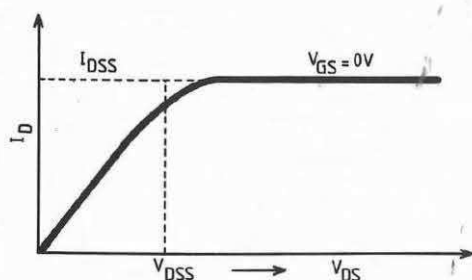


Fig. 2 : Caractéristique I_D/V_{DS} pour une valeur de polarisation $V_{GS} = 0$.

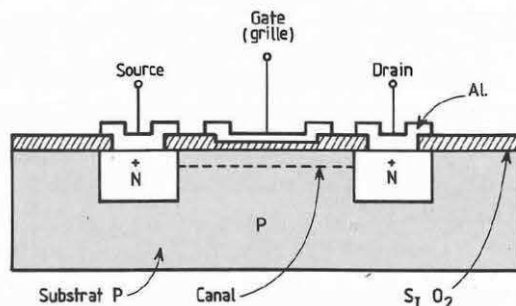


Fig. 4 : Structure d'un transistor MOS-FET de puissance, canal N. Caractéristique I_D/V_{DS} en fonction des variations de polarisation (positive) de V_{GS} . A noter que ce type de transistor travaille par effet d'enrichissement, la tension de polarisation V_{GS} étant positive et non négative.

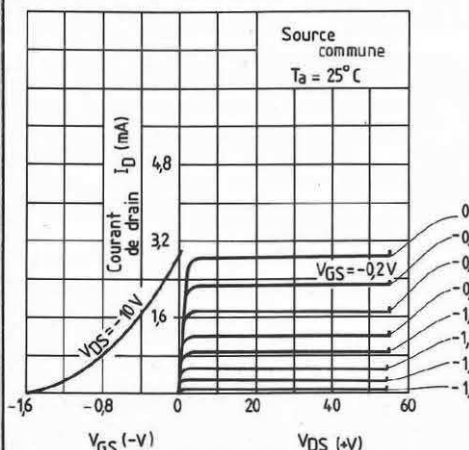
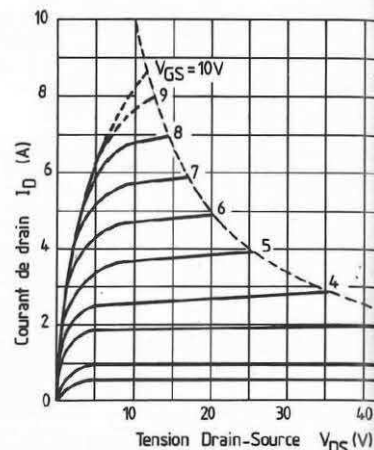


Fig. 3 : Caractéristique I_D/V_{DS} en fonction des variations de polarisation V_{GS} du transistor à effet de champ jonction canal N, 2SK 30 AGR. Les courbes ne sont pas sans rappeler celles d'un tube pentode.

T_{off} : temps de rétablissement du signal (coupeure)

P_{tot} : puissance totale dissipée (pour une température de fonctionnement donnée)

C_{rs} : capacité de transfert inverse.

Contrairement aux transistors bipolaires NPN ou PNP, les transistors à effet de champ sont des dispositifs dits unipolaires, le transport en courant s'effectuant par des porteurs d'une seule polarité.

Comme énoncé plus haut, la gate (que l'on appelle également grille, « gate » étant le terme anglais) se polarise négativement sur un transistor à effet de champ canal N. Dans de rares cas, on peut travailler sans polarisation (préamplificateurs pour signaux de très faible amplitude). Si la gate est polari-

