



TRANSISTORS

Cours de radio par correspondance

Je vous ai expliqué précédemment la théorie du transistor ainsi que les procédés technologiques utilisés dans la construction de ces semi-conducteurs.

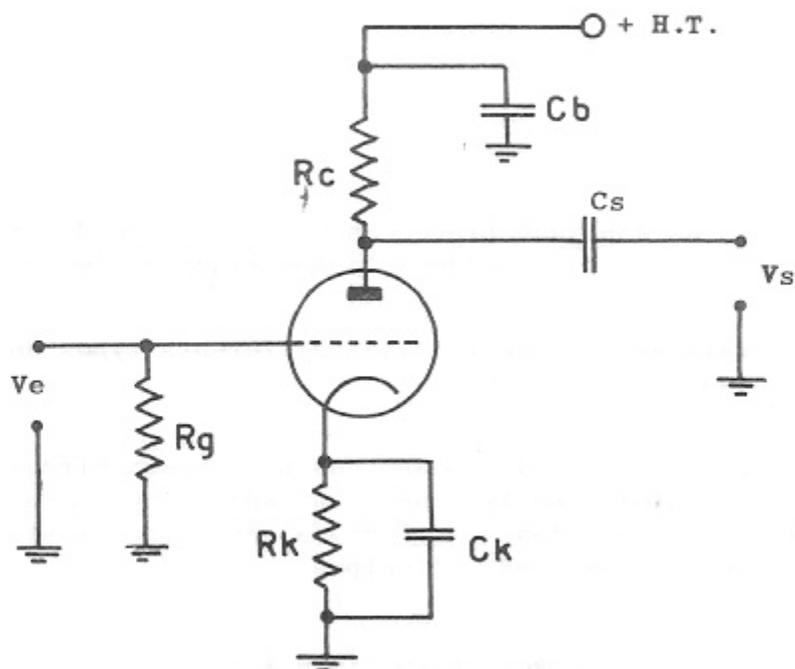
Désormais vous connaissez les différents types de transistors employés dans la technique électronique.

Je vous parlerai maintenant des principaux circuits électroniques, qui emploient des transistors, en les comparant aux circuits correspondants avec tubes électroniques, et j'approfondirai l'étude des caractéristiques du transistor, en déterminant ses "paramètres" principaux.

CIRCUITS FONDAMENTAUX.

Dans les circuits électroniques les tubes sont employés (comme amplificateurs) de la façon suivante :

CIRCUIT AMPLIFICATEUR AVEC CATHODE A LA MASSE.



- Fig. 1 -

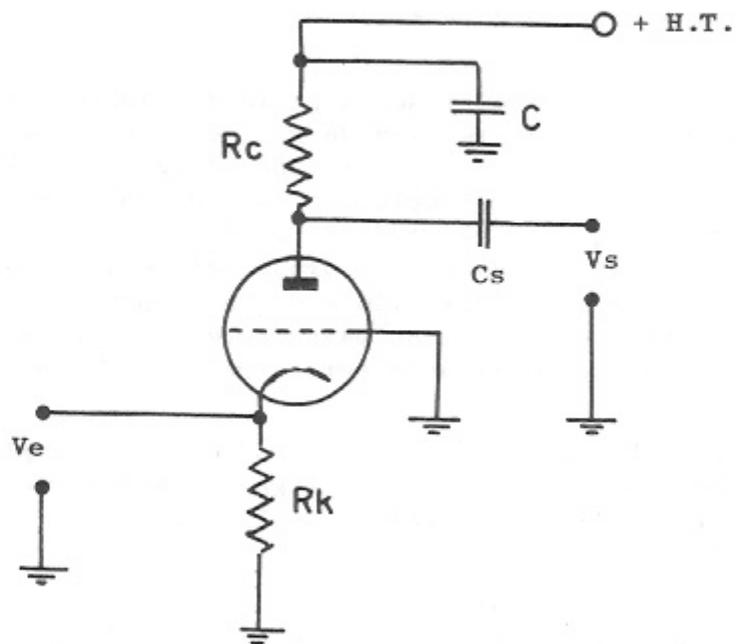
- avec cathode à la masse (Fig. 1-)
- avec grille à la masse (Fig. 2-)
- avec plaque à la masse (Fig. 3-)

Le premier circuit se rapporte à l'amplificateur conventionnel avec triode en classe "A", la polarisation de grille étant obtenue par une résistance cathodique " R_k ". Le condensateur " C_k " ramène la cathode à la masse en ce qui concerne la composante alternative amplifiée par le tube. " R_c " est la résistance de charge aux bornes de laquelle se produit la tension de sortie de l'amplificateur. " C_b " est un condensateur de fuite qui sert à mettre à la masse le point FROID de la résistance de charge quant aux effets de la composante alternative. " C_s " est un condensateur de sortie qui ne laisse passer que la composante alternative et qui bloque la tension continue existante sur la plaque du tube.

Le deuxième circuit au contraire est un amplificateur avec grille à la masse "grounded-grid" dans lequel le signal d'entrée est appliqué à la cathode du tube. Le signal amplifié est prélevé de la même façon que pour l'amplificateur du premier circuit.

