

L'utilisation des modules réfrigérants à effet Peltier vient à l'ordre du jour par l'aide qu'ils apportent à la miniaturisation des systèmes électroniques.

Sans les progrès des semi-conducteurs, ils auraient eu du mal à remplir cette mission. Une fois de plus c'est l'Electronique qui apporte elle-même un secours à sa propre existence.

Une pompe à chaleur : le module Peltier

Mais qu'est-ce que l'effet Peltier ? C'est l'application, imaginée par un français vers 1834, d'un phénomène mis en évidence, 12 ans au paravant, par Seebeck dans un rapport soumis à l'académie des Sciences de Prusse. Il avait inventé la thermopile en chauffant, à des températures différentes, les soudures de deux métaux M_1 et M_2 assemblés en circuit (**fig. 1**). En (**a**), si l'on chauffe S_A alors que S_B est maintenue à une température voisine de 0°C , une différence de potentiel peut être observée dans la zone de coupure d'un des métaux. Selon le métal coupé, la d.d.p. se mesure dans un sens ou dans l'autre (**fig. 1-b**). Toutefois, il est évident que lors du chauffage en S_A , la conduction calorifique tend à modifier la différence de température en échauffant S_B et la tension en G diminue. On remédie à cet état de choses en formant un thermocouple relié au galvanomètre par des conducteurs intermédiaires (**fig. 1-c**) afin de compenser les variations de températures dues à la conduction. C'est le Châtelier, Inspecteur Général des Mines (mort en 1936) qui, au cours de ses recherches sur la pyrométrie, réalisa le couple Pt/Pt Rh (platine-rhodium) compensé avec des conducteurs cuivre et cuivre nickel que l'on utilise encore en thermométrie de haute précision.

Si, partant du montage de la **figure 1-b**, on alimente le circuit par un générateur de courant continu disposé entre A et B à la place de la résistance R, on assiste au phénomène inverse : « **création d'un flux calorifique entre S_A et S_B** ». C'est ce qu'on appelle l'effet Peltier du nom de « l'horloger » français qui en fit la constatation. On schématise, en considérant (**fig. 2**) un barreau formé de deux corps à la même température parcouru par un courant d'intensité I . Dans la zone T_c se produit un dégagement de calories et il est égal à : $Q_p = \alpha TI$

α = coefficient de Seebeck

T = température absolue à la jonction.

Le produit αT (en degrés K) porte le nom de coefficient Peltier et le terme α caractérise le pouvoir thermoélectrique du couple considéré comme un semi-conducteur.

Cette relation peut encore s'écrire : $Q_p = ep \cdot I$ dans laquelle la valeur ep est la F.é.m de contact. Par conséquent :

$$\alpha T \cdot I = ep \cdot I$$

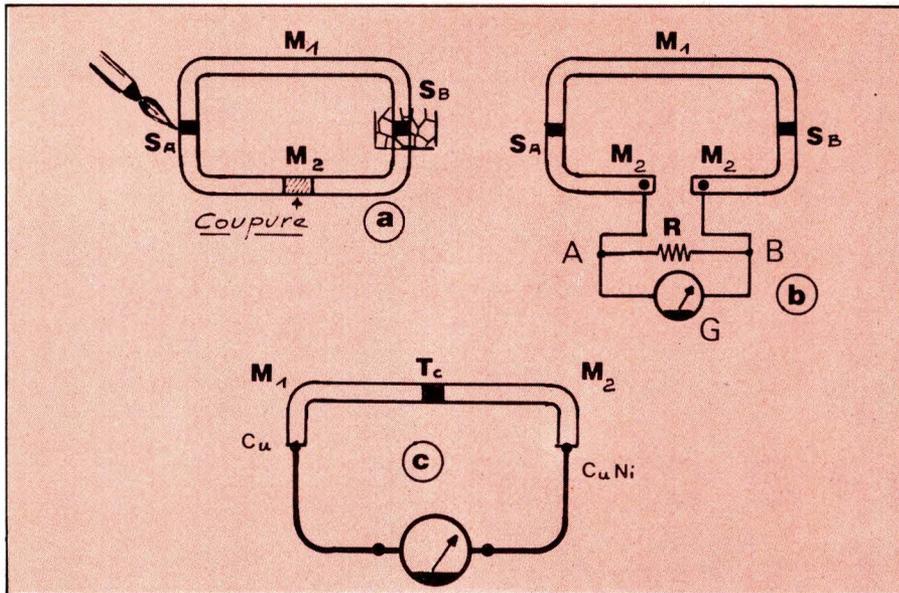


Fig. 1. — Principe de la thermopile.

