

# — mise au point sur les TRANSISTORS

(Suite voir N° 1473)

## 3. LES TRANSISTORS

### 3.1. Généralités : les gains en courant, tension et puissance

Un **transistor** est une boîte noire à trois électrodes, possédant deux jonctions PN montées en opposition, soit (PN - NP), ou PNP, soit (NP - PN), ou NPN. Une des électrodes par laquelle on injecte des trous, ou des électrons, s'appelle l'**émetteur**, symbolisé par e dans les schémas et dans les formules ; l'autre, médiane, s'appelle la **base**, symbolisée par b, directement connecté au matériau support, ou substrat ; la dernière, sur laquelle on recueille les charges s'appelle le **collecteur**, symbolisé par c (fig. 3-1).

Les transistors PNP et NPN ne se comportent pas de la même manière et nous devons bien apprendre à les différencier pour les employer au mieux de leurs performances (fig. 3-2).

Pourquoi cette dénomination consacrée de transistor ? Ce mot résume, en fait, le phénomène qui rend ce composant si attrayant. Il signifie TRANS(fert) - (de) - résistance, (résis)TOR, (en anglais) : TRANS(fer) - (Résis)TOR

Il permet le **transfert de la résistance d'entrée sur la sortie**, affecté d'un coefficient multiplicateur, ce qui le rend excellent amplificateur de tension (entre autres applications).

Cette opération de transfert d'une faible résistance (500 Ω) en une forte (900.000 Ω) donc avec un gain de 1800 (rapport de 900.000 Ω à 500 Ω) ne nous étonnera pas quand nous saurons que pour l'obtenir il faut et il suffit de polariser la **diode émetteur-base en direct** (conductance élevée) et la **diode base-collecteur en inverse** (conductance faible).

Les schémas de polarisation sont indiqués fig. 3-3.

Les charges libres, ou **porteurs mobiles de courant**, des transistors NPN sont des **électrons**, comme pour les tubes électroniques à vide de la radio-électricité classique. Dans ce cas, les **trous** existent mais en nombre bien inférieur et on les nomme pour cela **porteurs minoritaires**. En revanche, pour les PNP, c'est le contraire qui se passe, les **trous** sont les **porteurs majoritaires** tandis que les **électrons** sont les **porteurs minoritaires**. En ne s'occupant que des charges majoritaires, on constate que le courant d'électrons dans les NPN et dans les PNP suit les flèches, comme indiqué fig. 3-4. Ce courant d'électrons est de sens opposé à celui dit conventionnel du courant électrique (qui, en fait, est celui des trous).

Dans les deux cas, NPN et PNP, le **courant** mesuré sur le **collecteur** est de l'ordre de 5 % **inférieur** à celui de l'**émetteur** :

$$I_c = \frac{95}{100} I_e$$

ou gain en courant

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} = 0,95$$

Les tensions respectives :  
**émetteur-base :**

$$R_{eb} \cdot I_e = V_{eb} = 500 I_e$$

**base-collecteur :**

$$R_{bc} \cdot I_c = V_{bc} = 900\,000 I_c$$

d'où le **gain en tension**  $g_v$  :

$$g_v = \frac{V_{bc}}{V_{eb}} = \frac{R_{bc} \cdot I_c}{R_{eb} \cdot I_e}$$

$$= \alpha \cdot \frac{R_{bc}}{R_{eb}} = 0,95 \cdot \frac{900\,000}{500}$$

ou encore :

$$g_v = \alpha \cdot 1800 = 0,95 \times 1800 = 1710$$

Quel est le **gain en puissance**

$g_p$  :

**émetteur-base :**

$$P_{eb} = V_{eb} \cdot I_e = R_{eb} \cdot I_e^2$$

**base-collecteur :**

$$P_{bc} = V_{bc} \cdot I_c = R_{bc} \cdot I_c^2$$

donc :

$$g_p = \frac{P_{bc}}{P_{eb}} = \frac{I_c^2}{I_e^2} \times \frac{R_{bc}}{R_{eb}}$$

$$= \alpha^2 \cdot \frac{R_{bc}}{R_{eb}} = (0,95)^2 \times 1800$$

d'où :  $g_p = 1624,5$   
ou encore :

$$g_p = \frac{P_{bc}}{P_{eb}} = \frac{V_{bc}}{V_{eb}} \cdot \frac{I_c}{I_e} = g_v \cdot \alpha = 1710 \times 0,95 = 1624,5$$