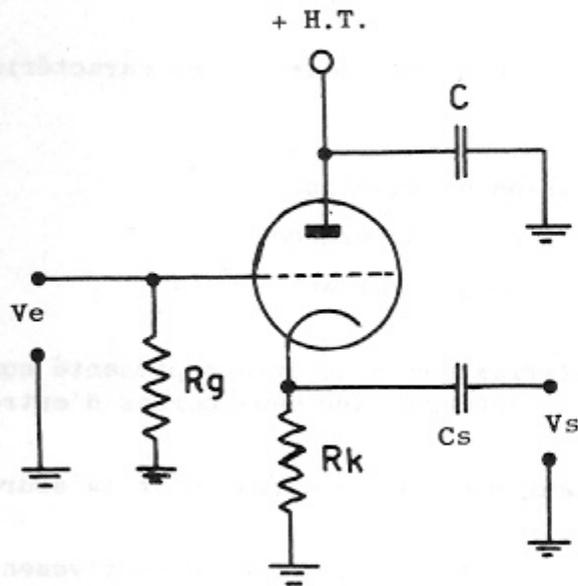
Le troisième circuit est un amplificateur avec plaque à la masse. Il est appelé souvent CATHODE FOLLOWER ou CATHODE FLOTTANTE. Il est caractérisé par le fait que, la résistance de cathode " R_k " sert à polariser la grille du tube et aussi comme résistance de charge aux bornes de laquelle on prélève le signal amplifié.

CIRCUIT AMPLIFICATEUR AVEC GRILLE A LA MASSE.



- Fig. 2 -

CIRCUIT AVEC PLAQUE A LA MASSE.



- Fig. 3 -

Vous remarquerez que la plaque n'est pas à la masse, mais réunie à la "H.T.". Cela n'est vrai que pour la tension continue, car le condensateur "C" présente une impédance négligeable aux courants alternatifs et l'on peut considérer la plaque comme étant à la masse pour ces courants.

Chacun de ces amplificateurs a ses caractéristiques bien définies ; les principales sont :

- Amplification en tension,
- Amplification en puissance,
- Amplification en courant.

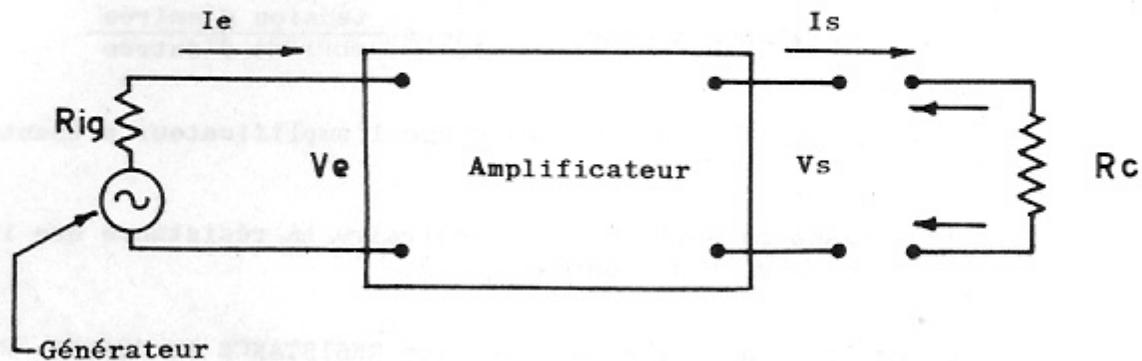
Chaque amplificateur peut être représenté comme le montre la Fig.4- c'est-à-dire par un simple rectangle avec deux bornes d'entrée et deux de sortie.

Le générateur représente normalement la source du signal.

" V_e " et " V_s " sont les tensions respectivement aux bornes d'entrée et de sortie.

" I_e " et " I_s " les courants dans les circuits d'entrée et de sortie. Ce courant circule parce que la tension " V_e " est appliquée à la résistance présentée par le circuit d'entrée de l'amplificateur.

RESISTANCE INTERNE DU GENERATEUR.



- Fig. 4 -

On a alors par définition :

$$\text{amplification de tension} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{\text{tension de sortie}}{\text{tension d'entrée}}$$

Ce que nous appelons RESISTANCE D'ENTREE est donnée par le rapport:

$$\text{résistance d'entrée} = \frac{V_e}{I_e} = \frac{\text{tension d'entrée}}{\text{courant d'entrée}}$$

La résistance d'entrée est celle que l'amplificateur présente du côté du générateur.

La résistance de sortie est au contraire la résistance que l'amplificateur présente pour le circuit de sortie.

Si on charge l'amplificateur par une RESISTANCE DE CHARGE "R_C", il circulera un courant de sortie "I_S".

Ce courant, selon la loi d'Ohm, sera égal à :

$$I_s = \frac{V_s}{R_c + R_u}$$

"R_u" est la résistance interne de sortie de l'amplificateur.

On peut démontrer que l'échange de puissance entre l'amplificateur et la charge prend une valeur maximum quand la résistance interne " R_u " est égale à la résistance de charge " R_c ".

L'amplification du courant est par définition :

$$\text{amplification du courant} = \frac{\text{courant de sortie}}{\text{courant d'entrée}} = \frac{I_s}{I_e}$$

De ces deux relations naît la suivante, qui en est la conséquence directe :

$$\text{amplification de puissance} = \text{amplification de tension} \times \text{amplification de courant.}$$

Les trois circuits vus précédemment ont des valeurs différentes d'amplification de tension et d'amplification de courant. Ils présentent aussi des valeurs différentes de résistance d'entrée et de sortie.

