Une étude comparative de dispositifs photovoltaïques multiples

J.R. Leguerre, M. Leroy

► To cite this version:

J.R. Leguerre, M. Leroy. Une étude comparative de dispositifs photovoltaïques multiples. *Revue de Physique Appliquée*, 1984, 19 (10), pp.889-903. 10.1051/rphysap:019840019010088900 . jpa-00245281

HAL Id: jpa-00245281

<https://hal.science/jpa-00245281>

Submitted on 1 Jan 1984

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
73.40L

Une étude comparative de dispositifs photovoltaïques multiples

J. R. Leguërre et M. Leroy

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du Centre National de la Recherche Scientifique,
7, avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex, France

(Reçu le 24 mai 1983, révisé le 23 mai 1984, accepté le 16 juillet 1984)

Résumé. — Un calcul précis des valeurs des largeurs de bande interdite Eg_k de matériaux hypothétiques et du rendement maximum $\eta_{\max}$ correspondant a été effectué pour des associations multicolores de photopiles couplées en mode dichroïque, tandem ou cascade. L'effet d'un couplage optique par un miroir unique entre plusieurs cellules solaires isolées et/ou associées en mode tandem ou cascade a été particulièrement analysé ainsi que l'influence d'un couplage électrique par un simple fil conducteur entre les photopiles.

Une simulation a été réalisée avec des matériaux réels tels que Ge, Si, AsGa. Un résultat caractéristique de cette étude est que le couplage par un miroir dichroïque d'une cellule et d'une structure cascade est particulièrement intéressant sur le plan du rendement et les valeurs des Eg_k sont pratiquement insensibles au niveau de concentration solaire.

Abstract. — A precise calculation of the values of gaps Eg_k of hypothetical materials and of the corresponding maximum efficiency $\eta_{\max}$ was carried out for multigap solar cells systems coupled in splitting, tandem or cascade mode. The effects of an optical coupling by a dichroic mirror between independent solar cells or/and cells coupled in tandem or cascade mode has been analysed in particular in addition to the influence of an electrical coupling of a simple conducting wire between the cells.

A simulation program has been performed on materials as Ge, Si, GaAs. One particular result of our study is that the coupling by a dichroic mirror between an independent cell and a cascade structure gives an interesting efficiency and the values of gaps Eg_k are practically insensitive to the level of solar concentration.

Nomenclature

CR : Facteur de concentration solaire
 D_n : Constante de diffusion des électrons
 D_p : Constante de diffusion des trous
 Eg_k : Largeur de bande interdite ou « gap » de la cellule k
 J : Densité du courant qui traverse la cellule
 J_0 : Densité du courant de saturation
 J_L : Densité du courant de lumière
 k : Constante de Boltzmann
 N_A : Dopage côté P de la jonction
 N_D : Dopage côté N de la jonction
 $N_{ph}(h\nu)$: Nombre de photons incidents d'énergie $h\nu$ par unité de surface et de temps
 N_c : Densité effective d'états dans la bande de conduction
 N_v : Densité effective d'états dans la bande de valence
 q : Charge de l'électron
 r_k : Réflectance superficielle de la cellule k
 T : Température absolue
 T_{rk} : Transmittance du miroir k

V : Tension aux bornes de la cellule
 η_m : Rendement maximum d'une combinaison de k cellules ($k > 1$), le « gap » Eg_1 n'étant pas à sa position optimale
 $\eta_{\max}$: Valeur de η_m , Eg_1 étant à sa position optimale
 ρ_k : Taux d'ombrage de la cellule k
 τ_k : Coefficient de transmission de la cellule k
 τ_n : Durée de vie des électrons
 τ_p : Durée de vie des trous.

1. Introduction.

Parmi les pertes responsables du faible rendement des photopiles solaires, celles dues à l'excès d'énergie et à la non-absorption des photons sont les plus importantes. Le concept de l'utilisation simultanée de plusieurs photopiles de matériaux différents permet dans une certaine mesure, de limiter ces pertes et d'obtenir un meilleur rendement. Les cellules peuvent être couplées entre elles en les disposant les unes derrière les autres sur le trajet optique comme dans

le système tandem [1] ou par l'intermédiaire de miroirs dichroïques qui envoient sur chacune d'elles, une partie bien définie du spectre solaire comme dans le système dichroïque [2]. Une autre disposition est la structure cascade [3] où plusieurs jonctions p-n de matériaux différents sont empilées les unes derrière les autres en formant un bloc monolithique. Les différentes cellules sont donc placées sur le faisceau optique comme dans le système tandem, mais sont aussi, par définition même du dispositif, couplées électriquement.

Les travaux théoriques antérieurs ont surtout mis en évidence les augmentations possibles de rendement de systèmes de cellules indépendantes couplées en mode tandem ou en mode dichroïque. Cependant, il faut noter l'intérêt des groupements mixtes faisant intervenir des combinaisons des trois modes de couplage : tandem, dichroïque et cascade.

Dans ce travail, nous proposons une analyse de ce problème en considérant que le couplage optique entre les cellules est effectué non seulement par l'un ou l'autre des trois modes de couplage tandem ou dichroïque ou cascade, mais encore par une combinaison des modes dichroïque et cascade ou dichroïque et tandem.

De plus, nous avons souvent considéré le cas où les cellules sont mises en série électrique par un simple fil conducteur qui relie entre elles les photopiles initialement indépendantes. Le but de cette étude est de mettre en évidence d'une part les différences qui existent entre les modes cascade et tandem couplés

électriquement, d'autre part de connaître les modifications par rapport au système à cellules indépendantes lorsque sur le plan pratique on décide d'effectuer une liaison électrique série entre les éléments par un simple fil conducteur.

Nous avons étudié des systèmes de un, deux, trois et quatre cellules constitués de matériaux hypothétiques de largeurs de bande interdite respectives Eg_1, Eg_2, Eg_3, Eg_4 avec toujours $Eg_1 > Eg_2 > Eg_3 > Eg_4$; nous donnerons les valeurs optimales des Eg_k et les maxima de rendement de nos systèmes.

La figure 1 montre les différentes structures que nous avons étudiées; on distingue deux grandes subdivisions :

- les systèmes simples,
- les systèmes mixtes à un miroir.

Pour les premiers, nous avons considéré des cellules indépendantes en mode tandem et dichroïque et sont représentés sur les dessins numérotés (1a) et (1b) respectivement. Les dessins (1c) et (1d) représentent le cas lorsqu'elles sont reliées électriquement et le dessin (1e) celui où les cellules sont associées en mode cascade.

Pour les seconds, nous avons volontairement limité notre étude à des systèmes de cellules solaires utilisant un miroir unique; en effet, le mode dichroïque faisant intervenir deux ou trois miroirs ne semble pas trop réaliste à notre avis, le coût d'un tel ensemble pouvant devenir prohibitif. Nous avons ainsi commencé à analyser des associations à trois cellules; il faut alors noter qu'il peut exister deux types de configurations.

Fig. 1. — Schéma des différents groupements de cellules.

[Scheme of different systems].

