

LA RESISTANCE THERMIQUE

Les constructeurs de transistors et de diodes semi-conductrices donnent dans leurs catalogues des informations sur la tenue en température de leurs produits. C'est au technicien de savoir comment utiliser ces données dans le but d'obtenir un fonctionnement de qualité et durable pour les montages qu'il a étudiés, surtout s'il souhaite obtenir de bonnes performances dans un milieu où la température de l'air environnant atteint une valeur bien supérieure aux 25 °C habituels.

Nous expliquerons donc dans les pages qui suivent ce que l'on entend par résistance thermique, comment prendre en considération la température maximale de la jonction, et tracer (et utiliser) la courbe de dissipation : diminution de la puissance utile en fonction de l'augmentation de la température. Puis nous verrons comment employer les radiateurs (également appelés refroidisseurs) afin d'atteindre un fonctionnement fiable.

collecteur base égale à $3,7 \text{ V} \times 10 \text{ mA}$, soit 37 mW. En ce qui concerne la puissance dissipée dans la jonction émetteur-base, et en considérant que I_E est sensiblement égal à I_C (théoriquement il faudrait y ajouter le courant I_B , de valeur négligeable par rapport aux autres courants), cette puissance est égale à 6 mW ($= 0,6 \text{ V} \times 10 \text{ mA}$). Ce qui fait que la puissance dissipée totale dans ce transistor est de $6 + 37$, soit 43 mW.

En pratique, pour le schéma donné, on ne se donnera pas autant de mal

en calculant séparément les puissances des deux jonctions ; la formule à appliquer sera seulement la suivante :

$P_{\text{diss.}} = V_{\text{collecteur}} \times I_C$, c'est-à-dire que, pour notre exemple :

$$P_{\text{diss.}} = 4,3 \text{ V} \times 10 \text{ mA} = 43 \text{ mW}.$$

Cette puissance électrique est convertie en chaleur (effet Joule). Le composant chauffera plus ou moins suivant ses dimensions (en effet, plus sa surface est grande, plus il cède facilement sa chaleur à son environnement).

Echauffement des transistors

Vous souhaitez réaliser un amplificateur basse fréquence devant sortir une puissance de quelques watts. Il va donc se poser le problème du choix des transistors de sortie. Il est évident que ces transistors seront du type « de puissance » et qu'ils devront être fixés sur un radiateur (ou refroidisseur), car les jonctions vont chauffer, et cette chaleur produite devra être évacuée pour ne pas endommager le transistor.

Physiquement, un transistor se présente comme sur la figure 1(a). La jonction

collecteur-base dissipe une certaine puissance, égale au produit du courant I_C par la tension collecteur-base. L'autre jonction (émetteur base) ne dissipe qu'une puissance plus faible ($V_{BE} I_E$) puisque la tension V_{BE} est toujours de l'ordre de 0,6 V.

Pour un circuit (fig. 2), il est aisé de calculer la puissance dissipée par ces deux jonctions. D'après les valeurs indiquées sur le schéma, on voit que la tension entre collecteur et émetteur est de 4,3 V ($= U - R_C I_C$) et que celle entre collecteur et base est de 3,7 V ($= V_{\text{collecteur}} - 0,6 \text{ V}$), d'où une puissance dissipée dans la jonction

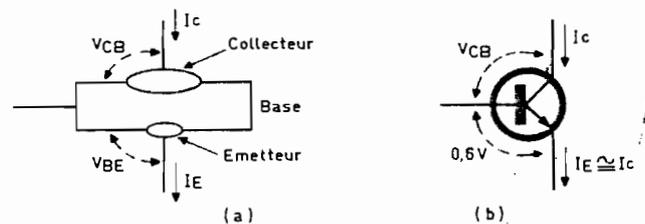


Fig. 1. — Représentation physique d'un transistor-jonction (a) et son schéma équivalent (b).

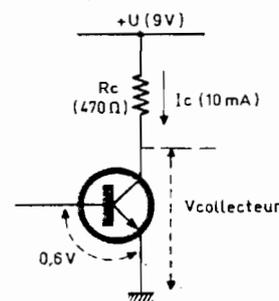


Fig. 2. — La puissance dissipée est égale à $V_{\text{collecteur}} \times I_C$.

Une certaine température ne doit jamais être dépassée. Cette valeur limite dépend de la technologie, elle est de l'ordre de : 90 °C pour le Germanium, 175 °C pour le Silicium et jusqu'à 150 °C pour certains circuits intégrés munis d'ailettes.

