Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 47-54

Calculs Hiérarchisés des Paramètres et Caractéristiques Optimaux des Différents Matériaux Photovoltaïques

M. Benosman et B. Benyoucef

Laboratoire de Physique Energétique et Matériaux, Institut de Physique, B.P. 119, Tlemcen

Résumé - *La conversion de la lumière en énergie électrique s'effectue à partir des cellules solaires à base de silicium : matériau le plus abondant sur terre, parfaitement stable et non toxique. Cependant, de nombreux autres matériaux semi-conducteurs ont des propriétés photovoltaïques acceptables et peuvent conduire à l'élaboration des cellules à prix de revient très bas, ce sont en outre Si, GaAs, CdTe,. Mais l'étude des matériaux doit être développée très finement pour permettre une bonne estimation de leurs performances. L'étude que nous présentons porte sur les différents paramètres photovoltaïques, tels que : énergie de gap, concentration intrinsèque, mobilité, durée de vie, et performances et leur influence sur les différents matériaux photovoltaïques afin d'examiner le degré d'importance que porte chaque paramètre sur le matériau étudié. Les données représentant ces derniers sont présentées sur des tableaux et cela dans le but d'ajuster une classification optimale des matériaux photovoltaïques. L'étude est poursuivie par une analyse des données photovoltaïques, et cela en utilisant une analyse statistique basée sur la méthode de l'analyse en composantes principales. Nous mettons en évidence l'intérêt d'une telle méthode pour la classification des différents matériaux photovoltaïques étudiés.*

Abstract - *The conversion of the light into electric power is carried out starting from the solar cells containing silicon : material most abundant on ground, perfectly stable and not toxic. However, many other semiconductor materials have acceptable photovoltaic properties and can lead to the development of the cells at very low cost price, they are moreover Si, GaAs, CdTe. But the study of materials must be developed very finely to allow a good estimate of their performances. The study that we present bear on the various photovoltaic parameters, such as: energy of gap, intrinsic concentration, mobility, lifetime, and performances and their influence on varios pholovoltaic materials in order to examine the degree of importance which each parameter carries on studied inaterial. The data representing the latter are presented on tables and that with an aim of adjusting an optimal classification of photovoltaic materials. The study is continued by an analysis of the photovoltaic data, and that by using statistical analysis based on the method of the analysis in principal components. We underline the interest of such a method for classification of various studied photovoltaic materials.*

Mots clés: Matériaux solaires - Paramètres de transport - Analyse factorielle en composants.

1. INTRODUCTION

Le spécialiste étudiant les matériaux photovoltaïques constate une grande diversité de situations. En effet, chaque matériau est caractérisé par certaines propriétés et caractéristiques influant directement sur la structure de la cellule solaire et son rendement. Compte tenu des phénomènes observés et de la nature des données, les méthodes classiques basées sur les modèles linéaires ne fournissant pas un schéma explicatif des situations et de leur évolution, d'où l'intérêt de proposer une autre démarche. Dans le passé, la statistique se proposait surtout d'estimer ou de valider les valeurs de paramètres numériques fixant la distribution de variables aléatoires qui sont régies par des phénomènes naturels de mécanismes très complexes. On peut, à présent, prétendre dégager, derrière et cela au grand bonheur des méthodes d'investigation dans les nombreuses disciplines de l'homme de la nature et de la vie, ou la part due à 'l'observation' et à la collecte des données est si importante. Telles qu'elles se manifestent dans ces sciences, les variables descriptives sont rarement numériques et il importe que 1a méthode de synthèse de l'information respecte la représentation naturelle des données.

Dans notre étude, on essaie de regrouper tous les paramètres essentiels dans la structure des cellules solaires. La méthode 'analyse en composantes principales' (A.C.P.) qui est une méthode de l'analyse statistique nous permet de visualiser les tableaux de données et de représenter ces derniers sous forme de graphique. Cette méthode repose sur la notion de distance, une fois ces distances calculées, on dispose les individus (matériaux) sur un graphique, et de même pour les caractères (données photovoltaïques), et on obtient ainsi une classification des différents matériaux photovoltaïques selon leurs caractéristiques et performances.

