

**POSITION DES COMPOSÉS III-V DANS LA CONVERSION
D'ÉNERGIE SOLAIRE**

par

M. AVEROUS

Centre d'Études d'Électronique des Solides
Université des Sciences et Techniques du Languedoc
Laboratoire associé au CNRS
Montpellier, France

RESUME

On presente une revue des différents composés III-IV tels que Ga Al As, Ga Al Sb, In Al Sb, parmi les différents matériaux permettant de convertir l'énergie solaire par effet photovoltaïque.

RESUM

Entre els diversos materials que permeten de convertir l'energia solar per l'efecte fotovoltaic, hom passa revista a diferents composts III-V, com és ara Ga Al As, Ga Al Sb, In Al Sb. Hom en posa en evidència l'interès i en dona els rendiments esperats.

SUMMARY

Diferent compounds of the (III-V) groups, namely Ga, Al, As; Ga, Al, Sb; In, Al, Sb; have been considered among a wide scope of materials which can be selected for photovoltaic energy conversion. The calculate efficiencies are presented.

INTRODUCTION

En 1977, les générateurs photovoltaïques représentent seulement une puissance installée de quelques centaines de kilowatts. La production actuelle triple chaque année. En 1986, l'ERDA (Energy Research and Development Administration) prévoit une production de 500 MW/an au prix de 2.500 F/KW installé pour les U.S.A.¹

Quels seront les matériaux les plus aptes à répondre à cette demande importante? Le choix d'un matériau ou d'une classe de matériau doit tenir compte de l'objectif fixé. En effet, des objectifs tels que:

- Grande production électrique
- Centrale de puissance en site isolé
- Alimentation de pompes à eau au Sahel

sont des objectifs très différents où le prix d'une installation compétitive peut être multiplié par dix. Dans chacun des trois cas, il a été calculé que le prix de l'énergie électrique compétitif est respectivement 0,15 F/KWH - 0,50 F/KWH, 1,50 F/KWH; le dernier objectif (1,50 F/KWH) peut être atteint par les cellules au Si, si on suppose que leur prix devrait diminuer d'un facteur 3 ou 4 dans les années à venir compte tenu d'une production importante, et qu'un nouveau facteur favorable de 3 ou 4 pourrait être obtenu par une concentration faible.²

La figure 1 montre le rendement de conversion minimum requis pour un prix de cellule donné, pour atteindre un coût de l'électricité de 0,15 F/KWH - 0,50 F/KWH, 1,50 F/KWH. Il apparaît clairement sur cette figure que pour atteindre l'objectif: centrale de puissance en site isolé, il faut faire appel à une nouvelle génération de photopiles qui doivent répondre aux spécifications suivantes: prix du KWH: 0,5 F, soit un rendement supérieur à 10 % pour un prix inférieur à 1.000 F/m². Cet objectif sera d'autant mieux

1. M. RODOT, M. BARBE, J. DIXMIER, *Revue de Physique Appliquée*.
2. J. J. LOFERSKI, *Proc. IEEE* 51, 667 (1963).

atteint que l'on pourra travailler sous forte concentration. Nous allons montrer que les composés III-V et plus particulièrement leurs alliages sont aptes à répondre à ces spécifications.

I. CARACTÉRISTIQUES OPTIMISÉS D'UN MATÉRIAU

La bande interdite: La largeur de bande interdite est un paramètre essentiel. Sa valeur optimisée est un compromis entre les différentes pertes qui interviennent dans la conversion de l'énergie et qui limitent le rendement. Nous les avons classées en pertes dues aux mécanismes de fonctionnement et pertes imposées par la technologie.

Limitation de rendement due aux pertes:

A — Pertes dues au mécanisme de fonctionnement:

- Photons d'énergie $h\nu < E_g$ non absorbés.
- Photons d'énergie $h\nu > E_g$ (absorption inactive).
- Porteurs minoritaires photocréés non collectés à cause de leur longueur de diffusion limitée.
- Facteur de tension $\frac{eV_{oc}}{E_g}$
- Facteur de courbe $\frac{I_m V_m}{I_{cc} I_{oc}}$
- Pertes par réflexion.

