

Initiation à la pratique de l'électronique

LA DROITE DE CHARGE

LORS de la conception de circuits électroniques comportant des diodes, des transistors ou des tubes, le tracé de la droite de charge sur le réseau de caractéristiques apporte au technicien de précieux renseignements.

Dans les circuits à diode, la droite de charge permet de connaître avec précision les tensions aux bornes des composants et leur comportement pour des variations de tensions d'alimentation, ce qui est important de connaître.

De même, pour tirer le meilleur parti d'un amplificateur à transistor, la droite de charge permet de choisir la tension d'alimentation et la résistance ou l'impédance de sortie de l'étage la plus adaptée, sans dépasser la limite de dissipation du transistor, tout en profitant du maximum de tension de sortie compatible avec un minimum de distorsion.

Le technicien a donc tout intérêt à apprendre à tracer cette droite de charge afin de choisir le point de fonctionnement en régime continu et prévoir le comportement de son circuit en régime variable (signal alternatif).

V_D lorsqu'on fait varier soit U , soit la valeur de R .

On superpose donc à la caractéristique I_D/V_D une droite dont l'inclinaison dépend de la valeur de R . Pour la tracer, deux situations particulières sont à considérer.

D'abord, la tension entre A et B , la charge étant déconnectée. Puis, en supposant cette charge en court-circuit, on calcule par la loi d'Ohm le courant résultant.

Revenons sur ces deux cas. Dans le premier (fig. 2a), puisque le courant est nul, on retrouve entre A et B la valeur U de la tension d'alimentation (il n'y a pas de chute dans R). On ob-

tient de cette façon le point X sur le réseau de caractéristique (fig. 3).

Ensuite (deuxième cas), la diode est remplacée par un court-circuit, la tension entre A et B est nulle, et le courant entre ces points est calculé par la loi d'Ohm. Dans notre exemple, ce courant maximal est U/R soit $1,5 \text{ V} / 1 \text{ k}\Omega = 1,5 \text{ mA}$.

C'est le point Y de la droite de charge. L'intersection entre la caractéristique de la diode et la droite de charge (point Z) nous indique le courant dans la charge (I) ainsi que la tension aux bornes de

Tracé de la droite de charge

La droite de charge est une droite placée sur le réseau de caractéristique indiquant la relation entre le courant et la tension dans la charge.

Pour commencer, prenons comme exemple un circuit simple comportant une diode et une résistance. La droite de charge, représentative de la valeur ohmique de la résistance, se superpose à la caractéristique I_D/V_D de la diode.

Un circuit régulateur à diode est donné sur la figure 1. Il peut être intéressant de connaître la tension V_D ou la tension V_R , ou encore la nouvelle valeur de

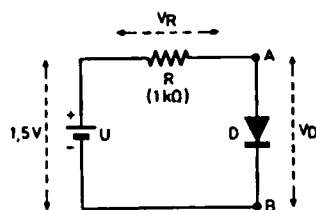


Fig. 1. — Circuit régulateur à diode.

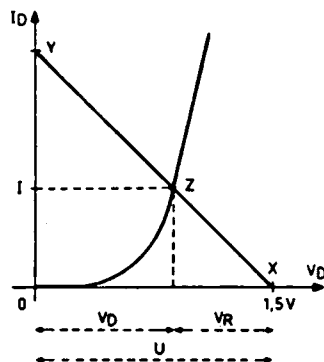


Fig. 2. — Pour le tracé de la droite de charge, on considère la tension à vide (a) et le courant en court-circuit (b).

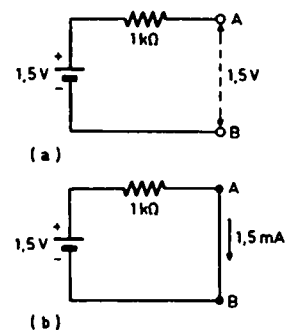


Fig. 3. — Le point Z indique le courant dans la charge et la tension à ses bornes.

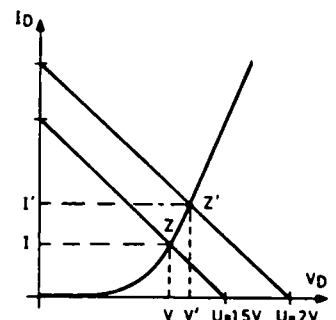


Fig. 4. — Si U augmente, la droite de charge nous donne les nouvelles valeurs de courant et de tension.

cette charge (V_D) et celle aux bornes de R (V_R).