2. PRESENTATION DES PARAMETRES DE TRANSPORT DES SEMICONDUCTEURS

2.1 Concentration intrinsèque [1]

On sait que dans le cas d'un semiconducteur intrinsèque, le nombre d'électrons est égal au nombre de trous et on écrit :

$$n = p = n_i$$
$$\text{d'où : } np = N_c\, N_v \exp(-E_g / K\,T) = n_i^2 \quad (1)$$

avec : n : nombre d'électrons, p : nombre de trous, N_c : densité d'état effective dans la bande de conduction, N_v : densité d'état effective dans la bande de valence, n_i : concentration intrinsèque.
Ou encore :

$$n_i^2 = Ao\, T^3 \exp(-E_{go} / K\,T) \quad (2)$$

L'expression (2) donne la variation de la concentration intrinsèque n_i en fonction de la température, E_{go} est l'écart énergétique à 0 K (ev), K : constante de Boltzmann (ev/K) et Ao une constante indépendante de la température.

Le tableau 1 présente n_i^2 pour un certain nombre de semiconducteurs, en fonction de la température.

Tableau 1: Variation de la concentration intrinsèque des porteurs en fonction de la température

Semiconducteur	Ge	Si	Inp	Ga As	Cd Te	Al Sb	Cd Se
				à 300 K			
n_i^2 (cm^{-6})	$5{,}76\ 10^{26}$	$2{,}10\ 10^{20}$	$6{,}91\ 10^{14}$	$2{,}03\ 10^{13}$	$2{,}32\ 10^{12}$	$2{,}61\ 10^{9}$	$5{,}00\ 10^{7}$
				à 350 K			
n_i^2 (cm^{-6})	$6{,}07\ 10^{28}$	$2{,}22\ 10^{23}$	$2{,}90\ 10^{18}$	$1{,}58\ 10^{17}$	$2{,}17\ 10^{16}$	$6{,}46\ 10^{13}$	$2{,}52\ 10^{12}$
				à 400 K			
n_i^2 (cm^{-6})	$2{,}28\ 10^{30}$	$3{,}88\ 10^{25}$	$1{,}60\ 10^{21}$	$1{,}38\ 10^{20}$	$2{,}18\ 10^{19}$	$1{,}35\ 10^{26}$	$8{,}92\ 10^{15}$
				à 450 K			
n_i^2 (cm^{-6})	$4{,}14\ 10^{32}$	$7{,}49\ 10^{28}$	$1{,}22\ 10^{24}$	$2{,}02\ 10^{24}$	$3{,}85\ 10^{23}$	$6{,}66\ 10^{21}$	$9{,}28\ 10^{20}$

2.2 Mobilité

La mobilité μ est définie par : [2]

$$\mu = V / E \quad (3)$$

où V est la vitesse des porteurs de charges, E : le champ électrique.

Dans le cas des impuretés électriquement chargées : $\mu \approx (m^*)^{-1/2}\, T^{3/2} / N_I$

Dans les cristaux non polaires comme Ge et Si : $\mu \approx (m^*)^{-1/2}\, T^{3/2}$

Dans le cas des matériaux polaires (GaAs, CdS,…) : $\mu \approx (m^*)^{-3/2}\, T^{3/2}$

Tableau 2: Mobilité des électrons (cm^2/S.s) en fonction de la température ($N_D = 10^{14} - 10^{15} / cm^3$)

Semiconducteur	Si	Ga As	Cd Te	Cd Se	Gap
T = 300 K	15	8500	100	600	120
T = 400 K	920	3800	750	500	100
T = 500 K	400	3200	650	350	80

Les tableaux 3 et 4 présentent la mobilité des électrons et des trous en fonction de la concentration d'impuretés.