Dans le circuit global tel que celui de la **figure 1-c**, la puissance totale absorbée résulte de la somme de deux dissipations calorifiques : celle due à l'effet Peltier (ep) et celle engendrée par effet Joule dans les conducteurs dont la résistance totale est égale à R . En conséquence on peut écrire :

$$Q = R \cdot I^2 \pm ep \cdot I = P \pm Q_p$$

Q peut en effet prendre 2 valeurs en fonction du sens de passage du courant :

$$Q_1 = R \cdot I^2 + ep \cdot I$$

$$Q_2 = R \cdot I^2 - ep \cdot I$$

En thermodynamique, l'état instantané correspondant à chacun des stades du cycle porte le nom « d'entropie » qui s'écrit dS et a pour valeur :

$$\frac{\delta q}{T}$$

laquelle est réversible. C'est ce que, partant du théorème de Carnot (Sadi Carnot - 1824), W. Thomson plus connu sous le titre de Lord Kelvin (1824-1907), a explicité en définissant la **chaleur spécifique de l'électricité** ou coefficient de Thomson (τ).

Ce paramètre exprime la relation entre la quantité de chaleur, **rayonnée** ou **absorbée**, par une portion (dx) de conducteur soumis à un gradient de température (dT/dx) et parcourue par un courant de densité déterminé J :

$$\frac{dQ}{dT} = \tau J \frac{dT}{dx}$$

ou

$$Qt = \tau I \frac{dT}{dx}$$

L'effet calorifique (rayonnement ou absorption) est donc réversible selon le sens de passage du courant c'est-à-dire que τ peut être positif ou négatif. Le froid est produit (absorption) lorsque le courant a le même signe que dT/dx et que le coefficient de Thomson est lui-même positif (cas du fer).

Le circuit thermo-électrique réversible

Les trois phénomènes étudiés par Seebeck, Peltier et Thomson sont parfaitement réversibles et caractérisent ce qu'il est convenu d'appeler une pompe à chaleur. Un module Peltier, nous allons le voir, aspire des calories qu'il dégage par ailleurs et vice versa. Seul, l'effet Joule, toujours présent, est irréversible.

La pompe à chaleur dont on parle tant et qui existe depuis que l'on fabrique du froid artificiel, semble avoir été inventée par un français en 1862, François Carré. Toutefois, l'application courante de la machine frigorifique ne remonte qu'aux années 1920 et l'idée de récupérer les calories prélevées aux matériaux à rafraîchir aurait pu être exploitée bien avant la recherche systématique

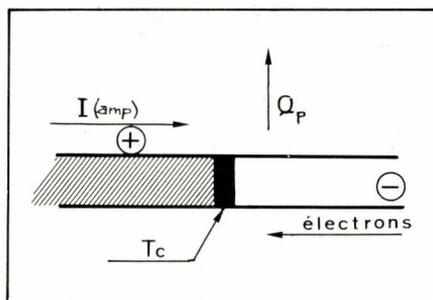


Fig. 2. — Mise en évidence de l'effet Peltier.

que actuelle de l'économie d'énergie. Cette récupération, soit dit en passant, s'applique d'ailleurs à beaucoup d'autres systèmes thermodynamiques.

Les dispositifs frigorifiques domestiques modernes, dont la **figure 3** donne le schéma, constituent les premières pompes à chaleur sur lesquelles on calque les dispositifs plus ou moins complexes offerts au public. Toutefois, rien n'empêche de composer la pompe à chaleur à partir du cycle à absorption dans lequel les faibles différences de températures autorisent un meilleur rendement en réduisant les pertes irréversibles (voir ci-dessus) et **inévitables**.

