CEA-R-3834

8.2

PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CEA-R-3834

# LES MICROGENERATEURS RADIOISOTOPIQUES 1 VOLT

*par*

*Robert BOMAL, Bernard DEVIN, Philippe DELAQUAIZE*

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay

**Rapport CEA-R-3834**

**1969**

Fa

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

C.E.N-SACLAY B.P. n°2, 91-GIF-sur-YVETTE-France

CEA-R-3834 - BOMAL Robert, DEVIN Bernard,
DELAQUAIZE Philippe

LES MICROGENERATEURS RADIOISOTOPIQUES 1 VOLT

Sommaire. - Cette étude examine les types de générateurs électriques réalisables à partir de sources isotopiques en dehors du procédé thermoélectrique classique.

Les quatre procédés suivants sont examinés :

1 - Thermoionique
2 - Thermophoto-voltaïque
3 - Radiovoltaïque
4 - Thermoélectrique à fils

Les calculs sont conduits sans souci exagéré du rendement de conversion pour aboutir à une puissance électrique délivrée de 0,2 à 1 mW sous une tension au moins égale à 1 volt.

./.

---

CEA-R-3834 - BOMAL Robert, DEVIN Bernard,
DELAQUAIZE Philippe

ISOTOPIC MICROGENERATORS 1 VOLT

Summary. - Various configurations for electrical isotopic generators in the milliwatt range are investigated ; these generators are not of the classical thermoelectric type.

The four following energy conversion method are examined :

1 - Thermionic
2 - Thermophotovoltaic
3 - Radiovoltaic
4 - Wired thermoelectric

The calculus has been conducted having in view not the best energy conversion efficiency, but the need to attain directly 1 volt output voltage.

Le problème des sources thermiques de $^{238}Pu$ à haute température (T > 1000 °K) est résolu avec une isolation à structure multi-couche moly-alumine. L'optimalisation est calculée en vue d'une utilisation dans les procédés 1 et 2.

Le procédé 1 est intéressant par sa compacité et le procédé 4 par sa simplicité, sa robustesse et son prix de revient ; mais avec ces deux générateurs on ne peut obtenir plus d'un volt en charge.

Les procédés 2 et 3 peuvent délivrer des tensions de plusieurs volts. Le radiovoltaïque donne des rendements de 1 pour cent, mais la création de défauts dans le réseau cristallin du semiconducteur avec les particules de grande énergie peut limiter son utilisation.

./.

---

High temperature $^{238}Pu$ sources (T above 1000 °K) are isolated by multi layer thermal insulation material of the Moly/Alumina type. Optimised application is given for n° 1 et 2 hereabove.

Thermionic is interesting by its compactness and Wired-thermoelectric is cheap, simple and rugged. Both method do not allow to extend output voltage range far above 1 volt.

TPV and RV, can be designed for multivolt application. Radiovoltaic is 1 per cent efficient but irradiation defects in the semiconductor induced by high energy radiations can strongly limit the lifetime of the generator.

./.

Les performances de ces différents modes de conversion sont conditionnées avant tout par les technologies des sources isotopiques.

1969 72 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

---

Isotope sources technology is the determining factor for these microgenerators.

1969 72 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

- Rapport CEA-R-3834 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
Service d'Electronique Physique

# LES MICROGENERATEURS RADIOISOTOPIQUES 1 VOLT

par

Robert BOMAL, Bernard DEVIN, Philippe DELAQUAIZE

- Juin 1969 -

# LES MICROGENERATEURS RADIOISOTOPIQUES 1 VOLT

## I. INTRODUCTION.

Nous nous placerons ici dans la gamme du milliwatt électrique, c'est-à-dire que les générateurs envisagés s'appliquent aux stimulateurs cardiaques, à l'horlogerie et à la micro-électronique en général.

Jusqu'à présent les différents modes de conversion de la chaleur en électricité avaient été considérés essentiellement en fonction de leur rendement, mais il n'est sans doute pas opportun d'en faire le critère prépondérant pour choisir tel ou tel procédé quand les puissances en jeu sont aussi faibles. Du point de vue de l'utilisateur, il sera beaucoup plus important de disposer de l'énergie électrique sous quelques volts que d'économiser quelques décigrammes de radioisotope. Le procédé thermoélectrique classique (Pb Te - Sn Te ou Ge Si) ne permet pour des raisons purement technologiques, de disposer que de quelques dizaines de millivolts dont le "conditionnement" fait perdre l'avantage d'un rendement de conversion élevé (quelques pour cent).

## II. GENERATEUR TYPE.

Cette étude se propose d'examiner les générateurs électriques réalisables à partir d'une source isotopique au $^{238}Pu$ inférieure à 1 watt thermique. Les calculs ont été conduits sans souci exagéré du rendement de conversion pour aboutir à une puissance électrique délivrée de 0,2 à 1 mW sous une tension au moins égale à 1 volt. Ce qui revient à dire que nous avons considéré un générateur comme "vraisemblable" dès que son rendement atteint 0,1 %.

La charge de radioélément étant donnée, chacun des quatre procédés suivant est examiné :

- thermoionique (T.I.)
- thermophotovoltaïque (T.P.V.)
- radiovoltaïque (R.V.)
- thermoélectrique à fil (T.E.F.)

Les deux premiers ont en commun l'utilisation d'une source à température aussi élevée que possible. Le troisième (R.V.) fonctionne entièrement isotherme et le dernier est une variante technologique du thermoélectrique où l'on utilise des fils fins de thermocouples usuels, procédé fort simple et peu coûteux.

## III. GENERATEUR THERMOIONIQUE.

### III.1. Considérations électroniques.

Il n'avait été envisagé de lier ce type de conversion qu'à des puissances électriques supérieures à 100 watts en raison de la température élevée requise pour la cathode émettrice [ 1 ] . Cependant la disponibilité de radioéléments à vie longue et à puissance spécifique moyenne (0,55 W/g) [2 ] et le fait que l'on se préoccupe peu du rendement ont conduit à la réalisation de modules expérimentaux de quelques milliwatts par Mc DONNELL DOUGLAS Co. [ 3 ].

Dans l'étude citée, les auteurs, à notre avis, se montrent très optimistes quant aux valeurs atteintes par le rendement car ils font déduction des pertes thermiques dans la structure, et leur importance relative est très grande au niveau d'une source de 1 W. Quoi qu'il en soit, les générateurs proposés sont décrits à leur tension optimale de fonctionnement qui reste inférieure à 0,3 volt. L'exemple à tension de sortie de 0,6 volt mentionné au tableau III de cette publication suppose un travail de sortie du collecteur de 1,1 volt, qui, à notre connaissance, n'a pas encore été prouvé.

En se plaçant d'un point de vue différent, nous verrons qu'il est cependant possible d'atteindre une tension de sortie de 1 volt avec ce type de générateur.

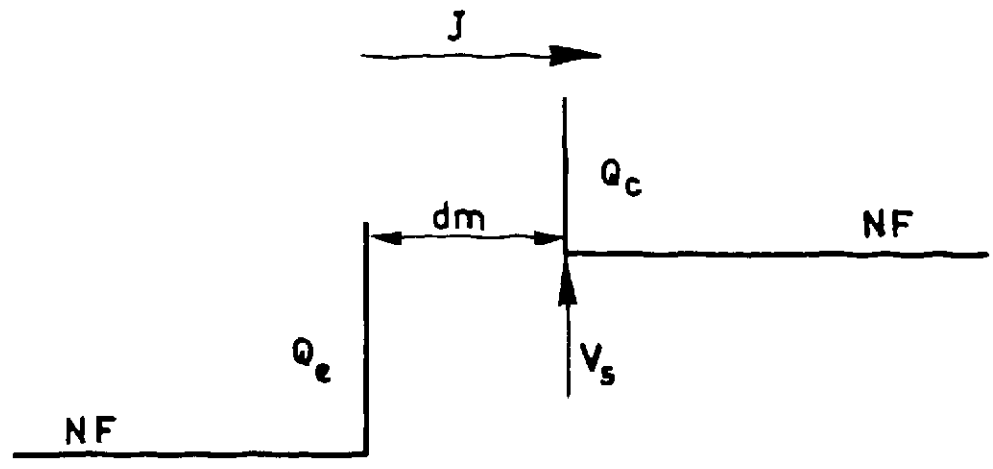



FIGURE 1 - Diagramme d'énergie potentielle.

La densité de courant J susceptible de transiter de l'émetteur au collecteur d'une diode à vide est donnée par l'équation de Richardson-Dushman qui s'applique ici au cas où la surface du collecteur est négative par rapport à l'émetteur :

$$J_{A/m^2} = 1,2.10^6 \; T_e^{\,2} \exp - \frac{e\,(V_S + \phi_c)}{k\,T_e}$$

Les considérations de charge d'espace exigent que le collecteur se situe par rapport à l'émetteur en-deça d'une distance $d_m$ définie par :

$$d^2_m = 9,664 \,.\, 10^{-6} \left( \frac{k\,T_e}{e} \right)^{3/2} J^{-1}$$

La tabulation de ces deux grandeurs conduit au Tableau I qui donne pour diverses tensions de sortie $V_S$ et diverses densités de courant J la température de l'émetteur et l'espacement maximum requis.

| $T_e$ °K / $d_m$ µ | J = 0,2 mA | 1 mA | 2 mA | 5 mA |
|---|---|---|---|---|
| $V_S$ = 1 V | 1 060 / 360 | 1 130 / 170 | 1 160 / 120 | 1 200 / 80 |
| $V_S$ = 1,5 V | 1 260 / 410 | 1 330 / 190 | 1 360 / 140 | 1 420 / 90 |
| $V_S$ = 2 V | 1 450 / 460 | 1 540 / 200 | 1 580 / 150 | 1 640 / 100 |

TABLEAU I : Température d'émetteur pour diverses combinaisons (V, J).

Le travail de sortie du collecteur est pris égal à 1,5 volt (valeur couramment mesurée).

Il est évident que rien n'est possible si l'émetteur, c'est-à-dire la capsule contenant le radioélément, n'atteint pas au moins 1 060 °K, c'est-à-dire en gros 800 °C.

III.2. Calcul de la capsule de radioélément (Fig. 2 )

En se référant à [ 2 ] la source contiendrait environ 2 grammes de $^{238}Pu$ sous une forme à choisir en fonction du gainage. Appelons $v_o$ le volume interne réservé à cette source dans la capsule pour permettre le dégagement d'hélium. L'épaisseur du gainage "e" est dictée par les conditions de sécurité, mais il est bien évident que la réduction du volume mort $v_o$ et de l'épaisseur du gainage favorise l'obtention de températures élevées.

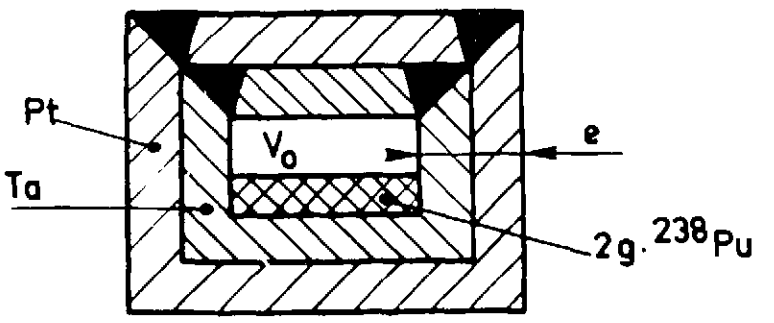



FIGURE 2 -

La protection et les impératifs de sécurité peuvent être satisfaits, lorsque la source est gainée en paroi mince, par un encapsulage épais du générateur complet. Nous conserverons donc dans ce calcul toute liberté sur la source.

En fait, il est à peu près vain de concevoir une capsule d'aussi faible puissance si l'on autorise une perte de chaleur par rayonnement par toute la surface externe. La capsule considérée sera donc montée entre deux rondelles d'isolant thermique, de telle sorte que seule la face cylindrique soit utilisée (fig. 3 ).

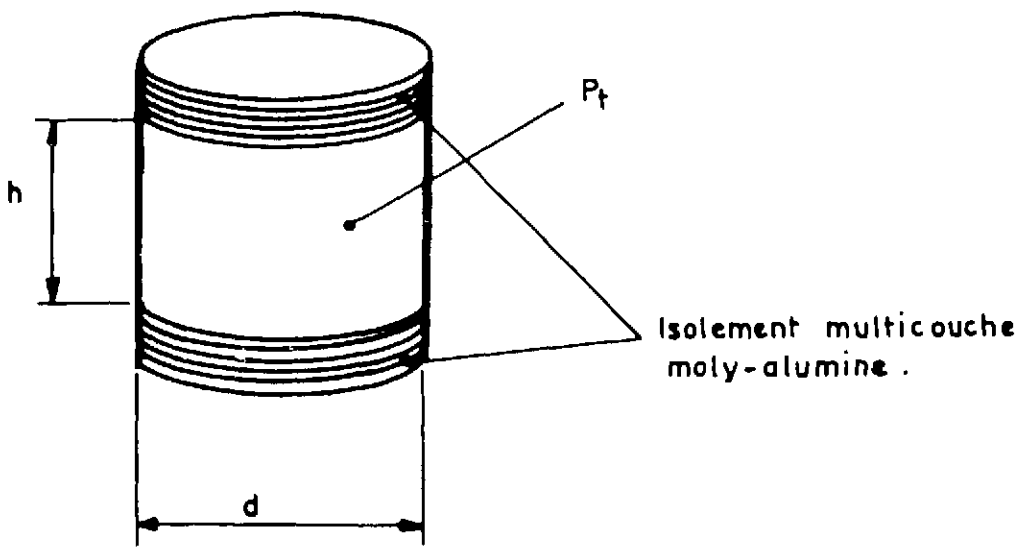



FIGURE 3 - Capsule isolée.

A cette température et sous vide, l'isolement thermique et le maintien de la capsule seront assurés par environ 2 mm d'isolant multicouche

moly- alumine qui a été déjà mentionné dans [ 1 ] et se trouve commercialisé aux U.S.A. sous la dénomination de "multi-foil". Ses propriétés thermiques sont remarquables ainsi qu'en témoigne la courbe publiée dans [ 4 ] et que nous reproduisons ici (fig. 4 ).

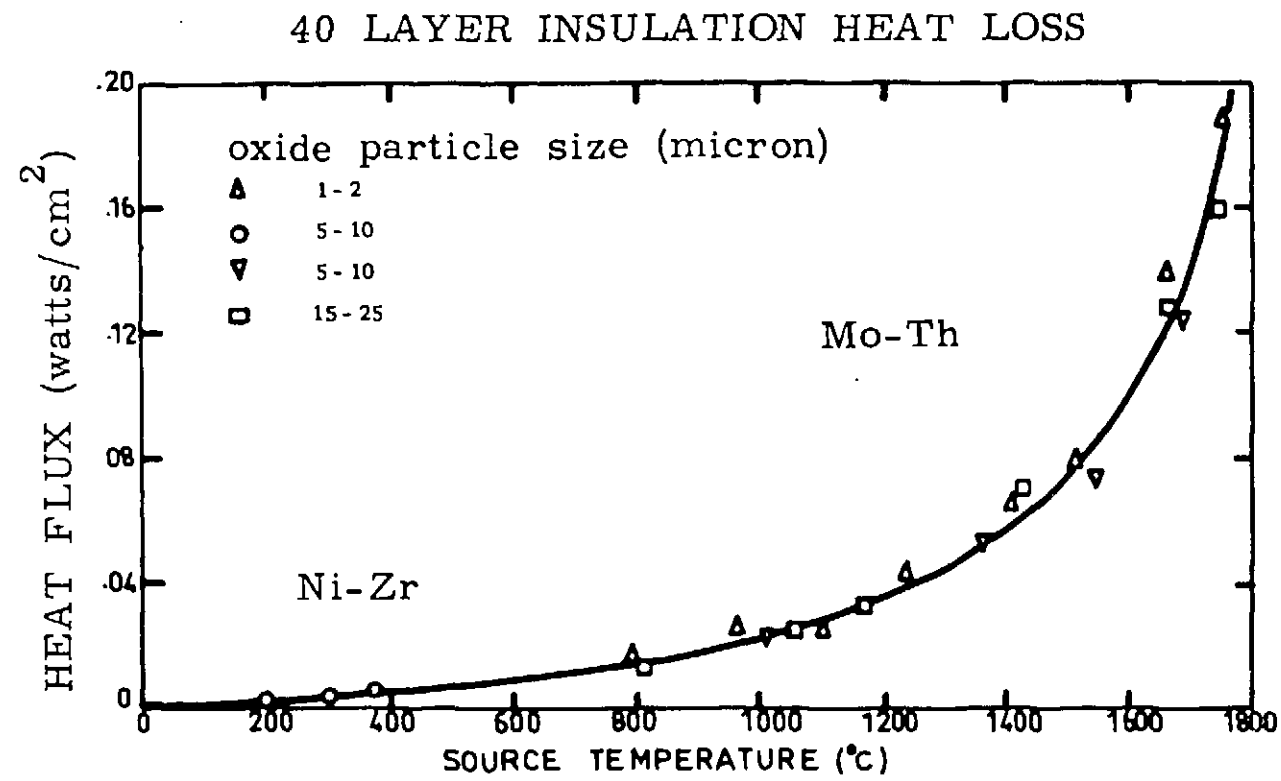



FIGURE 4 - Perte de chaleur dans l'isolement "multi-foil" (J. DUNLAY - E7).

Dans ces conditions, la perte de chaleur des faces protégées est inférieure à 0,02 $W/cm^2$ à 800 °C.

Compte tenu de ces hypothèses la température d'équilibre de la source peut être calculée en fonction de sa hauteur h (en gardant le volume interne constant) avec combinaison des divers paramètres :

| | |
|---|---|
| e | épaisseur du gainage |
| $\varepsilon$ | émissivité |
| $v_o$ | volume réservé à la source |

pour une puissance thermique de 1 watt.

Les équations utilisées sont les suivantes :

Diamètre de la capsule :

$$d = 2 \left[ \sqrt{\frac{v_o}{\pi \ (h - 2\ e)}} + e \right] \qquad (I\ A)$$

Volume de la capsule :

$$v = \pi\ h \left[ \sqrt{\frac{v_o}{\pi \ (h - 2\ e)}} + e \right]^2 \qquad (I\ B)$$

Surface latérale ou surface utile rayonnante :

$$s = 2\pi\ h \left[ \sqrt{\frac{v_o}{\pi\ (h - 2\ e)}} + e \right] \qquad (I\ C)$$

Le système est à l'équilibre thermique sous vide. Ainsi, nous pouvons écrire que l'énergie interne est exactement compensée par l'énergie rayonnée à travers s et par les pertes par conduction.

$$W_o = \varepsilon\ \sigma\ s\ T^4 + \frac{\pi\ d^2}{2}\ \varphi_c$$

$\varphi_c$ = densité de flux thermique s'écoulant par conduction dans le support isolant.

D'après les courbes de la figure 4 on peut admettre $\varphi_c$ sensiblement constant dans l'intervalle de température de fonctionnement. Cette approximation étant faite, il est commode d'expliciter T, soit en fonction de h et de v, soit en fonction de h et de s suivant la commodité des calculs.

$$T = \sqrt[4]{\frac{1}{2\sqrt{\pi}\,\varepsilon\,\sigma}\sqrt{\frac{v}{h}}\left[\frac{W_o}{v} - \frac{2\varphi_i}{h}\right]} = \sqrt[4]{\frac{1}{2\pi\varepsilon\sigma}\left[\frac{2\pi W_o}{s} - \frac{s\varphi_c}{h^2}\right]} \quad \text{(II)}$$

Si on veut travailler avec des températures élevées (thermoionique et thermophotovoltaïque) on a intérêt à réaliser de faibles émissivités.

Pour T voisin de 1 000 °K un gainage en tantale poli donne $0,05 \leq \varepsilon < 0,1$ un gainage en platine $\varepsilon = 0,1$ et avec une couche de rhodium on peut atteindre $\varepsilon = 0,05$.

En reprenant les hypothèses faites, on calcule par l'intermédiaire des relations ci-dessus, les dimensions et la température d'équilibre d'une source de 2 grammes de $^{238}Pu$ soit 1 watt thermique.

On prend $\varphi_c = 0,02$ watt $cm^{-2}$

avec $700 \leq T \leq 1\,200$ °K

Trois cas sont considérés :

a) Il n'existe pas de volume d'expansion pour l'hélium

$$W_o = 1 \text{ watt} \quad \text{d'où} \quad v_o = 0,12 \text{ cm}^3 \left(\frac{v_o}{v_p} = 1\right)$$

b) On prévoit un volume d'expansion pour l'hélium égal à celui de la source :

$$v_o = 0,24 \text{ cm}^3 \left(\frac{v_o}{v_p} = 2\right)$$

c) On prévoit un volume d'expansion pour l'hélium égal à trois fois celui de la source :

$$v_o = 0,48 \text{ cm}^3 \left(\frac{v_o}{v_p} = 4\right)$$

et on admet 3 épaisseurs possibles du gainage :

e = 0,05 cm (1 feuille de tantale)

e = 0,1 cm (1 feuille de tantale)

e = 0,2 cm (1 feuille tantale + 1 feuille platine).

La hauteur de la capsule est prise comme variable dans l'intervalle :

$2\,e < h \leqslant 0{,}8$ cm.

Les calculs sont effectués à la calculatrice "OLIVETTI PROGRAMMA 101". Il existe un optimum dimensionnel que montrent parfaitement les courbes de la figure 5 .

En considérant les seules combinaisons qui permettent d'atteindre une température significative pour la thermoionique, et en choisissant les hauteurs de capsule qui rendent minimale la surface externe, on aboutit au Tableau II.

