

M/ 5757.6 - 42/04

BUT : 464 / 99

République Algérienne Démocratique et Populaire

UNIVERSITÉ ABOUBEKR BELKAID - TLEMSEN

**laboratoire de Physique Energétique et Matériaux
Institut de Physique**

THESE

En vue de l'obtention du Grade de
Magister
en Physique Energétique et Matériaux

Présentée par :

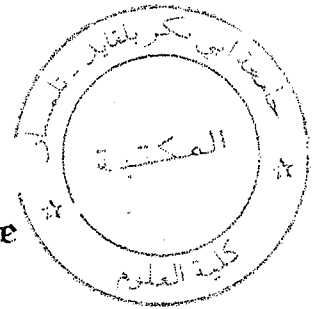
Melle Meriem BENOSMAN

Thème :

Contribution aux calculs hiérarchisés des rendements optimaux des différents matériaux photovoltaïques

Soutenu le 26 mai 1999 devant le jury composé de :

Président :	Mr N. GHOUALI	Professeur à l'Université de Tlemcen
Directeur de Thèse :	Mr B. BENYOUCEF	Professeur à l'Université de Tlemcen
Examineur :	Mr N. BACHARI	Docteur d'état à l'Université d'Oran (U.S.T.O)
Examineur :	Mr M. CHEIKH - BLED	Maître de conférence à l'Université de Tlemcen
Examineur :	Mr F. BENYAROU	Chargé de cours à l'Université de Tlemcen



Incr. 06 DEC. 2011
Com. 5894

UNIVERSITÉ ABOUBEKR BELKAID - TLEMCEM

**laboratoire de Physique Energétique et Matériaux
Institut de Physique**

THESE

*En vue de l'obtention du Grade de
Magister
en Physique Energétique et Matériaux*

Présentée par :

Melle Meriem BENOSMAN

Thème :

Contribution aux calculs hiérarchisés des rendements optimaux des différents matériaux photovoltaïques

Soutenu le 26 mai 1999 devant le jury composé de :

Président :	<i>Mr N. GHOUALI</i>	<i>Professeur à l'Université de Tlemcen</i>
Directeur de Thèse :	<i>Mr B. BENYOUCEF</i>	<i>Professeur à l'Université de Tlemcen</i>
Examineur :	<i>Mr N. BACHARI</i>	<i>Docteur d'état à l'Université d'Oran (U.S.T.O)</i>
Examineur :	<i>Mr M. CHEIKH - BLED</i>	<i>Maître de conférence à l'Université de Tlemcen</i>
Examineur :	<i>Mr F. BENYAROU</i>	<i>Chargé de cours à l'Université de Tlemcen</i>

Dédicaces

Avec toute mon affection,

Ma profonde reconnaissance

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents

Mes sœurs

Tous ceux qui me sont chers(es)

Meriem

Liste des symboles

A_0	Facteur de perfection de la diode
D_n	Coefficient de diffusion des électrons dans le matériau de type p. (cm^2/S)
D_p	Coefficient de diffusion des trous dans le matériau de type n. (cm^2/S)
E	Champ électrique (V/cm)
E_c	Energie de la bande de conduction. (ev)
E_g	Energie de gap. (ev)
E_v	Energie de la bande de valence. (ev)
E_r	Energie du centre de recombinaison. (ev)
FF	Facteur de forme.
G	Taux de génération des porteurs. (cm^{-3})
I_m	Courant maximum. (mA/cm^2)
I_0	Courant d'obscurité. (mA/cm^2)
I_{cc}	Courant de court circuit. (mA/cm^2)
K	Constante de Boltzmann (ev/K)
L_n	Longueur de diffusion dans le matériau de type p. (cm)
L_p	Longueur de diffusion dans le matériau de type n. (cm)
N_a	Densité des atomes accepteurs. (cm^{-3})
N_c	Densité d'état dans la bande de conduction. (cm^{-3})
N_d	Densité des atomes donneurs. (cm^{-3})
N_r	Densité de centre de recombinaison. (cm^{-3})
N_v	Densité d'état dans la bande de valence. (cm^{-3})
n	Concentration des électrons. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
n_i	Concentration intrinsèque des porteurs. (cm^{-3})
n_n	Densité des électrons dans le matériau de type n. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
n_{no}	Densité des électrons à l'équilibre. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
n_p	Densité des trous dans le matériau de type p. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
P_{in}	Densité de la puissance incidente. (mw/cm)
P_n	Densité des trous dans le matériau de type n. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
P_{no}	Densité des trous à l'équilibre. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
P_p	Densité des trous dans le matériau de type p. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
P_{po}	Densité des trous à l'équilibre. (nbre d'atomes/ cm^{-3})
R	Coefficient de réflexion.
R_s	Résistance série. (Ω)

R_{sh} : Résistance parallèle. (Ω)
 S_n : Vitesse de la surface de recombinaison des électrons. (cm/S)
 S_p : Vitesse de la surface de recombinaison des trous. (cm/S)
 T : Température. (K)
 V_b : Tension de diffusion. (V)
 V_m : Tension maximum. (V)
 V_{co} : Tension à circuit ouvert. (V)
 V_{th} : Vitesse thermique. (cm/S)
 α : Coefficient d'absorption.
 σ_n : Section de capture des électrons. (cm²)
 σ_p : Section de capture des trous (cm²)
 τ_n : Durée de vie des électrons. (sec)
 τ_p : Durée de vie des trous. (sec)
 μ_n : Mobilité des électrons dans le matériau de type p. (cm²/V.sec)
 μ_p : Mobilité des trous dans le matériau de type n. (cm²/V.sec)
 η : Rendement. (%)

SOMMAIRE

INTRODUCTION - PROBLÉMATIQUE:.....	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I : L'INTERET DE LA PHYSIQUE DES SEMICONDUCTEURS POUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

I- LA NÉCESSITÉ D'INTRODUIRE LA PHYSIQUE DES SEMI CONDUCTEURS :....	5
---	---

I.1- INTRODUCTION :	5
---------------------------	---

II- PROPRIÉTÉS DES SEMICONDUCTEURS:.....	5
--	---

II.1 INTRODUCTION :	5
---------------------------	---

II.2- LES PARAMÈTRES DE TRANSPORT DES SEMICONDUCTEURS :	6
---	---

II.2.1- Concentration intrinsèque :	6
---	---

II.2.2 La mobilité :	7
----------------------------	---

II.2.3- Recombinaison et durée de vie :	11
---	----

II.2.3.1-Conclusion :	15
-----------------------------	----

III- ABSORPTION ET RÉFLEXION :.....	15
-------------------------------------	----

III.1- ABSORPTION :	15
---------------------------	----

III.1.1- Absorption optique :	15
-------------------------------------	----

III.1.2- Absorption atmosphérique :	19
---	----

III.1.3- Absorption extrinsèque :	21
---	----

III.2- La réflexion :	22
-----------------------------	----

IV- L'EFFET D'INTRODUCTION DES IMPURETÉS :.....	23
---	----

CHAPITRE II : ETUDE DES PERFORMANCES DES CELLULES SOLAIRES

I- LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	26
---------------------------------------	----

I.1- INTRODUCTION	26
-------------------------	----

I.2- RÉALISATION ET FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE :	26
--	----

I.2.1- Réalisation :	26
----------------------------	----

I.2.2- Fonctionnement de la cellule :	27
---	----

II- CARACTÉRISTIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE :	29
--	----

II.1- CIRCUIT ÉQUIVALENT	29
--------------------------------	----

II.2- PERFORMANCES DES CELLULES SOLAIRES :	30
--	----

III- LES TECHNIQUES UTILISÉES POUR L'AMÉLIORATION DU RENDEMENT DE CONVERSION D'UNE CELLULE SOLAIRE :.....	32
---	----

IV- ELABORATION DES CALCULS	35
-----------------------------------	----

IV.1- RÉSULTATS OBTENUS.....	36
------------------------------	----

CHAPITRE III : CLASSIFICATION ET ANALYSE DES DONNEES PHOTOVOLTAÏQUES

I- INTRODUCTION	39
-----------------------	----

II- ETUDE FORMELLE ET STATISTIQUE DE LA NOTION DE RESSEMBLANCE :	41
--	----

II.1- SUR DEUX MODES DE MESURE DE L'IMPORTANCE D'UNE VARIABLE DESCRIPTIVE. ...	42
--	----

III- RAPPELS DES NOTIONS DE BASE SUR LA STATISTIQUE :	43
---	----

III.1- DÉFINITIONS :	43
----------------------------	----

III.2- ESTIMATION DE LA MOYENNE, DE LA VARIANCE ET DE L'ÉCART TYPE D'UNE POPULATION DE TAILLE N À L'AIDE D'UN ÉCHANTILLON DE TAILLE N :	44
--	----

III.3- GROUPEMENT PAR CLASSES :	46
---------------------------------------	----

IV- ANALYSE FACTORIELLE	47
-------------------------------	----

IV.1- INTRODUCTION	48
--------------------------	----

IV.2- ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTES	48
--	----

IV.2.1- Introduction :	48
------------------------------	----

IV.2.2- Analyse en composantes principales :	49
--	----

IV.2.2.1- Introduction :	49
--------------------------------	----

V- PRÉSENTATION DU LOGICIEL :	50
-------------------------------------	----

VI- RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	51
----------------------------------	----

CONCLUSION.....	76
-----------------	----

INTRODUCTION

Introduction – Problématique :

C'est lors de l'interaction du rayonnement solaire avec le matériau que l'énergie véhiculée par le rayonnement sera récupérée en partie.

Cette énergie peut se manifester sous trois formes principales :

- 1- sous forme d'une augmentation de la température du matériau récepteur (conversion thermique de l'énergie solaire).
- 2- Sous forme de transformations chimiques ou biochimiques.
- 3- Sous forme d'une circulation de charges électriques (conversion photovoltaïque de l'énergie solaire).

Dans le troisième cas, le rayonnement solaire est converti directement en énergie électrique, la structure absorbant le rayonnement solaire appelée photopile peut délivrer directement une puissance électrique à une charge branchée à ses bornes.

Il faut remarquer qu'en dépit du terme « pile solaire », souvent employé, il n'y a pas d'énergie emmagasinée dans la structure, celle – ci ne délivre une énergie électrique que si elle est soumise à un éclairage.

La conversion d'électricité basée sur la conversion de la lumière du soleil par des photopiles à base de silicium cristallin est la voie la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre, parfaitement stable et non toxique.

En vingt ans, le prix du watt photovoltaïque a considérablement baissé de plus de 100 dollars en 1975, il est aujourd'hui tombé aux environs de 4 dollars [1]. Pourtant, malgré l'immense chemin parcouru, l'électricité solaire n'a pas encore franchi le seuil lui permettant d'être compétitif par rapport aux autres sources de production d'électricité. Ceci nécessitera de nouvelles approches technologiques afin de réduire

les coûts de production tout en augmentant le rendement de conversion des cellules.

De plus, il reste encore deux verrous technologiques à briser relatifs à la fabrication des photopiles qui sont trop gourmandes en énergie et pas sans répercussion sur l'environnement.

En effet, si la photopile permet de produire de l'électricité sans aucun rejet dans l'atmosphère, les procédés actuels de fabrication (proches de ceux en micro électronique) mettent encore en jeu beaucoup trop d'opération nécessitant l'usage de produits chimiques et de gaz extrêmement toxiques.

Afin de pallier à tous ces inconvénients de nouveaux procédés d'élaboration du matériau et du dispositif sont nécessaires, tous ces travaux ont un double objectif ; l'amélioration du rendement de conversion des photopiles et la simplification de leur procédé de fabrication.

En effet, de nombreux autres matériaux semi conducteurs ont des propriétés photovoltaïques acceptables et peuvent conduire à l'élaboration de cellules à prix de revient très bas.

Environ 200 couples de matériaux formant homojonctions et hétérojonctions ont été dénombrés. Toutefois, les rendements sont encore faibles et la fiabilité doit être améliorée.

Comme nous pouvons dire qu'il est possible de réaliser une structure photovoltaïque par le contact de deux matériaux différents, l'un dopé P et l'autre dopé N, on obtient ainsi une hétérojonction P - N

Ces dernières sont également obtenues en effectuant un contact métal semi conducteur (M - S) et dans ce cas, une amélioration du rendement a pu être obtenue en introduisant un très fin film mince isolant rapporté entre le métal et le semi conducteur (MIS).

Ces méthodes permettent le dépôt de couches minces de grandes surfaces à faible coût, comme par exemple : le cas de CdS/ Cu₂S [2].

Cependant, le choix du matériau est très important. Aussi, il faut bien tenir en compte l'exigence et la possibilité de préparer de grandes surfaces de matériau de bonne qualité électronique, de façon économique.

L'analyse montre que la technique actuelle, utilisant des tranches monocristallines de silicium, limite sévèrement les possibilités, et, qu'un des principaux problèmes à l'ordre du jour est de choisir de nouveaux matériaux semiconducteurs conduisant à la fois à un bon rendement et à un bas prix.

Les matériaux ayant la possibilité de devenir compétitifs sont peu nombreux, ce sont surtout outre le Si, GaAs, InP, CdTe.

Les tentatives de choisir d'autres matériaux plus ou moins « exotiques » sont susceptibles de conduire à des mises au point intéressantes mais non d'ouvrir une voie nouvelle pratiquement valable.

Mais l'étude des matériaux doit être développée très finement pour permettre une bonne estimation de leurs possibilités.

Par ailleurs, notre travail porte sur l'étude de quelques matériaux photovoltaïques et la classification de ces derniers selon leurs caractéristiques étudiées, et, cela en faisant une analyse statistique des données photovoltaïques.

Prenons le cas de l'Arsenic de Gallium (GaAs), ce dernier n'est pas un matériau spécialement développé pour les applications solaires, mais surtout pour les dispositifs à hyperfréquences et l'optoélectronique. La technique utilisée pour l'obtention des plaquettes de GaAs est la même que celle du silicium, cependant la stœchiométrie doit être conservée.

Ce type de photopile présente peu d'intérêt pratique car les cellules sont au moins dix fois plus chères que les cellules au silicium sauf lorsqu'on veut utiliser une très forte concentration 500 à 2000. Sa production est donc limitée, plus particulièrement à cause de la rareté du Gallium, de la complexité de sa fabrication et de la fiabilité non encore déterminée de la cellule. Par contre le GaAs associé à d'autres matériaux, à bande interdite plus faible et plus haute constitue un très bon élément pour les photopiles à très haut rendement telles les photopiles « multicolores ».

Par ailleurs, notre travail consiste à faire une contribution aux calculs hiérarchisés des différents paramètres et performances caractérisants les matériaux photovoltaïques, tels que, Si, Ge, InP, GaAs, AlSb, CdSe, Gap, dans le but de faire une hiérarchisation ou classification de ces derniers.

Dans le chapitre I, on étudie quelques propriétés des semiconducteurs d'où l'intérêt d'utiliser la physique des semiconducteurs et voir l'influence de ces derniers sur les cellules solaires.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des performances des cellules solaires, d'où on détermine le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement. Les résultats sont représentés sur des tableaux.

Par la suite, et dans le troisième chapitre, à partir, d'une analyse statistique, on fait une classification et analyse des données de tous les paramètres étudiés auparavant en utilisant le logiciel « contrôle des processus statistiques ».

Notre étude est représentée par des tableaux de résultats de ces paramètres et des représentations graphiques correspondantes.

CHAPITRE I :

L'intérêt de la physique
des semiconducteurs
pour les cellules photovoltaïques

I- LA NECESSITE D'INTRODUIRE LA PHYSIQUE DES SEMICONDUCTEURS :

I.1- INTRODUCTION :

La mécanique quantique appliquée à l'étude du comportement des électrons dans un solide a montré que les niveaux d'énergie qui leurs sont permis s'assemblent en bandes.

Pour les corps semiconducteurs, deux de ces bandes d'énergie sont essentielles, il s'agit de la bande de valence, complètement remplie à OK et une bande supérieure qui est la bande de conduction et qui constitue tous les états d'énergie offerts aux électrons produits par la rupture des liaisons covalentes sous l'effet de la température.

II- PROPRIETES DES SEMICONDUCTEURS :

II.1- INTRODUCTION :

Les propriétés de conduction des semiconducteurs dépendent directement des densités des porteurs de charges (trous et électrons).

Cependant, de nombreux facteurs intérieurs ou extérieurs au cristal, peuvent changer les poids relatifs des deux densités.

En effet, les semiconducteurs possèdent deux propriétés extrêmement utiles. [3]

La première, est que, contrairement aux isolants et conducteurs, il est possible de changer la conductivité du semiconducteur par ordre de grandeur avec des processus relativement simples.

Par exemple, la conductivité du silicium, peut être variée de 1000 à 0,001 Ohm./cm.

La seconde propriété est que le champ électrique dans un semiconducteur est porté soit par des charges négatives (électrons) ou par des charges positives (trous).

II.2- LES PARAMÈTRES DE TRANSPORT DES SEMICONDUCTEURS :

II.2.1- CONCENTRATION INTRINSEQUE : [4]

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

$$n = p = n_i$$

$$\text{d'où : } np = N_c N_v \exp (-E_g/KT) = n_i^2 \quad (1)$$

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.

Où encore :

$$n_i^2 = A_0 T^3 \exp (-E_{g_0}/KT) \quad (2)$$

La formule (2) donne la variation de la concentration intrinsèque n_i en fonction de la température, E_{g_0} est l'écart énergétique à 0K (ev), K : constante de Boltzmann (ev/K) et A_0 une constante indépendante de la température. [5]

Le tableau (1) présente n_i^2 , pour un certain nombre de semiconducteurs, en fonction de la température, incluant l'effet causé par le changement de l'énergie de gap du semiconducteur résultant du changement d'espace interatomique provoqué dans le semiconducteur par variation de la température.

Semiconducteurs	Ge	Si	Inp	GaAS	CdTe	AlSb	CdSe
A 300K							
$n_i^2 \text{ (cm}^{-6}\text{)}$	$5,76 \cdot 10^{26}$	$2,10 \cdot 10^{20}$	$6,91 \cdot 10^{14}$	$2,03 \cdot 10^{13}$	$2,32 \cdot 10^{12}$	$2,61 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^7$
A 350K							
$n_i^2 \text{ (cm}^{-6}\text{)}$	$6,07 \cdot 10^{28}$	$2,22 \cdot 10^{23}$	$2,90 \cdot 10^{18}$	$1,58 \cdot 10^{17}$	$2,17 \cdot 10^{16}$	$6,46 \cdot 10^{13}$	$2,52 \cdot 10^{12}$
A 400K							
$n_i^2 \text{ (cm}^{-6}\text{)}$	$2,28 \cdot 10^{30}$	$3,88 \cdot 10^{25}$	$1,60 \cdot 10^{21}$	$1,38 \cdot 10^{20}$	$2,18 \cdot 10^{19}$	$1,35 \cdot 10^{16}$	$8,92 \cdot 10^{15}$
A 500K							
$n_i^2 \text{ (cm}^{-6}\text{)}$	$4,14 \cdot 10^{32}$	$7,49 \cdot 10^{28}$	$1,22 \cdot 10^{24}$	$2,02 \cdot 10^{24}$	$3,85 \cdot 10^{23}$	$6,66 \cdot 10^{21}$	$9,28 \cdot 10^{20}$

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

Notons que l'augmentation intrinsèque avec la température influe aussi sur la densité de charge des semiconducteurs extrinsèques.

Considérons par exemple, un échantillon de type n, à concentration n_p de donneurs, soumis à un échauffement de 300 à 400K

La densité des électrons n à 400K ne diffère pas sensiblement de celle à 300K parce que les impuretés donneurs ionisées fournissent presque tous les porteurs. Mais, selon la loi d'action de masse, la concentration p des trous augmente. De même, la concentration n des semiconducteurs de type p augmente pour de petits échauffements et $p \approx N_A$ demeure constante.

II.3.2 LA MOBILITE :

Considérons un semiconducteur avec une concentration d'impuretés uniforme.

