



# SEMI - CONDUCTEURS

COURS DE BASE  
ELECTRONIQUE

Au cours de la leçon SEMI-CONDUCTEURS 2, nous avons vu comment il est possible de représenter les propriétés électriques d'une diode au moyen de la **CARACTERISTIQUE TENSION-COURANT**, c'est-à-dire de la courbe représentant l'allure du courant de la diode lorsque la tension appliquée entre l'anode et la cathode varie.

Lorsqu'il s'agit de représenter les propriétés du transistor, on se sert également de graphiques, en fonction desquels il est possible de fixer les points de travail et de déterminer les différentes tensions et courants de fonctionnement du transistor (figure 1).

Alors que pour la diode on ne dispose que d'une seule courbe renseignant sur les caractéristiques **DIRECTE** et **INVERSE**, il n'en est pas de même pour le transistor.

Pour ce dernier en effet, il est possible d'avoir **DOUZE CARACTÉRISTIQUES** différentes et même **DOUZE FAMILLES DE CARACTÉRISTIQUES**, chacune d'elles représentant une relation bien définie entre deux tensions et un courant, ou encore entre deux courants et une tension du transistor.

Il n'est toutefois pas utile de posséder les douze familles de caractéristiques, pour connaître les propriétés électriques du transistor.

En effet, il suffit d'en posséder **DEUX**, c'est-à-dire celles qui renseignent sur **LA TENSION ET LE COURANT D'ENTRÉE** et la **TENSION ET LE COURANT DE SORTIE** pour retrouver au moyen d'opérations graphiques, les dix autres familles.

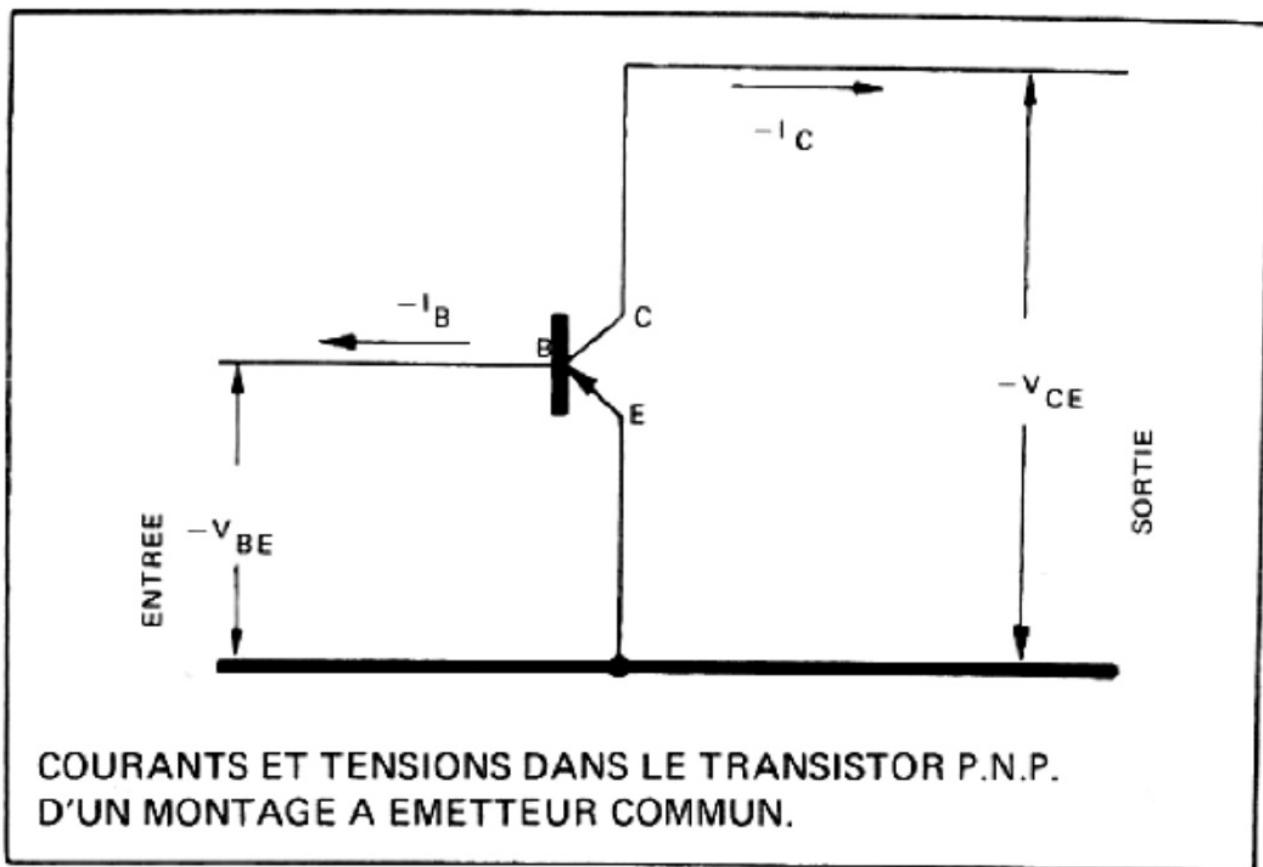


Figure 1

Généralement, les caractéristiques principales des transistors comprenant les courants et tensions, sont fournies par les constructeurs.

Dans le cadre de cette leçon, nous nous limiterons à l'étude des caractéristiques du transistor P.N.P. pour un circuit à émetteur commun.

Il s'agit là en effet du montage le plus fréquemment utilisé en électronique.

## I - CARACTERISTIQUES DES TRANSISTORS P.N.P. DANS UN MONTAGE A EMETTEUR COMMUN

Pour le relevé des caractéristiques, on peut imaginer un montage comme celui du schéma de la figure 2. En effet, avec un tel appareil, il est possible de recueillir toutes les données nécessaires à la construction des caractéristiques.

Examinons d'abord les caractéristiques relatives au circuit de sortie, couramment appelées **CARACTERISTIQUES DE SORTIE**.

Celles-ci comprennent le courant collecteur –  $I_C$  et la tension collecteur –  $V_{CE}$ , comme éléments variables.

Le courant collecteur –  $I_C$  dépend de la tension collecteur –  $V_{CE}$ , mais il est fortement influencé par les variations du courant de base –  $I_B$ .

Nous constatons donc que lorsqu'il s'agit de relever une caractéristique de sortie, **IL EST INDISPENSABLE DE MAINTENIR CONSTANT LE COURANT DE BASE A LA VALEUR CHOISIE**.

Cette mise au point s'effectue en faisant varier la résistance ajustable  $R$ , insérée dans le circuit de polarisation de la base. La lecture du courant –  $I_B$  s'effectue sur l'appareil de mesure  $Ae$  (figure 2).

Toutefois avec un courant de base constant, on fait varier grâce au potentiomètre  $P$ , la tension collecteur –  $V_{CE}$  de zéro au maximum, correspondant à la tension de la batterie d'alimentation  $B2$ .

Les variations de la tension –  $V_{CE}$ , sont enregistrées par le voltmètre  $Vu$ , inséré aux bornes du circuit de sortie.