B — Pertes de puissance imposées par la technologie:

- Recombinaisons des porteurs par l'intermédiaire d'états de surface.
- Recombinaison au niveau du contact ohmique arrière.
- Recombinaisons des porteurs dans le volume y compris la zone de charge d'espace.
- Courant de fuite à travers la jonction causée par des imperfections.
- Autres mécanismes de conduction à travers la jonction (émission de champ, effet tunnel).

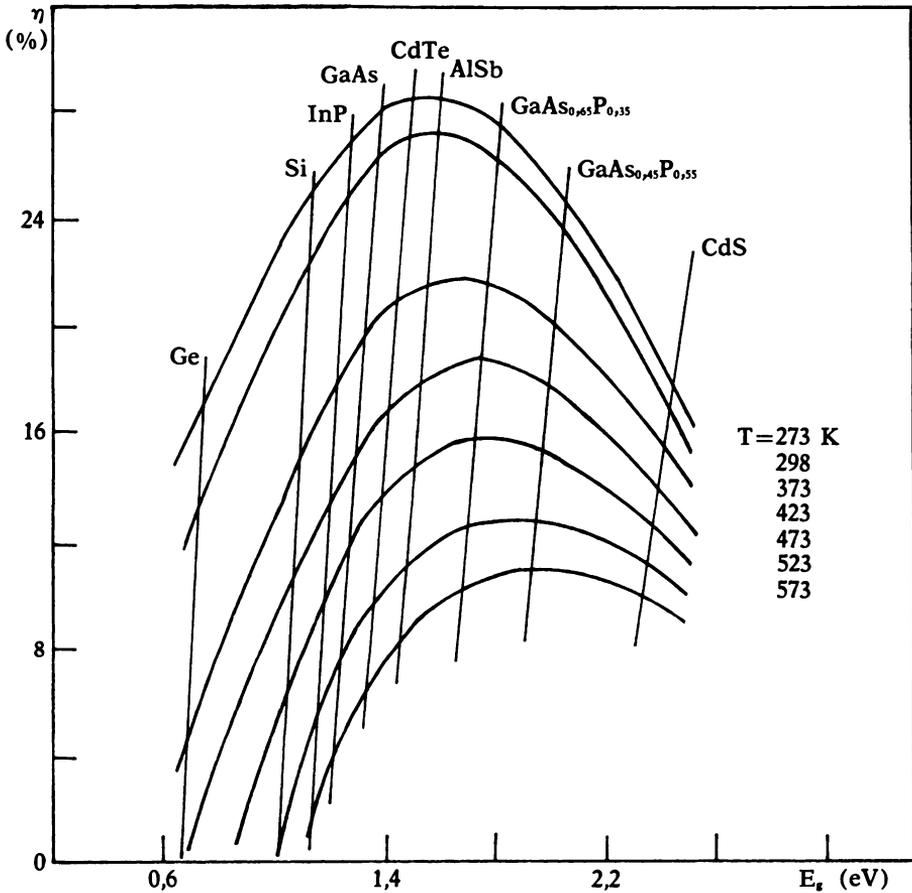


FIGURE 2. Rendement théorique d'une cellule solaire en fonction de E_g et de la température d'utilisation.

En tenant compte de tous ces facteurs, on obtient la figure 2³ sur laquelle on remarque que le maximum se déplace vers les gap importants quand T augmente, ce qui signifie que pour travailler sous forte concentration il faudra choisir des matériaux à large bande interdite. Nous notons sur cette figure la place privilégiée de nombreux composés III-V aussi bien à température ambiante qu'à température élevée.