La conductivité σ , est fonction du nombre des porteurs de charges, et on écrit :

$$\sigma = q \mu_n n + q \mu_p p \quad (3)$$

où μ_n et μ_p présentent la mobilité des électrons et des trous respectivement, définie par :

$$\mu = V/E \quad (4)$$

où :

V : est la vitesse des porteurs de charges

E : le champ électrique.

On définit ainsi la mobilité comme étant la vitesse moyenne de l'ensemble du gaz d'électrons ou de trous sous l'action du champ électrique $\bar{E}$: $\bar{V} = \mu \bar{E}$. Le mouvement en effet n'est pas uniformément accéléré à cause des nombreux chocs que subissent les porteurs, provoqués par les vibrations thermiques du réseau cristallin (phonons) et par les défauts et impuretés. [5]

Dans le cas des impuretés électriquement chargées :

$$\mu \approx (m^*)^{-1/2} T^{-3/2} / N_I \quad (5)$$

Cette dernière diminue quand le nombre N_I d'impuretés augmente. Dans les cristaux non polaires comme Ge et Si le réseau intervient par les phonons de basses énergies (phonons acoustiques) :

$$\mu \approx (m^*)^{-1/2} T^{-3/2} \quad (6)$$

Dans le cas des matériaux polaires (GaAs, CdS, ...)

$$\mu \approx (m^*)^{-3/2} T^{1/2} \quad (7)$$

Ce sont les phonons de plus haute énergie (phonons optiques) qui interviennent.

Les impuretés interviennent pour les dopages supérieurs à $10^{16}/\text{cm}^3$. On peut montrer aussi que la mobilité des trous est toujours inférieure à celle des électrons en raison des masses effectives plus élevées, ceci est normal puisque le mouvement d'un trou correspond en fait au mouvement de l'ensemble des électrons de la bande de valence.

Quand plusieurs mécanismes interviennent en parallèle, la mobilité s'écrit sous la forme :

$$\mu^{-1} = \sum_i \mu_i^{-1} \quad (8)$$

<i>Semiconducteurs.</i>	<i>Si</i>	<i>GaAs</i>	<i>CdTe</i>	<i>CdSe</i>	<i>Gap</i>
T = 300K	1500	8500	100	600	120
T = 400K	920	3800	750	500	100
T = 500K	400	3200	650	350	80

Tableau n°2 : La mobilité des électrons ($\text{Cm}^2/\text{V}.\text{sec}$) en fonction de la température (pour $N_D = 10^{14} - 10^{15}/\text{cm}^3$).

La variation de la mobilité des trous et des électrons avec la température est proportionnelle à T^{-m} , m étant un coefficient constant.

La mobilité μ décroît avec la température parce qu'alors les porteurs sont plus nombreux et plus énergétiques aux températures élevées. Chacun de ces facteurs augmentent le nombre de chocs et fait diminuer la mobilité.

Ceci étant, la mobilité dépend aussi de l'intensité du champ électrique et du niveau de dopage. Dans le cas de silicium de type n, μ est constante à une température donnée seulement si $E < 10^3 \text{V/cm}$. Pour $E > 10^4 \text{V/cm}$, μ_n est inversement proportionnelle à E et la vitesse de mobilité tend vers 10^7cm/S (la vitesse de saturation).

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

<i>Semiconducteurs</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>GaAs</i>	<i>CdTe</i>	<i>CdSe</i>
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 n°3 : Mobilité des électrons ($\text{cm}^2/\text{V}.\text{sec}$) à 300K en fonction de la concentration d'impuretés.

<i>Semiconducteurs</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>GaAs</i>	<i>CdTe</i>
Concentration d'impuretés (cm^{-3})				
10^{14}	1900	600	400	100
10^{16}	1300	460	320	80
10^{18}	360	200	160	60

Tableau n°4 : Mobilité des trous ($\text{cm}^2/\text{V}.\text{sec}$) à 300K en fonction de la concentration d'impuretés

II.2.3- RECOMBINAISON ET DUREE DE VIE :

Dans un semiconducteur intrinsèque le nombre de trous est égal au nombre d'électrons libres.

L'agitation thermique continue toutefois à générer g nouvelles, paires trous – électrons par volume unité par seconde, tandis que d'autres paires trous – électrons disparaissent par recombinaison ; autrement dit, des électrons libres tombent dans des liaisons covalentes vides, ce qui produit à chaque fois la perte d'une paire de porteurs mobiles. En moyenne, un trou (un électron) existera durant $\tau_p(\tau_n)$ secondes avant la recombinaison. Ce temps est appelé la durée de vie moyenne du trou (de l'électron). Ces grandeurs sont très importantes dans les dispositifs à semiconducteurs parce qu'elles indiquent le temps nécessaire aux concentrations des électrons, et, des trous provoquées pour revenir à leurs concentrations d'équilibre. [6]

Si on note N_r , la recombinaison du centre localisé par une énergie E_r avec une section de capture σ_n , σ_p pour l'électron et le trou respectivement, la durée de vie des trous dans le côté n de la jonction s'écrit : [7]

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p V_{th} N_r} \left[\left(1 + \frac{N_c}{n_{n0}} \right) \exp[-(E_c - E_r)/KT] + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_n} \right) \left(\frac{N_v}{n_{n0}} \right) \exp[-(E_r - E_v)/KT] \right]^{-1} \quad (9)$$

où :

n_{n0} : Concentration des électrons libres dans le côté n

V_{th} : la vitesse thermique

E_c , E_v : l'énergie de la bande de conduction et de valence respectivement

Des expressions analogues peuvent être obtenues pour la durée de vie des électrons dans le matériau de type p .

Alors la durée de vie des porteurs minoritaires devient :

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p V_{th} N_r}, \quad \tau_n = \frac{1}{\sigma_n V_{th} N_r} \quad (10)$$

On admet généralement que les durées de vie des porteurs majoritaires et minoritaires sont les mêmes. Ceci est vérifié sauf lorsque N_r devient très grand. Dans ce mécanisme les durées de vie ne dépendent pas explicitement du dopage.

L'expérience montre toutefois qu'il intervient aux fortes concentrations d'impuretés, trois modèles qui peuvent expliquer cette variation.

Quand le dopage augmente, on peut invoquer :

- ❖ La création de nouveaux pièges.
- ❖ Le niveau de Fermi se rapprochant des bandes rend actifs de nouveaux centres, par exemple dans le silicium entre 10^{14} et $10^{17}/\text{cm}^3$, E_F varie de 0,18eV à la température ambiante.
- ❖ Les niveaux donneurs ou accepteurs jouent eux - mêmes le rôle de piège, lorsque leur concentration atteint ou dépasse N_c ou N_v respectivement.

Le tableau n°5 indique la durée de vie des électrons et des trous pour les semiconducteurs étudiés.

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

Tableau n° 5 : Durée de vie des porteurs minoritaires (sec) à de faibles niveaux de concentrations.

On constate bien que la durée de vie dans les matériaux de bandes d'énergie directe comme de GaAs est plus faible que celle du Si et du Ge qui sont de bandes d'énergie indirecte.

Le tableau n°6 présente la durée de vie des trous et des électrons et la longueur de diffusion donnée par : $L = \sqrt{D\tau}$ pour GaAs et pour plusieurs dopages et pour plusieurs types de dopants.[7]

Dopage (cm^{-3})	DOPANT	τ_n (10^{-8} sec)	L_n (10^{-4} cm)	τ_p (10^{-3} sec)	L_p (10^{-4} cm)
2×10^{17}	?	0,35	6-6,3	-	-
2×10^{18}	?	0,092	1,9-3,3	-	-
5×10^{18}	Zn (LPE)	0,63	6	-	-
$> 3 \times 10^{18}$	ZN(LPE)	$> 0,65$	6-7	-	-
2×10^{18}	Zn	0,217	4	-	-
1×10^{19}	Zn	0,057	1,6	-	-
1×10^{18}	Ge (LPE)	5,88	23	-	-
5×10^{18}	Ge (LPE)	5,73	18	-	-
2×10^{18}	Ge (LPE)	1,50	10,5	-	-
1×10^{19}	Ge (LPE)	0,67	5,5	-	-
1×10^{17}	Ge, Sn	0,49	7,5	0,79	2,2
1×10^{18}	Ge, Sn	0,40	6	0,77	1,9
2×10^{18}	Sn	-	-	0,36	1,2
5×10^{18}	Ge	0,071	2	-	-
2×10^{17}	(Si)	-	-	1,9	3,1-3,5

Tableau n°6 : Durée de vie et longueur de diffusion pour GaAs à 300°K

Si on note S la vitesse de recombinaison, la densité de courant des porteurs minoritaires à la surface est donnée par :

$$J_s = q s_p (p_n - P_{n_0}) \text{ matériau de type n} \quad (11)$$

$$= q s_n (n_p - n_{p_0}) \text{ matériau de type p} \quad (12)$$

Notons que la vitesse de recombinaison a une importance critique dans la surface avant que dans la surface arrière.

Dans le premier cas, elle est de l'ordre de 10^5 - 10^6 cm/sec

II.2.3.1- Conclusion :

La durée de vie des porteurs libres dans un semiconducteur est un paramètre important puisqu'il détermine la longueur moyenne à laquelle les porteurs peuvent diffuser à partir du lieu où ils sont créés.

Ainsi la durée de vie ou bien la longueur de diffusion dont elle dépend a une influence directe sur la caractéristique (I - V), sur le rendement de tout dispositif, d'où la valeur de la durée de vie est reliée aux différents mécanismes de recombinaison qui se manifestent dans le semiconducteur.

En dehors de ce mécanisme, il existe un autre mécanisme dit « indirect » utilisant les impuretés et les défauts du réseau cristallin. Ceux - ci dépendent de la technologie utilisée pour la croissance des matériaux et pour la réalisation du dispositif.

Aussi, on comprend facilement que plus la durée de vie est grande, plus la longueur de diffusion est grande et plus le nombre de porteurs qui diffusent jusqu'à la jonction est grand.

Donc plus le courant est grand et le rendement aussi.

III- ABSORPTION ET REFLEXION :

III.1- ABSORPTION :

III.1.1- ABSORPTION OPTIQUE :

Considérons un faisceau lumineux monochromatique, d'énergie $h\nu$, frappant un matériau semiconducteur sous une incidence normale. Le flux de photons $N(x)$ restant après la traversée d'une épaisseur x est plus

faible que le flux incident $N(0)$. Par définition, si $\alpha(h\nu)$ est le coefficient d'absorption du matériau on a :

$$N(x) = N(0) \exp(-\alpha x)$$

L'absorption optique provient du fait que l'énergie du photon incident peut, si elle est suffisante déclencher le transfert d'un électron de la bande de valence, dans laquelle il manquera un électron (création de trous), vers la bande de conduction. La détermination expérimentale du seuil d'absorption optique constitue un moyen simple de mesurer la largeur E_g de la bande interdite. On peut observer successivement les transitions entre diverses branches des bandes de valence et de conduction. [6]

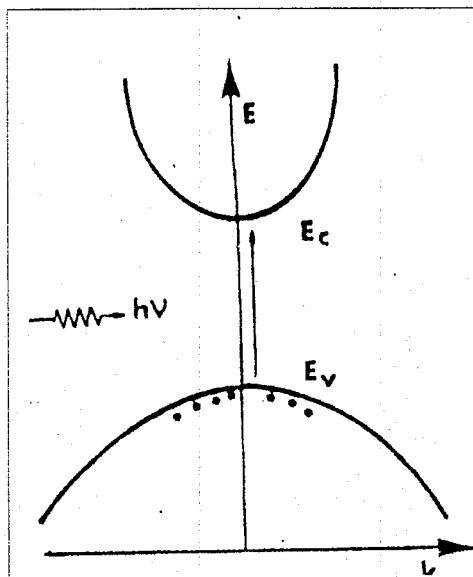


Fig a

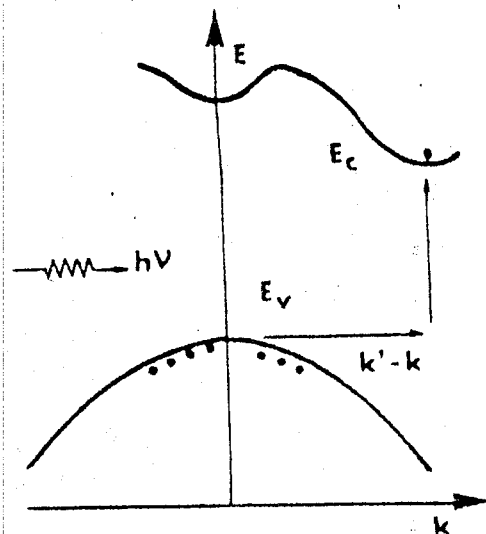


Fig. b

Absorption d'un photon par un matériau semiconducteur

Structure de bande directe (fig a)

Structure de bande indirecte.(fig b)

Le détail de la structure de bande influe sur $\alpha(h\nu)$, selon que les transitions sont directes ou indirectes. Dans le cas d'une transition directe (fig. a), cas de GaAs ou de CdS, $\alpha(h\nu)$ varie en $(h\nu - E_g)^{1/2}$.

Le front d'absorption est très raide comme le montre la fig.1, puisque dès qu'un photon se présente avec l'énergie suffisante, il est absorbé. Dans les matériaux à structure de bande indirecte (fig.b) la condition de conversion de l'énergie est satisfaite comme dans le cas précédent mais elle n'est pas suffisante puisque le vecteur $\vec{k}$ correspond à l'état initial de l'électron, est différent de celui de l'état final $\vec{k}'$. Il faut donc qu'une 3^{ème} particule intervienne car les vecteurs d'ondes des photons sont négligeables devant $\vec{k}' - \vec{k}$ dans le domaine d'énergie (≈ 1 à 2eV) qui nous intéresse.

La particule nécessaire doit posséder un vecteur d'onde $\vec{K} = \vec{k}' - \vec{k}$ et une énergie faible devant E_g .

De telles particules existent heureusement dans tous les solides. Ce sont les phonons, particules associées aux vibrations des atomes dans le réseau cristallin.

Naturellement, puisque l'intervention des phonons est nécessaire, la probabilité de transitions de la bande de valence à la bande de conduction sous l'action d'un photon est moins élevée que dans le cas d'un matériau à bande interdite directe le front d'absorption est beaucoup plus progressif. Il varie en $(h\nu - E_g)^2$

Dans les matériaux très dopés utilisés dans les photopiles, des mécanismes d'absorption supplémentaires apparaissent modifiant les fronts d'absorption, mais essentiellement pour les basses valeurs de α [9]

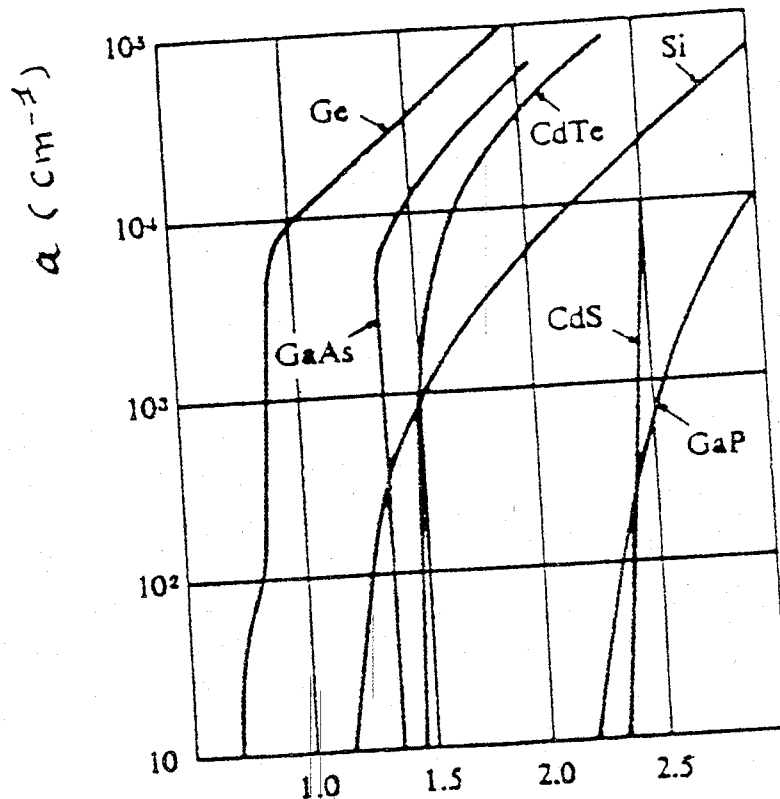


Fig.1 : Représentation du coefficient d'absorption pour
Différents matériaux photovoltaïques :

Lorsque α croît rapidement avec la fréquence, comme dans le cas de GaAs, les pertes par transmission sont réduites. Les radiations les plus énergétiques, $h\nu > E_g$ sont absorbées près de la face avant et celles correspondant à $h\nu = E_g$ dans la région arrière de la cellule à une profondeur plus ou moins grande suivant la valeur de α , pouvant aller jusqu'à la face arrière. Il en résulte que le rendement de captation sera en général plus petit aux deux extrémités du spectre solaire. [10]

La face arrière de la cellule réfléchit la fraction du rayonnement correspondant à $h\nu < E_g$, particulièrement si le contact électrique la recouvre. Le chemin optique de ces radiations s'allonge, elles finissent par être absorbées, ce qui a pour effet d'élever la température de la

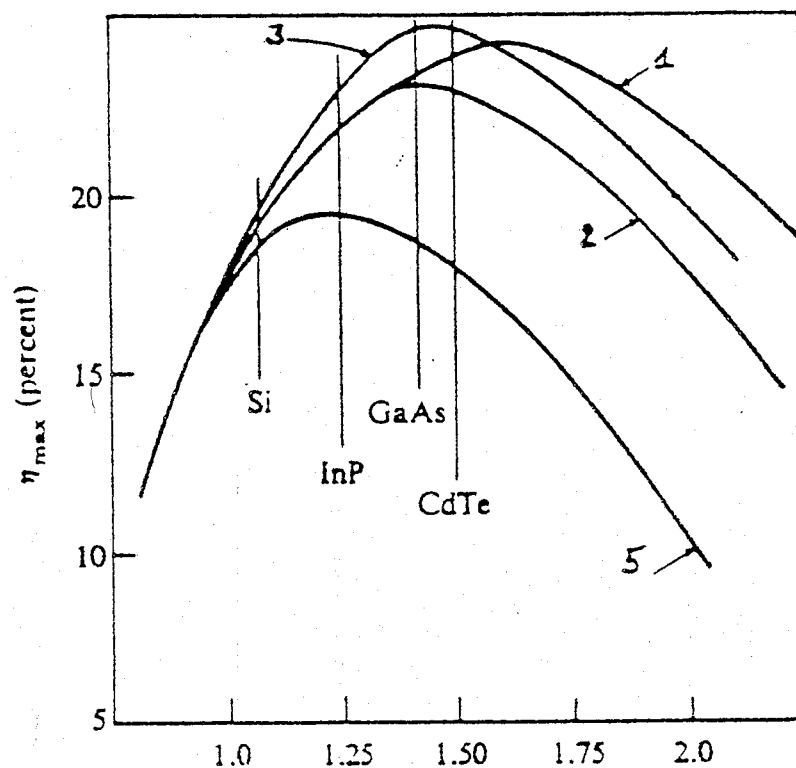


Fig.2 : Variation de E_g avec le rendement.

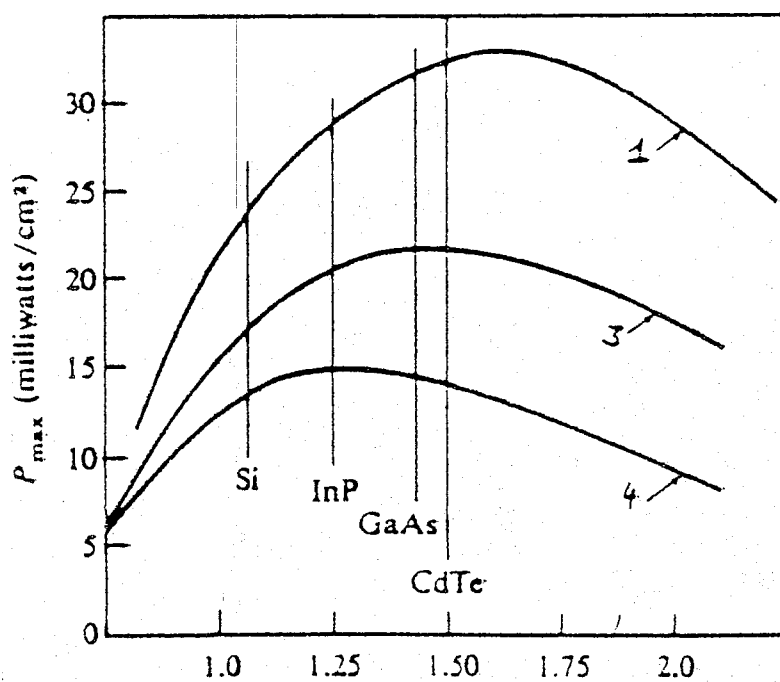


Fig.3 : Variation de E_g avec la puissance maximale.