Par analogie avec les 3 circuits à tubes électroniques vus précédemment, on peut placer dans un circuit les transistors avec BASE A LA MASSE, EMETTEUR A LA MASSE ou COLLECTEUR A LA MASSE, les caractéristiques diffèreront de façon semblable.

Les notions de résistance d'entrée et de résistance de sortie ont beaucoup d'importance dans l'étude des transistors.

Dans la triode amplificatrice avec cathode à la masse, il n'existe presque pas de courant d'entrée et la résistance d'entrée est alors pratiquement infinie.

Les courants d'entrée et les puissances d'entrée sont donc nuls : les notions d'amplification de puissance, d'amplification de courant et résistance d'entrée ne sont pas nécessaires.

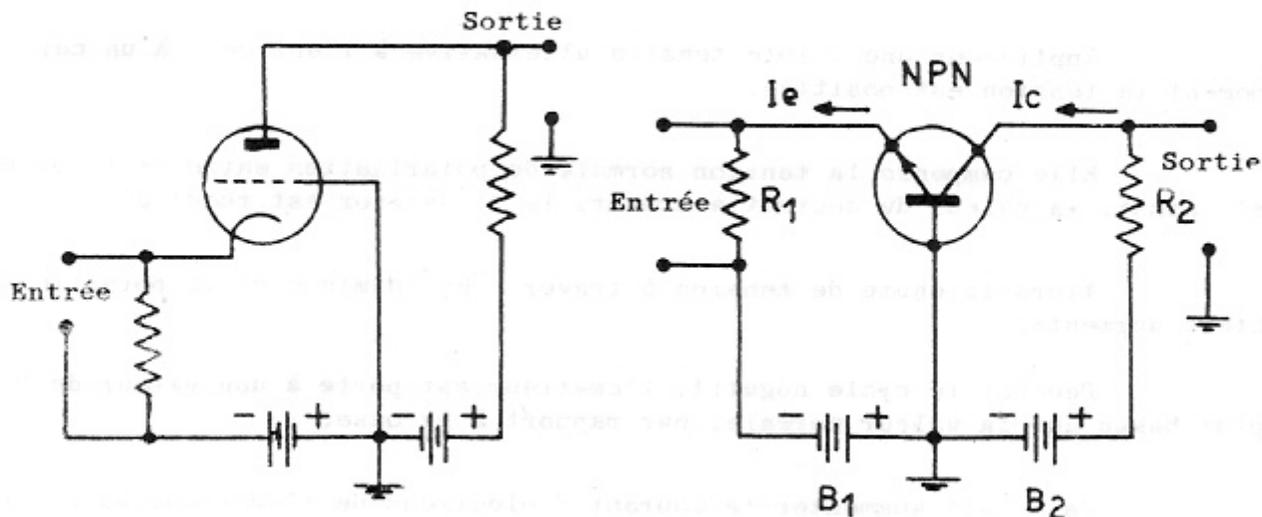
Dans le cas des transistors par contre, il existe toujours une résistance d'entrée suffisamment basse. En outre, les variations de résistance de sortie influent sur la résistance d'entrée, ce qui n'arrive pas dans les circuits à tubes.

AMPLIFICATEUR AVEC BASE A LA MASSE.

Sur la Fig. 5- est schématisé un circuit à tube électronique avec grille à la masse, ainsi qu'un circuit analogue à transistor avec base à la masse.

Le signal est appliqué à l'émetteur et est prélevé sur le collecteur. Les deux batteries donnent les tensions de polarisation des électrodes, et les

AMPLIFICATEUR AVEC BASE A LA MASSE.



- Fig. 5 -

résistances indiquées dans les deux schémas sont celles aux bornes desquelles se manifestent les tensions d'entrée et de sortie.

Examinons de plus près l'amplificateur à transistors.

Appliquons une faible tension alternative à l'entrée : à un certain moment la tension est positive.

Elle compense la tension normale de polarisation entre émetteur et base et, ainsi, la valeur du courant à travers le transistor est réduite.

Alors la chute de tension à travers " R_2 " diminue et le potentiel du collecteur augmente.

Pendant le cycle négatif, l'émetteur est porté à une valeur de tension plus basse que la valeur normale, par rapport à la base.

Cela fait augmenter le courant d'électrons de l'émetteur au collecteur et la chute de tension sur " R_2 " augmentera.

Le potentiel du collecteur deviendra plus négatif.

Puisqu'il suffit de petites variations de tension entre l'émetteur

et la base pour obtenir de grandes variations du courant de l'émetteur au collecteur, on aura une amplification.

Avec les transistors à jonction montés avec base à la masse, on aura des valeurs de résistance d'entrée de 100 à 300 Ω environ et des résistances de sortie de l'ordre de 500 Ω . L'amplification en puissance que l'on peut obtenir sera comprise entre 150 et 400.

Ce circuit est beaucoup employé avec les transistors à pointe : pour un tel montage, les transistors à pointe présentent de bonnes garanties de stabilité, tandis que ceux à jonction, sont peu employés parce que l'amplification obtenue est minimum.

