

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

THESE DE DOCTORAT

Présentée à
L'UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID DE TLEMCCEN
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN SCIENCES PHYSIQUES
Spécialité Physique

Par

Ali CHEKNANE

**MINIMISATION DE L'EFFET DE LA RESISTANCE SERIE
DANS UNE PHOTOPILE SOLAIRE
A BASE DE SILICIUM SOUS CONCENTRATION SOLAIRE**

Soutenu leà l'Université de Tlemcen devant le jury composé de :

- Président** : Mr. Nasreddine CHABANE-SARI, Professeur, Université de Tlemcen
- Directeur de Thèse** : Mr. Boumediène BENYOUCEF, Professeur, Université de Tlemcen
- Examineurs** : Mr. Jean Pierre CHARLES, Professeur, Université de Metz, France
: Mr. Maiouf BELHAMEL, Directeur de Recherche, CDER Alger
: Mr. Francis DUJARDIN, Professeur, Université de Metz, France
: Mme. Abla CHAKER, Maître de conférences, Université de Constantine



Inscrit Sous le N°: 1744
Date le: 08/11/05
Code:

Inscrit Sous le N°:

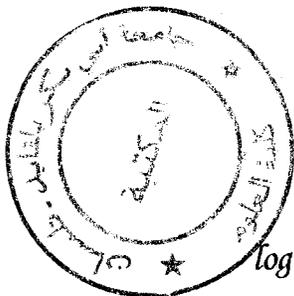
Date le: 27.FEV.2011

Code: 4503

Inscrit Sous le N°:

Date le:

Code:



« Ainsi, au lieu de ce grand nombre de préceptes dont la logique est composée, je crus que j'aurais assez des quatre suivants, pourvu que je prise une ferme et constante résolution de ne manquer pas une seule fois à les observer. [...] Le second, de diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre. Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres. Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre. »

Réné Descartes

Discours de la méthode, 1637.



REMERCIEMENTS

.....

Le présent travail a été réalisé à l'Université Abou Bakr Belkaid de TLEMCEM à l'Unité de Recherche des Matériaux et Energies Renouvelables (URMER), sous la direction du Professeur **Boumediène BENOUCHEF**, Directeur de l'URMER. Il me témoigne une très grande confiance, durant ce travail. Il a su me soutenir et me diriger avec rigueur et enthousiasme au long de ma thèse. Cette thèse n'aurait certainement pas vu le jour sans son inspiration et esprit stimulant.

Nasreddine CHABANE-SARI, Professeur à l'Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, en acceptant d'être le président de mon jury de thèse, m'a fait un très grand honneur. Nos quelques discussions m'ont permis d'apprécier sa vaste culture et grande ouverture d'esprit. Qu'il en soit vivement remercié.

Je sais gré à Monsieur **Maiouf BELHAMEL**, directeur de recherche CDER Alger, d'avoir accepté de juger ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'intérêt dont il a fait preuve à l'égard de ce travail et pour ses conseils d'améliorations du manuscrit.

Je suis très honoré de la présence parmi les membres du jury de Monsieur **Jean Pierre CHARLES**, Professeur émérite à l'Université de Metz (France), l'aboutissement de cette thèse doit beaucoup à ses conseils comme à ses critiques.

Mes vives reconnaissances et remerciements vont au Docteur **Abla CHAKER**, maître de conférences à l'Université de Constantine, d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse.

Monsieur **Francis DUJARDIN**, Professeur à l'Université de Metz, s'est intéressé à ce travail et m'a fait l'honneur de participer à la commission d'examen, je lui exprime toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier Monsieur **Adrea ANTONINI**, Professeur à l'université de Ferrare (Italie), de m'accueillir dans son Laboratoire pour y réaliser quelques mesures.

L'expérience de la thèse n'est pas banale, et c'est bien souvent dans le soutien des proches, parents, épouse et amis, que l'on trouve réconfort, motivation, écoute..... Ma profonde reconnaissance à ma femme, pour sa patience sans borne. Je la remercie d'avoir supporté mon humeur des mauvais jours, les soirées et les week-ends de solitude, mes moments d'égarement intellectuel momentanés pendant nos conversations.

Enfin, à tous les membres de l'Unité de Recherche URMER (Tlemcen), qui ont su faire de ce lieu un endroit agréable et stimulant pour la recherche, je témoigne mon amitié.