Le cycle de Carnot peut être appliqué à la pompe à chaleur pour définir le rendement idéal résultant de l'écart des températures :

$$\eta = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

avec :

T_c = température de la source chaude ;

T_f = température de la source froide ;

Dans le module Peltier, η est défini par le rapport entre la quantité de calories à retirer dans l'unité de temps (P_f) et la puissance totale à fournir en énergie électrique (W).

$$\eta = \frac{P_f}{W}$$

W est composée de l'énergie nécessaire à vaincre la f.é.m. de Seebeck définie plus haut (αTI) et de la dissipation Joule ($R \cdot I^2$). On peut calculer la différence idéale de température résultant de l'écart entre le froid et le chaud ($T = T_c - T_f$), en annulant la dérivée dT/dI pour trouver sa valeur maximum :

$$\frac{d(T_c - T_f)}{dI} = 0$$

En effectuant, on trouve que, dans ces conditions, l'optimum a pour valeur : $T_c - T_f = 1/2 Z T_f^2$ ou $Z = 2 T_f^2 (T_c - T_f)$, Z étant le facteur de qualité d'un matériau thermo-électrique tenant compte des caractéristiques thermique et électrique (conductance calorifique et résistivité électrique).

A partir de la valeur Z ainsi établie, on détermine le meilleur rendement en annulant la dérivée :

$$\frac{d\eta}{dI} = 0$$

Lequel a pour limite la valeur établie par le théorème de Carnot mais

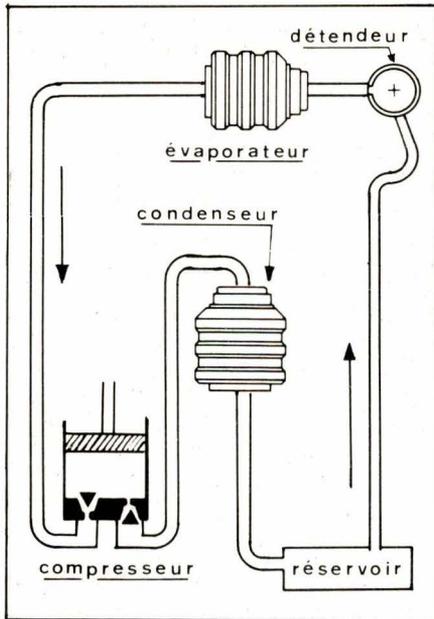


Fig. 3. - Principe d'un dispositif frigorifique moderne.

cette fois en considérant l'absorption calorifique soit :

$$\eta = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Construction des modules Peltier

L'optimisation du rendement, et donc celle du facteur de qualité, conduit à la recherche de matériaux répondant à la valeur de :

$$\frac{\alpha^2}{\rho \cdot k}$$

la plus élevée possible puisque ce rapport correspond à Z avec :

α = coefficient de Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)

k = conductibilité thermique ($\text{W}/^\circ\text{C}/\text{cm}$)

ρ = résistivité électrique (Ω/cm)

Z s'exprime en degré à la puissance -1 ($^\circ\text{C}^{-1}$)

Les courbes de la **figure 4** montrent les allures de variation de chaque paramètre et on remarque que l'optimum de Z (point Z') se situe à une intersection où la résistivité électrique et la conductance thermique sont relativement faibles tandis que la valeur α est sensiblement élevée. Ce compromis exprime donc le fait que les matériaux semi-conducteurs sont les mieux adaptés. C'est sans doute pour cette raison que Peltier, qui avait inspiré le principe développé ensuite par Lord Kelvin, n'a pu donner à sa découverte une application valable au niveau industriel. Ce n'est, semble-t-il, que vers 1950 que les soviétiques ont tenté de substituer les éléments Peltier aux appareils de production du froid par absorption pour des ensembles de petites dimensions.

Comparés aux jonctions hétérométalliques, les matériaux dopés se sont avérés plus performants dans la composition des thermocouples. Se sont encore les composés telluriques qui donnent à l'heure actuelle les meilleurs rendements.

On peut, à titre de comparaison, noter quelques valeurs du pouvoir thermo-électrique Seebeck :

- couple Cuivre/Constantan = $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- couple Ni-Ni/Cr = $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- couple Argent/bismuth = $77 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- couple au tellure de bismuth dopé = $400 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Le montage type de ce dernier couple prend l'allure du dessin de la **figure 5**. Il est constitué de deux jambes en tellure de bismuth (Bi_2Te_3) composées de la façon suivante :

Jambe P : Bi_2Te_3 (40 %) + Sb_2Te_3 (60 %)

Jambe N : Bi_2Te_3 (80 %) + Se_3Bi_2 (20 %)

(Sb_2Te_3 = tellure d'antimoine ; Se_3Bi_2 = Séléniure de bismuth).