sée positivement, on constatera un effet « d'enrichissement » rapide de la zone qui doit se trouver normalement appauvrie. Une valeur de polarisation positive trop élevée peut conduire à la destruction du transistor. Ces risques sont à prendre en considération, des accidents pouvant se produire par décharges électrostatiques, en particulier sur les circuits intégrés équipés d'entrées de structure MOS-FET. Sur ces derniers, l'impédance d'entrée extrêmement élevée (parfois supérieure à 10 000 M Ω) et la grande sensibilité des entrées rendent ces circuits fragiles. Ceux-ci exigent d'être manipulés avec certaines précautions : soudure avec fer à souder dont la panne est reliée à la masse, circuits conservés avant montage avec les pattes de connexions enfichées sur des supports en mousse conductrice. Pour le transistor à effet de champ, le paramètre I_D/V_{DS} , pour diverses valeurs de polarisation V_{GS} , est le plus souvent représenté sous forme graphique. La figure 3 montre l'aspect de cette caractéristique qui n'est pas sans rappeler celle d'un tube pentode. Le transistor à effet de champ à jonction P est plus rare mais il est utilisé dans des applications audio (entre autres) pour lesquelles on souhaite par

exemple utiliser des transistors à effet de champ complémentaires canal N et P. Sur le transistor à jonction canal P, la tension V_{DS} est négative, la polarisation de gate V_{GS} étant positive. Sur ce type de transistor, le canal P est placé entre deux zones N diffusées. Les versions complémentaires (canal N + canal P) existent mais sont assez rares. Citons en exemple quelques références japonaises comme :

- 2SJ 32 (P) - 2SK 95 (N)
- 2SJ 33 (P) - 2SK 96 (N)
- 2SJ 44 (P) - 2SK 163 (N)
- 2SJ 73 (P) - 2SK 146 (N)
- 2SJ 74 (P) - 2SK 170 (N)
- 2SJ 75 (P) - 2SK 240 (N)

La dernière référence, 2SJ 75 (P) - 2SK 240 (N) correspondant à des transistors canal N et P dont chacun est monté en boîtier double, ce qui permet de réaliser facilement un étage différentiel et complémentaire à transistors à effet de champ.

LES TRANSISTORS MOS-FET CANAL N ET P

Les transistors MOS-FET de puissance développés puis mis au point assez récemment se sont vulgarisés et sont maintenant utilisés sur de nombreux amplificateurs basse fréquence et haute fidélité. Leur structure permet

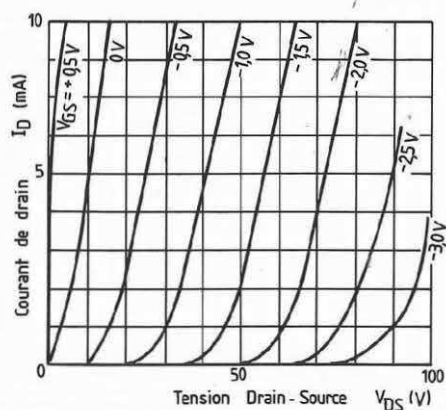


Fig. 5 : Caractéristiques I_D/V_{DS} , en fonction des variations de polarisation de gate V_{GS} d'un transistor à effet de champ vertical (V-FET) de référence 2SK 63. Elles rappellent celles d'un tube triode.

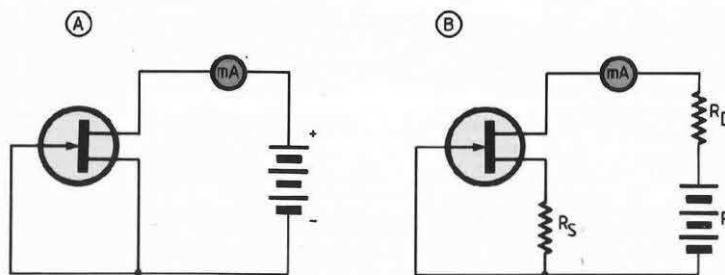


Fig. 6 : Mesure de la valeur du I_{DSS} d'un transistor à effet de champ, jonction canal N. En A, mesure conventionnelle. En B, mesure tenant compte des conditions réelles d'utilisation (polarisation de gate, charge de drain, tension d'alimentation).

d'offrir des possibilités très intéressantes pour cette application audio. La réponse en fréquence est excellente grâce à un temps de réponse très rapide. Le faible « effet de mémoire » assure une vitesse de commutation très rapide. La stabilité thermique, le coefficient de température négatif, l'absence de rupture en seconde avalanche rendent ces transistors fiables, très performants. Autrefois très onéreux, les transistors MOS-FET de puissance sont maintenant proposés à des prix plus abordables, notamment la paire Hitachi 2SK 134/2SJ 49 (qui se vend en France aux environs de 140 F la paire). Les versions complémentaires et les fortes capacités en courant, en tension, en dissipation totale contribuent à l'obtention de composants actifs très appréciés par les amateurs et par les professionnels du son.