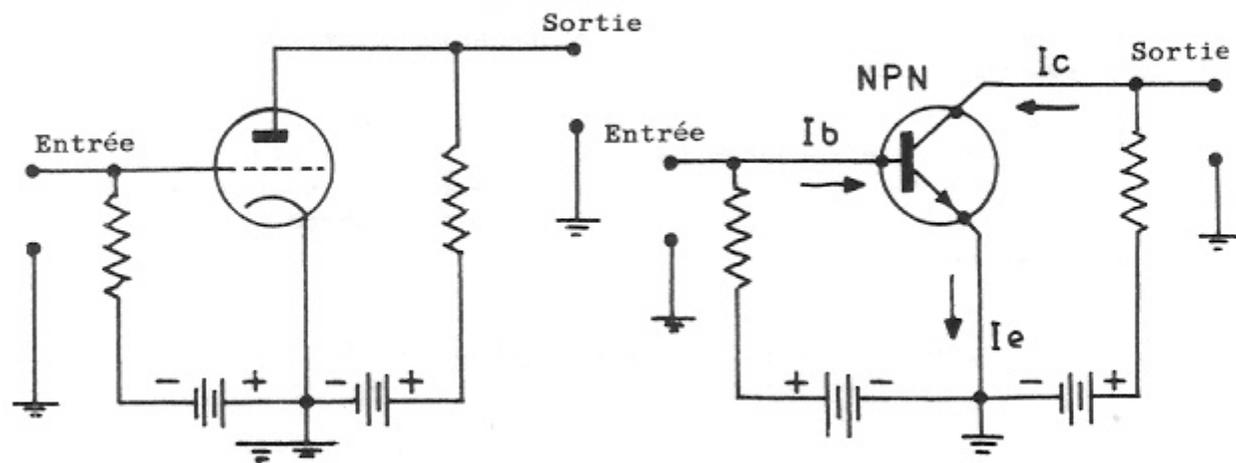
AMPLIFICATEUR AVEC EMETTEUR A LA MASSE.

Sur la Fig. 6- est schématisé un circuit à tube électronique avec cathode à la masse et un circuit analogue à transistor avec émetteur à la masse.

Le signal est appliqué à la base et prélevé au collecteur. La polarisation des électrodes est obtenue par deux batteries et les résistances servent de charge aux signaux d'entrée et de sortie.

Avec les transistors à jonction montés en émetteur à la masse, on a

AMPLIFICATEUR AVEC EMETTEUR A LA MASSE.



- Fig. 6 -

des valeurs de résistance d'entrée de 700 à 1.000 Ω environ et de sortie de l'ordre de 50 K Ω .

L'amplification est considérablement plus élevée que dans le circuit précédent : l'amplification de puissance est de l'ordre de 5.000, celle de tension de l'ordre de 500 fois.

AMPLIFICATEUR AVEC COLLECTEUR A LA MASSE.

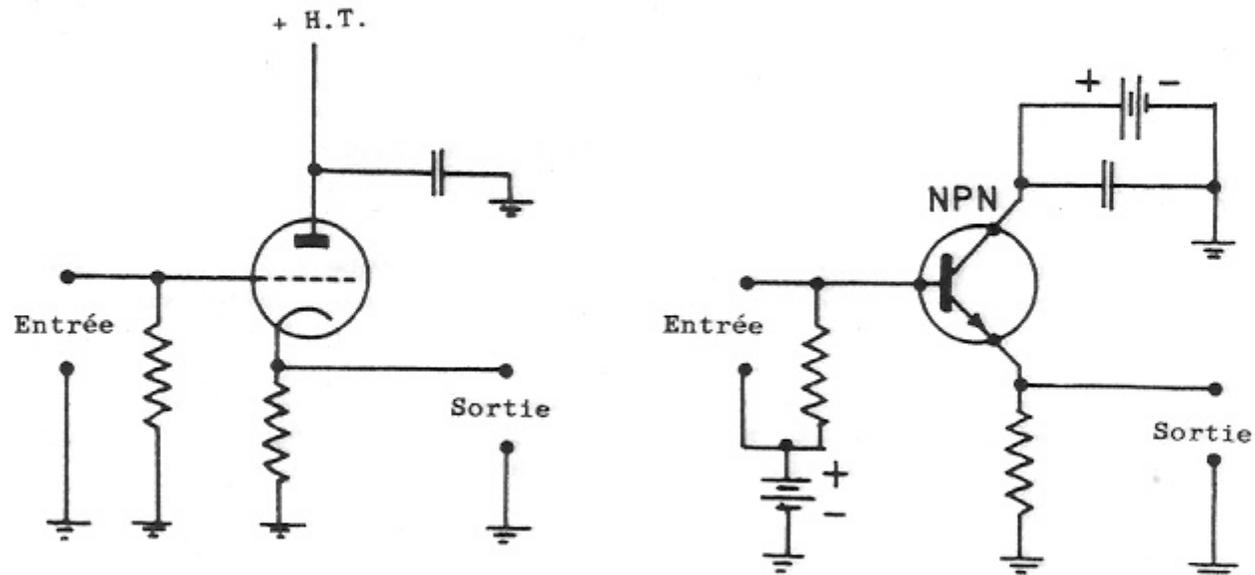
Sur la Fig. 7- est schématisé un circuit à tube électronique avec plaque à la masse et le circuit correspondant à transistor avec collecteur à la masse.