On peut compter, avec ce thermocouple, sur un Z d'environ $2,3 \cdot 10^{-3} (\text{deg})^{-1}$. Ce type d'assemblage répond à une nécessité de montage et d'encombrement mais, au lieu de souder chaque jambe, entre deux bandes conductrices formant ponts avec les jambes adjacentes, on pourrait très bien les souder dans le prolongement l'une de l'autre pour former le couplage en série.

Les pastilles semi-conductrices sont composées d'éléments obtenus par frittage. Un meilleur facteur de mérite (Z) serait obtenu, avec des matériaux cristallisés ($3 \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$) mais au détriment de la robustesse qui est primordiale. La variation brusque des températures soumet en effet les substances métalliques à des contraintes justifiant une recherche de la rigidité des structures.

La représentation de la **figure 5** est exactement conforme à la réalité aux proportions près, un peu exagérées pour la clarté du dessin. Les pastilles P et N sont alternativement réunies par des barrettes de cuivre A, A₁... A_n du côté froid et B, B₁... B_n du côté rayonnement chaud. La **figure 6** montre la structure réelle d'une batterie Peltier (Transco) avec ses ailettes du côté réfrigérant et son carter de refroidissement du côté rayonnant. Le carter est muni

de deux tubulures cannelées pour raccordement à un circuit de fluide comportant 11 thermocouples en série, destinée à être alimentée sous 1,1 V/20 A. On construit toutefois des modules refroidissant par contact et dans ce cas les surfaces absorbante et radiante sont constituées d'une simple plaque de cuivre, isolée bien sûr, des barrettes de liaison, ce qui ajoute obligatoirement une perte due au contact thermique imparfait. Pour remédier à ce défaut, on assure les échanges thermiques directement sur les barrettes en pratiquant l'enrobage arasé dans un polymère. Cette disposition peut toutefois provoquer des circuits électriques indésirables notamment lorsqu'il s'agit de refroidir un dispositif à semi-conducteur : circuit intégré, transistor ou autre.

La véritable solution, tout au moins celle assurant le meilleur compromis isolement électrique contact thermique, c'est encore les plaques métalliques collées aux époxy comme celles fabriquées par Epoxy-Technology. Ce genre d'assemblage thermique est aussi praticable sur le côté de la surface à refroidir.

Lorsque une batterie similaire à celle représentée sur la **figure 6** est montée entre plaques, son épaisseur se trouve réduite à la valeur notée « e » sur la coupe CD.

Elle est d'environ 10 mm au total mais on fabrique aussi des types très performants dont l'épaisseur ne dépasse pas 3,8 mm. Certains modules sont étanches de façon à pouvoir être immergés du côté utile, afin d'assurer un meilleur échange thermique.

La bonne liaison thermique exige des surfaces parfaitement dressées et même polies, mais l'interposition d'un compound de contact est toujours nécessaire (epoxy, silicone ou huile minérale). Il est aussi possible d'assurer la liaison par soudure mais encore faut-il choisir un alliage à bas

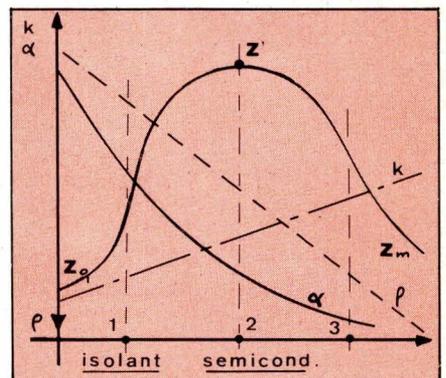


Fig. 4. - Courbes caractéristiques du module Peltier.

point de fusion (50 à 60 °C) et un flux compatible (voir notre numéro 10, pages 54 et suivantes). Certains produits à base de bismuth et d'indium conviennent à cette opération.