Dans la configuration n° 1, le dessin (2a) de la figure 1 montre que la cellule 1 reçoit la partie du rayonnement lumineux d'énergie $h\nu \geq Eg_1$ où $h\nu$ est le quantum d'énergie du photon. Les cellules 2 et 3 de bandes interdites respectives Eg_2 et Eg_3 sont en mode tandem et reçoivent la partie du rayonnement d'énergie $h\nu < Eg_1$. La courbe de la transmittance T_r du miroir en fonction de l'inverse de l'énergie $h\nu$ du photon, doit alors avoir l'allure représentée sur la figure 2a. Dans ce travail, nous avons supposé que le miroir est idéal et ne sert qu'à effectuer une séparation spectrale. Le rendement du système ne dépendra alors que de la technologie de la configuration et du mode de liaison électrique des cellules. Le dessin (2b) de la figure 1 considère le cas précédent où les cellules 2 et 3 sont maintenant reliées par un fil électrique tandis que (2c) représente le cas où les trois cellules sont liées par un fil électrique. Le dessin (2d) reprend le groupement de (2a) dans lequel le tandem de cellules 2-3 est remplacé par une cascade ; le dessin (2e) considère alors l'effet d'une liaison électrique entre la cascade 2-3 et la cellule 1. La configuration n° 2

Fig. 2. — Transmittance T_r du miroir dichroïque en fonction de l'inverse de l'énergie $h\nu$ du photon pour : a) systèmes mixtes de 3 cellules, configuration 1 ; b) systèmes mixtes de 3 cellules, configuration 2 ; c) systèmes de 4 cellules.

[Transmittance T_r of the dichroic mirror as a function of the inverse of photon energy $h\nu$ for : a) combined systems of 3 cells, configuration 1 ; b) combined systems of 3 cells, configuration 2 ; c) systems of 4 cells.]

qui correspond aux dessins (2f) à (2j) de la figure 1 reprend les combinaisons précédentes dans lesquelles nous avons effectué une permutation des matériaux ; en particulier, la cellule 1 est remplacée par la cellule 3, la 2 par la 1 et la 3 par la 2. Il faut alors noter que la courbe idéale de transmittance T_r du miroir doit avoir l'allure représentée sur la figure 2b.

Enfin, nous avons considéré des systèmes à quatre cellules représentés sur les dessins (2k) à (2o) de la figure 1. La courbe correspondante de transmittance T_r du miroir est représentée sur la figure 2c. Le dessin (2k) fait intervenir 2 tandems indépendants, (2l) est un double tandem couplé électriquement séparément tandis que (2m) a la même configuration mais avec une liaison électrique entre les deux tandems ; (2n) est une double cascade et (2o) fait intervenir une liaison électrique entre les deux cascades.

Etant donné que les matériaux comme Si, Ge, AsGa sont actuellement assez bien connus, nous avons alors développé une analyse ayant pour but de mettre en évidence les modifications apportées par l'utilisation de ces matériaux dans les systèmes précédemment décrits. Nous avons étudié des groupements de deux cellules en considérant que la photopile de plus faible bande interdite était soit AsGa, soit Si, soit Ge. Dans le cas de système à trois cellules, AsGa a toujours été considéré comme le matériau intermédiaire Eg_2 .

Dans le paragraphe 2 de cet article, nous présenterons le modèle adopté. Dans le paragraphe 3, nous exposerons la méthode utilisée pour le calcul des valeurs optimales de Eg_k et des maximums de rendement de nos systèmes. Dans le paragraphe 4, nous donnerons les résultats obtenus et nous effectuerons une discussion lorsqu'il sera nécessaire.

2. Modèle d'étude.

Etant donné que nous étudions des systèmes de cellules ayant $Eg_1 > \dots > Eg_{k-1} > Eg_k > \dots > Eg_n$ répartis régulièrement dans le spectre solaire, la première cellule absorbera donc la partie du spectre d'énergie supérieure ou égale à Eg_1 , la deuxième cellule la partie du spectre d'énergie comprise entre Eg_1 et Eg_2 , la k -ième cellule, la partie du spectre comprise entre Eg_{k-1} et Eg_k .

Cette absorption sélective de la lumière ainsi que le mode de couplage des cellules entraîneront différentes composantes de courant lumière que nous nous proposons d'établir ; mais tout d'abord, donnons la loi du comportement de la jonction p-n.

2.1 CARACTÉRISTIQUE COURANT-TENSION. — Nous avons supposé que le comportement photovoltaïque des cellules solaires est bien décrit par l'expression suivante :

$$J = J_L - J_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

avec $T = 300$ K ; les effets thermiques n'ont donc pas été considérés dans ce travail. J_0 et J_L dépendent étroitement des matériaux utilisés.

Pour la cellule n° k , la densité du courant de saturation J_{0k} est donnée par la formule suivante [1] :

$$J_{0k} = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{gk}}{kT}\right). \quad (2)$$

Normalement A_0 varie suivant le type de matériau ; nous l'avons maintenu constant et égal à 3×10^{11} A.m⁻² d'après [1]. Cependant, dans l'analyse des systèmes avec des matériaux réels tels que Ge, Si, AsGa, nous avons développé une étude dans laquelle A_0 n'est pas constant. Les résultats sont reportés au paragraphe 4.8.

La densité de courant lumière J_L est évidemment différente suivant les modes de couplage optique entre cellules, qui entraînent des pertes optiques différentes. Nous allons maintenant donner les expressions de J_L .

2.2 EXPRESSIONS DES COURANTS DE LUMIÈRE SUIVANT LES MODES DE COUPLAGE. — Nous distinguerons quatre cas de couplage.

2.2.1 Cas idéal : aucune perte optique [1]. — La densité de courant lumière de la première cellule est donnée par :

$$J_{L1} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{g1}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot d h \nu. \quad (3)$$

— La densité de courant lumière de la cellule k est donnée par l'expression suivante :

$$J_{Lk} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{gk}}^{E_{gk-1}} N_{ph}(h\nu) \cdot d h \nu. \quad (4)$$

On suppose ici un rendement de collectage unité dans les photopiles.

2.2.2 Mode tandem. — Les cellules sont placées les unes derrière les autres, celle ayant E_{g1} est placée du côté des rayons incidents. Dans ce mode, chaque cellule possède un taux d'ombrage ρ_k , une réflectance superficielle r_k et un coefficient de transmission τ_k qui influent sur le nombre des photons incidents ; les expressions des courants lumière deviennent [4] :

— pour la première cellule :

$$J_{L1} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{g1}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - r_1) \cdot d h \nu \quad (5)$$

— pour la k -ième cellule :

$$J_{Lk} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{gk}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot \left[\prod_{i=1}^{k-1} \tau_i \right] \cdot \left[\prod_{i=1}^k (1 - \rho_i) \cdot (1 - r_i) \right] \cdot d h \nu. \quad (6)$$

Dans nos calculs, nous avons toujours pris :

$$\begin{aligned} \rho_k &= 0,05 ; r_k = 0,05 \\ \tau_k &= 0,90 \text{ si l'énergie du photon } h\nu < E_{gk} \\ \tau_k &= 0 \text{ si l'énergie du photon } h\nu \geq E_{gk}. \end{aligned}$$

2.2.3 Mode dichroïque. — Dans ce mode, le spectre solaire est découpé par des miroirs dichroïques, chaque miroir envoyant une partie du spectre solaire sur la cellule correspondante. On doit tenir compte de la transmittance T_{rk} du k -ième miroir.

Pour les systèmes mixtes à un miroir de la figure 1, nous avons déjà donné figure 2 les allures que doivent avoir les courbes de transmittance en fonction de l'énergie du photon.