Si maintenant nous augmentons la valeur de U (sans changer R), la droite de charge se déplace parallèlement sur la caractéristique I_D/V_D de la diode (fig. 4). De même, si nous changeons la valeur de R (sans changer U), la droite de charge sera plus ou moins inclinée, l'axe de pivotement étant la tension d'alimentation U (fig. 5). La droite se rapproche d'autant plus de l'horizontale que la valeur de R est plus grande.

Donc, en résumé, pour tracer la droite de charge, on considère d'une part la

tension d'alimentation du circuit U et d'autre part le courant maximal égal précisément à la tension U divisée par la résistance.

Droite de charge d'un régulateur Zener

Le procédé est le même, la seule différence est que l'on opère sur la partie inverse de la caractéristique de la diode (I_{inv} , V_{inv}) (fig. 6). La droite de charge part de la tension d'alimentation de 18 volts (point X) et arrive au point Y, dont la valeur est calculée comme pour l'exemple précédent : $18\text{ V} / 1\text{ k}\Omega = 18\text{ mA}$. Le

point Z nous donne la tension régulée (6,3 V) et le courant I_Z moyen (11,9 mA).

En diminuant la valeur de R, on s'aperçoit que, vu la pente abrupte de la caractéristique, le courant I_Z moyen augmente dans de grandes proportions, mais que la valeur de V_Z ne varie presque pas.

Droite de charge d'un étage à transistor

Le tracé de la droite de charge apparaît sur le réseau de courbes I_C/V_{CE} pour différentes valeurs de I_B .

Commençons par un montage de commutation dont le schéma est représenté figure 7. Nous appliquons les mêmes règles que pour les diodes. Soit premièrement le transistor déconnecté, la tension aux bornes de A et de B est égale à la tension d'alimentation U. Ensuite, le transistor étant en court-circuit, le courant parcourant R_C est égal à U/R_C . Ces deux valeurs sont portées sur le réseau de caractéristiques I_C/V_{CE} . Prenons un exemple pratique. La tension d'alimentation est de 15 V et R_C est de 5 k Ω . Les points X et Y sont respectivement 15 V et 75 mA. Tout

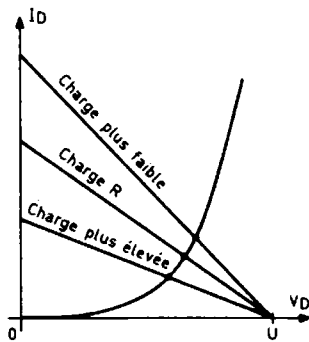


Fig. 5. - Plus la charge est élevée, plus elle se rapproche de l'horizontal.

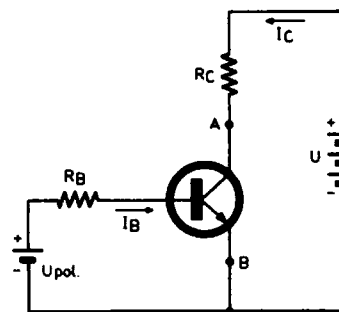


Fig. 7. - Montage de commutation.

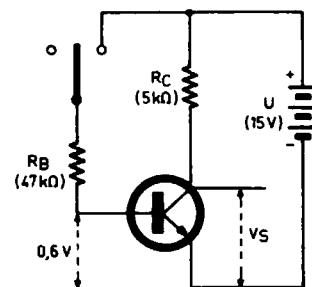


Fig. 9. - La tension V_S ne prend que deux valeurs : zéro et 15 V.

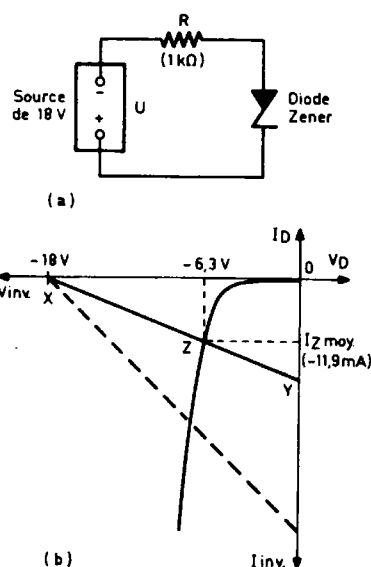


Fig. 6. - Régulateur Zener (a) et sa droite de charge (b).