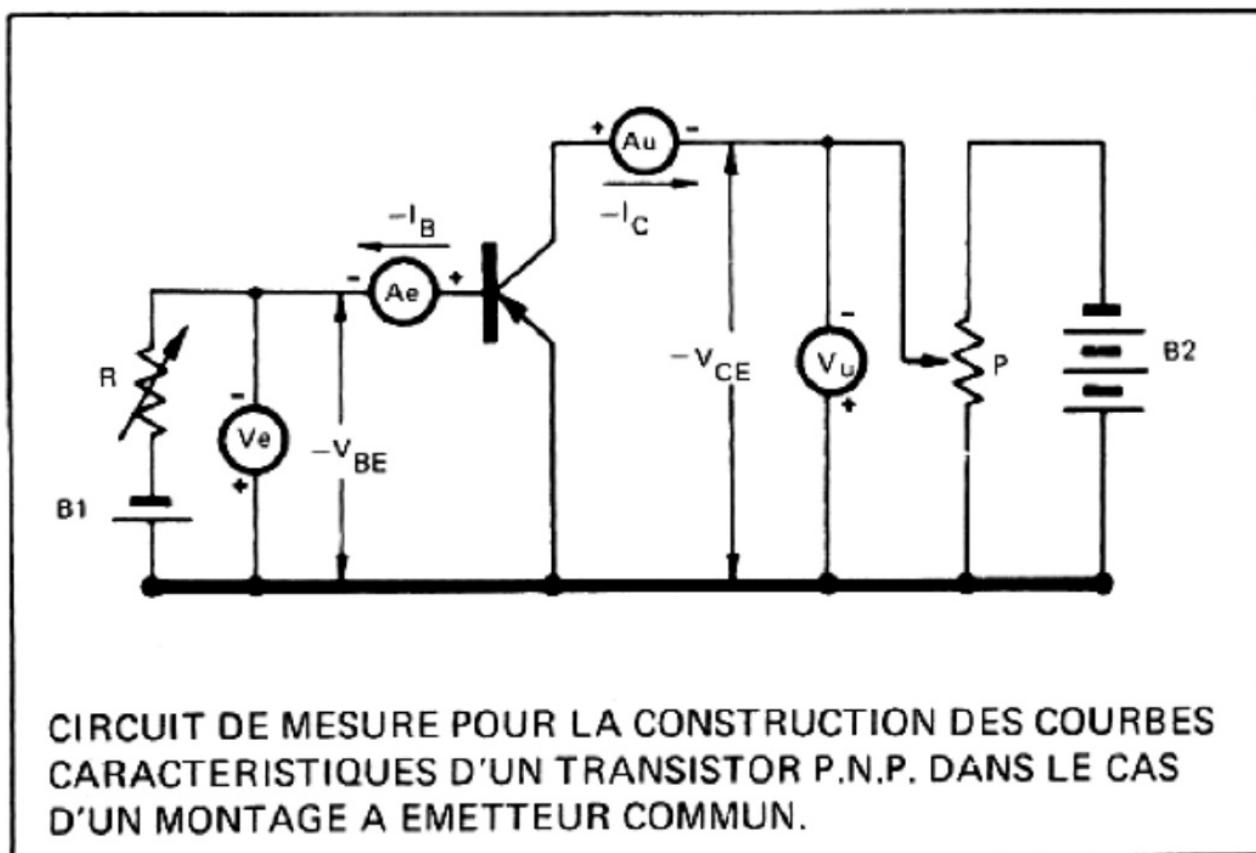
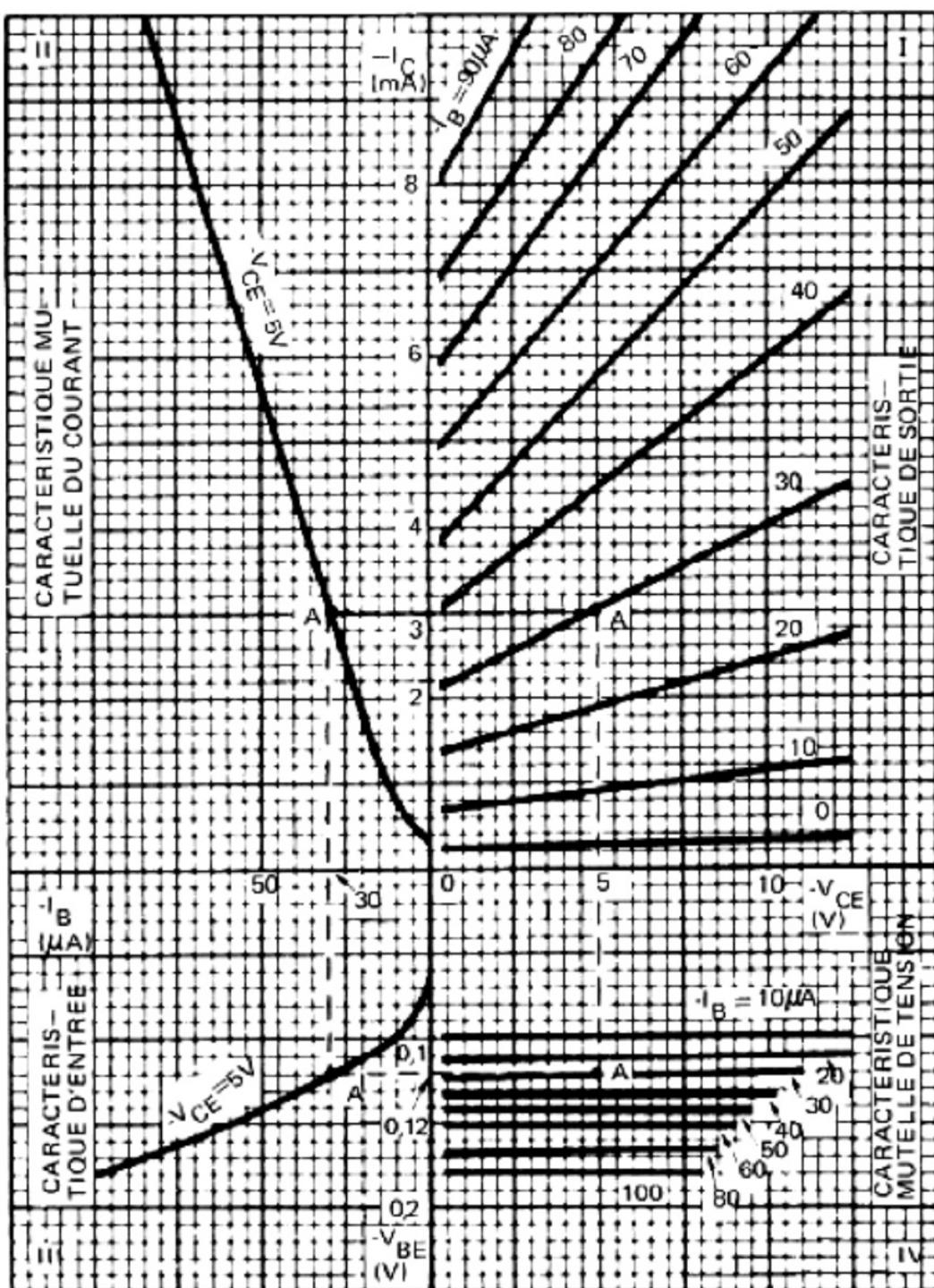


Figure 2

A ces variations de tension, correspondent des variations plus ou moins accentuées du courant collecteur  $-I_C$ , lisibles sur l'appareil  $A_u$ . Il est alors possible de déterminer des couples de valeurs qui, reportées sur un diagramme cartésien, permettent de construire la caractéristique de sortie correspondant au courant de base choisi.

Pour toute valeur du courant de base, on obtient une caractéristique de sortie bien définie, comme on peut le voir dans la partie I (en haut, à droite) du diagramme donné figure 3. L'ensemble des caractéristiques tracées dans cette partie, constitue la FAMILLE DES CARACTÉRISTIQUES DE SORTIE.



CARACTÉRISTIQUES D'UN TRANSISTOR P.N.P DANS UN MONTAGE A EMETTEUR COMMUN.

Figure 3

Ce même diagramme représente également un certain nombre de graphiques, illustrant d'autres caractéristiques appelées **CARACTERISTIQUES MUTUELLES DE TENSION**.

Dans ce cas aussi, à chacune des caractéristiques, correspond une valeur déterminée du courant de base  $-I_B$ , qui reste constante durant les opérations de mesures relatives à cette même caractéristique.

La tension collecteur ( $-V_{CE}$ ), déjà considérée précédemment et la tension de base ( $-V_{BE}$ ) dont la valeur est lisible sur le voltmètre  $V_e$  (figure 2) **SONT VARIABLES**.

Il est toutefois bon d'observer que les variations de la tension de base dues aux variations de la tension collecteur sont pratiquement imperceptibles, du fait que chaque caractéristique mutuelle de tension reste à un niveau constant par rapport à l'axe des tensions  $-V_{CE}$ .

La famille des caractéristiques de sortie et caractéristiques mutuelles de tension, comprennent toutes les grandeurs fondamentales c'est-à-dire, la tension collecteur ( $-V_{CE}$ ), le courant collecteur ( $-I_C$ ), le courant de base ( $-I_B$ ) dont la valeur est indiquée sur chaque caractéristique et enfin la tension de base ( $-V_{BE}$ ). Avec ces deux familles de caractéristiques, on peut donc retrouver toutes les autres, au moyen d'opérations graphiques.

Toutefois, pour faciliter les recherches, certains constructeurs de transistors fournissent deux autres caractéristiques à savoir : **LA CARACTERISTIQUE MUTUELLE DE COURANT**, reportée dans la partie II du diagramme de la figure 3 et **LA CARACTERISTIQUE D'ENTREE** reportée dans la partie III de ce même diagramme.

On construit la caractéristique mutuelle de courant d'après les valeurs du courant  $-I_C$ , obtenues avec les variations du courant  $-I_B$  et avec une tension collecteur constante ( $-V_{CE} = 5 \text{ V}$ ).

La caractéristique d'entrée est construite d'après les valeurs de la tension  $-V_{BE}$ , obtenues lorsqu'il y a variation de  $-I_B$  pour une tension collecteur  $-V_{CE}$  constante.

En réunissant les caractéristiques du transistor dans un cadre comme celui de la figure 3, il est possible de faire tous les calculs fondamentaux nécessaires à l'étude d'un amplificateur à émetteur commun.

Nous allons toutefois nous arrêter à l'exemple de la figure 1, en nous limitant à définir les valeurs de courant et de tension nécessaires au calcul de la résistance de collecteur  $R_C$  et la résistance de base  $R_B$ .

## II - EMPLOI DES CARACTÉRISTIQUES DES TRANSISTORS

La caractéristique de sortie ayant comme paramètre le courant de base, représente LA PLUS UTILE DE TOUTES LES FAMILLES DE CARACTÉRISTIQUES.

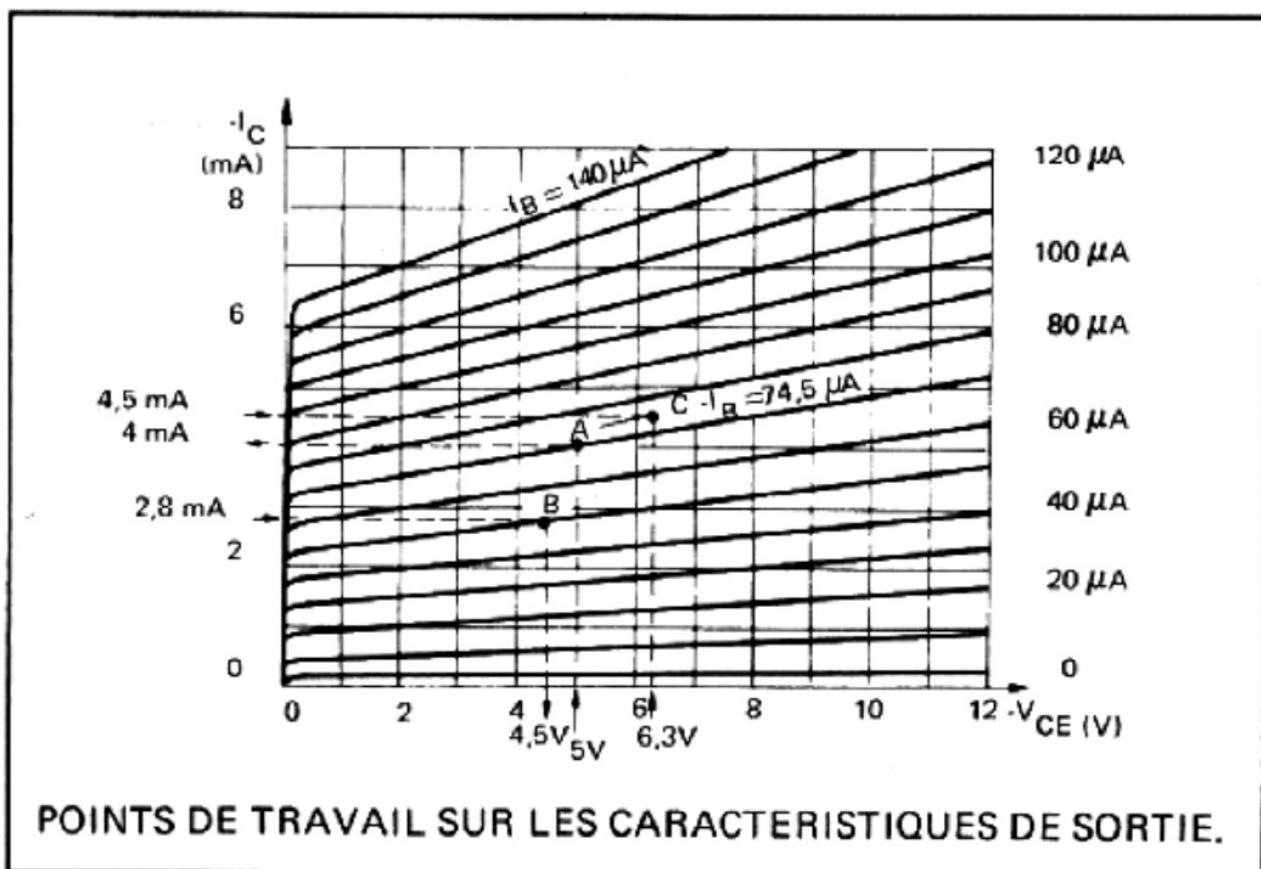
Celle-ci permet en effet de mettre en relation les grandeurs de sortie du transistor (tension collecteur et courant collecteur) avec la grandeur de commande c'est-à-dire, LE COURANT DE BASE.