Nous rappelons encore que la plaque dans le tube électronique et le collecteur dans le transistor ne sont à la masse que pour les effets de la composante alternative du signal, au moyen d'un condensateur de fuite.

Ce circuit a la propriété d'avoir une résistance d'entrée de 300.000 à 600.000 Ω . La résistance de sortie est de l'ordre de 100 Ω . L'amplification de tension est, comme dans la cathode flottante inférieure à 1.

OBSERVATION : On note que, quel que soit le circuit de liaison du transistor, la méthode de polarisation des électrodes reste la même.

AMPLIFICATEUR AVEC COLLECTEUR A LA MASSE



- Fig. 7 -

L'émetteur est toujours polarisé négativement par rapport à la base et le collecteur toujours positivement, s'il s'agit de transistors "N P N". Dans le cas des transistors "P N P", les polarités des batteries doivent être inversées.

CARACTERISTIQUES ET DONNEES DES TRANSISTORS.

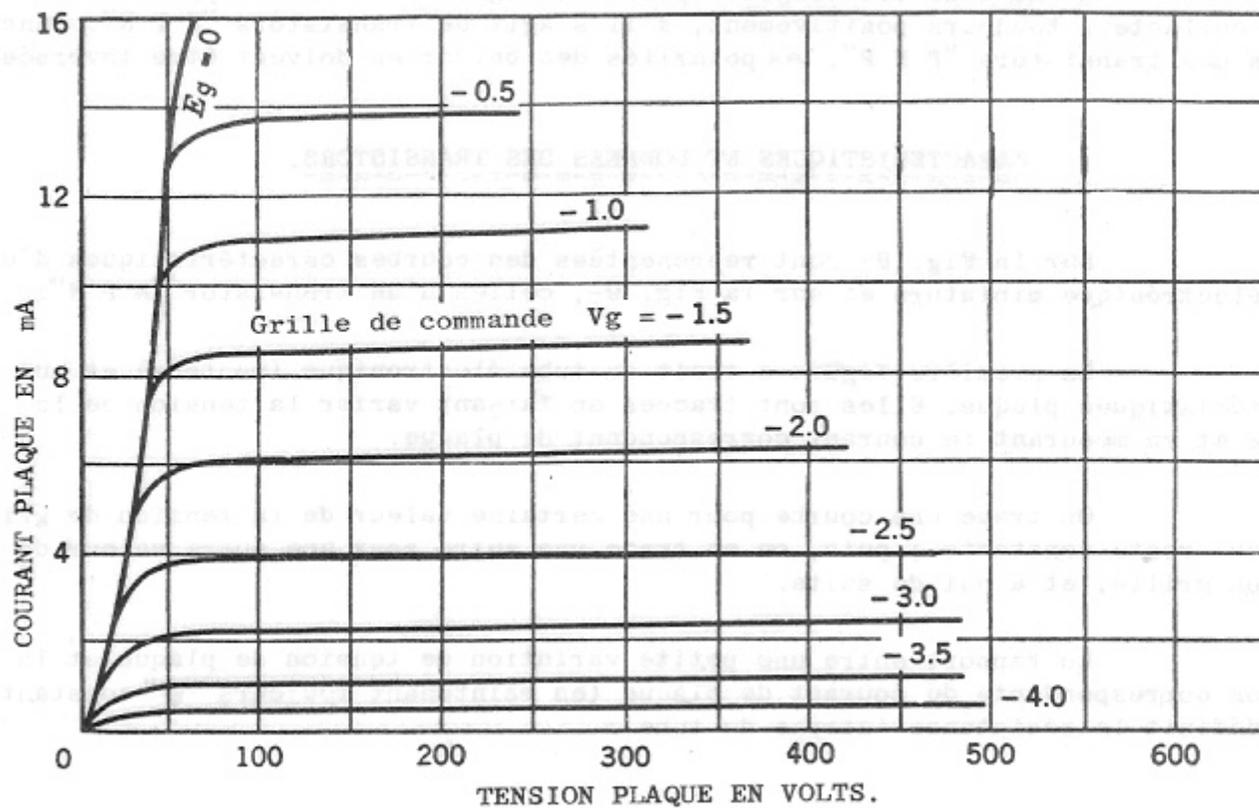
Sur la Fig. 8- sont représentées des courbes caractéristiques d'un tube électronique miniature et sur la Fig. 9-, celles d'un transistor "N P N".

La première figure a trait au tube électronique (pentode) et aux caractéristiques plaque. Elles sont tracées en faisant varier la tension de la plaque et en mesurant le courant correspondant de plaque.