RESUME

Le présent travail a été consacré à l'étude et la conception d'un masque pour une grille collectrice appliquée aux photopiles sous haute concentration solaire ainsi que la résistance série qui est influencée principalement par la résistance de la couche avant pour les deux modèles étudiés (grille linéaire et grille circulaire). La réduction de la résistance série se fera au détriment du coefficient de transparence de la grille. Il s'agit donc de faire un compromis entre la valeur de résistance série et celle de taux de transparence de la photopile. Le taux d'ombre constitue une forme de perte pour les deux modèles. Sa minimisation ne doit pas être réalisée au détriment du coefficient de transparence. Donc, nous sommes amenés, dans notre étude, à choisir un compromis, en introduisant ainsi un autre facteur de perte dit 'taux de conduction' qui représente les pertes par effet Joule. A partir du point d'intersection des deux courbes (taux de conduction et le taux d'ombre) nous déduisons les dimensions géométriques de la grille de collecte optimisées. D'où l'amélioration du rendement de conversion énergétique.

Mots clés : grille, résistance série, concentration solaire, cellule solaire

ABSTRACT

The series resistance of a solar cell has long been recognized as a parasitic factor consuming power and seriously affecting the maximum conversion efficiency of a solar cell.

For a concentrator cell, series resistance R_s is most detrimental; it is made up of several components: (i) the bulk resistivity of the silicon wafers; (ii) the resistance of the metal grid lines; (iii) the resistance of the contact strips; (iv) the resistance of the contact strips; (v) the contact resistance at the metal-silicon interface.

The main objectif of this thesis is to optimize the collecting grid dimensions of the based-silicon solar cells under solar concentration in order to minimize the serie resistance of based-silicon solar cells. Our contribution goes on two grid shapes, the first is linear and the second one is circular. In the latter, we propose a mathematical model used for minimization of the power losses, consequently the efficiency improvement.

The shadow fraction constitutes a form of loss for the two models. Its minimization should not be carried out with the detriment of the transparency coefficient. Therefore, we are brought, in our study, to choose a compromise, by thus introducing the conduction fraction which represents the losses by Joule effect. So, the optimized dimension is deduced from the both calculated optimum fraction losses.

ملخص

لقد كانت الطاقة موضع اهتمام البشرية منذ القديم، وازداد اهتمام الإنسان بها خاصة في عصرنا هذا، حتى أصبحت شريان الحياة الاقتصادية كلها. فالشمس مصدر طاقتي مهم متجدد و غير ملوث ، يمكن تحويل طاقة الشمس إلى طاقة كهربائية مباشرة داخل خلايا شمسية التي تستخدم في محطات الوصل التلفزيونية في المناطق النائية والحاسبات كما تستخدم في السواتل الفضائية وفي الطاقة الملاحية في عرض المحيطات.

انصب اهتمام الباحثين في هذا المجال على تحسين مردود الطاقة الشمسية حيث اعتمدوا في أعمالهم على جانبين :

-تطوير صناعة الخلية الشمسية والتقنيات المنوطة بذلك،

-الحد من الطاقة الضائعة سواء كانت ضوئية بفعل الانعكاس أو الامتصاص، أم كهربائية بفعل المقاومة التسلسلية (م س) على سبيل المثال.

لقد سعينا في عملنا هذا إلى تحسين مردود التحويل الطاقوي للخلية الشمسية وذلك باختيار شبكة تجميع⁽¹⁾ ذات أبعاد هندسية معدلة تقلل من فعل الظل الناتج عن الشبكة من جهة ، وأثر المقاومة التسلسلية⁽²⁾ من جهة أخرى.

لقد اعتمدنا في بحثنا هذا الطريقة الرياضية للتكاملات التي تهدف من ورائها إلى التخفيض من الاستطاعة الضائعة في مختلف أجزاء الخلية وبالتالي حساب الأبعاد المناسبة للشبكة المختارة ، فوقع اختيارنا على الشبكة ذات الشكل الخطي والشبكة المستديرة .

في هذا الصدد قمنا بالتقليل من فعل الظل والمقاومة التسلسلية في حالة الأشعة المركزة.

فمثلا في حالة تركيز شمسي مساو 100 نحصل على النتائج التالية:

* الخلايا الشمسية ذات الشبكة الخطية :

-نسبة الظل = 3.03 % ، (م س) = 1.73 Ω.سم²

-المردود الطاقوي = 16.73 %

* الخلايا الشمسية ذات الشبكة المستديرة :