Pour l'étude des systèmes simples de la figure 1, nous avons pris une courbe de transmittance idéale où :

$$\begin{aligned} T_{rk} &= 1 \text{ pour l'énergie du photon } h\nu < E_{gk} \\ T_{rk} &= 0 \text{ si l'énergie du photon } h\nu \geq E_{gk}. \end{aligned}$$

Dans cette configuration, les expressions du courant lumière sont [4] :

— pour la première cellule :

$$J_{L1} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{g1}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot (1 - T_{r1}) \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - r_1) \cdot d h \nu \quad (7)$$

— pour la k -ième cellule :

$$J_{Lk} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{gk}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot \left(\prod_{i=1}^{k-1} T_{ri} \right) \cdot (1 - T_{rk}) \cdot (1 - \rho_k) \cdot (1 - r_k) \cdot d h \nu. \quad (8)$$

2.2.4 Mode cascade. — Dans ce mode, on considère que les cellules sont construites en un seul bloc et peuvent être reliées par des jonctions tunnel [5] ou possèdent leur propre système de grille [6].

Nous avons considéré le premier cas en supposant que seule la première cellule a un taux d'ombrage ρ_1 et une réflectance superficielle r_1 .

Les expressions des courants lumière sont :

— pour la première cellule,

$$J_{L1} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{g1}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - r_1) \cdot d h \nu \quad (9)$$

— pour la cellule k ,

$$J_{Lk} = q \cdot CR \cdot \int_{E_{gk}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot \left(\prod_{i=1}^{k-1} \tau_i \right) \cdot (1 - \rho_1) \cdot (1 - r_1) \cdot d h \nu. \quad (10)$$

2.3 RENDEMENTS. — Le rendement de la cellule k est :

$$\eta_k = \frac{V_{Mk} \cdot J_{Mk}}{P_{TOT}} \quad (11)$$

où P_{TOT} est la puissance totale lumineuse incidente par unité de surface. V_{Mk} , J_{Mk} sont les coordonnées du point de puissance maximale [1].

Le rendement d'un système de n photopiles s'écrit :

$$\eta = \sum_{k=1}^n \eta_k. \quad (12)$$

Suivant les modes de couplage définis précédemment, nous aurons donc différentes valeurs de rendement.

Il est utile de préciser dès maintenant que le mode dichroïque sera toujours supérieur au mode tandem car les miroirs sont supposés parfaits. Le mode cascade n'est pas équivalent au tandem couplé électriquement. Ce dernier tient compte du taux d'ombre et de la réflectance superficielle de chaque cellule. Le mode cascade ne prend en compte ces facteurs que pour la première cellule.

On sait, donc que, d'une part, le mode cascade est supérieur au mode tandem, d'autre part le mode dichroïque est supérieur au mode tandem. Rien ne s'oppose à ce que le mode cascade soit supérieur au mode dichroïque et inversement. En particulier, les rendements obtenus dépendront pour une large part du choix des valeurs des paramètres technologiques r_k , ρ_k et τ_k .

Il faut noter que nous avons aussi calculé un rendement que nous avons appelé « rendement spectral » qui ne fait pas intervenir le fonctionnement électrique

de la photopile, ni les modes de couplage. Ce rendement hypothétique constitue une valeur supérieure du rendement et correspond à l'énergie maximale que l'on peut récupérer dans le spectre solaire par le concept des cellules multiples. Pour cela, nous avons dit que :

— la première cellule absorbe l'énergie,

$$E_1 = E_{g1} \cdot \int_{E_{g1}}^{\infty} N_{ph}(h\nu) \cdot d h \nu \quad (13)$$

— la cellule k , l'énergie :

$$E_k = E_{gk} \cdot \int_{E_{gk}}^{E_{gk-1}} N_{ph}(h\nu) \cdot d h \nu \quad (14)$$

L'énergie absorbée par le système de n cellules sera :

$$E = \sum_{k=1}^n E_k. \quad (15)$$

Le rendement spectral du système est donc :

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^n E_k}{E_{TOT}} \quad (16)$$

où E_{TOT} est l'énergie totale incidente sur le système de cellules par unité de surface.

3. Principes du calcul.

Dans cette partie, nous nous proposons de déterminer pour un ensemble de n cellules solaires de matériaux différents, la combinaison hypothétique des valeurs

des $Eg_1, Eg_2, \dots, Eg_n$ qui donnera le meilleur rendement pour tous les groupements représentés dans la figure 1. Une fois cette combinaison déterminée, nous pourrions trouver les matériaux les mieux adaptés pour la réalisation de notre structure multiple.

Nous avons utilisé les mesures de M. P. Thekarakara [7] qui donnent la division du spectre solaire AM1 en 188 intervalles sur une échelle d'énergie allant de 4 à 0,3 eV. Ce grand nombre d'intervalles nous permet d'avoir une grande précision dans la détermination des Eg_k et constitue une particularité de notre étude.

La procédure de recherche des valeurs des Eg_k est la même pour les cellules indépendantes et pour les cellules avec un couplage électrique. Seule intervient une différence dans l'exécution du calcul des rendements pour ces dernières où nous avons évidemment imposé qu'un même courant électrique traverse les cellules.

Examinons d'abord la méthode utilisée pour les cellules indépendantes.

Considérons par exemple une combinaison de deux cellules ayant $Eg_1 > Eg_2$. Les deux cellules étant positionnées sur l'échelle d'énergie, on calcule le courant lumière J_{Lk} pour chaque cellule k qui permet de déterminer les coordonnées V_{Mk} et J_{Mk} du point de fonctionnement où la puissance de sortie est maximale, d'où le rendement partiel η_k donné par la formule (11); le rendement de la combinaison sera égal à la somme des rendements partiels, soit :

$$\eta = \sum_{k=1}^2 \eta_k.$$

On fait évoluer la valeur de Eg_2 et on détermine un rendement maximum η_m et la combinaison (Eg_1, Eg_2) correspondante. On déplace Eg_1 sur la valeur suivante de l'échelle d'énergie et on détermine le nouveau rendement maximum η_m en faisant évoluer Eg_2 comme

précédemment. On peut donc étudier les variations de η_m en fonction de Eg_1 comme l'illustrent les courbes en trait plein de la figure 3 dans le cas de systèmes simples à 2, 3, 4 cellules à couplage dichroïque. Pour une certaine combinaison Eg_1, Eg_2 , nous obtiendrons le maximum η_{max} du rendement η_m .

Le même principe de calcul a été utilisé pour évaluer les rendements lorsque les cellules sont liées entre elles par un fil conducteur ou en cascade. Il faut alors noter qu'un même courant traverse toutes les cellules et que la tension électrique totale aux bornes du dispositif sera simplement la somme des tensions aux bornes de chaque cellule.

Après avoir déterminé le point de fonctionnement V_{Mk}, J_{Mk} des cellules indépendantes, nous avons imposé un courant série I égal au plus petit des courants I_{Mk} soit $I = \inf(I_{Mk})$. On obtiendra une tension d'utilisation V_{Mk} et une puissance utile

$$P_k = V_{Mk} \cdot \inf(I_{Mk}).$$

Le rendement global sera :

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{P_{TOT}}. \quad (17)$$

On effectuera ensuite la recherche du maximum de rendement selon la méthode qui vient d'être décrite. On peut encore tracer $\eta_m = f(Eg_1)$ et les courbes en pointillé de la figure 3 montrent les résultats obtenus pour des systèmes simples à couplage dichroïque de 2, 3 et 4 cellules.

4. Résultats.

Les résultats seront présentés en deux grandes parties.

Dans la première partie, nous considérerons qu'il existe des associations de matériaux hypothétiques

Fig. 3. — Variation du rendement η_m en fonction de l'inverse de la largeur de bande interdite Eg_1 pour des groupements à mode dichroïque de 2, 3, 4 cellules. Traits pleins : cellules indépendantes. Traits pointillés : cellules couplées électriquement.