Les éléments Peltier courants autorisent des basses températures ne dépassant guère - 35 à - 40 °C dans les meilleures conditions d'emploi. Souvent les applications scientifiques modernes réclament des abaissements plus importants : - 60, - 100 °C et plus. On forme alors des montages en cascade de plusieurs modules superposés. La face froide du premier étage refroidit la face chaude du second et ainsi de suite. Par exemple un élément à 6 étages fabriqué par Marlow permet d'atteindre - 105 °C en quelques secondes. La stabilisation peut atteindre $\pm 0,1$ °C avec réglage du courant à travers des thermistances.

Cette température de - 105 °C implique évidemment une mise en œuvre bien étudiée et nous n'avons mentionné cette valeur que pour situer le niveau de froid qu'il est possible d'obtenir avec les éléments thermo-électriques.

Choix d'un thermocouple

On choisit le type le mieux adapté en partant de la différence ΔT que nous avons définie comme étant l'écart entre les températures chaude (T_c) et froide T_f (1). Toutefois, T_c résulte de la somme de 2 températures, l'ambiance T_a plus la température nécessaire à la création du flux radiateur/ambiance soit :

$$T_c = T_a + \delta t$$

On peut supposer, à priori, que le meilleur choix est celui qui porte sur une batterie développant un T_c aussi élevé que possible mais dans ce cas ΔT augmente et le rendement diminue.

On peut donc conclure, comme

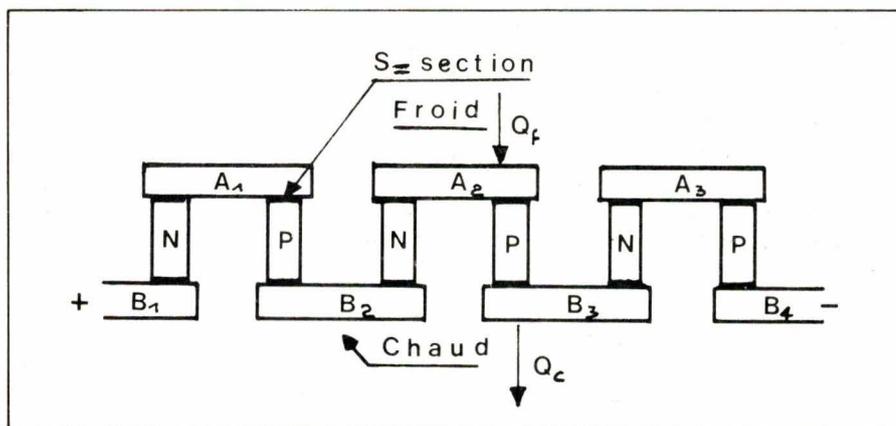


Fig. 5. - Montage du couple au tellure de bismuth.

Table de températures caractéristiques

$T_c = 60$ °C ; $DT = 32$ °C

	1	2	3	4	5	6	7	8...
V	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8		
P	0,8	2,4	4,8	8,1	12,1	17		
$(Q_H) Q_c$	- 2,2	2,4	7,4	12,9	18,7	25		
$(Q_c) Q_f$	- 3	- 0	2,6	4,8	6,6	8		
COPR	- 379	0	53	59	54	46		
COPH	- 279	99	153	159	154	146		

pour la valeur de Z, que l'élément répondant à un problème donné procède d'une recherche de compromis entre les caractéristiques suivantes :

- la température du radiateur correspondant à la face chaude du module (T_c) ;

- la différence de température entre le radiateur et celle à obtenir du côté froid $\Delta T = T_c - T_f$

- la valeur de la charge thermique à absorber évaluée en watts laquelle représente la somme de chaleur à pomper et des fuites diverses dont celle de l'ambiance (Q_f) ;

- l'intensité du courant (I) ;

- la tension de fonctionnement (V) ;

- la puissance électrique absorbée (P) ;

- la chaleur à rejeter par le radiateur (Q_c) ;

- le coefficient de performance de réfrigération (COPR) ;

- le coefficient de performance de pompage de chaleur (COPH) ;

- la conductance thermique moyenne de module (Km) ;

- la résistance électrique moyenne (R_m).