-نسبة الظل = 5.45 % (م س) = 2.27 Ω.سم²

-مردود التحويل الطاقوي = 16.293 %

(1)Grille collectrice, (2) Résistance série

SOMMAIRE

INTRODUCTION	01
CHAPITRE I : CONSIDERATIONS PHYSIQUES DES PHOTOPILES SOLAIRES	04
1. Mécanisme de la photoconductivité	05
2. Modèles et circuits équivalents	06
2.1 Photopile parfaite	06
2.2 Equation de la diode idéale : courant de diffusion	09
2.3 Courants de génération-recombinaison	09
2.4 Modèle combiné : superposition des effets	10
2.5 Photopile réelle	11
2.6 Les modèles "utilisateurs"	13
CHAPITRE II : CONCENTRATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR L'OPTIQUE GEOMETRIQUE	18
Introduction	19
I. Aspect général du problème de la concentration : les concentrateurs	21
I.1 Miroirs paraboliques, calcul simplifié de l'éclairement moyen dans l'image de Gauss	22
I.2 Cas des miroirs cylindro-paraboliques	24
I.3 Concentration par réflexion	25
I.3.1 Concentration d'une lentille simple	25
I.3.2 Lentilles de Fresnel	26



II.1.5 Perte due à l'effet d'ombre	61
II.1.6 Calcul de la résistance série	61
II.1.7 Optimisation des dimensions géométriques de la grille	68
II.2 Grille circulaire	68
II 2.1 Perte de puissance due à la résistance de la couche avant	69
II 2.2-Pertes dans la métallisation de la grille	71
(a) Doigts	71
(b) Collecteurs	71
II 2.3 Perte de puissance due au contact métal/semiconducteur	72
II.2.4 Perte de puissance due à l'effet d'ombre	73
II.2.5 Calcul de la résistance série	75
II.2.6 Optimisation des dimensions géométriques	77
Conclusion	79
CHAPITRE IV : METHODES NUMERIQUES APPLIQUEES A LA DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES SOUS CONCENTRATION SOLAIRE	83
Introduction	84
I.Calcul de la résistance série en utilisant le Simulink	85
I.1 Modèle à une seule diode	85
I.1.1 Principe du calcul des paramètres	85
I.1.2 Organigramme	92
I.2. Modèle à deux diodes	92
I.2.1 Calcul des paramètres électriques	93
II. Applications	95
Conclusion	102



CHAPITRE V : REALISATION DE CONTACTS METALLIQUES ET TECHNIQUES DE MESURE	105
Introduction	106
I. Techniques de réalisation des contacts ohmiques	106
I.1 Méthode de dépôt par évaporation sous vide	106
I.2 Dépôt chimique de nickel sur le silicium (Electroless Nickel deposition)	108
I.3 Dépôt sérigraphique	111
I.3.1 Principe de la technique	111
I.3.2 Pâte de sérigraphie	113
I.3.3 Qualités de la sérigraphie	114
II. Techniques de mesure de la résistance du contact métal/semiconducteur	115
II.1 Définition	115
II.2 Type et nature des contacts en technologie « planar »	116
II.2.1 Type de contact	116
II.2.2 Nature de contacts	116
II.3 Caractéristiques d'un bon contact ohmique	117
II.4 Méthodes de mesure des paramètres de contacts	119
II.4.1 Méthodes transverses	119
II.4.2 Méthodes « planars »	119
II.4.3 Rappel de quelques techniques « planars » pour la modélisation d'un contact ohmique	120
II.4.4 Méthode TLM (Transmission Line Model en anglais)	123



**III. Mesure de résistivité et de résistance carrée par la méthode
de 4 pointes**

131

III.1 Echantillon semi-infini. Pointes en lignes

133

III.2 Tranches (ou couches isolé du substrat) d'épaisseur $W \ll S$.

Pointes en ligne

135

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

ANNEXE

NOMENCLATURE

A	Longueur du collecteur (m)
B	Longueur du barreau (m)
e	Epaisseur du barreau
FF	Facteur de forme
I	Courant électrique (A)
I_{CC}	Courant de court-circuit (A)
$I_{CC}(1)$	Courant de court-circuit sous un soleil.
I_{PH}	Photocourant (A)
I_S	Courant de saturation (A)
J_m	Densité du courant à la puissance maximale ($A.m^{-2}$)
k	Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J/^{\circ}K$)
L	Distance entre barreaux (m)
L_D	Longueur de diffusion (m)
L_{OP}	Distance optimale entre deux barreaux consécutifs.
n	Ordre du nième collecteur.
n_f	Facteur d'idéalité
P_b	Puissance perdue dans un doigt (W)
P_C	Puissance perdue due à la résistance de couche (W)
P_{dis}	Puissance perdue due au contact métal/semi-conducteur (W)
P_f	Puissance fournie (W)
P_I	Puissance incidente ($W.m^{-2}$)
P_{lc}	Puissance perdue dans la ligne collectrice (W)