[Variation of the efficiency η_m as a function of the inverse of the gap Eg_1 for splitting systems of 2, 3, 4 cells. Solid lines : independent cells. Dashed lines : cells with electric coupling.]

et nous donnerons les valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des Eg_k correspondants.

Dans la deuxième partie, nous considérerons des associations avec des matériaux particuliers tels que Ge, Si et AsGa.

1^{re} partie : Etude avec des matériaux hypothétiques.

Les résultats du calcul, donnés sous forme de tableaux numérotés de I à VIII, seront présentés suivant l'ordre établi dans la figure 1, c'est-à-dire en commençant par les systèmes simples, les cellules étant d'abord indépendantes puis ayant un couplage électrique, et en continuant par les systèmes mixtes de 3 cellules couplées par un miroir, et en terminant par les systèmes mixtes de 4 cellules couplées par un miroir.

4.1 SYSTÈMES SIMPLES A CELLULES INDÉPENDANTES. — Pour les 2 niveaux CR de concentration solaire égaux à 1 et 1 000, le tableau I donne les valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et les combinaisons des Eg_k correspondants pour des systèmes simples en mode

tandem et dichroïque de 1 à 4 cellules indépendantes et représentées respectivement sur les dessins (1a) et (1b) de la figure 1; nous avons aussi ajouté des résultats pour les deux autres types d'association : spectrale et idéale.

L'examen du tableau permet de tirer les conclusions suivantes :

a) Si on obtient une substantielle augmentation du rendement du système en passant de 1 à 2 cellules, cette augmentation diminue au fur et à mesure que l'on ajoute des cellules. Nous nous sommes donc limités à 4 cellules bien que le principe du calcul soit valable pour un nombre quelconque de cellules.

Les systèmes à mode dichroïque sont plus performants que les systèmes à mode tandem mais les rendements que nous avons obtenus ne diffèrent pas fondamentalement des valeurs obtenues par d'autres auteurs [4].

b) Cependant, la détermination des valeurs des Eg_k est très précise du fait de la division du spectre AM1 en un nombre assez élevé d'intervalles dans

Tableau I. — Valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des largeurs de bande interdite Eg_k ; matériaux hypothétiques; systèmes simples à cellules indépendantes; (1a) et (1b) correspondent aux dessins (1a) et (1b) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency $\eta_{\max}$ and gaps Eg_k ; hypothetical materials; simple systems with independent cells; (1a) and (1b) correspond to the pictures (1a) and (1b) of the figure 1.]

AM1		Nombre de cellules										
		1	2	3	4		1	2	3	4		
Mode de couplage	spectral	47,04 1,127	65,38 1,486 0,696	73,37 2,203 1,467 0,696	79,68 2,121 1,486 0,944 0,514	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	47,04 1,127	65,38 1,486 0,696	73,37 2,203 1,467 0,696	79,68 2,121 1,486 0,944 0,514		
		idéel	25,06 1,486	32,83 1,825 1,127	38,00 2,121 1,486 0,963	40,90 2,433 1,886 1,467 0,944	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	30,36 1,467	40,31 1,726 0,944	46,57 2,121 1,486 0,930	49,49 2,433 1,880 1,467 0,930	
			tandem (1a)	22,55 1,486	27,68 1,778 1,127	29,79 2,051 1,467 0,963	30,51 2,051 1,495 1,130 0,929	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	27,33 1,467	34,04 1,629 0,944	36,01 1,909 1,426 0,930	36,97 2,051 1,467 0,973 0,696
				dichroïque (1b)	22,55 1,486	29,35 1,798 1,127	33,95 2,121 1,486 0,963	36,38 2,460 1,852 1,467 0,946	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	27,33 1,467	36,10 1,705 0,944	41,65 2,103 1,467 0,930
	Concentration solaire				$CR = 1$		$CR = 10^3$					

l'échelle d'énergie. Il nous est ainsi possible de faire les observations suivantes :

— pour un système donné de cellules, nous avons constaté que les valeurs des Eg_k varient avec le niveau de concentration ; par exemple le tableau I montre, pour deux cellules couplées en mode tandem, une variation de l'ordre de 10 % pour Eg_1 et de 20 % pour Eg_2 lorsque le niveau CR de concentration varie de 1 à 1 000.

— des écarts significatifs sur les valeurs de Eg_k sont aussi enregistrés lorsqu'on passe d'un mode de couplage à un autre ; par exemple le tableau I montre que pour un système de 4 cellules sous concentration $CR = 10^3$, nous avons enregistré une variation de l'ordre de 17 % pour Eg_1 , 26 % pour Eg_2 , 50 % pour Eg_3 et 33 % pour Eg_4 lorsqu'on passe du mode tandem au mode dichroïque.

c) les Eg_k déterminés ne correspondent en général pas exactement aux valeurs rencontrées dans les matériaux réels, mais on peut sélectionner des corps dont les bandes interdites sont voisines des Eg_k calculés sans trop altérer le rendement.

Par exemple, pour des systèmes simples de 2, 3, 4 cellules indépendantes à couplage dichroïque, les courbes en trait plein de la figure 3 montrent que lorsque varie Eg_1 , les autres Eg_k étant toujours posi-

tionnés à des valeurs donnant le rendement maximum η_m pour cette valeur de Eg_1 , le rendement η_m des systèmes reste assez voisin de la valeur maximale η_{max} de η_m .

4.2 SYSTÈMES SIMPLES A COUPLAGE ÉLECTRIQUE. — Le tableau II donne les valeurs du rendement maximum η_{max} et des Eg_k pour, d'une part les deux systèmes simples à mode tandem et dichroïque avec couplage électrique et représentés par les dessins (1c) et (1d) de la figure 1, d'autre part les valeurs correspondant au système cascade représenté par le dessin (1e) de la figure 1. On remarque que c'est le mode dichroïque qui donne le meilleur rendement suivi par le mode cascade puis par le mode tandem. Ce dernier a d'ailleurs son rendement qui commence à décroître légèrement pour des associations de plus de 3 cellules, ceci étant dû à une absorption des photons qui croît avec le nombre de cellules.

Pour étudier l'effet du couplage électrique sur une association qui ne possédait pas de liaison électrique, effectuons une comparaison des données du tableau II par rapport à celles du tableau I. Nous remarquons que pour un même type d'association et un même nombre de cellules, le couplage électrique ne pénalise le rendement que de 7,5 % au maximum pour le

Tableau II. — Valeurs du rendement maximum η_{max} et des largeurs de bande interdite Eg_k ; matériaux hypothétiques ; systèmes simples de cellules avec couplage électrique ; (1c), (1d), (1e) correspondent aux dessins (1c), (1d), (1e) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency η_{max} and gaps Eg_k ; hypothetical materials ; simple systems with electric coupling ; (1c), (1d), (1e) correspond to the pictures (1c), (1d), (1e) of the figure 1.]