Plusieurs auteurs ont établi $\eta_m(E_g)$ pour une cellule maintenue à la température ambiante, éclairée par le soleil au zénith, par un jour clair, au niveau de la mer. [10]

Les différentes courbes obtenues ont la même allure mais les maximums et les valeurs correspondantes de E_g diffèrent légèrement.

Ces différences proviennent :

- 1- de l'utilisation d'un spectre solaire différent.
- 2- Et surtout du choix des paramètres du semiconducteur qui entrent dans le calcul du courant d'obscurité.

Ceci dit que pour une radiation de longueur d'onde donnée, l'absorption est plus importante dans le matériau à gap directe que dans celui à gap indirecte. Cela se traduit par une épaisseur plus faible que la couche sensible dans une photopile construite à partir d'un matériau à gap directe, donc par une économie du matériau.

III.1.3- ABSORPTION EXTRINSEQUE :

L'absorption extrinsèque est due aux impuretés dopantes dans le semiconducteur.

Dans ce processus l'énergie des photons est absorbée par les atomes donneurs ou accepteurs pour libérer des électrons ou des trous, respectivement dans la bande de conduction et de valence.

Pour ce processus, il faut que l'énergie des photons soit supérieure à l'énergie d'ionisation des impuretés.

Ce processus d'ionisation, peut être important, dans certains semiconducteurs, parce qu'il permet aussi d'utiliser une partie des photons, dont la longueur d'onde se trouve en dehors de la gamme spectrale utile pour la conversion photovoltaïque, pour chaque matériau.

Après avoir passé en revue les mécanismes essentiels de la physique des semiconducteurs, nous devons signaler l'importance de

certaines de ces paramètres électriques et optiques comme le coefficient d'absorption optique, la mobilité, la conductivité, la résistivité, la durée de vie qui influent sur les performances des cellules photovoltaïques.

III.2- LA REFLEXION [11] :

Supposons que la lumière incidente frappe le matériau avec une incidence normale.

Notons par n_{c_1} indice de réflexion où :

$$n_{c_1} = n_1 - ik_1 \quad (13)$$

Où : n_1 est l'indice de réfraction réel

k_1 est le coefficient d'extinction.

et n_{c_2} indice de réflexion de la lumière incidente

$$n_{c_2} = n_2 - ik_2 \quad (14)$$

La fraction de la lumière réfléchie à travers la surface du matériau est :

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k_2^2}{(n_2 + n_1)^2 + k_2^2} \quad (15)$$

Où R est la fraction réfléchie, connue sous le nom du coefficient de réflexion, pour les cellules solaires ($n_1 \approx 1$)

En pratique, il est préférable d'appliquer une couche anti réflexion sur la surface de la cellule afin de réduire la réflexion.

Le tableau suivant présente le coefficient de réflexion pour quelques semiconducteurs.

Matériaux	Ge	Si	InP	GaAs	CdTe	AlSb	CdSe	Gap
R	0,36	0,30	0,262	0,286	0,207	0,272	0,184	0,294

Tableau n°7 : Coefficient de réflexion de quelques semiconducteurs.

Une couche anti réflexion peut être appliquée par évaporation de SiO_2 , avec un indice de réfraction, $n \approx 1,5$

Dans ce cas, le coefficient de réflexion est présente dans le tableau suivant :

Matériaux	Ge	Si	InP	GaAs	CdTe	AlSb	CdSe	Gap
R	0,207	0,1540	0,120	0,141	0,079	0,130	0,065	0,147

Tableau n°8 : Coefficient de réflexion dans le cas de la couche de SiO_2



IV- L'EFFET D'INTRODUCTION DES IMPURETES : [12]

D'après le tableau n°1, on considère un certain nombre de semiconducteurs, Si et Ge qui sont des semiconducteurs du groupe IV et l'introduction d'atomes donneurs ou accepteurs peut être appliquée pour ces matériaux.

InP, GaAs, AlSb, Gap sont des semiconducteurs du groupe (III – V), ces semiconducteurs composés sont limités dans le cristal à la fois près des partitions covalentes des électrons des semiconducteurs du groupe IV, et près des électrons échangés entre les constituants (bornes ioniques).

Dans ces matériaux, les éléments du groupe VI comme Se ou Te agissent comme donneurs et les éléments du groupe II comme Zn agissent comme accepteurs, cependant la situation de ces derniers est complexe par rapport aux éléments du groupe IV. Pour le silicium, il agit comme donneur ou accepteur dans les composants (III – V) dépendant de l'emplacement du cristal dans la région des atomes III ou dans la région des atomes V.

Pour compléter l'étude du tableau n°1, on a deux semiconducteurs du groupe (II – VI), CdTe et CdSe. Dans ce cas, par exemple, Cd agit comme donneur dans les deux matériaux.

× Plusieurs méthodes d'introduction d'impuretés dans les semiconducteurs ont été suggérées.

× En effet, il est possible d'améliorer le rendement d'une cellule solaire en utilisant l'effet d'introduction des impuretés dans la bande de gap du semiconducteur. En plus, cet effet apparaît particulièrement utile, pour les cellules solaires, utilisant, des semiconducteurs de gap indirecte, comme le silicium monocristallin et polycristallin et le Ge.

Cet effet a été suggéré, en premier par Wolf en 1960 [13]

En 1970, Gütter et Queisser montrent expérimentalement que ces impuretés dans le gap agissent comme centre de recombinaison des porteurs, et cet effet induit la dégradation du rendement de la cellule, et, cela quand ces derniers sont introduits au milieu du gap du silicium. [14]

Cependant, en 1992, Li et Al, ont réclamé que le rendement d'une cellule solaire à base de Silicium cristallin peut être amélioré en introduisant des défauts locaux dans les couches proches de la jonction p-n de la cellule solaire à base de silicium cristallin. [15]

Par conséquent, l'étude de cet effet attire de nouveau l'attention bien que, plusieurs suggestions contre on été reportées [16].

D'un autre côté, Keevers et Green [17] étudient théoriquement l'effet de la profondeur du piépage relative à l'individu (In) dans silicium cristallin, et concluent que l'incorporation de In peut contribuer à l'amélioration du rendement de la cellule.

Cependant, il n'a pas été clarifié pourquoi In est choisi, et, les résultats expérimentaux pour l'amélioration du rendement n'ont pas été obtenus jusqu'à présent.

Récemment, on étudie cet effet dans le silicium amorphe (a - Si).
[18]

Dans cette étude, l'effet des impuretés est évalué en fonction du niveau d'énergie des pièges d'impuretés. Il a été trouvé que dans une zone d'énergie stricte dans la bande de gap du semiconducteur, le niveau de piège peut contribuer à l'amélioration du rendement.

L'effet d'introduction des impuretés par pièges est étudiée théoriquement par l'investigation du mécanisme du taux de recombinaison des porteurs, en fonction du niveau d'énergie notamment dans le silicium cristallin.

CHAPITRE II :

Etude des performances
des cellules solaires

I- LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1- INTRODUCTION

Une cellule solaire est un dispositif qui absorbe les photons et les convertit en porteurs de charges et collecte ces derniers pour les utiliser dans un circuit extérieure. Il existe plusieurs types de cellules solaires photovoltaïques, parmi les plus utilisées sont les cellules solaires à homojonction p - n au Silicium monocristallin ou polycristallin et les hétérojonctions CdS - Cu₂S.

Les premières cellules ont connu un développement intense, dans, le but d'être utilisé comme générateur dans les véhicules spatiaux, quant aux cellules solaires CdS - Cu₂S, leur développement a été très peu utilisé au profit des premières, ce n'est que depuis 1973 que l'utilisation des cellules solaires pour usage terrestre s'est fortement développé. [33]

I.2- RÉALISATION ET FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE :

I.2.1- Réalisation :

La jonction est obtenue dans des dispositifs commerciaux, par diffusion thermique d'impuretés de type n ou de type p, on utilise, le plus souvent, du phosphore pour obtenir des jonctions n+/p.

Le gaz comportant l'impureté balaye un tube de quartz porté à une température variant entre 800 et 1100°C. Dans ce tube sont placées les plaquettes de Silicium préalablement bécapées. La diffusion obéit à la loi de Fick et produit une jonction dont la profondeur varie entre 0,2 et 1µm. Cette dernière est la plus importante pour les performances de la cellule.

Ensuite un contact arrière assurant un bon contact ohmique est déposé sous vide. Afin d'assurer la collecte des porteurs, on applique une grille transparente (> 90%) sur la face avant.

Enfin la face avant est couverte d'une couche antireflet, car l'indice élevé du Silicium (3,5 à 4) entraîne une réflexion de l'ordre de

35% de la lumière solaire. Pour limiter le taux de réflexion élevé et assurer une meilleure absorption, on dépose, par évaporation, un composé à faible indice de réfraction tel que l'oxyde de Silicium (SiO_x), l'oxyde de titane (TiO_x), le sulfure de Zinc (ZnS) ou l'oxyde de tantale (Ta_2O_5).

L'épaisseur de la couche antireflet est voisine de 700°A . [33]

1.2.2- Fonctionnement de la cellule :

D'une manière assez simple, on peut dire que l'énergie lumineuse absorbée par le Silicium aura pour effet d'arracher les électrons de la bande de valence à ce matériau semiconducteur, et, la configuration de la cellule doit être telle qu'il existe une dissymétrie des propriétés électriques entre les deux faces de la plaquette, de façon, à ce que ces électrons soient drainés préférentiellement vers une face. Cette dissymétrie est obtenue par l'apparition d'un gradient de dopage lors de la réalisation de la jonction p - n. A la limite des deux zones, p(Si + Bore) et n (Si + Phosphore), va exister un champ électrique interne où la structure va permettre aux électrons arrachés, par le rayonnement solaire, d'être drainés préférentiellement vers la zone n. Les charges ainsi créées sont récupérées par les électrodes, déposées sur les deux faces de la plaquette, qui seront reliées à la charge (fig 4)

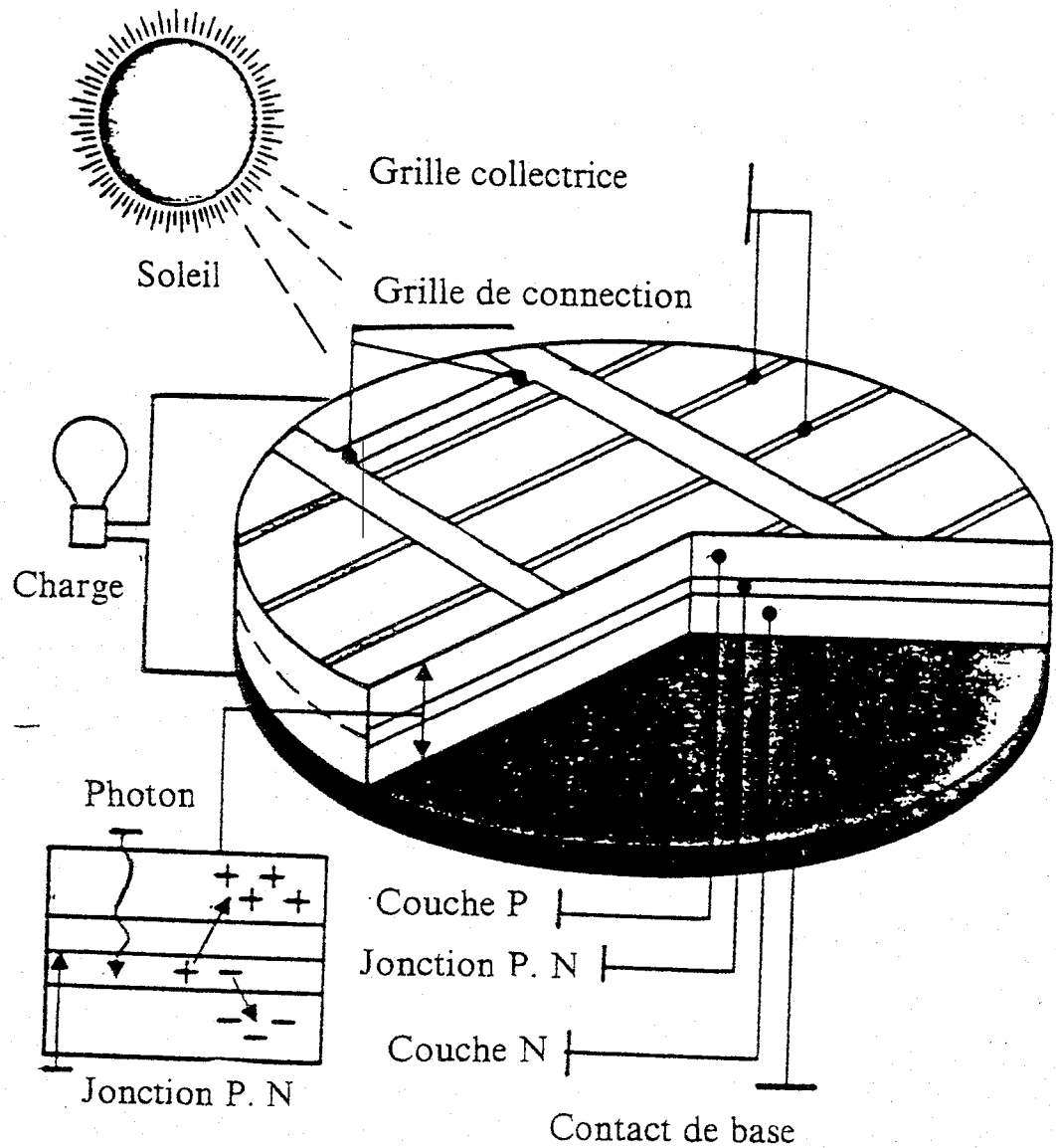


Fig. 4 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

II- CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE :

II.1- Circuit équivalent

Le circuit équivalent

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est présenté sur la fig ci - dessous.

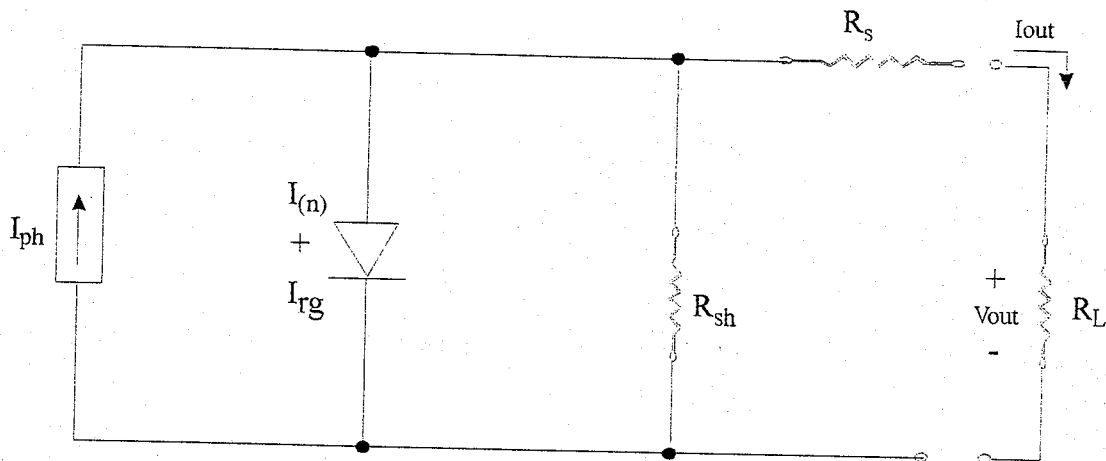


Fig.5 :Circuit équivalent d'une cellule solaire

Le photocourant est présenté par un courant générateur I_{ph} qui est opposé à la direction du courant de la diode.

La résistance parallèle est présentée par R_{sh} , R_s est la résistance série, elle croît avec le contact des résistances à l'avant et à l'arrière (particulièrement pour une base à haute résistivité 1 à 10 ohm - cm).

La caractéristique ($I - V$) s'écrit sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp(q(V + R_s I) / A_0 K T) - 1] - V + R_s I / R_{SH} \quad (1)$$

Dans le but d'avoir un rendement élevé de la cellule solaire, on néglige souvent l'effet de la résistance série et parallèle, et, l'équation (1) devient:

$$I = I_{cc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{A_0 KT} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Où A_0 est le facteur de perfection de la jonction.

Et on écrit :

$$I_0 = q \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} + q \frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} \quad (3)$$

D_n , D_p étant les coefficients de diffusion des électrons et des trous respectivement, définis à partir de la relation d'Einstein par :

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu_n \quad (4)$$

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p \quad (5)$$

II.2- Performances des cellules solaires :

❖ Le courant de court – circuit est donné simplement par :

$$I_{CC} = I_{ph} = q G (L_n + L_p) \quad (6)$$

G : nombre de paires électrons – trous.

❖ La tension à circuit ouvert est :

$$V_{C0} = A_0 \left(\frac{KT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{CC}}{I_0} + 1 \right) \quad (7)$$

Pour une jonction parfaite $A_0 = 1$ et V_{C0} atteint sa valeur la plus élevée, alors que pour les grandes valeurs de A_0 , I_0 est grand et V_{C0} est réduite.

Le courant d'obscurité I_0 est déterminé par l'énergie de gap du matériau, de la température ; I_0 diminue et V_{C0} augmente avec l'augmentation de E_g ou diminution de la température.

Le courant de court - circuit I_{CC} est déterminé par la réponse spectrale de la cellule.

La réponse spectrale dépend de l'absorption optique (coefficient d'absorption α), de la profondeur de la jonction X_j , et celle de la région de déplétion W , de la durée de vie, de la mobilité dans les deux côtés de la jonction, de la présence ou l'absence du champ électrique dans les deux régions et de la vitesse de recombinaison en surface S .

Cependant, plusieurs facteurs peuvent affecter la cellule solaire et il est donc impossible d'inclure tous ces facteurs en même temps et les calculs numériques sont obtenus dans le cas général.

Ainsi, la puissance de sortie est $V.I$, et la puissance maximale sera égale à $P_m = I_m V_m$

Où I_m : le courant maximum (mA/cm^2)

V_m : la tension maximum (V)

$$I_m = (I_{CC} + I_0) \left[\frac{q V_m / A_0 K T}{1 + (q V_m / A_0 K T)} \right] \quad (8)$$

❖ Le facteur de forme est déterminé par le rapport de $V_m I_m$ sur $I_{CC} V_{CO}$ et est trouvé par :

$$FF = \frac{V_m}{V_{OC}} \left[1 - \frac{\left[\exp\left(\frac{q V_m}{A_0 K T}\right) - 1 \right]}{\left[\exp\left(\frac{q V_{OC}}{A_0 K T}\right) - 1 \right]} \right] \quad (9)$$

L'augmentation de la valeur de V_{CO} et la diminution de A_0 et de la température améliorent les rapports $\frac{V_m}{V_{CO}}$ et $\frac{I_m}{I_{CC}}$ et le facteur de forme FF .

Les matériaux à énergie de gap élevée conduisent ces 2 rapports et le facteur de forme à des valeurs élevées à cause de V_{CO} qui est grande.

Par exemple :

Pour le silicium, $V_{CO} = 0,58V$, $FF = 0,82$ pour $A_0 = 1$ et $FF = 0,72$ pour $A_0 = 2$.