La majorité des transistors de puissance de ce genre, MOS-FET canal N ou P travaillent par effet d'enrichissement. C'est pourquoi on constate que sur les versions canal N, la gate (ou grille) est polarisée positivement. Sur la figure 4 est représentée la caractéristique I_D/V_{DS} en fonction de la valeur de la polarisation de gate V_{GS} . On constate que pour $V_{GS} = 0$ le courant I_D est

nul et que ce dernier augmente au fur et à mesure que la valeur de polarisation positive V_{GS} augmente. On remarque d'autre part que les caractéristiques prennent une allure semblable à celle des tubes pentodes. Ce n'est toutefois pas le cas des transistors à effet de champ verticaux (V-FET), comme le montrent les caractéristiques I_D-V_{DS} du transistor Sony 2SK 63 de la figure 5. Ce type de transistor, bien que très intéressant est toutefois moins courant que les FET à jonction N ou P ou que les MOS-FET.

EXEMPLES D'UTILISATION DES TRANSISTORS

A EFFET DE CHAMP

Les transistors à effet de champ à jonction, canal N s'utilisent comme les tubes triodes, mis à part quelques modifications évidentes : tension d'alimentation beaucoup plus basse (10 à 35 V en moyenne), absence de circuit de chauffage filament, mode d'implantation différent, plus grande compacité du câblage.

La mesure du I_{DSS} s'effectue comme sur la figure 6. Il ne faut pas perdre de vue que les transistors à effet de champ présentent des dispersions de caractéristiques, ceci par rapport aux

valeurs annoncées par le constructeur. Sur certains modèles, les références du transistor sont suivies d'un chiffre ou d'une lettre correspondant à une fourchette de valeurs prises par le I_{DSS} . Pour le transistor japonais bien connu 2SK 30A, on a par exemple :

- 2SK 30A-R (I_{DSS} 0,30 à 0,75 mA)
- 2SK 30A-0 (I_{DSS} 0,60 à 1,40 mA)
- 2SK 30A-Y (I_{DSS} 1,20 à 3,00 mA)
- 2SK 30A-GR (I_{DSS} 2,60 à 6,00 mA).

Ces écarts importants de la valeur du I_{DSS} variant entre 0,30 et 6 mA montrent que dans le cas où le transistor ne comporte pas de code relatif à la valeur du I_{DSS} , une mesure préalable est souhaitable, en particulier si l'on cherche à obtenir le minimum de dispersion des performances du circuit en cours de réalisation.

La figure 7 montre les diverses possibilités d'utilisation du transistor à effet de champ, à jonction canal N : montage amplificateur de tension simple, mode de polarisation de la gate, application d'une boucle de contre-réaction, découplage ou non par un condensateur de la résistance de polarisation R_S , montages auto push-pull SRPP (Shunted Regulated Push-Pull), montage différentiel, montage cascode.