En effet, pour utiliser un transistor, IL SUFFIT D'APPLIQUER UNE CERTAINE TENSION ENTRE LE COLLECTEUR ET L'EMETTEUR et de faire CIRCULER UN COURANT DONNÉ DANS LE CIRCUIT DE BASE.

On obtient alors un courant collecteur dont la valeur est lue sur les caractéristiques de sortie.

Examinons maintenant les caractéristiques reportées sur la figure 4, en supposant que le transistor auquel se rapportent ces courbes

soit alimenté avec une tension collecteur  $-V_{CE} = 5 \text{ V}$  et que son circuit de base soit parcouru par un courant  $-I_B = 70 \mu\text{A}$ .



POINTS DE TRAVAIL SUR LES CARACTERISTIQUES DE SORTIE.

Figure 4

La première opération consiste à rechercher sur l'axe horizontal, le point correspondant à la tension collecteur de 5 V. A partir de ce point, on trace une droite verticale, jusqu'au point A (la caractéristique ayant comme paramètre la valeur de  $70 \mu\text{A}$  du courant de base).

Au point A, on trace une droite horizontale jusqu'au point de rencontre de l'axe vertical, sur lequel on lit la valeur du courant collecteur. L'exemple choisi sur la figure 4 donne un courant collecteur de 4 mA.

LE POINT A indiquant les grandeurs qui définissent les conditions de fonctionnement du transistor est appelé POINT DE TRAVAIL.

L'exemple nous a montré comment repérer le point de travail en ne possédant que deux des grandeurs connues. Nous allons voir maintenant comment il est possible de trouver la troisième.

Nous avons vu en effet comment trouver le COURANT COLLECTEUR en connaissant LA TENSION COLLECTEUR ET LE COURANT DE BASE, mais de la même façon, il est également possible de trouver LA TENSION COLLECTEUR en connaissant LES COURANTS DE BASE ET DE COLLECTEUR, ou encore LE COURANT DE BASE en connaissant LE COURANT ET LA TENSION COLLECTEUR.

Prenons un autre exemple, en cherchant la tension collecteur nécessaire pour obtenir un courant collecteur de 2,8 mA, avec un courant de base de  $50 \mu A$ .

Il faut tout d'abord rechercher sur l'axe vertical, le point qui correspond au courant collecteur de 2,8 mA.

A partir de ce point, on trace une droite horizontale jusqu'à ce qu'elle rencontre au point B, la caractéristique ayant comme paramètre les  $50 \mu A$  du courant de base.

A partir du point B, on trace une droite verticale, comme indiqué figure 4. On constate alors que la tension à appliquer entre collecteur et émetteur est de 4,5 V.

Parmi les exemples choisis, nous avons vu que la lecture du courant de base ne représente pas de difficultés, dans la mesure où les points de travail considérés se trouvent toujours sur une caractéristique, dont le paramètre donne immédiatement la valeur du courant.

Il peut cependant arriver que le point de travail se trouve entre deux caractéristiques. Dans ce cas, le calcul est un peu plus compliqué, comme nous le montre l'exemple suivant.

Supposons que l'on ait à chercher le courant de base nécessaire pour obtenir un courant collecteur de 4,5 mA, lorsque le transistor est alimenté avec une tension collecteur de 6,3 V.

Il faut avant tout rechercher sur l'axe horizontal, le point qui correspond à la tension collecteur de 6,3 V, point à partir duquel on commence par tracer une droite verticale (figure 4).

On cherche ensuite sur l'axe vertical, le point correspondant au courant collecteur de 4,5 mA et on trace à partir de ce point une droite horizontale jusqu'à ce qu'elle rencontre au point C la droite verticale tracée précédemment.

Comme le montre la figure 4, le point de travail C se trouve entre les caractéristiques relatives aux courants de base de  $70 \mu A$  et de  $80 \mu A$  : il n'indique donc pas avec précision la valeur du courant de base désiré.

Pour l'instant, il est seulement possible de savoir que ce courant est supérieur à  $70 \mu A$ .

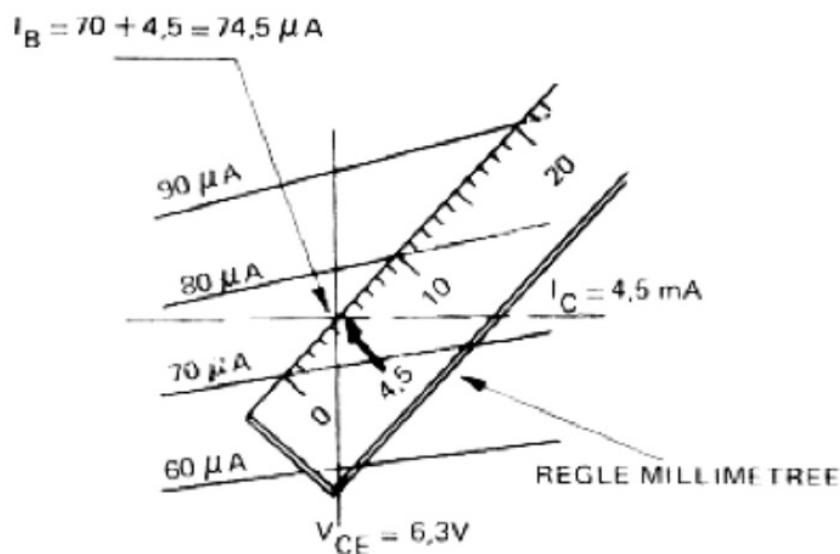
Pour connaître la différence, il faut procéder à une opération dite INTERPOLATION, que l'on effectue comme indiqué figure 5, reproduisant un agrandissement de la partie de la figure 4, correspondant au point C.

On utilise une règle millimétrée, que l'on place sur le diagramme, en l'inclinant de manière à ce que sa graduation 0, se trouve sur la caractéristique correspondant à  $70 \mu A$  et que sa graduation 10 se trouve sur la caractéristique relative à  $80 \mu A$ , en veillant bien à ce que le bord de la règle passe par le point C.

On lit alors sur la règle, le nombre correspondant au point C c'est-à-dire 4,5, comme on le voit figure 5.

La différence recherchée et à ajouter au  $70 \mu A$  est de 4,5. Le courant de base est donc de  $74,5 \mu A$ .

Jusqu'ici, nous avons pu déterminer facilement le point de travail d'après les caractéristiques, car on a toujours supposé que l'on connaissait au moins deux des trois grandeurs qui définissent les conditions de fonctionnement d'un transistor.



#### EXEMPLE D'INTERPOLATION

Figure 5

Dans de nombreux cas, le processus n'est pas aussi immédiat. En effet, le transistor n'est jamais relié directement au circuit.

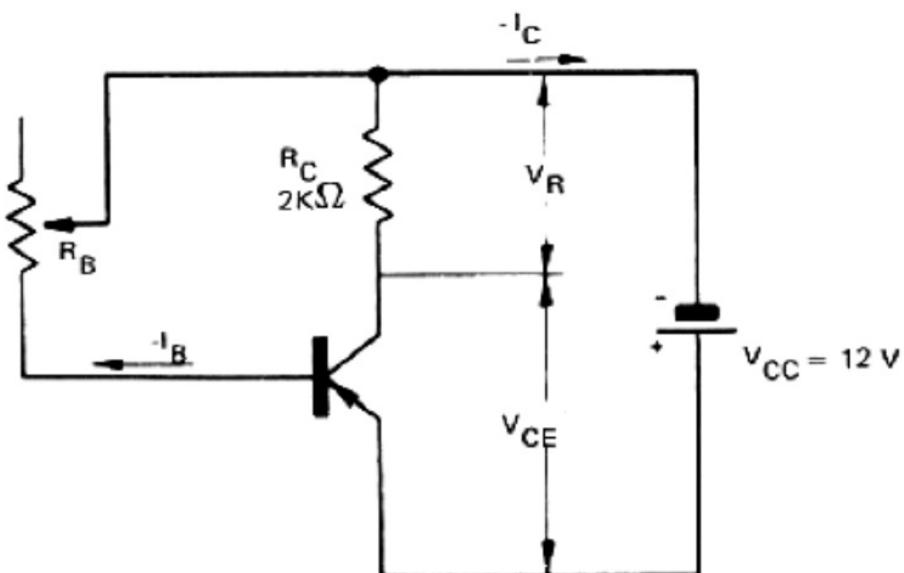
On place une résistance dans le circuit collecteur appelée RESISTANCE DE COLLECTEUR ou encore RESISTANCE DE CHARGE.

Le circuit d'alimentation du transistor se présente alors comme indiqué figure 6. L'alimentation est obtenue à partir d'une seule batterie, fournissant une tension de ( $V_{CC} = 12$  V).

Le collecteur est relié au négatif de la batterie par l'intermédiaire de la résistance de charge  $R_C$ , d'une valeur de  $2\text{ k}\Omega$ .

La base est également reliée au même pôle (négatif) par l'intermédiaire de la résistance ajustable  $R_B$ , permettant d'agir sur le courant de base.

Comme l'indique cette figure, la tension fournie par la batterie se partage entre la résistance  $R_C$  (tension  $V_R$ ) et le transistor (tension  $-V_{CE}$ ).



TRANSISTOR AVEC RESISTANCE DE CHARGE

Figure 6

Dans ce cas donc, on ne connaît pas la tension  $-V_{CE}$  présente entre le collecteur et l'émetteur, ni celle du courant collecteur  $-I_C$ . Le problème se présente donc en ces termes :

Connaissant la tension  $V_{CC}$  fournie par la batterie et la valeur de la résistance  $R_C$ , TROUVEZ la tension et le courant collecteur pour un courant de base donné.

Commençons par supposer que le courant collecteur est de 1 mA. En traversant la résistance  $R_C$ , ce courant produit une chute de tension de  $1 \text{ mA} \times 2 \text{ k}\Omega = 2 \text{ V}$ .