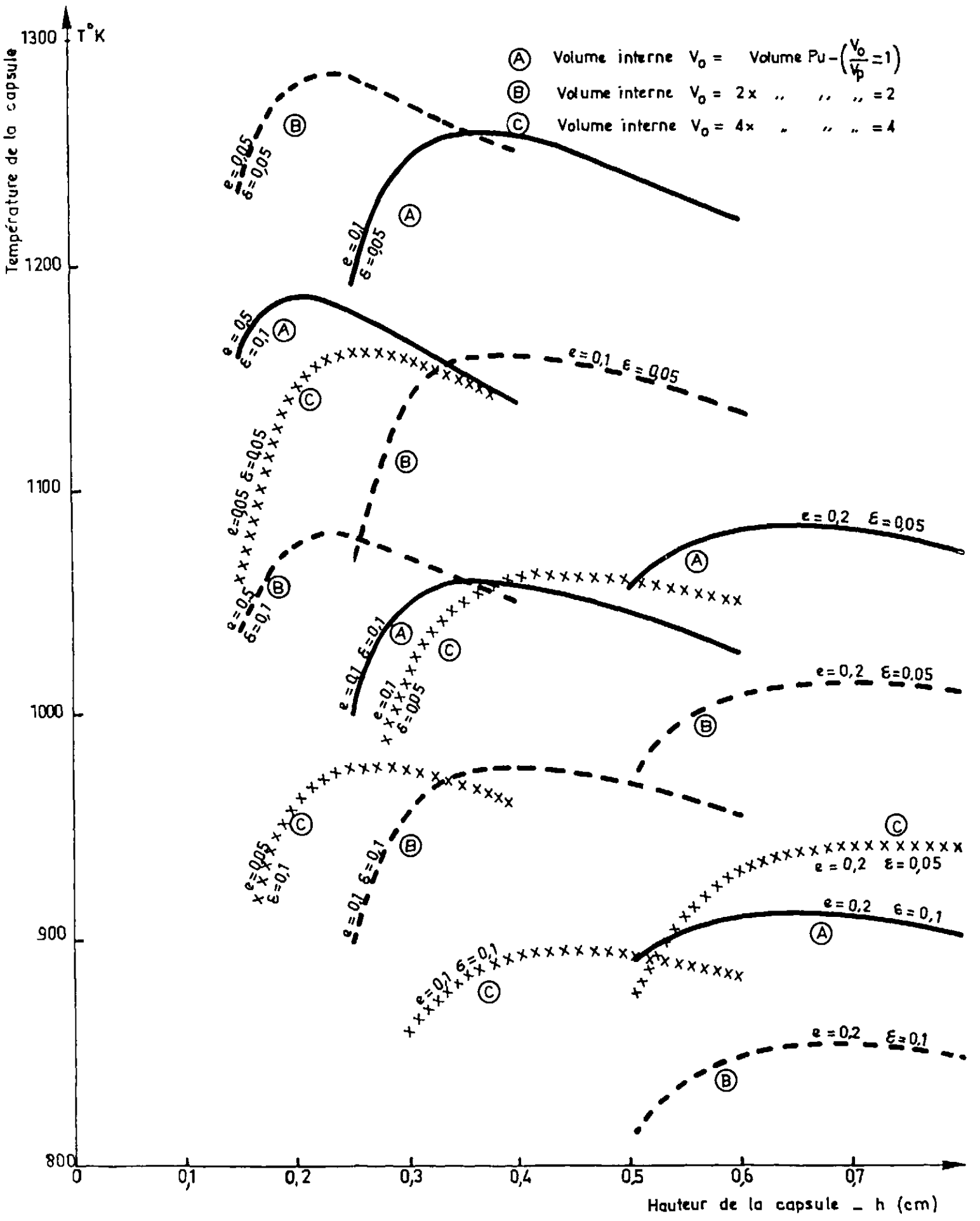



Fig 5 _ VARIATIONS DE LA TEMPERATURE D'UNE CAPSULE CONTENANT 2g. DE $^{238}Pu$ ( 1 WATT.) EN FONCTION DE SES DIMENSIONS ET DE SON EMISSIVITE ( Isolant Multi - foil 1mm sur les bases )

| | Gainage | Capsule | | | Température équilibre °K | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | h (mm) | d (mm) | Slat($cm^2$) | $\varepsilon$ = 0,1 | $\varepsilon$ = 0,05 |
| $v_o = v_p$ | e = 0,5 mm | 2 | 13,4 | 0,84 | 1 185 | 1 408 |
| | = 1 | 4 | 10,7 | 1,35 | 1 060 | 1 260 |
| | = 2 | 6 | 13 | 2,4 | 912 | 1 084 |
| $v_o = 2\ v_p$ | e = 0,5 mm | 2 | 18,5 | 1,16 | 1 078 | 1 281 |
| | = 1 | 4 | 14,4 | 1,8 | 976 | 1 161 |
| | = 2 | 7 | 14,0 | 3,1 | 853 | 1 015 |
| $v_o = 4\ v_p$ | e = 0,5 mm | 2,5 | 21,2 | 1,7 | 975 | 1 160 |
| | = 1 | 5 | 16,3 | 2,55 | 890 | 1 059 |
| | = 2 | 8 | 16,4 | 4 | 790 | 940 |

TABLEAU II - Capsules pour générateurs thermoioniques.

III.3. Générateurs réalisables dans la somme du milliwatt.

La comparaison des tableaux I et II conduit directement aux caractéristiques des générateurs que l'on peut penser réaliser simplement. Les générateurs à courant fort (supérieur à 99 mA) sont exclus en raison de l'espacement interélectrode maximal qui devient technologiquement difficile à réaliser en dessous de 100 microns.

| $v_o / v_p$ | $\varepsilon$ | e (mm) | $V_S$ (volt) | $J_S$ (mA) | $W_3$ (mW) | $T_K$ | Note |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,05 | 0,5 | 1,5 | 4,7 | 7 | 1 408 | A, B |
| 1 x | 0,05 | 2 | 1 | 0,73 | 0,7 | 1 084 | B |
| 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,2 | 0,2 | 1 060 | C, A |
| 2 | 0,05 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 160 | B, A |
| 2 | 0,1 | 0,5 | 1 | 0,29 | 0,29 | 1 078 | C, A |
| 4 | 0,05 | 0,5 | 1 | 2 | 2 | 1 160 | B, A |
| 4 | 0,05 | 1 | 1 | 0,2 | 0,2 | 1 059 | C, A |

A : protection reportée à l'extérieur du générateur

B : capsule de platine

C : capsule de tantale

x : générateur décrit fig. 6

TABLEAU III : Performances des générateurs pour source 1 W.

Le Tableau III chiffre quelques générateurs-type d'après les calculs ci-dessus. En particulier, il est apparent qu'un gainage mince est nécessaire, hormis le cas où l'on pourrait accomoder l'hélium dégazé à l'intérieur du radioélément.

Pour être complet, il faut mentionner que les travaux de sortie d'émetteur et de collecteur qui rendent possible de telles performances sont assurés par la présence de vapeur de césium. La pression de vapeur qui doit régner dans l'enceinte suppose dans la majorité des cas une température de paroi autour

de 100 °C, ce qui impose une enveloppe externe séparée du convertisseur par une isolation thermique convenable.

La figure 6 donne, à l'échelle 4, la géométrie d'un tel générateur. Son poids peut être évalué à 50 g.

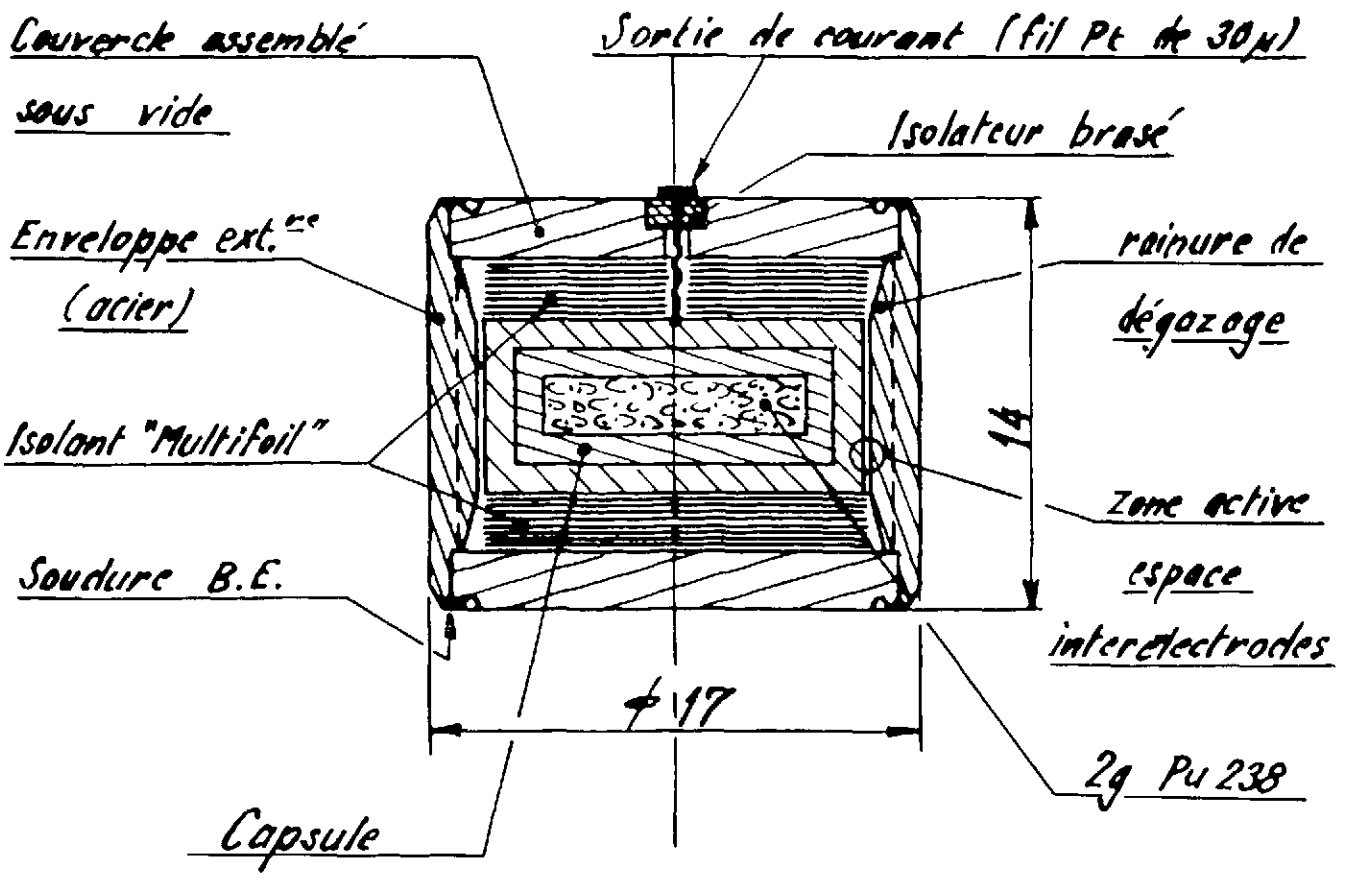



FIGURE 6 - Générateur thermoionique - 1 V - 700 µW - 35 $C_i$ - 1 W th - 50 g -

La réalisation d'un tel générateur est d'abord une question de source, mais il est important de passer en revue les autres modes de conversion avant d'esquisser un tableau général de comparaison.

## IV. CONVERTISSEURS UTILISANT L'EFFET THERMOPHOTOVOLTAIQUE.

### IV.1. Principe et relations utilisées pour le calcul.

Le rayonnement électromagnétique pénétrant dans un semi-conducteur produit dans le réseau cristallin de celui-ci des paires électron-trou. La sensibilité dépend de la longueur d'onde.

Un photon d'énergie $h\nu$ cède son énergie à un électron de valence et crée une paire électron-trou si

$$h\nu > E_G$$

$E_G$ : bande interdite du semiconducteur.

Dans le cas d'une jonction, les paires créées diffusent vers la zone de transition, le champ électrique régnant dans cette partie les sépare et il s'établit une différence de potentiel aux bornes du cristal. Si ces bornes sont reliées à une résistance R un courant électrique traverse le circuit.

Le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert sont donnés respectivement par les expressions :

$$I_{cc} = q\,N\,Q\,(1 - r) \qquad \text{(III.A)}$$

$$V_o = \frac{kT}{q}\,\mathrm{Log}\,(1 + \frac{I_{cc}}{I_o}) \qquad \text{(III.B)}$$

q : charge de l'électron

k : constante de BOLTZMANN

N : nombre de photons incidents d'énergie $h\nu > E_G$

Q : rendement de collection ou fraction de paires atteignant la jonction

r : coefficient de réflexion du semiconducteur

$T_o$ : température de la jonction

$I_o$ = courant inverse de la jonction

Le courant en charge est exprimé par la relation :

$$I = I_{cc} - I_o \left[\exp \frac{qV}{kT} - 1\right] \qquad (IV)$$

La puissance en charge présente un maximum pour un point $V_m$ $I_m$ de la caractéristique (fig. 7 ) $V_m$ est défini par l'équation différentielle

$$\frac{d}{dI} (VI) = V + I \frac{dV}{dI} = 0 \qquad (V)$$

Ces considérations impliquent l'introduction d'un facteur de courbe $\beta$ , dépendant de $\frac{I_{cc}}{I_o}$ et défini à l'optimum tel que :

$$V_m = \beta_v V_o \qquad \text{et} \qquad I_m = \beta_I I_{cc} \qquad \text{avec}$$

$$\beta = \beta_v \beta_I \qquad \text{et} \qquad P_m = \beta V_o I_{cc} \qquad (VI)$$

IV. 2. Choix du semiconducteur à utiliser.

Ce choix est déterminé compte tenu :

- de la répartition spectrale de l'énergie émise par la capsule,
- du seuil d'efficacité pour la capture des photons, constitué par la bande interdite du semiconducteur,

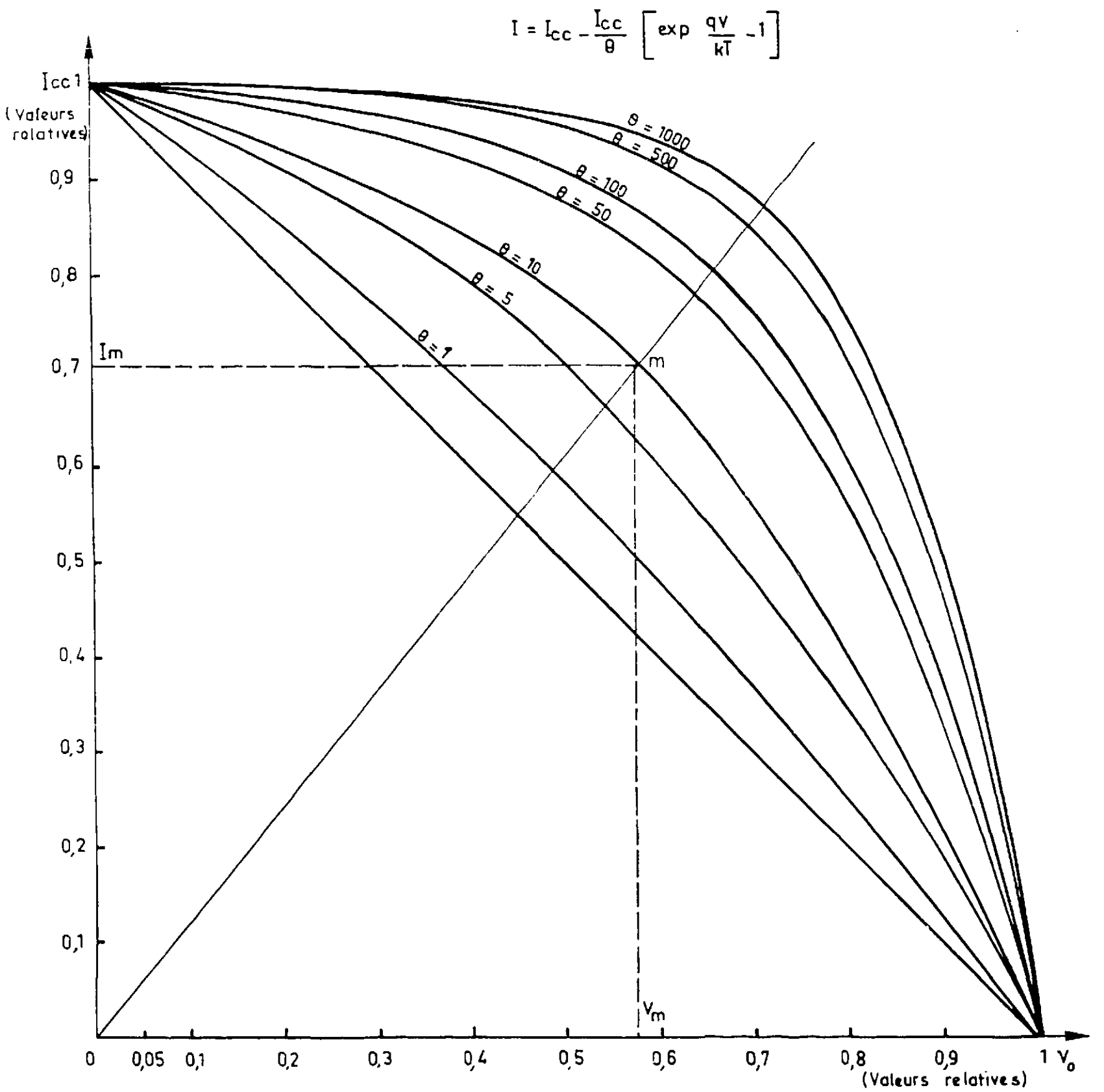



Fig 7 — CARACTERISTIQUES COURANT TENSION SUIVANT DIFFERENTS RAPPORTS

$$\theta = \frac{I_{cc}}{I_o}$$

- des valeurs respectives du courant de court-circuit $I_{cc}$ et du courant de saturation $I_o$ de la jonction, dépendant tous deux de $E_G$.

La température de la capsule étant bien définie, le nombre de photons par $cm^2$, convertible en paires électron-trou est obtenu en intégrant la relation de PLANCK sur l'ensemble des valeurs de $\lambda$ tel que $\lambda \leqslant \frac{hc}{E_G}$

$$\frac{N}{S} = 2\pi \int_{\lambda = 0}^{\lambda = \frac{hc}{E_G}} \varepsilon_\lambda \quad E_{\lambda T} \, d\lambda \qquad \text{(VII)}$$

Pour calculer $I_{cc}$, il est commode d'effectuer une approximation en considérant le domaine restrictif où $\varepsilon_\lambda$ et r ne dépendent plus de $\lambda$ et en admettant un rendement de collection Q égal à l'unité.

Dans ces conditions, la densité de courant de court-circuit est :

$$J_{cc} = 2\pi q (1-r) \varepsilon h c^2 \int_{\lambda = o}^{\lambda = hc/E_G} \lambda^{-5} \exp. \left(- \frac{hc}{kT\lambda}\right) d\lambda =$$

$$= \frac{2\pi q \varepsilon kT}{h^3 c^2} (1-r) \left[E_G^2 + 2\, kT\, E_G + 2\, k^2 T^2\right] \exp\left(- \frac{E_G}{kT}\right) \qquad \text{(VIII)}$$

$\varepsilon$ : émissivité totale

h : constante de PLANCK

c = vitesse de la lumière.

La détermination de la densité de courant de saturation $J_o$ en fonction de $E_G$ est obtenue en considérant les relations entre $J_o$ et la concentration

intrinsèque $n_i$ [5] [6] :

$$J_o = q\,x\,\frac{n_i}{\tau} \qquad \text{- courant de génération} \qquad \text{(IX A)}$$

$$J_o = q\,n_i^2\left[\frac{D_P}{L_N N_D} + \frac{D_N}{L_p N_A}\right] \text{- Courant de diffusion} \qquad \text{(IX B)}$$

avec

$$n_i = 2\left[\frac{2\pi m^* K T_o}{h^2}\right]^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2 K T_o}\right) \qquad \text{(IX C)}$$

$m^*$ : masse effective de l'électron

$D_n$ $D_p$ : constantes de diffusion respectives des milieux N et P

$L_n$ $L_p$ : longueurs de diffusion respectives des milieux N et P

$N_A$ $N_D$ : concentrations respectives des accepteurs et des donneurs

$\tau$ : durée de vie

x : profondeur de la jonction.

En se reportant à la courbe représentant $n_i$ en fonction de $E_G$ à $T_o$ = 300 °K, [6], figure 8 , on établit une relation entre $J_o$ et $E_G$ de la forme :

$$J_o \simeq A\ T_o^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2\ k\ T_o}\right) \qquad \text{(X)}$$

et en accord avec des valeurs relevées expérimentalement sur différents semi-conducteurs à jonction (NP) [7] [8] [9].