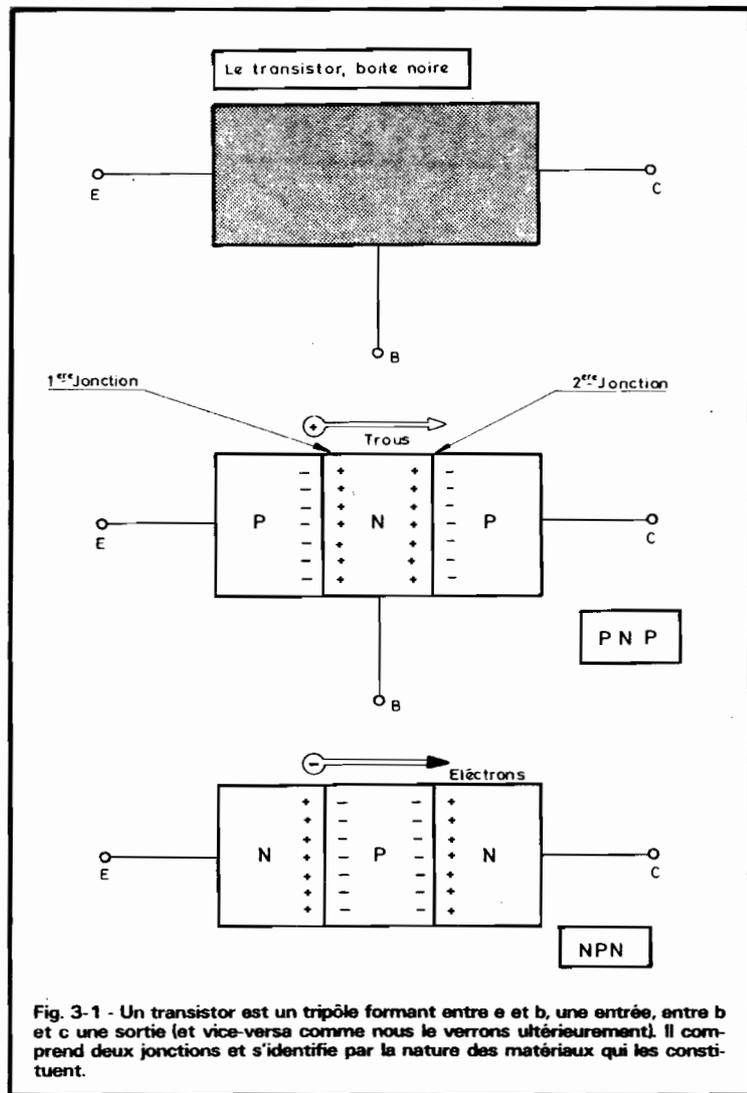


Fig. 3-1 - Un transistor est un tripôle formant entre e et b, une entrée, entre b et c une sortie (et vice-versa comme nous le verrons ultérieurement). Il comprend deux jonctions et s'identifie par la nature des matériaux qui les constituent.

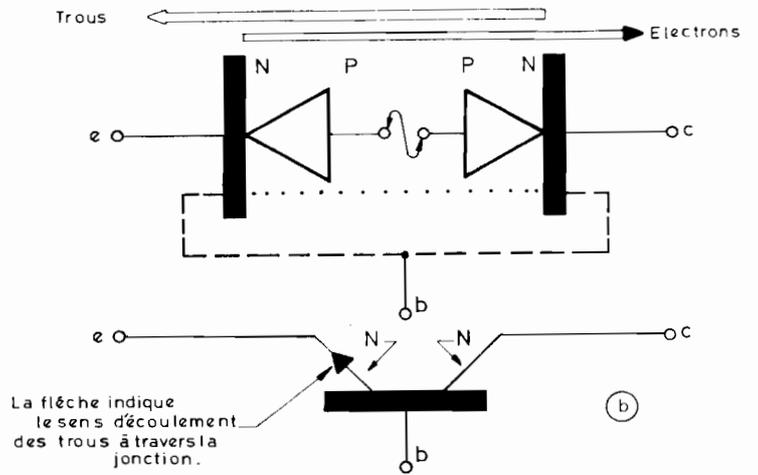
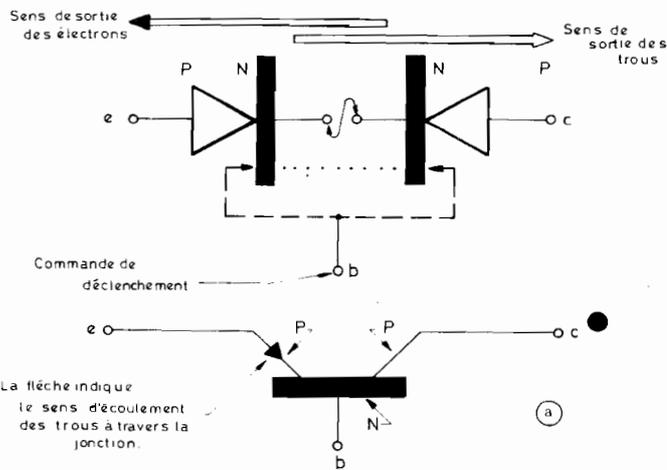


Fig. 3-2 - Deux diodes P-N accolées cathode contre cathode montrent ce qu'est un transistor PNP (a); la flèche sur le collecteur indique le sens de circulation des trous (lacunes d'électrons) qui correspond au sens conventionnel du courant; deux diodes P-N montées anode opposée à anode figurent un transistor NPN (b).