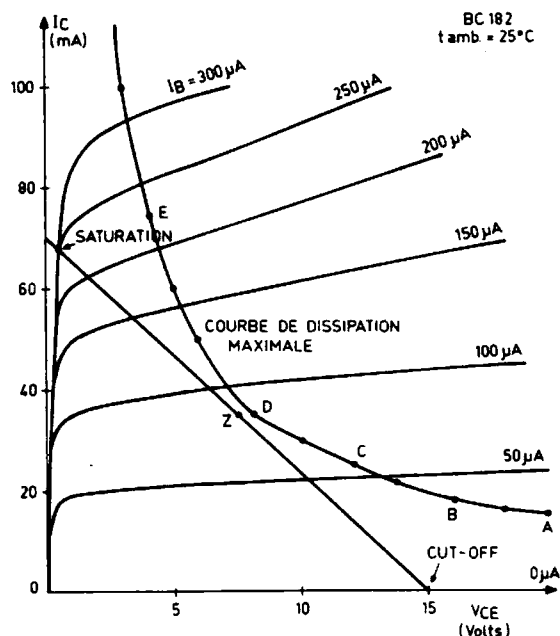


Fig. 8. - Tracé de la droite de charge sur le réseau I_C/V_{CC} d'un transistor.

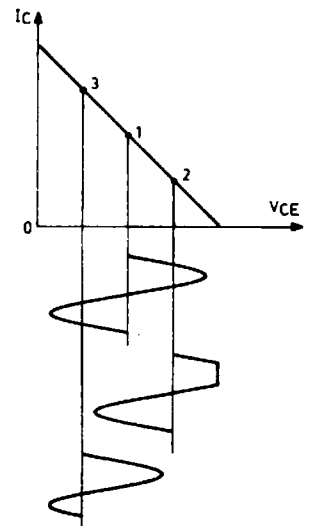


Fig. 10. - Le point de fonctionnement doit être situé au milieu de la droite pour avoir le maximum de tension de sortie sans distorsion.

comme pour les diodes, ils ne sont valables que pour une tension d'alimentation et une résistance données.

Notons les points importants de cet étage de commutation. Le croisement entre la droite de charge et la droite $I_B = 0$ correspond au « cut-off ». Nous voyons sur la caractéristique que si ce courant d'entrée est nul, aucun courant I_C ne traverse le transistor (transistor bloqué) et la tension émetteur-collecteur est pratiquement égale à la tension U (fig. 8).

Le point de saturation est obtenu avec un fort courant d'entrée (ici 300 μA). Si I_B est égal à cette valeur ($I_B = I_{Bsat}$), le transistor est saturé et la tension entre collecteur et émetteur est très faible (0,5 V) tandis que le courant collecteur atteint presque 70 mA. Pour des valeurs supérieures à I_{Bsat} , la tension V_{CE} ne varie pas et le courant de saturation I_{Csat} est approximativement égal à U/R_C .

Un transistor fonctionnant en commutation ne donne donc en sortie que ces deux valeurs de tension (zéro volt et tension d'alimentation). Quant à la base du transistor, elle est traversée par un courant qui ne prend que deux valeurs : 0 mA (au cut-off) et I_{Bsat} (à la saturation). C'est cette dernière qui détermine la résistance R_B . La formule est :

$$R_B = \frac{V_{pol} - V_{BE}}{I_{Bsat}}$$

La source de polarisation (U_{pol}) peut être la tension d'alimentation U du collecteur. Quant à V_{BE} , sa valeur est fixe : entre 0,6 et 0,7 V pour la majorité des transistors (silicium). Pour notre exemple, et avec le schéma représenté figure 9, R_B doit être égal ou inférieur à 47 k Ω .