Les variations respectives de $J_o$ et $J_{cc}$ en fonction de $E_G$, sont représentées par les courbes de la figure 9 . Nous avons effectué les calculs avec une calculatrice "OLIVETTI P.101" pour différentes températures de la capsule : T = 800, 1 000 et 1 200 °K. En admettant :

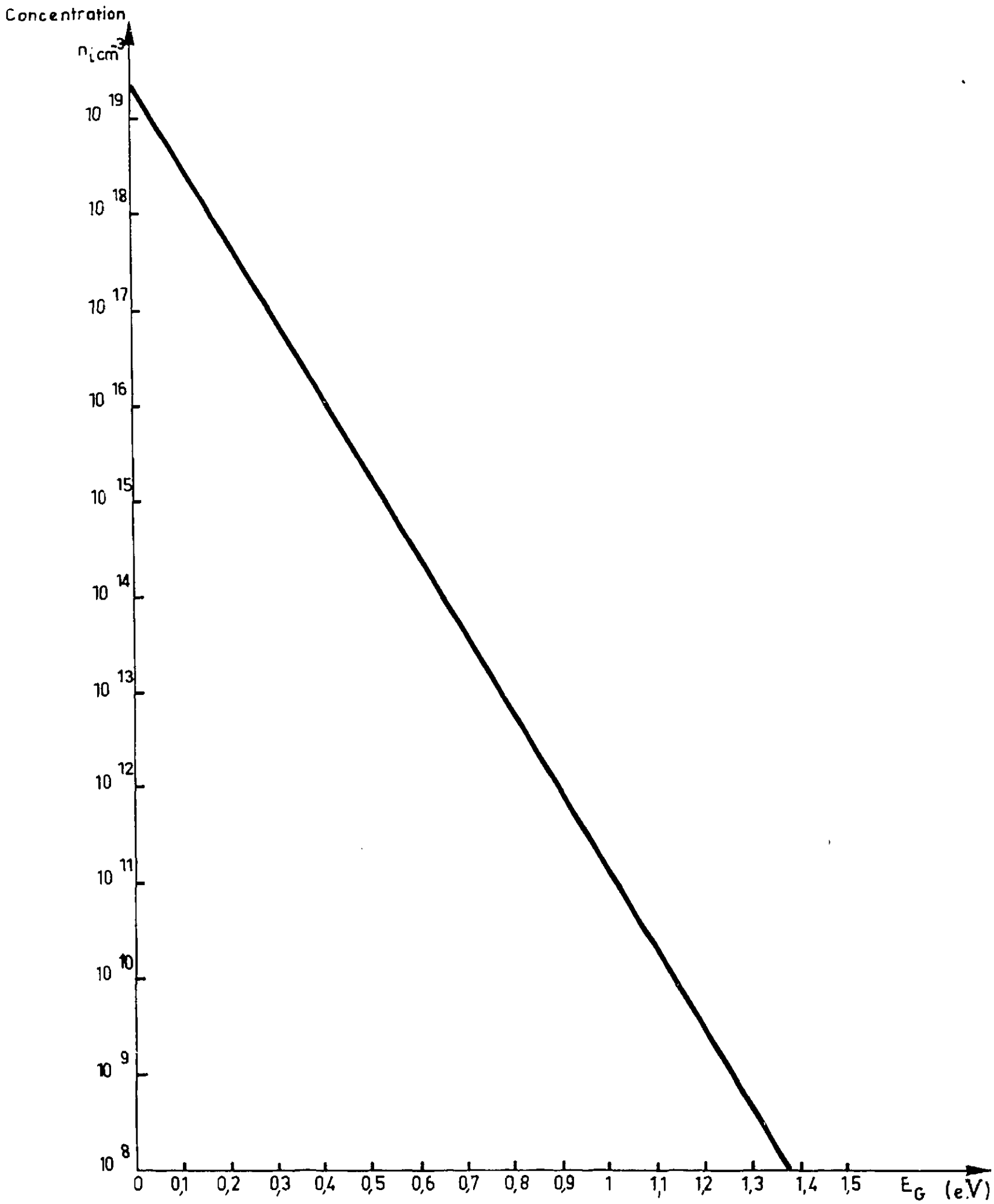
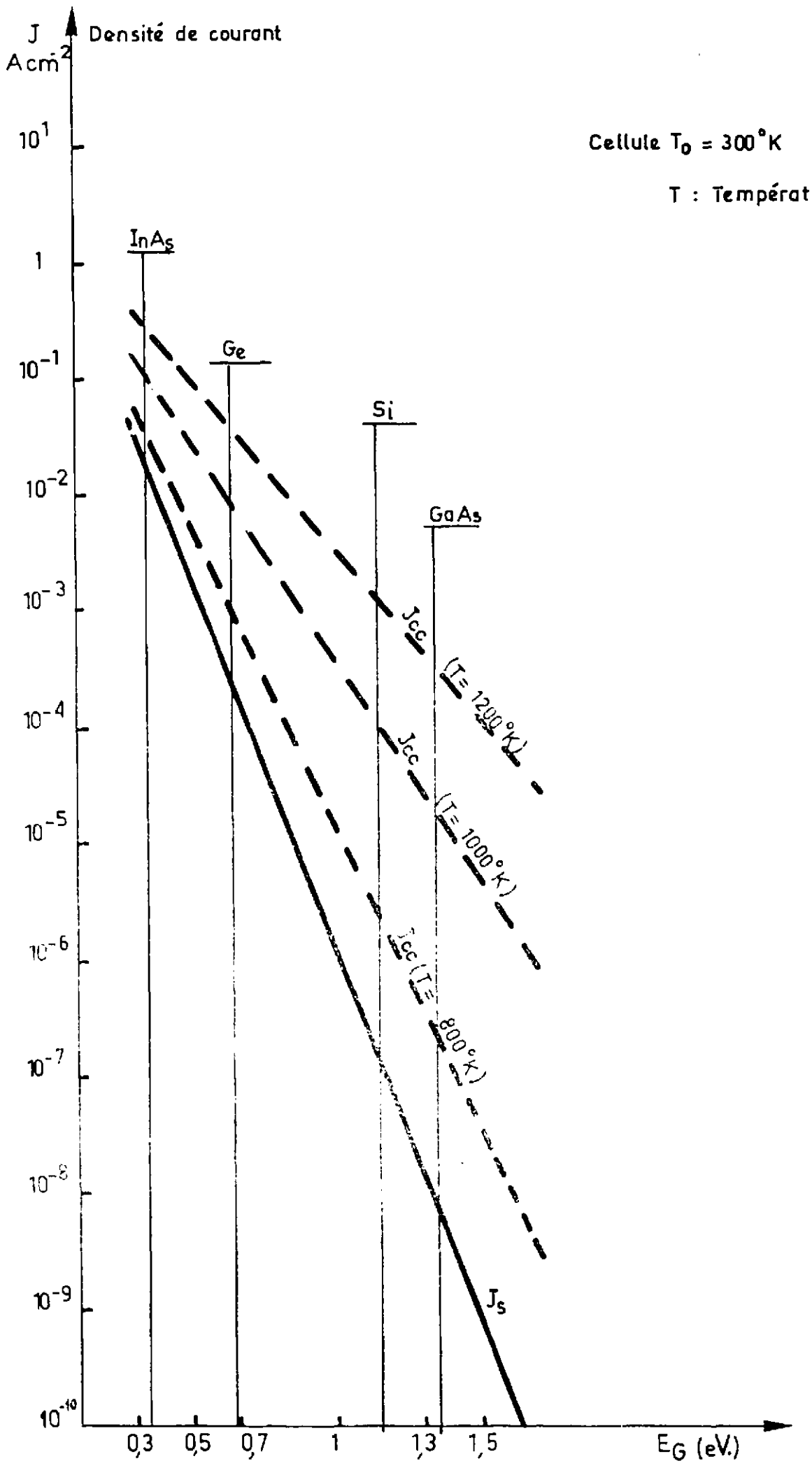



Fig 8 _ RELATION ENTRE LA CONCENTRATION INTRINSEQUE DES PORTEURS ET LA BANDE INTERDITE $E_G$ D'après IOFFE (6)




Cellule $T_0 = 300°K$

T : Température de la source ($\varepsilon = 0,1$)

Fig 9 - VARIATIONS DU COURANT DE SATURATION $J_0$ ET DU COURANT DE COURT CIRCUIT $J_{cc}$ AVEC LA BANDE INTERDITE $E_G$

- une émissivité totale du matériau de gainage $\varepsilon = 0,1$
- un coefficient moyen de réflexion $r = 0,75$
- et une température de jonction $T_o = 300$ °K;

Le choix du semiconducteur est guidé par les considérations suivantes :

a) atteindre 1 volt avec un nombre restreint de cellules (quelques dizaines) ce qui implique en raison de l'équation (III B) un rapport $\frac{J_{cc}}{J_o} > 5$.

b) Obtenir une intensité en charge de l'ordre du milliampère.

Ces conditions ne sont remplies aux températures voisines de 1 000 °K que pour le germanium et nous traiterons la suite de cette étude avec ce matériau.

## IV. 3. Calcul d'un générateur (T. P. V.) constitué de jonctions au germanium et utilisant une source de $^{238}Pu$ de 1 watt thermique.

### IV. 3. 1. Configuration et dimensions des éléments convertisseurs

Etant donné la géométrie des capsules décrites au chapitre III, on dispose les jonctions sur la face interne d'un cylindre, coaxial à celui de la source.

Si $\delta$ est la distance capsule-jonction, la surface totale de l'ensemble des éléments convertisseurs est :

$$S = s + 2 \pi \delta h \qquad \text{on admet} \qquad \delta \leqslant 0,1 \text{ cm} \qquad \text{(XI A)}$$

et la surface d'une cellule est :

$$s_q = \frac{S}{q_j}$$ si $q_j$ est le nombre de jonctions. (XI B)

IV.3.2. Densité de courant de court-circuit.

Le précédent calcul du courant de court-circuit est conditionné par certaines approximations. L'utilisation précise du germanium, nous permet de reconsidérer le problème d'une manière plus rigoureuse.

Ainsi, le rendement de collection Q n'est généralement pas égal à l'unité. Les recombinaisons en volume et en surface dans le cristal peuvent diminuer sensiblement le nombre de charges parvenant à la zone de transition. Cependant, certains auteurs [ 9 ] [10] montrent que $Q \simeq 1$ si :

a) les vitesses de recombinaison sont faible,

b) la profondeur de la jonction est petite par rapport aux longueurs de diffusion : $x \ll L$.

c) le coefficient d'absorption est suffisamment grand (pour le germanium = $a \geq 500\ cm^{-1}$).

Les deux premières conditions sont réalisables technologiquement [10] [12]. La troisième n'est effective que pour un certain seuil d'énergie des photons $E_s$ .

La courbe de la figure 10 montre la variation de a en fonction de $h\nu$ ou de $\lambda$ [10] [11]. On voit que :

$a \geq 500\ cm^{-1}$ implique $h\nu \geq 0,8$ eV ou $\lambda \leq 1,5\ \mu$

pour $T_o = 300$ °K

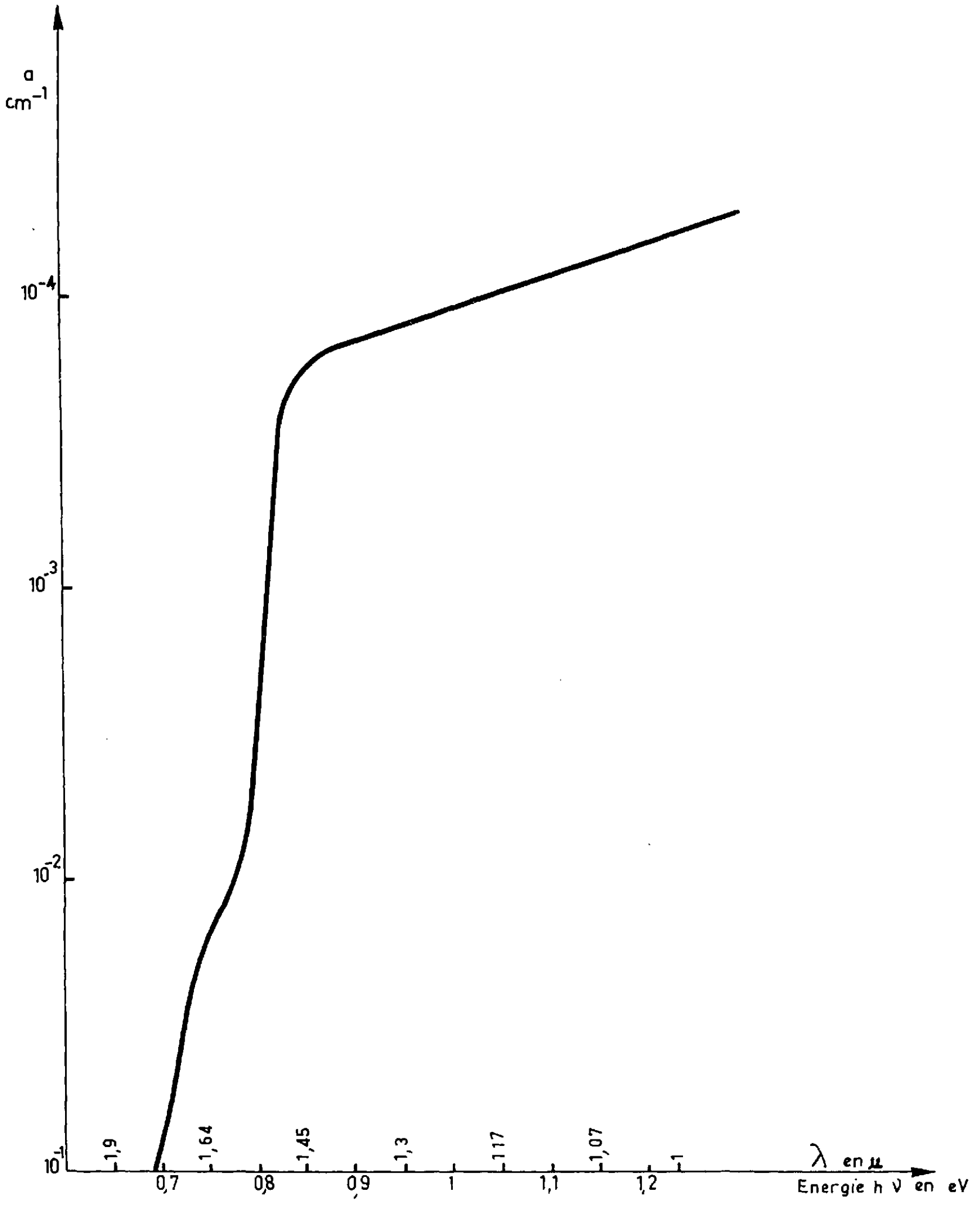



Fig 10 _ VARIATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION [a] DU GERMANIUM AVEC LA LONGUEUR D'ONDE ET L'ENERGIE

La condition Q = 1 nous conduit à changer les bornes de l'intervalle d'intégration de l'expression (VIII). Ainsi pour le germanium, $E_G$ devient $E_s = 0,8$ eV et

$$J_{cc} = \frac{2 \pi \varepsilon q k T (1-r)}{h^3 c^2} [E_s^2 + 2 E_s kT + 2 k^2 T^2] \exp ( - \frac{E_s}{kT} ) \qquad (XII)$$

IV. 3. 3. Caractéristiques en charge et rendement.

Compte tenu de la géométrie adoptée, on détermine les caractéristiques en charge optimale pour une jonction fictive cylindrique.

Courant : $$I_m = \beta_I s J_{cc} \qquad (XIII A)$$

Tension : $$V_m = \beta_v \frac{kT}{q} \text{ Log } (1 + \frac{J_{cc} s}{J_o S}) \qquad (XIII B)$$

Puissance max. : $$P_m = V_m I_m \qquad (XIII C)$$

Rendement : $$\eta : \frac{P_m}{W_o} \qquad (XIII D)$$

$W_o$ : puissance thermique du radioisotope.

Le nombre $q_j$ de jonctions à disposer en série pour obtenir 1 volt est :

$$q_j = \frac{1}{V_m} \qquad (XIV)$$

et le courant délivré par ces $q_j$ jonctions en série est celui du générateur.

$$I = \frac{I_m}{q_j} \qquad (XV)$$

### IV. 3. 4. Evaluation des caractéristiques en charge et projet d'un générateur.

En partant des expressions reliant la géométrie d'une capsule, son émissivité et sa température (chapitre III); nous avons calculé les caractéristiques en charge d'un ensemble (Jonctions Ge/Source $^{238}Pu$ : 1 W) en utilisant les relations : I, II, XII, XIII, XIV et XV.

On admet :

- d'une part pour la source, deux valeurs possibles de l'émissivité de la capsule ;

$\varepsilon = 0,1$ et $\varepsilon = 0,05$.

- d'autre part pour les jonctions de germanium :

$r = 0,35$ (valeur moyenne) [14]

$J_o = 10^{-4}$ A cm$^{-2}$ à 300 °K.

Avec les technologies actuelles, nous pensons que des jonctions avec des courants de saturation de cet ordre de grandeur sont réalisables [9] [13][14]

Les calculs sont effectués avec une calculatrice "OLIVETTI P 101" en tenant compte d'un coefficient géométrique évalué à 2/3.

Les résultats sont présentés dans le tableau IV et exprimés par les courbes de la figure 11 .

Nous nous sommes limités aux cas où $T \leqslant 1\,000$ °C (1 273 °K).

On remarque l'incidence sensible sur les performances, de l'épaisseur du gainage de la capsule et du volume d'expansion nécessaire à l'hélium.

Nous avons établi un projet de générateur thermophotovoltaïque en nous basant sur un des résultats où la température de la source : 1 160 °K, l'épaisseur du gainage : 1 mm et la présence d'un volume d'expansion pour l'hélium ($\frac{V_o}{V_p} = 2$) sont du domaine des réalisations possibles.

Nous donnons tableau V les caractéristiques et les performances de ce générateur. Les plans sont représentés figure 12

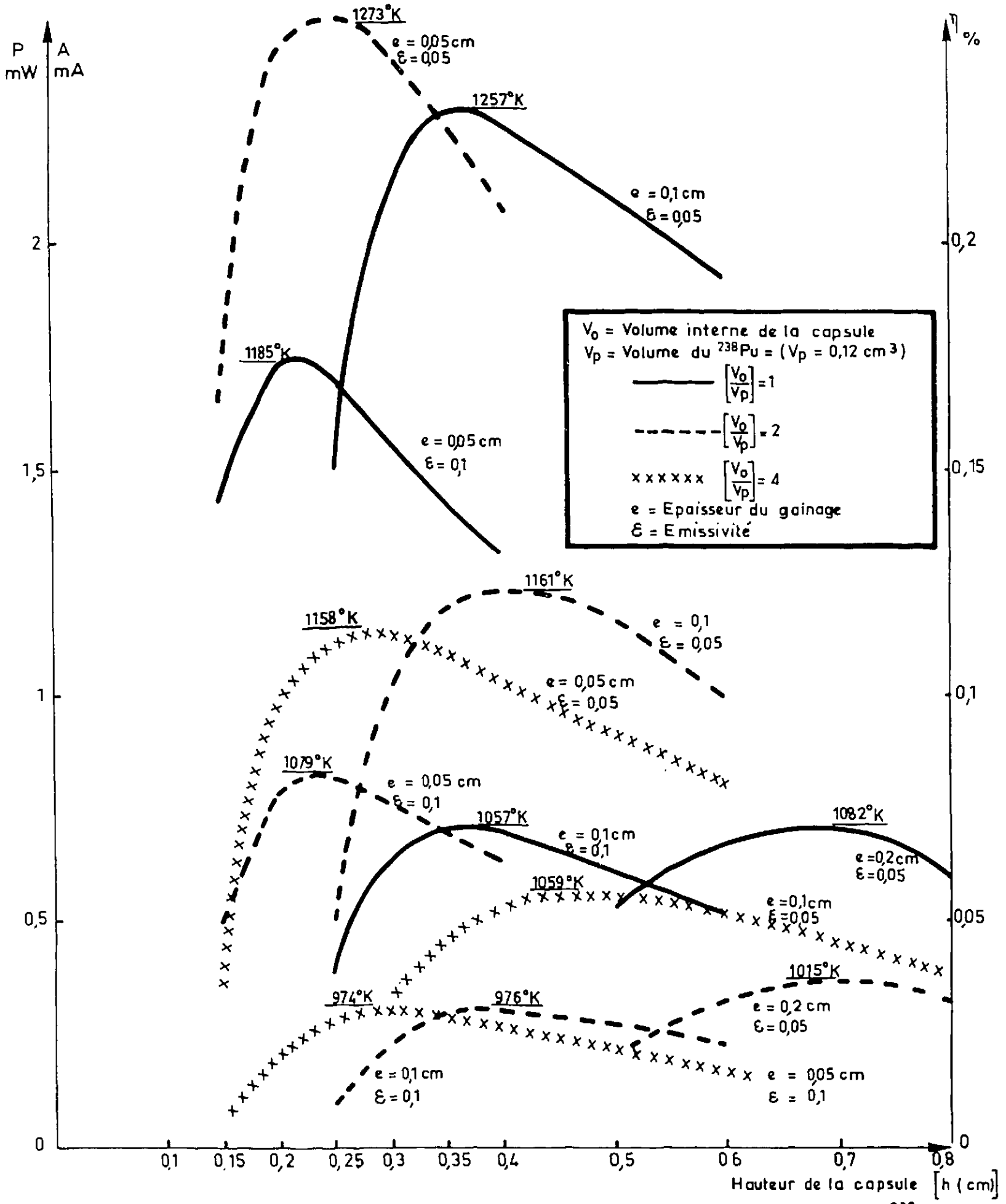



Fig 11 _ GENERATEURS TPV 1VOLT AVEC JONCTIONS NP AU GERMANIUM ET SOURCE $^{238}Pu$ [2 GRAMMES ↔ 1 WATT THERMIQUE]. PUISSANCE, COURANT ET RENDEMENT SUIVANT LES DIMENSIONS DE LA CAPSULE ET SON EMISSIVITE

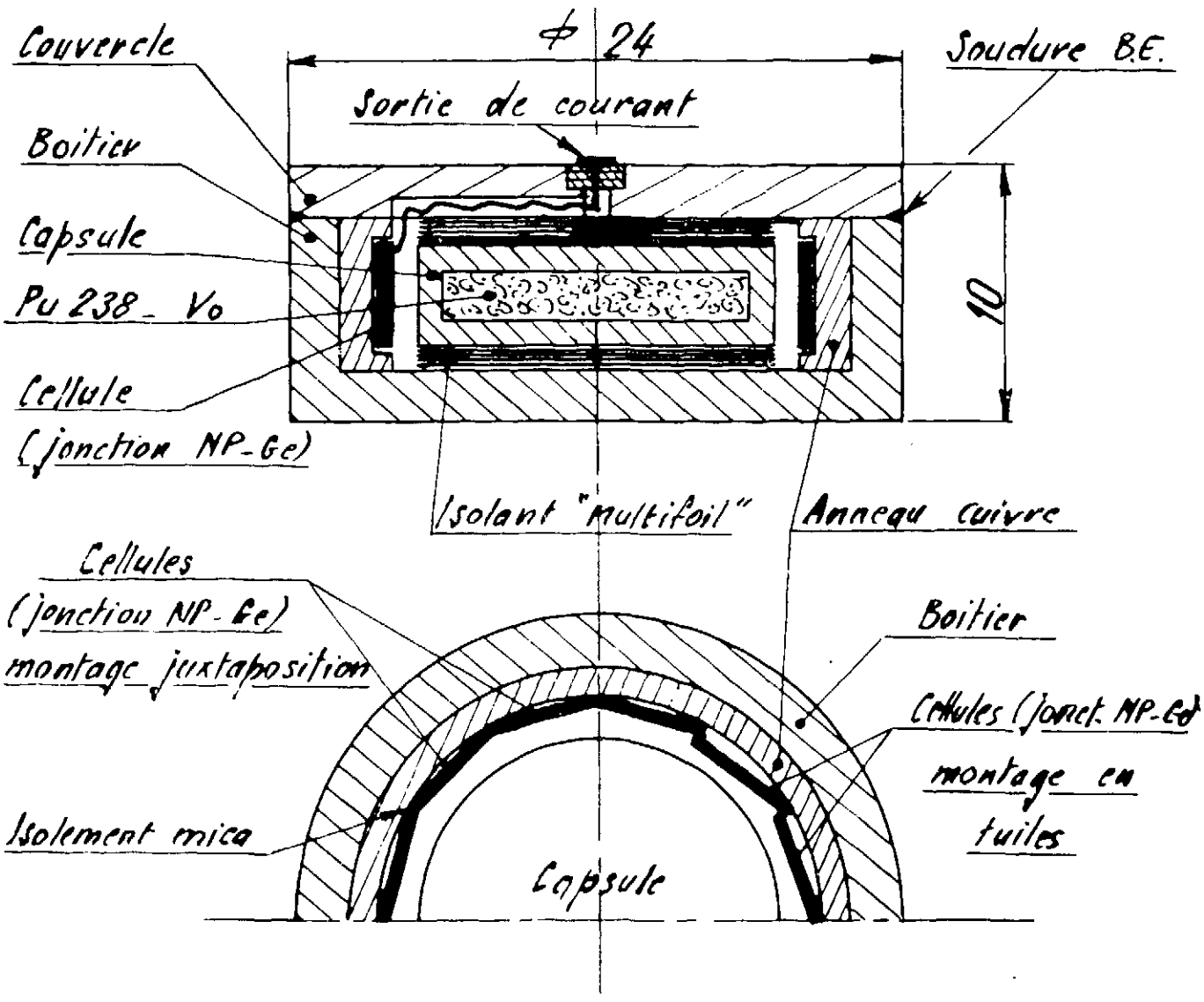



Figure 12 - GENERATEUR THERMOPHOTOVOLTAIQUE 1volt/5volts-0,2 mW-35 Ci-1 Wth-50g

Echelle : 4

### IV. 3. 5. Autres perspectives.

Les résultats précédents, peuvent conduire dans certains cas à la réalisation de générateurs pouvant délivrer plusieurs volts en charge.