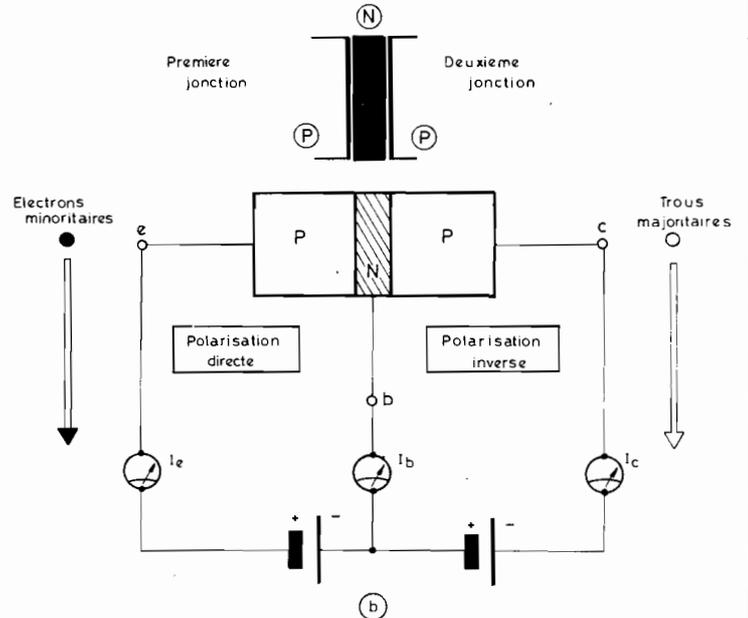
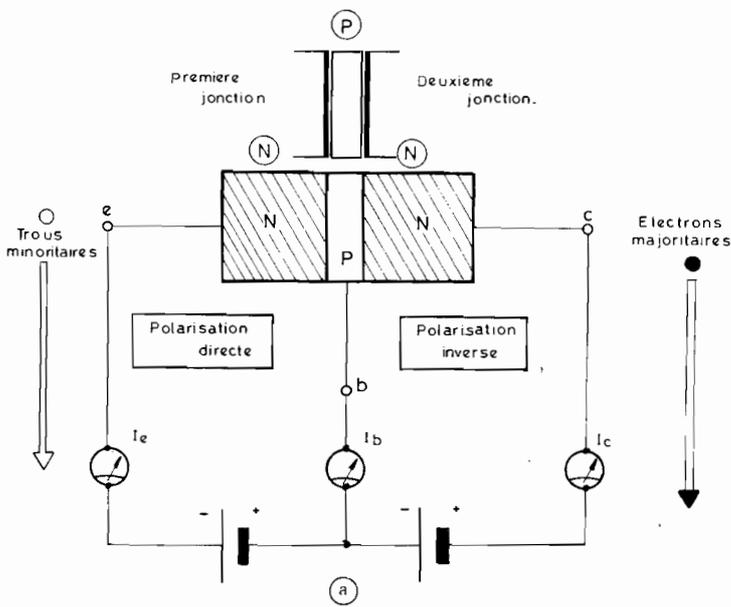


Fig. 3-3 - Pour faire fonctionner un transistor NPN, il faut polariser en direct sa jonction base-émetteur et en inverse sa jonction base-collecteur (a); de même pour un PNP, mais les piles d'alimentation doivent être échangées pôle contre pôle par rapport au montage précédent (a), les positifs sont remplacés par les négatifs et vice-versa (b).

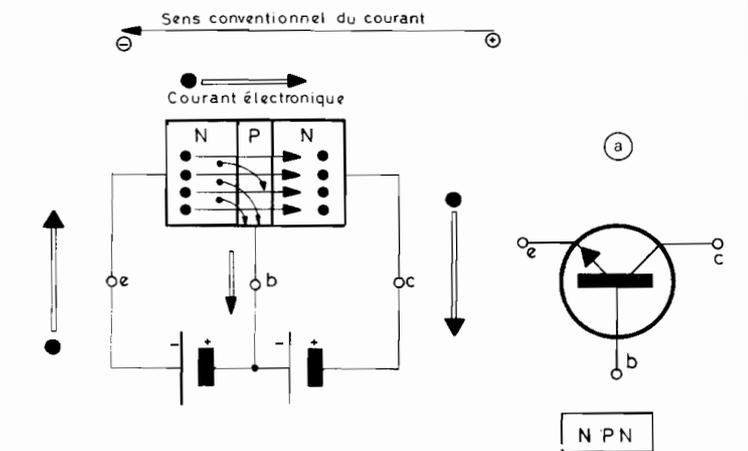
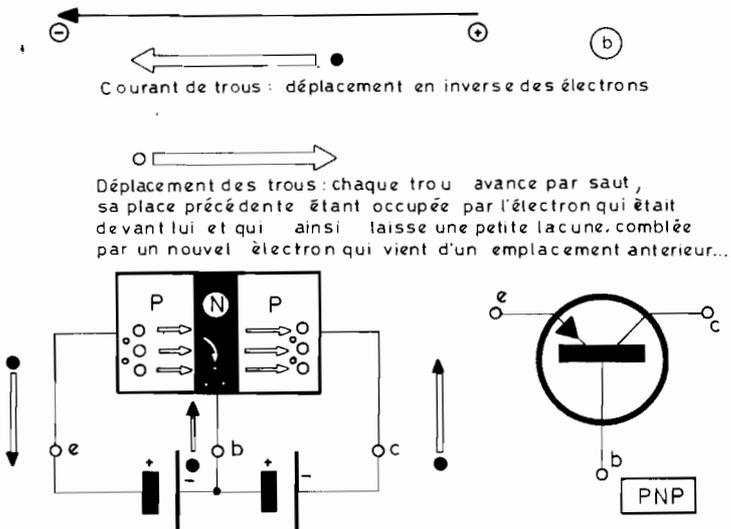