3. M. Rodor, *Acta Electronica*, 18, 4, 1975, pp. 345-358.

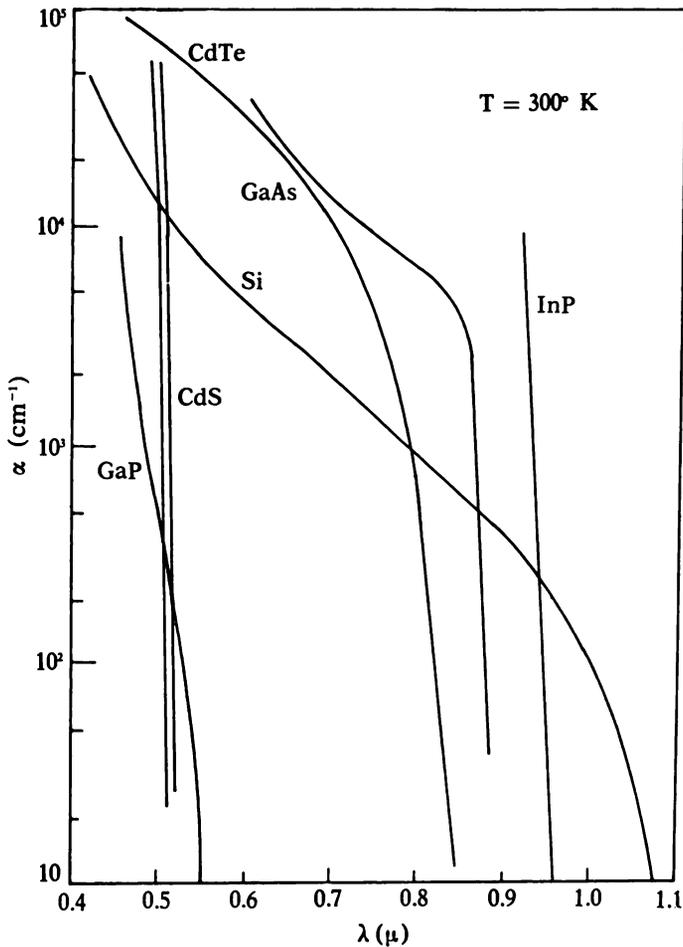


FIGURE 3. Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde de différents semiconducteurs. On note la différence dans la forme des courbes du GaAs et du Si caractéristiques d'un gap direct et indirect.

La figure 3 donne la variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde. Nous remarquons que les matériaux à transition directe ont un coefficient plus élevé que ceux à transition indirecte. Cela se traduira par une épaisseur plus faible de la couche sensible de la photopile si on utilise un matériau à gap direct, (GaAs, InP), donc par une économie de matériau. Néanmoins cet avantage du gap direct est tempéré par une durée de vie beaucoup plus brève, ce qui du point de vue longueur de diffusion se compense.³ La structure idéale serait celle qui permettrait d'avoir des

créations de paire électrons-trous comme dans le cas d'un gap direct et des recombinaisons identiques à celles d'un gap indirect. Nous verrons que cela est possible avec des alliages du type $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}$.

Les pertes les plus importantes proviennent de l'absorption inactive.^{3,4} Il a été proposé pour diminuer ces pertes des hétérojonctions à gap gradué (figure 4).

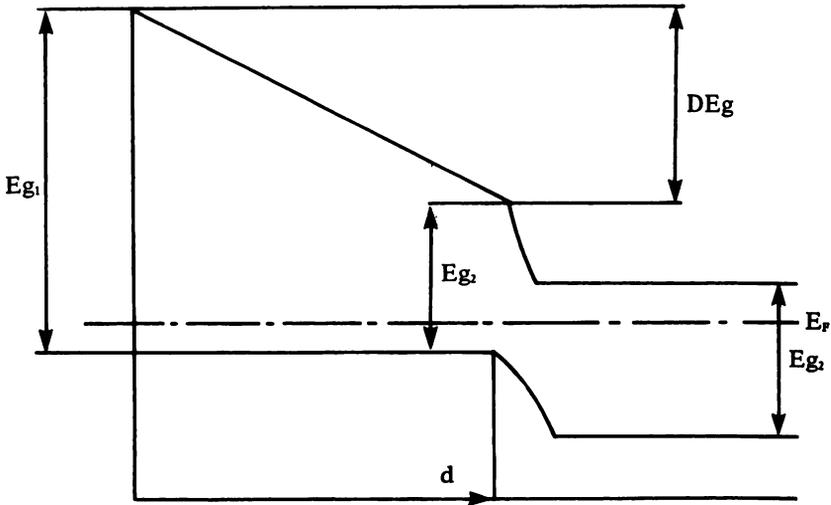


FIGURE 4. Hétérojonctions à gap gradué. GaAs-GaAlAs ou GaSb-GaAlSb.