Les possibilités d'obtenir 5 volts avec des courants supérieurs ou égaux à 200 µampères, en augmentant le nombre de cellules, sont présentées également Tableau IV.

Si des puissances plus faibles sont désirées, on peut réduire la quantité de radioélément mais le rendement diminue.

Nous avons repris les calculs précédents en partant de capsules contenant 1,2 gramme et 0,6 gramme de $^{238}Pu$, ce qui correspond respectivement à 0,6 et 0,3 watt thermique, et, nous avons tenu compte d'un volume nécessaire au dégagement de l'hélium en considérant différents rapports $\frac{V_o}{V_p}$ égaux successivement à 1, 2, 4 et 8.

Les résultats de ces calculs figurent dans le Tableau VI.

La double exigence, d'obtenir des puissances supérieures à 150 µwatts et de concevoir un volume d'expansion pour l'hélium, implique l'utilisation d'un gainage d'épaisseur 0,5 mm avec une émissivité de 0,025.

Les courbes de la figure 13 représentent les variations du rendement et de la puissance fournie par un générateur de ce type en fonction du rapport $\frac{V_o}{V_p}$.

Généralement, des rendements de l'ordre de $10^{-3}$ sont obtenus, si les températures de capsule atteignent 1 100 °K. En conséquence, nous avons représenté en fonction du rapport $\frac{V_o}{V_p}$, figure 14 les variations de l'émissivité

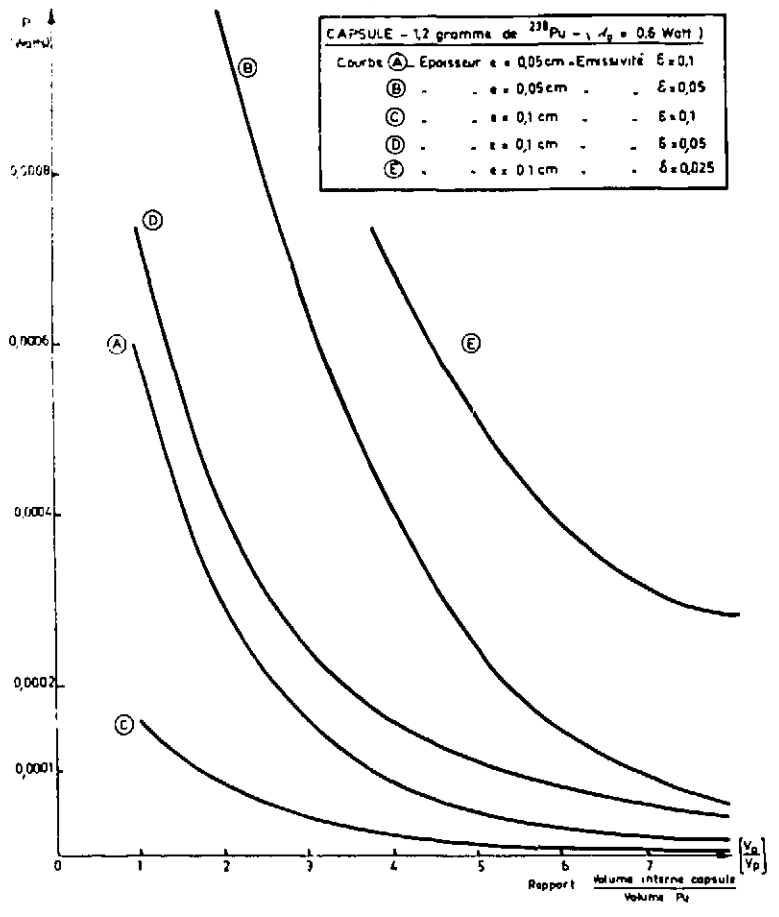



Fig 13 a - PUISSANCE DU GENERATEUR EN FONCTION DU VOLUME DE LA CAPSULE POUR DIFFERENTES EPAISSEURS ET EMISSIVITES DU GAINAGE

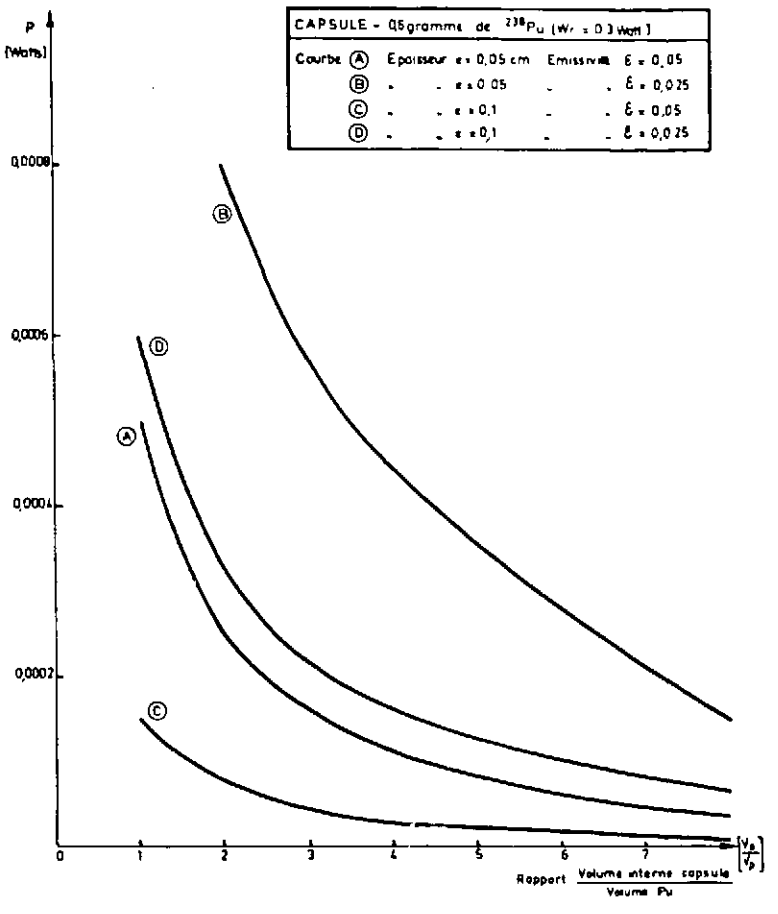



Fig 13 b - PUISSANCE DU GENERATEUR EN FONCTION DU VOLUME DE LA CAPSULE POUR DIFFERENTES EPAISSEURS ET EMISSIVITES DU GAINAGE

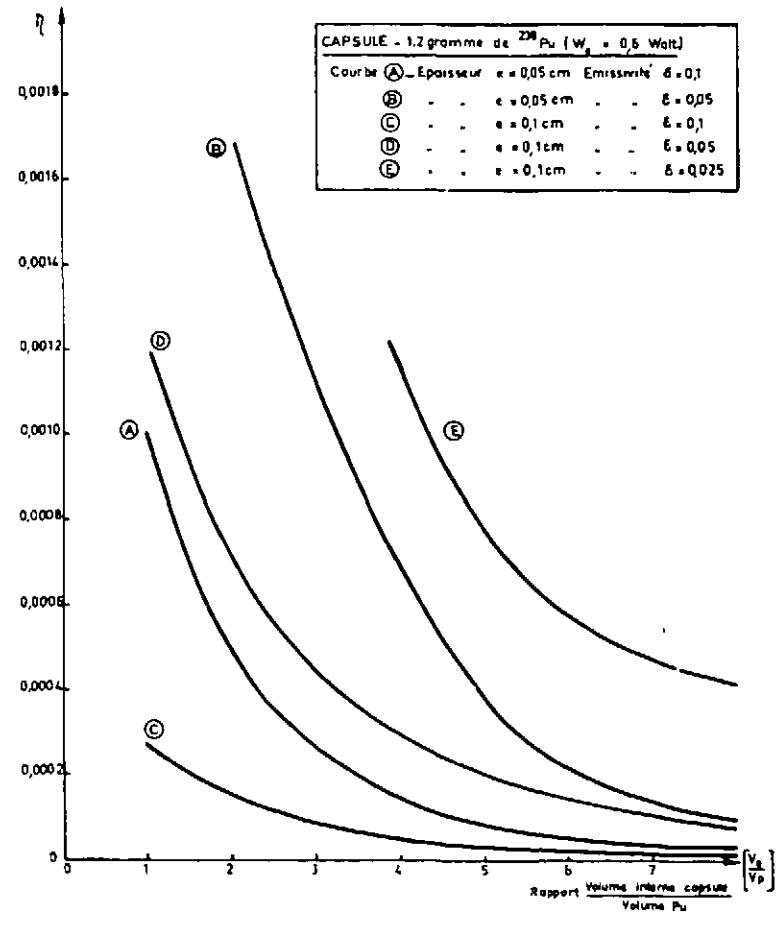



Fig 13 c - RENDEMENT DU GENERATEUR EN FONCTION DU VOLUME DE LA CAPSULE POUR DIFFERENTES EPAISSEURS ET EMISSIVITES DU GAINAGE

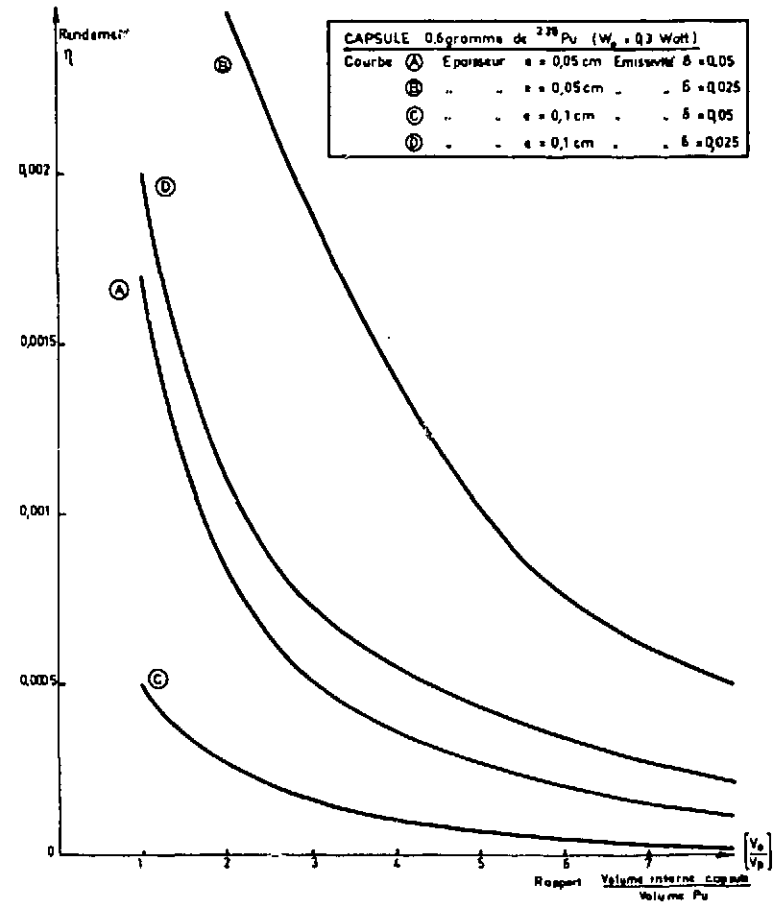



Fig 13 d - RENDEMENT DU GENERATEUR EN FONCTION DU VOLUME DE LA CAPSULE POUR DIFFERENTES EPAISSEURS ET EMISSIVITES DU GAINAGE

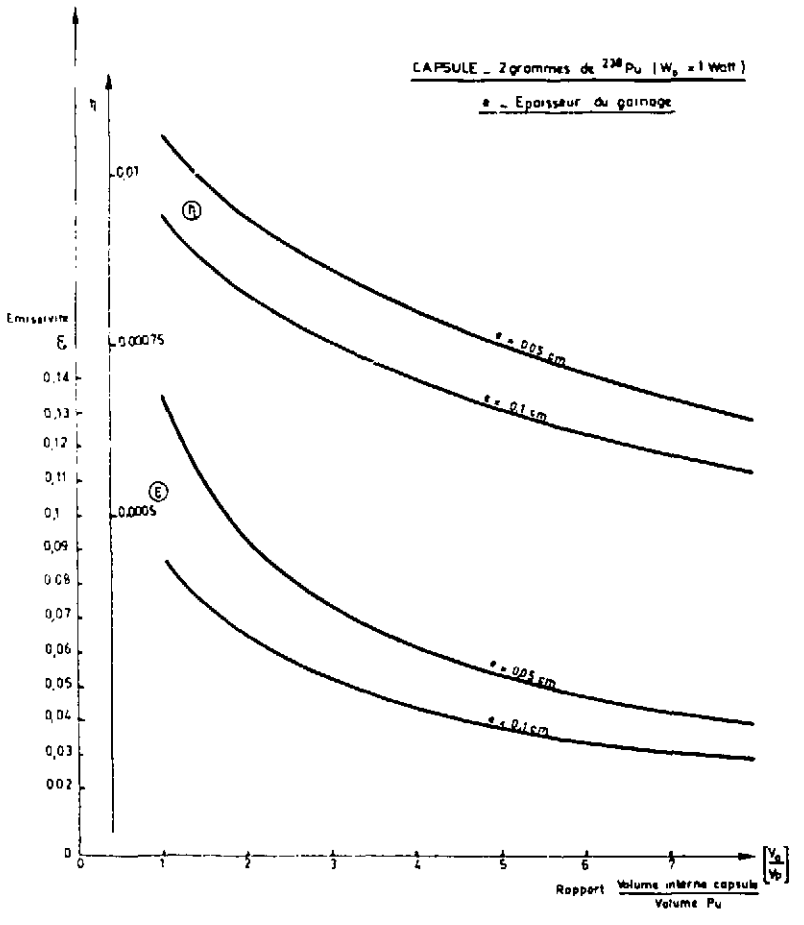



Fig 14 a _ EMISSIVITE (ε) NECESSAIRE POUR MAINTENIR LA CAPSULE A 1100°K EN FONCTION DU VOLUME DE LA CAPSULE _ RENDEMENT CORRESPONDANT η

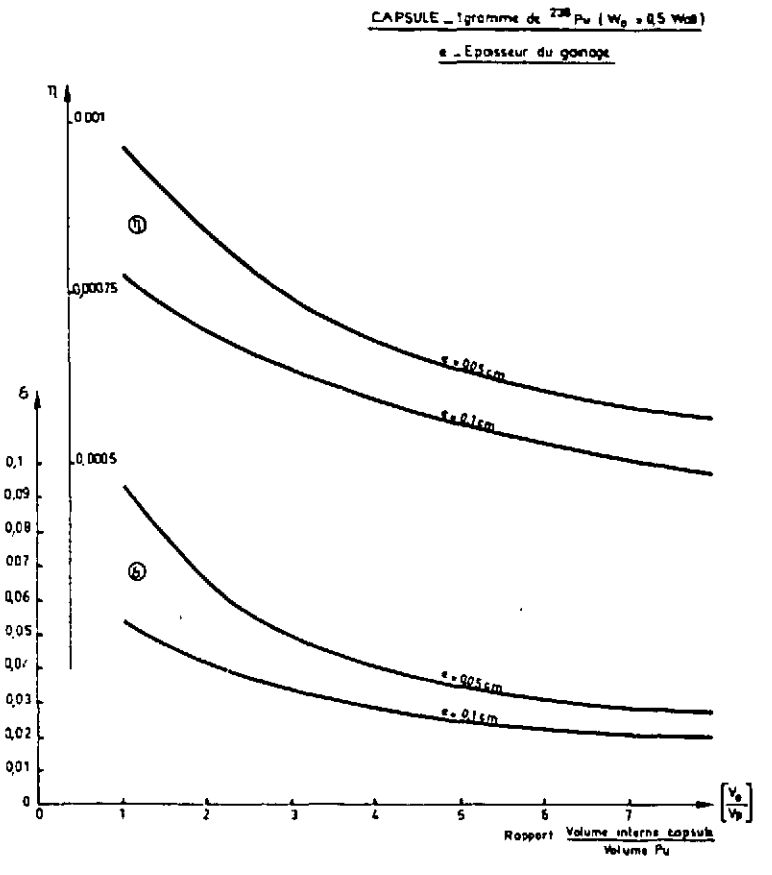



Fig 14 b _ EMISSIVITE (ε) NECESSAIRE POUR MAINTENIR LA CAPSULE A 1100°K EN FONCTION DU VOLUME DE LA CAPSULE _ RENDEMENT CORRESPONDANT η

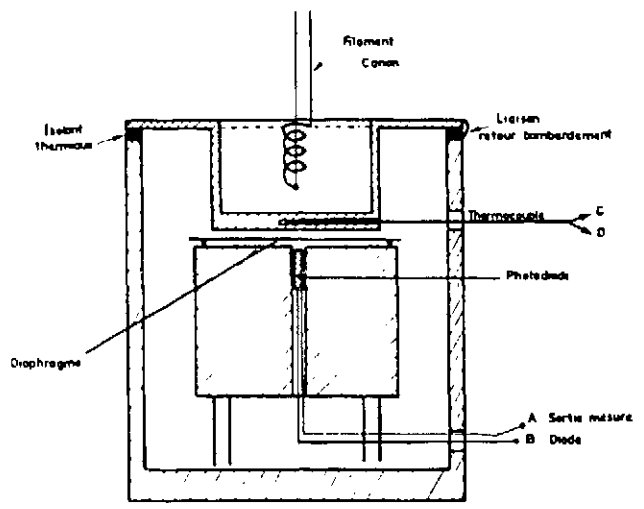



Fig 15 DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR LA MESURE DES CARACTERISTIQUES D'UNE JONCTION NP AU GERMANIUM

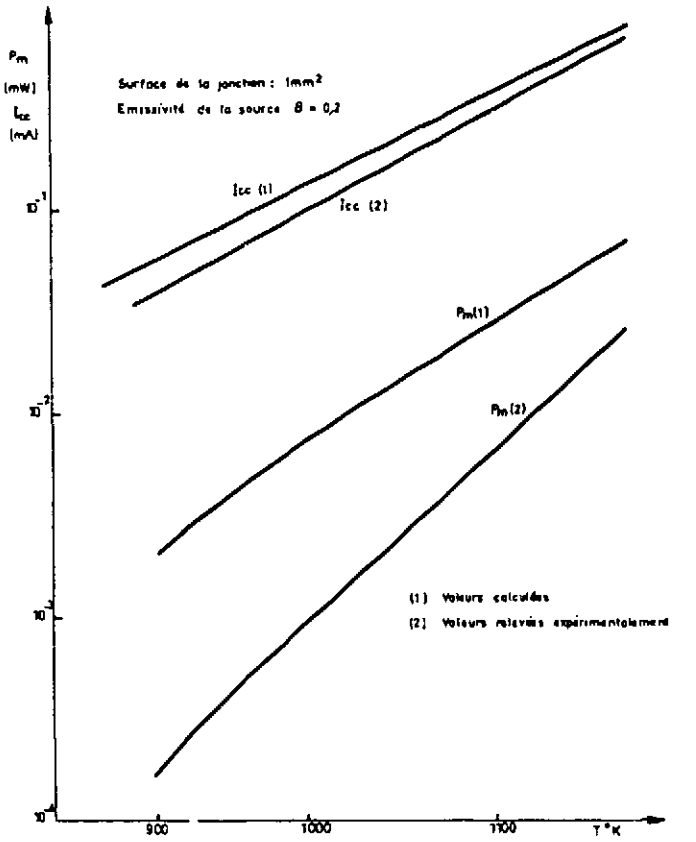



Fig 16 _ COURANT DE COURT CIRCUIT ET PUISSANCE MAXIMALE EN CHARGE D'UNE JONCTION NP GERMANIUM EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA SOURCE RADIANTE (CAPSULE)

$\varepsilon$ nécessaire pour atteindre cette température de 1 100 °K, l'énergie du radio-isotope étant successivement de 1 watt et de 0,5 watt.

A titre indicatif, nous donnons les valeurs du rendement correspondant.

Il est évident que pour respecter certains critères de sécurité, la réalisation de très faibles émissivités est à envisager.

IV.4. Evaluations expérimentales.

A titre de vérification, nous avons relevé les caractéristiques d'une photodiode du commerce, placée face à un élément chauffant, celui-ci simulant la surface radiante d'une capsule.

Le montage de l'ensemble expérimental est représenté figure 15

Un diaphragme est disposé devant la photodiode afin de réaliser un coefficient géométrique voisin de l'unité entre la cellule et la surface émissive.

Un thermocouple chromel-alumel est placé dans le simulateur. Celui-ci est chauffé par bombardement électronique. La photodiode est située dans un bloc métallique pour éviter une élévation de température de la jonction. L'expérience est réalisée sous vide.

La jonction utilisée a une surface de 1 $mm^2$, le courant de saturation mesuré est de 40 µampères soit $4.10^{-3}$ A $cm^{-2}$. Cette valeur est malheureusement trop élevée pour obtenir de bons rendements.

L'émissivité totale de la surface radiante (acier inox poli) est évaluée, à l'aide d'une thermopile, à $\varepsilon$ = 0,2 pour T = 1 000 °K.

Nous avons relevé en fonction de la température de la source chaude T =

- le courant de court-circuit de la jonction $I_{cc}$

- la tension à vide $V_o$

- les caractéristiques en charge optimale V, I et $P_m$.

Afin d'établir une comparaison valable, nous avons calculé les caractéristiques $I_{cc}$ et $P_m$ pour une jonction de surface 1 $mm^2$ et en fonction de la température d'une capsule d'émissivité $\varepsilon = 0,2$.

Les comparaisons sont présentées sous forme de courbes figure 16.

La différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées confirme la possibilité d'obtenir les courants évalués précédemment et la nécessité d'utiliser des jonctions avec un très faible courant inverse.

IV.5. Remarques.

En définitive, la quantité de radioisotope, le volume interne de la capsule, l'épaisseur de son gainage, son émissivité et le courant inverse des jonctions sont les paramètres de base pour la réalisation d'un microgénérateur thermophotovoltaïque.

Le courant inverse dépendant fortement de la température, on doit prévoir une bonne conduction thermique des cellules afin d'évacuer la chaleur produite par l'excès d'énergie des photons.

La réalisation de très faibles émissivités du gainage est un problème délicat, il peut être l'objet d'une étude particulière en métallurgie.

Dans tous les cas, une protection extérieure à la capsule s'impose.

TABLEAU IV - CARACTERISTIQUES DE GENERATEURS 1 VOLT ET 5 VOLTS.

| CAPSULE | | | | | CONVERTISSEUR | | | | | Courbe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| * $\frac{v_o}{v_p}$ | épaisseur gainage (cm) e | hauteur (cm) h | émissivité $\varepsilon$ | température (° K) T | tension en charge (volts) V | puissance (mW) $P_m$ | rendement $\eta$ | nombre de cellules $q_j$ | surface d'une cellule ($cm^2$) $s_q$ | |
| 1 | 0,05 | 0,2 | 0,1 | 1 185 | 1 | 1,74 | $1,74.10^{-3}$ | 11 | 0,088 | I A |
| | " | " | " | " | 5 | " | " | 55 | 0,0176 | " |
| | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 1 057 | 1 | 0,7 | $7.10^{-4}$ | 14 | 0,114 | II A |
| | 0,1 | 0,37 | 0,05 | 1 257 | 1 | 2,3 | $2,3.10^{-3}$ | 11 | 0,143 | III A |
| | " | " | " | " | 5 | " | " | 55 | 0,0286 | " |
| | 0,2 | 0,7 | 0,05 | 1 082 | 1 | 0,7 | $7.10^{-4}$ | 16 | 0,18 | IV A |
| 2 | 0,05 | 0,25 | 0,1 | 1 079 | 1 | 0,81 | $8,4.10^{-4}$ | 13 | 0,104 | I B |
| | 0,05 | 0,25 | 0,05 | 1 273 | 1 | 2,5 | $2,5.10^{-3}$ | 11 | 0,123 | II B |
| | " | " | " | " | 5 | " | " | 55 | 0,0246 | " |
| | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 976 | 1 | 0,3 | $3.10^{-4}$ | 18 | 0,11 | III B |
| | 0,1 | 0,4 | 0,05 | 1 161 | 1 | 1,22 | $1,22.10^{-3}$ | 13 | 0,158 | IV B |
| | " | " | " | " | 5 | " | " | 65 | 0,0316 | " |
| | 0,2 | 0,7 | 0,05 | 1 015 | 1 | 0,36 | $3,6.10^{-4}$ | 20 | 0,176 | V B |
| 4 | 0,05 | 0,3 | 0,1 | 974 | 1 | 0,29 | $2,9.10^{-4}$ | 18 | 0,107 | I C |
| | 0,05 | 0,3 | 0,05 | 1 158 | 1 | 1,18 | $1,18.10^{-3}$ | 13 | 0,148 | II C |
| | " | " | " | " | 5 | " | " | 65 | 0,0296 | " |
| | 0,1 | 0,5 | 0,05 | 1 059 | 1 | 0,54 | $5,4.10^{-4}$ | 17 | 0,168 | IV C |

* $\frac{v_o}{v_p}$ = rapport volume interne de la capsule/volume plutonium.

TABLEAU V : GENERATEURS 1,2 MILLIWATT (Projet)

| SOURCE | CELLULES |
|---|---|
| Nature : $^{238}Pu$<br>Quantité : 2 grammes - $v_p = 0,12\ cm^3$<br>Puissance thermique : 1 watt<br>Température : T = 1 160 °K<br>Emissivité : $\varepsilon = 0,05$<br>Géométrie : cylindrique<br>Epaisseur gainage : 1 mm<br>Volume : 0,65 $cm^3$ $\quad \frac{v_o}{v_p} = 2$<br>Matériau : tantale<br>Isolement : Multifoil thermal insulation | Type : jonctions NP Germanium<br>($J_o \leqslant 10^{-4}$ A $cm^{-2}$ à 300 °K)<br>Quantité : 13<br>Surface 1 cellule : 0,158 $cm^2$<br>Montage : série (en tuiles ou par juxtaposition)<br>Isolement : (feuille de mica<br>(enrobage araldite<br>Température : 310 °K<br>Distance cellules-source : $\leqslant$ 1 mm. |

Protection : extérieure

Boîtier acier inox - épaisseur 2 mm - soudé étanche

Vide $\sim 10^{-6}$ torr.

PERFORMANCES :

- Tension en charge : V = 1 volt
- Courant en charge : I = 1,2 milliampères
- Puissance : P = 1,2 milliwatt
- Rendement : $\eta$ = O,12 %
- Durée de vie : $\geqslant$ 10 ans.
- Encombrement : ( Volume hors tout : 4,5 $cm^3$
  ( Poids : 45 grammes
- Puissance spécifique ( volumique : 270 $\mu W\ cm^{-3}$
  ( massique : 27 $\mu W\ g^{-1}$

TABLEAU VI : GENERATEURS POSSIBLES AVEC SOURCES DE MOINS D'UN WATT.

| | CAPSULE | | | | | GENERATEUR (1 VOLT) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Isotope quantité | Rapport volumes $\frac{v_o}{v_p}$ | épaisseur (cm) e | hauteur (cm) h | émissivité $\varepsilon$ | température (° K) T | puissance (mwatt) $P_m$ | rendement $\eta$ | nombre de cellules $q_j$ | section une cellule ($cm^2$) $s_q$ | volume hors tout ($cm^3$) $v_T$ | poids (g) |
| $^{238}Pu$ - 1,2 gramme - $W_o$ = 0,6 watt thermique | 1 | 0,05 | 0,2 | 0,1 | 1 105 | 0,6 | $10^{-3}$ | 13 | 0,061 | 3 | 33 |
| | | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 970 | 0,16 | $2,7.10^{-4}$ | 19 | 0,071 | 3 | 35 |
| | | 0,1 | 0,4 | 0,05 | 1 162 | 0,74 | $1,2.10^{-3}$ | 13 | 0,104 | 3 | 35 |
| | 2 | 0,05 | 0,22 | 0,1 | 1 018 | 0,29 | $4,8.10^{-4}$ | 15 | 0,07 | 4 | 43 |
| | | 0,05 | 0,22 | 0,05 | 1 211 | 1 | $1,7.10^{-3}$ | 12 | 0,087 | 4 | 43 |
| | | 0,1 | 0,4 | 0,05 | 1 085 | 0,4 | $7.10^{-4}$ | 16 | 0,1065 | 4 | 45 |
| | 4 | 0,05 | 0,3 | 0,05 | 1 095 | 0,42 | $7.10^{-4}$ | 15 | 0,093 | 6 | 60 |
| | | 0,1 | 0,45 | 0,05 | 997 | 0,175 | $3.10^{-4}$ | 21 | 0,105 | 5,5 | 55 |
| | | 0,1 | 0,45 | 0,025 | 1 186 | 0,7 | $1,17.10^{-3}$ | 15 | 0,147 | 5,5 | 55 |
| | 8 | 0,05 | 0,35 | 0,025 | 1 110 | 0,27 | $4,5.10^{-4}$ | 18 | 0,105 | 9 | 90 |
| | | 0,1 | 0,45 | 0,025 | 1 081 | 0,28 | $4,7.10^{-4}$ | 20 | 0,145 | 8 | 80 |
| $^{238}Pu$ - 0,6 gramme - $W_o$ = 0,3 watt thermique | 1 | 0,05 | 0,2 | 0,05 | 1 205 | 0,5 | $1,67.10^{-3}$ | 12 | 0,051 | 2 | 23 |
| | | 0,1 | 0,4 | 0,05 | 1 050 | 0,15 | $5.10^{-4}$ | 18 | 0,061 | 2,5 | 30 |
| | | 0,1 | 0,4 | 0,025 | 1 250 | 0,6 | $2.10^{-3}$ | 13 | 0,085 | 2,5 | 30 |
| | 2 | 0,05 | 0,2 | 0,05 | 1 111 | 0,25 | $8,4.10^{-4}$ | 15 | 0,053 | 3 | 33 |
| | | 0,1 | 0,4 | 0,025 | 1 168 | 0,32 | $1,1.10^{-3}$ | 16 | 0,0845 | 3 | 33 |
| | 4 | 0,05 | 0,22 | 0,025 | 1 211 | 0,42 | $1,4.10^{-3}$ | 14 | 0,0745 | 4 | 40 |
| | | 0,1 | 0,42 | 0,025 | 1 085 | 0,16 | $5,3.10^{-4}$ | 20 | 0,085 | 4 | 40 |
| | 8 | 0,05 | 0,25 | 0,025 | 1 095 | 0,15 | $5.10^{-4}$ | 19 | 0,0735 | 6 | 60 |

## V. RADIOVOLTAIQUE.

Les procédés de conversion utilisant l'effet thermoionique et thermophotovoltaïque ont pour inconvénient l'emploi de sources chaudes à des températures élevées ( $\geq$ 1 100 °K) et difficiles à réaliser. D'autre part, le problème posé par le volume d'expansion nécessaire à l'hélium, produit par le plutonium, diminue la densité d'énergie radiante et, par suite, les performances du système de conversion.

Les convertisseurs utilisant l'effet radiovoltaïque, que nous avions étudié il y a une dizaine d'années [15] n'ont pas été développés industriellement. Les défauts créés par les particules de grande énergie dans la structure cristalline du semiconducteur, le courant inverse important des jonctions, la technologie peu connue des sources appropriées à ce mode de conversion étaient, à l'époque, les principaux obstacles à des réalisations pratiques. A l'heure actuelle les technologies ont évolué et des réalisations commencent à être entreprises [16]. Aussi, dans un domaine où le rendement n'est pas l'objectif principal recherché, ce procédé d'échange direct d'énergie entre le radioisotope et le détecteur peut offrir des possibilités intéressantes.

### V.1. Principe de l'effet radiovoltaïque.

Les particules chargées, $\alpha$ et $\beta$ , créent par ionisation des paires électron-trou dans le réseau cristallin d'un semiconducteur. L'échange d'énergie se fait généralement par interaction coulombienne et, le nombre de paires créées est proportionnel à l'énergie de la particule incidente.

Dans le cas d'une jonction, un certain nombre de paires est collecté dans la région de charge d'espace et il en résulte l'apparition d'une différence de potentiel aux bornes du cristal.

Si toute l'énergie de la particule pénétrant dans le détecteur est perdue dans celui-ci, on peut calculer le courant de court-circuit, obtenu avec une source d'activité A (curies.$cm^{-2}$). Sachant que le nombre de particules par $cm^2$, émises par le radioisotope, dans 2 $\pi$ stéradians est :

$$N = 3,7.10^{10} \quad \frac{A}{2}$$

on a l'expression donnant la densité de courant de court-circuit :

$$J_{cc} = 1,85\ 10^{10}\ A\ q\ \frac{E}{w}\ Q\ (1 - a_i) \qquad \text{(XVI)}$$

q : charge de l'électron

E : énergie de la particule

w : énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou

Q : rendement de collection

$a_i$ : coefficient d'absorption dans le radioisotope.

Avec les particules $\beta$ il faut tenir compte d'un coefficient de rétrodiffusion r. Le courant de court-circuit est alors réduit par le facteur (1 - r).

La tension à circuit ouvert et les caractéristiques optimales en charge sont déterminées au moyen des mêmes relations que celles utilisées en thermophotovoltaïque :

$$V_o = \frac{kT}{q} \text{ Log } (1 + \frac{I_{cc}}{I_o}) \qquad \text{(XVII A)}$$

$$I_m = \beta_I I_{cc} \qquad \text{(XVII B)}$$

$$V_m = \beta_V V_o \qquad \text{(XVII C)}$$

$$P_m = V_m I_m \qquad \text{(XVII D)}$$

Le processus semble séduisant. On pense a priori à utiliser des sources de longue période, de forte activité, émettant des particules de grande énergie afin de disposer de générateurs à longue durée de vie avec un rendement relativement important. Mais, si le choix de la source est conditionné par le degré de pureté du radioisotope, sa toxicité et les problèmes délicats de dépôt et d'adhérence, la densité d'énergie utile du flux particulaire est très vite limitée par l'autoabsorption. Par ailleurs, les semiconducteurs ont un comportement transitaire différent suivant l'énergie et la nature de la particule. Le rendement de collection Q peut être considérablement réduit si les atomes du réseau sont déplacés par des chocs élastiques ou des interactions coulombiennes.

Ces considérations impliquent une adaptation de la source et une conception technologique et géométrique de la jonction susceptible de palier les effets destructifs du rayonnement.

V.2. Défauts créés dans les semiconducteurs et possibilités de limiter leurs effets.

Les particules chargées de grande énergie produisent,par choc avec les atomes, des imperfections du réseau. Les atomes heurtés sont déplacés de leurs positions normales et viennent occuper des positions intersticielles, d'où la formation de paires "lacune-interstice" appelées encore défauts de "FRENKEL". Ainsi le nombre de centres de recombinaison augmente, la durée de vie des porteurs minoritaires diminue et la quantité de charges électriques parvenant à la jonction également. La sensibilité au rayonnement du semiconducteur décroit.

L'énergie nécessaire pour déplacer un atome est d'environ 25 eV pour le germanium et 12 à 13 eV pour le silicium [17] . On en déduit le seuil de création des défauts $E_S$ par l'intermédiaire des théories de SEITZ [19].

Pour les $\beta$ , $E_S$ = 0,6 MeV avec le germanium et 0,25 MeV avec le silicium. Pour les particules $\alpha$ : $E_S <$ 1 keV.

En utilisant un émetteur $\beta$ dont les particules ont une énergie inférieure à $E_S$, le problème est résolu uniquement par le choix du radioisotope. Le détecteur peut être alors une jonction disponible sur le marché à condition que l'épaisseur du cristal ou mieux celle de la zone désertée soit légèrement supérieure au parcours des $\beta$ dans le semiconducteur. Le silicium est l'élément le mieux adapté [ 8 ]. Sa large bande interdite (1,15 eV ) les longueurs de diffusion réalisables ( > 100 $\mu$) et les faibles courants inverses obtenus ($J_o \sim 10^{-8}$ Acm$^{-2}$) justifient ce choix.

Le prométhéum 147 est un émetteur $\beta$ de période (2,6 ans) dont l'énergie des particules est inférieure à 0,25 MeV (énergie maximale des $\beta$ :

0,22 MeV). La technique de préparation de sources intenses de $^{147}Pm$ a été longue à s'affirmer. Aujourd'hui on sait réaliser des dépôts avec une activité de 1 $Ci.cm^{-2}$ [18]. Les densités de flux sont ainsi mieux adaptées à la sensibilité des jonctions.

Si on veut concevoir des générateurs avec des durées de vie de l'ordre d'une dizaine d'années, il faut utiliser un radioélément de plus longue période ; un émetteur $\alpha$ convient : le plutonium 238.

Les particules $\alpha$ de 5 MeV vont créer beaucoup plus de charges que les $\beta$ du prométhéum, mais l'apparition de défauts devient inévitable. On peut chercher les moyens de limiter leurs effets, c'est ce que nous allons montrer.

Nous ne reprendrons pas la théorie des déplacements atomiques dans un solide. De nombreux chercheurs l'ont suffisamment bien traitée depuis les travaux de SEITZ et,à Saclay M. NGUYEN VAN DONG [8 ] [17] lequel nous a aimablement conseillé sur ce problème bien particulier.

V.3. Structure et géométrie d'une jonction adaptée à un flux de particules $\alpha$.

L'étude de l'action des $\alpha$ dans le silicium a été faite par DEARNALEY [20]. D'après ces travaux, la sensibilité d'un détecteur à jonction diminue à partir d'un flux intégré de $10^{10}$ $\alpha$ $cm^{-2}$ pour un silicium de résistivité 1 000 ohms cm. Or, nous verrons que le flux particulaire nécessaire pour obtenir des puissances électriques de l'ordre du microwatt est de $10^{7}$ à $10^{8}$ $\alpha$ $cm^{-2}$ $s^{-1}$. Soit sur 10 ans une irradiation de $3.10^{15}$ à $3.10^{16}$ $\alpha$ $cm^{-2}$. Mais les effets du rayonnement sur la concentration des porteurs sont plus sensibles dans un

matériau de haute résistivité. On peut penser alors à doper suffisamment le zone de capture afin de retarder l'épuisement de la région diffusée.

Le parcours d'un $\alpha$ de 5 MeV dans le silicium est de 26 $\mu$ [21]. Cette particule produit en moyenne 3 000 défauts par cm dans le même matériau [20] soit environ 10 défauts sur tout son parcours. En tenant compte d'une régénération partielle des dislocations à la température ambiante, on peut faire l'estimation du nombre moyen de défauts à quelques unités par $\alpha$ incident.

En admettant que la profondeur de la région diffusée soit de l'ordre de grandeur du parcours des $\alpha$, un dopage avec une concentration de $10^{19}$ à $10^{20}$ $cm^{-3}$ peut être une solution valable.

On trouve facilement des jonctions au silicium avec des couches mortes de quelques dizaines de microns. Le dopage n'est pas très important mais ces jonctions pourraient être utilisées à des expérimentations estimatives préliminaires.

Une autre possibilité est offerte avec les semiconducteurs à structure polycristalline. L'existence de nombreuses dislocations peut conduire à une saturation des défauts et à une stabilité du courant de court-circuit.

Les piles solaires actuelles au Te Cd ($E_G$ = 1,5 eV ) ont des géométries non défavorables :

épaisseur de la région de charge d'espace: 0,5 $\mu$

épaisseur de la zone diffusée : 1 à 2 $\mu$.

épaisseur totale du semiconducteur : 22 $\mu$.

Avec ces éléments nous avons mesuré des courants de saturation de $10^{-8}$ A $cm^{-2}$. Mais les longueurs de diffusion sont de l'ordrede quelques

centaines d'angströms et on ne peut espérer des rendements de collection importants. Toutefois il serait intéressant d'étudier le comportement de ces semiconducteurs avec des flux $\alpha$ intenses.

## V.4 Performances d'un convertisseur radiovoltaïque.

### V.4.1. Utilisation d'une source de $^{147}Pm$

Suivant la qualité du dépôt, on estime entre 10 et 20 $\mu$ l'épaisseur d'une couche de $^{147}Pm$ d'activité 1 curie $cm^{-2}$. Les pertes par autoabsorption dans le radioisotope sont calculées par l'expression [ 8 ] :

$$a_i = 1 - \left[ \frac{1 - \exp\left(- d_o/\lambda_o\right)}{d_o/\lambda_o} \right]$$

$d_o$ : épaisseur du radioélément

$\lambda_o$ = parcours des $\beta$ dans le radioélément (7 à 8 $\mu$ pour le $^{147}Pm$).

Le calcul donne : $a_i = 0,55$.

L'énergie moyenne des $\beta$ du prométhéum est de 74 KeV, et l'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou dans le silicium est : $w = 3,5$ eV.

En utilisant la relation XVI on peut calculer le courant de court-circuit obtenu avec une source de 1 Ci $cm^{-2}$. Si on admet un rendement de collection voisin de l'unité et si on néglige les pertes par rétrodiffusion on trouve :

$$J_{cc} = 3.10^{-5} \text{ A Ci}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

Pour un courant de saturation $J_o = 10^{-8}$ A $cm^{-2}$ on détermine

la tension à vide et les caractéristiques optimales en charge avec les expressions déjà utilisées en thermophotovoltaïque. Pour un élément de 1 $cm^2$ et pour 1 curie de $^{147}Pm$ on obtient :

Tension à circuit ouvert : $V_o = 0,2$ volts

Densité de courant en charge : $J_m = 2,6.10^{-5}$ A $cm^{-2}$

Tension en charge : $V_m = 0,15$ volts

Puissance en charge : $P_m = 3,9.10^{-6}$ watts $cm^{-2}$

Rendement : $\eta = 9.10^{-3}$

(la puissance du radioisotope étant pour 1 Ci : $P_i = 3,7.10^{10} \times 74.10^{3} \times 1,610^{-19} = 4,4 . 10^{-4}$ watt $Ci^{-1}$).

En superposant plusieurs éléments (source/jonction) on obtient des puissances plus élevées. $V_o$ étant une fonction logarithmique de $I_{cc}$; une diminution du courant d'un facteur 10 ne fait chuter la tension à circuit ouvert que de 30 %. On peut donc augmenter l'autonomie de ce type de générateur en prévoyant une réserve de puissance appropriée (fig. 17 ).