Fig. 3-4 - Mise en évidence du courant d'électrons dans le cas d'un NPN (a) et d'un PNP (b).

Évidemment, si l'on connaît, grâce aux notices des constructeurs,  $\omega$ , on aura la possibilité de déterminer  $g_p$  et de là, le rapport  $r$  entre les résistances-collecteur  $R_{bc}$  et émetteur  $R_{eb}$  :

En effet :

$$g_p = \alpha \cdot g_v = \alpha \cdot \alpha \cdot \frac{R_{bc}}{R_{eb}} = \alpha_2 \cdot r$$

Par suite :

$$r = \frac{g_p}{\alpha^2} = \frac{\alpha \cdot g_v}{\alpha^2}$$

$$= \frac{g_v}{\alpha} = \frac{R_{bc}}{R_{eb}}$$

que nous vérifions aisément :

$$r = \frac{1624,5}{(0,95)^2} = \frac{1624,5}{0,95 \times 0,95}$$

$$= \frac{1624,5}{0,9025} = 1800$$

Ainsi, par les seules données de  $\alpha$  (gain en courant) de  $g_v$  (gain en tension) et une mesure, par exemple, celle de  $I_e$  (courant émetteur) on parvient à établir les **principaux paramètres de fonctionnement d'un transistor** (NPN ou PNP).

Les gains, en tension ( $g_v$ ), en résistance ( $r$ ), en puissance ( $g_p$ ) sont tous fortement supérieurs à l'unité. L'emploi du mot **gain** est justifié. En compensation, le gain en courant ( $\alpha$ ) est inférieur à 1 (de l'ordre de 0,95 avons-nous dit) : il y a donc **perte de courant** et non pas gain, mais l'usage s'en est imposé. D'ailleurs le courant ne s'évapore pas dans la nature ! Il se retrouve dans l'électrode de base b.

### 3.2. Le problème des « fuites »

Si les transistors étaient parfaits, il n'y aurait pas de « fuites », ou de « pertes de courant ». Trois catégories sont connues, pratiquement :

- Celles dues aux mauvaises polarisations d'entrée et de sortie.
- Celles dues aux phénomènes internes de transfert des charges, lorsque l'émetteur reste « en l'air » (n'est pas connecté) ; ce

sont des « impuretés »\* qui en portent la responsabilité.

— Celles dues aux effets de surface, imputables aux imperfections technologiques du matériau lors de la fabrication.

La figure 3-5 schématise par quatre diagrammes ce qu'il faut entendre par là et montre la façon d'en assurer les mesures, pour un transistor PNP (de loin le plus répandu actuellement sur le marché, d'où ce choix... Mais le lecteur, s'il le désire, peut se faire un aide-mémoire complémentaire en raisonnant, seul sur le transistor NPN, en reprenant les figures 3-3 et 3-5).

### 3.3. « Transistor-mètre » économique

Considérons la figure 3-6. Elle comprend trois milliampèremètres étalonnés de 0 à 1 mA, deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  de protection, une pile, un interrupteur-inverseur et un interrupteur à bouton-poussoir. Si l'on ne possède qu'un seul milliampèremètre, il suffit de court-circuiter leurs bornes (a - a'), (b - b'), (c - c') et refaire trois fois la mesure voulue.

Lorsque  $K_2$  est ouvert, on détermine sur le milliampèremètre c - c', donnant  $I_{e0}$ , la valeur du **courant de fuite** entre l'émetteur e et le collecteur c, appelé  $I_{e00}$  dans la littérature. Le circuit de base doit être ouvert pour cette opération (ne pas appuyer sur  $K_2$ ).

En ouvrant  $K_1$  (position A<sub>1</sub>) on note que le courant de base est nul (milliampèremètre b - b', donnant  $I_b$ ).

$I_{e00} = 20$  micro-ampères environ

Si l'on approche un fer à souder du boîtier, on s'aperçoit que cette intensité augmente jusqu'à 200 micro-ampères. Lorsque le fer est enlevé, il faut attendre cinq minutes environ pour observer un retour à la normale.

La température joue un rôle primordial dans l'affaiblissement des performances des transistors, aussi convient-il de toujours veiller à une excellente ventilation.