Tableau 3: Mobilité des électrons (cm^2/V.s) à 300 K en fonction de la concentration d'impuretés

Semiconducteur	Ge	Si	Ga As	Cd Te	Cd Se
Concentration d'impuretés (cm^{-3})					
10^{14}	4600	1900	7000	1000	620
10^{16}	3700	1200	6000	900	580
10^{18}	2000	320	3000	800	500

Tableau 3: Mobilité des trous (cm^2/V.s) à 300 K en fonction de la concentration d'impuretés

Semiconducteur	Ge	Si	Ga As	Cd Te	Cd Se
Concentration d'impuretés (cm^{-3})					
10^{14}	4600	1900	7000	1000	620
10^{16}	3700	1200	6000	900	580
10^{18}	2000	320	3000	800	500

2.3 Durée de vie

La durée de vie des trous dans le côé n de la jonction s'écrit : [3]

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p V_{th} N_r}\left[\left(1+\frac{N_c}{n_{n_0}}\right)\exp\left[-(E_c - E_r)/KT\right] + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_n}\right)\left(\frac{N_v}{n_{n_0}}\right)\exp\left[-(E_c - E_r)/KT\right]\right]^{-1} \quad (4)$$

où : n_{no} : concentration des électrons libres dans le côté n, V_{th} : la vitesse thermque, E_c, E_v : l'énergie de la bande de conduction et de vaalence respectivement, σ_p, σ_n : section de capture des trous et des électrons respectivement.

Tableau 5: Durée de vie des porteurs minoritaires (s) à de faibles niveaux de concentrations

Semiconducteurs	Durée de vie des électrons	Durée de vie des trous
Ge	$0,5\ 10^{-4}$	$0,5\ 10^{-4}$
Si	$0,8\ 10^{-4}$	$0,8\ 10^{-8}$
Inp	$4\ 10^{-8}$	$4\ 10^{-8}$
GaAs	$4\ 10^{-8}$	$4\ 10^{-8}$
CdTe	$1,6\ 10^{-7}$	$1,6\ 10^{-7}$
AlSb	$9\ 10^{-8}$	$9\ 10^{-8}$
CdSe	$1,6\ 10^{-8}$	$1,6\ 10^{-8}$
Gap	$4\ 10^{-8}$	$4\ 10^{-8}$

On constate bien que la durée de vie dans les matériaux de bande d'énergie directe comme le GaAs est plus faible que celle du Si et du Ge qui sont de bandes d'énergie indirecte. Afn de faire une classification ds différents matériaux par analyse de données, on regroupe tous ces critère sur le tableau suivant :

Tableau 6: Présentation de tous les paramètres

Semiconducteur	Ge	Si	Inp	GaAs	CdTe	CdSe	GaP
V_1 : Energie de Gap (ev) à 300 K							
	0.67	1.106	1.29	1.39	1.45	1.74	2.24
V_2 : Bande de conduction							
	0.55	1.08	0.07	0.072	0.11	0.13	0.13
V_3 : Bande de valence (Densité d'état cm^3 à 300 K x 10^{19})							
	0.31	0.56	0.4	0.5	0.35	0.4	0.8
V_4 : Bande de conduction							
	1.03	2.82	0.465	0.465	0.0917	0.118	0.118
V_5 : Bande de valence							
	0.43	1.04	0.636	0.888	0.520	0.639	1.80
V_6 : Concentration intrinsèque à 300 K (cm^{-3})							
	$2.4\ 10^{13}$	$1.45\ 10^{10}$	$2.63\ 10^{7}$	$4.5\ 10^{6}$	$1.52\ 10^{6}$	$7.07\ 10^{3}$	0.764
V_7 : Mobilité des électrons ($N_D = 10^{14}$ / cm^3, à 300 K) (cm^2/V.s)							
	3950	1500	4000	8500	1000	600	120
V_7 : Mobilité des trous ($N_A = 10^{14}$ / cm^3, à 300 K) (cm^2/V.s)							
	1900	600	650	400	100	-	100
V_9 : Coefficient de diffusion des électrons (cm^2/s)							
	102.2	38.81	103.5	219.94	25.87	15.25	3.10
V_{10} : Coefficient de diffusion des trous (cm^2/s)							
	49.16	15.52	16.81	10.35	2.58	-	2.58
V_{11} : Coefficient de réflexion							
	0.36	0.30	0.262	0.286	0.207	0.184	0.294
V_{12} : Durée de vie des électrons (s) à 300 K - V_{13} : Durée de vie des trous (s) à 300 K							
	$0.5\ 10^{-4}$	$0.8\ 10^{-4}$	$4\ 10^{-8}$	$4\ 10^{-8}$	$1.6\ 10^{-7}$	$1.6\ 10^{-8}$	$4\ 10^{-6}$
V_{14} : Longueur de diffusion des électrons (cm)							
	$32\ 10^{-4}$	$34\ 10^{-4}$	$10.17\ 10^{-4}$	$14.8\ 10^{-4}$	$50.86\ 10^{-5}$	$30.4\ 10^{-5}$	$15.81\ 10^{-6}$
V_{15} : Longueur de diffusion des trous (cm)							
	$22\ 10^{-4}$	$21\ 10^{-4}$	$41\ 10^{-5}$	$32.17\ 10^{-5}$	$16.06\ 10^{-5}$	-	$16.06\ 10^{-6}$
V_{16} : Courant de court-circuit (mA/cm^2)							
	16	40.7	24.8	29.7	25	84	29
V_{17} : Tension de circuit ouvert (V)							
	0.18	0.69	0.86	0.88	0.84	0.35	1.39
V_{18} : Facteur de forme							
	0.57	0.95	0.83	0.82	0.74	0.73	0.86
V_{19} : Rendement							
	0.10	0.22	0.179	0.24	0.158	0.16	0.17