Résistance thermique

Dans les calculs concernant le refroidissement des transistors de sortie, apparaît une caractéristique appelée la résistance thermique (en abrégé R_{th}), exprimée en degré par watt (°C/W). **La résistance thermique doit être la plus faible possible.** Elle dépend de la technologie et des dimensions géométriques du transistor.

La puissance que peut supporter le transistor est limitée par la température atteinte au niveau des jonctions.

Mais qu'est-ce donc que cette résistance thermique ? C'est, pour une puissance donnée, la différence de température d'une jonction par rapport à la tempé-

rature ambiante, ou par rapport à la température d'un autre point (le boîtier par exemple).

Exprimée par une formule, la résistance thermique est :

$$R_{th} = \frac{T_j - T_{amb.}}{P_{c \max}}$$

dans laquelle on considère la différence de température entre la jonction (T_j) et la température extérieure de l'ensemble (température ambiante $T_{amb.}$). Cette formule peut être donnée sous une autre forme :

$$R_{th} = \frac{T_j - T_b}{P_{c \max}}$$

qui est la résistance thermique entre la jonction et le boîtier. C'est cette caractéristique qui est donnée dans les catalogues de semi-conducteurs pour les transistors de puissance.

Dans ces formules, T_j est la température de la jonction, T_b celle du boîtier et $T_{amb.}$ la température ambiante. Elles sont données en °C. La température maximale sur le collecteur du transistor est en watt, et R_{th} est donnée en °C par watt.

Quelques exemples feront bien comprendre ce qu'est la résistance thermi-

que, nous indiquerons comment utiliser cette caractéristique.

Transistor sans refroidisseur

Le transistor BC 107 nous servira pour ce premier exemple. En ce qui concerne la puissance les caractéristiques limites sont :

Puissance de dissipation totale (pour une température ambiante ≤ 25 °C) : 300 mW.

Température de la jonction : 175 °C.

Le constructeur nous indique également deux valeurs intéressantes au sujet de la tenue en température du composant :

Résistance thermique (entre jonction et boîtier) : 200 °C/W

Résistance thermique (entre jonction et ambiante) : 500 °C/W

D'après ces renseignements, nous pouvons calculer la puissance collecteur à ne pas dépasser, et cela pour chaque valeur de température de l'environnement.

Nous utiliserons la for-

mule donnée, mais sous la forme :

$$P_{c \max} = \frac{T_j - T_{amb.}}{R_{th}}$$

dans laquelle nous faisons rentrer les valeurs données pour le BC 107 :

$$P_{c \max} = \frac{175 \text{ °C} - T_{amb.}}{500}$$

Pour plusieurs valeurs de $T_{amb.}$ (75 °C, 125 °C, 175 °C), nous obtenons la valeur correspondante de $P_{c \max}$ (0,2 W, 0,1 W et 0 W). Ces valeurs limites de puissance pourront être portées sur un graphique (fig. 3). Nous remarquons d'abord un palier entre 0 °C et 25 °C, puisque le catalogue nous indique que la dissipation totale ne doit pas dépasser 300 mW, et cela pour une température inférieure ou égale à 25 °C.

Ensuite la courbe chute d'une façon linéaire selon la formule donnée ci-dessus. Plus la température ambiante augmente, plus la puissance admissible sur le collecteur se réduit.

Puis on s'aperçoit que pour 175 °C de température ambiante, $P_{c \max} = 0$.

Si T_j max n'avait pas été donnée, on aurait pu

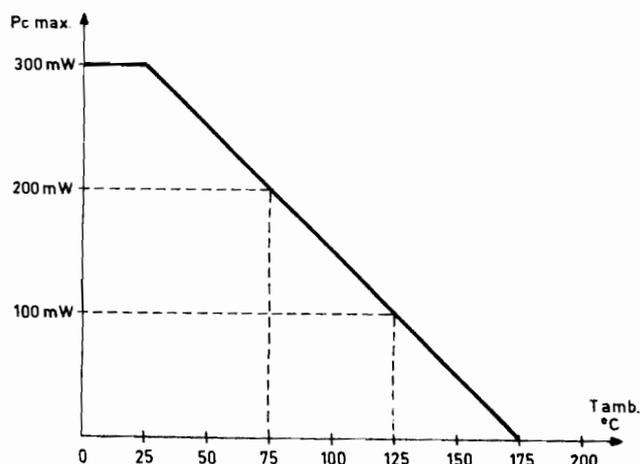


Fig. 3. - Variation de la puissance collecteur limitée en fonction de la température ambiante.