### V. 4.2. Utilisation d'une source de $^{238}Pu$.

Le parcours d'une particule $\alpha$ de 5 MeV dans le plutonium est environ $\lambda_o = 1,3\ \mu$. En limitant l'épaisseur du radioisotope à 0,25 $\mu$ ($d_o < \frac{\lambda_o}{5}$ ), on recueille à peu près tous les $\alpha$ émis dans 2 $\pi$ stéradians. Le nombre de particules $\alpha$ incidentes est alors :

$$N = \frac{3,7.10^{10}\ \mathcal{A}\ \partial_o\ d_o}{2} \simeq 10^8\ \alpha\ cm^{-2}\ s^{-1}$$

si $\partial_o$ est la densité du $^{238}Pu$ - $\partial_o = 15,9$

$\mathcal{A}$ est l'activité spécifique du $^{238}Pu$ - $\mathcal{A} = 17,38$ Ci $g^{-1}$ ,

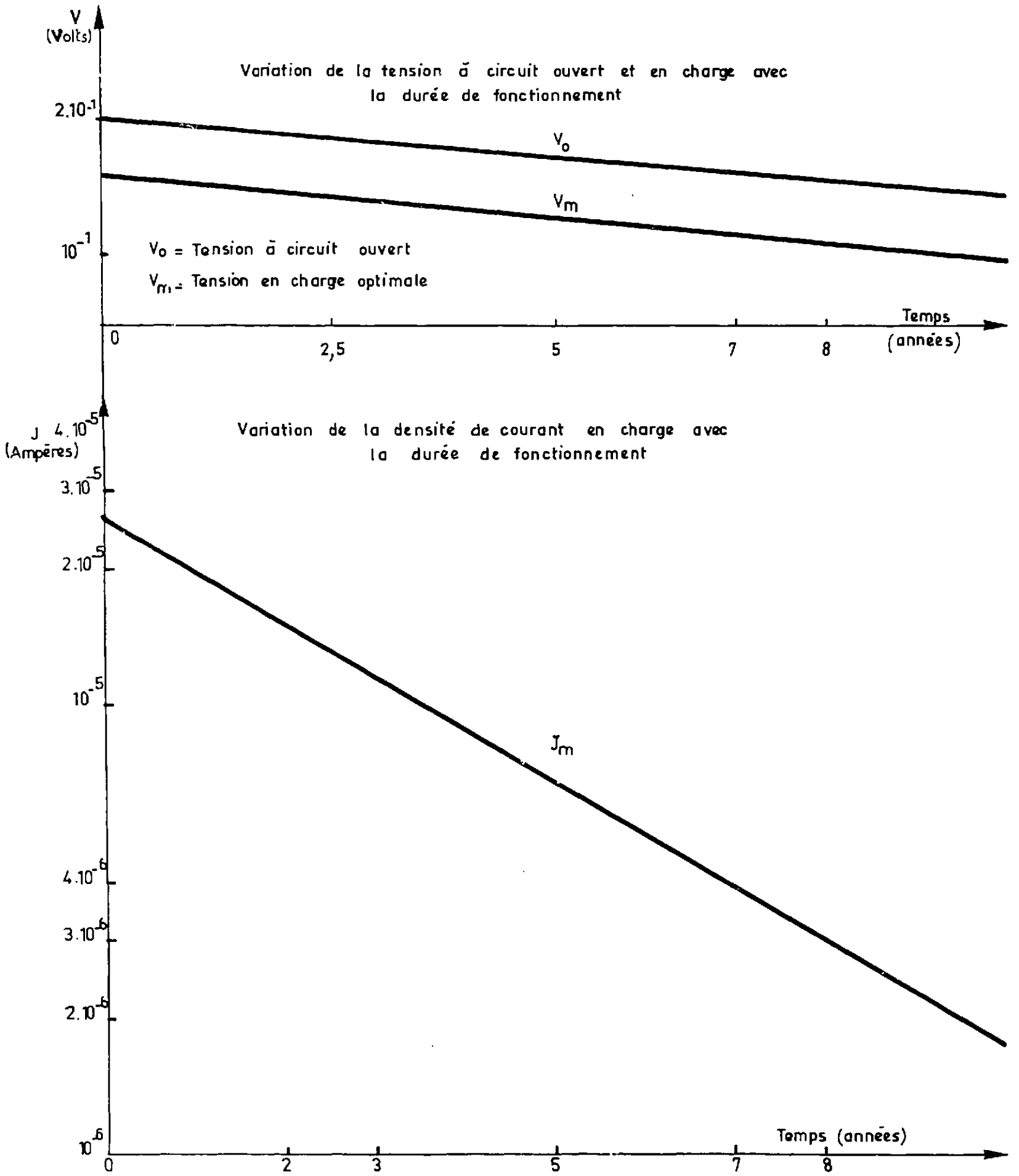



Fig 17 _ CONVERTISSEUR UTILISANT UNE SOURCE DE $^{147}Pm$ ( UN ELEMENT DE 1 $Cm^2$ )

ce qui correspond à une quantité de radioisotope de 0,4 mg . $cm^{-2}$ et à une activité de 7 mCi. $cm^{-2}$ . La puissance est de $3.10^{-4}$ watt . De telles sources sont réalisables. Utilisées avec un semiconducteur à jonction bien adapté, et dans le cas idéal où les défauts ne perturbent pas la sensibilité du détecteur, on obtient une densité de courant de court-circuit calculable par l'expression :

$$J_{cc} = q\,N\,\frac{E}{w}\,Q = 2,3\,.10^{-5}\,Q$$

Si Q est égal à l'unité, les performances sont voisines de celles réalisables avec le prométhéum.

Etant donné le problème posé par les défauts, on fait une estimation des caractéristiques en charge pour différentes valeurs de Q et pour des flux incidents de $10^{17}$ et $10^{18}$ $\alpha$ $cm^{-2}$ $s^{-1}$ - Tableau VII et courbes de la figure 18 .

V.5 . Projet d'un générateur de 200 microwatts (5 V, 40 µA).

Le parcours d'un $\alpha$ de 5 MeV dans le silicium est de 26 µ. Celui d'un $\beta$ de 74 keV est de 70 µ [21 ]. L'épaisseur du détecteur peut être de 100 µ. Celle de la source et de son support 80 à 90 µ. En tolérant une distance de 10 à 20 µ entre la jonction et la source, l'épaisseur minimale d'un élément convertisseur est estimée à 200 µ.

La figure 19 représente un microgénérateur constitué d'un empilement de ces éléments. L'épaisseur du gainage protecteur est de 2 millimètres.

Pour obtenir une puissance de 200 microwatts, les caractéristiques électriques et dimensionnelles du générateur sont fonction :

$P_m$ – Densité de puissance en charge
$\eta$ Rendement
$S_T$ Surface totale des éléments pour obtenir 200 $\mu$ watts
$q_s$ Nombre d'éléments en série pour obtenir 5 V en charge
A Activité de la source en curies
V Volume de l'ensemble en $cm^3$

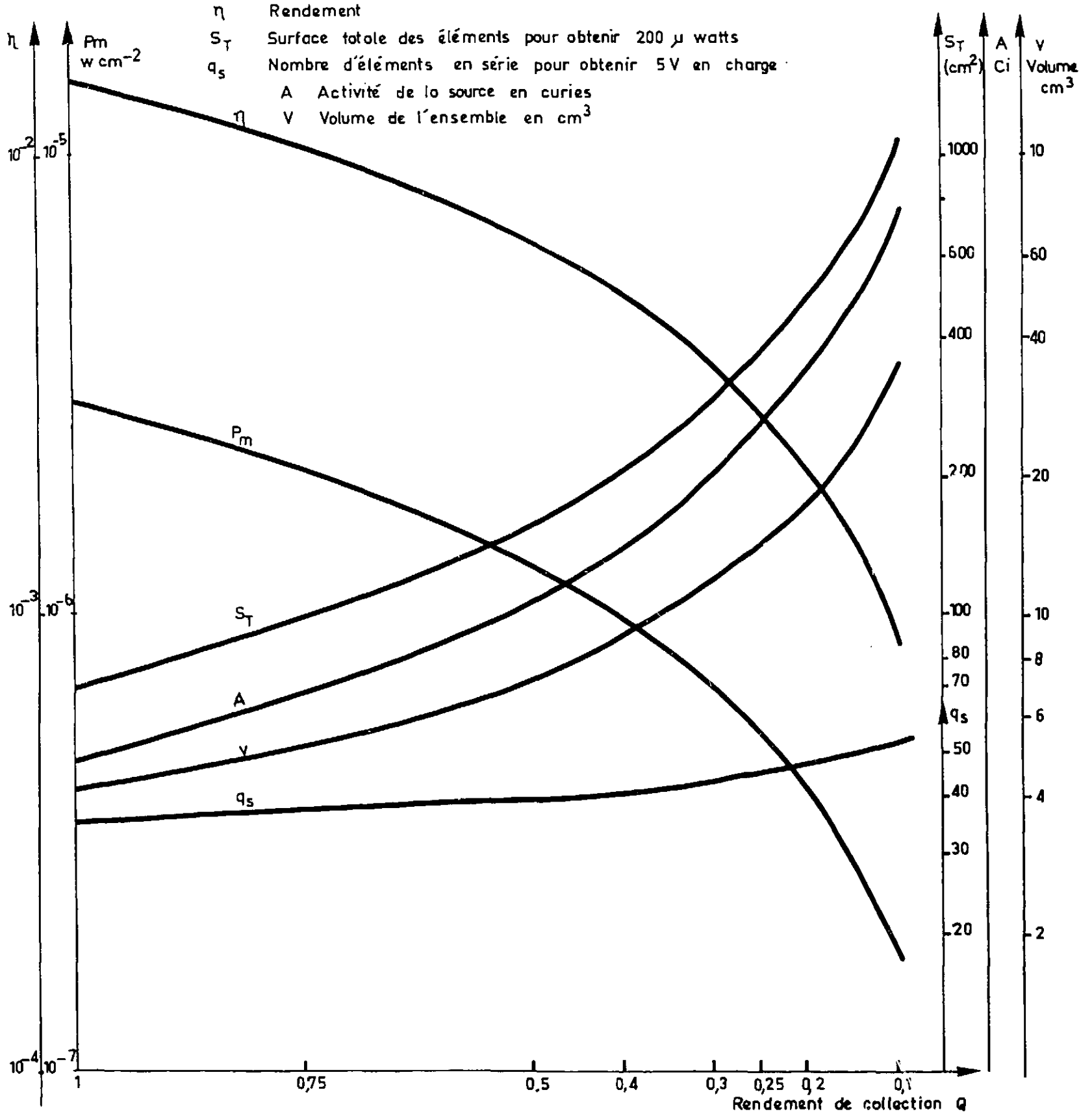



Fig 18_ GENERATEUR_200 MICROWATTS UTILISANT UNE SOURCE DE $^{238}Pu$
CARACTERISTIQUES EN FONCTION DU RENDEMENT DE COLLECTION Q

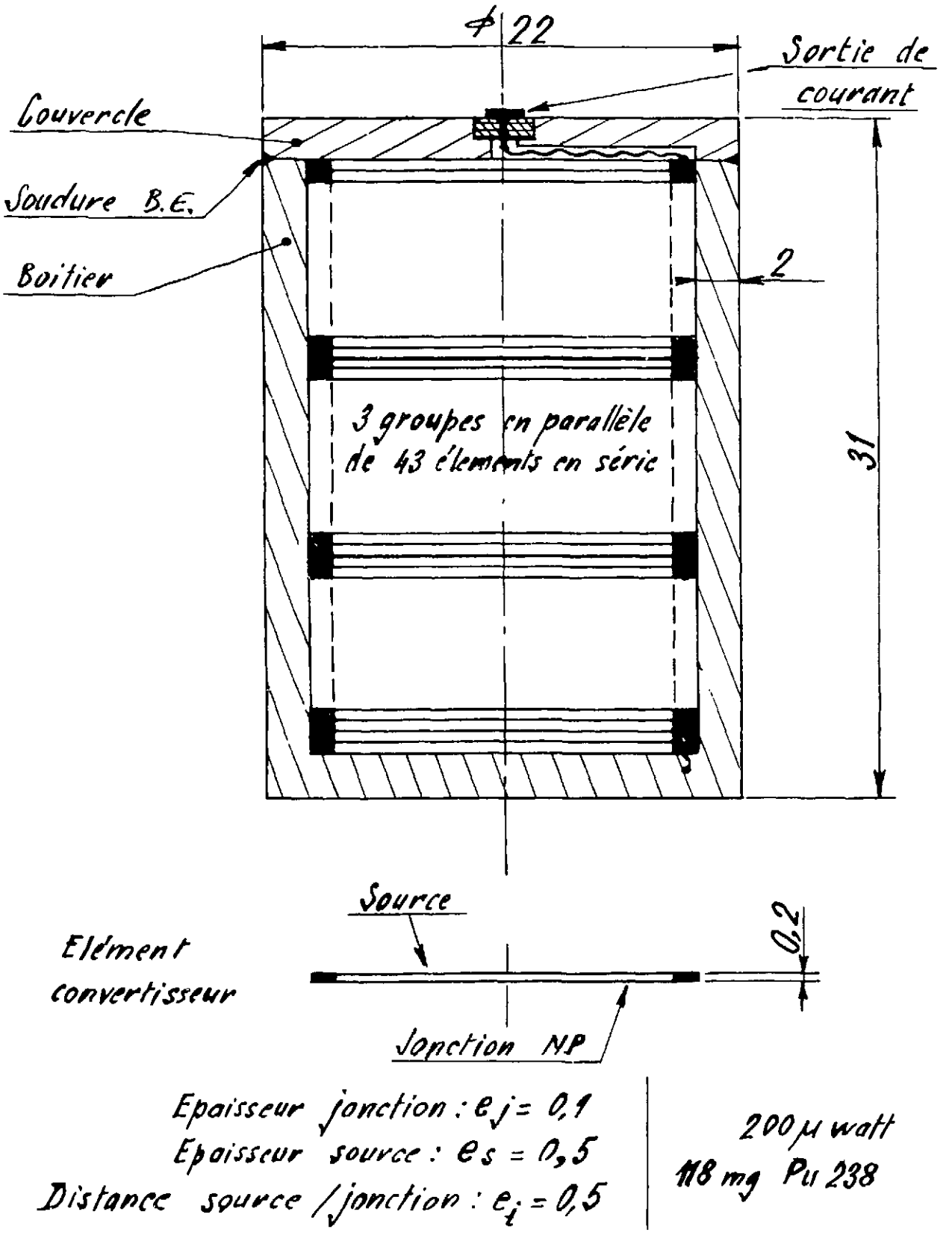



Figure 19 - GENERATEUR RADIOVOLTAIQUE 1 volt/ 5volts-0,2mWatt-2Ci-0,06Wth-90g

Echelle : 4

a)Du flux particulaire incident et du rendement de collection Q imposés par l'accumulation des défauts dus aux $\alpha$ , si on utilise une source de $^{238}Pu$. Tableau VII,courbes fig. 18 .

b) De l'autonomie du générateur si on utilise une source de $^{147}Pm$. Tableau VIII, courbes fig. 20 .

Des autonomies de 8 à 10 ans impliquent des activités importantes de la source et conduisent à une perte d'énergie considérable rendant le système peu économique.

L'utilisation d'une source de $^{238}Pu$ présente un intérêt certain (faibles quantités de radioisotope - grande durée de vie) à la condition de réaliser des détecteurs pouvant être exposés pendant 10 ans et, sans dégradation de leurs caractéristiques, à des flux de l'ordre de $10^8 \alpha$ $cm^{-2}$ $s^{-1}$ avec des rendements de collection supérieurs à 0,2.

$I_i$ _ Courant à prévoir initialement pour obtenir 40 µA pendant l'autonomie

$P_i$ _ Puissance à prévoir initialement pour obtenir 200 µW pendant l'autonomie

$V_i$ _ Tension optimale à prévoir initialement pour obtenir 5 V. pendant l'autonomie

N _ Nombre d'éléments à mettre en série pour obtenir 5 V. en fin d'autonomie

η _ Rendement global en fonction de l'autonomie

V _ Volume en fonction de l'autonomie

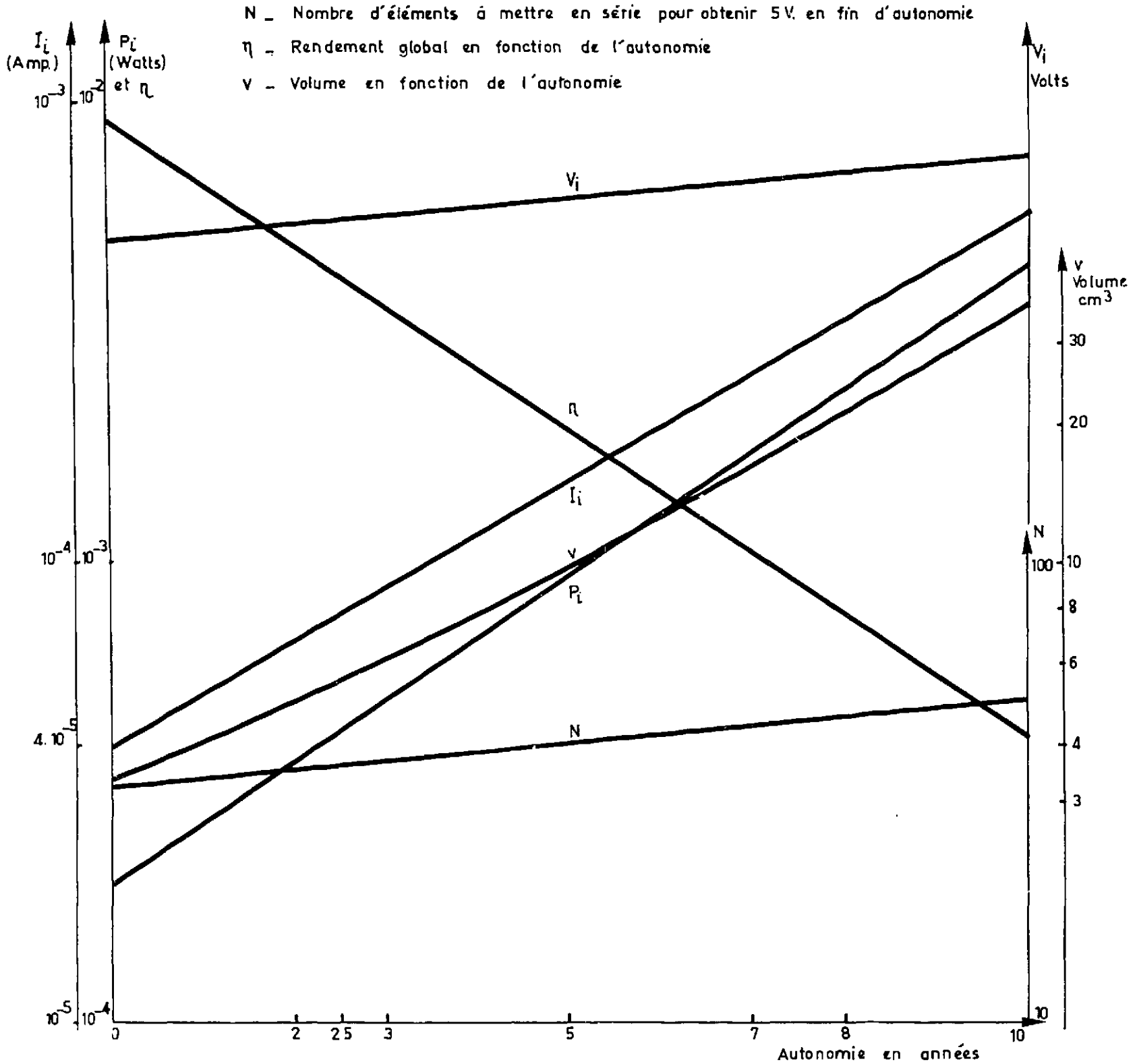



Fig 20 _ GENERATEUR UTILISANT UNE SOURCE DE $^{147}Pm$ ( PUISSANCE 200 µw )
CARACTERISTIQUES INITIALES A PREVOIR SUIVANT L'AUTONOMIE DESIREE

TABLEAU VII - GENERATEURS 200 MICROWATTS UTILISANT UNE SOURCE DE $^{238}Pu$

CARACTERISTIQUES SUIVANT LE FLUX PARTICULAIRE ET LE RENDEMENT DE COLLECTION.

| Flux particulaire dans $2\pi$ stéradians | CARACTERISTIQUES DU RADIOISOTOPE. | | | Rendement de collection | CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES | | | CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | Dimensions hors tout | | | | Puissance spécifique | |
| | Quantité par $cm^2$ | Quantité totale | Activité totale en curies | | Densité de courant de court-circuit | Densité de puissance en charge | Rendement | Surface totale des éléments pour obtenir 200 µwatts. | Nombre d'éléments en série pour obtenir 5 volts en charge | Surface d'un élément | Nombre d'éléments en parallèle pour obtenir 40 µA | diamètre | hauteur | volume | poids | volumique | massique |
| $\alpha$ $cm^{-2}\,s^{-1}$ | grammes | grammes | Ci | Q | $J_{cc}$ amp. $cm^{-2}$ | Pm watts $cm^{-2}$ | $\eta$ | $S_T$ $cm^2$ | $q_s$ | $s_e$ $cm^2$ | $q_p$ | Ø cm | H cm | v $cm^3$ | Pd g | W. $cm^{-3}$ | W. $g^{-1}$ |
| $10^8$ | $4.10^{-4}$ | $2,8.10^{-2}$ | 0,485 | 1 | $2,3.10^{-5}$ | $2,9.10^{-6}$ | $1,45.10^{-2}$ | 69 | 35 | 2 | 1 | 2,1 | 1,2 | 4,15 | 25 | $4,8.10^{-6}$ | $8.10^{-6}$ |
| | | $6,25.10^{-2}$ | 1,09 | 0,5 | $1,15.10^{-5}$ | $1,28.10^{-6}$ | $6,4.10^{-3}$ | 156 | 39 | 2 | 2 | 2,1 | 2,1 | 7,3 | 45 | $2,75.10^{-6}$ | $4,45.10^{-6}$ |
| | | $1,18.10^{-1}$ | 2,05 | 0,3 | $6,9.10^{-6}$ | $6,8.10^{-7}$ | $3,4.10^{-3}$ | 295 | 43 | 2,3 | 3 | 2,2 | 3,1 | 11,8 | 72 | $1,7.10^{-6}$ | $2,8.10^{-6}$ |
| | | 0,192 | 3,34 | 0,2 | $4,6.10^{-6}$ | $4,2.10^{-7}$ | $2,1.10^{-3}$ | 480 | 46 | 3,5 | 3 | 2,6 | 3,3 | 17,5 | 110 | $1,15.10^{-6}$ | $1,8.10^{-6}$ |
| | | 0,445 | 7,75 | 0,1 | $2,3.10^{-6}$ | $1,8.10^{-7}$ | $9.10^{-4}$ | 1110 | 53 | 7 | 3 | 3,5 | 3,7 | 35,5 | 215 | $5,65.10^{-7}$ | $9,3.10^{-7}$ |
| $10^7$ * | $4.10^{-5}$ | $4,45.10^{-2}$ | 0,775 | 1 | $2,3.10^{-6}$ | $1,8.10^{-7}$ | $9.10^{-3}$ | 1110 | 53 | 7 | 3 | 3,5 | 3,7 | 35,5 | 215 | $5,65.10^{-7}$ | $9,3.10^{-7}$ |
| | | 0,108 | 1,88 | 0,5 | $1,15.10^{-6}$ | $7,35.10^{-8}$ | $3,7.10^{-3}$ | 2700 | 63 | 11 | 4 | 4,2 | 5,6 | 77,5 | 465 | $2,3.10^{-7}$ | $4,3.10^{-7}$ |

* Pour des valeurs de Q < 0,5 la surface totale des éléments et leur nombre conduisent à des dimensions exagérées.