3. CLASSIFICATION ET ANALYSE DES DONNEES PHOTOVOLTAÏQUES

Très souvent, lorsqu'on cherche à décrire une population, les éléments de description se présentent sous la forme d'un tableau de nombres à deux entrées, l'un concerne les éléments de la population étudiée "individus" et l'autre les caractéristiques descriptives "caractères" ou "variables".

Dans notre étude, nous représentons 8 individus : Ge, Si, Inp, GaAs, CdTe, AlSb, Gap, et 19 variables : E_g, N_c, N_v, n_i, μ_n, μ_p, (Tableau 6), l'analyse factorielle présente ce dernier sous forme de matrice à n lignes et m colonnes.

Plusieurs techniques ont été proposées et résument au mieux l'information contenue dans le tableau et présentent celle-ci sous forme intelligible.

Ces techniques reposent sur la notion de 'distance' entre deux éléments. Cette notion intuitive de distance est formalisable mathématiquement. Lorsque ces distances ont été calculées pour tous les couples de la population, on représente les individus sur un graphique, de façon à respecter ces distances. En général, il est impossible de constituer un dessin en respectant rigoureusement les distances calculées. Cependant, on peut trouver un dessin qui respecte au mieux les distances calculées, et déforme le moins possible la figure définie par les individus de la population et leurs distances [4].

D'une façon plus ou mains évidente, on peut dire que les graphiques d'analyse factorielle sont des visualisations de tableaux de nombres. D'une manière simplifiée, il s'agit de calculer les valeurs propres et les vecteurs propres d'une matrice associée aux distances calculées entre individus de la population.

4. ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTES [5]

Il est important de reconnaître que les méthodes d'analyse factorielle sont particulièrement utilisées en analyse des données. Il existe deux méthodes de l'analyse factorielle. La première est l'analyse en composantes principales et la deuxième est l'analyse des correspondances.

Dans notre travail, on s'intéresse à la première méthode.

4.1 Analyse en composantes principales

Le problème posé est l'étude du comportement d'une population dont on dispose d'un échantillon formant un ensemble fini I, vis à vis d'un ensemble fini V de variables numériques. L'ensemble des lignes du tableau T des données est indexé par I de taille n et celui des colonnes par V de taille m, x_{ij} est la mesure de la $j^{ème}$ variable V_j sur le $i^{ème}$ élément i de I.

Ainsi donc, la distance entre deux éléments i et i' de I s'écrit :

$$d^2(i,i') = \sum_{1 \le j \le m} (X_{i,j} - X_{i',j}) \tag{5}$$

Cela nous permet de faire une analyse en composantes principales (A.C.P.) et d'obtenir des résultats présentés sous forme de tableaux et de représentation graphique.