Refermons  $K_1$  et  $K_2$  et enregistrons les grandeurs affichées par les appareils de lecture :

- Milliampèremètre cc', collecteur :  $I_c = 0,40$  mA
- Milliampèremètre aa', émetteur :  $I_e = 0,42$  mA
- Variation des courants :  
Collecteur :  $0,40 - 0,02 = 0,38$  mA  
Émetteur :  $0,42 - 0,02 = 0,40$  mA

\* Sans entrer dans la théorie, il faut pourtant dire que le **matériau de base** des transistors est un semi-conducteur, ou semicteur (voir appendice I) de haute pureté (raffinage parfait) de résistivité  $\rho$  intermédiaire entre les métaux et les isolants (germanium, silicium, arséniure de gallium, etc.). On diminue sa résistivité en injectant des agents dopants qui sont des « impuretés ».

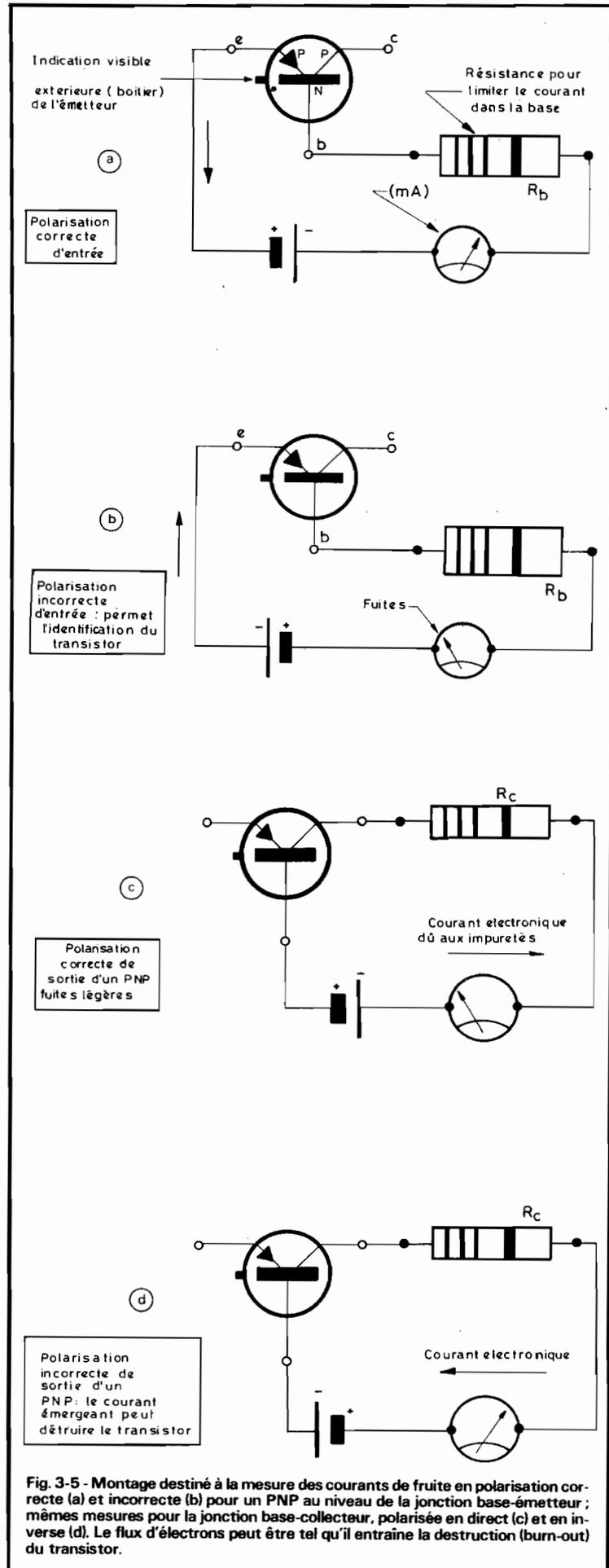


Fig. 3-5 - Montage destiné à la mesure des courants de fuite en polarisation correcte (a) et incorrecte (b) pour un PNP au niveau de la jonction base-émetteur ; mêmes mesures pour la jonction base-collecteur, polarisée en direct (c) et en inverse (d). Le flux d'électrons peut être tel qu'il entraîne la destruction (burn-out) du transistor.



**UN COMPRIMÉ DE PHYSIQUE DU SOLIDE POUR CEUX QUI SONT ATTEINTS D'INSOMNIE**

**1. Constitution de la matière**

La plus petite particule, tout en taille, qu'en masse, chargée d'une certaine quantité d'électricité  $|q|$  est l'électron. Il existe des électrons positifs, ou positons (charge  $+q$ ) et des électrons négatifs, ou négatons (charge  $-q$ ).

Dans le système d'unités de mesure M.K.S.A. (mètre, kilogramme, seconde, ampère, pour la longueur [L], la masse [M], le temps [T] et l'intensité [I]) l'électron est défini par :

- Sa charge :  $|q| = 1,6 \times 10^{-19}$  coulomb [Cb]
- Sa masse :  $m_q = 9,1 \times 10^{-31}$  kilogramme [kg]
- Sa charge spécifique :  $|q|/m = 1,8 \times 10^{11}$  [Cb/kg]

Lorsque des négatons se déplacent en sens inverse sous l'effet d'une force, ou d'un champ électrique (mesuré en volts/mètres), ils laissent à la place qu'ils occupaient auparavant des lacunes, de même volume qu'eux, mais de signe opposé (positif) que l'on désigne par trous. Ce ne sont pas des positons, mais bien des sites vides de négatons, qui se propagent, à leur tour, dans la direction opposée à celle du transfert des négatons (fig. A-1).