Pour GaAs : $V_{CO} = 0,9V$, $FF = 0,87$ pour $A_0 = 1$ et $0,79$ pour $A_0 = 2$. [7]

❖ Le rendement :

Ces trois paramètres définissent le rendement de conversion de la cellule, défini par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad (10)$$

Où : P_m : puissance maximale

P_{in} : puissance incidente.

III- LES TECHNIQUES UTILISEES POUR L'AMELIORATION DU RENDEMENT DE CONVERSION D'UNE CELLULE SOLAIRE :

De nombreuses méthodes ont été proposées pour l'amélioration du rendement des cellules solaires, dans ce qui suit, on citera quelques unes de ces méthodes brièvement, pour certains matériaux photovoltaïques afin d'aboutir à un rendement élevé.

Le silicium : [19]

Plusieurs efforts sont établis pour avoir un haut rendement d'une cellule solaire à base de silicium.

Un groupe de l'université d'Australie (UNSW) a réalisé une cellule à structure PERL [20] dont le rendement a été obtenu à 24%.

La durée de vie du substrat du silicium est l'un des facteurs les plus importants pour l'amélioration du rendement, bien que le substrat du silicium avec une durée de vie de plus est réalisable aujourd'hui, la

La durée de vie du substrat du silicium est l'un des facteurs les plus importants pour l'amélioration du rendement, bien que le substrat du silicium avec une durée de vie de 1µs est réalisable aujourd'hui, la succession des étapes thermiques dégradent la durée de vie à un point que les performances de la cellule se réduisent.

L'augmentation de la durée de vie ou l'amélioration de la surface de passivation compliquent le processus de fabrication pour les cellules à haut rendement, et quelques unes des étapes de ces processus deviennent inacceptables du point de vue environnement. [21]

Cependant, il existe un moyen d'améliorer le rendement en utilisant un processus thermique de façon à maintenir la durée de vie le plus longtemps possible. [22]

Les résultats des performances obtenues dans ce cas sont :

Pour une surface de 4 cm²

$V_{C0} = 690 \text{ mV}$, $I_{CC} = 40,7 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,95$, $\eta = 22,3\%$.

Phosphore d'indium (Inp) : [23]

Inp est l'un des matériaux pouvant espérer avoir un bon rendement [24], 24% comparé à celui de GaAs. Mais le rendement de conversion reporté pour des cellules de Inp [25] sont, cependant, inférieurs à ceux de GaAs.

La recombinaison en surface des porteurs est l'un des paramètres majeurs limitant le rendement d'une cellule de Inp [26] et $\text{In}_{0,52} \text{Al}_{0,48} \text{As}$ est considéré comme un matériau à fenêtre pour des cellules de $p^+n\text{Inp}$ car l'hétérojonction $\text{In}_{0,52} \text{Al}_{0,48} \text{As}/\text{Inp}$ à une énergie de bande de conduction égale à 0,38eV [27] et cette dernière agit comme une excellente barrière pour prévoir l'annihilation des électrons en surface.

Les performances pour ce type de cellules sont :

$I_{CC} = 24,80 \text{ mA/cm}^2$, $V_{C0} = 0,862 \text{ V}$, $FF = 0,836$, $\eta = 17,9\%$

Pour une surface de 1 cm^2 :

$$V_{CO} = 681 \text{ mV} , I_{CC} = 40,7 \text{ mA/cm}^2 , FF = 0,51 , \eta = 22,6\%$$

Le tellure de cadmium « CdTe » : [28]

Le tellure de cadmium est caractérisé par son énergie de gap égale à $1,44 \text{ eV}$ et son haut coefficient d'absorption.

Le CdTe absorbe plus de 90% des photons ($h\nu > 1,44 \text{ eV}$) pour une épaisseur de $1 \mu\text{m}$, alors qu'une épaisseur de 1 à $3 \mu\text{m}$ est suffisante dans le cas des cellules sont réalisées par CdTe, comme, la structure mis, la barrière de Shottky, homojonction...

En effet, de nombreuses techniques pour l'amélioration du rendement de conversion ont été reportées dans la littérature, citons par exemple épitaxie en couche par évaporation [29], la sublimation, [30] ces dernières sont utilisées pour la fabrication de la cellule solaire à film mince CdTe/ CdS et cela pour un rendement de 12%.

La technique CSS (close spaced sublimation) permet d'obtenir des rendements de 15% avec une épaisseur du film mince de CdTe de $4 - 8 \mu\text{m}$ [31].

Les paramètres importants utilisés dans ce processus sont la température de la source, la pression du réacteur, ..., tous ces paramètres sont étudiés dans [32].

Les résultats obtenus pour cette méthode sont comme suit :

T(sub) (°C)	V _{CO} (mV)	I _{CC} (mA/cm ²)	FF	η (%)
625	843	25,09	0,74	15,8%
620	853	24,02	0,76	15,5%
600	853	23,4	0,75	14,9%
570	854	23,24	0,73	14,5%

IV- ELABORATION DES CALCULS

Avant de faire une analyse statistique pour la classification des matériaux qui est représentée dans le chapitre suivant, ou établie une analyse de pondération et cela dans le but d'avoir une classification plus ou moins évidente.

Notre analyse est présentée comme suit :

Pour les huit matériaux étudiés, on fait une pondération de 1 à 8 de ces derniers selon les paramètres qui les caractérisent.

Ensuite, on choisit pour chaque paramètre un coefficient, par exemple on donne pour énergie de gap E_g un coefficient de 30% et on répartit les 70% restantes entre les autres paramètres.

On fait le produit du coefficient par le poids déjà donné, et on obtient ainsi une « classification » des matériaux utilisés.

V- RESULTATS OBTENUS :

<i>Semiconducteurs</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>InP</i>	<i>GaAs</i>	<i>CdTe</i>	<i>AlSb</i>	<i>CdSe</i>	<i>Gap</i>
Paramètre 1 : E_g	0,3	2,4	2,1	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6
Paramètre 2 : $\frac{m_0}{m_c}$	0,35	0,4	0,05	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
Paramètre 3 : $\frac{m_0}{m_v}$	0,05	0,35	0,25	0,3	0,1	0,15	0,25	0,4
Paramètre 4 : N_c	0,35	0,4	0,3	0,3	0,1	0,05	0,2	0,2
Paramètre 5 : N_v	0,05	0,35	0,25	0,3	0,1	0,15	0,25	0,4
Paramètre 6 : n_i	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Paramètre 7 : μ_n	0,3	0,25	0,35	0,4	0,2	0,1	0,15	0,05
Paramètre 8 : μ_p	0,4	0,3	0,35	0,2	0,15	0,25	-	0,15
Paramètre 9 : τ_n	0,35	0,4	0,2	0,2	0,3	0,25	0,05	0,02
Paramètre 10 : τ_p	0,35	0,4	0,2	0,2	0,3	0,25	0,05	0,02
Paramètre 11 : L_n	0,35	0,4	0,25	0,3	0,2	0,1	0,15	0,05
Paramètre 12 : L_p	0,4	0,35	0,3	0,2	0,15	0,25	-	0,15
Paramètre 13 : D_n	0,3	0,25	0,35	0,4	0,2	0,1	0,15	0,05
Paramètre 14 : D_p	0,4	0,3	0,35	0,4	0,15	0,25	-	0,15
Paramètre 15 : R	0,05	0,1	0,3	0,2	0,35	0,25	0,4	0,15
Total	0,27	0,45	0,38	0,36	0,28	0,25	0,24	0,20

D'après les résultats, on peut faire une classification selon les paramètres de chaque matériau et on obtient le classement comme suit :

Si InP GaAs CdTe Ge AlSb CdSe Gap

Selon cette analyse, on constate que le silicium possède des paramètres plus ou moins évidentes et cela en comparaison avec les autres matériaux, mais cela ne signifie pas que son rendement est le plus élevé.

Les meilleures performances obtenues pour les cellules solaires sont représentées sur le tableau suivant :

<i>Semiconducteurs</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>Inp</i>	<i>GaAs</i>	<i>CdTe</i>	<i>CdSe</i>	<i>Gap</i>
I_{CC} (mA/cm ²)	16	40,7	24,8	29,7	25	84	29
V_{CO} (V)	0,18	0,69	0,86	0,88	0,84	0,35	1,39
FF	0,57	0,95	0,83	0,82	0,74	0,73	0,86
η	0,10	0,22	0,179	0,24	0,158	0,16	0,174

En faisant un calcul analogue à celui des autres paramètres on obtient :

<i>Semiconducteurs</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>Inp</i>	<i>GaAs</i>	<i>CdTe</i>	<i>CdSe</i>	<i>Gap</i>
Total des paramètres	0,45	1,05	0,9	0,75	0,6	0,3	0,15
$P_{16} : I_{CC}$	0,15	1,05	0,6	0,9	0,75	0,3	0,45
$P_{17} : V_{CO}$	0,15	0,45	0,75	0,9	0,6	0,3	1,05
$P_{18} : FF$	0,2	1,4	0,25	0,2	0,15	0,1	1,2
$P_{19} : \eta$	0,35	2,1	1,75	2,45	0,7	1,05	1,4
Total	0,26	1,21	0,85	1,04	0,56	0,41	0,85

A partir de ces résultats, on peut plus ou moins faire une classification des matériaux étudiés selon leurs paramètres et performances et on obtient le classement suivant :

Si – GaAs – Inp – Gap – CdTe – CdSe – Ge

Le tableau qui suit présente tous les paramètres étudiés pour chaque matériau photovoltaïque.

<i>Semiconducteurs</i>	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>Inp</i>	<i>GaAS</i>	<i>CdTe</i>	<i>AlSb</i>	<i>CdSe</i>	<i>Gap</i>
L'énergie de gap (ev)								
0K	0,75	1,253	1,34	1,58	1,60	1,75	1,85	2,40
300K	0,67	1,106	1,29	1,39	1,45	1,45	1,74	2,24
Densité de la masse								
Bande de conduction	0,55	1,08	0,07	0,072	0,11	0,11	0,13	0,13
Bande de valence	0,31	0,56	0,4	0,5	0,35	0,39	0,4	0,8
Densité d'états (cm⁻³) à 300K x 10¹⁹								
Bande de conduction	1,03	2,82	0,465	0,465	0,0917	0,0717	0,118	0,118
Bande de valence	0,43	1,04	0,636	0,888	0,520	0,612	0,636	1,80
Concentration intrinsèque à 300K (cm⁻³)								
	2,4 10 ¹³	1,45 10 ¹⁰	2,63 10 ⁷	4,5 10 ⁶	1,52 10 ⁶	5,11 10 ⁴	7,07 10 ³	0,764
Mobilité des électrons (N_D = 10¹⁴/cm³, T = 300K) (cm²/V.sec)								
	3950	1500	4000	8500	1000	200	600	120
Mobilité des trous (N_A = 10¹⁴/cm³, T = 300K) (cm²/V.sec)								
	1900	600	650	400	100	420	-	100
Durée de vie des électrons (sec) à 300K								
	0,5 10 ⁻⁴	0,8 10 ⁻⁴	4 10 ⁻⁸	4 10 ⁻⁸	1,6 10 ⁻⁷	9 10 ⁻⁸	1,6 10 ⁻⁸	4 10 ⁻⁸
Durée de vie des trous (sec) à 300K								
	0,5 10 ⁻⁴	0,8 10 ⁻⁴	4 10 ⁻⁸	4 10 ⁻⁸	1,6 10 ⁻⁷	9 10 ⁻⁸	1,6 10 ⁻⁸	4 10 ⁻⁸
Longueur de diffusion des électrons (cm)								
	32 10 ⁻⁴	34 10 ⁻⁴	10,17 10 ⁻⁴	14,8 10 ⁻⁴	50,86 10 ⁻⁵	22,74 10 ⁻⁵	39,4 10 ⁻⁵	15,81 10 ⁻⁶
Longueur de diffusion des trous (cm)								
	22 10 ⁻⁴	21 10 ⁻⁴	41 10 ⁻⁵	32,17 10 ⁻⁵	16,06 10 ⁻⁵	32,95 10 ⁻⁵	-	16,06 10 ⁻⁶
Coefficient de diffusion des électrons (cm²/S)								
	102,2	38,81	103,5	219,94	25,87	5,17	15,25	3,10
Coefficient de diffusion des trous (cm²/S)								
	49,16	15,52	16,81	10,35	2,58	10,86	-	2,58
Coefficient de réflexion								
	0,36	0,30	0,262	0,286	0,207	0,272	0,184	0,294

CHAPITRE III :

Classification et analyse
des données photovoltaïques

I- INTRODUCTION

L'informatique a donné une vie nouvelle à certaines branches de la statistique ; elle a en outre permis la naissance de nouvelles méthodes qu'on ne pouvait concevoir sans l'existence de l'ordinateur.

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 une grande masse d'informations, des structures d'organisation entre ces dernières et cela au grand bonheur des méthodes d'investigation dans les nombreuses disciplines des sciences de l'homme de la nature et de la vie, où la part due à « l'observation » et à la collecte des données, est si importante. [34]

Telles qu'elles se manifestent dans ces sciences, les variables descriptives sont rarement numériques et il importe que la méthode de synthèse de l'information respecte la représentation naturelle des données.

D'autre part, la structure de condensation la plus adéquate pour le problème posé par le spécialiste a le plus souvent un caractère fini : partition, chaîne de partitions, ordre, ... et le critère de synthèse doit en tenir compte tout en ayant un fondement statistique clair.

Enfin, les algorithmes proposés doivent être justifiés du point de vue du critère qu'ils optimisent.

C'est relativement à une visée classificatoire que le spécialiste établira les attributs de description de la population qu'il étudie, pour suivre la démarche d'Adanson : « Je me contenterais de rapprocher les objets suivant le plus grand nombre de degrés de leur rapport et de leurs ressemblances ... les objets ainsi réunis formeront plusieurs petites familles que réunirait encore l'ensemble, afin d'en faire un tout dont les

parties soient unies, et, liées intimement, respectant l'intuition du spécialiste, il importe par conséquent pour une bonne classification (partition) de la population étudiée, que, relativement aux attributs de description, le degré de ressemblance de deux objets soit plutôt grand s'ils appartiennent à la même classe et plutôt petit sinon.

De plus, une hiérarchie de classification emboîtées (chaîne ordonnée de partitions) respecte de manière satisfaisante les ressemblances entre objets. Si la ressemblance de deux objets d'une même classe est d'autant plus grande que le niveau de la hiérarchie, ces derniers se trouvent réunis.

S'il y a une raison pratique, évidente, à la classification de l'ensemble des attributs, ou, plus généralement, des variables descriptives liées à la dimension du tableau des données : la taille de l'ensemble des variables dépasse très rarement quelques centaines alors que celui des objets peut atteindre plusieurs milliers ; il y a surtout une raison profonde motivant l'intérêt de la classification, de l'ensemble V des variables.

En effet, la construction d'une hiérarchie de classifications sur V , basée sur les « ressemblances » entre variables, conduit à la découverte des tendances principales du comportement de la population étudiée et de diverses composantes de chacune de ces tendances.

Cette approche qui fournit un terme non linéaire à l'alternative posée par l'analyse factorielle, est par conséquent, la plus féconde, car elle réduit et donc simplifie notre mode de reconnaissance en organisant les liens entre les nombreuses questions qu'on peut se poser pour appréhender le grand ensemble E soumis à l'étude.

Toutefois, la réponse au problème posé par le chercheur peut plus directement, et, plus efficacement se trouver dans une classification de l'ensemble E des objets. D'ailleurs devant un tableau de données supportant la description variables $\times$ objets, on cherche le plus souvent à

organiser en classes et sous - classes, aussi bien l'ensemble des variables, que celui des objets et à faire correspondre l'une des classifications à l'autre.

II- ETUDE FORMELLE ET STATISTIQUE DE LA NOTION DE RESSEMBLANCE :

En présence d'un tableau T de données croisant un ensemble fini V de variables descriptives et un ensemble E d'objets ou de sujets ; deux optiques de synthèse apparaissent : [35]

La première porte sur E et la seconde, sur V.

Pour la première, on obtient, relativement à une visée classificatoire, une typologie de l'ensemble des objets à partir de la détermination sur E d'une hiérarchie des classifications établie de façon à respecter au mieux les « ressemblances » entre objets ; c'est à dire, de telle sorte que, le plus souvent, deux objets puissent se retrouver à un niveau d'autant plus élevé de la hiérarchie que leur ressemblance est grande.

Relativement à la seconde optique de synthèse, la construction d'une hiérarchie de classifications sur l'ensemble des variables descriptives, basées sur les « ressemblances » entre variables, conduit à la découverte des tendances principales du comportement de la population étudiée, que constitue E, et, des diverses composantes de chacune de ces tendances. [36]

Qu'il s'agisse de la condensation de V ou de E ; on commencera par définir une « mesure » de la ressemblance entre éléments de V ou de E. D désignant l'un ou l'autre des deux ensembles V et E ; cette « mesure » (on dit encore indice ou coefficient) de la ressemblance (on dit également similarité ou proximité) se présente formellement comme une fonction numérique définie sur $D \times D$, associant à chaque couple $(c, d) \in D \times D$, un nombre sensé mesurer la ressemblance entre c et d.

II.1- SUR DEUX MODES DE MESURE DE L'IMPORTANCE D'UNE VARIABLE DESCRIPTIVE.

* Introduction

Le choix des objets constituant l'ensemble E peut s'imposer de façon plus au moins évidente au spécialiste ; il s'agit le plus souvent d'un échantillon de la population étudiée, relativement aux tendances principales dans le comportement qu'on désire dégager ; mais c'est une condition qu'on ne peut contrôler.

Le choix des variables descriptives est un problème autrement plus délicat.

A ce sujet, deux questions se posent :

- a- Quelles sont les variables descriptives pertinentes vis à vis du problème étudié ?
- b- Quelle importance convient-il d'accorder à chacune d'elles pour définir au mieux une classification sur E ?

Selon notre point de vue, (a) est un vrai problème alors que (b) en est un faux.

En effet, l'importance d'une variable descriptive ne peut être définie de façon abstraite, dans l'absolu ; elle résulte d'une connaissance des données, connaissance dont la forme est nécessairement statistique ; c'est à dire, comportant un aspect synthétique.

Or une « bonne » classification sur E, basée sur les ressemblances, où les diverses variables sont à priori également considérées, fournit cette synthèse statistique par rapport à laquelle nous pouvons précisément définir l'importance de chacune des variables descriptives par son degré de « discrimination » de la classification ; il s'agit de ce que nous appellerons : importance « classificative » de la variable.

Par conséquent une bonne pondération d'un certain type est un résultat d'une bonne synthèse statistique ; elle n'en est pas le préalable.

Ce qui peut faire croire au spécialiste que (b) est un vrai problème, c'est qu'ayant une certaine connaissance des données, il se résout mal, malgré l'imprécision de cette connaissance à accorder la même importance à priori, aux diverses variables. [37]

En établissant des variables descriptives, le chercheur se rend tout à fait compte du caractère crucial du problème (a).

On ignore souvent si une variable donnée interfère avec la nature du phénomène étudié. Il en résulte un alourdissement du tableau des données par un accroissement du nombre de variables dont une part est formée de variables « neutres » qui peuvent cacher la nature classifiable de la population étudiée par rapport à l'ensemble des autres variables.

D'où la nécessité de procéder à une synthèse statistique rapide qui, sans aller jusqu'à l'application d'algorithmes de classification, nous permet de mieux contrôler les résultats d'une analyse des données. [38]

III- RAPPELS DES NOTIONS DE BASE SUR LA STATISTIQUE :

III.1- Définitions :

En statistique ou en probabilités, on étudie à partir des individus qui composent la population définie, le ou les caractères ayant un intérêt direct pour l'objectif poursuivi.