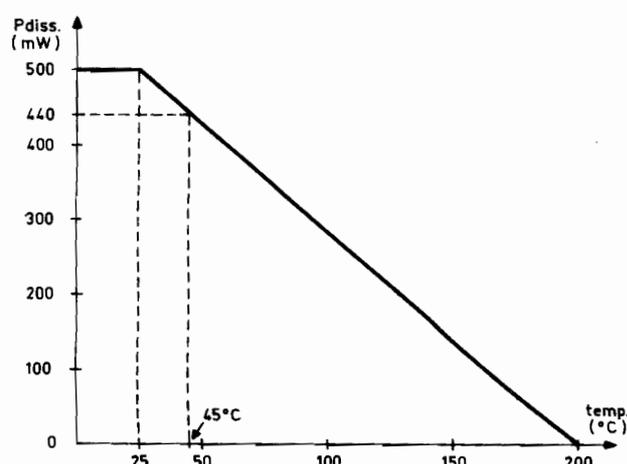


Fig. 4. - Puissance dissipée max. de la diode 1N 4148 en fonction de la température.

calculer sa valeur de cette façon :

$$T_j \text{ max} = 25 \text{ }^\circ\text{C} + (R_{th} \times P_{c \text{ max}} \text{ à } 25 \text{ }^\circ\text{C}), \text{ soit ici : } 25 \text{ }^\circ\text{C} + (0,5 \times 300) = 175 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Application aux diodes

Ces considérations sur la tenue en température des transistors s'appliquent également aux diodes semi-conductrices (de redressement, Zener, etc.). Pour ne citer qu'un seul exemple, disons que la diode 1N4148 possède une résistance thermique jonction-ambiance de $350 \text{ }^\circ\text{C/W}$, que la température de sa jonction ne doit pas dépasser $200 \text{ }^\circ\text{C}$ et que la puissance maximale à $45 \text{ }^\circ\text{C}$ est de 440 mW , ou 500 mW pour une température inférieure ou égale à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le graphique de la variation de la puissance en fonction de la température

est donné sur la figure 4. Ces valeurs ne sont valables que si la longueur de la connexion entre le corps de la diode et la soudure est de 4 mm (fig. 5).

Transistor avec refroidisseur

Le transistor est fixé au moyen de vis sur un refroidisseur, en l'occurrence une plaque métallique (aluminium) peinte de préférence en noir mat. La résistance thermique de ce radiateur est également exprimée en degrés Celsius par watt.

Ces résistances thermiques, internes ou extérieures, se manipulent comme des résistances ohmiques de circuits électriques, elles peuvent se brancher en série ou en parallèle.

La jonction émet de la chaleur dans toutes les directions vers le boîtier, ce dernier s'échauffe et rayonne cette chaleur vers

l'extérieur, ou la conduit vers l'air environnant à travers le refroidisseur. L'écoulement de cette chaleur est représenté d'une façon linéaire (sur une seule ligne).

Pour commencer, nous avons représenté l'écoulement de la chaleur dans le cas précédent (BC 107, $R_{th} \text{ jonction/ambiance} = 500 \text{ }^\circ\text{C/W}$) (fig. 6). La jonction, sous l'effet de la puissance électrique absorbée ($P_c = 200 \text{ mW}$), émet une certaine température (T_j). Celle-ci s'écoule dans l'espace jonction-boîtier, possédant une résistance thermique ($R_{th} = 500 \text{ }^\circ\text{C/W}$). Le boîtier est à la température de l'air ambiant, ici $75 \text{ }^\circ\text{C}$. On remarque que dans cet exemple, on est à la limite de température de la jonction ($175 \text{ }^\circ\text{C}$).

Si la température est à $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (cas d'un autoradio dans une voiture en plein soleil), la puissance $P_{c \text{ max}}$ à

ne pas dépasser sera 250 mW , car pour cette puissance et cette température, la jonction est à $175 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est évident que si la puissance est inférieure, il n'y aura aucun problème côté comportement du transistor en température.