La figure 4 montre tout le parti que l'on peut tirer d'une telle structure⁵ puisqu'elle permet de créer des paires électrons-trous pour des $h\nu$ de valeurs différentes. Cependant il est nécessaire d'avoir des paramètres cristallins de part et d'autre de la jonction qui diffèrent de moins de 1 %. Les composés III-V sont particulièrement bien placés puisque par exemple le GaAs et l'AlAs ont respectivement des paramètres de réseau de 5.654 Å et 5.661 Å, de même le GaSb et l'AlSb ont des paramètres de réseau de 6.09 Å et 6.13 Å. En ce qui concerne les valeurs respectives des longueurs de bandes interdites, nous avons:

4. M. J. WOLF, *Energy Convers.*, 14, 49 (1975).

5. Y. MARFAING, *Proc. Int. Conf. on Solar Cells*. Toulouse, 605 (1970).

GaAs (transition directe)	1.43 eV	
AlAs (transition indirecte)	2.15 eV	$\Delta E = 0.7 \text{ eV}$
GaSb (transition directe)	0.8 eV	
AlSb (transition indirecte)	1.6 eV	$\Delta E = 0.8 \text{ eV}$

Par conséquent, il est possible de fabriquer des hétérojonctions à gap gradué proche du gap de rendement optimum à une température d'utilisation donnée.

La figure 5 montre les variations de composition entre l'interface et la surface d'une couche de $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}$ obtenue expérimenta-

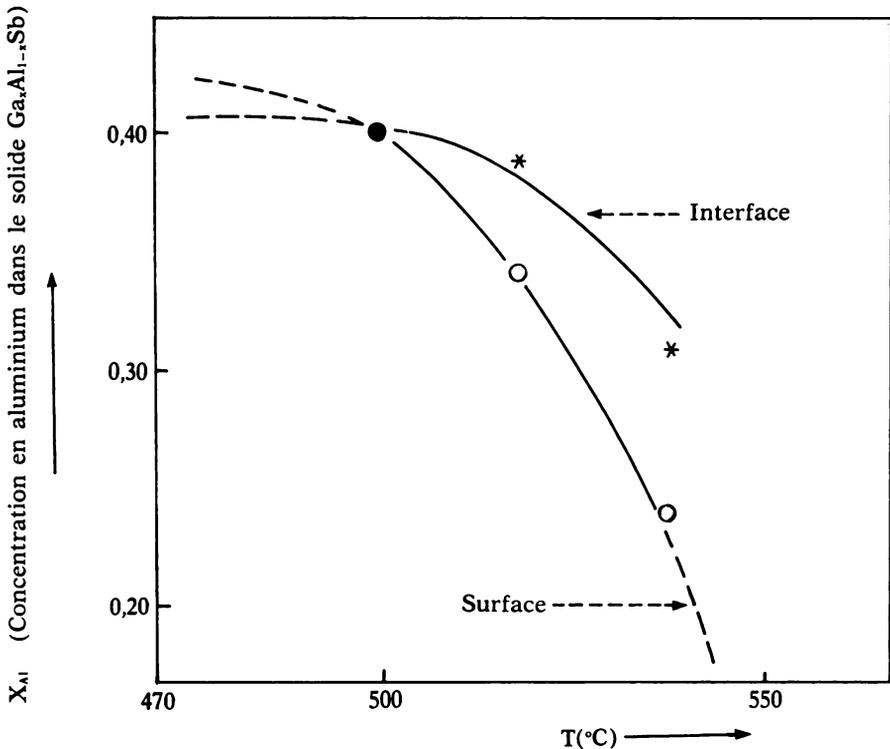


FIGURE 5. Variation de concentration d'aluminium à la surface et à l'interface en fonction de la température de fabrication ou un $C_L = \frac{\text{Al}}{\text{Ga}}$ % en poids = 0.75%.