Dans notre étude, la population étudiée est représentée par les matériaux photovoltaïques d'échantillons n, c'est-à-dire que nous prenons quelques classes de ces matériaux comme par exemple : classe (III), (III - V), (II - VI) (de la classification du tableau périodique de Mendeliev).

Ces derniers sont caractérisés par des individus qui sont Si, Ge, GaAs,... et qui sont eux mêmes caractérisés par un certain nombre de paramètres (caractères, variables ou encore observations).

Les tableaux obtenus présentent les paramètres comme étant des vecteurs, d'où la nécessité de calculer la matrice des variances - covariances, les valeurs propres, les vecteurs propres, coordonnées des individus et les coordonnées des caractères.

4.2 Interprétation des résultats

Les éléments de description se présentent sous la forme d'un tableau de nombres à deux entrées, l'une concerne les éléments de la population étudiée "individus" qui sont les matériaux photovoltaïques étudiés Ge, Si, Inp, GaAs, CdTe, AlSb, CdSe et Gap et l'autre les caractéristiques descriptives "caractères" ou "variables" qui sont les différents paramètres caractérisant les matériaux : E_g, N_c, N_v, μ_n, μ_p, ... qu'on nommera "vecteurs", par exemple le premier paramètre qui est l'énergie de gap E_g sera nommé V_1, de même pour les autres paramètres.

A l'aide du logiciel 'contrôle du processus statistique', on obtient des représentations graphiques sur les individus et les caractères.

La figure 1 représente la variation du carré de la concentration intrinsèque en fonction de la température, on constate que les quatre vecteurs V_{01}, V_{02}, V_{03}, V_{04} correspondants aux températures 300 K, 350 K, 400 K et 500 K respectivement sont présentés sur un seul point, cela signifie, que pour les quatre valeurs de température, on a le même 'profil' ou la même information et un coefficient de corrélation $\rho = 1$.

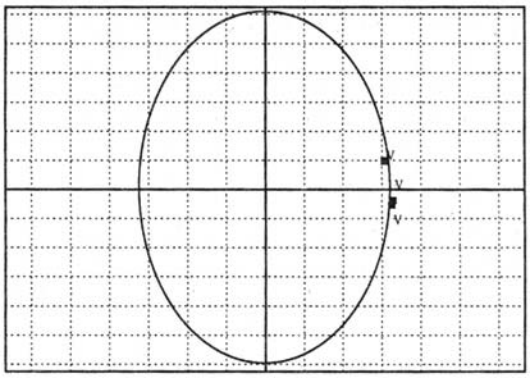

Fig. 1: Variation du carré de la concentration intrinsèque
en fonction de la température
Représentation des caractères sur le plan principal

Dans le cas de la variation de la mobilité des électrons en fonction de la concentration d'impuretés, la représentation des caractères est présentée sur la figure 2, où on constate que les vecteurs V_{01} et V_{02} correspondants aux concentration 10^{14} et 10^{16} /cm^3 respectivement sont sur le même point avec un coefficient de corrélation $\rho = 0{,}995848$.

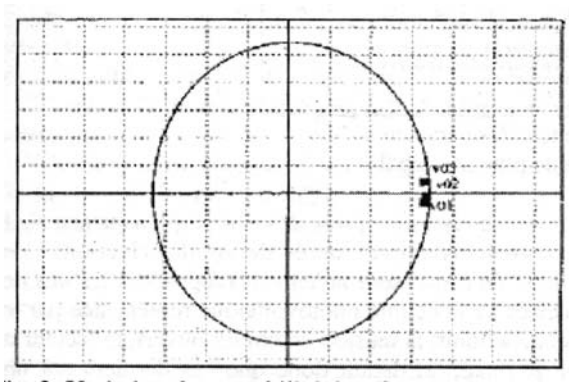

Fig. 2: Variation de la mobilité des électrons
en fonction de la concentration d'impuretés
Représentation des caractères
sur le plan principal