Sur la figure 6, la jonction et la température ambiante sont représentées par des cercles, puisque ce sont des générateurs de chaleur. Le transistor peut être détérioré par une ambiance trop élevée, même s'il n'est pas sous tension (température de stockage à ne pas dépasser : $+175 \text{ }^\circ\text{C}$).

On représente le plus souvent l'écoulement de la chaleur sous la forme d'un dessin semblable à un circuit électrique (fig. 7). Nous pensons qu'il serait préférable de dessiner le circuit de refroidissement comme sur la figure 8. La jonction est un générateur de température de valeur variable

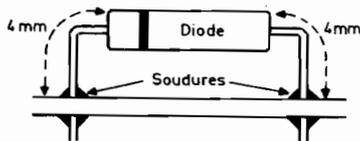


Fig. 5. — La résistance thermique de la diode est donnée pour une certaine longueur des connexions.

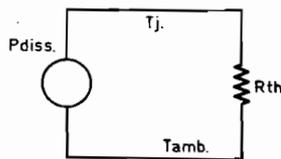


Fig. 7. — Représentation classique de l'écoulement de la chaleur.

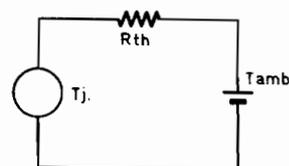


Fig. 8. — Autre représentation. L'ambiance est un générateur de température de valeur fixe.

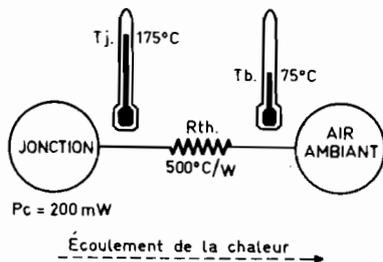


Fig. 6. — Représentation schématique de l'écoulement de la chaleur (la température n'est pas mesurée avec un thermomètre à mercure, mais avec un thermocouple ou un élément CTN).

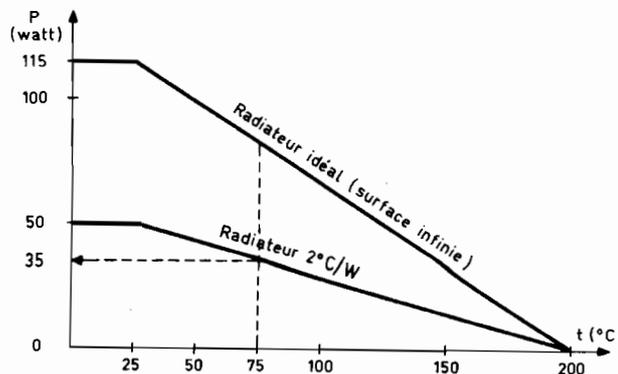


Fig. 9. — Courbe de dissipation dans le cas d'un radiateur idéal et d'un radiateur courant.

(suivant les variations de puissance dans le transistor), l'ambiance est un générateur de température de valeur fixe, représentée par le symbole de la pile.

Pour expliquer la dissipation par radiateur, nous prendrons un 2N3055, transistor de puissance très apprécié pour les étages de sortie, ou comme ballast dans les alimentations stabilisées devant fournir un fort courant, et dont le boîtier TO 3 est prévu pour être fixé sur un refroidisseur. Les caractéristiques limites données par le constructeur sont les suivantes :

Puissance dissipée du collecteur : 115 W (pour une température de boîtier inférieure ou égale à 25 °C).

Température de la jonction : 200 °C.

Résistance thermique (jonction-boîtier) : 1,5 °C/W.

La valeur de 115 W est donnée pour le cas d'un refroidisseur idéal infini. Dans la réalité, le radiateur possède une résistance thermique plus ou moins élevée.

Nous avons sur la figure 9 plusieurs possibilités. D'abord le cas du radiateur idéal, dont la résistance thermique serait nulle et qui serait une surface infinie.

La deuxième courbe concerne un refroidisseur de $R_{th} = 2 \text{ °C/W}$. Les résistances thermiques s'ajoutant, la valeur totale est de 3,5 °C/W. Ainsi à 25 °C, la puissance collecteur à ne pas dépasser est : $\frac{200 \text{ °C} - 25 \text{ °C}}{3,5 \text{ °C/W}} = 50 \text{ W}$.