Passons maintenant à un montage à transistor fonctionnant en amplificateur classe A. Le point de fonctionnement doit se trouver au milieu de la

droite de charge (point Z). Il n'y a plus deux points de fonctionnement comme en commutation, mais un seul. Ce point, appelé également « point de repos », nous donne la valeur de la tension V_{CE} et du courant I_C du collecteur, lorsqu'il n'y a pas de signal alternatif sur la base. Avec les mêmes composants que dans l'exemple donné, le courant et la tension de repos sont de 35 mA et 7,5 V, ceci pour un courant I_B de l'ordre de 85 μA . Il en résulte que R_B doit changer de valeur :

$$R_B = \frac{15 - 0,6}{85 \times 10^{-6}} \approx 170 \text{ k}\Omega$$

Si I_B vient à varier, il est évident que I_C et V_{CE} varieront.

La zone active du transistor est comprise entre le point de saturation et le cut-off. Donc, dans le but d'obtenir le maximum de tension en sortie (cas de signaux forts), ou bien pour bénéficier d'un minimum de distorsion du signal (amplis

haute fidélité), on a intérêt à placer le point de fonctionnement à mi-chemin entre les deux positions extrêmes mentionnées ci-dessus (fig. 10). Ceci est mis en évidence avec un générateur BF et un oscilloscope. La tension crête à crête à la sortie du générateur est légèrement inférieure à la tension d'alimentation U .

En faisant varier R_B (dans I_B), on obtient la valeur optimale de polarisation du transistor (fig. 11).

Pour s'assurer que l'on travaille bien dans une zone linéaire, un bon moyen est de tracer la courbe I_C/I_B afin de mieux choisir le point de repos, et modifier éventuellement la valeur de la résistance de charge de l'étage (fig. 12). Sur le tracé de caractéristique de droite, on considère les points d'intersection des courbes de I_B avec la droite de charge. Ces points sont reportés sur le réseau de gauche, d'où le tracé de la ligne résultante plus ou

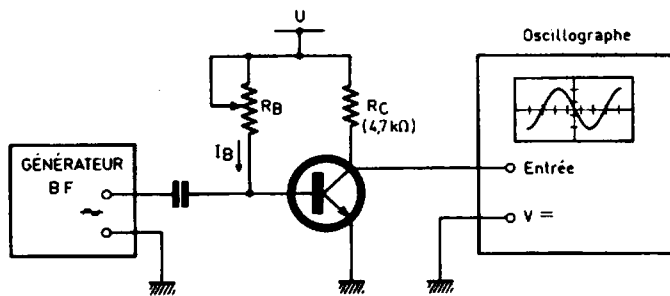


Fig. 11. - Contrôle à l'aide d'un oscilloscope.

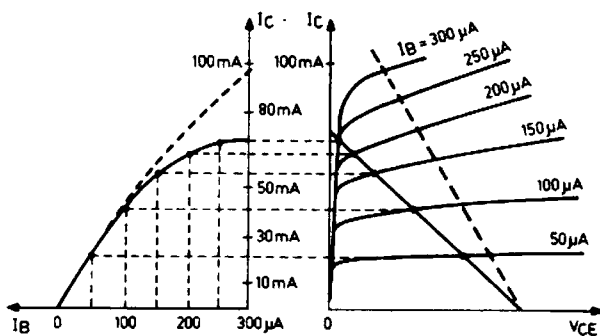


Fig. 12. - Contrôle de la linéarité par le tracé de la caractéristique I_C/I_B (meilleure linéarité par l'emploi d'une charge plus faible).