TABLEAU VIII- GENERATEURS (200 µW) UTILISANT UNE SOURCE DE $^{147}Pm$ ( CARACTERISTIQUES SUIVANT L'AUTONOMIE DESIREE).

| Autonomie | Activité totale du radioisotope | Courant global à prévoir initialement pour obtenir en fin d'autonomie - 40 µA | Puissance globale à prévoir initialement pour obtenir en fin d'autonomie - 200 µW | Rendement global | Surface totale des éléments pour obtenir la puissance initiale | Nombre d'éléments en série pour obtenir 5 volts en fin d'autonomie | Surface d'un élément | Nombre d'éléments en parallèle pour obtenir 40 µA en fin d'autonomie | DIMENSIONS HORS TOUT | | | | PUISSANCE SPECIFIQUE UTILE | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | Diamètre | Hauteur | Volume | Poids | Volumique | Massique |
| années | curies | $I_i$ ampères | $P_i$ watts | $\eta$ | $S_T$ $cm^2$ | $q_s$ | $s_e$ $cm^2$ | $q_p$ | $\phi$ cm | H cm | V $cm^3$ | $P_d$ g. | $W.cm^{-3}$ | $W.g^{-1}$ |
| 1/4 | 50 | $4.10^{-5}$ | $2.10^{-4}$ | $9.10^{-3}$ | 51,4 | 33 | 1,55 | 1 | 1,9 | 1,2 | 3,4 | 20 | $5,9.10^{-5}$ | $10^{-5}$ |
| 2,5 | 108 | $7,8.10^{-5}$ | $4,4.10^{-4}$ | $4,2.10^{-3}$ | 111 | 37 | 1,5 | 2 | 1,9 | 2 | 5,65 | 34 | $3,5.10^{-5}$ | $5,9.10^{-6}$ |
| 5 | 242 | $1,5.10^{-4}$ | $9,4.10^{-4}$ | $1,9.10^{-3}$ | 248 | 41 | 2,9 | 2 | 2,4 | 2,1 | 9,5 | 57 | $2,1.10^{-5}$ | $3,5.10^{-6}$ |
| 8 | 550 | $3,2.10^{-4}$ | $2,2.10^{-3}$ | $8,2.10^{-4}$ | 565 | 46 | 4,1 | 3 | 2,8 | 3,2 | 19,6 | 117 | $10.^{-5}$ | $1,7.10^{-6}$ |
| 10 | 1090 | $5,8.10^{-4}$ | $4,4.10^{-3}$ | $4,2.10^{-4}$ | 1120 | 50 | 7,45 | 3 | 3,6 | 3,5 | 35,8 | 215 | $5,6.10^{-6}$ | $9,3.10^{-7}$ |

## VI . THERMOELECTRIQUE A FIL.

### VI .1. Principe.

Ce type de générateur utilise l'énergie produite par des thermocouples. On sait que la tension aux bornes d'un thermocouple est proportionnelle à la différence de température entre les soudures ; la soudure froide étant généralement maintenue à une température constante. Mais cette tension est très faible, seulement quelques dizaines de microvolts par degré. Pour obtenir un volt à partir d'un flux thermique donné, il est donc nécessaire de monter un certain nombre de couples en série.

La tension maximum atteinte par n paires de couples reliés en série est :

$$V_o = n \alpha \Delta\theta$$

$\alpha$ pouvoir thermoélectrique (dépend de la nature des fils utilisés)

$\Delta\theta$ différence de température entre les soudures.

Une augmentation du nombre de couples diminue la température nécessaire pour atteindre la tension désirée et, par suite, les pertes thermiques

L'énergie conduite par les fils est déduite de la formule de FOURIER :

$$W_c = \frac{2 \lambda s n \Delta\theta}{l}$$

$\lambda$ : coefficient de conductibilité thermique des fils

s : section d'un fil

l : longueur d'un fil.

En utilisant les relations précédentes, on obtient le rendement électrique sans pertes :

$$\eta_{c.} = \frac{1}{2} \quad \frac{P_e}{V_o} \quad \frac{\alpha}{\lambda} \quad \frac{1}{s}$$

Cette relation comprend trois rapports dépendant respectivement : des performances désirées, de la nature des fils utilisés et de la géométrie du générateur. Ni la température, ni le nombre de couples n'interviennent dans cette formule du rendement électrique où l'énergie fournie au générateur est supposée constante.

VI .2. Calcul du générateur optimum.

Dans le cas présent, nous étudions un générateur élémentaire fournissant 0,2 mA sous 0,5 V à partir d'un flux thermique inférieur à 0,5 W. On se fixe pour ce générateur les caractéristiques physiques suivantes :

$n = 50$

$l = 1$ cm

$S = 1\ cm^2$ (surface des supports de couples).

Si on utilise des fils de chromel et de constantan, le pouvoir thermoélectrique est :

$\alpha = 62\ \mu V$ par degré

Pour un générateur travaillant à sa puissance maximum, les pertes thermiques par rayonnement de la face chaude sont relativement importantes et dépassent à elles seules 0,5 W.

En fait, dans ce cas, il est plus intéressant d'utiliser un générateur travaillant près de sa tension à vide car à l'optimum électrique ne correspond pas un optimum thermique.

Posons :

$$V_o = \beta \; V \qquad \text{avec } 1 < \beta \leqslant 2$$

soit :

$$\Delta\theta = \beta \; \frac{V}{\alpha_n}$$

Dans le cas idéal d'adaptation électrique $\beta$ est égal à 2. Il tend vers 1 si le générateur travaille près de sa tensi on à vide. Comme V est imposé, $\Delta\theta$ est alors plus faible. Pour limiter les pertes thermiques, $\Delta\theta$ doit être inférieur à 200 °C.

Considérons l'énergie totale à fournir au générateur en supposant qu'il travaille sous vide c'est-à-dire en incluant uniquement les pertes par rayonnement de l'extrémité chaude :

$$W = 2 \lambda \; \frac{s}{l} \; n \; \Delta\theta + \varepsilon \sigma \; (T + \Delta\theta)^4$$

Groupons les constantes et faisons apparaître $\beta$ .

$$W = n A \left( \frac{\beta}{\beta - 1} \right) + B \left( C + D \; \frac{\beta}{n} \right)^4$$

en tenant compte des conditions précédentes :

$$A = 1,28 \; . \; 10^{-4} \qquad C = 0,31$$

$$B = 4 \qquad D = 8$$

La figure 21 représente en fonction de $\beta$ la courbe du flux thermique nécessaire pour obtenir 0,2 mA sous 500 mV. On constate qu'il existe un minimum pour $\beta = 1,15$, correspondant à une tension à vide de 575 mV, pour un flux thermique de 290 mW.

Les courbes de la figure 22 permettent d'apprécier la différence de flux absorbé avec des générateurs travaillant à leur puissance maximale ($\beta = 2$) et avec des générateurs optimalisés ($\beta = 1,15$). Ces courbes sont tracées pour une même densité de couple : 50 $cm^{-2}$.

Caractéristiques électriques du générateur optimum :

$V_o = 575$ mV

$\Delta\theta = 185$ °C

W = 290 mW

R = 375 $\Omega$

On détermine le diamètre $\phi$ des fils de chromel et de constantan :

$\phi = 45\ \mu$

Le rendement au point de fonctionnement envisagé (500 mV - 0,2 mA) est :

$\eta = 0,345 \quad 10^{-3}$

Par contre ce générateur peut fournir à partir du même flux thermique mais avec une charge adaptée une puissance plus élevée :

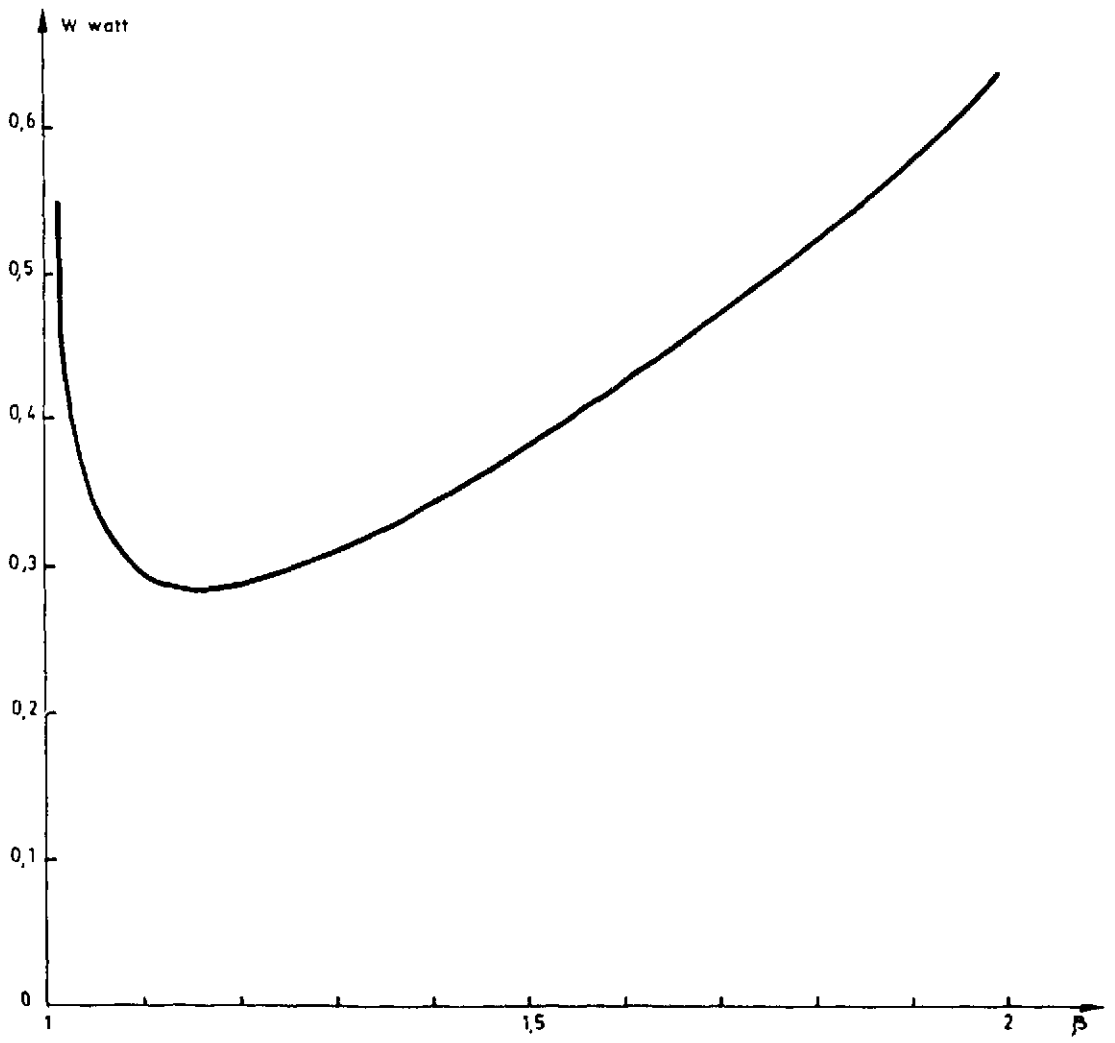



Fig 21 FLUX THERMIQUE EN FONCTION DU RAPPORT β DE LA TENSION A VIDE SUR LA TENSION DE FONCTIONNEMENT POUR OBTENIR LE POINT 0,2 mA - 0,5 V

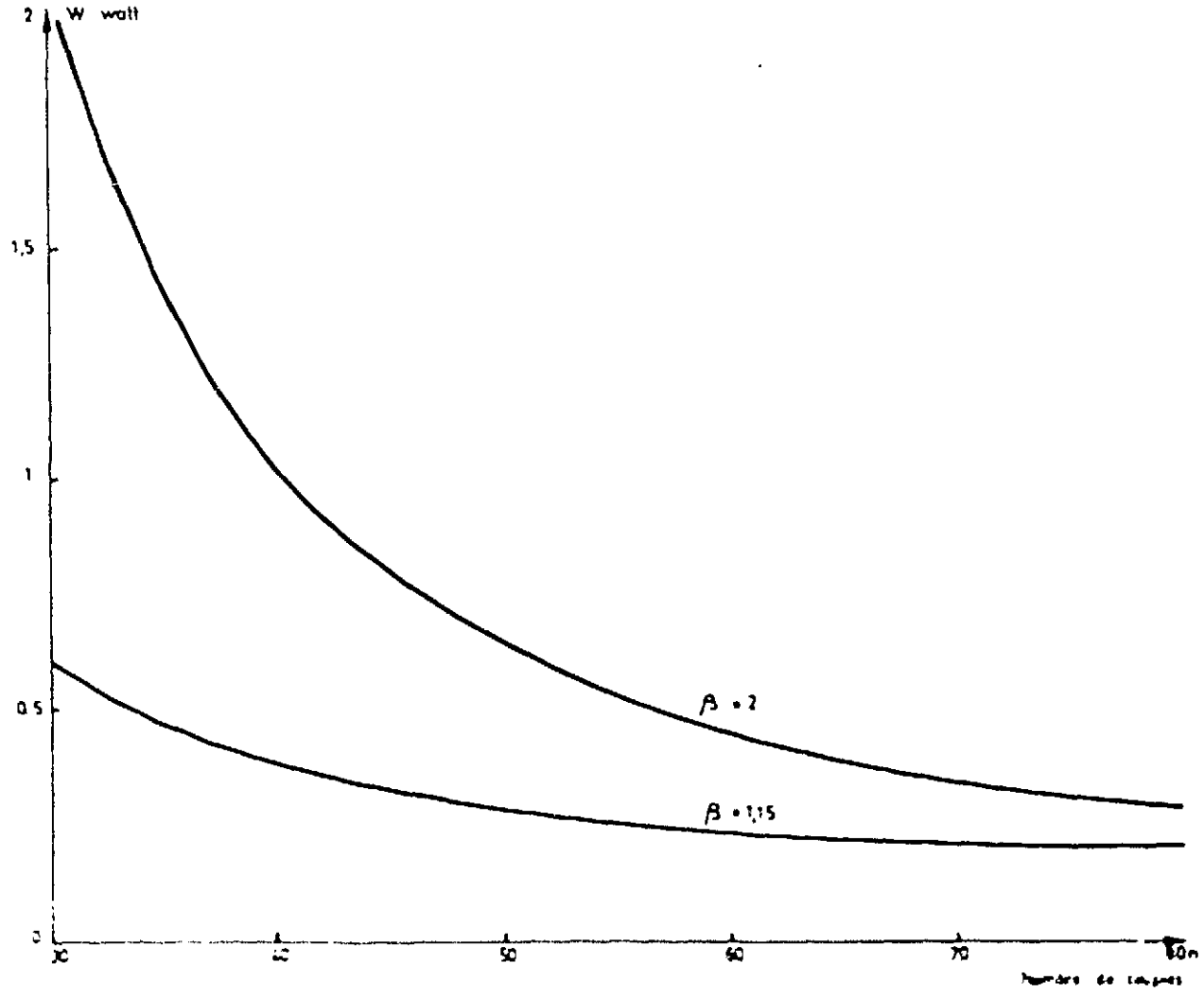



Fig 22 - RELATION ENTRE LE FLUX THERMIQUE ET LE NOMBRE DE COUPLES POUR OBTENIR 0,2 mA - 0,5 V

$P_{max} = 0,22$ mW

$\eta_{max} = 0,76 \quad 10^{-3}$.

La figure 23 représente la courbe de la tension à vide en fonction du flux fourni au générateur.

Remarque :

Il est intéressant d'augmenter la densité de couples sur les plaquettes support ; cette amélioration exige une étude technologique plus poussée. Les courbes de flux thermique représentées sur la figure 24 permettent de comparer le générateur précédemment décrit avec un autre générateur similaire constitué de 100 couples au lieu de 50. Le nouveau minimum correspond alors à un fonctionnement plus voisin de l'optimum électrique.

VI . 3. Ensemble convertisseur 1 volt - 0,2 mA.

Il se compose de deux générateurs élémentaires : chaque générateur étant disposé sur la base d'une capsule cylindrique contenant le combustible (voir figure 25 ). La surface latérale de cette source est thermiquement isolée comme défini au chapitre I. L'ensemble est placé sous vide dans un boitier en platine. Une feuille de mica de faible épaisseur, placée sur chaque face des générateurs évite de court-circuiter les couples. Le système délivre 0,2 mA sous 1 volt à partir d'un flux thermique d'environ 600 mW.

Caractéristiques de la source :

- Radioélément : $^{238}Pu$

  quantité 1,6 g

  puissance thermique 0,8 watt

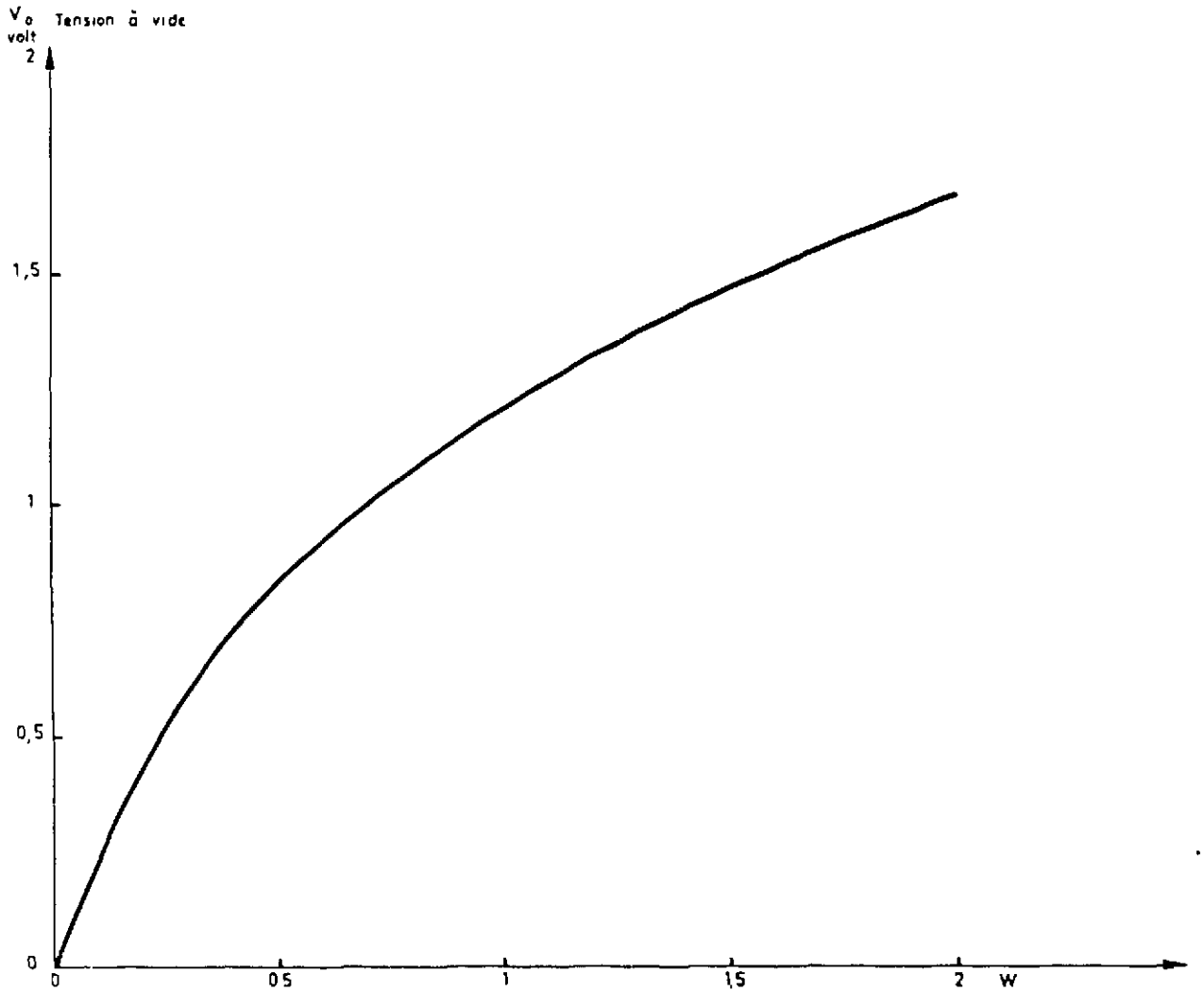



Fig 23 _TENSION A CIRCUIT OUVERT EN FONCTION DU FLUX THERMIQUE

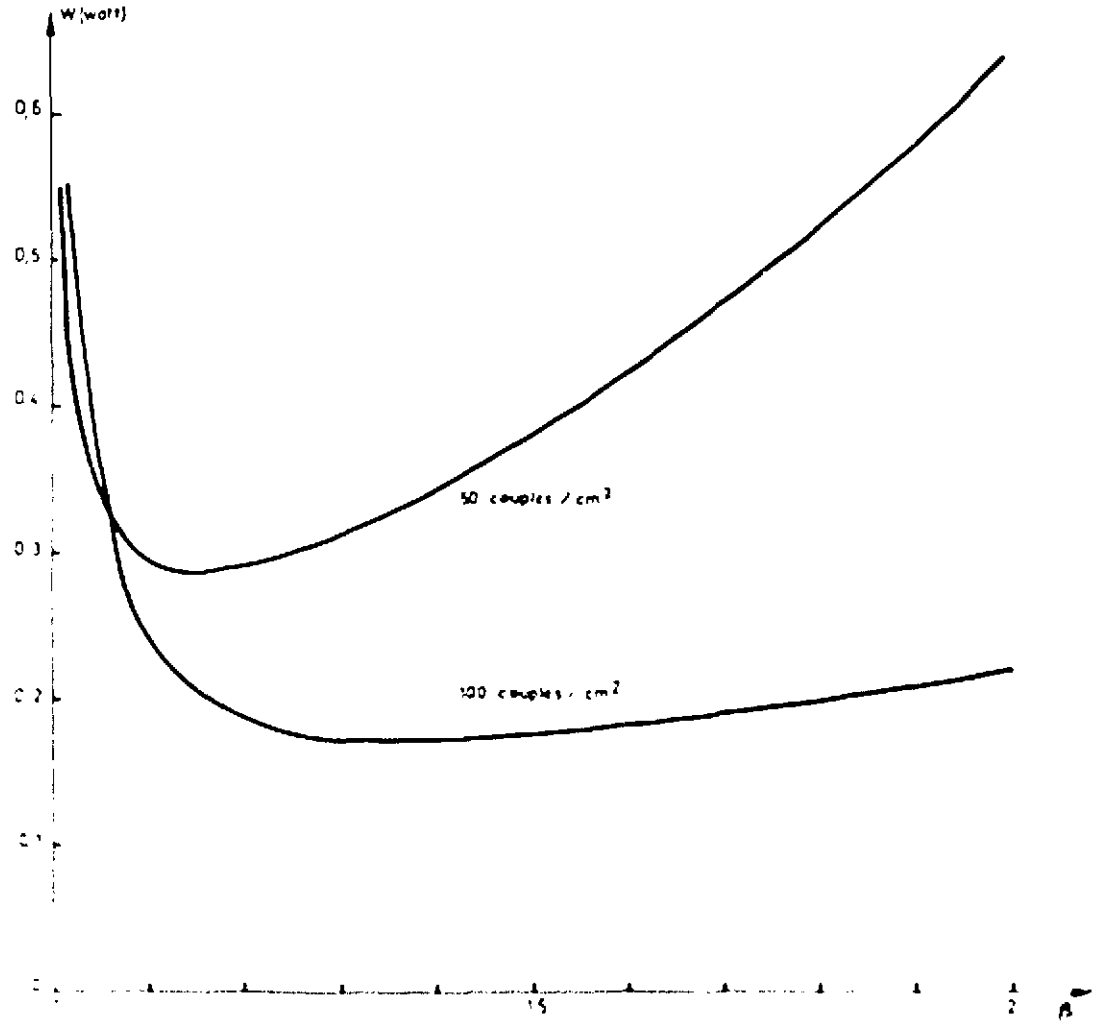



Fig 24 COMPARAISON ENTRE LES FLUX NECESSAIRES POUR OBTENIR 0,2 mA - 0,5 A AVEC DES GENERATEURS DE 50 ET DE 100 COUPLES EN FONCTION DE H

- Capsule : matériau : platine

volume interne : 2 fois le volume du plutonium

$(\frac{V_o}{V_p} = 2)$

VI .4. Exemple de réalisation.