Si le montage doit fonctionner dans un environnement à 74 °C, la puissance collecteur à ne pas dépasser sera :

$$\frac{200 - 75}{3,5} \approx 35 \text{ W}$$

L'ensemble transistor-refroidisseur est schématisé sur la figure 10. Quelle sera la température du boîtier ? Elle est donnée par la formule :

$$R_{th} = \frac{T_j - T_b}{P_{diss}}$$

transformée sous la forme : $T_b = T_j - (P_{diss} \times R_{th})$, ce qui donne 147,5 °C.

Montage du transistor de puissance

Le contact entre le transistor et le refroidisseur devra être le plus parfait possible. Si ce refroidisseur n'est pas un modèle du commerce mais de notre fabrication, on veillera à ce que les dimensions des trous soient bien respectées (fig. 11) afin d'obtenir une surface de contact la plus grande possible. Cet espace d'application devra être parfaitement plan, et les bavures dues au perçage supprimées.

Puisque le boîtier du transistor de puissance est relié électriquement au collecteur et que la plaque métallique sur laquelle il est fixé est reliée à un potentiel différent (le plus souvent la masse), l'isolement électrique entre les deux se fait par une mince lame de mica, que l'on trouve, coupée aux dimensions, chez les marchands de composants. Cette feuille de mica doit être enduite de graisse

aux silicones pour augmenter le contact thermique avec le transistor (fig. 12).

L'utilisation de mica apporte souvent des problèmes d'isolement (mica détérioré,...) et peut être désastreux pour les transistors de puissance. En plus, cet isolant au mica apporte une augmentation non négligeable de la résistance thermique. En conclusion, un bon conseil : ne pas utiliser de mica (si c'est possible). Le mieux est de fixer directement le transistor sur le radiateur. Celui-ci sera isolé du reste du montage par des rondelles isolantes.

En résumé...

L'écoulement thermique s'effectuera d'autant mieux que les dimensions du radiateur seront grandes. La surface du radiateur a plus d'importance que son épaisseur.

Les métaux n'ont pas la même résistivité thermique, le cuivre rouge serait l'idéal, mais pour des questions de prix de revient, on

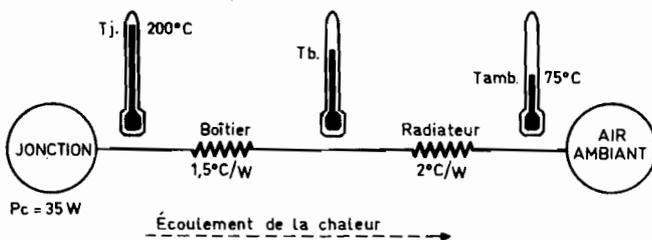


Fig. 10. — Schéma du refroidissement de l'ensemble transistor-radiateur.

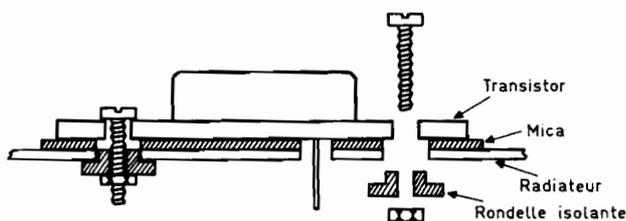


Fig. 12. — Mode de fixation d'un transistor de puissance sur son radiateur.

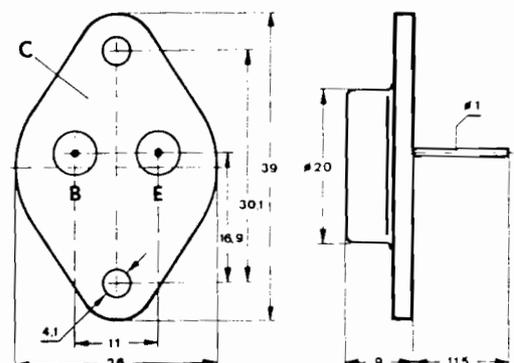
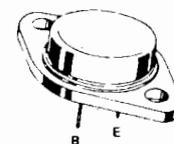


Fig. 11. — Boîtier TO3 et ses dimensions.

utilisera l'aluminium. Le laiton est à proscrire.

La surface sera teinte en noir mat.

Les radiateurs seront disposés verticalement.

Quelques remarques

Les transistors en boîtier type TO 39 et TO 18 sont prévus pour un emploi sans radiateur, néanmoins la puissance de dissipation maximale pourrait être augmentée en leur adjoignant un refroidisseur, soit de sa propre fabrication (pour le boîtier TO 18), soit acheté dans le commerce (pour le boîtier TO 39). Ce dernier type a été largement utilisé sur le BF 258 qui équipe le dernier étage vidéo de certains téléviseurs transistorisés (fig. 13).