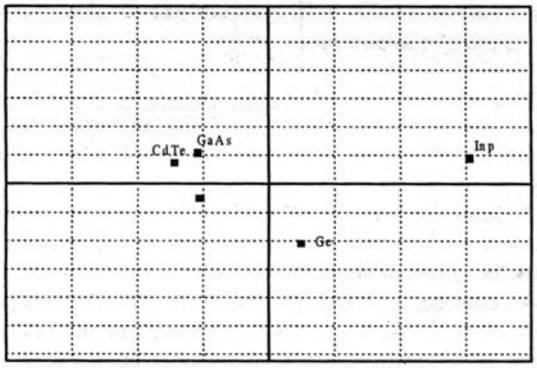

Fig. 3: Variation de la mobilité des électrons
en fonction de la température
Représentation des individus
sur le plan principal

Pour la représentation des individus (matériaux), la figure 3 nous montre que les trois points correspondants aux vecteurs V_{02}, V_{04} et V_{05} correspondant aux Si, CdTe et CdSe respectivement sont nettement détachés des autres points, cela signifie que ces trois vecteurs (individus) apportent une forte information comparés aux deux autres. De même, pour la variation de la mobilité des trous avec la concentration d'impuretés (Fig. 4), le coefficient de corrélation entre les vecteurs V_{01} et V_{02} , $\rho = 0{,}999211$.

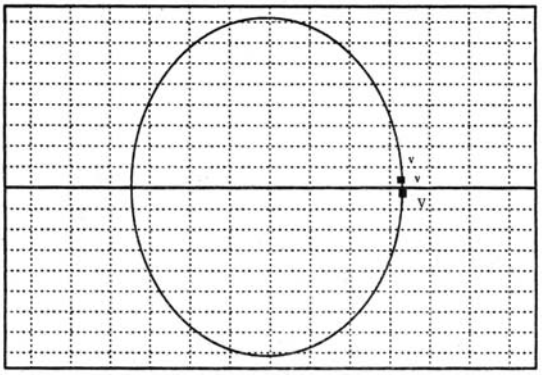

Fig. 4: Variation de la mobilité des trous
en fonction de la concentration d'impuretés
Représentation des caractères
sur le plan principal

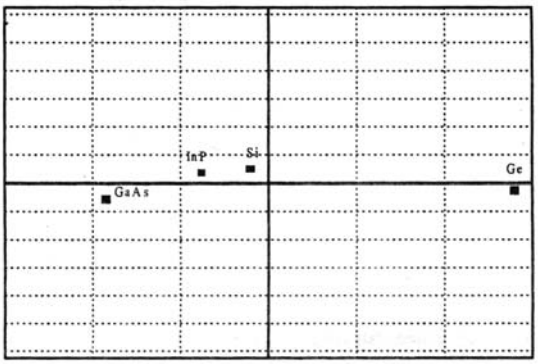

Fig. 5: Variation de la mobilité des trous
en fonction de la température
Représentation des individus
sur le plan principal

Dans ce même cas, la représentation des individus est effectuée sur la figure 5 où les vecteurs V_{02}, V_{03} et V_{04} correspondants aux matériaux Si, GaAs et CdTe respectivement sont éloignés par rapport au vecteur V_{01} correspondant au Ge, cela montre que la variation de la mobilité des trous avec la concentration d'impuretés pour les trois matériaux est meilleure que celle du matériau Ge, puisque la distance entre ces trois vecteurs est plus petite comparée à celle du 1er vecteur.

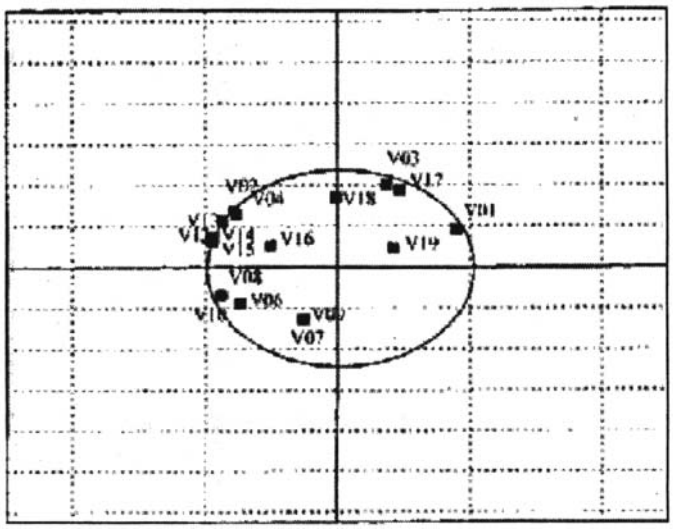

Fig. 6: Représentation de tous les caractères
(19 paramètres) sur le plan principal