Par conséquent, il est possible de trouver la tension collecteur ( $-V_{CE}$ ) en soustrayant la tension  $V_R$  (2 V) de la tension  $V_{CC}$  (12 V). Celle-ci est alors de 10 V.

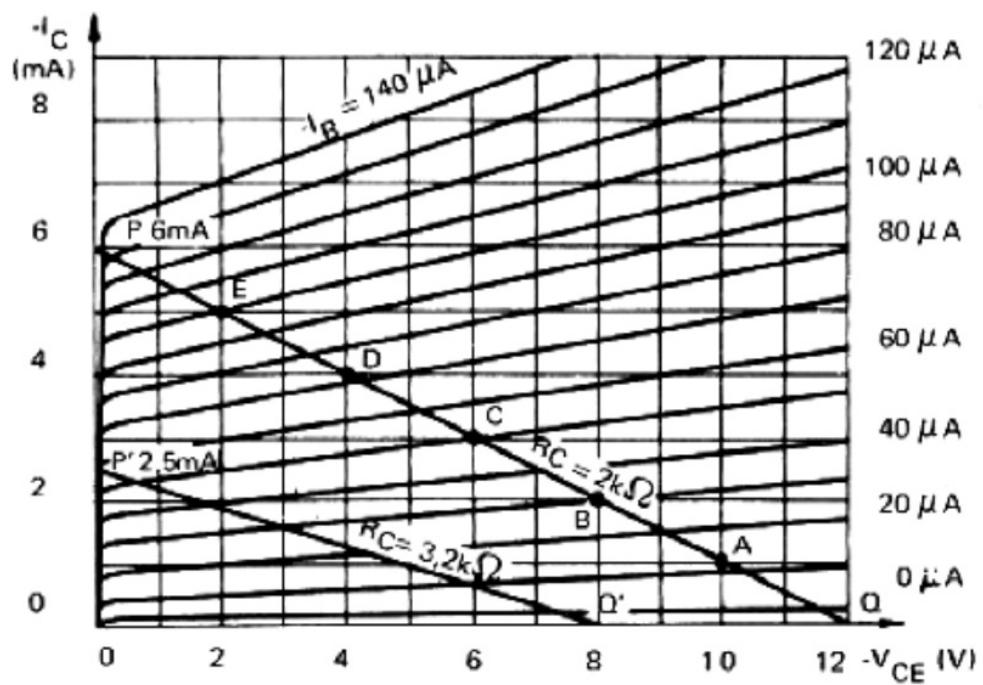
En supposant ensuite que le courant collecteur prenne des valeurs de 2, 3, 4 et 5 mA, la chute de tension aux bornes de  $R_C$  augmente respectivement jusqu'à 4, 6, 8, 10 V et par conséquent, la tension  $-V_{CE}$  se réduit à 8, 6, 4, 2 V.

On obtient ainsi cinq couples de valeurs du courant et de la tension collecteur, grâce auxquelles il est possible de reporter autant de points de travail sur les caractéristiques, comme le montre la figure 7.

Les points sont repérés par les lettres A, B, C, D, E.

On remarque immédiatement que tous ces points sont parfaitement alignés et qu'il est possible de les réunir par une ligne droite, dite DROITE DE CHARGE.

Comme l'indique cette même figure 7, on a prolongé cette droite jusqu'à ce qu'elle rencontre aux points P et Q, les deux axes du diagramme.



DROITES DE CHARGE

Figure 7

Il est intéressant de remarquer qu'au point Q correspond la tension de 12 V reportée sur l'axe horizontal, c'est-à-dire justement la tension fournie par la batterie qui alimente le circuit de la figure 6.

On peut aussi remarquer qu'au point P, correspond la valeur de 6 mA du courant collecteur, valeur obtenue en divisant la tension de la batterie (12 V) par la résistance de charge (2 kΩ) ; en effet :

$$\frac{12 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA}$$

Etant donné que pour tracer la droite de charge il suffit de connaître deux de ces points, il est très facile de trouver les points P et Q.

Voyons par exemple comment procéder pour tracer la droite de charge dans le cas où la résistance de collecteur a une valeur de  $3,2 \text{ k}\Omega$ , avec une tension d'alimentation de 8 V.

L'un des deux points se trouve sur l'axe horizontal, correspondant aux 8 V de la tension. Ce point est repéré par Q dans la figure 7.

Pour trouver l'autre point, il suffit de diviser 8 V par  $3,2 \text{ k}\Omega$  de la résistance de charge et l'on obtient :

$$\frac{8V}{3,2 \text{ k}\Omega} = 2,5 \text{ mA}$$

Le second point repéré dans la figure 7 par P', se trouve donc sur l'axe vertical, en face des 2,5 mA du courant collecteur.

En réunissant ces deux points à l'aide d'une droite, on obtient la droite de charge relative à la résistance de collecteur de  $3,2 \text{ k}\Omega$ .

Ces exemples démontrent donc que la position de la droite de charge sur le graphique, dépend de la tension d'alimentation que définit le point Q et de la résistance de charge que définit le point P, en même temps que la valeur de la tension d'alimentation.

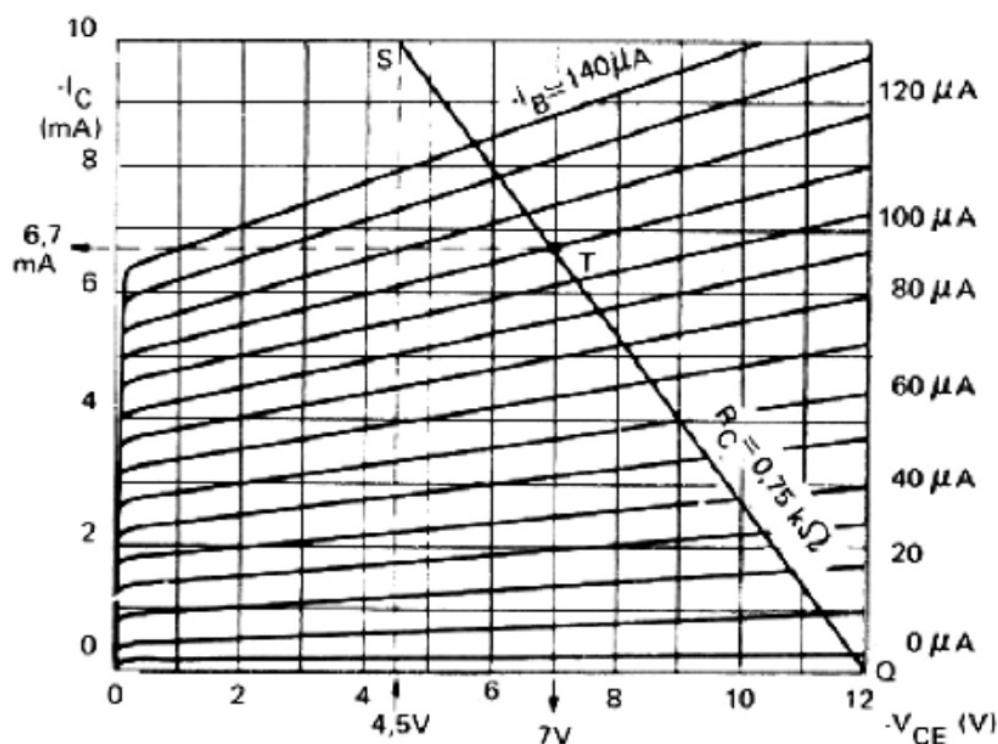
Il peut également arriver qu'il soit impossible de marquer le point P sur l'axe vertical, lorsque le courant correspondant à ce point est supérieur à la valeur maximum du courant reporté sur l'axe.

Supposons par exemple que la résistance de charge ait une valeur de  $0,75 \text{ k}\Omega$  et que la tension d'alimentation corresponde à 12 V.

La figure 8 montre que le point Q correspond encore à la valeur de 12 V, marquée sur l'axe horizontal. Pour déterminer le point P, DIVISONS cette tension par la valeur de la résistance de charge, c'est-à-dire :

$$\frac{12 \text{ V}}{0,75 \text{ k}\Omega} = 16 \text{ mA}$$

Il est évidemment impossible de porter cette valeur sur l'axe vertical, car le courant indiqué arrive seulement à la valeur maximum de 10 mA.



DROITE DE CHARGE ET SON UTILISATION

Figure 8

Dans un tel cas, il faut multiplier ce courant (10 mA) par la valeur de la résistance de charge (0,75 k $\Omega$ ), après quoi, on soustrait la tension ainsi obtenue :

$$(10 \text{ mA} \times 0,75 \text{ k}\Omega = 7,5 \text{ V})$$

à la tension d'alimentation (12 - 7,5 = 4,5 V).

On cherche ensuite sur l'axe horizontal le point correspondant à la valeur de 4,5 V ainsi déterminée et on trace à partir de ce point une droite verticale qui doit rencontrer au point S, la droite horizontale tracée à partir du point correspondant au 10 mA du courant collecteur comme indiqué figure 8.

En réunissant les points S et Q, on obtient la droite de charge correspondant à la résistance de collecteur de 0,75 k $\Omega$ , comme le montre la figure 8.

Après avoir tracé la droite de charge, il nous reste à trouver les conditions de fonctionnement du transistor, c'est-à-dire les valeurs prises par la tension et le courant collecteur, pour un courant de base déterminé.

Pour trouver ces conditions de fonctionnement, considérons la droite de charge de la figure 8 avec un courant de base de 110  $\mu$ A.

Le point T de la figure 8, marque la rencontre de la droite de charge avec la caractéristique relative à la valeur de 110  $\mu$ A du courant de base.

En regard de ce point, on lit sur les axes une tension collecteur de 7 V et un courant collecteur de 6,7 mA.

Il est toutefois nécessaire de signaler que toutes les considérations faites jusqu'ici quant aux caractéristiques et à leur emploi, SONT

**VALABLES SEULEMENT POUR UNE TEMPERATURE DONNÉE.** En effet, si la température à laquelle se trouve le transistor varie, les caractéristiques varient également.

Nous allons voir justement quels sont les effets de la température sur les caractéristiques des transistors.

### III - VALEURS LIMITES

D'après ce que nous avons vu précédemment, il semble que le point de travail d'un transistor puisse être choisi librement d'après les caractéristiques de sortie, dans la mesure où l'on n'a parlé d'aucune limite.

En réalité, il faut savoir que chaque transistor présente certaines limites dans ses performances, dépendant directement du type, des dimensions et de la structure interne du transistor lui-même.