On trouvera sur la figure 8, deux exem-

Les transistors à effet de champ

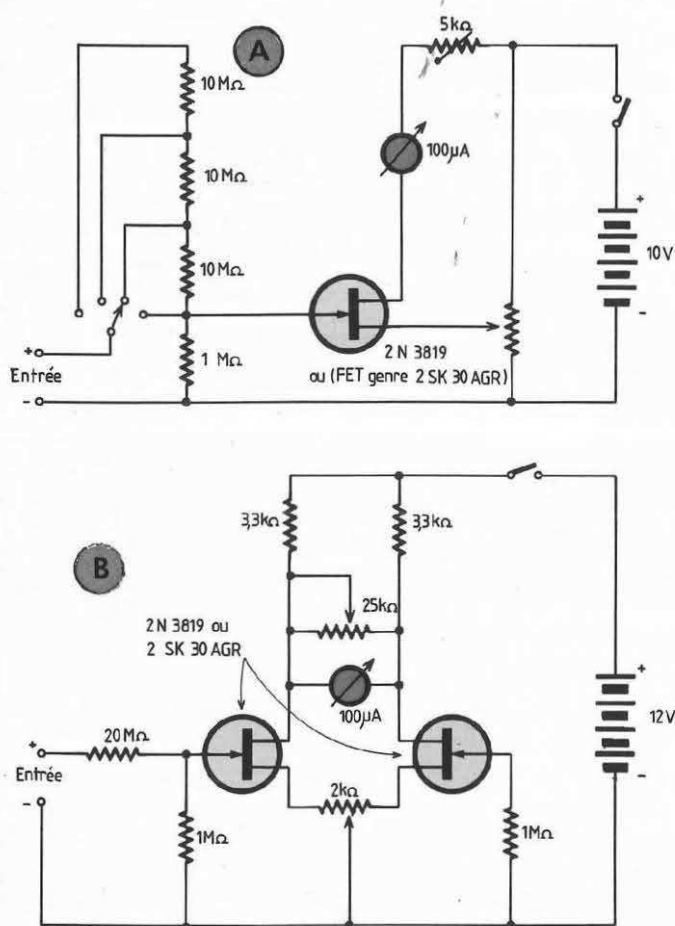


Fig. 8 : Deux exemples de voltmètres audio à haute impédance d'entrée et à large bande passante. En A, version à un seul transistor. En B, version à amplificateur différentiel.

ples d'applications concernant la réalisation de voltmètres audio à haute impédance d'entrée. La faible consommation de ces circuits et le volume réduit permettent de réaliser ainsi des appareils de mesure de petit volume et autonomes (piles incorporées). Une des versions utilise un seul transistor sur lequel la polarisation de gate est établie par R_1 , R_2 et R_3 permettant d'obtenir une plage de mesures de tensions comprise entre 0,5 V et 15 V. Sur le second montage, on retrouve

l'étage amplificateur différentiel déjà utilisé sur les voltmètres à tubes, l'impédance d'entrée de 2 MΩ/V étant particulièrement intéressante pour les mesures et la mise au point de circuits travaillant sous des impédances éle-