Les atomes sont constitués par des électrons négatifs qui entourent un noyau formés de particules plus lourdes, les protons, de même charge que les positons, mais de masse beaucoup plus importante  $m_p$  :

$$m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kilogramme}$$

d'où le rapport k :

$$\frac{m_p}{m_q} = 1836 = k$$

A côté des protons, se trouvent des corpuscules électriquement neutres, ou neutrons, de même masse que les protons. Entre protons et neutrons, l'énergie s'échange continuellement en se transformant sous des formes corpusculaires et matérielles qui donnent naissance à des particules lourdes (ou baryons) et à des particules légères (ou leptons). Leur intérêt, capital en physique nucléaire (nucléonique) reste discutable pour notre propos, aussi

nous hâterons-nous de les oublier.

Les atomes en se réunissant construisent des molécules. Les liaisons qui y existent peuvent être électriques (électrovalence) ou neutres (covalence). Les ions électrovalents sont positifs, ou négatifs, à cause de l'éviction, ou de l'absorption, de négatons. La figure A-2 précise cette notion. Si l'orbite externe de l'atome, ou de la molécule, est saturée, elle apparaît comme neutre (fig. A-3). Ni trou ni négaton ne peuvent s'y glisser. Si des corpuscules de cette nature sont retenus dans cet édifice, ils y constituent des « nuages » (Drude) de porteurs libres, soumis au seul mouvement désordonné (thermique) identifié par Brown. Si on leur applique un champ électrique extérieur, ils se déplacent en « groupe organisé » et deviennent des porteurs mobiles de charge électrique.

Les molécules géantes structurées selon une architecture bien ordonnée procurent des verres, des cristallites, des cristaux, au fur et à mesure que leur degré de cohésion augmente. On passe ainsi progressivement des isolants, amorphes, en général, au métaux, dans lesquels les ions sont rangés avec la parfaite ordonnance des athlètes sur un stade. La conductivité  $\sigma$  (inverse de la résistivité  $\rho$ ) s'accroît notablement des isolants (ou diélectriques) aux métaux.

Entre les deux, il existe une famille de corps, pas tout-à-fait isolants, pas tout-à-fait métaux, appelés semi-conducteurs, ou semiconducteurs.

Leur résistivité varie de 5000 d'ohms/mètre pour le germanium (Ge) à 5.000.000 d'ohms/mètre pour le silicium (Si). Leur principale propriété tient à ce que leur conductivité augmente avec la température (fig. A-4), d'abord en suivant la loi d'Ohm, linéaire, puis après être passés par un stade d'équilibre, dit de plateau, s'emballant, deviennent vite inutilisables.

**2. Nature de la conductivité**

Pour achever ce résumé succinct et incomplet, nous voulons toutefois déterminer la nature intime de la conductivité  $\sigma$  (fig. A-5).

La loi d'Ohm (voir § 1) permet d'écrire :

$$U_0 = R \cdot I = \rho \cdot l/s \cdot I$$

ou encore :

$$I = G \cdot U_0 = \sigma \cdot s/l \cdot U_0$$

La densité (surfaccique) du courant est égale à l'intensité I, divi-

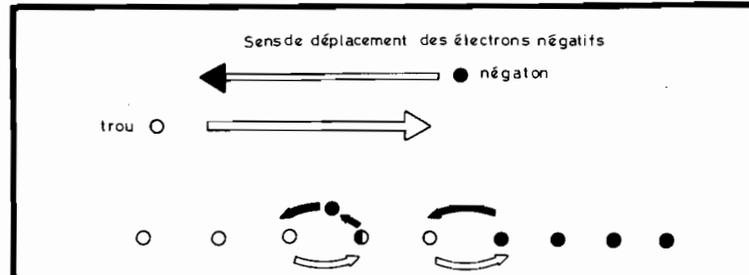


Fig. A-1 - Conduction par saut des trous, remplacés par un électron laissant un site vacant derrière lui.

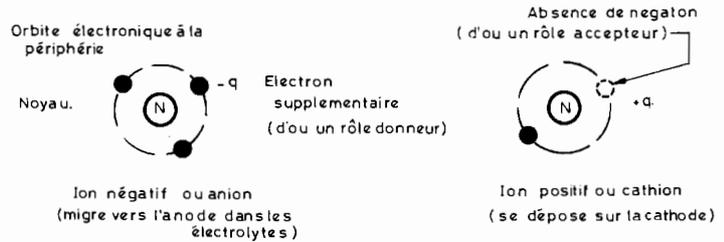


Fig. A-2 - Placés dans des mailles cristallines constituées par des atomes fortement liés (texture covalente) des ions négatifs et positifs servent d'agents activateurs, les uns en perdant les négatons supplémentaires qui les gênent pour se fixer parmi les éléments du matériau, les autres captant les électrons qui leur manquent. Mais ce sont des atomes « neutralisés » instables qui pègent, relâchent, rattrapent les corpuscules en mouvement, accélérant ainsi, par leur présence, les phénomènes de transfert des charges mobiles.