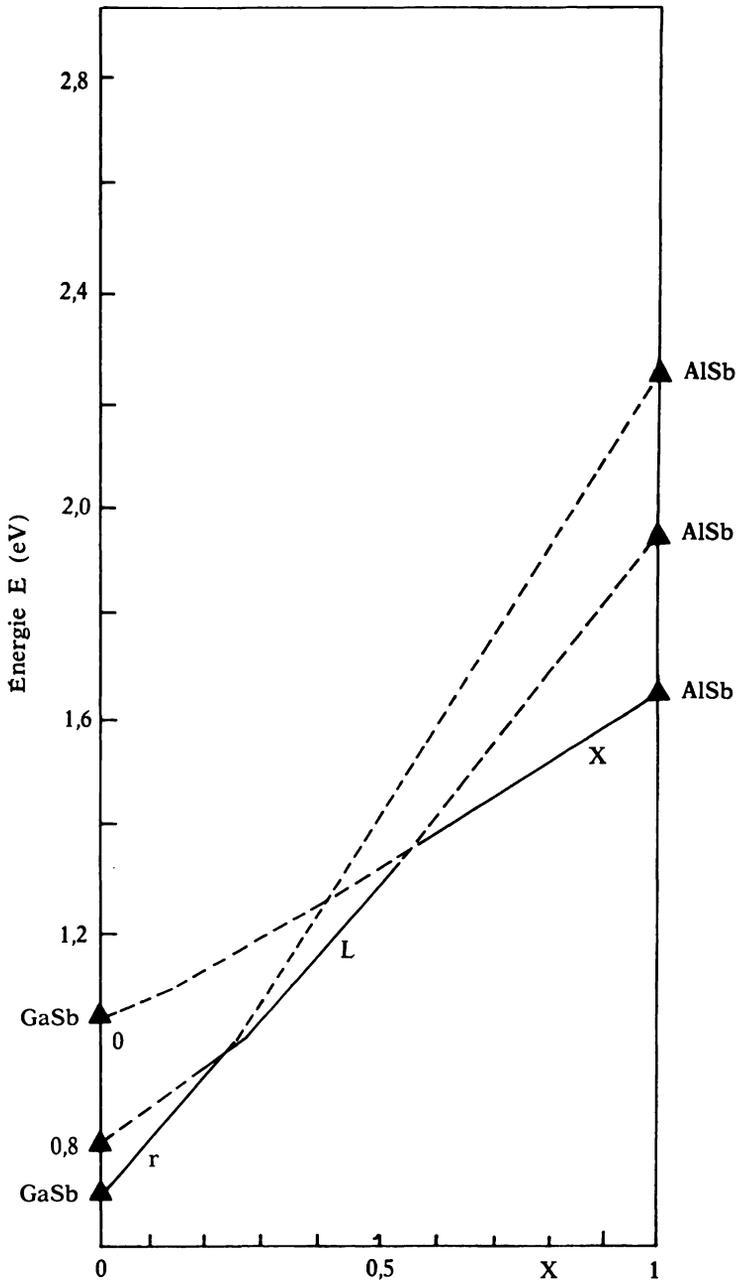


FIGURE 6. Évolution de la structure de bande de $\text{GaAl}_{1-x}\text{Sb}$ avec x .

lement par VAN MAU et BOUGNOT⁶ en fonction de la température de fabrication pour un rapport $C_2=0,75$ d'aluminium sur gallium en poids dans le creuset, au départ.

A partir de l'évolution de la structure de bande avec la composition du $Ga_xAl_{1-x}Sb$,⁷ que l'on observe sur la figure 6, nous pouvons pour un x convenablement choisi, obtenir dans notre cellule photovoltaïque une structure de bande non graduée, mais avec deux minimum de la bande de conduction situés comme dans la figure 7. A partir d'une telle structure, où le minimum (111) est situé à kT du minimum central (000), on peut bénéficier d'un gap direct pour la création de paires électrons-trous (probabilité beaucoup plus grande pour le minimum central). Les électrons ainsi photocréés, vont se thermaliser dans le minimum subsidiaire (111) et par conséquent du point de vue recombinaison, nous pouvons bénéficier des