q	Charge d'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C)
r_{top}	Rayon optimal d'ordre 1 (m)
R_C	Résistance du contact (Ω)
r_k	Rayon d'ordre k (m)
R_S	Résistance série (Ω)
R_S	Résistance série (Ω)
R_{SH}	Résistance shunt (Ω)
R_{SH}	Résistance shunt (Ω)
S	Surface du contact (m^2)
$S_{1/2 \text{ motif}}$	Surface d'un demi motif (m^2)
S_{col}	Surface du collecteur (m^2)
S_m	Surface métallisée (métal de la grille) (m^2)
S_{ncol}	Surface correspondant au $n^{ième}$ collecteur (m^2)
S_t	Surface frontale totale de la cellule solaire (m^2)
V	Tension (V)
V_{CO}	Tension en circuit ouvert (V)
$V_{CO(1)}$	Tension en circuit ouvert (V) sous un soleil
V_m	Tension à la puissance maximale (V)
W	Largeur du doigt de grille circulaire (m)
x	Abscisse(m)
x_j	Profondeur de la jonction (m)
y	Ordonnée (m)
ΔV	Variation du potentiel (V)

SYMBOLES

η	Rendement énergétique de conversion
α	Angle formé entre l'axe ox et un axe arbitraire
τ_c	Facteur de perte due à la résistance de la couche avant.
τ_c	Facteur de perte de puissance de la couche avant
τ_m	Taux de perte due à la métallisation de la grille.
τ_{ms}	Taux de perte due au contact métal/semiconducteur
τ_o	Taux d'ombre
τ_{oop}	Taux d'ombre optimal
τ_R	Taux de perte de puissance par conduction (pertes par effet Joule).
τ_{Rop}	Taux optimal de perte de puissance par conduction
ρ_C	Résistance spécifique du contact ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
ρ_M	Résistivité du métal ($\Omega \cdot \text{cm}$)
ρ_s	Résistance de couche ($\Omega/\text{carrée}$)

**INTRODUCTION
GENERALE**

INTRODUCTION

Alors que la crise de l'énergie bat son plein et que les technologues et industriels assurent, au moyen du pétrole et de l'énergie nucléaire, notre approvisionnement à court terme, le public souhaite savoir s'il existe, à long terme, des espoirs réels de voir l'énergie solaire prendre au moins partiellement le relais. Beaucoup le croient, certains en doutent. L'électricité, en particulier, et de plus en plus produite et distribuée par des installations à grande échelle ; supposer qu'elle pourrait être produite, dans les années prochaines, dans des installations dispersées à l'échelle des besoins locaux, implique un effort d'imagination difficile.

« A l'effet de développer des projets d'énergies renouvelables, nous avons créé, la société NEW ENERGY ALGERIA (NEAL). Cette société a pour actionnaire deux entreprises publiques (SONATRACH et SONEGAS), et une société privée algérienne (SIM).

Ces projets vont permettre, au-delà de la satisfaction des besoins en énergie électrique du pays, de reculer l'échéance de déplétion de nos réserves d'hydrocarbures, et de rendre ainsi disponible une plus grande quantité de gaz pour nos clients européens. Par la promotion des énergies renouvelables l'Algérie contribue en fait au renforcement de la sécurité énergétique de l'Europe à laquelle elle fournit 95% de ses exportations en gaz naturel.

Un premier projet hybride gaz/électricité de grande capacité, a fait déjà l'objet d'un appel à manifestation d'intérêt. Sa réalisation apportera une contribution significative de l'énergie solaire au bilan énergétique national et constituera une première expérience, à grande échelle, dans la production d'électricité renouvelable raccordée au réseau de distribution nationale. On remarquera à travers cette expérience naissante que le gaz naturel – énergie fossile – va contribuer à la promotion des énergies renouvelables en Algérie.

Cette expérience sera d'autant plus intéressante que les gaz associés, provenant d'un gisement d'huile voisin et susceptibles d'être torchés, permettront d'alimenter ce projet.

La Société NEAL est chargée du développement de ce projet. Le programme de développement de projets hybrides à base de Concentrateurs Solaires de Puissance (CSP) nourrit l'ambition d'exporter l'électricité ainsi produite vers l'Europe. Nous

participons activement à cette démarche pour la réunion des conditions nécessaires à sa réalisation dans le cadre de l'initiative dite « Global Market Initiative (GMI) » intervenait Monsieur Chakib Khelil, Ministre de l'énergie et des mines, à la conférence du 1^{er} Juin 2004 à Bonn Allemagne, consacrée au développement des énergies renouvelables (Bulletin des Energ. Ren. N°6 Déc.2004).

Toutefois, le développement des cellules solaires est essentiellement limité d'une part par le fait que l'énergie solaire est intermittente, ce qui nécessite un stockage. D'autre part par le coût au kilowatt. Néanmoins, elles présentent une utilité certaine dans le cas où il serait difficile d'amener de l'énergie solaire sous une autre forme, en particulier dans les satellites.