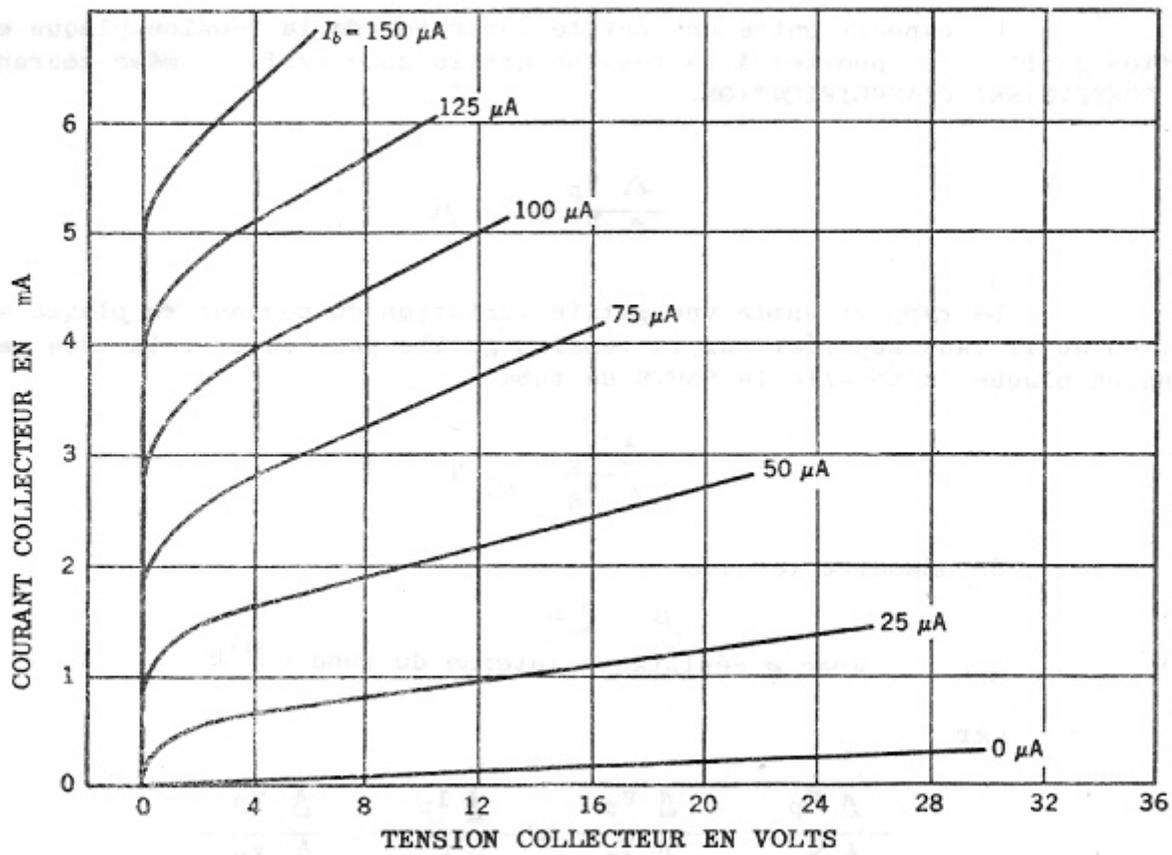
On trace une courbe pour une certaine valeur de la tension de grille " V_g " qui reste constante ; puis, on en trace une autre pour une autre valeur de tension grille, et ainsi de suite.

Le rapport entre une petite variation de tension de plaque et la variation correspondante du courant de plaque (en maintenant toujours " V_g " constant) nous définit la résistance interne du tube :

$$\frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} = r$$



- Fig. 8 -



- Fig. 9 -

Le rapport entre une petite variation de la tension plaque et la variation qu'il faut apporter à la tension grille pour avoir le même courant, s'appelle COEFFICIENT D'AMPLIFICATION.

$$\frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} = \mu$$

Le rapport entre une petite variation du courant de plaque et la variation qu'il faut apporter sur la tension grille pour obtenir la même valeur de la tension plaque, s'appelle la PENTE du tube :

$$\frac{\Delta I_p}{\Delta V_g} = S$$

On démontre ici que :

$$\mu = \rho S$$

avec ρ résistance interne du tube = $\frac{\Delta V_p}{\Delta I_p}$

Car :

$$\frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} \times \frac{\Delta I_p}{\Delta V_g} = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g}$$

Par exemple, si, en faisant varier de 210 à 220 V. la tension de la plaque, on a une variation de 1 mA du courant plaque, à valeur constante de "V_g" la résistance interne du tube étudié sera :

$$\text{résistance interne "r"} = \frac{220 \text{ V.} - 210 \text{ V.}}{0,001 \text{ A}} = \frac{10}{0,001} = 10.000 \Omega$$

Ainsi pour obtenir la variation de 6 à 7 mA du courant plaque d'un certain tube, il faut effectuer une variation de la tension grille de 0,1 V. La tension plaque restant constante, la conductance mutuelle est :