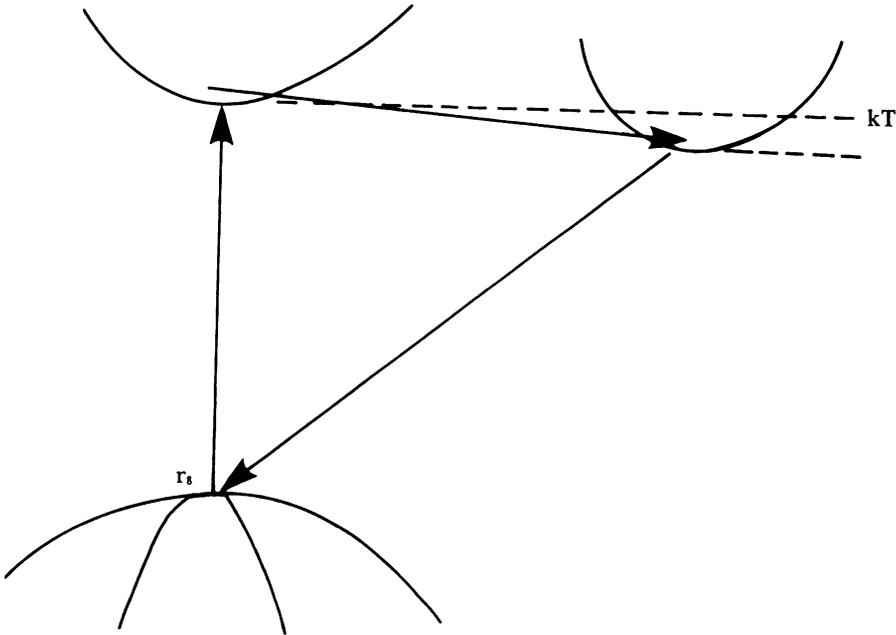


FIGURE 7. Configuration de bande pour x voisin de 0.40. Minimum central situé à kT au-dessus du minimum en $k=(111)$.

6. N. VAN MAU et G. BOUGNOT, *Rapport de Contrat D.G.R.S.T.*, Décembre, 1975.
7. H. MATHIEU et al., *Phys. Rev.*, 12, 12, 5846 (1975).

avantages d'un gap indirect. Seuls les composés III-V dans le domaine d'énergie de rendement optimum permettent de réaliser de telles structures. Les matériaux actuellement étudiés pour la réalisation de gap gradués, ou de structure à deux bandes de conduction sont: le GaAlAs, le GaAlSb et plus récemment l'InAlSb.

Aptitude à travailler sous concentration solaire

L'élément important qui freine actuellement le développement des photopiles fabriquées à partir de composés III-V est leur prix de revient.

Dans une perspective de prix de KWH fixé à 0.5 F., il est nécessaire de travailler sous forte concentration solaire. De ce fait, on augmente le rendement du système dans des proportions importantes, et le coût de la photopile devient une partie peu importante du coût total. Pour un facteur de concentration $K=100$, la photopile intervient pour 20 % du coût total. Pour un facteur de concentration $K \approx 1000$, ce pourcentage devient très faible, et l'emploi de matériau tel que GaAs, GaAlAs, GaAlSb devient économiquement rentable, à condition que ces matériaux se prêtent à la concentration.^{1, 8, 9, 10}

La figure 8 montre les résultats obtenus sous concentration de 1000, en fonction de la température sur une hétérostructure⁸ GaAs n — GaAs p — Ga_xAl_{1-x}As p par J. DU BOW, Colorado, State University. Les remarques qui peuvent être faites à partir de cette figure sont les suivantes:

- le rendement photovoltaïque diminue avec la température, mais le rendement photothermique augmente, de telle sorte que le rendement total tend vers une valeur limite de 25 %;
- le GaAlAs est ici utilisé comme fenêtre, ce qui signifie, qu'il élimine les recombinaisons à la surface de la jonction, et il agit comme un contact basse résistance qui décroît la résistance série de la cellule.

Par conséquent, on doit encore pouvoir augmenter le rendement en utilisant des hétérostructures, faites d'une fenêtre GaAlAs, mais aussi d'une hétérojonction. Le GaAlSb se prête également à ce type de cellule avec toutefois une limitation vers les grands gap.