AM1		Nombre de cellules								
		1	2	3	4		1	2	3	4
Mode de couplage	tandem (1c)	22,55 1,486	27,34 1,880 1,147	29,35 2,121 1,551 0,973	28,90 2,342 1,825 1,379 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	27,33 1,467	33,74 1,748 0,944	35,68 2,086 1,504 0,930	34,39 2,342 1,825 1,379 0,930
	dichroïque (1d)	22,55 1,486	29,32 1,798 1,134	33,48 2,00 1,486 1,00	35,34 2,196 1,724 1,334 1,00	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	27,33 1,467	36,04 1,65 0,944	40,82 1,970 1,426 0,963	42,43 2,177 1,700 1,273 0,963
	cascade (1e)	22,55 1,486	28,36 1,825 1,127	31,59 2,051 1,504 0,973	32,24 2,277 1,778 1,368 0,982	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	27,33 1,467	35,03 1,705 0,944	38,28 2,034 1,467 0,944	38,53 2,277 1,778 1,368 0,982
Concentration solaire					CR = 1		CR = 10 ³			

mode dichroïque; d'une manière générale, nous avons constaté tout au long de cette étude que le couplage électrique n'affecte que peu le rendement obtenu avec des cellules indépendantes.

Cependant, ce qui est important à notre avis dans les systèmes à couplage électrique, c'est la grande sensibilité du rendement η_m du système aux variations des valeurs des Eg_k ; ceci est montré dans un cas précis sur les courbes en pointillé de la figure 3 qui représentent les variations $\eta_m = f(Eg_1)$ de systèmes simples en mode dichroïque et à couplage électrique. Les maxima particulièrement « pointus » de ces courbes, notamment pour les combinaisons à 3 et 4 cellules, mettent en évidence clairement une diminution très rapide du rendement η_m lorsque Eg_1 s'écarte de la valeur pour laquelle $\eta_m = \eta_{\max}$. Nous pouvons donc dire qu'il faudra choisir des matériaux dont les valeurs des Eg_k doivent se rapprocher au mieux des valeurs calculées sous peine de voir le rendement « s'effondrer ». Heureusement, et comme le montrent les résultats du tableau II, les valeurs des Eg_k pour un même système, ne varient pas beaucoup avec le niveau CR de concentration.

4.3 SYSTÈMES MIXTES DE 3 CELLULES COUPLÉES PAR UN MIROIR. — En ce qui concerne les systèmes mixtes à un miroir, les données du tableau III sont relatives à des associations de 3 cellules couplées par un miroir suivant deux types de configuration. Les différents groupements sont représentés dans la figure 1 par les dessins (2a) à (2e) pour la première configuration et par les dessins (2f) à (2j) pour la deuxième configuration.

On remarque qu'un ensemble de cellules assemblées suivant la configuration n° 1 donne toujours un meilleur rendement que le même ensemble assemblé suivant la configuration n° 2. Par exemple, pour un niveau CR de concentration égal à l'unité, les 3 cellules indépendantes du dessin (2a) de la configuration n° 1 conduisent à un $\eta_{\max}$ égal à 32,96 %, valeur légèrement supérieure à celle de 31,59 % obtenue sur la structure correspondante de la configuration n° 2 et représentée par le dessin (2f).

On note de plus que le mode cascade permet d'obtenir le rendement le plus élevé; aussi, on trouve à $CR = 1$, une valeur $\eta_{\max} = 33,35$ % pour la configuration n° 1 où la cellule 1 est indépendante et les

Tableau III. — Valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des largeurs de bande interdite Eg_k ; matériaux hypothétiques; systèmes mixtes de 3 cellules à un miroir; (2a), (2b) ... (2j) correspondent aux dessins (2a) ... (2j) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency $\eta_{\max}$ and gaps Eg_k ; hypothetical materials; combined systems of 3 cells and 1 mirror; (2a) ... (2j) correspond to the pictures (2a) ... (2j) of figure 1.]

Configuration 1					Configuration 2			
Mode de couplage	Cellules indépend. (2a)	32,96 2,103 1,467 0,944	40,12 2,103 1,467 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3	31,59 2,051 1,486 0,963	38,79 2,051 1,481 0,930	Cellules indépend. (2f)	Mode de couplage
	1 indépendant. 2, 3 cascade (2d)	33,35 2,103 1,495 0,930	40,82 2,121 1,495 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3	32,61 2,051 1,495 0,963	40,01 2,051 1,495 0,930	3 indépendant. 1,2 cascade (2i)	
	1 couplée électriq. 2, 3 cascade (2e)	33,11 2,00 1,49 0,98	40,39 1,97 1,44 0,94	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3	32,36 2,03 1,47 1,00	39,28 1,97 1,34 0,93	3 couplée électriq. 1, 2 cascade (2j)	
	1 indépendant. (2b) 2, 3 tandem couplé	32,75 2,051 1,504 0,930	39,96 2,068 1,504 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3	31,52 2,086 1,495 0,963	38,69 2,086 1,495 0,930	3 indépendant. (2g) 1, 2 tandem couplé	
	1 couplée électriq. 2, 3 tandem couplé (2c)	32,63 2,00 1,49 0,94	39,68 2,00 1,49 0,94	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3	31,27 2,07 1,47 1,01	37,90 2,05 1,44 1,00	3 couplé électriq. 1, 2 tandem couplé (2h)	
Concentration		CR = 1	CR = 10 ³	AM1	CR = 1	CR = 10 ³	Concentration	

cellules 2, 3 sont en cascade. Ce résultat est remarquable car ce rendement est tout juste inférieur à la valeur de $\eta_{\max} = 33,95\%$ donnée par un système qui paraît « plus cher » et qui est celui du couplage dichroïque de 3 cellules indépendantes par 2 miroirs ; cette valeur du rendement est supérieure à la valeur $\eta_{\max} = 29,79\%$ donnée par une combinaison de 3 cellules indépendantes à couplage tandem dont le schéma est représenté par le dessin (1a) de la figure 1 pour une association de 4 cellules ; elle est encore supérieure à la valeur $\eta_{\max} = 31,59\%$ donnée par un système de 3 cellules totalement en cascade et dont le schéma est représenté par le dessin (1e) de la figure 1 pour un groupement de 4 cellules ; cette valeur du rendement est enfin supérieure à la valeur $\eta_{\max} = 32,96\%$ observée dans le cas où les cellules 1, 2, 3 sont indépendantes et sont représentées par le dessin (2a) de la figure 1. En principe, cette association devrait donner un rendement plus grand car il n'y a aucune contrainte sur l'optimisation. Toutefois, le rendement inférieur observé provient de la réflectance et du taux d'ombrage de la cellule 3 qui pénalisent le rendement du tandem 2, 3 par rapport à la cascade 2, 3 où ces grandeurs ne sont pas prises en compte.

Il est à noter que les valeurs des Eg_k des systèmes mixtes à un miroir varient peu d'une structure à une autre et ont des valeurs voisines de celles obtenues sur un système à mode dichroïque à 2 miroirs et à 3 cellules indépendantes. De plus, ces valeurs varient très peu avec le niveau de concentration par opposition aux variations beaucoup plus importantes des valeurs des Eg_k observées sur des systèmes à cellules indépendantes.

4.4 SYSTÈMES MIXTES DE 4 CELLULES COUPLÉES PAR UN MIROIR. — Le tableau IV donne les résultats pour des systèmes mixtes de 4 cellules couplées 2 par 2 par un miroir ; on remarque que le groupement en cascade des cellules 1, 2 d'une part et 3, 4 d'autre part, représenté par le dessin (2n) de la figure 1 permet d'obtenir le rendement le plus élevé, soit une valeur de $34,56\%$ à $CR = 1$; ce rendement est bien sûr inférieur à la valeur de $36,38\%$ donnée par une association à mode dichroïque de 3 miroirs et 4 cellules indépendantes, mais est supérieur à la valeur de $33,61\%$ donnée par le système mixte à 1 miroir de 4 cellules indépendantes, représenté par le dessin (2k) de la figure 1. Cette dernière combinaison devrait normalement donner le meilleur rendement ; toutefois, elle est pénalisée par l'utilisation des 2 montages tandems 1, 2 et 3, 4 qui font intervenir les réflectances superficielles r_2 et r_4 ainsi que les taux d'ombrage ρ_2 et ρ_4 des cellules 2 et 4, grandeurs qui ne sont pas prises en compte lorsqu'on utilise des montages cascade. Cependant, il faut noter que l'adjonction d'une cellule supplémentaire ne fait augmenter le rendement que faiblement par rapport aux systèmes mixtes de 3 cellules couplées par un miroir et étudiées précédemment.