Dans ces conditions, la recherche d'une production d'énergie électrique photovoltaïque a suivi ces dernières années deux voies principales :

- *Etude et développement de matériaux semiconducteurs, tel que le silicium, dont la fabrication serait simplifiée par rapport aux techniques de tirage des monocristaux et par conséquent moins coûteuse,
- *Réduction de la surface du convertisseur par l'utilisation de systèmes de conversion de concentration du rayonnement solaire.

La deuxième filière semble pouvoir donner, à ce jour, les prix de revient de l'énergie électrique les plus intéressants. La solution des systèmes à concentration permet de réduire la contribution du prix des cellules au coût total du générateur. Cependant, le fonctionnement sous concentration nécessite des photopiles de résistance série la plus faible possible sans que ceci soit au détriment de l'effet d'ombre c'est à dire de la surface active.

C'est dans ce cadre que nous avons entrepris des programmes de simulation comme outils du dimensionnement de la grille collectrice, à fin de minimiser la résistance série des cellules solaires destinées à être utilisées dans les systèmes solaires à concentration.

Dans le **premier chapitre**, notre travail est axé sur une compréhension des mécanismes physiques qui contrôlent le fonctionnement des photopiles, tels que les mécanismes de la photoconductivité, modèles et circuits équivalents d'une cellule solaire.



Dans le **chapitre 2**, nous présentons succinctement la concentration du rayonnement solaire par l'optique géométrique. La filière « concentration » nécessite la mise en jeu de un ou plusieurs sous systèmes qui conditionnent l'efficacité de la conversion énergétique au niveau du système photovoltaïque :

- un système optique qui réalise la focalisation des rayons solaires sur la surface réceptrice,
- un système de pointage asservi sur la position du soleil, plus ou moins précis selon la directivité de l'optique focalisante,
- un système de refroidissement des photopiles, destiné à garantir leur fiabilité et à compenser la décroissance de leur rendement avec l'augmentation de leur température lorsqu'elles sont soumises à des niveaux d'éclairement pouvant être élevés.

Le **chapitre 3** est consacré à l'optimisation des dimensions géométriques de la grille de collecte des cellules solaires à base de silicium sous forte concentration. A ce sujet une étude bidimensionnelle fixe le dessin des masques de la grille. Notre optimisation s'articule sur deux cas un modèle linéaire et un autre circulaire, dans ce dernier nous proposons un modèle mathématique qui sert à la minimisation des pertes de puissance, par conséquent l'amélioration du rendement de conversion.

Dans le **quatrième chapitre**, l'objectif de notre travail est de déterminer les paramètres électriques sous concentration solaire et notamment la résistance série, par des méthodes numériques. Egalement, ces programmes de simulations faites sur des échantillons, nous ont permis de modéliser les cellules solaires fonctionnant sous concentration solaire.

Le **chapitre 5** traite en premier lieu les différents procédés technologiques utilisés pour la métallisation de la photopile solaire et notamment sous concentration solaire tels que : l'évaporation sous vide et dépôt sérigraphique, en deuxième lieu, notre étude s'est portée sur une analyse faite sur les principales techniques conçues pour la mesure de la résistance de contact et la résistance carrée qui représentent les composantes fondamentales de la résistance série R_s .

CHAPITRE I

CONSIDERATIONS PHYSIQUES DES PHOTOPILES SOLAIRES

CHAPITRE I**CONSIDERATIONS PHYSIQUES DES PHOTOPILES SOLAIRES****1. Mécanisme de la photoconductivité**

Avant d'aborder l'effet photovoltaïque nous allons rappeler quelques mécanismes élémentaires. On dit qu'il y a photoconductivité chaque fois que la résistance électrique d'un corps matériel varie lorsqu'on l'éclaire avec des radiations électromagnétiques appartenant aux domaines visible, ultraviolet et/ou infrarouge. Pour que ce phénomène puisse se produire et qu'on puisse l'observer deux conditions nécessaires mais non suffisantes doivent être remplies :

- les radiations doivent pouvoir être absorbées par le corps éclairé. En d'autres termes on doit rechercher l'origine de la photoconductivité dans l'absorption de photons dont l'énergie est utilisée pour libérer des charges électriques à l'intérieur du volume éclairé, ce qui se traduit par une diminution (fonction croissante du flux lumineux absorbable reçu par le spécimen) de la résistance électrique du matériau étudié.
- l'augmentation de conductivité produite par l'éclairement doit être notable vis à vis de la conductivité du matériau dans l'obscurité et à la température de l'expérience, ce qui impose pour les semiconducteurs que la température soit assez basse pour que la conductivité propre du matériau ne soit pas trop grande (facteur important pour les applications).