Des expériences de concentration ont été faites également sur des photopiles GaAs — GaAs_{0,43}P_{0,57} qui ont montré un comportement similaire avec un gain important sur le rendement.⁹

8. J. DU BOW, *Electronics*, 11, 86, Nov. 76.

9. A. S. EPSEIN and M. V. DEBAETS, *Sol. Stat. Elect.*, 9, 1019 (1976).

10. L. W. JAMES and R. L. MOON, *Appl. Phys. Lett.*, 467 (1975).

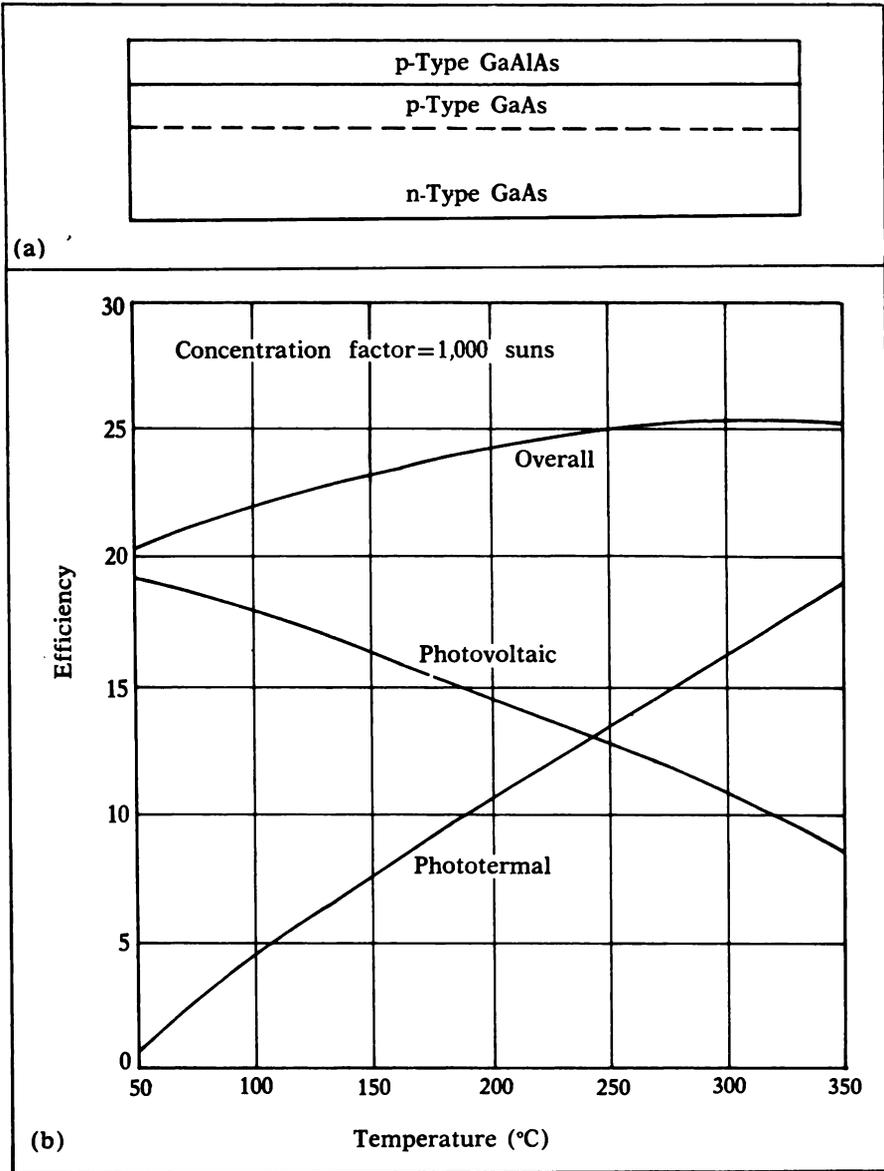


FIGURE 8. Rendement total obtenu sous concentrations de 1000, en fonction de la température pour GaAs-GaAlAs.⁹

CONCLUSION

A partir de 1980, il existera un marché important pour des cellules solaires de rendement élevé fonctionnant sous forte concentration.

Les composés III-V semblent devoir occuper une place de choix dans la conquête de ce marché grâce aux atouts suivants: gap optimum — gap gradué — structure de bande à plusieurs minima — recombinaisons en surface faible, grâce à des fenêtres d'alliage III-V déposées sur la cellule — résistance série faible — bonne tenue aux fortes concentrations ($K > 1000$).