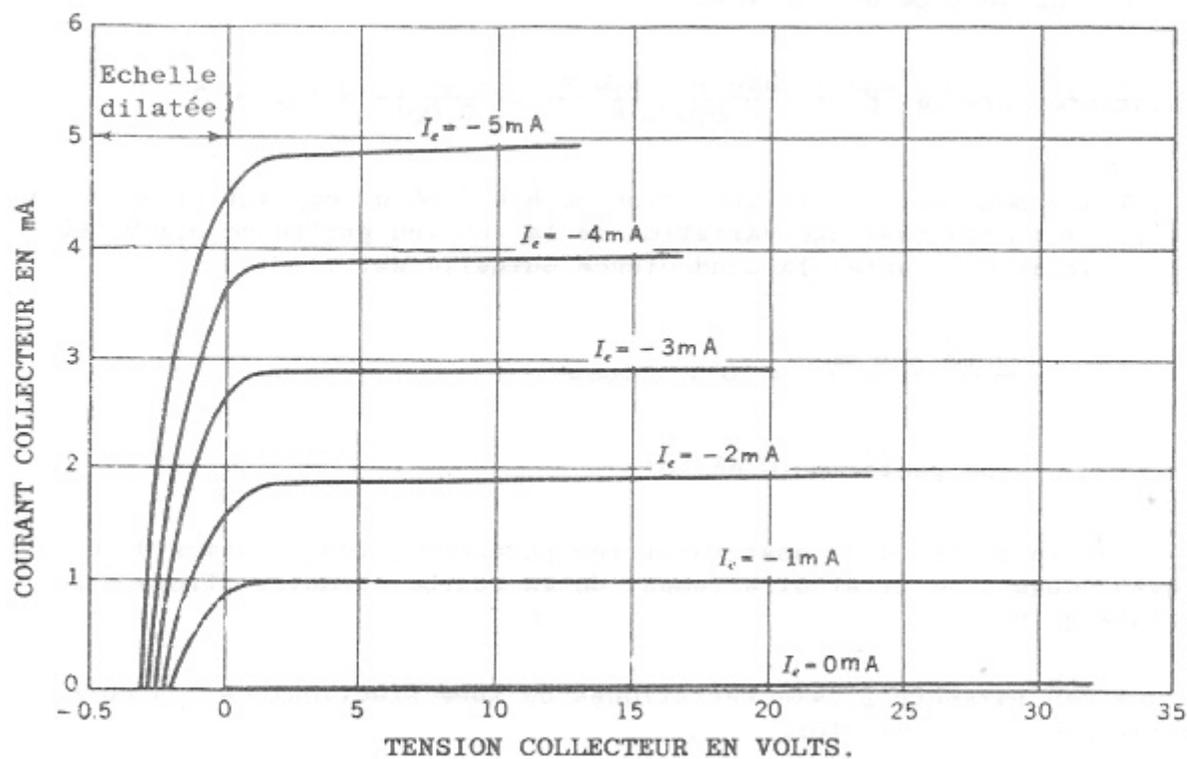
$$\frac{7 \text{ mA} - 6 \text{ mA}}{0,1 \text{ V}} = 10 \text{ millimho}$$

$$\text{ou pente} = 10 \text{ mA/volt}$$

Ces rapports, qui constituent les paramètres fondamentaux d'un tube électronique, peuvent se tirer directement de la courbe caractéristique expérimentée sur la Fig. 8-.

A ces paramètres caractéristiques du tube électronique, en correspondent d'autres pour le transistor.

Avant tout, je vous fais observer que sur la courbe caractéristique



- Fig. 10 -

correspondante du transistor (Fig. 9-), au lieu de la tension de grille "V_g", il est porté le courant de base "I_b".

SACHANT CELA, L'ANALOGIE ENTRE LES DEUX COURBES EST EVIDENTE.

Précisément, puisqu'à une tension dans le tube correspond un courant dans le transistor, on dit que les transistors sont des amplificateurs de courant.

Sur la Fig. 10- il y a au contraire une famille de courbes caractéristiques du transistor tracées en fonction du courant collecteur et de la tension collecteur. Ces courbes sont tracées pour différents courants, non pas de base, comme nous l'avons vu avant, mais d'émetteur.

Supposons que nous ayons un transistor monté comme celui de la Fig. 6- c'est-à-dire avec l'émetteur à la masse.

Le rapport entre une variation du courant collecteur "I_c" et la variation correspondante du courant de base "I_b" (obtenue en faisant varier la polarisation ou la base) s'appelle FACTEUR D'AMPLIFICATION DE BASE et on le désigne par le symbole "β" (béta).

$$\beta = \frac{\text{variation de } I_c}{\text{variation de } I_b}$$

Supposons maintenant que nous ayons un transistor monté comme celui de la Fig. 5- c'est-à-dire avec la base à la masse.

Le rapport entre une variation du courant collecteur " I_C " et la variation correspondante du courant émetteur " I_e " (obtenue en faisant varier la polarisation de l'émetteur) s'appelle FACTEUR D'AMPLIFICATION DE L'EMETTEUR et on l'indique avec le symbole " α " (alpha).

$$\alpha = \frac{\text{variation de } I_C}{\text{variation de } I_e}$$

La valeur de " α " est inférieure à 1 pour les transistors à jonction.

La valeur de " β " est en général comprise entre 15 et 50.

Ces deux paramètres sont reliés entre eux par des relations :

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \qquad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Si, par exemple, " α " est égal à 0,95, on obtiendra " β " ainsi :

$$\beta = \frac{0,95}{1 - 0,95} = \frac{0,95}{0,05} = 19$$

De même façon, si " β " est égal à 50, on obtiendra :

$$\alpha = \frac{50}{1 + 50} = \frac{50}{51} = 0,980$$

Ces paramètres peuvent être également déduits des 2 courbes des Fig. 8 et 9- mais avec des procédés qui sortent des limites de ces leçons.