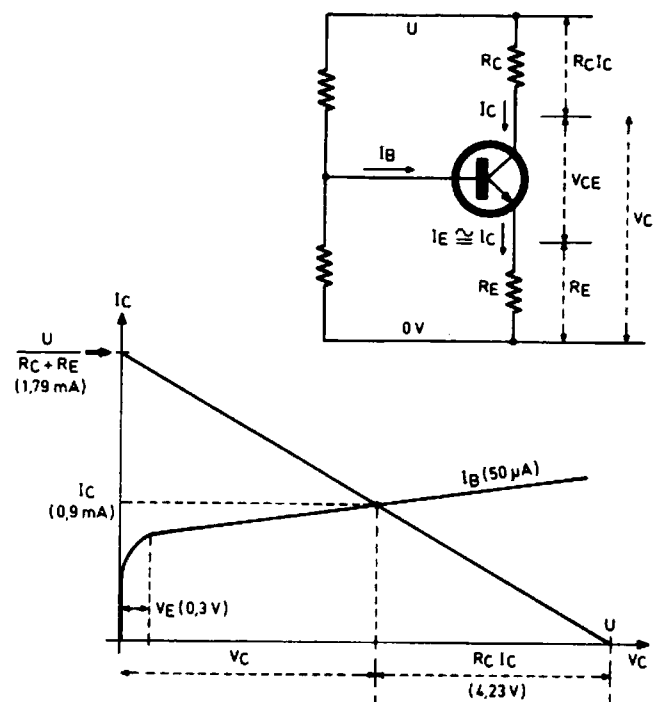


Fig. 13. - La résistance R_C doit être prise en compte pour le tracé de la droite de charge.

moins droite. En modifiant la position de la droite de charge sur le réseau I_C/V_{CE} , on recherche la caractéristique la plus droite, puis, sur celle-ci, on choisit le point de fonctionnement à son centre, afin d'éviter au maximum les distorsions.

Résistance dans le circuit émetteur

Comment tracer la droite de charge lorsque le montage comporte une résistance R_E dans l'émetteur ? Il suffit d'opérer comme auparavant, en considérant la charge totale comme étant égale à $R_C + R_E$. Du point de vue pratique, la droite de charge part toujours de la valeur U sur l'axe horizontal, pour arriver à une valeur de courant égale à :

$$\frac{U}{R_C + R_E}$$

Le croisement avec la

caractéristique I_B nous donne la valeur du courant de repos I_C et la tension entre le collecteur et le zéro volt (masse du montage). En ce qui concerne la tension aux bornes de R_E , elle est facilement calculable. Le courant émetteur est égal (à la valeur de I_B près) au courant collecteur, ce qui fait que la tension V_E est égale pratiquement à R_E multiplié par I_C (fig. 13).

Avec $U = 9$ volts, $R_C = 4,7$ k Ω et $R_E = 330$ Ω , la charge totale du transistor est 5 030 Ω , ce qui donne un I_C max de 1,79 mA. Si l'étage est polarisé avec un I_B de 3 μ A donnant un courant de repos de 0,9 mA, la chute $R_C I_C$ est de 4,23 V et la tension V_E est de 0,3 V.

La méthode de calcul est la même pour un circuit déphaseur (fig. 14) ou pour un montage collecteur commun (adaptateur d'impédance de la figure 15).

Dans le premier, la charge totale est 940 Ω , la tension de repos sur l'émetteur est de 4,7 volts (470 $\Omega \times 10$ mA), celle entre collecteur et masse est de 13,3 V ($U - R_C I_C$). Quant au second montage, le point de repos se trouve au milieu de la droite de charge (10 k Ω). La tension de repos est de 10 V.

Application au bistable

Le mois dernier, nous avons parlé du montage bistable. Dans le circuit émetteur d'une des versions est insérée une résistance. Il est nécessaire de calculer la tension aux bornes de celle-ci. Ce qui complique le problème est que le transistor fonctionne en commutation.

La droite de charge est tracée pour $U = 12$ V et pour une charge égale à $4,7$ k $\Omega + 1$ k Ω (fig. 16).

Les transistors fonctionnant en tout ou rien, les points de repos ne peuvent prendre que deux valeurs : X ou Y. Si celui de T_1 est en X, celui de T_2 est en Y, et inversement.

En supposant que T_2 soit passant, son courant collecteur, de même que sa tension V_C , sont donnés par la droite de charge (point Y : $I_C = 68$ mA ; $V_C = 0,5$ V). Connaissant ainsi I_C , il est facile, d'après ce que nous avons dit, de connaître V_C et les tensions sur les bases.