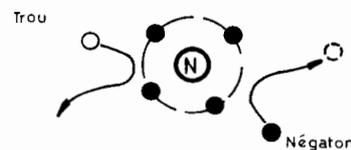


Fig. A-3 - Un atome à couche externe saturée refuse de perdre ses électrons périphériques, ou d'en prendre. Des échanges ont lieu, cependant, mais la forme saturée demeure.

sée par la surface  $s$  qu'elle traverse :

$$J = I/s = \sigma \cdot U_0/l$$

Or, le quotient de  $U_0$  par  $l$ , longueur du barreau cylindrique de semi-conducteur, est le champ électrique  $E$ , régnant dans les mailles cristallines de ce substrat :

$$J = \sigma \cdot E$$

La densité de courant  $J$  est constituée par les deux flux de particules, négatives (de charge  $-q$  et de nombre  $n_q$ ) et de trous (de charge  $+q$ , quantité  $n_t$ ) qui s'écoulent avec des vitesses longitudinales  $v_q$  et  $v_t$  (d'ailleurs,  $v_q$  est supérieure à  $v_t$ ). Ces vitesses sont appelées « de translation ».

Nous aurons par conséquent :

$$J = J_q + J_t = \sigma \cdot E$$

Mais, dans une tranche extrêmement mince du solide considéré, il passe en une unité de temps (une seconde)  $n_q$  charges mobiles, animées d'une vitesse de circulation  $-v_q$  et  $n_t$  charges libres, à la vitesse  $v_t$ , d'où :

$$\begin{aligned} J &= J_q + J_t \\ &= [(-q) \cdot n_q \cdot (-v_q) + q \cdot n_t \cdot v_t] \\ J &= q [(n_q + n_t) \cdot (v_q + v_t)] \\ &= \sigma \cdot E \end{aligned}$$

Il y a contribution des électrons et des trous au phénomène de transport des charges non-liées.

D'où :

$$\begin{aligned} \sigma &= q \cdot \frac{(n_q + n_t) \cdot (v_q + v_t)}{E} \\ &= q \cdot n_0 (\mu_q + \mu_t) \end{aligned}$$

avec :

- $n_0 = n_q + n_t =$  quantités de porteurs en mouvement ;
- $\mu_q = v_q/E =$  vitesse tangentielle, ou mobilité des négatons ;
- $\mu_t = v_t/E =$  vitesse tangentielle, ou mobilité des trous.

Par suite :

$$\sigma = q \cdot n_0 \mu_0$$

En revenant au principe fondamental de la dynamique (« la force est égale au produit de la masse par l'accélération qui lui est procurée ») on pourrait mieux préciser la nature de  $\sigma$ , mais les calculs à développer (bien que simples) sortent, toutefois du cadre qui nous est imparti (intégration).

Ce qu'il faut savoir, néanmoins, c'est que la masse des porteurs de charge intervient dans la formule. On démontre d'ailleurs que la « masse apparente » des trous est plus « lourde » que celle des négatons, ce qui modifie grandement les trajectoires internes, en fonction des énergies locales \*.

# LE STÉTHOSCOPE DU RADIO - ÉLECTRICIEN



**DETECTE LES PANNES  
SANS DEMONTAGES**

## MINITEST 1

**Signal Sonore**  
vérification et contrôle des circuits BF. MF. NF. Micros télécommunications - Haut parleurs pick up

## MINITEST 2 Signal Vidéo

appareil spécialement conçu pour le technicien TV

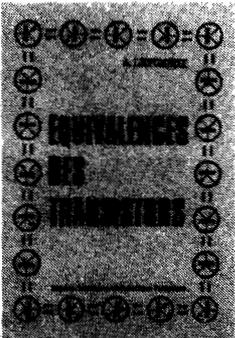
## MINITEST UNIVERSEL

documentation sur demande à

**slora**

18, Avenue de Spicheren  
BP 91 57602 - FORBACH - tél : 85.00.66

*Vient de paraître*



# ÉQUIVALENCES DES TRANSISTORS

par A. LEFUMEUX

Grâce à la documentation considérable réunie par l'auteur, spécialiste de la question des équivalences, celui-ci a pu réunir, sous forme de tableaux très faciles à consulter, les équivalences de tous les transistors usuels et même rares. Dans ce livre, on trouvera également les indications «NPN» et «PNP», la marque et toutes «remarques» utiles pour le remplacement correct. Ce livre est absolument indispensable aux amateurs, aux professionnels, techniciens, commerçants ou industriels.

Un ouvrage de 184 pages. Format 11 x 15,5.

Prix : 20 F.