Il est évident qu'un transistor de faibles dimensions ne peut fournir la même puissance qu'un transistor de plus grandes dimensions, étant donné que le premier fonctionnera avec des courants et des tensions bien inférieures au second.

Pour cette raison, les constructeurs fournissent pour chaque type de transistor, **DES VALEURS LIMITES QUI NE DOIVENT ABSOLUMENT PAS ÊTRE DÉPASSEES** dans les conditions normales de fonctionnement et ceci, pour éviter la détérioration pure et simple du transistor ou encore qu'il ne fonctionne de façon incorrecte.

Les limites normalement indiquées sont les suivantes :

- COURANT MAXIMUM DE COLLECTEUR  $I_C$  max
- TENSION MAXIMUM DE COLLECTEUR  $V_{CE}$  max
- PUSSANCE MAXIMUM DE COLLECTEUR  $P_C$  max
- TEMPERATURE MAXIMUM DE LA JONCTION  $T_J$  max

Certains constructeurs prévoient en plus de ces indications, celles qui sont relatives à la base et à l'émetteur.

A titre d'exemple, voici les valeurs limites fournies par un constructeur, pour un transistor de faible puissance.

$$\begin{array}{ll} I_C \text{ max} = 10 \text{ mA} & P_C \text{ max} = 75 \text{ mW} \\ V_{CE} \text{ max} = 30 \text{ v} & T_J = 75^\circ\text{C} \end{array}$$

Signalons que ces valeurs ne doivent absolument pas être dépassées, de façon à assurer le fonctionnement normal du transistor.

Le point de travail doit donc être choisi de telle sorte qu'aucune des trois valeurs (courant, tension et puissance dissipée) ne soit supérieure à la limite tolérée.

Afin d'examiner quelles sont les causes qui limitent les grandeurs énumérées, considérons séparément ces différentes limites. Voyons également de quels critères dépendent les valeurs maximum admissibles.

### III - 1 - VALEUR MAXIMUM DU COURANT COLLECTEUR

La valeur maximum du courant collecteur pouvant être admise pour un type de transistor donné, est déterminée par le fonctionnement correct du transistor.

En fait, le coefficient d'amplification diminue lorsque le courant collecteur augmente et descent rapidement à des valeurs plus basses que la normale.

Pour que le transistor travaille avec un coefficient d'amplification à peine réduit, il faut donc limiter le courant collecteur.

La figure 9 donne les caractéristiques de sortie du transistor étudié. On voit ici une ligne horizontale tracée en pointillé, passant par le point de l'échelle verticale, correspondant à la valeur maximum du courant collecteur de 10 mA.

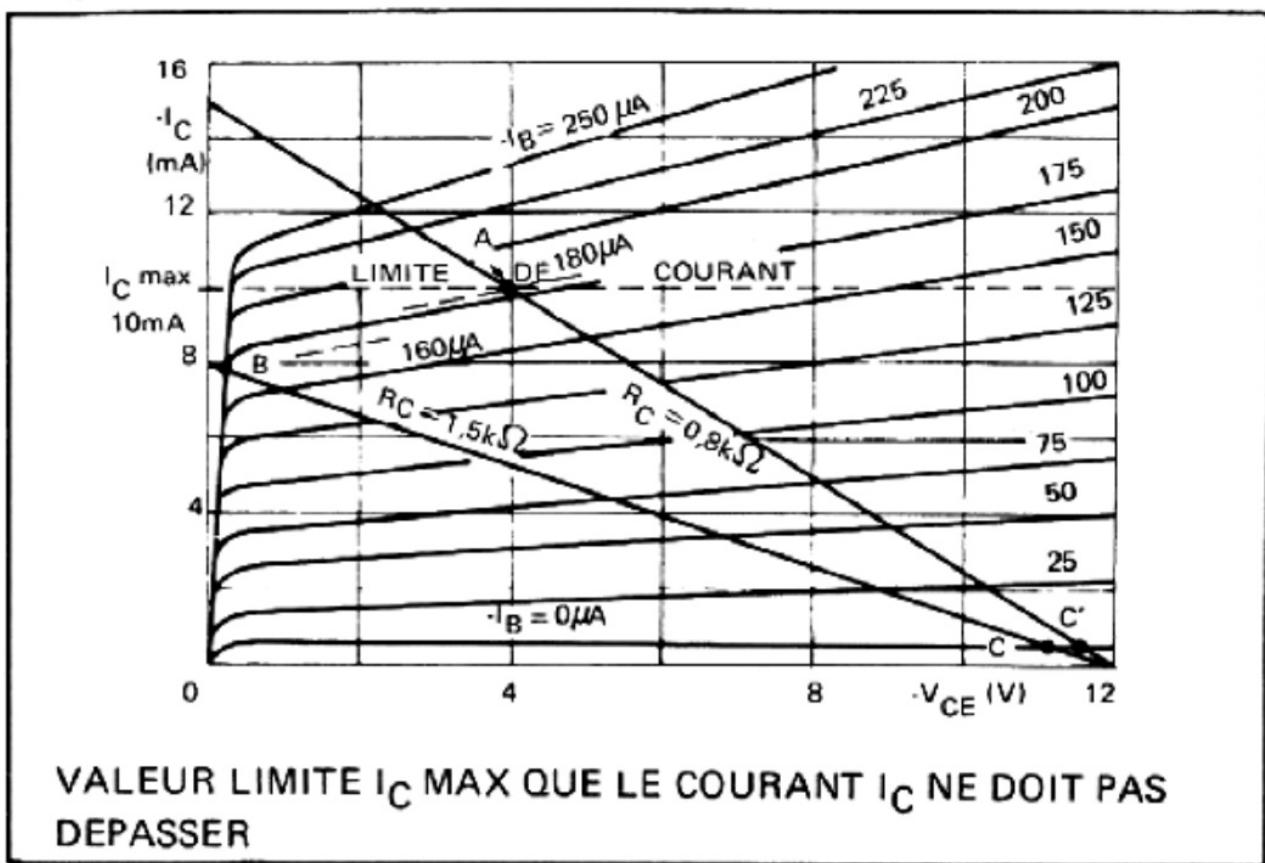


Figure 9

Le point de travail doit donc être choisi de manière à ce qu'il soit au dessus de cette ligne et jamais au dessous.

Si le transistor travaille avec une résistance de charge  $R_C$  en série avec le collecteur, on peut considérer deux cas, selon que la droite de charge coupe ou non la droite horizontale correspondant à la limite du courant collecteur.

Supposons que le transistor soit alimenté avec une tension de 12 V, à travers une résistance de charge de 0,8 k $\Omega$ .

La droite de charge (passant par le point 12 V de l'axe horizontal et par le point :

$$\frac{12 \text{ V}}{0,8 \text{ k}\Omega} = 15 \text{ mA}$$

de l'axe vertical) doit couper la droite horizontale correspondant à la limite du courant collecteur au point indiqué par A dans la figure 9.

Le point de travail, devant nécessairement être sur cette droite de charge, ne devra donc pas tomber au delà du point A.

Cela signifie que le courant de polarisation de base peut se trouver au maximum de la valeur correspondant à la caractéristique passant par le point A, c'est-à-dire 180  $\mu$ A.

Nous avons donc vu qu'après avoir défini la valeur de la résistance de charge, la limite du courant collecteur entraîne une limite du courant de base.

Supposons maintenant que l'on augmente la valeur de la résistance de charge, en lui donnant par exemple une valeur de 1,5 k $\Omega$ . La droite de charge (passant par le point 12 V de l'axe horizontal et par le point :

$$\frac{12 \text{ V}}{1,5 \text{ k}\Omega} = 8 \text{ mA}$$

de l'axe vertical) ne doit plus couper la droite horizontale correspondant à la limite du courant collecteur.

Dans ce cas, si l'on augmente progressivement le courant de base, le point de travail se déplace et rejoint le point B, lorsque  $I_C$  a atteint la valeur de  $160 \mu A$  environ.

En augmentant encore le courant de base, le point de travail ne peut aller au delà du point B, car les caractéristiques correspondant à des valeurs de  $I_B$  supérieures à  $160 \mu A$  environ, rencontrent toutes la droite de charge considérée à ce même point B. Le courant collecteur a donc atteint son point de saturation.

Lorsque la droite de charge ne coupe pas la droite horizontale correspondant à la valeur limite du courant collecteur, il n'y a pas à tenir compte de la valeur maximum de  $I_C$  max.

Celle-ci en effet n'a aucune chance d'être atteinte et encore moins d'être dépassée.

Si au contraire on diminue le courant de base, le point de travail se déplace vers le bas de la droite de charge et rejoint au maximum le point C, lorsque  $I_C$  est réduit à zéro.

On peut donc conclure en disant que :

a) Lorsque la droite de charge coupe la droite horizontale représentant la limite maximum du courant collecteur, le point de travail ne doit pas être placé au delà du point A (figure 9) tandis qu'il ne peut descendre au dessous du point C'.

b) Lorsque la droite de charge ne coupe pas la droite correspondant à  $I_C$  max, le déplacement du point de travail est automatiquement limité vers le haut (point B) et vers le bas (point C).

### III - 2 - VALEUR MAXIMUM DE LA TENSION COLLECTEUR

En étudiant la diode à jonction, nous avons vu comment vérifier l'effet zener, en appliquant à la jonction une tension inverse suffisamment élevée.

Le même phénomène se manifeste aussi pour les transistors, dans la mesure où la jonction collecteur base se comporte de la même façon qu'une diode polarisée en sens inverse.

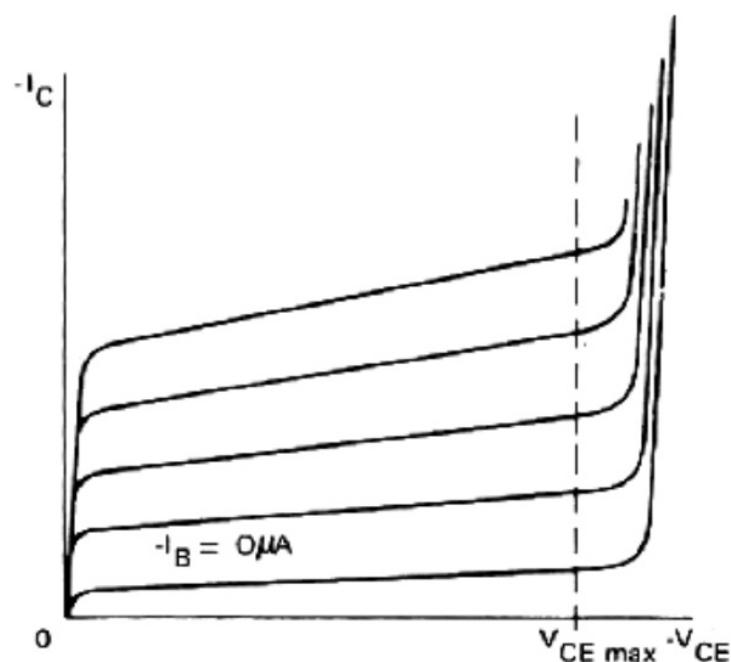
Si, en traçant les caractéristiques de collecteur ou de sortie, on continue à augmenter la tension collecteur, on remarque qu'à un certain point le courant  $I_C$  commence à monter rapidement, raison pour laquelle les courbes caractéristiques sont brusquement inversées vers le haut, comme le montre clairement la figure 10.