Ces paramètres sont très importants pour calculer l'amplification d'un transistor; généralement on n'en donne qu'un, l'autre se déduisant du premier.

Dans les tableaux des données qui définissent un transistor particulier, il y a toujours un des ces paramètres.

Les résistances d'entrée et de sortie se déduisent plus ou moins facilement des valeurs de résistances que présentent dans un sens ou dans l'autre les jonctions. Mais généralement, elles sont fournies par le constructeur pour les différents montages du circuit à transistor.

Vous trouverez Fig. 11- les caractéristiques de deux transistors français à jonction (P N P) fabriqués par la Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil (C. S. F.). Il s'agit d'un transistor "B F" classique et d'un transistor, dit "de puissance".

Caractéristiques de deux transistors de la Compagnie Générale de TSF								
	β intégré à $V_{ce} = 1 \text{ V.}$	$I_{co} \mu \text{ A}$ à $V_{cb} = -12\text{V.}$	$I_{eo} \mu \text{ A}$ à $V_{eb} = -12\text{V.}$	Fréquence de coupure KHz	En W/degé	V_{eb} max volt	I_c max	V_{eb} max volt
SFT 101	pour $I_c = 50\text{mA}$ 20	< 10	< 30	550	> 1,8	24	50 mA	12
SFT 113	pour $I_c = 2 \text{ A}$ 4	500	-	250	500	30	3 A	-

- Fig. 11 -

Les transistors qui fonctionnent à des fréquences élevées présentent comme caractéristiques une CAPACITE ENTRE COLLECTEUR ET BASE qui est généralement de l'ordre de 10 à 15 pF.

La FREQUENCE DE COUPURE définie comme étant la fréquence du signal encore amplifiée avec une atténuation raisonnable, est également signalée.

Pour le transistor du type "SFT IO8 - C S F", par exemple, la valeur de la fréquence de coupure est de 10 MHz.

Une caractéristique typique des transistors, qui les différencie notamment des tubes électroniques, est l'interdépendance des circuits d'entrée et de sortie. En effet, en faisant varier la résistance de sortie, on obtient une variation sensible de la résistance d'entrée.

Il apparaît donc une variation dans l'amplification.

Dans les tubes électroniques au contraire, les circuits d'entrée et de sortie sont complètement indépendants.

En concluant, je résume ce que nous avons vu dans cette leçon.

1- Circuits fondamentaux d'emploi des tubes électroniques et des transistors.

a- cathode à la masse	=	émetteur à la masse
b- grille à la masse	=	base à la masse
c- plaque à la masse (cathode flottante)	=	collecteur à la masse

- 2- Notion d'amplification de tension, d'amplification de courant et de puissance.
- 3- Notion de résistance d'entrée et de sortie.
- 4- Importance dans l'étude des transistors des notions exprimées aux points 2 et 3.
- 5- Courbes caractéristiques du tube électronique et du transistor et leur signification.
- 6- Résistance - coefficient d'amplification et conductance mutuelle dans le tube électronique.
- 7- Facteur d'amplification de base et d'émetteur - relation entre eux.
- 8- Capacité entre le collecteur et la base et notion de fréquence limite.
- 9- Notion d'interdépendance entre les résistances d'entrée et de sortie - ce qui arrive seulement dans les transistors et non dans les tubes électroniques.

REPONSES AUX EXERCICES DE REVISION SUR LA 4ème LECON TRANSISTORS.

- 1- Résistivité du germanium pur = 65 Ω /cm
Résistivité du germanium pour transistors = 60 Ω /cm
Résistivité du silicium pur = 240 k Ω /cm
Résistivité du silicium pour transistors = 150 k Ω /cm
- 2- On l'obtient par diffusion d'une petite quantité d'impuretés du type "P" (par exemple indium) dans un cristal de germanium du type "N".
- 3- L'avantage du transistor au silicium par rapport à celui au germanium, est dû à sa sensibilité réduite aux variations de température, à ses caractéristiques électriques, et à la possibilité qu'il a de fonctionner à des températures plus élevées.
- 4- Le procédé du pulling est un système qui sert à obtenir le monocristal; il consiste dans le traitement d'un monocristal "mère" sur lequel est créé le monocristal voulu, par une cristallisation successive.

- 5- La purification par zones, est la méthode par laquelle on exploite le fait que les impuretés du germanium se localisent dans la partie fondue du minerai ; on obtient un degré de pureté supérieur à 1 partie d'impureté pour 100 millions de parties de germanium.
- 6- Le coût du germanium pur est élevé, et parce qu'il se trouve dans la nature en des quantités très petites, et parce qu'une grande partie est perdue pendant les différentes phases du travail.

EXERCICES DE REVISION SUR LA 5ème LECON TRANSISTORS.

- 1- Définir l'amplification de tension, de courant et de puissance
- 2- Définir la résistance d'entrée et de sortie
- 3- Quelles sont les valeurs moyennes des résistances d'entrée et de sortie d'un transistor monté suivant les 3 modes possibles ?
- 4- Comment peut-on tirer la courbe caractéristique qui exprime le courant collecteur, en fonction de la tension collecteur pour différentes tensions de base ?
- 5- Comment tire-t-on les valeurs de α et de β ?