Attention à la puissance dissipée

La puissance dissipée $P_{C_{max}}$ donnée par le constructeur est à considérer pour le tracé de la droite de charge. Lorsqu'on désire utiliser le transistor au maximum de ses possibilités (V et I élevés), il est

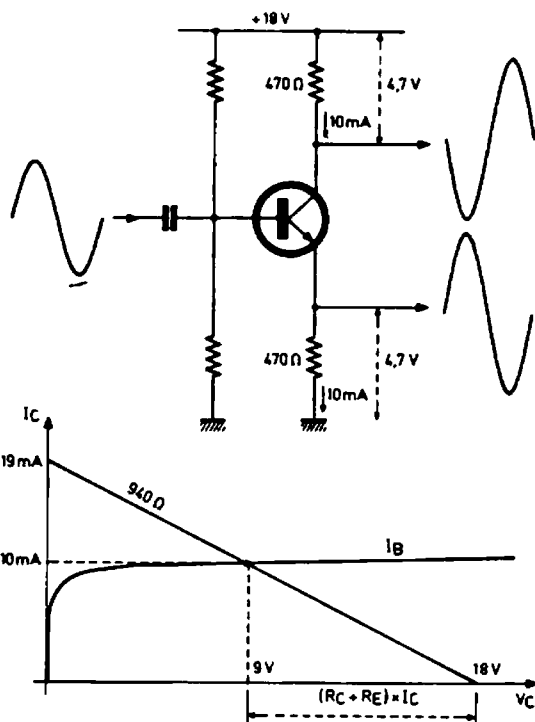


Fig. 14. - Circuit déphaseur et sa droite de charge.

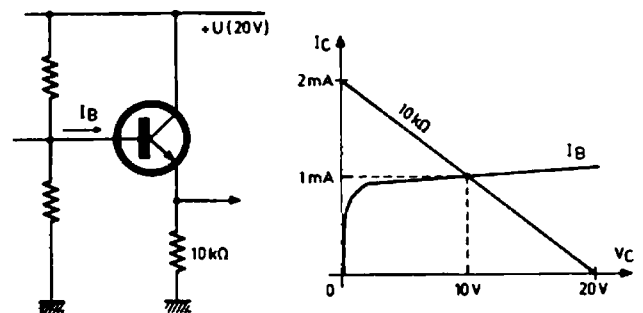


Fig. 15. - Adaptateur d'impédance et sa droite de charge.

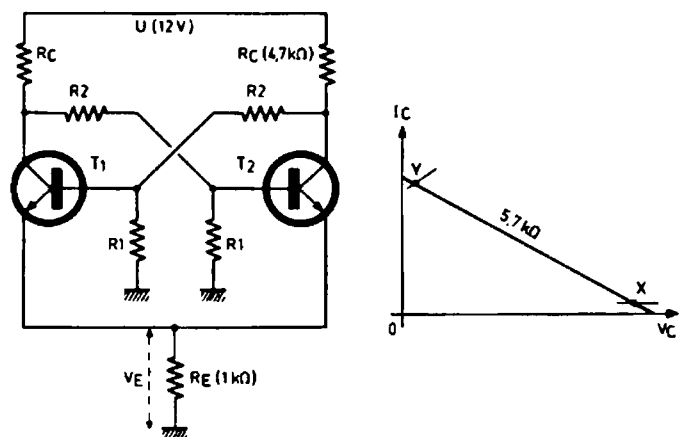


Fig. 16. - Montage bistable et sa droite de charge.

primordial de tracer d'abord la courbe de dissipation maximale. Il suffit d'appliquer la formule :

$$P_{C_{max}} = V_{CE} \times I_{C_{max}}$$

Si $P_{C_{max}}$ est de 0,3 W, on calcule $I_{C_{max}}$ pour différentes tensions V_{CE} . Soit $V_{CE} = 20 V$,

$$I_C = \frac{0,3 W}{20 V} = 15 mA$$

En donnant successivement à V_{CE} les valeurs 16, 12, 8 et 4 V, le courant résultant est 18, 25, 37 1/2 et 75 mA respectivement. Ces points sont joints entre eux, ils donnent la courbe représentée sur la figure 8 (points A, B, C, D et E). En aucun cas, la

droite de charge ne doit couper cette hyperbole.

Cette courbe de dissipation peut être tracée par le même procédé pour les diodes (de signal ou Zener). Les valeurs maximales de courant et de tension doivent également être prises en considération. Elles sont de 200 mA et de 50 V pour le transistor BC 182.