Si l'on considère un semiconducteur intrinsèque à la température ambiante, pour qu'il apparaisse un phénomène de conductivité il faudra que les photons incidents possèdent une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite (Fig.I.1). Il y aura donc un seuil correspondant à une longueur d'onde λ_0 au dessus de laquelle la photoconductivité ne peut se manifester [1-2].

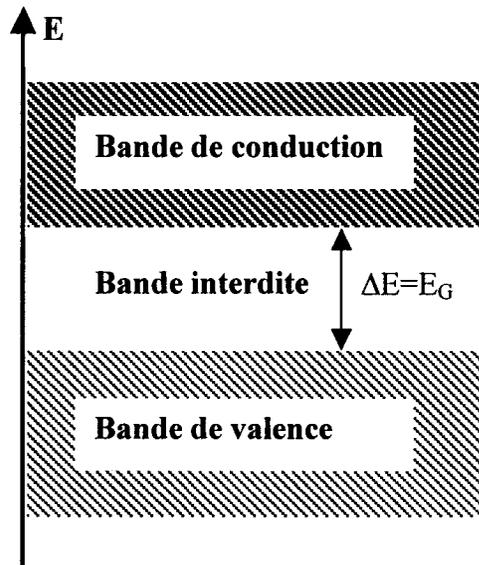


Fig.I.1 Diagramme énergétique d'un semiconducteur.

2. Modèles et circuits équivalents

2.1 Photopile parfaite

Dans sa forme physique la plus simple, le modèle représente la cellule par une zone de charge d'espace (ZCE) qui est totalement vide de porteurs libres et qui sépare deux régions uniformes dopées n et p (Fig.I.2).

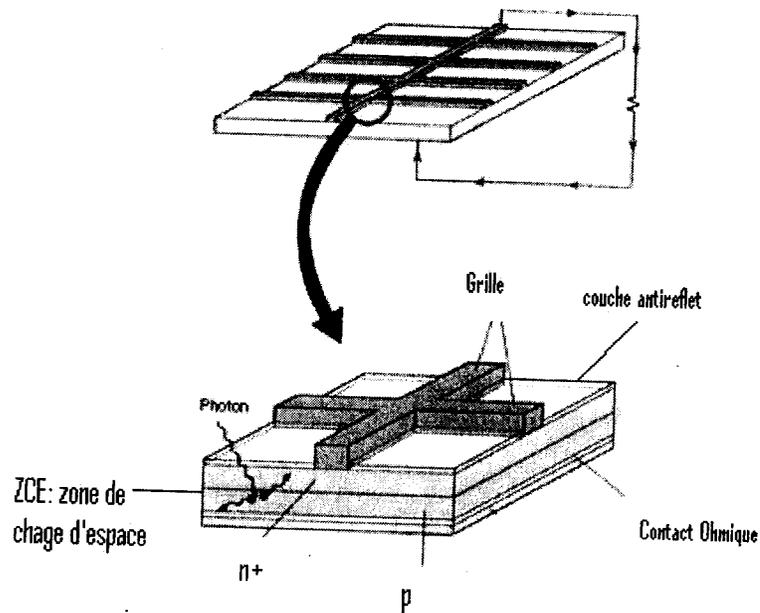


Fig.I.2 Structure physique de la photopile idéale.

La photopile éclairée produit un courant par génération de paires électron-trou : presque une paire pour chaque photon absorbé ayant une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite. Le courant de sortie est le résultat de ces porteurs minoritaires qui, s'ils ne se recombinent pas, sont entraînés par les champs électrostatiques internes de part et d'autre d'une barrière de potentiel appropriée. La barrière est réalisée par une jonction p-n ou une barrière Schottky ou un contact métal-semiconducteur. Dans chaque cas la photopile parfaite peut être représentée par une diode idéale en parallèle avec un générateur de courant (Fig.I.3) :

$$I = I_{ph} - I_D \tag{I.1}$$

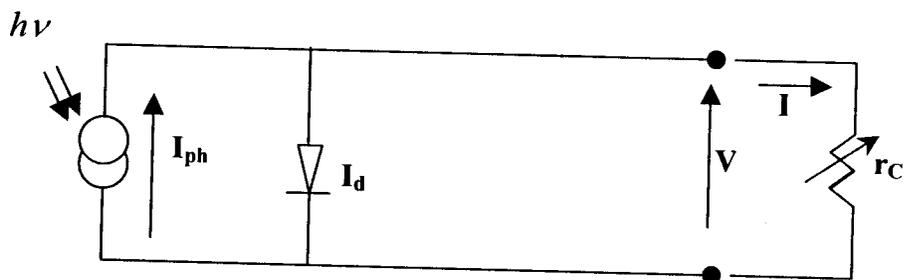


Fig.I.3 Circuit équivalent à une photopile solaire parfaite éclairée.

dont la caractéristique courant-tension est donnée sur la figure I.4 où V et I sont les coordonnées du point de fonctionnement pour la résistance de charge r_c .