III.2- Estimation de la moyenne, de la variance et de l'écart type d'une population de taille N à l'aide d'un échantillon de taille n :

Généralement, pour une population donnée, on ne connaît pas les valeurs réelles de :

$$\text{La moyenne } \mu_x = \frac{\sum x}{N} \quad (1)$$

Avec X : variable

N : nombre de caractères.

$$\text{La moyenne harmonique : } H = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{x} \quad (2)$$

$$\text{La variance : } V_x = \frac{\sum (x - \mu_x)^2}{N} \quad (3)$$

$$\text{La covariance : } cov = \frac{1}{N} \sum (x - \bar{x}) \quad (4)$$

Avec $\bar{x}$: valeur moyenne de la variable x .

$$\text{L'écart type } \sigma_x = \sqrt{V_x} = \sqrt{\frac{\sum (x - \mu_x)^2}{N}} \quad (5)$$

$$\text{Le coefficient de corrélation : } \rho = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (6)$$

Avec N : nombre des individus

σ_x, σ_y : écart type du vecteur x et y respectivement

On dispose par contre d'un échantillon de taille n extrait de cette population.

La population (ou paramètres de tendance centrale) peut s'écrire sous la forme :

$$\mu_X = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad (7)$$

avec $f(x)$: fonction de « densité de probabilité »

On appelle aussi la moyenne moment d'ordre 1 et la variance moment centré d'ordre 2 ; plus généralement :

$\int_{-\infty}^{+\infty} x^n f(x) dx$ est le moment d'ordre n et

$\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^n f(x) dx$ est le moment centré d'ordre n .

L'emploi des moments est assez fréquent dans la statistique et il présente un certain nombre de propriétés intéressantes.

Les meilleurs estimations des valeurs réelles des paramètres inconnus de la population ont respectivement pour valeur :

$$\text{Pour la moyenne } M_X = \frac{\sum x}{N} \quad (8)$$

$$\text{Pour la variance : } V_X = \frac{\sum (x - M_X)^2}{n-1} \quad (9)$$

$$\text{Pour l'écart type } S_X = \sqrt{\frac{\sum (x - M_X)^2}{n-1}} \quad (10)$$

Les statisticiens appellent ces estimations « absolument correctes », lorsque croît la taille n de l'échantillon, ils tendent vers les valeurs réelles des paramètres de la population.

Ces propriétés sont très importantes, nous les utiliserons par la suite.

III.3- GROUPEMENT PAR CLASSES :

Dans ce cas, on effectue un calcul approché : on regroupe les valeurs en classes d'intervalle i . A partir de cela, nous définissons les éléments suivants :

f : la fréquence c'est à dire le nombre d'observations de chaque classe.

c : le nombre algébrique de classes séparant la classe considérée de la classe contenant la moyenne provisoire a (valeur centrale de cette classe).

Ce groupement conduit à une valeur approchée : plus l'intervalle de classe i est grand, plus l'erreur est élevée.

Toutefois, on considère le résultat comme valable si l'écart type estimé S est plus grand que i .

Pour éviter des calculs inutiles, on peut évaluer l'ordre de grandeur de S à partir de l'étendue W (différence entre la plus petite et la plus grande des valeurs de l'échantillon de taille n).

Si :

$$\left. \begin{array}{ll} n < 30 & S \approx \frac{W}{4} \\ 30 < n < 60 & S \approx \frac{W}{5} \\ n > 60 & S \approx \frac{W}{6} \end{array} \right\}$$

Cette règle permet seulement de connaître un ordre de grandeur de S fixant la limite supérieure de l'intervalle i pour obtenir des résultats acceptables.

IV- ANALYSE FACTORIELLE

IV.1- INTRODUCTION

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 , ...

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. Il existe même de nombreuses formules de calcul de distance entre individus d'une population à partir d'un tableau de nombres relatifs à cette population qu'on définira par la suite.

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. (Problème analogue à celui qui consiste à représenter une pyramide sur une surface plane).

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. [39]

Comme en général, cette figure n'est réalisable que dans un espace à plus de trois dimensions, il est impossible de la représenter

d'un sous - espace de dimension S donnée qui rend minimum la somme pondérée des carrés des distances à S des différents sommets du nuage.

La représentation consiste alors en la projection du nuage, au sens de la métrique définie par la forme quadratique, sur le sous espace S trouvé. [41]

IV.2.2- ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES :

IV.2.2.1- Introduction :

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 $j^{\text{ème}}$ variable V_j sur le $i^{\text{ème}}$ élément i de I .

Pour l'ensemble J , on le note $\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$, on fait correspondre un nuage de points de R^m dont chaque sommet portera ici la même masse ponctuelle $1/n$.

En condensant au mieux la dimension de l'espace de représentation, on espère que les facteurs définiront des variables de synthèse non directement observables qui nous font « comprendre » les tendances dominantes du comportement de la population étudiée en disposant les diverses variables introduites par rapport à ces tendances.

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

$$d^2(i, i') = \sum_{1 \leq j \leq m} (x_{ij} - x_{i'j})^2$$

Conduisant à l'analyse en composantes principales, la contribution à la distance d'une variable dépend intimement de la dispersion de ses valeurs, et cette dispersion est liée à la nature de la variable. [42]

V- PRESENTATION DU LOGICIEL :

Le logiciel utilisé est « contrôle des processus statistiques ».

Ce dernier nous permet en faisant une analyse statistique des données d'avoir une classification de la population étudiée d'un système de dimension P à un système de dimension Q avec $Q \leq P$.

Dans une première étape nous effectuons une analyse statistique à une variable, cette analyse nous permet de calculer plusieurs paramètres dont le rôle est important en statistique et qui ont déjà été déterminés.

L'analyse statistique à deux variables nous permet de calculer la moyenne entre caractères, l'écart type, la covariance ainsi que le coefficient de corrélation défini auparavant et qui a une portée très critique.

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.

VI- RESULTATS ET DISCUSSION

L'étude effectuée dans les chapitres précédents nous conduit à faire une interprétation des données à l'aide de l'analyse en composantes principales.

Les éléments de description se présentent sous la forme d'un tableau de nombres à deux entrées, l'une concerne le 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 technique utilisée repose sur la notion de distance entre deux éléments. Cette dernière est formalisée mathématiquement, il existe même de nombreuses formules de calcul de distance entre individus d'une population à partir d'un tableau de nombres relatifs à cette population, comme on l'a dit précédemment, une fois les distances calculées, on dispose les individus sur un graphique ; cependant, on trouve un dessin qui respecte au mieux les distances calculées, et déforme le moins possible la figure définie par les individus et les caractères de la population et leurs distances.

L'analyse statistique à une et à deux variables est représentée sous forme de tableaux, dans le premier cas, on calcule les différentes variables utilisées en statistique comme la moyenne généralisée, quadratique,... déjà définies et dans le 2^{ème} cas les variables les plus importantes qui nous conduisent au calcul du coefficient de corrélation ρ qui nous donne ou nous confirme l'information obtenue sur les caractères utilisés.

Plus $\rho \approx 1$, plus les deux caractères (vecteurs) ont la même information et on limite le nombre de ces derniers à un nombre inférieur à celui utilisé au début.

Par exemple, si on a deux ou trois vecteurs qui ont un coefficient de corrélation ≈ 1 , cela veut dire qu'ils ont la même information donc, au lieu de faire un calcul pour les trois vecteurs, on se limite à un seul. C'est là l'intérêt que porte l'analyse en composantes principales, ainsi donc, pour effectuer une classification à plusieurs caractères ou individus, on utilise cette analyse dont elle limitera le nombre des éléments de la population, et il nous sera plus facile d'établir une classification.

Cependant, il sera nécessaire de noter que, les deux axes portés sur le graphique ne correspondent pas aux caractères et aux individus respectivement, mais sont le résultat de calculs complexes et doivent être interprétés globalement.

La figure n°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 300K, 350K, 400K et 500K 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.

Cela est vérifié dans le tableau représentant cette variation en effectuant une analyse statistique à deux variables où on trouve le coefficient de corrélation $\rho = 1$ c'est à dire que les quatre vecteurs sont bien corrélés entre eux et ont la même information.

D'où l'intérêt de limiter le calcul à un seul vecteur au lieu de quatre vecteurs.

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 n°2, où on constate que les vecteurs V_{01} et V_{02} correspondants aux concentrations 10^{14} et $10^{16}/\text{cm}^3$ respectivement sont sur le même point avec un coefficient de corrélation $\rho = 0,995848$.

Pour la représentation des individus, la figure n°3 nous montre que les trois points correspondants aux vecteurs V_{02} , V_{04} et V_{05} 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 (figure n°4), le coefficient de corrélation entre les vecteurs V_{01} et V_{02} , $\rho = 0,999211$.

Ces constatations nous mènent à dire qu'à partir d'une classification dans un espace à P dimensions, on se retrouve dans un espace à Q dimensions plus petit.

La représentation des individus est effectuée sur la figure n°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 1^{er} vecteur.

Venons maintenant au cas, où tous les caractères sont présentés sur le plan principal, la figure n°8 nous montre que les vecteurs V_{12} , V_{13} , V_{14} , V_{15} , V_{02} et V_{04} 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} qui sont proches de l'axe, on déduit donc que ces derniers ont une importance dans les caractéristiques des cellules photovoltaïques. Le tableau présentant l'analyse statistique à deux variables pour tous les caractères confirme ces résultats.

Dans le but de faire une classification des individus, il est nécessaire de faire une représentation graphique de ces derniers selon les performances et les paramètres étudiés auparavant.

En effet, cette représentation est montrée sur la figure n°10 où 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 comparée aux autres vecteurs.

La représentation des performances sur le plan principal est effectuée sur la figure n°12, cette dernière nous informe du paramètre le plus important.

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.

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 n°11.

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.

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.

D'après ces constatations, on déduit donc, que le silicium est le matériau le plus utilisé car il possède des paramètres significatives bien que son rendement est inférieur à celui de GaAs, mais reste à traiter le problème du coût.

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.

Le classement général obtenu est représenté comme suit :

- 1- Si
- 2- GaAs
- 3- InP
- 4- CdTe
- 5- GaP
- 6- CdSe
- 7- Ge

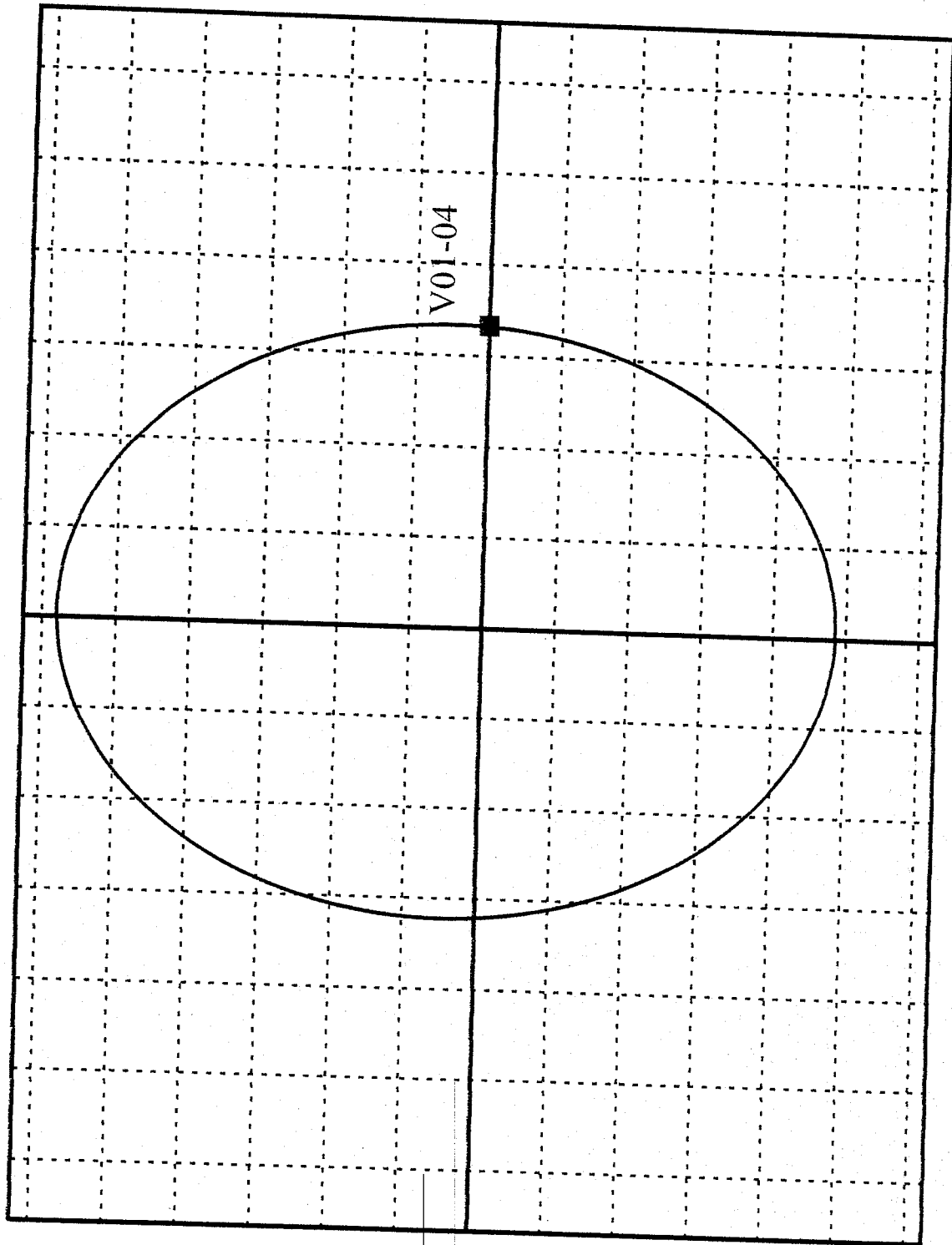


Figure n°1: Variation du carré de la concentration intrinsèque en fonction de la température.
Représentation des caractères sur le plan principal.

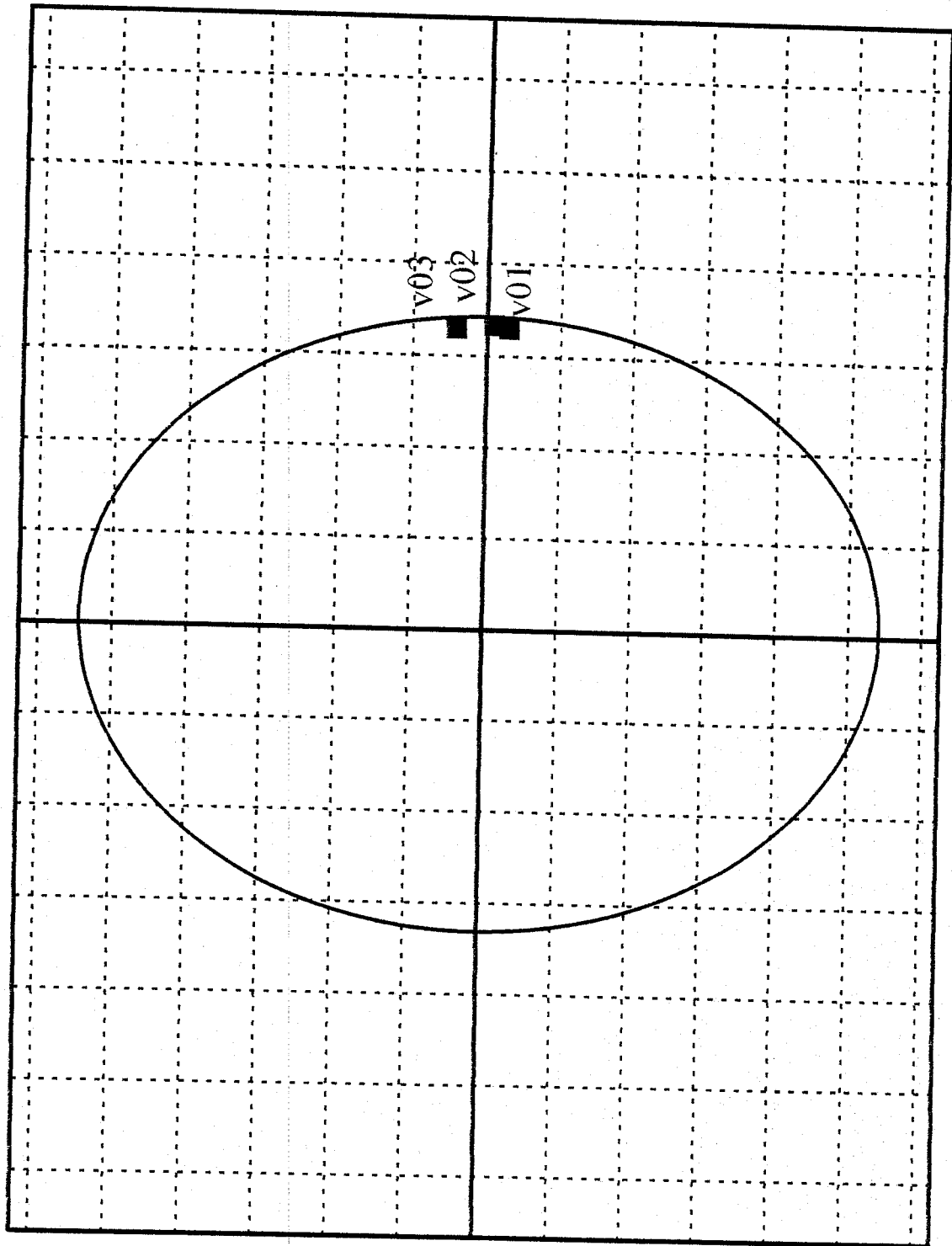


Figure n°2: Variation de la mobilité des électrons en fonction de la concentration d'impuretés.
Représentation des caractères dans le plan principal.

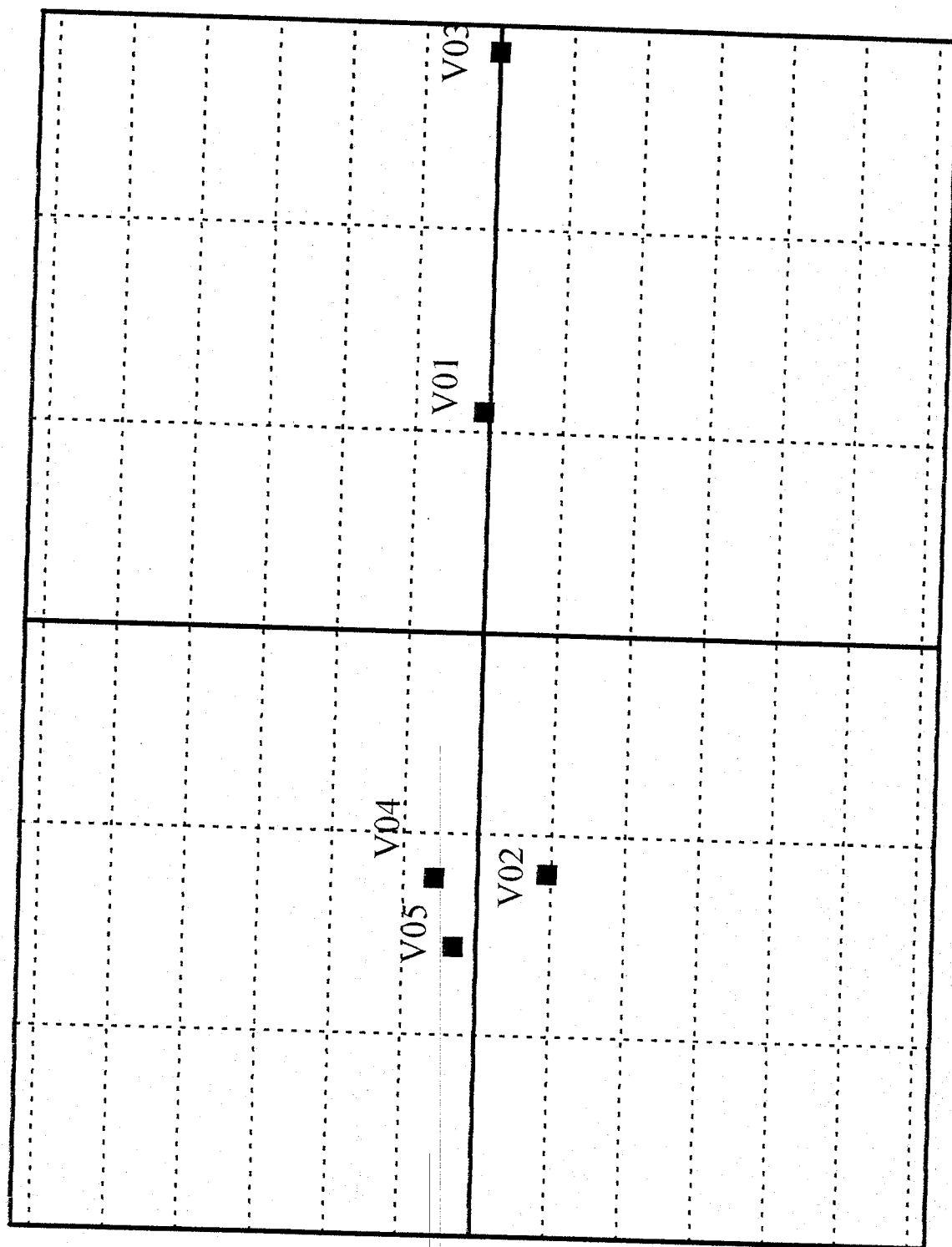


Figure n°3: Variation de la mobilité des électrons en fonction de la concentration d'impuretés.
Représentation des individus sur le plan principal.