Cette courbure n'est pas spéciale aux caractéristiques du branchement à EMETTEUR COMMUN, mais elle est également valable dans le cas du branchement A BASE COMMUNE.

Dans ces deux cas, il faut donc ne pas dépasser une certaine valeur maximum de la tension appliquée au collecteur du transistor, afin d'éviter de le faire travailler dans la ZONE DE COURBURE DES CARACTERISTIQUES. Sans cette précaution, le transistor travaillerait de façon incorrecte et risquerait même de se détériorer.

Selon le type de transistor choisi, la tension maximum de collecteur peut varier de 10 à 40 V. Seuls les types au silicium peuvent supporter des tensions de l'ordre d'une centaine de volts.

La figure 10 montre également que la tension maximum  $V_{CE}$  max délimite (dans la partie droite au moyen d'une ligne pointillé) la zone dans laquelle on peut fixer le point de travail. Ce dernier doit en effet être situé à gauche de la ligne verticale, tracée en face de la valeur  $V_{CE}$  max.



COURBURE DES CARACTERISTIQUES DE COLLECTEUR  
POUR UNE TENSION EXCESSIVE

Figure 10

### III - 3 - VALEUR MAXIMUM DE LA PUISSANCE DE DISSIPATION DU COLLECTEUR

On repère le point de travail sur les caractéristiques de collecteur à partir d'une valeur de tension  $V_{CE}$  et d'une valeur de courant  $I_C$ , lues respectivement sur les échelles horizontale et verticale.

CELLES-CI EXPRIMENT LA TENSION PRÉSENTE ENTRE LE COLLECTEUR ET L'EMETTEUR ET LE COURANT ABSORBE PAR LE TRANSISTOR. LE PRODUIT DE CES VALEURS N'EST AUTRE

## QUE LA PUISSANCE FOURNIE AU TRANSISTOR PAR LE CIRCUIT D'ALIMENTATION DU COLLECTEUR.

Généralement, cette puissance est indiquée par le symbole  $P_c$  et sa valeur, donnée par le produit :

$$P_c = V_{CE} \times I_c$$

est exprimée en mW, seulement lorsque la tension collecteur est donnée en volts et le courant en mA.

Comme n'importe quelle résistance, un transistor chauffe lorsqu'il est parcouru par un courant. En effet, l'énergie électrique correspondant à la puissance  $P_c$  est transformée par effet joule en ENERGIE THERMIQUE.

A cause d'un tel réchauffement, la température intérieure du transistor ou plus précisément, la température de la jonction collecteur base atteint une valeur plus élevée que la température ambiante dans laquelle se trouve le transistor.

Ainsi, PLUS LA PUISSANCE  $P_c$  DISSIPE SUR LE COLLECTEUR EST GRANDE, PLUS L'AUGMENTATION DE TEMPERATURE DE LA JONCTION EST ELEVEE.

On comprend facilement qu'il est nécessaire de mettre une limite à  $P_c$ , si l'on veut maintenir la température de la jonction entre certaines limites, non dangereuses pour le transistor.

On peut calculer l'augmentation de température de la jonction avec la formule suivante :

$$T'_j = K \times P_c$$

dans laquelle  $T'_j$  indique l'augmentation de température en degré C,  $P_C$  la puissance dissipée par le collecteur en mW et K, le coefficient appelé **RESISTANCE THERMIQUE DU TRANSISTOR**.

La valeur de K est donnée en degré C/mW pour les transistors de faible puissance, tandis qu'elle est donnée en degré C/W pour les transistors de puissance élevée. La valeur de K dépend donc du type de transistor et indique également de combien de degrés la température de la jonction augmente pour chaque milliwatt ou watt de puissance dissipé sur le collecteur.

Dans le cas du transistor étudié précédemment, nous avons :

$$K = 0,4^{\circ}\text{C}/\text{mW}$$

Si le transistor travaille avec une tension  $V_{CE} = 5\text{ V}$  et avec un courant  $I_C = 3\text{ mA}$ , la puissance  $P_C$  sera de :

$$5\text{ V} \times 3\text{ mA} = 15\text{ mW}$$

et l'augmentation de température de sa jonction sera de :

$$0,4 \times 15 = 6^{\circ}\text{C}$$

La température  $T_j$ , à laquelle sera portée la jonction est donnée par la somme de la température  $T_a$  (température de l'atmosphère dans laquelle se trouve le transistor) et de l'augmentation  $T'_j$  de la température de la jonction due à la puissance  $P_C$ . On obtient donc :

$$T_j = T_a + T'_j$$

Ainsi, en nous référant à notre précédent exemple, nous obtenons pour une température ambiante de  $25^{\circ}$  :

$$T_j = 25 + 6 = 31^{\circ}\text{C}$$

Si la température ambiante est de  $50^{\circ}\text{C}$  on obtient :

$$T_j = 50 + 6 = 56^{\circ}\text{C}$$

Une température ambiante de  $50^{\circ}\text{C}$  peut paraître exagérée mais il ne faut pas oublier que certains transistors fonctionnent à proximité d'éléments dégageant beaucoup de chaleur (résistances ou transistors de plus forte puissance).

La température de la jonction ne doit donc pas excéder un certain maximum ( $75^{\circ}$  pour les transistors au germanium et  $150^{\circ}\text{C}$  pour les silicium).

DONC, LA TEMPERATURE DE LA JONCTION DEPEND NON SEULEMENT DE L'AUGMENTATION DE TEMPERATURE DUE A LA PUISSANCE  $P$ , MAIS AUSSI DE LA TEMPERATURE AMBIANTE.

On en déduit que la puissance maximum  $P_C$  max de collecteur admissible pour un transistor donné, dépend non seulement du type de transistor, mais aussi de la température du milieu dans lequel ce dernier travaille.

Pour cette raison, les catalogues de transistors mentionnent toujours en plus de la valeur de  $P_C$  max, la température ambiante à laquelle elle se réfère.

Ainsi, pour le transistor de notre exemple, la valeur de  $P_C$  max = 75 mW est donnée pour  $T_a = 45^{\circ}\text{C}$ .

Les catalogues indiquent également les valeurs de  $K$  et de  $T_j$  max, renseignant sur la valeur de la résistance thermique et la température maximum admissible par la jonction.

Avec ces indications, il est possible de connaître la valeur de  $P_C$  max pour la température ambiante considérée en utilisant la formule :

$$P_{C \text{ max}} = \frac{T_{j \text{ max}} - T_a}{K}$$

Voyons maintenant comment la valeur de  $P_C$  max intervient pour limiter la zone des caractéristiques de collecteur du transistor, à l'intérieur de laquelle il est possible de fixer le point de travail.

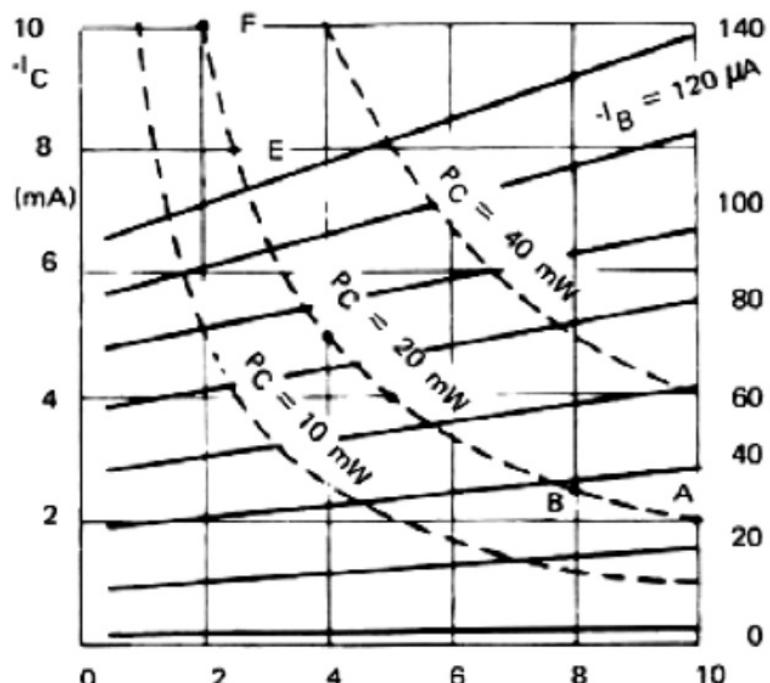
En rappelant que la puissance collecteur  $P_C$  est égale au produit de la tension  $V_{CE}$  par le courant  $I_C$ , on s'aperçoit que l'on aura sur les caractéristiques de collecteur autant de points de travail que l'on désire, pour lesquels  $P_C$  prend une valeur donnée.

Ces points sont en effet déterminés par les couples de valeurs de  $V_{CE}$  et  $I_C$  qui, multipliés entre eux, donnent la valeur choisie de  $P_C$ .

En choisissant par exemple  $P_C = 20 \text{ mW}$ , on peut avoir sur les caractéristiques du transistor, les points de travail donnés dans le tableau suivant :

Points de travail	$V_{CE}$	$I_C$	$P_C = V_{CE} \times I_C$
A	10 V	2 mA	$10 \times 2 = 20 \text{ mW}$
B	8 V	2,5 mA	$8 \times 2,5 = 20 \text{ mW}$
C	5 V	4 mA	$5 \times 4 = 20 \text{ mW}$
D	4 V	5 mA	$4 \times 5 = 20 \text{ mW}$
E	2,5 V	8 mA	$2,5 \times 8 = 20 \text{ mW}$
F	2 V	10 mA	$2 \times 10 = 20 \text{ mW}$

En reportant ces points de travail sur les caractéristiques de la figure 11 on obtient, en les reliant par une ligne, une courbe dite à PUISSANCE CONSTANTE.