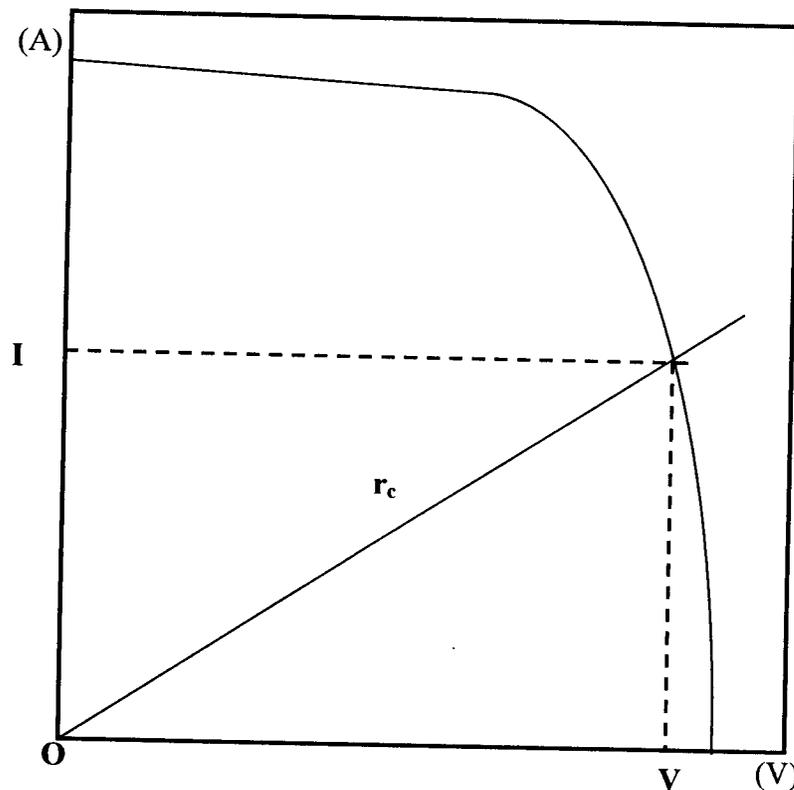


Fig.I.4 Caractéristique $I(V)$ de la photopile fonctionnant en générateur.

Le photocourant I_{ph} est déterminé par plusieurs facteurs liés à la nature de la lumière reçue et aux propriétés optiques et électroniques de la photopile. Il est le produit de la création de paires électron-trou par l'absorption de l'énergie lumineuse.

Le courant diode I_d est lié à la différence de potentiel entre les électrodes de la photopile, ddp due aux écarts de concentration de porteurs entre les extrémités de la zone de charge d'espace qui est totalement dépeuplée de porteurs libres.

L'équation (I.1) représente une superposition des caractéristiques à l'obscurité et sous éclaircissement par translation de I_{ph} sur l'axe des courants, par

application du principe de superposition. Ce modèle est une première approximation puisqu'il suppose notamment I_d et I_{ph} indépendants [3-4].

2.2 Equation de la diode idéale : courant de diffusion

Idéalement le courant de diode est donné par l'expression [5] :

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (I.2)$$

où I_{01} est le courant de saturation qui représente théoriquement la limite constante du courant de diode sous polarisation inverse, jusqu'au phénomène d'avalanche. Son expression théorique est liée à la structure de la photopile considérée et peut être obtenue pour une homojonction (modèle de Shockley, diffusion pure), ou pour le franchissement d'une barrière abrupte par le modèle de l'émission thermoïonique (modèle Anderson) et d'une double barrière Schottky (équation de type Richardson) [6].

Pour ce modèle il est supposé que les effets de recombinaison dans la zone de charge d'espace (ZCE) sont négligeables et que les porteurs se recombinent dans les régions de quasi neutralité.