Tableau IV. — Valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des largeurs de bande interdite Eg_k ; matériaux hypothétiques ; systèmes mixtes de 4 cellules à 1 miroir ; (2k) (2l) ... (2o) correspondent aux dessins (2k) (2l) ... (2o) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency $\eta_{\max}$ and gaps Eg_k ; hypothetical materials ; combined systems of 4 cells and 1 mirror ; (2k), (2l) ... (2o) correspond to the pictures (2k), (2l) ... (2o) of figure 1.]

Mode de couplage	Cellules indépendantes (2k)	$\eta_{\max} (\%)$ Eg_1 Eg_2 (eV) Eg_3 Eg_4	33,61 2,277 1,939 1,467 0,944	40,60 2,320 2,051 1,467 0,930
	1, 2 cascade	$\eta_{\max} (\%)$ Eg_1 Eg_2 (eV)	34,56 2,341 1,852	41,87 2,364 1,880
	3, 4 cascade (2n)	Eg_3 Eg_4	1,379 0,930	1,379 0,930
	1, 2 tandem couplé	$\eta_{\max} (\%)$ Eg_1 Eg_2 (eV)	33,16 2,457 1,939	40,07 2,533 2,051
	3, 4 tandem couplé (2l)	Eg_3 Eg_4	1,467 0,930	1,495 0,930
	1, 2 cascade couplée électriq. avec	$\eta_{\max} (\%)$ Eg_1 Eg_2 (eV)	34,29 2,216 1,705	41,04 2,216 1,705
	3, 4 cascade (2o)	Eg_3 Eg_4	1,342 1,004	1,342 1,004
	1, 2 tandem couplé en liaison électrique avec	$\eta_{\max} (\%)$ Eg_1 Eg_2 (eV)	32,80 2,256 1,705	39,20 2,256 1,705
	3, 4 tandem couplé (2m)	Eg_3 Eg_4	1,356 0,982	1,356 0,982
	AM1	Concentration	$CR=1$	$CR=10^3$

Nous constatons enfin que les valeurs des gaps Eg_k varient peu avec le niveau de concentration.

2^e partie : Etude avec des matériaux particuliers.

Les résultats de cette étude, donnés sous forme de tableaux numérotés 5 à 7, seront présentés suivant l'ordre suivant :

- systèmes simples de 2 cellules,
- systèmes simples de 3 cellules,
- systèmes mixtes de 3 cellules à 1 miroir.

4.5 SYSTÈMES SIMPLES A DEUX CELLULES. — Le tableau V donne les valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et de Eg_1 pour des systèmes simples à 2 cellules en mode tandem, dichroïque, cascade et dont le matériau de faible bande interdite Eg_2 est soit AsGa,

Tableau V. — Valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des largeurs de bande interdite Eg_k ; systèmes simples à 2 cellules; le matériau de faible bande interdite est soit AsGa, soit Si, soit Ge; (1a) ... (1e) correspondent aux dessins (1a) ... (1e) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency $\eta_{\max}$ and gaps Eg_k ; simple systems of 3 cells; material of lower gap is either GaAs or Si or Ge; (1a) ... (1e) correspond to the pictures (1a) ... (1e) of figure 1.]

Couples de matériaux				Eg_1/AsGa $Eg_2 = 1,426 \text{ eV}$		Eg_1/Si $Eg_2 = 1,12 \text{ eV}$		Eg_1/Ge $Eg_2 = 0,666 \text{ eV}$	
Mode de couplage	dichroïque	Indépendant (1b)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$	29,05 2,086	34,08 2,068	29,34 1,798	35,86 1,798	24,22 1,486	33,11 1,486
		couplage électrique (1d)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$	28,72 1,970	33,66 1,970	29,31 1,778	35,83 1,778	23,98 1,591	32,98 1,540
	tandem	Indépendant (1a)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$	26,72 1,939	31,27 1,909	27,68 1,778	33,63 1,705	23,88 1,495	31,97 1,495
		couplage électrique (1c)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$	26,63 2,051	31,05 2,051	27,29 1,880	33,03 1,852	23,16 1,677	31,41 1,612
	cascade	(1e)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$	27,65 2,002	32,40 2,002	28,36 1,825	34,53 1,825	23,69 1,627	32,30 1,571
Concentration AM1				CR=1	CR=10 ³	CR=1	CR=10 ³	CR=1	CR=10 ³

soit Si, soit Ge. Pour les modes dichroïque et tandem, les cellules peuvent être indépendantes ou connectées électriquement par un fil conducteur.

L'étude effectuée dans la première partie avec les matériaux hypothétiques a montré que dans le cas, par exemple, d'un couplage optique à miroir de 2 cellules indépendantes, le rendement maximum $\eta_{\max}$ est de 29,35 % à CR = 1 et 36,10 % à CR = 1 000. Sur le tableau V, nous voyons que le couplage par miroir d'un matériau hypothétique dont $Eg_1 = 1,798 \text{ eV}$ avec du Si entraîne un $\eta_{\max}$ très voisin de cette valeur optimale, soit 29,34 % à CR = 1 et 35,86 % à CR = 1 000. Ce résultat est meilleur que si nous avions pris AsGa comme matériau de faible bande interdite, puisque dans ce cas, le rendement $\eta_{\max}$ est un peu plus faible et égal à 29,05 % à CR = 1 et 34,08 % à CR = 1 000. Avec Ge comme matériau de faible bande interdite Eg_2 , c'est bien moins bon, puisque dans ce cas, le rendement $\eta_{\max}$ est égal seulement à 24,22 % à CR = 1. Il faut cependant insister sur l'amélioration très nette du rendement du couplage Eg_1/Ge sous concentration élevée; par exemple, à CR = 10³, on trouve $\eta_{\max} = 33,11 \%$, valeur tout à fait compétitive par rapport à celle obtenue avec l'association Eg_1/AsGa .

Enfin, on remarque que quelle que soit la combinaison Eg_1/AsGa , Eg_1/Si , Eg_1/Ge , le meilleur rendement est obtenu par le mode dichroïque suivi par le mode cascade puis par le mode tandem.

4.6 SYSTÈMES SIMPLES À 3 CELLULES. — Le tableau VI donne les valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des Eg_k pour des systèmes simples de 3 cellules couplées en mode dichroïque, tandem et cascade; nous avons étudié deux cas :

— dans le premier cas, le matériau de bande interdite intermédiaire Eg_2 est AsGa et nous donnons les valeurs Eg_1 et Eg_3 .

— dans le deuxième cas, le matériau repéré par Eg_2 est encore AsGa, mais le matériau de bande interdite faible est Ge.

Le choix de prendre AsGa pour Eg_2 nous est dicté par les résultats de la première partie. Sur le tableau I qui correspond au cas des cellules indépendantes, on remarque pour des associations de 3 cellules, Eg_2 varie entre 1,426 eV qui correspond à AsGa et 1,486 eV qui correspond approximativement à $\text{Ga}_{0,95}\text{Al}_{0,05}\text{As}$.