Venons maintenant au cas, où tous les caractères (19 paramètres) sont présentés sur le plan principal, la figure 6 nous montre que les vecteurs V_{12}, V_{13}, V_{14}, V_{15} correspondant aux durées de vie des électrons, des trous, la longueur de diffusion des électrons et des trous respectivement sont nettement rapprochés les uns des autres comme, on remarque une forte présence des performances de la cellule photovoltaïque représentée par les vecteurs V_{16}, V_{17}, V_{18} et V_{19} correspondant aux courants de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement respectivement et qui sont proches de l'axe, on déduit donc que ces derniers ont une importance dans les caractéristiques des cellules photovoltaïques. Dans le but de faire une classification des individus, il est nécessaire de faire une représentation graphique de ces derniers selon les performances (Fig. 7).

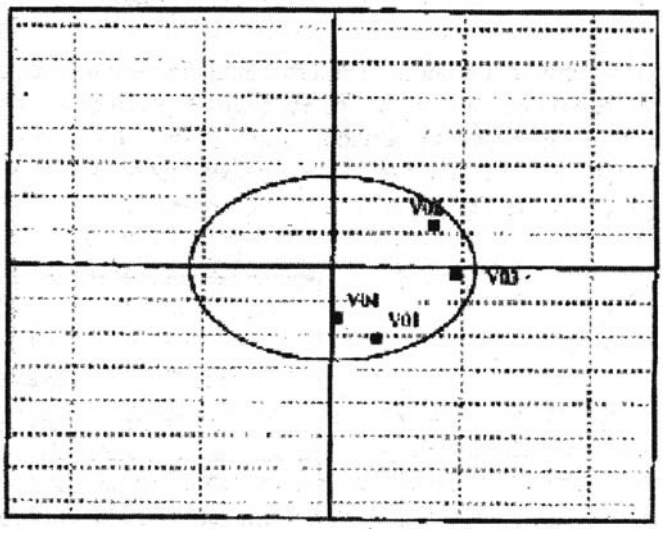

Fig. 7: Représentation des performances sur le plan principal

D'après cette représentation, le vecteur V_{04} correspondant au rendement est le vecteur le plus important puisqu'il est représenté sur l'axe vertical, qui nous permet de faire la distinction entre individus ou caractères, et nous donne plus d'informations sur l'individu étudié. En effet, le choix du matériau repose sur son rendement, d'un côté, et d'un autre sur son coût, et sa disponibilité, ceci est le cas du Si et de GaAs.

Pour la représentation des individus (matériaux) selon les performances, elle est représentée sur la figure ci-dessous.