COURBES A PUISSANCE CONSTANTE DISSIPEE SUR LE COLLECTEUR

Figure 11

En effet, pour tous les points de travail qui tombent sous cette courbe, la puissance dissipée par le collecteur prend toujours la même valeur de 20 mW. De la même façon, il est également possible de tracer d'autres courbes à puissance constante, correspondant à d'autres valeurs de  $P_C$ .

A titre d'exemple, on a également tracé figure 11, les courbes correspondant à 10 mW et à 40 mW. On remarque qu'en augmentant la

valeur de  $P_C$ , la courbe correspondante s'éloigne de l'origine des axes, c'est-à-dire qu'elle se déplace vers le haut et vers la droite (figure 11).

En d'autres termes, cela signifie que pour tous les points de travail placés dans la zone comprise entre les deux axes et une courbe à puissance constante donnée, LA PUISSANCE DISSIPÉE SUR LE COLLECTEUR EST INFÉRIEURE A CELLE QUI CORRESPOND A CETTE MÊME COURBE.

La figure 12, montre les caractéristiques relatives au transistor étudié, avec les différentes limites de puissance de dissipation, de tension et de courant maximum du collecteur.

Pour une température ambiante de 25°C nous avons :

$$P_C \text{ max} = 125 \text{ mW}$$

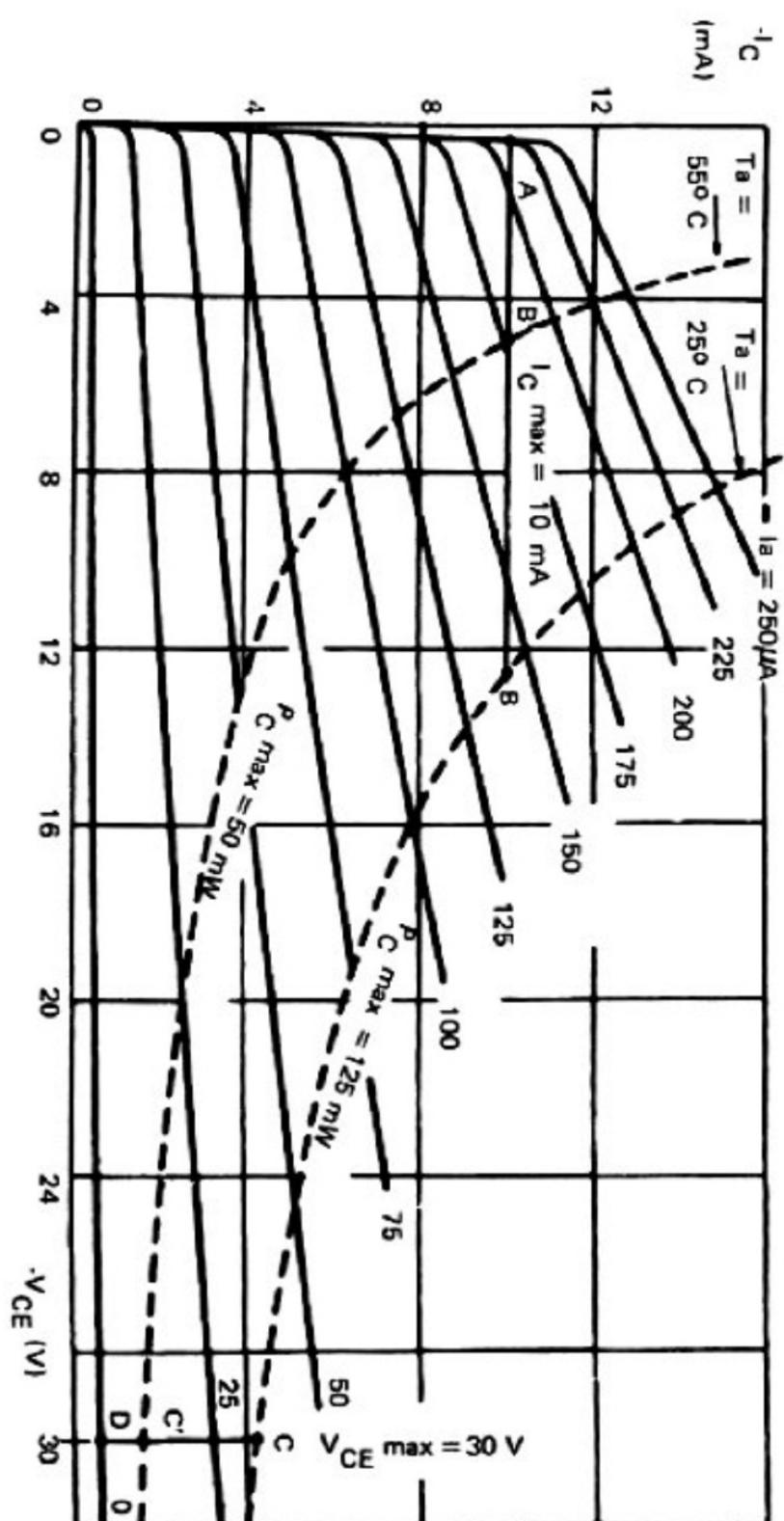
et l'espace utile pour le choix du point de travail est délimité par les points O, A, B, C, D.

Cet espace se réduit à mesure qu'augmente la température ambiante, étant donné la rapide diminution de valeur de  $P_C$  max.

On voit en effet comment pour  $T_a = 55$  °C ( $P_C$  max étant réduit à 50 mW) l'espace s'est rétréci, devant O, A, B, C et D.

La zone des caractéristiques de collecteur à l'intérieur de laquelle doit être choisi le point de travail d'un transistor est ainsi délimitée. De cette façon, les valeurs maximum admises seront respectées pendant le fonctionnement.

Avec la prochaine leçon, nous étudierons LES EFFETS DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES TRANSISTORS. Nous verrons également comment stabiliser un circuit en courant continu.



CARACTÉRISTIQUES DE COLLECTEUR AVEC LES LIMITES DE COURANT, DE TENSION ET DE PUISSANCE DE DISSIPATION DU COLLECTEUR

Figure 12

## NOTIONS A RETENIR

- Pour un TRANSISTOR, on peut tracer DOUZE CARACTERISTIQUES DIFFERENTES et même DOUZE FAMILLES DE CARACTERISTIQUES. Chacune d'elle représente une relation bien définie entre deux tensions et un courant ou encore entre deux courants et une tension du transistor.
- La famille des CARACTERISTIQUES DE SORTIE ET CARACTERISTIQUES MUTUELLES DE TENSION, comprennent toutes les grandeurs fondamentales c'est-à-dire, la TENSION COLLECTEUR ( $-V_{CE}$ ), le COURANT COLLECTEUR ( $-I_C$ ), le COURANT DE BASE ( $-I_B$ ) dont la valeur est indiquée sur chaque caractéristique et enfin la TENSION DE BASE ( $-V_{BE}$ ). Avec ces deux familles de caractéristiques, il est possible de retrouver toutes les autres, au moyen d'opérations graphiques.
- La CARACTERISTIQUE MUTUELLE DE COURANT est construite d'après les valeurs du courant  $-I_C$  (obtenues avec les variations du courant  $-I_B$  et avec une tension collecteur constante ( $-V_{CE}$ )).
- La CARACTERISTIQUE D'ENTREE est construite d'après les valeurs de la tension  $-V_{BE}$ , obtenues lorsqu'il y a variation de  $-I_B$  pour une tension collecteur  $-V_{CE}$  constante.
- Pour utiliser un transistor, il suffit d'appliquer une certaine tension entre le COLLECTEUR ET L'EMETTEUR et de faire circuler un courant donné dans le CIRCUIT DE BASE. On obtient alors un COURANT COLLECTEUR dont la valeur est lue sur les caractéristiques de sortie.

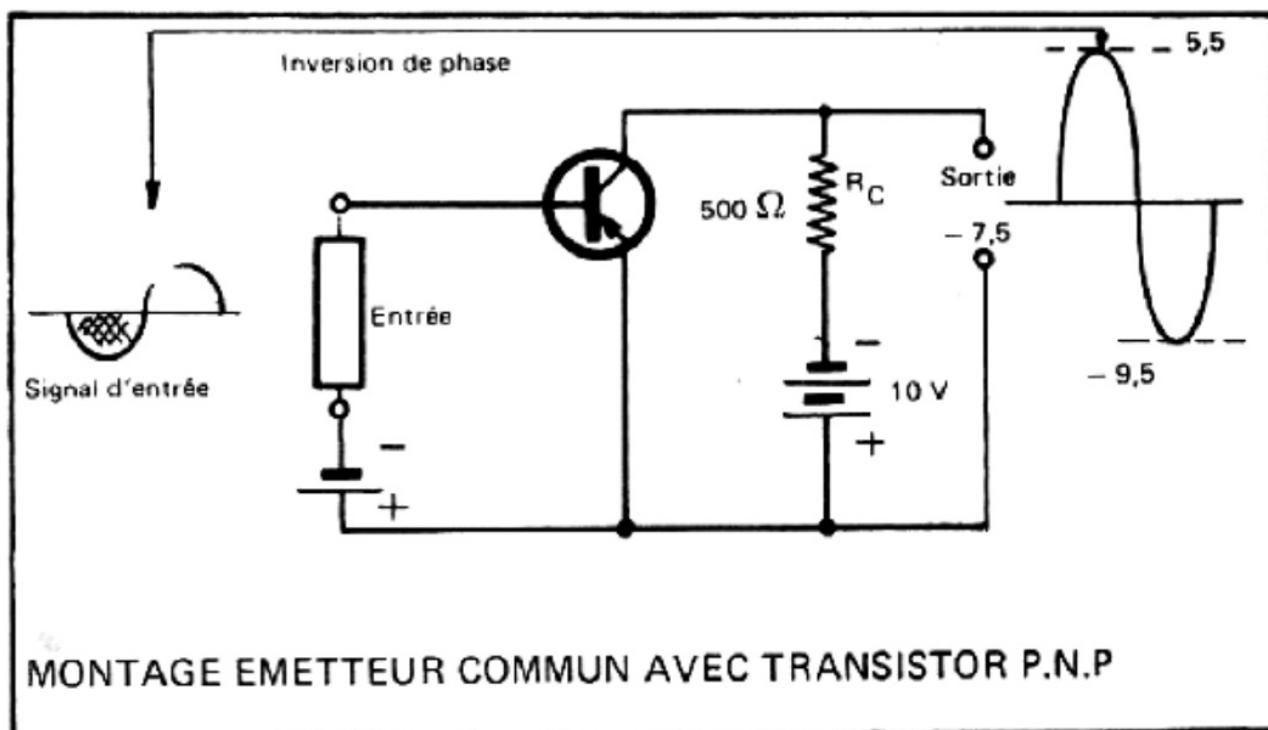
- La VALEUR MAXIMUM DU COURANT COLLECTEUR pouvant être admise pour un type de transistor donné, est déterminée PAR LE FONCTIONNEMENT CORRECT DU TRANSISTOR. En fait, le coefficient d'amplification DIMINUE lorsque le courant collecteur augmente.
- Si en traçant les caractéristiques de collecteur ou de sortie on continue à augmenter la tension collecteur, ON REMARQUE QU'A UN CERTAIN POINT LE COURANT  $I_C$  COMMENCE A MONTER RAPIDEMENT, raison pour laquelle les courbes caractéristiques sont brusquement inversées vers le haut.