En vente à la :

**LIBRAIRIE PARISIENNE DE LA RADIO**

43, rue de Dunkerque - 75010 PARIS

Tél. : 878.09.94/95

C.C.P. 4949-29 PARIS

(Aucun envoi contre remboursement - Ajouter 15 % pour frais d'envoi à la commande. Tous nos envois sont en port recommandé).

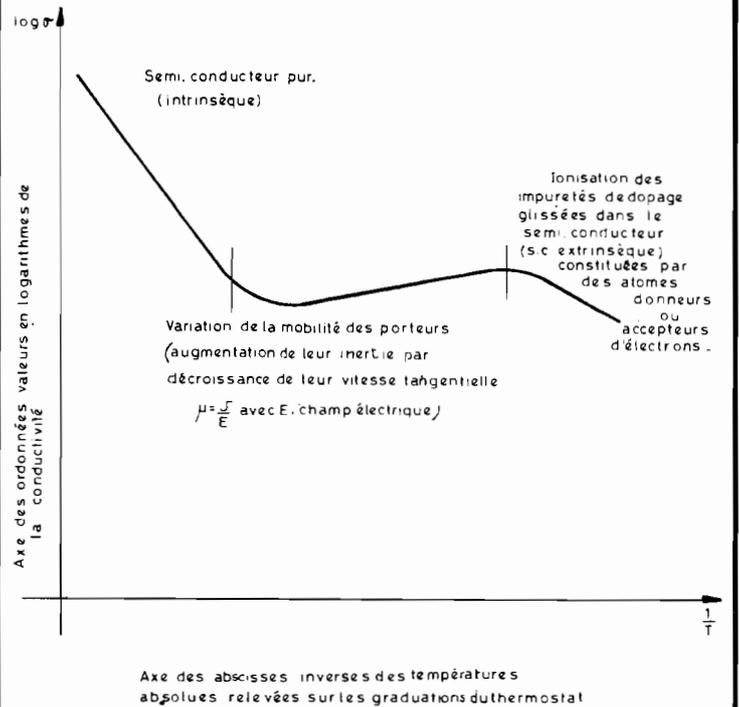


Fig. A-4 - Caractéristique des corps semi-conducteurs : la conductivité augmente avec la température (matériau intrinsèque).

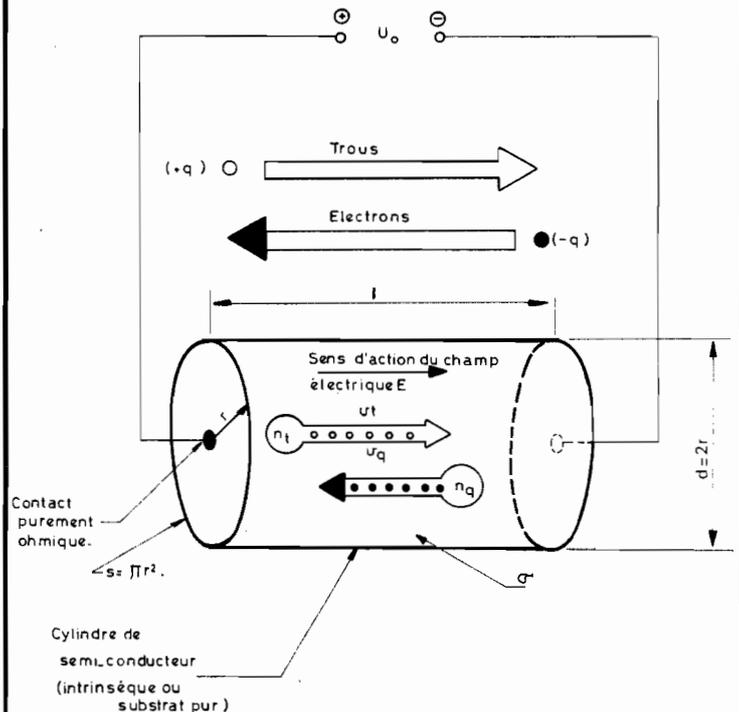


Fig. A-5 - La loi d'Ohm permet de déterminer la composition physique de la conductivité  $\sigma$ . Pour expliquer tous les phénomènes semi-conducteurs, classiques, il faut faire intervenir également la constante diélectrique du matériau-support, intrinsèque (ou permittivité  $\epsilon_0$ ) ; les centres donneurs et accepteurs doivent aussi être identifiés (ils appartiennent pour la plupart aux corps chimiques, anciennement nommés métalloïdes).

La circulation des trous et des négatifs est accrue si l'on insère dans le cristal pur (intrinsèque) de haute résistivité des agents physico-chimiques dopants (atomes accepteurs, ou donneurs d'électrons fig. A-2) qui en modifiant la structure (semi-conducteur extrinsèque) et augmentent, par les méca-

nismes qu'ils mettent en jeu, la conductivité du matériau.

**B. MARIN**

\* Voir du même auteur : « Réflexions sur les structures hyperfréquences à profils contrôlés » ni « L'électricité électronique moderne » n° 279 (février-mars 1974).