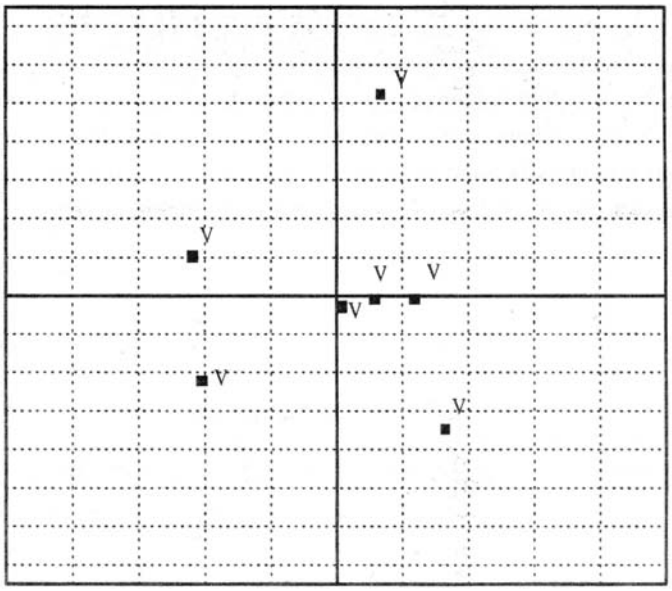

Fig. 8: Représentation des individus selon les performances

On remarque que les trois vecteurs V_{03}, V_{04} et V_{05} correspondants aux individus Inp, GaAs et CdTe sont présentés sur l'axe horizontal et sont près de l'origine, ce qui signifie que ces vecteurs sont mieux regroupés que les autres et leur distribution est plus uniforme comparées aux autres vecteurs.

L'intérêt de tous ces calculs, est de faire une classification des matériaux étudiés auparavant par analyse statistique.

C'est ce qui est représenté sur la figure 9. D'après cette représentation, les matériaux outre que le Silicium, le GaAs, Inp, CdTe ont une forte présence sur le graphique, ce qui signifie qu'ils possèdent des propriétés très intéressantes et qu'ils ont un 'profil' ou une information très importante.

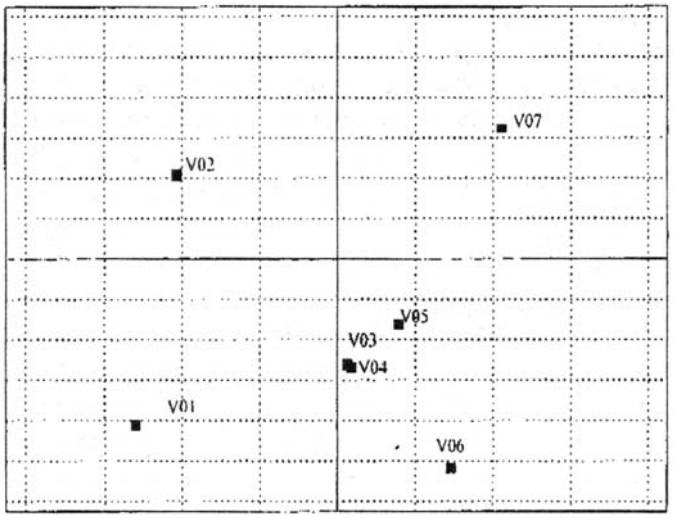

Fig. 9: Représentation des individus (tous les matériaux) selon les paramètres et les performances

A partir de là, l'analyse statistique nous a permis de faire une classification plus ou moins évidente des différents matériaux photovoltaïques selon leurs caractéristiques et propriétés et que les résultats obtenus sont satisfaisants.

Tous ces résultats se retrouvent dans les tableaux de nombres, d'une façon plus ou moins évidente, et cette concordance montre bien que les graphiques d'analyse factorielle sont des visualisations de tableaux de nombres. Ces graphiques présentent donc d'autant plus l'intérêt que les tableaux sont plus grands.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats d'une étude d'analyse statistique pouvant conduire à la classification des paramètres caractérisant les cellules solaires.

Nous remarquons que les résultats obtenus par la méthode d'analyse en composante principale sont essentiellement qualitatifs. Nous obtenons une visualisation globale d'un tableau de nombres. A partir de cette étude, nous avons pu obtenir une classification des matériaux étudiés, mais il reste à traiter le problème du coût qui influe sur la fabrication des cellules solaires, la disponibilité du matériau, aussi que sa disponibilité dans le temps.

REFERENCES

[1] A.S Grove, '*Physics and Technology of Semiconductor Devices*', Wiley, p. 102, 1967.
[2] J. Millman and A. Grabel, '*Dispositifs à Semiconducteurs*', 1989.
[3] H.J. Hovel, '*Semiconductors and Semimetals*', Vol. 11, Academic Press NewYork, Solar Cells, 1975.
[4] Rapport, '*Statistiques et Probabilités*', Tome 2, A.I.D.E.P, Dunod.
[5] I.C. Lerman, '*Les Présentations Factorielles de la Classification*', Gauthier-Villard, Paris, 1970.