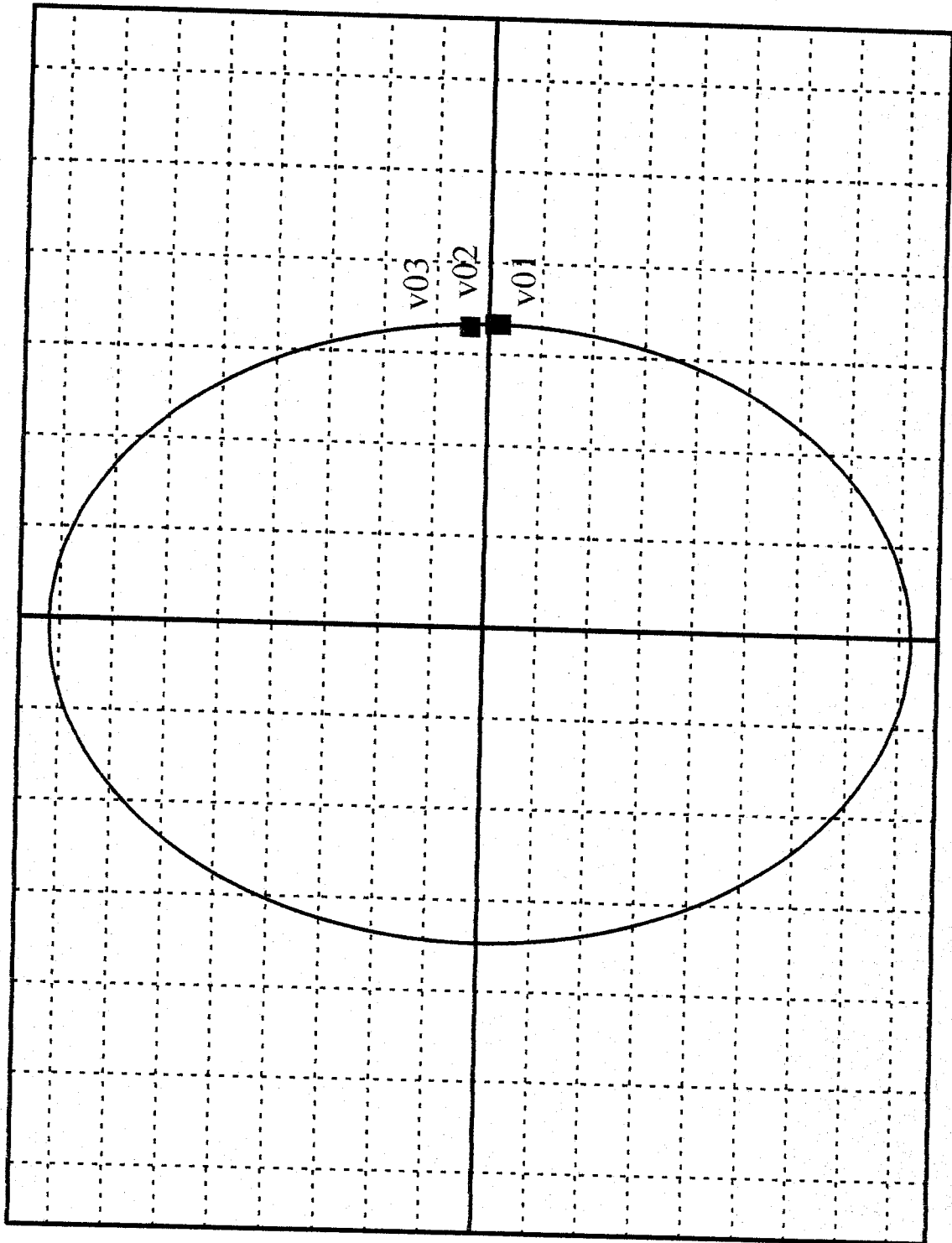


Figure n°4: Variation de la mobilité des trous en fonction de la concentration d'impuretés.
Représentation des caractères dans le plan principal.

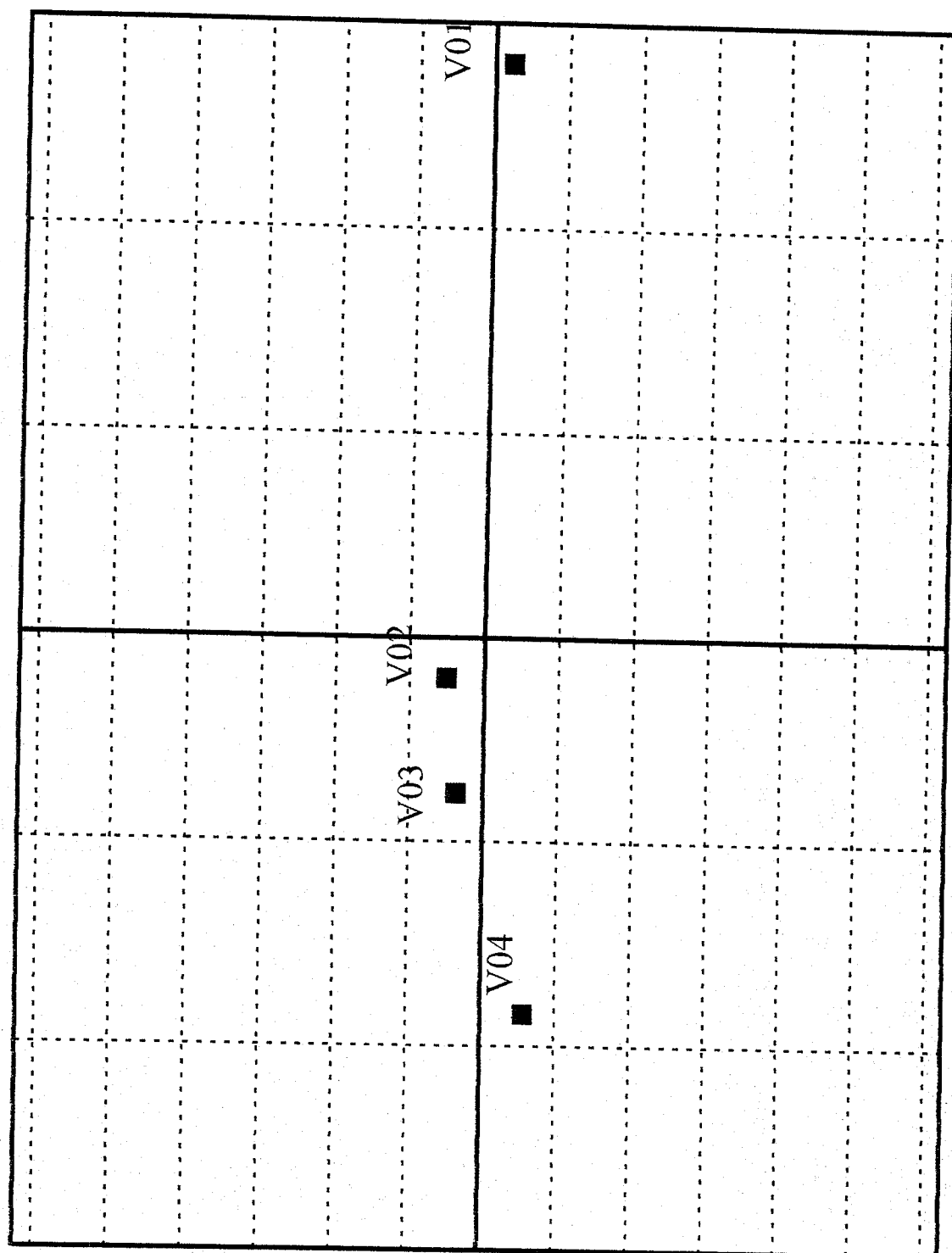


Figure n°5: Variation de la mobilité des trous en fonction de la concentration d'impuretés.
Représentation des individus sur le plan principal.

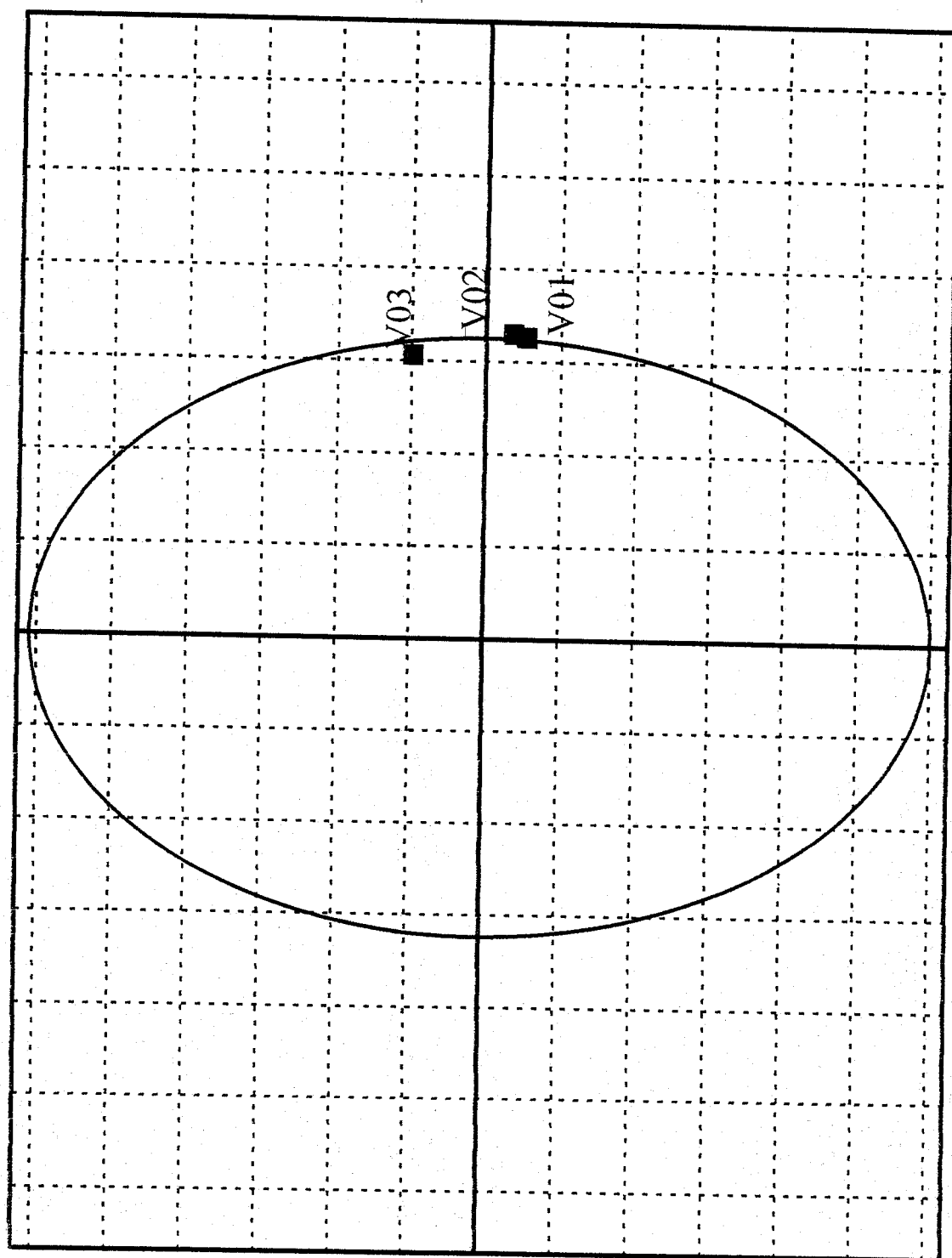


Figure n°6: Variation de la mobilité des électrons en fonction de la température.
Représentation des caractères sur le plan principal.

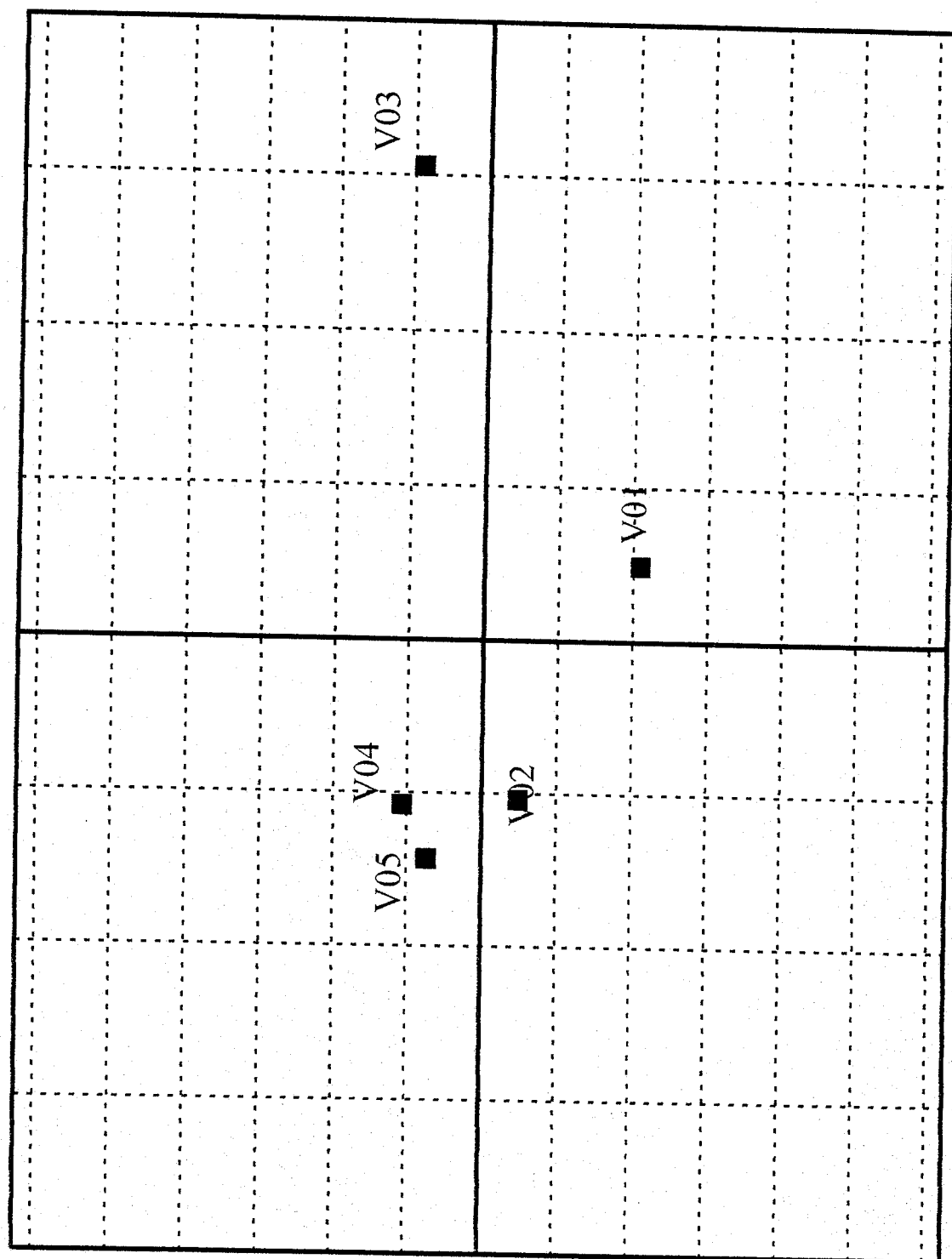


Figure n°7: Variation de la mobilité des électrons en fonction de la température.
Représentation des individus sur le plan principal.

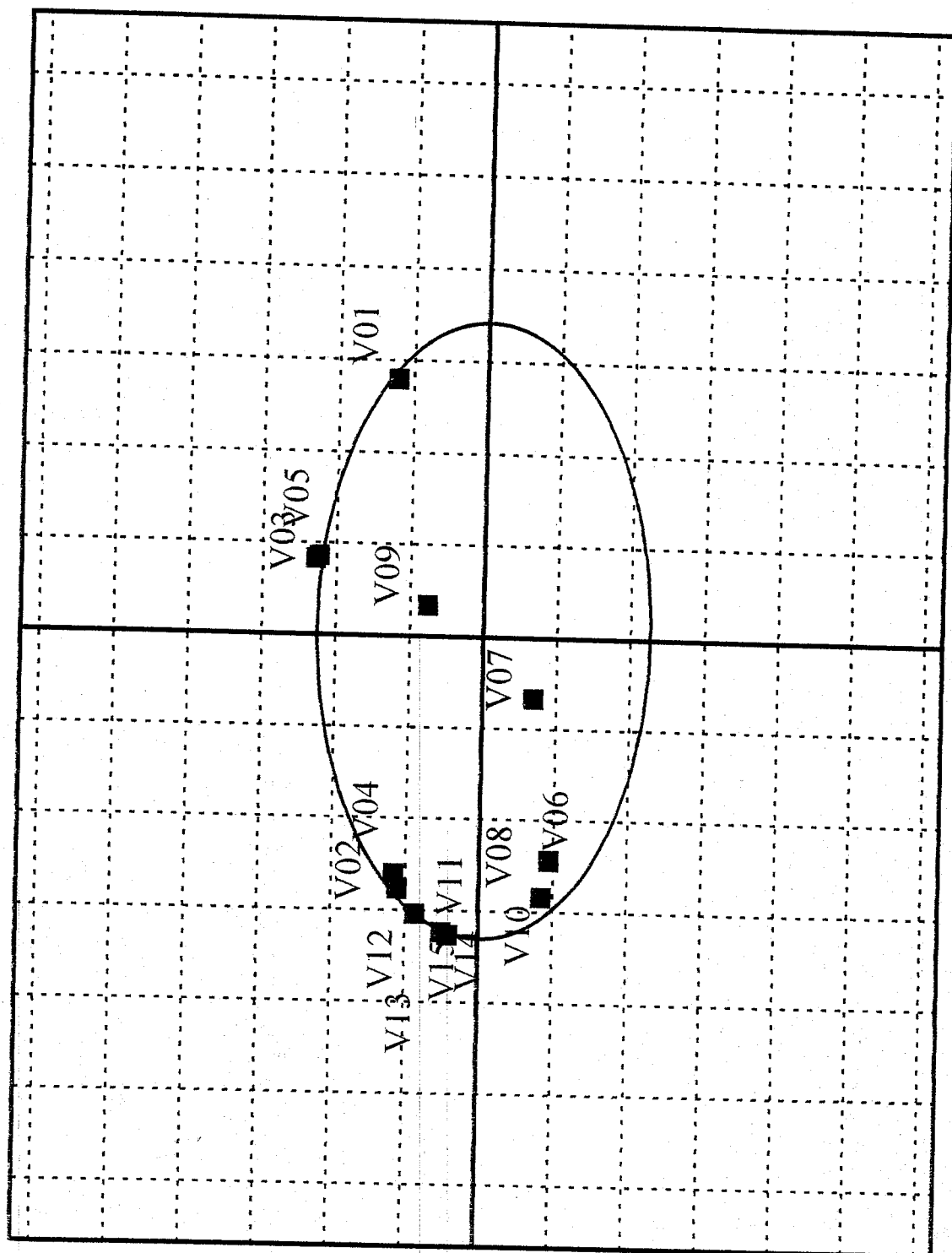


Figure n°8: Représentation des caractères sur le plan principal.