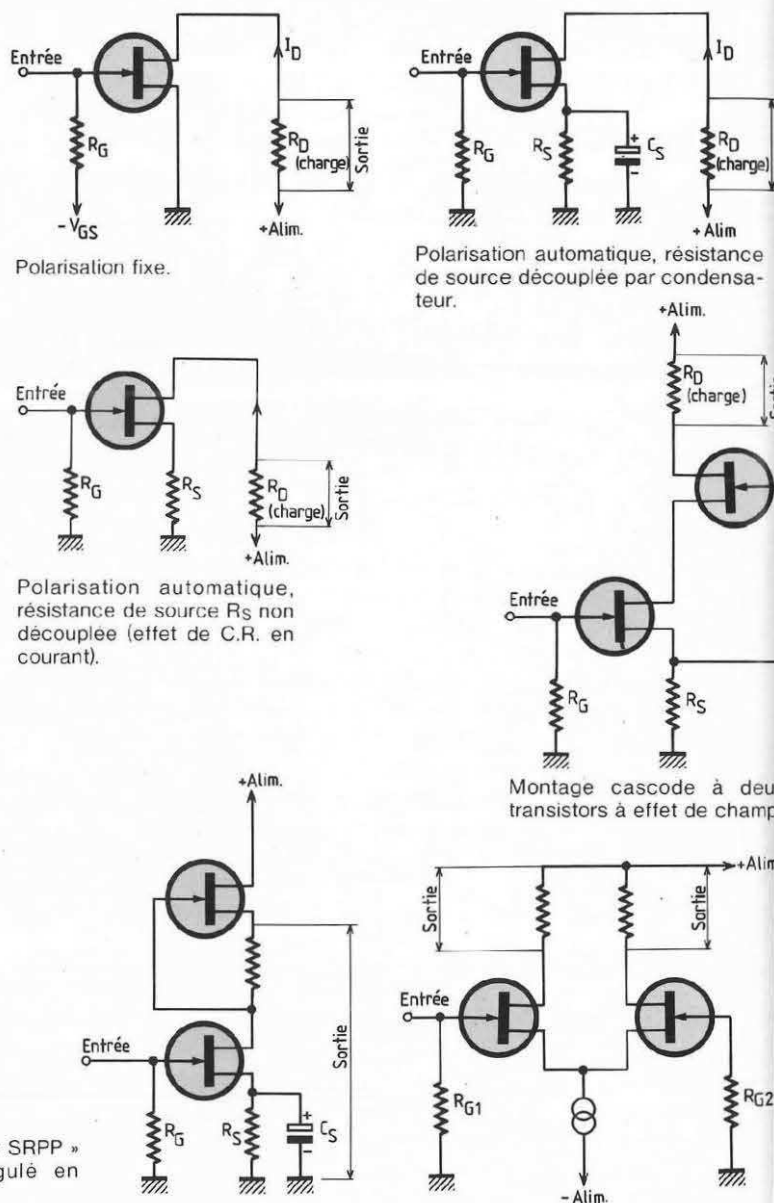


Fig. 7 : Exemples d'utilisation des transistors à effet de champ, à jonction canal N. Quelques circuits de base.

vées. Sur la figure 9, on trouvera d'autres exemples de circuits amplificateurs et préamplificateurs. Nous nous sommes contentés de ne donner ici que quelques exemples d'applications, ceux-ci