Les résultats portés sur le tableau VI montrent que le mode dichroïque est le meilleur, suivi par le mode cascade puis par le mode tandem. Le meilleur rendement est obtenu par la combinaison $Eg_1/\text{AsGa}/Eg_3$ de cellules indépendantes en mode dichroïque avec $Eg_1 = 2,086 \text{ eV}$ et $Eg_3 = 0,944 \text{ eV}$, $\eta_{\max}$ étant égal à 33,70 % à CR = 1, valeur très proche des 33,95 % donnés par le système idéal de 3 cellules hypothétiques indépendantes couplées en mode dichroïque. La combinaison en mode dichroïque de cellules indépendantes $Eg_1/\text{AsGa}/\text{Ge}$ est un peu moins bonne à CR = 1, puisque nous trouvons un rendement de

Tableau VI. — Valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des largeurs de bande interdite Eg_k ; systèmes simples à 3 cellules; le matériau de bande interdite intermédiaire est AsGa; (1a) ... (1e) correspondent aux dessins (1a) ... (1e) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency $\eta_{\max}$ and gaps Eg_k ; simple systems of 3 cells; material of intermediate gap is GaAs; (1a) ... (1e) correspond to the pictures (1a) ... (1e) of figure 1.]

Systèmes de 3 matériaux			$Eg_1/\text{AsGa}/Eg_3$ $Eg_2 = 1,426 \text{ eV}$			$Eg_1/\text{AsGa}/\text{Ge}$ $Eg_2 = 1,426 \text{ eV}$ $Eg_3 = 0,666 \text{ eV}$	
Mode de couplage	dichroïque	Indépend. (1b)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$ Eg_3	33,70 2,086 0,944	41,43 2,086 0,930	30,65 2,086	39,58 2,086
		couplage électrique (1d)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$ Eg_3	33,37 1,970 0,963	40,77 1,970 0,969	30,08 1,967	37,47 1,967
	tandem	Indépend. (1a)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$ Eg_3	29,70 1,939 0,944	36,01 1,909 0,930	27,67 1,939	34,75 1,909
		couplage électrique (1c)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$ Eg_3	28,36 2,051 0,752	35,12 2,051 0,776	27,58 2,051	34,20 2,051
	cascade	(1e)	$\eta_{\max} (\%)$ $Eg_1 (\text{eV})$ Eg_3	30,70 2,034 0,897	37,95 2,002 0,897	28,74 2,002	35,79 2,002
Concentration AM1				$CR = 1$	$CR = 10^3$	$CR = 1$	$CR = 10^3$

30,65 %. Mais là encore, comme pour la combinaison Eg_1/Ge du paragraphe précédent, nous notons une amélioration sensible du rendement du système sous forte concentration, soit une valeur de 39,58 % assez voisine de 41,43 % du système $Eg_1/\text{AsGa}/Eg_3$.

4.7 SYSTÈMES MIXTES À UN MIROIR DE 3 CELLULES. — Le tableau VII donne les valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des Eg_1 , Eg_3 pour des systèmes mixtes à un miroir de 3 cellules; le matériau intermédiaire Eg_2 est AsGa. Nous avons étudié deux types de configuration qui ont déjà été expliqués dans l'introduction de cet article.

Nous retrouvons ici les conclusions obtenues lors de l'étude avec les matériaux hypothétiques. Ainsi, pour des systèmes équivalents, la configuration n° 1 est supérieure à la configuration n° 2. Dans la configuration n° 1, le dispositif qui donne le meilleur rendement est obtenu lorsque l'on dispose les cellules 2 et 3 en cascade, la cellule 1 étant indépendante. Sous $CR = 1$ le rendement est de 32,87 %, voisin des 33,35 % obtenus avec le même dispositif mais constitué de matériaux hypothétiques. L'écart est encore moins élevé sous $CR = 10^3$ puisque nous avons alors

40,42 % très proche des 40,82 % donnés pour les matériaux hypothétiques. Comme nous l'avons déjà fait remarquer dans les paragraphes 4.3 et 4.4, l'association qui devrait donner le meilleur rendement est celle où les cellules sont indépendantes et est représentée par le dessin (2a) de la figure 1. Cependant, elle est pénalisée par la présence du tandem 2-3 qui a un rendement inférieur à la cascade 2-3. Il n'est donc pas étonnant de trouver un $\eta_{\max}$ meilleur pour le dispositif de cellules avec 2 et 3 en cascade, la cellule 1 étant indépendante.

4.8 INFLUENCE DES VARIATIONS DE A_0 SUIVANT LE TYPE DE MATÉRIAU. — Les matériaux comme Si, Ge, AsGa sont relativement bien connus et il est possible de faire une estimation plus précise de la constante A_0 de la formule (2) qui s'exprime par la relation suivante :

$$A_0 = q \cdot N_c \cdot N_v \times \left[\frac{1}{N_A} \cdot \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_D} \cdot \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{1/2} \right]. \quad (18)$$

Tableau VII. — Valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des largeurs de bande interdite Eg_k ; systèmes mixtes de 3 cellules à 1 miroir; le matériau de bande interdite intermédiaire est AsGa; (2a) ... (2j) correspondent aux dessins (2a) ... (2j) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency $\eta_{\max}$ and gaps Eg_k ; combined systems of 3 cells and 1 mirror; material of intermediate gap is GaAs; (2a) ... (2j) correspond to the pictures (2a) ... (2j) of figure 1.]

Système mixte de trois matériaux $Eg_1/\text{AsGa}/Eg_3 - Eg_2 = 1,426 \text{ eV}$								
	Mode de couplage	Configuration 1			Configuration 2		Mode de couplage	
(2a)	Cellules indépend.	32,79 2,086 0,944	40,01 2,086 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV) Eg_3	31,37 1,939 0,944	38,62 1,909 0,930	Cellules indépend.	(2f)
(2d)	2, 3 cascade 1 indépend.	32,87 1,939 0,944	40,42 1,970 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV) Eg_3	32,17 2,002 0,944	39,60 2,002 0,930	1, 2 cascade 3 indépend.	(2i)
(2e)	2, 3 cascade 1 couplée électriq.	32,84 1,970 0,930	40,26 1,970 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV) Eg_3	32,08 2,002 0,982	39,12 2,002 0,982	1, 2 cascade 3 couplée électriq.	(2j)
(2b)	2, 3 tandem couplé 1 indépend.	32,18 1,880 0,944	39,51 1,909 0,930	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV) Eg_3	31,31 2,051 0,944	38,47 2,051 0,930	1, 2 tandem couplé 3 indépend.	(2g)
(2c)	2, 3 tandem couplé 1 couplée électriq.	31,20 1,970 0,789	38,69 1,970 0,805	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV) Eg_3	31,16 2,051 1,004	37,79 2,051 1,004	1, 2 tandem couplé 3 couplée électriq.	(2h)
	Concentra- tion AM1	$CR = 1$	$CR = 10^3$		$CR = 1$	$CR = 10^3$	Concentra- tion AM1	

Le tableau VIII donne les valeurs numériques des paramètres physiques que nous avons utilisées. Dans cette partie de notre étude, nous avons simplement voulu illustrer l'influence de A_0 sur les résultats précédents. Pour cela, nous avons reporté dans le tableau VIIIb les valeurs de $\eta_{\max}$ et des Eg_k pour des systèmes simples à 2 cellules. Le matériau de faible bande interdite est soit AsGa, soit Si, soit Ge. On note que par rapport aux valeurs du tableau V où A_0 a été maintenu constant, les rendements ont très sensiblement augmenté mais que Eg_2 n'a pas beaucoup varié. Nous avons aussi ajouté la combinaison AsGa/Ge qui nous semble intéressante surtout à forte concentration où nous avons remarqué une amélioration très sensible du rendement par rapport à sa valeur à $CR = 1$.