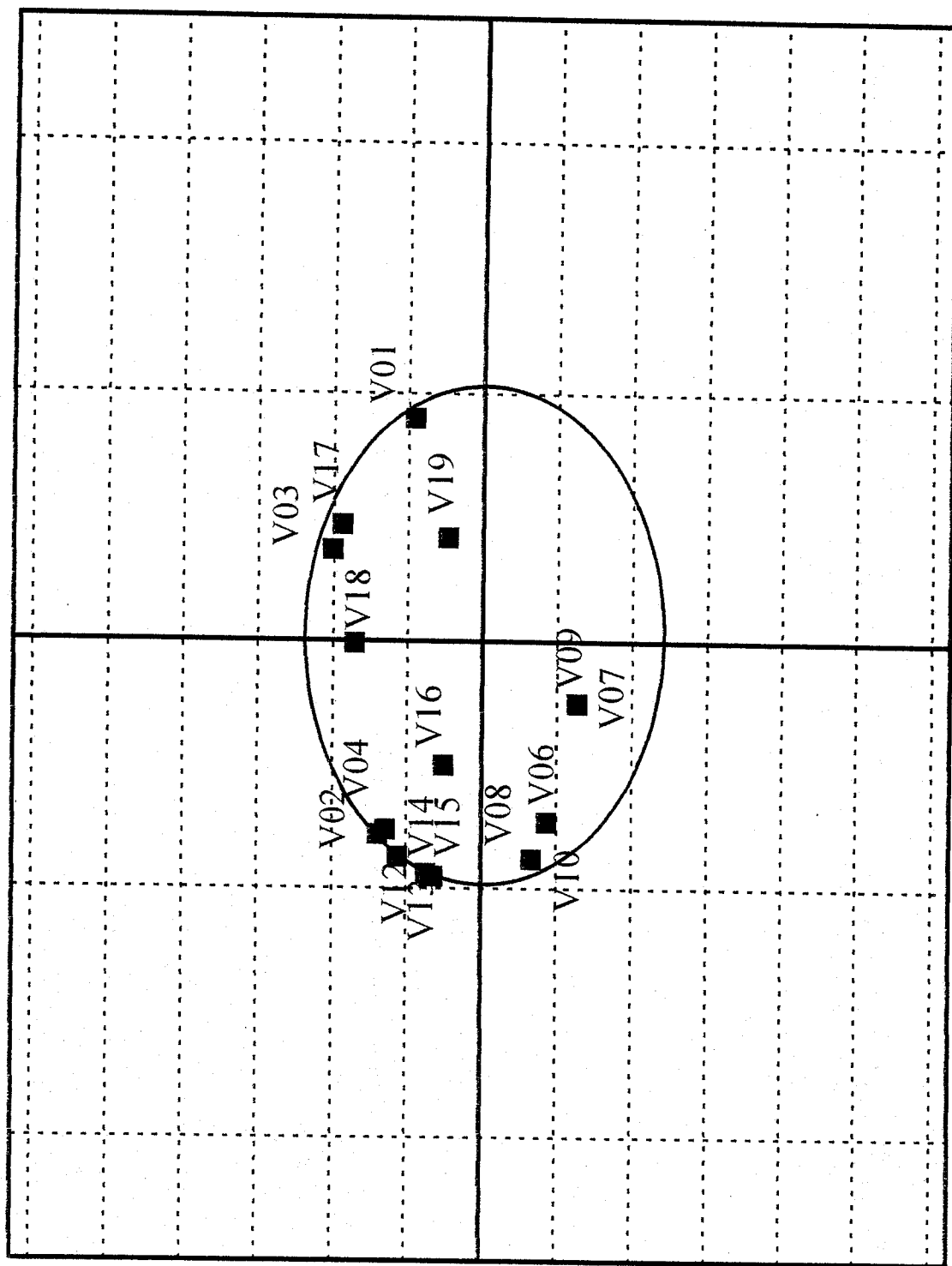


Figure n°9: Représentation de tous les caractères sur le plan principal.

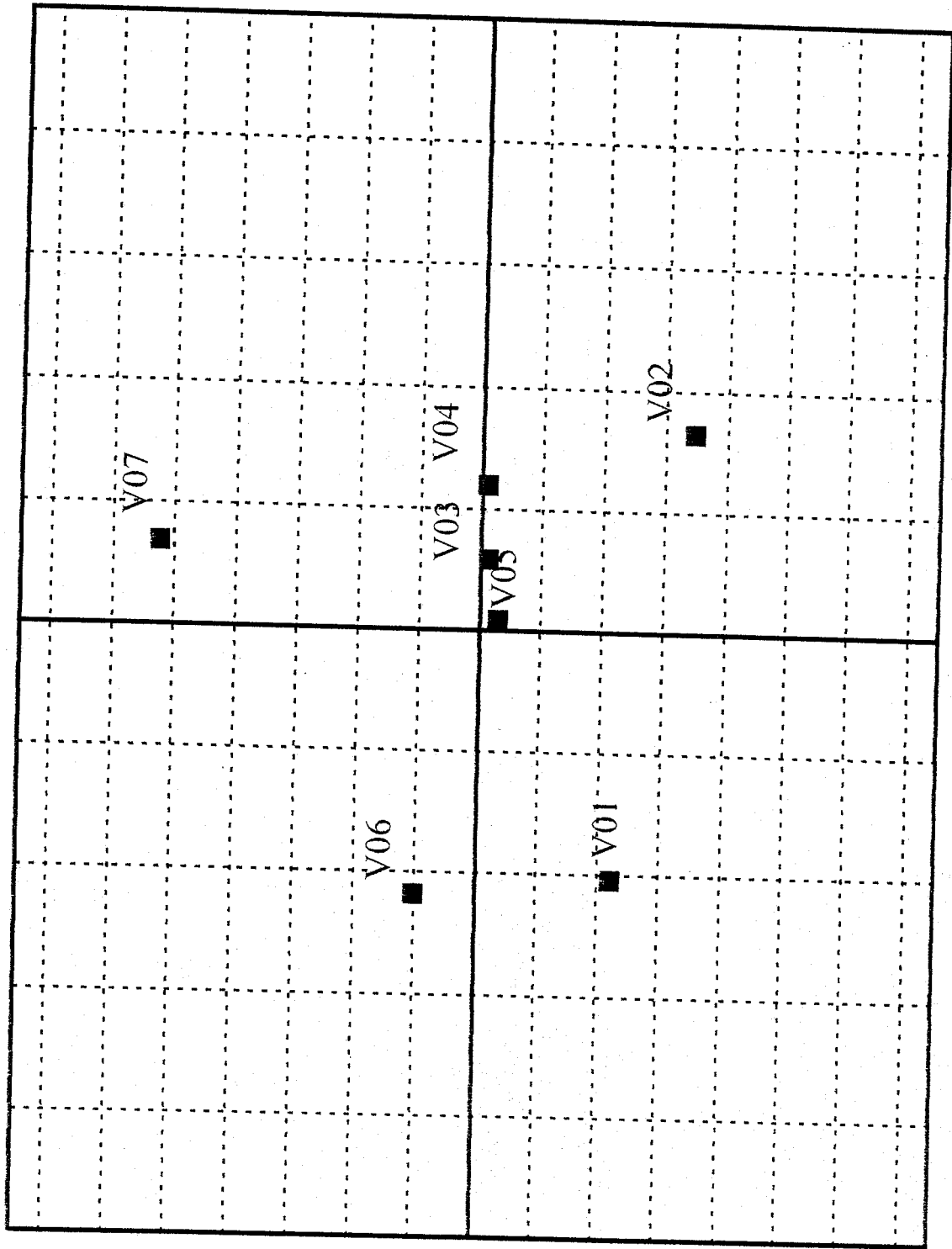


Figure n° 10: Représentation des individus sur le plan principal.
Selon les performances.

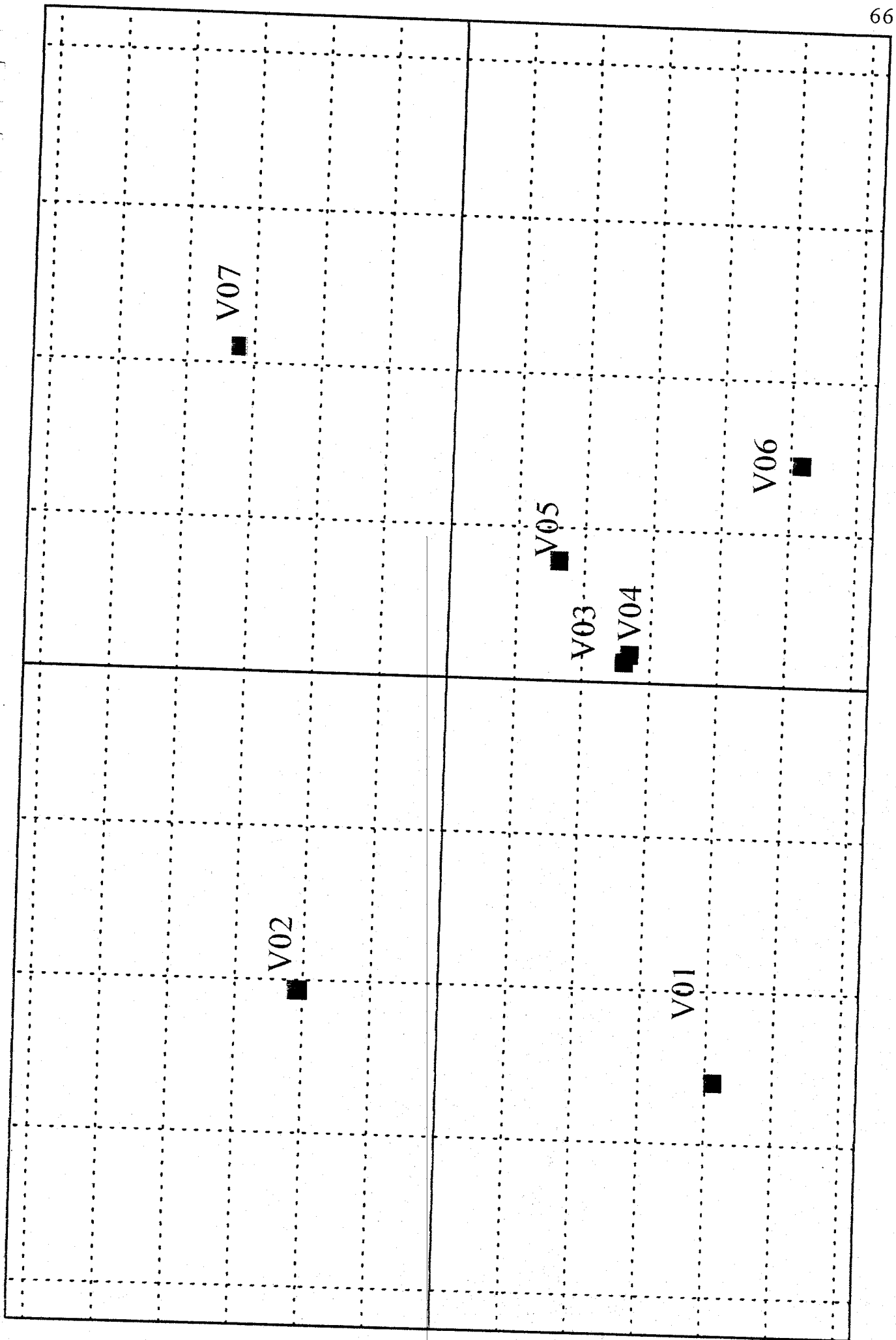


Figure n°11: Représentation des individus (matériaux) sur le plan principal.

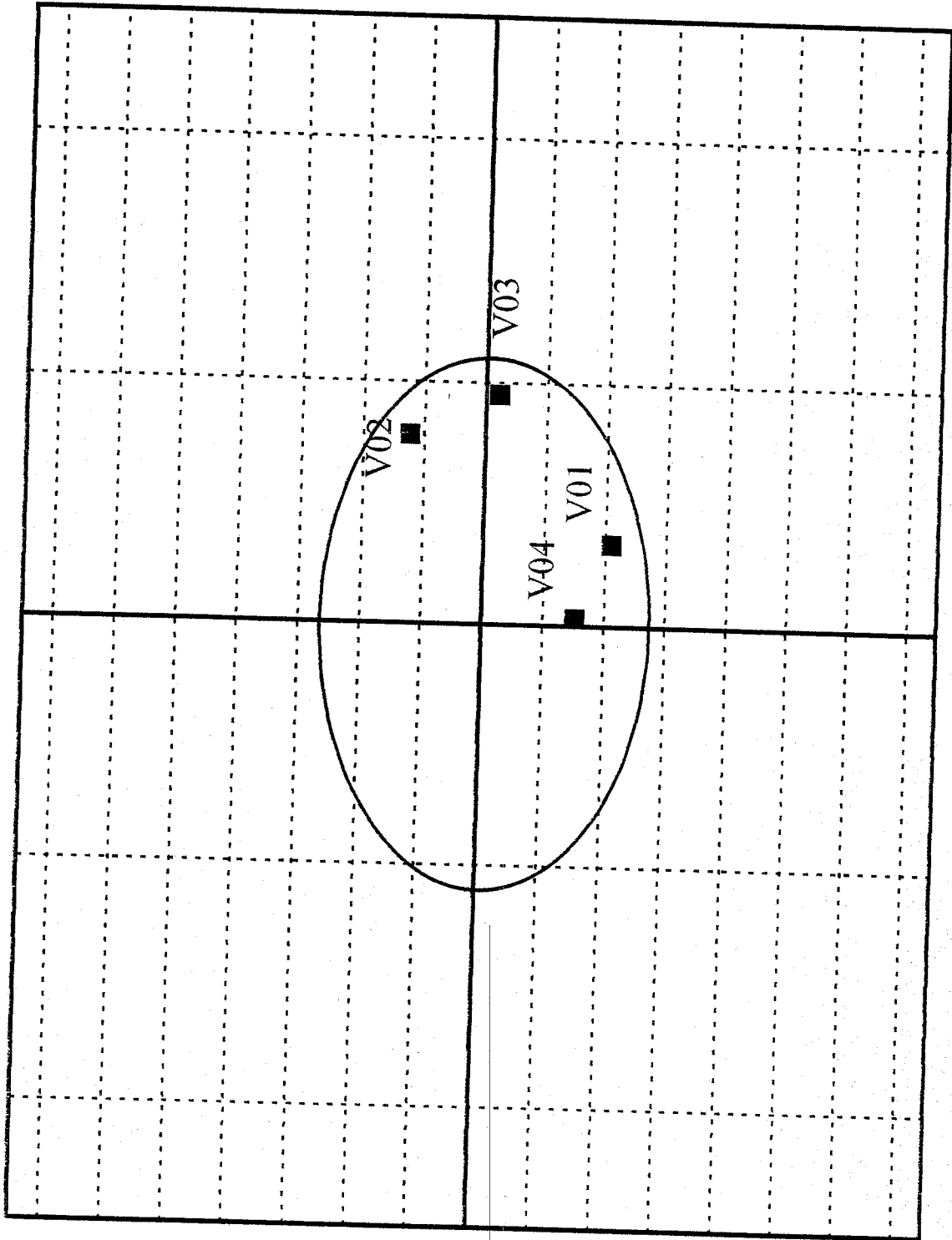


Figure n°12: Représentation des performances sur le plan principal.

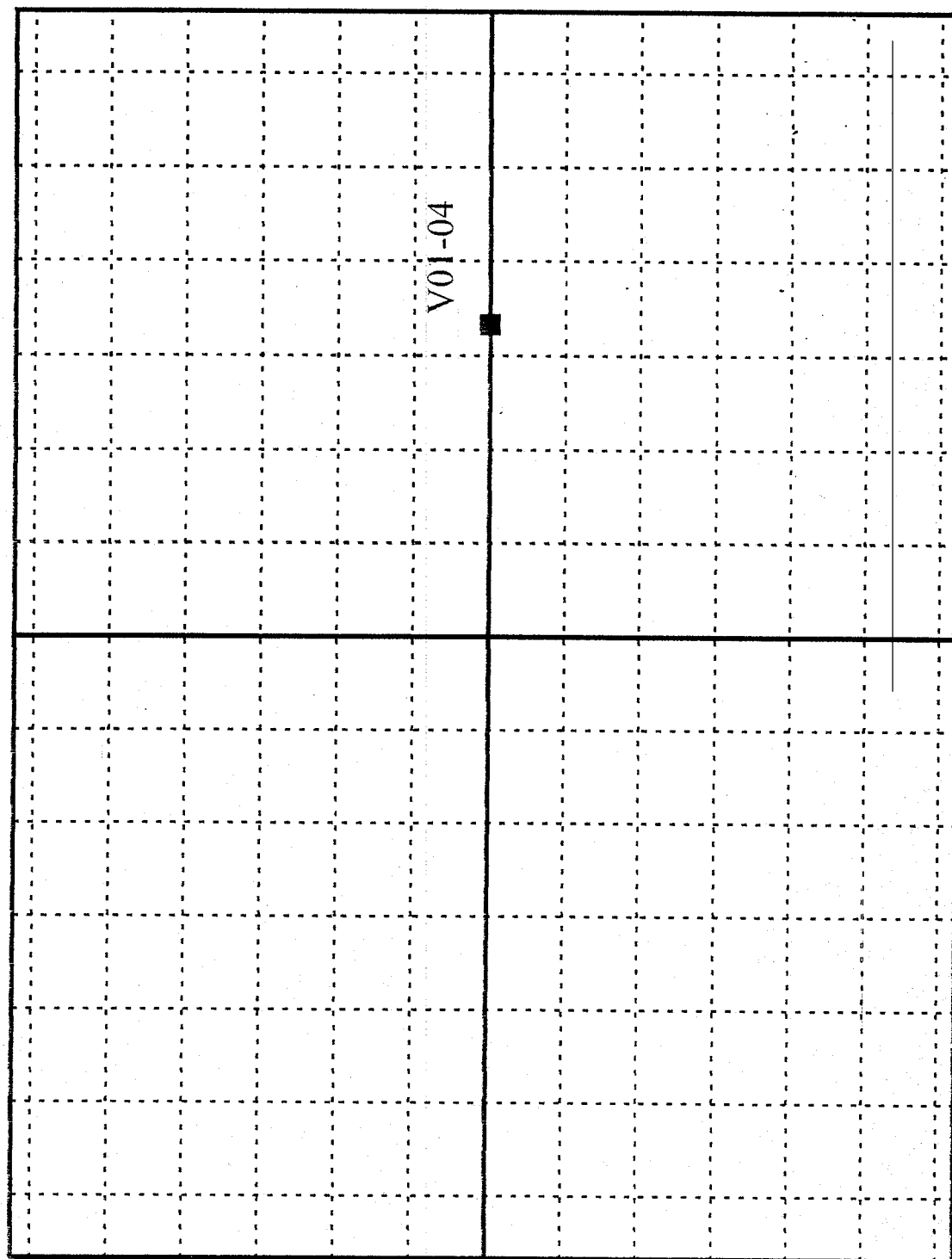


Figure n° 13: Variation du carré de la concentration intrinsèque en fonction de la température.
Représentation des individus sur le plan principal.