Nous avons construit des générateurs thermoélectriques à partir d'éléments que nous possédions en laboratoire. Ces générateurs se présentent sous la forme d'un cube (voir figure 26 ). Deux des faces opposées contiennent respectivement les soudures froides et les soudures chaudes. Une plaquette d'alumine de 1 $cm^2$, percée de 16 trous de 5/10 sert de support aux soudures. Les fils utilisés sont en chromel et en alumel de 2/10 . Chaque type de fil passe par chaque trou de telle façon qu'une fois le générateur terminé les couples soient tous en série.

Caractéristiques :

$n = 16$

$l = 1$ cm

$s = 3,14\ 10^{-4}\ cm^2$

$\alpha = 40\ \mu V$ par degré )
) couple chromel-alumel
$\lambda = 0,18$ W/cm °K )

On a relevé la caractéristique VI qui peut se représenter sous la forme algébrique :

$V = 0,58\ (\Delta\theta) - 6\ I$ (R = 6 ohms)

$V_o$ . V en mV

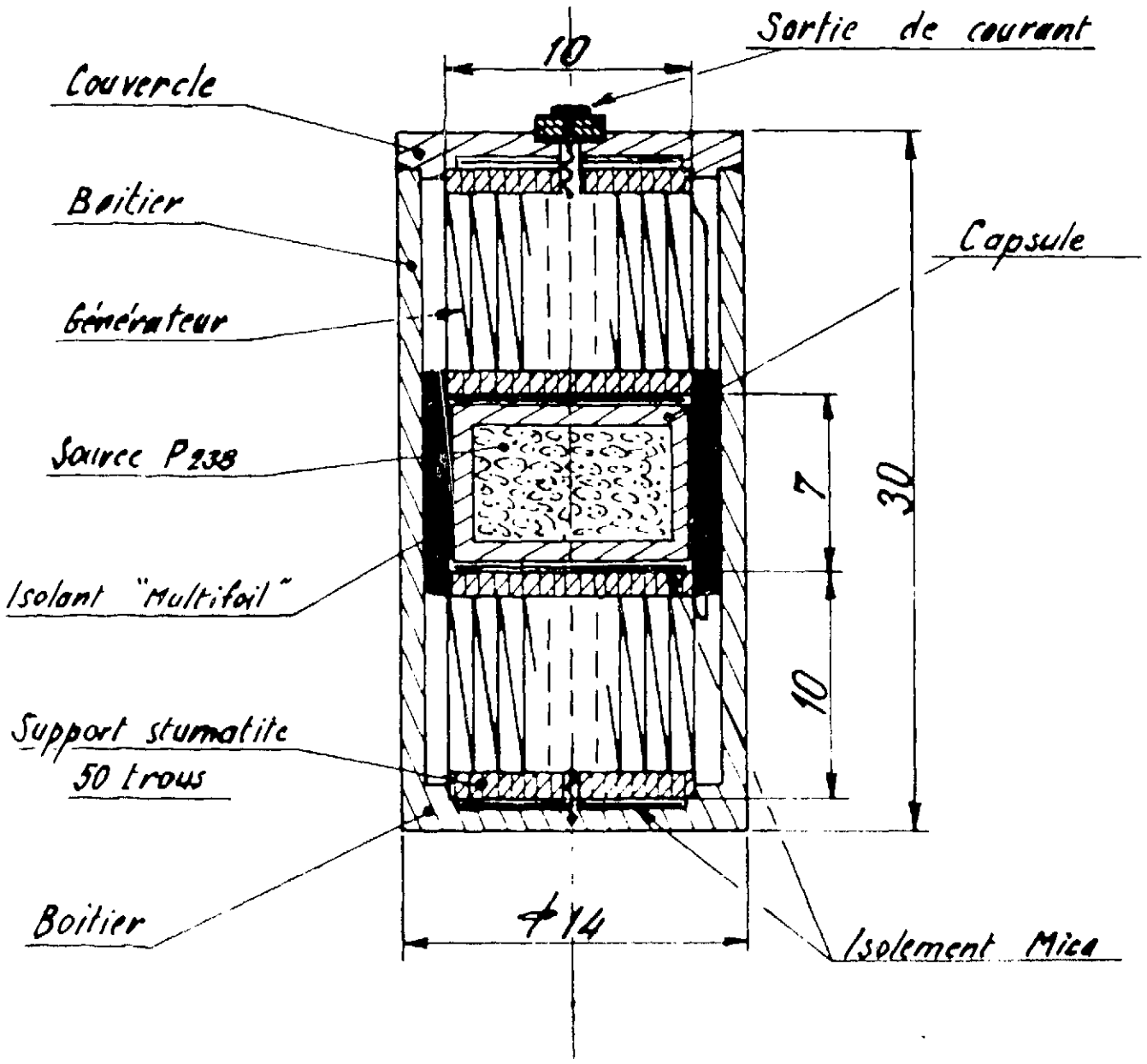
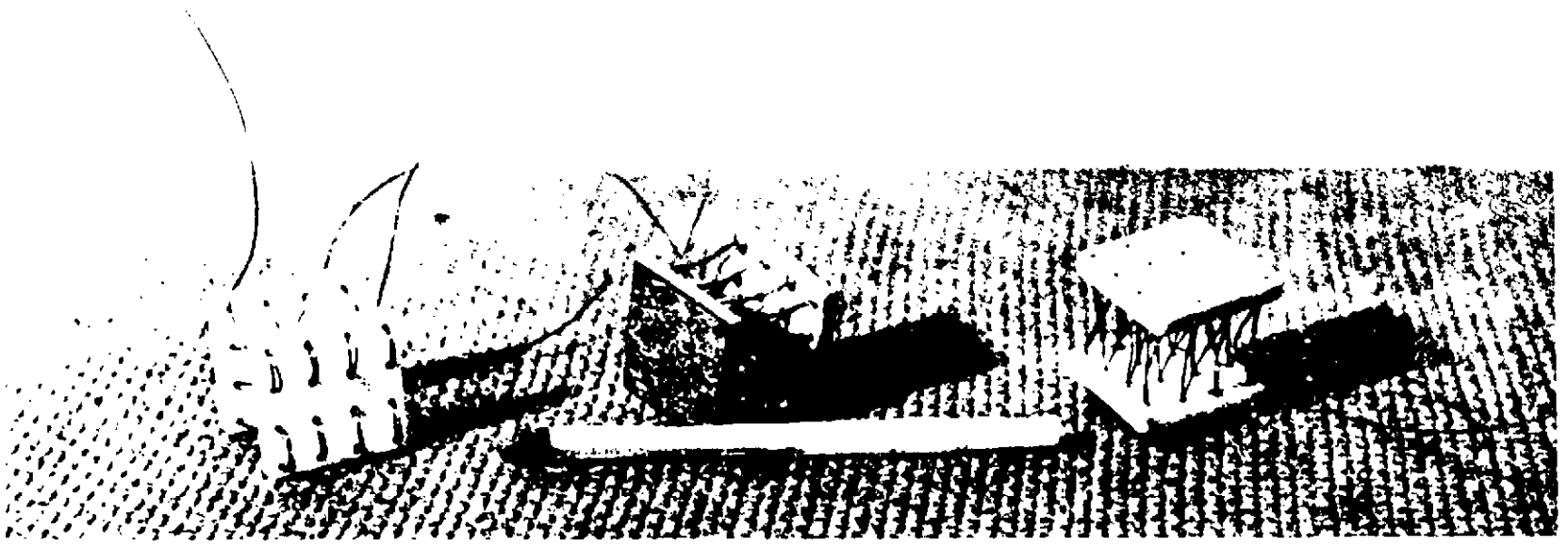


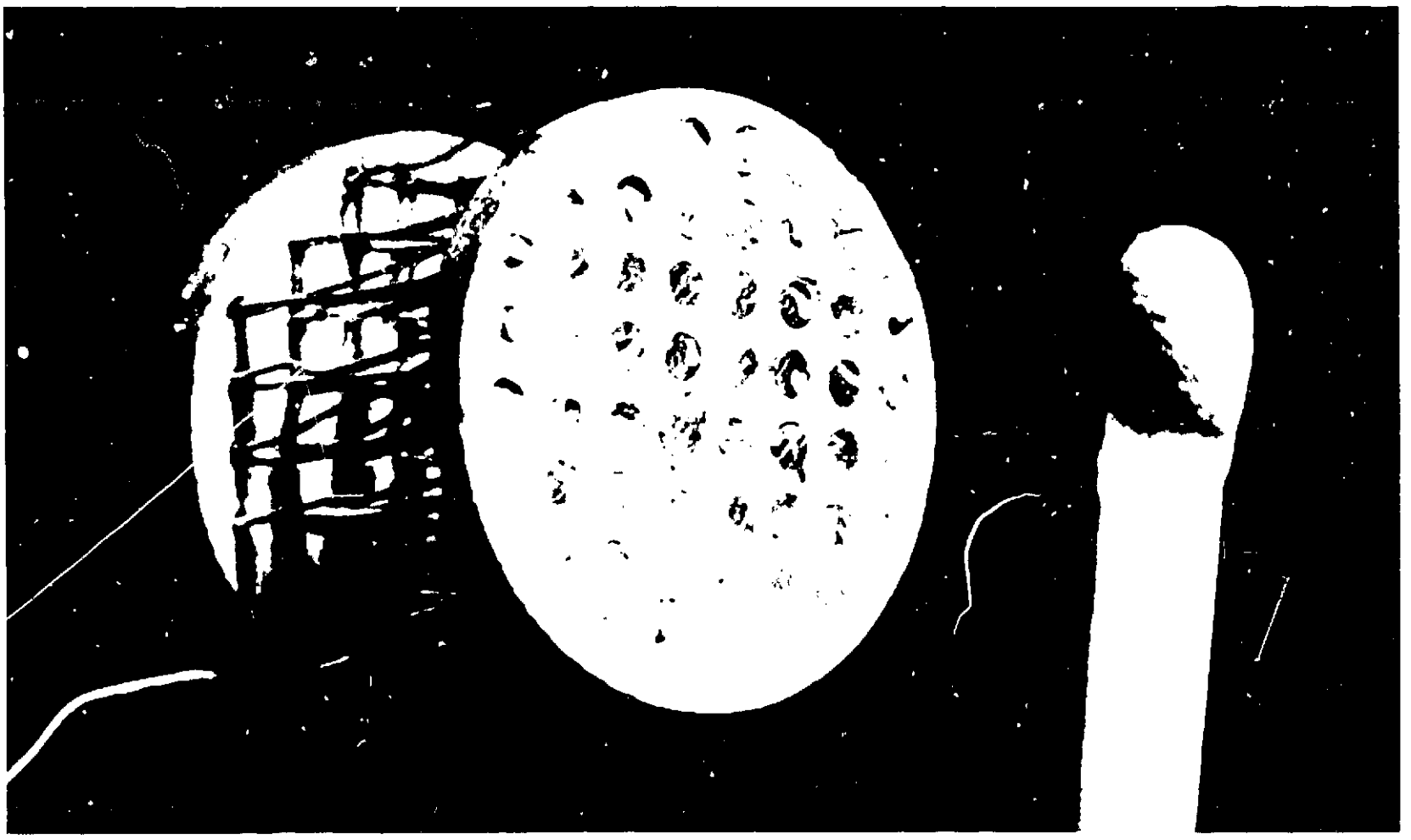

Figure 25

GENERATEUR THERMOELECTRIQUE 1 volt-0, 2mWatt-28Ci-0, 8Wth.40g

Echelle : 4



a) Générateurs 16 couples à différents stades de leur fabrication.



b) Générateur 52 couples en cours d'études.

Figure 26 - GENERATEURS THERMOELECTRIQUES A FILS (réalisations)

$\Delta\theta$ en °C

I courant (en mA)

Les résultats sont proches de ceux prévus par la théorie. Lors des expériences, le transfert du flux thermique est effectué par rayonnement. Nous avons étudié les caractéristiques de ce générateur à l'air libre puis sous vide ($10^{-3}$ torr). Pour permettre une comparaison nous avons groupé sur le tableau IX les valeurs obtenues pour un flux thermique de 1 watt.

A titre indicatif, le poids de ce générateur de 1 $cm^3$ est de 1,620 g ; les plaquettes support en alumine interviennent pour 1,460 g.

GENERATEUR - 16 couples - utilisant une source de 1 watt thermique.

TABLEAU IX

| | Valeurs calculées | | Valeurs mesurées | |
|---|---|---|---|---|
| | sans pertes | avec rayonnement | à l'air libre | sous vide |
| $V_o$ en mV<br>Tension à circuit ouvert | 350 | 178 | 110 | 168 |
| $I_{cc}$ en mA<br>Courant de court-circuit | 50 | 29,5 | 18 | 27 |
| Pe en mW<br>Puissance électrique | 4,5 | 1,32 | 0,5 | 1,18 |
| $\eta$<br>Rendement global | $4,5.10^{-3}$ | $1,32.10^{-3}$ | $0,5.10^{-3}$ | $1,18.10^{-3}$ |
| $\Delta\theta$ en °C<br>Différence de température | 546 | 280 | 180 | 270 |
| Wc en W<br>Puissance transférée par conduction | 1 | 0,51 | 0,31 | 0,475 |
| $\eta_e$<br>Rendement électrique | $4,5.10^{-3}$ | $2,6.10^{-3}$ | $1,6.10^{-3}$ | $2,5.10^{-3}$ |

## VII - COMPARAISON DES DIFFERENTS MODES DE CONVERSION ET CONCLUSION.

Parmi toutes les possibilités offertes par les quatre procédés étudiés, nous avons choisi une évaluation moyenne des performances de chaque système et, à titre comparatif, nous avons chiffré ces performances dans le tableau X.

Le choix du mode de conversion est déterminé par l'utilisation envisagée.

Le procédé thermoionique est intéressant par sa compacité et par son rendement( $\eta \geq 10^{-3}$) ; le procédé thermoélectrique à fil par sa simplicité, sa robustesse et son prix de revient. Etant donné leurs faibles impédances on ne peut malheureusement obtenir plus d'un volt en charge avec chacun de ces générateurs.

Les convertisseurs utilisant les effets thermophotovoltaïques et radiovoltaïques, peuvent délivrer des tensions de plusieurs volts avec des rendements supérieurs à $10^{-3}$. On peut même diminuer sensiblement la quantité de radioélément avec le premier de ces deux procédés si des puissances de quelques centaines de microwatts sont recherchées.

Le procédé radiovoltaïque a pour principal avantage d'utiliser de faibles quantités de plutonium : (2 curies pour une puissance électrique de 200 μW). Mais la dispersion en surface de la source implique une multiplicité des cellules et des dimensionnements deux à trois fois plus importants que ceux réalisables avec les autres procédés. L'utilisation du $^{147}Pm$ accentue encore cet

inconvénient et nécessite de fortes activités si on veut disposer d'une autonomie de plusieurs années. Quelles que soient les améliorations obtenues avec les détecteurs à semiconducteurs, l'exploitation adéquate de ce procédé ne deviendra compétitive qu'en recherchant un radioélément mieux adapté que le $^{238}Pu$ ou le $^{147}Pm$, en particulier parmi les émetteurs $\beta$ d'énergie inférieure aux seuils de création des défauts dans le semiconducteur. Sinon, la dégradation des performances des cellules sous l'influence des radiations reste le seul handicap de ce procédé. Des vérifications expérimentales sont nécessaires, en particulier avec les matériaux du type CdTe et CdS.

En définitive, le procédé thermoélectrique étant mis à part, les performances de ces différents modes de conversion sont conditionnées avant tout par les technologies des sources radioisotopiques : ces technologies devant conduire vers une adaptation optimale des différents paramètres de transfert, c'est-à-dire :

- La température pour les sources thermiques (procédés T.I. et T.P.V.) ;

- La densité du flux particulaire utile et l'énergie des particules pour les sources "froides" déposées en couche mince (procédé R.V.).

TABLEAU X - CARACTERISTIQUES DE DIFFERENTS MICROGENERATEURS 1 VOLT AVEC SOURCE $\leqslant$ 1 WATT.

| Type de conversion | Caractéristiques de la source | CAPSULE | | | | GENERATEUR | | | Note | Nombre d'éléments convertisseurs | Surface d'un élément ($cm^2$) | Autonomie (années) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $v_o/v_p$ *** | T (°K) | e (cm) ** | $\epsilon$ | Puissance en charge P (mW) | Volume v ($cm^3$) | Poids (g) | | | | |
| (T.I.) | $^{238}Pu$ - 2 g. 1 watt therm. 35 Ci | 1 | 1084 | 0,2 | 0,05 | 0,7 | 2,3 | 50 | B | 1 | ~1 | 10 |
| | | 2 | 1160 | 0,1 | 0,05 | 2 | 3 | 65 | AB | 1 | ~1 | 10 |
| (T.P.V) * | $^{238}Pu$ - 2 g. 1 watt therm. 35 Ci | 1 | 1185 | 0,05 | 0,1 | 1,74 | 4 | 40 | AC | 11 | 0,08 | 10 |
| | | 2 | 1161 | 0,1 | 0,05 | 1,22 | 4,5 | 45 | AC | 13 | 0,158 | 10 |
| | | 4 | 1158 | 0,05 | 0,05 | 1,18 | 6,1 | 60 | AC | 13 | 0,148 | 10 |
| | $^{238}Pu$ - 0,6 g. 0,3 watt therm. 10 Ci | 1 | 1205 | 0,05 | 0,05 | 0,5 | 2 | 20 | AC | 12 | 0,0512 | 10 |
| | | 4 | 1211 | 0,05 | 0,025 | 0,42 | 3,9 | 40 | AC | 14 | 0,0744 | 10 |
| (R.V.) * | $^{238}Pu$ - 62,5mg ~ 1 Ci | | 300 | | | 0,2 | 7,3 | 50 | A | 75 | 2 | 10 |
| | $^{238}Pu$ - 118 mg 2 Ci | | 300 | | | 0,2 | 11,8 | 90 | A | 129 | 2,3 | 10 |
| | $^{147}Pm$ - 108 curies | | 300 | | | 0,2 | 5,65 | 45 | A | 74 | 1,5 | 2,5 |
| | $^{147}Pm$ 242 curies | | 300 | | | 0,2 | 9,5 | 80 | A | 82 | 2,9 | 5 |
| (T.E.F) | $^{238}Pu$ - 1,6 g 0,8 watt therm 28 Ci | 2 | 500 | 0,1 | | 0,2 | 4,6 | 40 | AB | 100 | 0,02 | 10 |

* Générateurs 1 volt/5 volts.

** e = épaisseur du gainage de la capsule

*** $v_o/v_p$ = rapport volume interne de la capsule / volume du plutonium

A = Protection extérieure

B = Capsule en platine

C = capsule en tantale.

# BIBLIOGRAPHIE.

[1] CLEMOT Max, DEVIN Bernard, DURAND Jean-Paul
CEA R-3418

[2] BOUCHER R.
CEA N 1019

[3] N.S. RASOR et al.
IIe Conférence Internationale sur la Conversion Thermoionique,
STRESA, Mai 1968, Communication B 15

[4] J. DUNLAY
IIe Conférence Internationale sur la Conversion Thermoionique,
STRESA, Mai, 1968, Communication E 7.

[5] SPENKE E.
Les semiconducteurs électroniques, DUNOD, Paris, 1959.

[6] IOFFE A.F.
Physics of semiconductors - Infosearch Limited London, 1960

[7] BOMAL R.
Mémoire CNAM, Paris 1958

[8] N'GUYEN VAN DONG
Thèse, Paris 1959.

[9] ROBERT M.
LEP (Paris) Acta Electronica, vol. 6, Oct. 1962, n° 4

[10] WEDLOCK B.D.
MIT Scientific Report n° 3, Août 1962.

[11] WERNER-BLOSS
Elektronische - Energie Wandler Physik und Technik - Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH Stuttgart 1968, p. 103/111.

[12] SCHWARTZ R.J.
P.I.N. Thermophotovoltaïc diode - Août 1967, Purdue University-School of Electrical Eng. Lafayette-Indiana U.S.

[13] LECLERC P.
CSF, Rap. 1983 (20.2.1964)

[14] FORTINI A., BAUDUIN Ph., SIBILLOT P.
Sixth AGARD, Combustion and Propulsion Colloquium, Cannes - 16 (20.3.1964).

[15] BOMAL R., KOCH L., N'GUYEN VAN DONG, SCHNEIDER G.
Colloque International d'Electronique nucléaire, Paris 1958.

[16] Mc DONNEL DOUGLAS CORP.
Isomite et Betacel - Information l'Onde Electrique, décembre 1968.

[17] N'GUYEN VAN DONG
B.I.S.T. Saclay, n° 56, Nov. 1961.

[18] A. LEFEVRE, J. LEFEVRE
Syndicat d'études sur les batteries isotopiques, Rapport d'activité, OCDE, Avril 1968.

[19] SEITZ
Disc. Faraday Soc. 5, 271, 1946

[20] DEARNALEY
I.E.E.E. Trans. on N.S., Vol. 10, n° 1, janvier 1963

[21] WAPSTRA A.H., NIJGH G.J., VAN LIESHOUT R.
(N.H.P.C.) Amsterdam, 1959.

*Manuscrit reçu le 7 mai 1969*

FIN