Droite de charge en alternatif

Parfois le circuit comporte des éléments dont le comportement n'est pas le même en alternatif qu'en continu. Une résistance

shuntée par un condensateur peut être une charge négligeable si la fréquence du signal qui lui est soumis est élevée. Dans le schéma de la figure 13, si la résistance R_E est shuntée par un condensateur de forte valeur, la charge en continu est bien toujours $R_C + R_E$, elle tombe à R_C si la réactance de C_E est faible par rapport à R_E .

De même pour le montage collecteur-commun de la figure 17. L'ensemble CR_C est un circuit de découplage dont la valeur de R_C est plutôt faible par rapport à celle de R_E . Le

condensateur C possède une forte valeur de façon que $X_C = 0$ pour les fréquences de fonctionnement.

Le point X est donc au potentiel de la masse en alternatif. La charge du transistor, égale à $R_C + R_E$ en continu, passe à R_E en alternatif.

La charge peut parfois être plus grande en alternatif qu'en continu. Dans un étage de puissance chargé par un transformateur (fig. 18), la charge en continu est assez faible, c'est la somme de R_E et de la résistance ohmique du primaire du transformateur. En alternatif, vient s'ajouter l'impédance rapportée au primaire Z'_c .

Dans ces cas particuliers, on trace d'abord la droite de charge en continu pour obtenir le point de repos du montage (P).

On trace ensuite la droite de charge en alternatif, correspondant à Z'_c . Celle-ci, plus inclinée, passe par le point P.

J.-B. P.

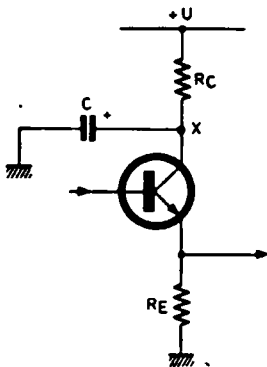


Fig. 17. — Montage collecteur commun. En alternatif, le point X est au potentiel de la masse.

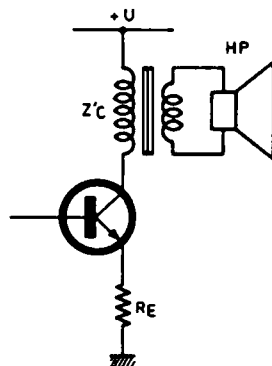
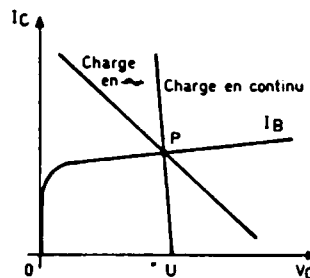


Fig. 18. — Amplificateur de puissance et ses droites de charge.



Bloc-notes

LES TROISIEMES CHAMPIONNATS EUROPEENS DE MODELISME ET DE MAQUETTISME

Les troisièmes championnats européens de modélisme et de maquettisme sont organisés à l'occasion du cinquième Salon international de la Maquette et du Modèle réduit, par Spodex, avec le concours d'I.P.M.S. France.

Deux nouveautés pour 1984 :

Les championnats, de nationaux, deviennent européens. Ils dépassent nos frontières et comptent maintenant de nom-

breuses participations étrangères.

Une catégorie débutant est créée, pour permettre aux maquettistes et modélistes non expérimentés de participer aux championnats sans toutefois devoir affronter les « pros » de la compétition.

Le championnat de maquettisme :

Il réunira des maquettes, représentations statiques et fidèles

de la réalité à une échelle donnée.

Le championnat de modélisme :

Il réunira des modèles en ordre de marche, qui évoluent conformément à la réalité, mais qui ne seront jugés que sur leurs conception et réalisation.

Les prix :

Dans chacune des catégories définies, est attribué : un certificat de mérite, une médaille d'or, une médaille d'argent, une médaille de bronze, un accessit débutant ; premier

prix I.P.M.S. ; 2° prix I.P.M.S., plus un grand nombre de prix offerts par les exposants.

Frais de participation :

20 francs par réalisation. Le nombre de ces réalisations n'est pas limité mais il ne sera pas demandé plus de 200 francs par participant.

Demi-tarif pour les moins de 16 ans.

Inscriptions et renseignements complémentaires :

Avant le 31 janvier 1984 à Spodex, 2, place de la Bastille, 75012 Paris. Tél. : 345.55.55.