Il s'agit donc d'une « équation » implicite puisque le nombre des inconnues est supérieur au nombre

des relations mathématiques caractérisant une solution possible. Les fabricants ont donc fait appel aux simulations pour optimiser un grand nombre de possibilités. Les courbes de la **figure 7** concernent un type de module fabriqué par Cambion ayant pour caractéristiques de construction :

- $\Delta T > 60$ °C

- I = 5,5 A

- V = 6 à 8 V

- $T_c = 50$ °C

- $Q_f = > 27$ W (à $\Delta T = 0$)

- $T_c = 125$ °C (max)

Avec cette famille de courbes on détermine les performances d'un module pour une température T_c déterminée qui, dans ce cas, est de 50 °C.

Le fournisseur peut aussi produire des données tabulées grâce auxquelles on peut définir les caractéristiques pour une température différente. La portion de table ci-dessus montre comment se présente la suite de valeurs figurant au catalogue Cambion pour une famille de modules. Une centaine de pages est consacrée à l'édition de ces tables. A titre d'exemple, nous reproduisons un type d'emploi décrit par ce constructeur.

On désire maintenir une surface à 28 °C (T_f) dans une ambiance à 55 °C (T_a).

La charge thermique totale (Q_c) est évaluée à 15 W. On choisira un radiateur qui fonctionne au moins à 5 °C au-dessus de la température ambiante (voir ci-dessus).

Soit : $T_c = T_a + 5$ °C = 60 °C.

On cherche donc la table qui répond à $T_c = 60$ °C et qui porte en tête cette valeur ainsi que celle de DT, qui dans le cas présent est :

$T_c - T_f = 60 - 28 = 32$ °C.

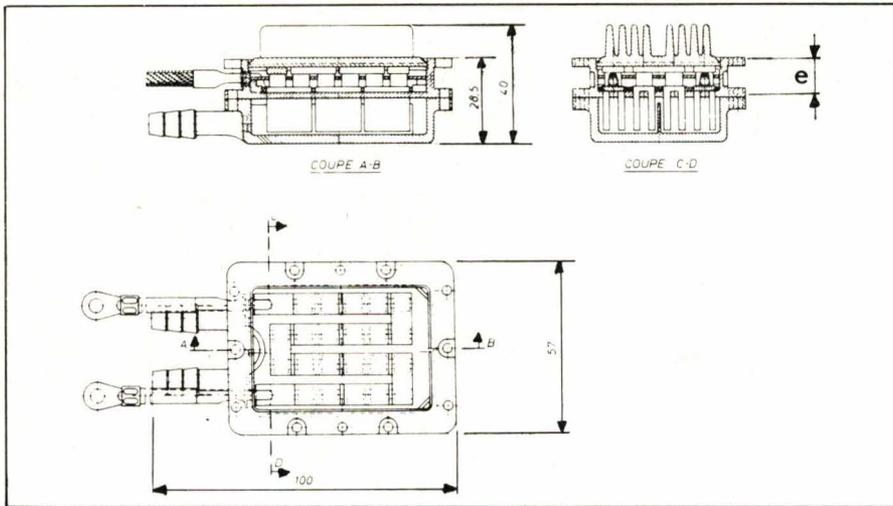


Fig. 6. - Vue écorchée et coupe d'une batterie.

On constate que plusieurs solutions sont acceptables dans la limite de la conductance thermique (k) optimum c'est-à-dire celle répondant au type de convection adopté : naturelle, ventilée ou par circulation liquide. Cambion préconise les valeurs en °C/W suivantes :

- 2 à 0,5 °C/W pour convection naturelle
- 0,5 à 0,02 °C/W pour convection forcée
- 0,02 à 0,005 °C/W pour convection liquide.

« Les valeurs de k sont indiquées pour chaque type de module radiateur c'est-à-dire l'élévation de température au-dessus de T_a lorsqu'une quantité de chaleur de 1 W est pompée sur sa surface ».

L'alimentation des thermocouples

La manière idéale d'alimenter les modules serait l'emploi d'accumulateurs mais c'est parfois un cas d'impossibilité.

En tout état de cause, l'ondulation résiduelle lorsqu'on produit localement du courant continu, doit être pratiquement nulle. On a intérêt à utiliser un courant parfaitement filtré en partant d'un générateur surdimensionné (transfo ou dynamo) avec redressement particulièrement soigné.