5. Conclusion.

Le travail que nous venons de présenter a les particularités suivantes :

- une division précise du spectre AM1 en 188 intervalles échelonnés entre 4 et 0,3 eV,
- une étude du couplage électrique entre les cellules, effectué avec un simple fil conducteur,
- la prise en compte de la structure cascade,
- l'étude du couplage de trois cellules par un seul miroir.

Les résultats montrent que lorsque les miroirs dichroïques sont supposés parfaits :

- Les systèmes à cellules indépendantes et à plusieurs miroirs sont les meilleurs mais leur coût peut devenir prohibitif.

Il faut noter que pour ces systèmes, la répartition des Eg_k dans le spectre solaire dépend du niveau de concentration; de plus, lorsqu'on passe d'un mode de couplage à un autre, les valeurs des Eg_k peuvent varier dans d'assez grandes proportions et il faudra dans chaque cas reconsidérer les matériaux de départ.

- Lorsque le nombre de cellules est supérieur à 2, il y a alors intérêt à utiliser des systèmes mixtes à un

miroir. Le meilleur rendement est obtenu avec une association d'une cellule indépendante recevant la partie UV du rayonnement solaire couplée par un

miroir avec une structure cascade recevant l'autre partie du rayonnement. Une particularité des systèmes mixtes à un miroir est que les valeurs des Eg_k varient très peu avec la concentration et lorsqu'on passe d'un système à un autre.

— On dispose à l'heure actuelle de matériaux comme Ge, Si, AsGa dont les largeurs de bande interdite sont relativement bien disposées dans le spectre solaire et qui sont bien adaptés à la réalisation des structures que nous avons étudiées.

Nous avons noté que Si couplé par un miroir avec un matériau dont $Eg_1 = 1,798$ eV comme GaAlAs était un système « presque idéal » mais que les groupements utilisant Ge avaient leurs rendements très améliorés sous forte concentration.

— Le couplage électrique n'entraîne pas une grande perte dans le rendement; ce dernier est cependant très sensible à une variation des valeurs des Eg_k par rapport à celles calculées pour lesquelles le rendement est maximum.

Enfin, ce travail avait essentiellement pour but de faire une évaluation des Eg_k et de $\eta_{\max}$ de différents dispositifs multicolores; nous insisterons sur le fait que ces grandeurs et notamment le rendement $\eta_{\max}$ seront modulées plus ou moins fortement par les valeurs prises pour les paramètres réflectance r , taux d'ombrage ρ , transmittance τ de la cellule et transmittance du miroir T_r .

Tableau VIIIa. — Valeurs numériques des paramètres physiques de la constante A_0 .

[Numerical values of the physical parameters of the constant A_0 .]

	Si	AsGa	Ge
N_c (cm ⁻³)	$2,39 \times 10^{19}$	$4,63 \times 10^{17}$	$3,71 \times 10^{19}$
N_v (cm ⁻³)	$8,85 \times 10^{18}$	$8,85 \times 10^{18}$	$4,96 \times 10^{18}$
D_n (cm ² . s ⁻¹)	13,26	4,42	74
D_p (cm ² . s ⁻¹)	0,78	36,6	4,27
τ_n (s)	2×10^{-5}	1×10^{-9}	1×10^{-5}
τ_p (s)	2×10^{-7}	$7,46 \times 10^{-9}$	1×10^{-6}
N_A (cm ⁻³)	1×10^{17}	2×10^{19}	1×10^{17}
N_D (cm ⁻³)	1×10^{19}	6×10^{17}	5×10^{18}

Tableau VIIIb. — Valeurs du rendement maximum $\eta_{\max}$ et des largeurs de bande interdite Eg_k ; systèmes simples à 2 cellules; le matériau de faible bande interdite est soit AsGa, soit Si, soit Ge; cas où A_0 dépend du matériau; (1a) ... (1e) correspondent aux dessins (1a) ... (1e) de la figure 1.

[Values of the maximum efficiency $\eta_{\max}$ and gaps Eg_k ; simple systems of 3 cells; material of lower gap is either GaAs or Si or Ge; constant A_0 is calculated for each material; (1a) ... (1e) correspond to the pictures (1a) ... (1e) of figure 1.]

Couples de matériaux				Eg_1/AsGa $Eg_2 = 1,426$ eV		Eg_1/Si $Eg_2 = 1,12$ eV		Eg_1/Ge $Eg_2 = 0,666$ eV		AsGa/Ge $Eg_1 = 1,426$ eV $Eg_2 = 0,666$ eV	
Mode de couplage	Dichroïque	Indépendant (1b)	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV)	33,4 2,086	38,2 2,068	33,8 1,798	40,1 1,798	35,3 1,495	39,5 1,490	29,8	39,07
		Couplage Electrique (1d)	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV)	33,0 1,970	38,0 1,970	33,8 1,798	40,1 1,798	35,3 1,540	39,2 1,505	25,90	35,84
	Tandem	Indépendant (1a)	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV)	30,60 1,909	35,20 1,778 à 2,00	31,92 1,55 à 1,80	37,93 1,55 à 1,80	29,63 1,486	37,95 1,486	29,06	37,57
		Couplage Electrique (1c)	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV)	30,43 2,051	34,86 2,051	31,14 1,880	37,0 1,852	28,86 1,628	37,06 1,612	20,69	28,79
	Cascade	(1e)	$\eta_{\max}$ (%) Eg_1 (eV)	31,62 2,002	36,35 2,002	32,53 1,825	38,70 1,825	29,63 1,591	38,36 1,551	23,32	32,33
Concentration AM1				CR = 1	CR = 10 ³	CR = 1	CR = 10 ³	CR = 1	CR = 10 ³	CR = 1	CR = 10 ³

Bibliographie

- [1] LOFERSKI, J.J., *Tandem photovoltaic solar cells and increased solar energy conversion efficiency*, Conf. Record 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., p. 957-61, Baton Rouge, La., 1976.
 - [2] ALVI, N.S., BACKUS, C.E., MASDEN, G.W., *The potential for increasing the efficiency of photovoltaic systems by using multiple cell concepts*, Conf. Record 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., p. 948-56, Baton Rouge, La. 1976.
 - [3] MOON, R.L., JAMES, L.W., VANDER PLAS, H.A., YEP, T.O., ANTYPAS, G.A., CHAI, Y., *Multigap solar cells requirements and the performance of AlGaAs and Si cells in concentrated sunlight*, Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. p. 859-67, June 5-8, 1978, Washington.
 - [4] BENNETT, A., OLSEN, L.C., *Analysis of multiple-cell concentrator/photovoltaic systems*, Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., p. 868-73, June 5-8, 1978, Washington.
 - [5] LAMORTE, M.F., ABBOTT, D., *Two-junction cascade solar cell characteristics under 10^3 concentration ratio and AM0-AM5 spectral conditions*, Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., p. 874-80, June 5-8, Washington.
 - [6] SAKAI, S., UMEMO, M., *Theoretical analysis of new wavelength division solar cells*, *J. Appl. Phys.* **51** (9) (1980) 5018-24.
 - [7] THEKAERAKA, M.P., Solar cells book edited by Charles E. Backus (IEEE Press, New York) 1976, p. 2-5.
-