Variation de la concentration intrinsèque avec la température

Analyse statistique pour une variable :

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>	<i>Vecteur 4</i>
Nombre d'éléments	8	8	8	8
Moyenne généralisée	7,2000026250	2,1460690809	8,0610173066	2,4616587280
Moyenne arithmétique	7.2000026250	7,5875277503	2,8500485024	5.1759362954
Moyenne géométrique	11462195042	10175658414	9.7857828813	1.2625194599
Moyenne harmonique	4.64000	4215999,0838	13119959937	28398758306
Moyenne quadratique	2,0364675298	2,1460690809	8,0610173066	1,4637110610
Moment d'ordre 1	0,000	0,000	0,000	0,000
Moment d'ordre 2	3,6287996219	4,0299067264	5,6857223552	1,874549047
Moment d'ordre 3	1,5676413550	1,8346140786	9,7225615857	5,8203174194
Moment d'ordre 4	8,0890289707	9,9760910514	1,9858283763	2,1585544744
Coefficient d'aplatissement	6,14286	6,14286	6,14286	6,14286
Coefficient d'asymétrie	2,26779	2,26779	2,26779	2,26779
Médiane	$1131 \cdot 10^7$	$8985 \cdot 10^7$	$1,78 \cdot 10^{20}$	$8,025 \cdot 10^{23}$
Etendue	$5,76 \cdot 10^{26}$	$6,07 \cdot 10^{28}$	$2,28 \cdot 10^{30}$	$4,14 \cdot 10^{32}$

Variation de la concentration intrinsèque en fonction de la température

Analyse statistique à deux variables :

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>	<i>Vecteur 4</i>
Moyenne	7.2000026250	7,587527759	2,8500485024	5.1759362954
Ecart de la moyenne type (n-1)	7,1999996249	7,5874960357	2,8499930714	5.1748663264
Ecart de la moyenne type (n)	6.7349829454	7,0974526472	2,6659244070	4,8406442040
Ecart moyen	1.1599999343	1,3278118062	4,9874878743	9,0560159261
Ecart type (n - 1)	2,0364674237	2,1460679596	8,0609977087	1,9636732284
Ecart type (n)	1,9049408447	2,0074627584	7,5403729054	1,3691409367
Covariance (n - 1)	4,3703974889	4,3703974889	1,1798666385	1,1798666385
Covariance (n)	3,8240978028	3,8240978028	1,0328833087	1,0328833087
Coefficient de corrélation	1,000	1,000	1,000	1,000

Analyse statistique à une variable

Variation de la mobilité des électrons avec la température

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>
Nombre d'éléments	5	5	5
Nombre d'éléments	3024	3233,462540	1773,862971
Moyenne généralisée	3024	2476	1048
Moyenne arithmétique	2069,189340	1692,937576	750,489435
Moyenne géométrique	1428,788824	1217,872727	600,872234
Moyenne harmonique	3876,967887	3233,462540	1440,610981
Moyenne quadratique	0,000	0,000	0,000
Moment d'ordre 1	5886304	4324704	977056
Moment d'ordre 2	8632917888	6557814912	1358732544
Moment d'ordre 3	61571521956	35641672714	29853642449
Moment d'ordre 4	1,777029	1,905659	3,127220
Coefficient d'aplatissement	0,604496	0,729163	1,406873
Coefficient d'asymétrie	1900	1200	620
Etendue	6380	5420	2680

Analyse statistique à deux variables

Variation de la mobilité des électrons avec la température

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>
Moyenne	3024	2476	1048
Ecart de la moyenne type (n-1)	1213,085323	1039,796134	494,230715
Ecart de la moyenne type (n)	1085,016498	930,021935	442,053390
Ecart moyen	2220,80	1899,20	780,80
Ecart type (n - 1)	2712,541244	2325,054838	1105,133476
Ecart type (n)	2426,170645	2079,592268	988,461431
Covariance (n - 1)	6280620	6280620	1221320
Covariance (n)	5024496	5024496	977056
Coefficient de corrélation	0,995848	0,995848	1,000

Analyse statistique à une variable

La mobilité des électrons en fonction de la concentration d'impuretés

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>
Nombre d'éléments	5	5	5
Moyenne généralisée	3024	3233,462540	1925,056262
Moyenne arithmétique	3024	2476	1324
Moyenne géométrique	2069,189340	1692,937576	948,576244
Moyenne harmonique	1428,788824	1217,872727	693,641618
Moyenne quadratique	3876,967887	3233,462540	1672,865805
Moment d'ordre 1	0,000	0,000	0,000
Moment d'ordre 2	5886304	4324704	1045504
Moment d'ordre 3	8632917888	6557814912	660271488
Moment d'ordre 4	61571521956	35641672714	19303339755
Coefficient d'aplatissement	1,777029	1,905659	1,765961
Coefficient d'asymétrie	0,604496	0,729163	0,617638
Médiane	1900	1200	800
Etendue	6380	5420	2680

Analyse statistique à deux variable

La mobilité des électrons en fonction de la concentration d'impuretés

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>
Moyenne	3024	2476	1324
Ecart de la moyenne type (n-1)	1213,085323	1039,796134	511,249450
Ecart de la moyenne type (n)	1085,016498	930,021935	457,275409
Ecart moyen	2220,80	1899,20	940,80
Ecart type (n - 1)	2712,541244	2325,054838	1143,188523
Ecart type (n)	2426,170645	2079,592268	1022,498900
Covariance (n - 1)	6280620	6280620	1306880
Covariance (n)	5024496	5024496	1045504
Coefficient de corrélation	0,995848	0,995848	1,00

Analyse statistique à une variable

Variation de la mobilité des trous avec la concentration d'impuretés

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>
Nombre d'éléments	4	4	4
Moyenne généralisée	750	708,942875	245,199061
Moyenne arithmétique	750	540	195
Moyenne géométrique	462,105578	351,750957	162,144019
Moyenne harmonique	272,238806	215,422718	130,316742
Moyenne quadratique	1017,349497	708,942875	222,934968
Moment d'ordre 1	0,000	0,000	0,000
Moment d'ordre 2	472500	211000	11675
Moment d'ordre 3	$3 \cdot 10^8$	$8262 \cdot 10^4$	497250
Moment d'ordre 4	48575625000	95194960000	268713125
Coefficient d'aplatissement	2,175779	2,138204	1,971402
Coefficient d'asymétrie	0,923674	0,852435	0,394175
Médiane	500	390	180
Etendue	1800	1220	300

Analyse statistique à deux variable

Variation de la mobilité des trous avec la concentration d'impuretés

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>
Moyenne	750	540	195
Ecart de la moyenne type (n-1)	396,862697	265,204324	62,383224
Ecart de la moyenne type (n)	343,693177	229,673682	54,025457
Ecart moyen	575	380	85
Ecart type (n - 1)	793,725393	530,408647	124,766448
Ecart type (n)	687,386354	459,347363	108,050914
Covariance (n - 1)	420666,66666	420666,66666	15566,666667
Covariance (n)	315500	315500	11675
Coefficient de corrélation	0,999211	0,999211	1,000

Analyse statistique à deux variables

Résultats des paramètres des matériaux

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>	<i>Vecteur 4</i>
Moyenne	1,4175000	0,281500	0,4637500	6,47425 10 ¹⁸
Ecart de la moyenne (n-1)	0,16107618	0,12704664	0,0557077	3,3095842248
Ecart de la moyenne (n)	0,15067297	0,11884125	0,05210978	3,0958325654
Ecart moyen	0,3025000	0,2668750	0,1171875	6,387875 10 ¹⁸
Ecart type (n - 1)	0,45559224	0,35934216	0,15756518	9,3609177930
Ecart type (n)	0,42616751	0,33613381	0,14738873	8,7563368018
Covariance (n - 1)	-0,08543929	-0,08543929	16673035714	16673035714
Covariance (n)	-0,07475938	-0,07475938	14588906250	14588906250
ρ	-0,52188297	-0,52188297	0,1130410	0,1130410

<i>Vecteur 5</i>	<i>Vecteur 6</i>	<i>Vecteur 7</i>	<i>Vecteur 8</i>	<i>Vecteur 9</i>
8,2025 10 ¹⁸	30018165472	2483,75	521,25	88,8425
1.5621068076	29997410292	1019,1451906	214,4464427	29,52648313
1.4612171189	28060007951	953,32303271	200,5962791	27,61949593
3.168125 10 ¹⁸	52495458631	2249,6875	396,5625	67,5675
4.4183052665	84845488943	2882,5779013	606,54613533	83,51350579
4.1329461344	79365687609	2696,4047243	567,37195692	78,11973146
-1.337545519	-1,337545519	606251,78571	606251,78571	99,86227857
-1,170352329	-1,170352329	530470,31250	530470,31250	87,37949375
-0.35679938	-0,35679938	0,34674335	0,34674335	0,07618804

<i>Vecteur 10</i>	<i>Vecteur 11</i>	<i>Vecteur 12</i>	<i>Vecteur 13</i>	<i>Vecteur 14</i>	<i>Vecteur 15</i>
13,4825	0,27	0,0000163	0,0000163	0,08292693	0,05390473
5.54897762	0,01963961	0,0000110	0,0000110	0,05394916	0,0351666
5.19059328	0,01837117	0,00001029	0,00001029	0,05046481	0,03289535
10.2606250	0,040	0,00002435	0,00002435	0,12353654	0,08054763
15.69487883	0,05554921	0,00003111	0,00003111	0,15299126	0,09946618
14.68121483	0,05196152	0,0000291	0,0000291	0,14273605	0,09304209
99.86227857	0,00000098	0,00000098	0,00000463	0,00000463	0,01514853
87.37949375	0,00000086	0,00000086	0,00000405	0,00000405	0,01325497
0,07618804	0,56954765	0,56954765	0,97464631	0,97464631	0,9980847

Analyse statistique à deux variables.

Résultats des paramètres et des performances des matériaux.

<i>Vecteurs</i>	<i>Vecteur 1</i>	<i>Vecteur 2</i>	<i>Vecteur 3</i>	<i>Vecteur 4</i>
Moyenne	1.41228571	0.3060000	0.47428571	6.9595714285
Ecart de la moyenne (n-1)	0.18607343	0.14387759	0.06316483	3.7996442431
Ecart de la moyenne (n)	0.17227052	0.13320477	0.05847927	3.5177870122
Ecart moyen	0.34089796	0.29085714	0.12489796	7.0231020408
Ecart type (n - 1)	0.49230401	0.38066433	0.16711844	1.0052913737
Ecart type (n)	0.4557895	0.35242669	0.15472161	9.3071895997
Covariance (n - 1)	-0.09914267	-0.09914267	64195476190	64195476190
Covariance (n)	-0.08497943	-0.08497943	55024693877	55024693877
ρ	-0.52903577	-0.52903577	0.03821097	0.03821097

<i>Vecteur 5</i>	<i>Vecteur 6</i>	<i>Vecteur 7</i>	<i>Vecteur 8</i>	<i>Vecteur 9</i>
$8.5 \cdot 10^{18}$	34306474752	2810	535.71428571	72.22785714
1.7707517908	34282260286	111418798782	247.05751348	29.04048336
1.6393975996	31739205639	1032.1782000	228.73081178	26.8862632
3.3657142857	58769578642	2291.4285714	440.81632653	59.70183673
4.6849688721	90702335099	2949.6948994	653.65274019	76.83389692
4.3374383486	83974044931	2730.8868261	605.16484514	71.13436611
-1.679541826	-1.679541826	663250	663250	450.56735952
-1.439607280	-1.439607280	568500	568500	386.20059388
-0.3952443	-0.3952443	0.34399575	0.34399575	0.34671099

<i>Vecteur 10</i>	<i>Vecteur 11</i>	<i>Vecteur 12</i>	<i>Vecteur 13</i>	<i>Vecteur 14</i>
13,85714286	0,27042857	0,00001861	0,00001861	0,09477363
6,39278712	0,02249853	0,00001242	0,00001242	0,06077463
5,91857081	0,02082959	0,00001149	0,00001149	0,05626638
11,40530612	0,04522449	0,00002651	0,00002651	0,13441507
16,91372491	0,0595255	0,00003285	0,00003285	0,16079456
15,659006649	0,05510991	0,00003041	0,00003041	0,14886684
450,56735952	0,00000114	0,00000114	0,00000514	0,00000514
386,20059388	0,00000098	0,00000098	0,00000441	0,00000441
0,34671099	0,58246132	0,58246132	0,97346145	0,97346145

<i>Vecteur 15</i>	<i>Vecteur 16</i>	<i>Vecteur 17</i>	<i>Vecteur 18</i>	<i>Vecteur 19</i>
0,06155834	0,20904286	0,58428571	0,67714286	0,18798571
0,03963353	0,0553117	0,1607254	0,05918954	0,001936812
0,03669352	0,05120869	0,1488028	0,05479886	0,01793139
0,08768095	0,1142245	0,33346939	0,12040816	0,04026939
0,10486046	0,14634102	0,42523943	0,1566008	0,05124322
0,09708192	0,13548545	0,39369521	0,14498417	0,04744201
0,0062933	0,0062933	0,03999762	0,03999762	0,00153029
0,00539426	0,00539426	0,03428367	0,03428367	0,00131168
0,41011023	0,41011023	0,60062948	0,60062948	0,20406681

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

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.

Pour introduire ce travail, nous avons mis en relief, dans le premier chapitre, l'étude des propriétés des semiconducteurs : la concentration intrinsèque, la mobilité, la durée de vie, l'absorption et la réflexion et leurs variations suivant la température et la concentration d'impuretés. Les données représentant ces derniers ont été présentées sur des tableaux et cela dans le but d'ajuster une classification optimale des matériaux photovoltaïques.

L'étude de ces paramètres est très importante et a une influence très significative sur le rendement des cellules solaires et leur fabrication ; pour cela nous avons trouvé nécessaire d'exposer ces caractéristiques et d'examiner le degré d'importance que porte chaque paramètre sur le matériau étudié.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions les performances des cellules solaires, où nous définissons ces dernières de façon très explicite, et avant de faire une analyse statistique sur ces données, nous avons trouvé utile d'effectuer quelques calculs pour mettre au point la situation de chaque matériau vis - à - vis de la performance étudiée.

Par la suite, dans le troisième chapitre, nous présentons quelques rappels sur l'analyse statistique et la méthode utilisée :

Analyse par composantes principales (A.C.P.). Cette dernière est très importante en statistiques et nous permet de mieux comprendre l'intérêt que porte l'analyse statistique sur la population étudiée.

Cette méthode nous permet de mieux visualiser les tableaux de données et de les présenter sur des graphiques.

En effet, deux individus qui ont le même « profil » au travers des variables d'observations, se retrouvent au même point sur le graphique.

L'ensemble de tous ces points représentant ces individus ou caractères forme « un nuage de points ».

Ce nuage de points possède une certaine forme. Le calcul définit quels sont ces axes de « plus grands allongement » sur lesquels s'effectuera la projection, ce qui donnera de ce nuage de points, la représentation plane la plus fidèle. C'est cette projection que nous avons analysé.

Nous remarquons que les résultats obtenus par cette méthode d'analyse sont essentiellement qualitatifs. Nous obtenons une visualisation globale d'un tableau de nombres.

C'est une méthode utilisée dans plusieurs domaines des statistiques comme le domaine médical, économique, ...

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.

Actuellement le matériau le plus utilisé est le silicium pour sa grande disponibilité (silice dans le sable du désert du Sahara Algérien). Aussi l'influence des données météorologiques (position du soleil, ...) ont un rôle très critique dans la mise au point de la fabrication des cellules solaires.

Comme perspectives future à ce travail, nous pouvons espérer aborder ces paramètres, dans le cadre de la classification hiérarchisée, et à partir d'autres méthodes d'optimisation telles que la méthode de Pénalités ou celle du Lagrangien Augmenté.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] J.C. Muller « Procédés propres et rapides de fabrication des photopiles ». CNRS. 17/10/97
- [2] W.KERN and E. TRACY, R.C.A Review 41 (1980) 133
- [3] RICHARD C. NEVILLE Solar energy Conversion : The solar cell.
- [4] A.S Grove, physics and technology of semiconductor Devices, WILEY, 1967, p. 102
- [5] Jacob Millman – Arvin Grabel – « Dispositifs à semiconducteurs » (1989)
- [6] A. Laugier, J.A. Roger. « les photopiles solaires ». Edition technique documentation. Paris (1981)
- [7] Harold J. Hovel. « semiconductors and Semimetals – volume 11 » - academic press New York. Solar Cells. 1975
- [9] A. Benmansour. « contribution à l'étude de la conversion photovoltaïque résultats théoriques et expérimentaux ». Thèse de Magister. Tlemcen (1991)
- [10] Document de cours. D.E.A Energétique. Université de Caen. France 1985
- [11] G. Haacke, « Exploratory Development of Transparent conductor Material, NTIS Report AD – A008 783/3ST.
- [12] Hiroto Kasai, Hideki Matsumura – Solar Energy Materials and Solar Cells 48 (1997). « Study for improvement of solar cell efficiency by impurity photovoltaic effect ».
- [13] M. Wolf, proc. IRE 48 (1960) 1246.
- [14] G. Gütter, HJ. Queisser, Energy Conversion 10 (1970) 51.
- [15] J. Li, M. Chong, J. Zhu and al., Appl. Phys. Lett. 60 (1992) 2240.

- [16] C. Summonte, M. Biavati, E. Gabilli, R. Galloni, S. Guerri, R. Rizzoli, Appl. Phys. Lett. 63 (1993) 785.
- [17] M.J. Keevers, M.A. Green, J. Appl. Phys. 34 (1995) 4022.
- [18] H. Mastumura, H. Kasai, Jpn.J. Appl. Phys. 34 (1995) 2252
- [19] H. Ohtsuka, Y. Nagata, M. Sakamoto – Solar Energy Materials and Solar Cells 48 (1997) 137 – 143 « Optimization of thermal processing and device design for high efficiency C – Si Solar cells ».
- [20] J. Zhao, A. Wang, P. Alternatt, M.A. Grenne, Appl. Phys. Lett. 66 (1995) 3636.
- [21] H. Ohtsuka, S.; Muramatsu et al., conf. Record of the 25th IEEE PVSC, Washington DC, 1996.
- [22] T.S. Horanyi, T. Pavelka, P. Tüttö, Appl. Surf. Sci. 63 (1993) 306.
- [23] T. Veda, M. Mohri. Solar Energy Materials and Solar Cells 50 (1998) « Improvement of conversion efficiency by $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ Window layers for p^+InP Solar Cells ».
- [24] W. Ruppel, P. Wurfel, IEEE Electron devices ED – 27 (1980) 144.
- [25] R.K. Jain, D.J.F. Lood, IEEE Electron devices ED – 40 (1993) 224.
- [26] C.J. Keavney, V.E. Haven, proc. 21st IEEE photovoltaic specialists conf. 1990 p. 141.
- [27] H. Kroener, G. Griffiths, IEEE Electron device lett. ED – 4 (1983) 20.
- [28] C. Ferekides, J. Britt – Solar Energy Materials and solar cells 35 (1994) « CdTe Solar cells with efficiencies over 15% ».
- [29] J. Scharp et al. « Development and evaluation of CdS/ CdTe thin film photovoltaic cells », 10th european photovoltaic solar Energy conf, Lisbon, 1991, PP. 567 – 569.

- [30] R.K Ahrenkiel et al, « Minority – carrier lifetim of polycristalline CdTe in CdS/ CdTe solar cells », proc. 22nd IEEE photovoltaic specialists conf. PP 940 – 945.
- [31] T.L Chu et al, « 14,6% efficient their film cadmium tellaride solar cells », IEEE Electr. Dev. Lett. 13 (1992) 303 – 304.
- [32] T.C. Anthony et al, « Growth of CdTe films by close spaced vapor transport », J. Vac. Sci. Technol. A2 (3) (1984) 1296 – 1302.
- [33] El Hindiss. Revue périodique publiée par l'union des ingénieurs Algériens N°9/10.
- [34] I.C. Lerman « Classification et analyse ordinale des données ». Edition Dunod. (1981).
- [35] G. Lecalve. « Problèmes d'analyse des données », 2^{ème} partie d'une thèse d'état, université de Rennes I, novembre 1976.
- [36] W.F. de la Vega. « Techniques de classification automatique utilisant un indice de ressemblance ».
- [37] Benzecri J.P. « l'analyse des données », Tome I (IB n°1) et Tome II, Dunod, Paris.
- [38] Lerman I.C. « Les bases de la classification automatique Gauthier – Villars, Paris.
- [39] « Statistiques et probabilités » Tome II, A.I.D.E.P, Dunod.
- [40] B. Cordier. « analyse factorielle des correspondances », thèse 3^{ème} cycle, Rennes 1965.
- [41] Mme Nora. « Analyse factorielle d'un nuage de points ». Publication interne, université de paris VI.
- [42] I.C. Lerman. « Les présentations factorielles de la classification » Gauthier – Villars, paris, (1970).