Les catalogues donnent deux caractéristiques pour les transistors de petite puissance :

– Rth jonction-ambiance, pour l'utilisation usuelle sans refroidisseur.

– Rth jonction-boîtier, dans le cas où on utiliserait un petit refroidisseur comme celui représenté figure 13.

Résistances thermiques associées en parallèle

Jusqu'ici nous n'avons parlé que de l'association de résistances thermiques en série. L'évacuation de la chaleur peut pourtant se faire par deux voies différentes, d'une part par le boîtier lui-même (Rth = 500 °C/W), le boîtier est alors l'interface entre la jonction et l'air ambiant, d'autre part à travers le boîtier et le refroidisseur (Rth2 = 200 °C/W + 55 °C/W). La résistance

thermique totale est égale à :

$$R_{th} = \frac{R_{th1} \times R_{th2}}{R_{th1} + R_{th2}}$$

Avec les valeurs numériques données Rth total ≈ 169 °C/W (fig. 14).

Thermal Derating Factor

Une autre caractéristique liant la température et les semi-conducteurs, et que l'on rencontre dans la littérature technique américaine, est le « Thermal derating factor », désigné par Kt et exprimé en watt par degré. Il s'agit de l'inverse de la résistance thermique.

Ainsi, un transistor dont les caractéristiques sont : P diss. max à 25 °C = 150 mW et Kt = 3 mW/°C possède une résistance thermique de 330 °C/W. Le facteur Kt indique que la puissance, pour une tempé-

érature extérieure supérieure à 25 °C, doit être diminuée de 3 mW par degré. A 35 °C, soit une hausse de 10 °C, la puissance sur le collecteur ne devra pas dépasser 120 mW (150 – 30).

En conclusion, lorsqu'un montage doit fonctionner dans un environnement dont la température est supérieure à 25 °C, il est bon de se rappeler ces formules :

$$R_{th} = \frac{T_j - T_b}{P_{c \max}}$$

$$R_{th} = \frac{T_j - T_{amb}}{P_{c \max}}$$

$$K_t = \frac{P_{c \max}}{T_j - 25^\circ C}$$

Si seulement deux caractéristiques sont données, la troisième est trouvée facilement.

Par exemple, si nous avons un transistor au germanium dont nous ne connaissons que

Tj. = 85 °C et Kt = 1,7 mW/°C, la puissance autorisée sur le collecteur est :

$$P_{c \max} = K_t (T_j \max - 25^\circ C)$$

$$P_{c \max} = 1,7 (85 - 25) = 102 \text{ mW}$$

Autre exemple : Nous savons que Tj. max = 125 °C et P diss. max = 200 mW (à 25 °C), la résistance thermique est :

$$R_{th} = \frac{T_j \max - T_{amb}}{P_{c \max}}$$

$$R_{th} = \frac{125 - 25}{0,2} = 500^\circ C/W$$

ou Kt = 1/Rth = 0,002 soit 2 mW/°C.

J.-B. P.

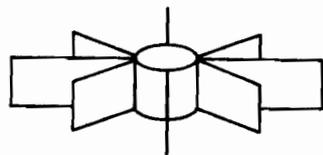


Fig. 13. – Exemple de radiateur utilisé sur un boîtier TO39.

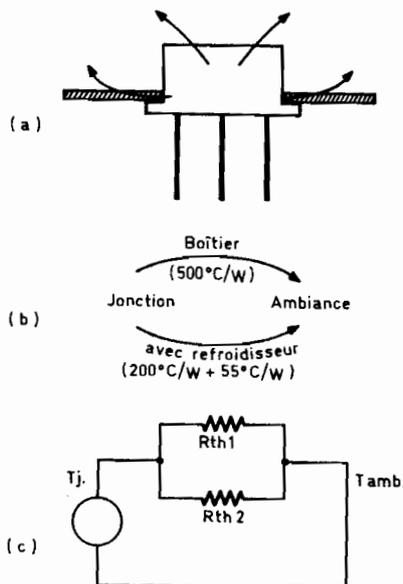


Fig. 14. – Avec le boîtier TO39 placé sur un refroidisseur improvisé (a), les calories atteignent l'ambiance par deux voies différentes (b) d'où la représentation classique avec deux résistances en parallèle (c).