Lorsqu'il s'agit de refroidir des éléments de systèmes électroniques complexes il est possible de prélever la tension continue sur l'alimentation générale mais les précautions d'isolement entre circuits peuvent alors

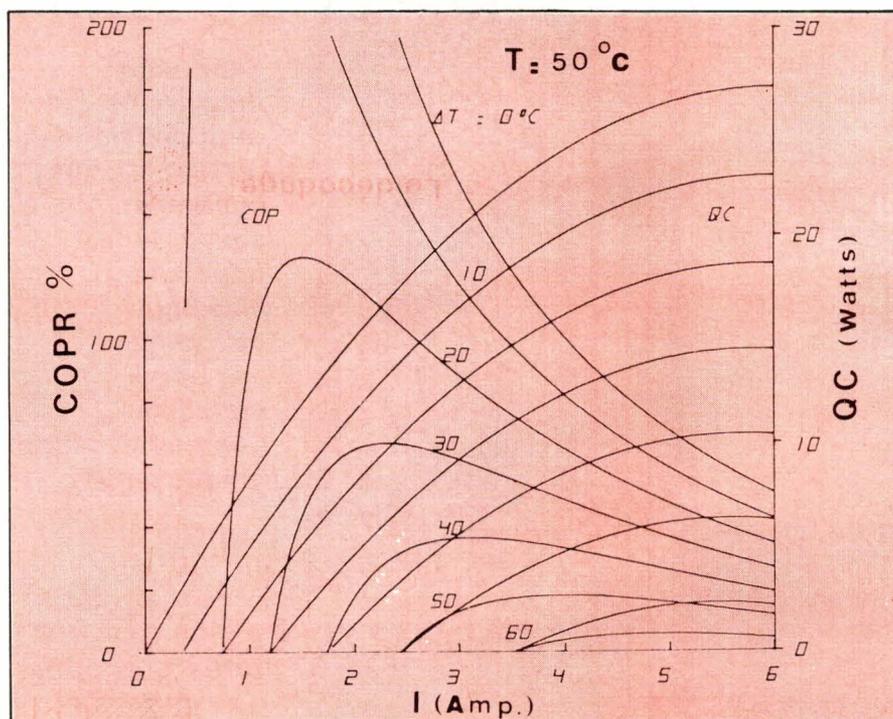


Fig. 7. - Courbes caractéristiques du module « Cambion ».

exiger la mise en place de composants limitant les risques d'interférence.

La pompe à chaleur Peltier

Revenant à la théorie de l'effet Peltier citée plus haut, on peut faire usage de la formule pratique ci-dessous pour déterminer la charge d'un module :

$$Q_f = \frac{\alpha^2 \cdot T_f^2}{2 R_m} - k_m \cdot \Delta T$$

avec les valeurs déjà définies en se souvenant que ΔT est la différence de température ($T_c - T_f$) entre les deux faces du module et α est le coefficient de Seebeck.

Il est clair que si la différence ΔT tend vers zéro la valeur de Q_f est maximum ; si au contraire ΔT est importante le flux Q_f tend vers sa valeur minimum. A la limite, la pompe à chaleur ne fonctionne plus.

La pompe à chaleur peut, nous l'avons dit, grâce à sa réversibilité, être utilisée comme générateur thermique. Les thermopiles dont nous avons évoqué l'emploi sont utilisables à partir de n'importe quelle source de chaleur y compris celle du rayonnement solaire. Plusieurs constructeurs se sont intéressés à cette application des thermocouples (Thomson-CSF, Alcatel, Westinghouse, Cambion, etc...).

En mettant à profit « l'effet de serre » qui emprisonne les calories du rayonnement solaire traversant une paroi de verre, on produit facilement et à bon marché de l'énergie électrique. On peut aussi faire usage de dispositifs de concentration à miroirs, plus efficaces mais aussi plus compliqués à réaliser.

Il semble que la thermo-électricité entre dans une phase nouvelle grâce au progrès de la technologie des semi-conducteurs. Déjà, les thermocouples apportent à la micro-électronique une aide considérable pour la climatisation des systèmes en ambiance contraignante.

P. Lemeunier

Liste des principaux fournisseurs

- Cambion (Techmaton) 20, quai de la Marne, 75019 Paris, Tél. : 200.11.05
- Marlow (ISC) 27, rue Yves-Kermen, 92100 Boulogne. Tél. : 608.52.75.
- Radiotechnique 130, avenue Ledru Rollin, 75540 Paris. Tél. : 355.44.99.