Cette courbure n'est pas spéciale aux caractéristiques du branchement A EMETTEUR COMMUN, mais elle est également valable dans le cas du branchement A BASE COMMUNE.

LE REPERAGE DU POINT DE TRAVAIL, s'effectue sur les caractéristiques de collecteur, à partir d'une valeur de tension  $V_{CE}$  et d'une valeur de courant  $I_C$ . lues respectivement sur les échelles horizontale et verticale.

CELLES-CI EXPRIMENT LA TENSION PRÉSENTE ENTRE LE COLLECTEUR ET L'EMETTEUR ET LE COURANT ABSORBE PAR LE TRANSISTOR. LE PRODUIT DE CES VALEURS N'EST AUTRE QUE LA PUISSANCE FOURNIE AU TRANSISTOR PAR LE CIRCUIT D'ALIMENTATION DU COLLECTEUR.

- La formule :  $T'j = K \times P_c$ , permet le calcul de l'augmentation en température de la jonction.  $T'j$  indique l'augmentation de température en degré C,  $P_c$  donne la puissance dissipée par le collecteur en mW et K, exprime un coefficient, plus précisément appelé : RESISTANCE THERMIQUE DU TRANSISTOR. La valeur de K dépend du type de transistor utilisé et indique également de combien de degrés la température de la jonction augmente pour chaque milliwatt ou watt de puissance dissipée sur le collecteur.



- IMPORTANT :** Dans un montage EMETTEUR COMMUN équipé d'un TRANSISTOR P.N.P, une TENSION DE BASE PLUS NEGATIVE provoque une AUGMENTATION du COURANT de COLLECTEUR.  
De ce fait, la CHUTE DE TENSION dans la RESISTANCE DE CHARGE est plus importante avec pour résultat UNE DIMINUTION de la TENSION COLLECTEUR qui devient MOINS NEGATIVE.

La figure ci-dessus permet de bien comprendre l'explication :

La TENSION D'ALIMENTATION est de 10 volts et la RESISTANCE DE CHARGE ( $R_C$ ) de  $500 \Omega$  par exemple.

En condition de repos, c'est-à-dire sans SIGNAL D'ENTREE, le COURANT COLLECTEUR a une valeur de 5 mA (0,005 A) par exemple.

Dans ces conditions, la **TENSION DE COLLECTEUR** est de :

$$10 - (500 \times 0,005) = \boxed{- 7,5 \text{ Volts}}$$

Appliquons maintenant un **SIGNAL D'ENTREE**.

Lors de l'**ALTERNANCE NEGATIVE** de celui-ci, la **BASE** va devenir **PLUS NEGATIVE** par rapport à l'**EMETTEUR**.

De ce fait, le **COURANT DE COLLECTEUR** va passer de 5 mA à 9 mA (0,009 A) par exemple.

La chute de tension dans  $R_C$  va alors avoir pour valeur :

$$U = RI = 500 \times 0,009 = 4,5 \text{ volts}$$

La **TENSION de COLLECTEUR** va donc passer de  $- 7,5 \text{ V}$  à  $10 - 4,5 = \boxed{- 5,5 \text{ Volts}}$

Lors de l'**ALTERNANCE POSITIVE** du signal d'entrée, la **BASE** va devenir **PLUS POSITIVE** par rapport à l'**EMETTEUR**.

De ce fait, le **COURANT DE COLLECTEUR** va passer de 5 mA à 1 mA (0,001 A) par exemple.

La chute de tension dans  $R_C$  va alors avoir pour valeur :

$$U = RI = 500 \times 0,001 = 0,5 \text{ volt}$$

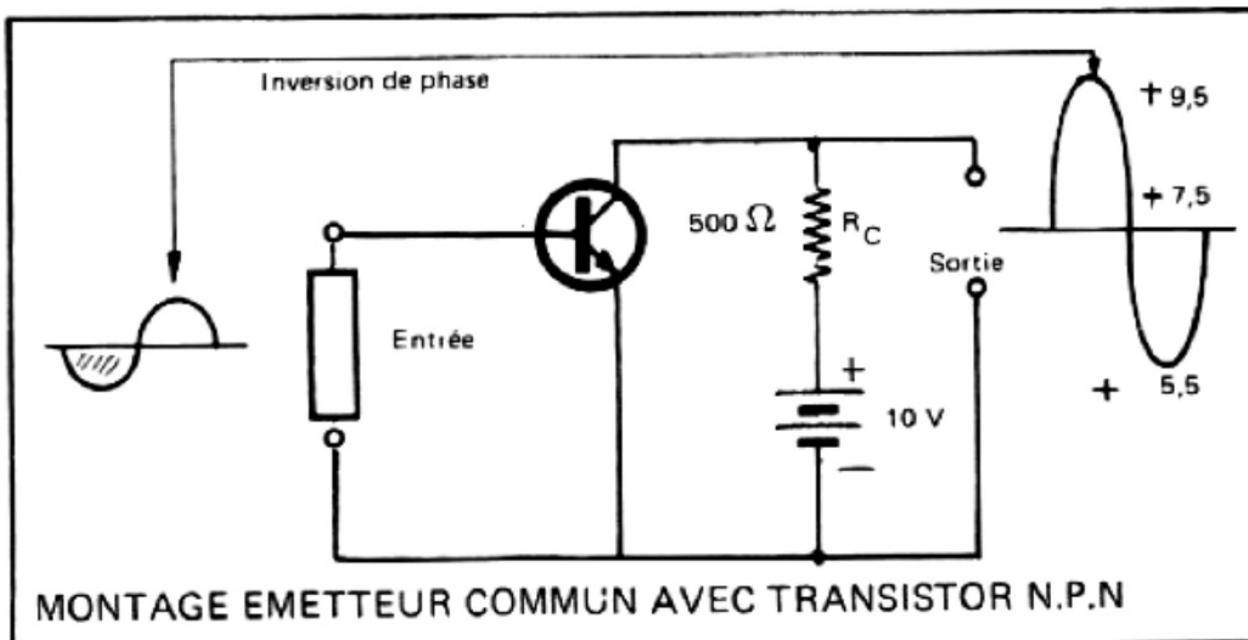
La **TENSION DE COLLECTEUR** va donc passer de  $- 7,5 \text{ V}$  à :

$$10 - 0,5 = \boxed{- 9,5 \text{ volts}}$$

En d'autres termes, dans un montage EMETTEUR COMMUN équipé d'un TRANSISTOR P.N.P, lorsque la BASE devient PLUS NEGATIVE (par rapport à l'émetteur), la TENSION COLLECTEUR CROÎT vers un POTENTIEL MOINS NEGATIF.

**L'AMPLIFICATION se fait donc avec INVERSION DE PHASE**

- Si le montage EMETTEUR COMMUN est équipé d'un TRANSISTOR N.P.N, il y a également INVERSION DE PHASE, mais dans ce cas une TENSION DE BASE PLUS NEGATIVE provoque une DIMINUTION du courant de COLLECTEUR, dont la TENSION CROÎT alors vers un potentiel plus POSITIF.
- Quel que soit le type du montage considéré, le COURANT COLLECTEUR D'UN TRANSISTOR P.N.P. AUGMENTE LORSQUE LA BASE DEVIENT PLUS NEGATIVE.  
Inversement, avec un TRANSISTOR N.P.N, LE COURANT COLLECTEUR DIMINUE LORSQUE LA BASE DEVIENT PLUS NEGATIVE.



Dans le MONTAGE BASE COMMUNE par exemple, le signal d'entrée est appliqué sur l'EMETTEUR. Lors de L'ALTERNANCE NEGATIVE de ce signal, l'EMETTEUR devient plus NEGATIF par rapport à la BASE, ce qui revient à dire que la BASE devient plus POSITIVE par rapport à l'EMETTEUR.

Il en résulte que le MONTAGE BASE COMMUNE NE PROVOQUE PAS D'INVERSION DE PHASE.

Dans le montage COLLECTEUR COMMUN, la TENSION DE SORTIE est prélevée sur l'EMETTEUR et non sur le COLLECTEUR. De ce fait la TENSION DE SORTIE suit dans le même sens les variations de la TENSION D'ENTREE.

Il en résulte que le montage COLLECTEUR COMMUN, NE PROVOQUE PAS D'INVERSION DE PHASE.



**EXERCICE DE REVISION SUR LA LECON  
SEMI-CONDUCTEURS 5**

- 1) Que représentent les caractéristiques de sortie du transistor ?
- 2) A quelle résistance donne-t-on le nom de résistance de charge ?
- 3) De quoi dépend l'inclinaison de la droite de charge ?
- 4) Comment calcule-t-on la puissance dissipée sur le collecteur ?
- 5) Comment varie la puissance maximum dissipée sur le collecteur lorsque la température ambiante varie ?



REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR LA LECON  
SEMI-CONDUCTEURS 4

- 1) On appelle **EFFET TRANSISTOR**, la forte variation du courant de collecteur, résultant d'une faible variation du courant de base.
- 2) Un transistor comporte deux jonctions P.N.
- 3) Le produit littéral  $\alpha I_E$  exprime la partie du courant d'émetteur ( $I_E$ ) qui traverse la base pour entrer dans le circuit du collecteur.
- 4) Il existe trois circuits fondamentaux à transistor : l'amplificateur à émetteur commun, l'amplificateur à base commune et l'amplificateur à collecteur commun.
- 5) Le coefficient d'amplification  $\beta$  (beta) est le nombre que l'on obtient en divisant une variation du courant collecteur (avec tension de collecteur constante) par la variation du courant de base correspondante, toutes deux étant les variations qui se rapportent à un transistor monté en émetteur commun.