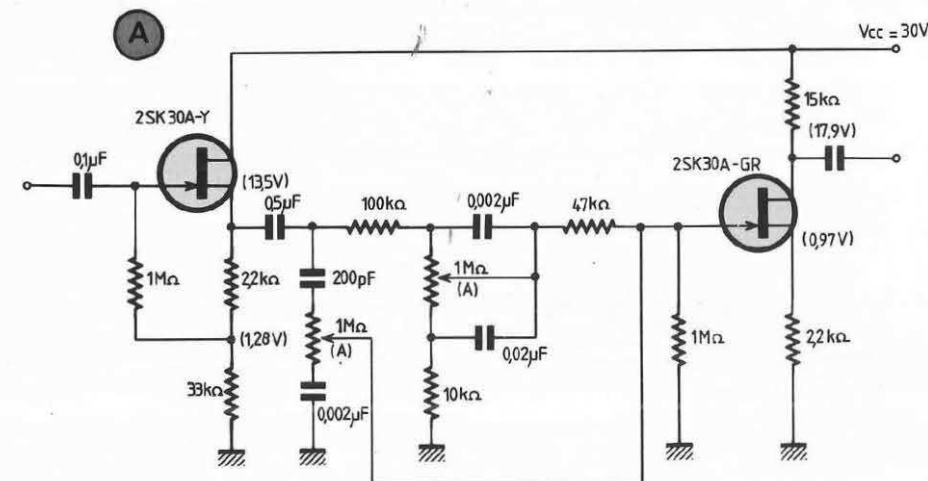
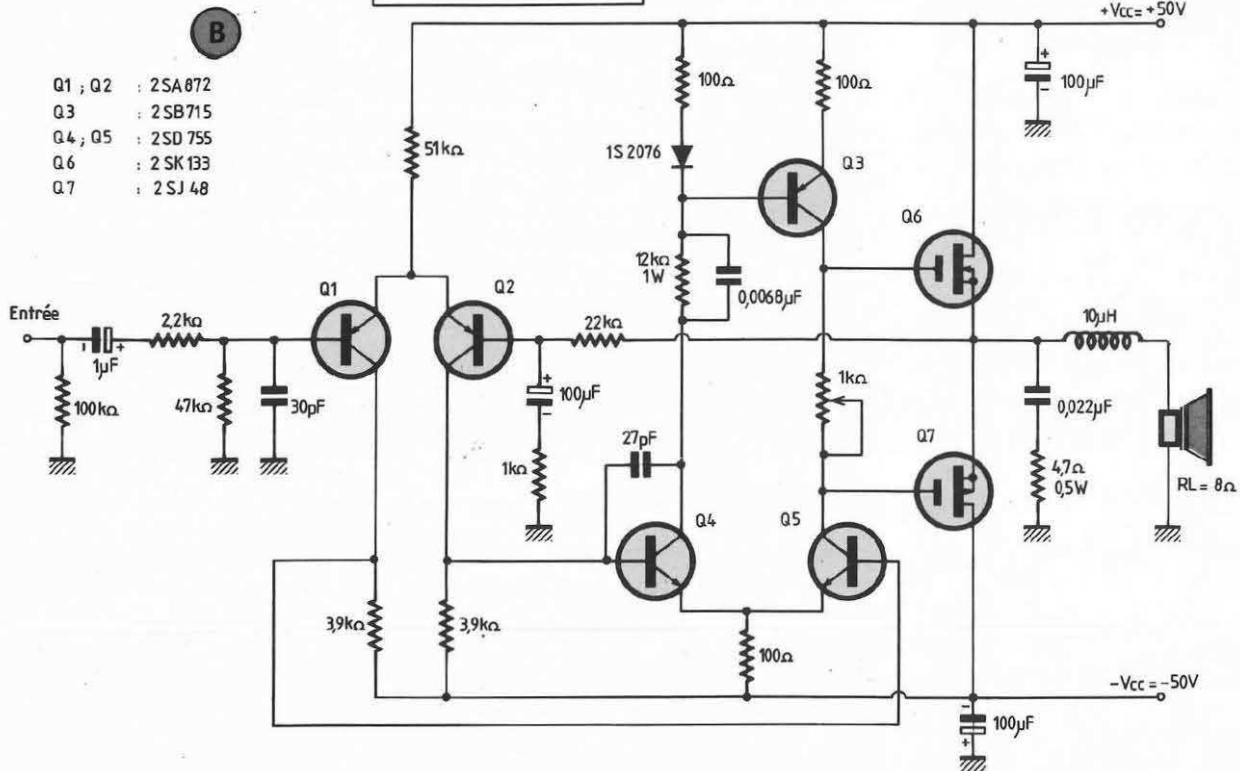


Fig. 9 : Deux exemples de circuits utilisant des transistors à effet de champ à jonction N et MOS-FET de puissance. En A, contrôles de tonalité sur un préamplificateur (montage Williamson). En B, amplificateur de puissance 50 W utilisant des transistors de puissance de type MOS-FET (circuit Hitachi pour transistors 2SK 133, 134, 135 et 2SJ 48, 49 et 50).



Q1 ; Q2 : 2SA872
Q3 : 2SB715
Q4 ; Q5 : 2SD755
Q6 : 2SK133
Q7 : 2SJ48

étant en fait extrêmement nombreux. D'autre part les montages « hybrides » FET + bipolaires sont très courants, en particulier sur les amplificateurs et préamplificateurs pour applications audio et hi-fi. Pour les étages d'entrée de type différentiel, les réalisations pratiques ont été considérablement facilitées grâce à la mise sur le marché

d'un certain nombre de transistors à effet de champ double, pré-appairés et montés soit en boîtier double, soit en boîtier unique, les constructions étant soit monolithiques (substrat unique) soit à puces séparées et pré-appairés. Le 2N 3954 est un bon exemple, de même que le transistor japonais 2SK 240. Parfois, les cons-

tructeurs adoptent le boîtier DIL 6 ou 8 broches pour les transistors à effet de champ double. C'est notamment grâce à ces composants qu'il a été possible de mettre au point des préamplificateurs à très large bande passante et au taux de distorsion harmonique extrêmement bas.

J. Hiraga