2.3 Courants de génération-recombinaison

Une seconde composante du courant de diode doit être considérée pour tenir compte de la recombinaison [7-8] des porteurs par des centres dont l'énergie les situe dans la bande interdite et qui sont répartis dans la ZCE d'une jonction p-n ou dans la couche interface d'une hétérojonction :

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp\left(\frac{qV}{n_f kT}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

I_{02} est le courant de saturation inverse, il dépend de la largeur de la ZCE, des durées de vie effective des porteurs minoritaires, de la densité des centres de recombinaison, et de section de capture de ces centres. n_f est le facteur de qualité de la diode. Il est introduit par ce modèle et sa valeur apporte une information sur les mécanismes de conduction :

$$\underline{n_f < 1}$$

avec recombinaison Auger dans les conditions de fortes injection : $n=2/3$ [9].

$$\underline{n_f = 1}$$

des pièges peu profonds sont présents dans la ZCE [10].

$$\underline{1 < n_f < 2}$$

le niveau piège n'est pas au centre de la bande interdite, n'est alors fonction que de la polarisation [11-14]. Dans le cas où les pièges sont localisés à la surface de la ZCE [15] n est indépendant de la polarisation [16].

$$\underline{n_f = 2}$$

les centres sont uniformément distribués dans la ZCE et sur un seul niveau au centre de la bande interdite [11,17].

$$\underline{2 < n_f < 4}$$

lorsque la recombinaison s'effectue par les canaux à la surface de la ZCE [15,18], par des courants shunts indépendants de la température [14] ou lorsque la distribution des centres recombinants n'est pas uniforme avec une densité réduite au centre de la ZCE par rapport aux autres points [19].

La recombinaison Auger dans le cas d'une jonction p-n dissymétrique [20] se traduit par une diminution de la durée de vie des porteurs minoritaires et par un courant de recombinaison.

2.4 Modèle combiné : superposition des effets

Quelle que soit la structure considérée, les caractéristiques expérimentales ne suivent qu'exceptionnellement l'équation de la diode idéale. Une bonne approximation peut être obtenue en englobant tous les mécanismes envisagés :

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (I.4)$$

La caractéristique courant-tension de la photopile éclairée devient alors :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (I.5)$$

soit :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{qV}{n_f kT}\right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

La seconde composante domine aux faibles polarisations tandis qu'aux fortes polarisations le taux de croissance plus rapide de la composante diffusion lui permet de devenir prépondérante ($n_f > 1$, généralement).

Cette relation est représentée par le circuit équivalent de la Fig.I.5

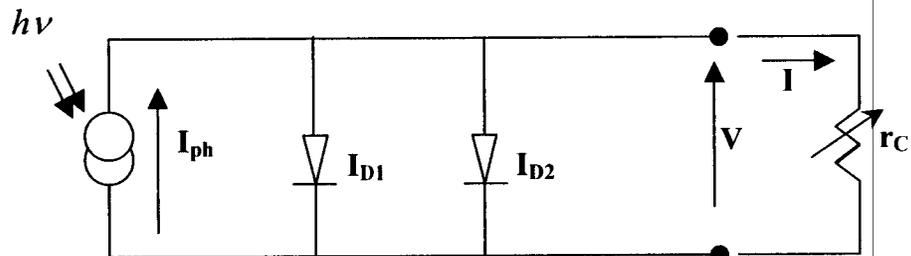


Fig. I.5- Schéma équivalent au modèle combiné pour une photopile parfaite.

2.5 Photopile réelle

Le modèle de la photopile parfaite ne considère pas les influences, sur le fonctionnement de la durée de vie τ et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires qui sont finis, des pertes par recombinaison en surface, des pertes à l'interface, des résistances de contact et des éléments de la structure [21]. Ces effets se manifestent par une diminution du rendement de la photopile et par un échauffement important pour les points de fonctionnement obtenus sous fort éclairage. Sur le schéma de la Fig.I.6 on tient compte de ces effets.

La relation courant-tension devient ainsi :

$$I = I_{ph} - \frac{(V + R_s I)}{R_{SH}} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_f kT}\right) - 1 \right] \quad (I.7)$$

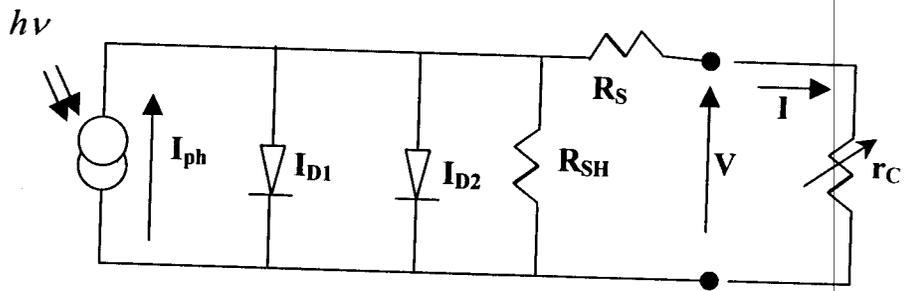


Fig.I.6 –Schéma équivalent au modèle combiné-dissipateur pour une photopile réelle.

Le générateur de puissance que constitue la photopile est habituellement caractérisé par des grandeurs macroscopiques expérimentales :

-la tension de circuit-ouvert V_{OC} , étroitement liée à la structure de la photopile, et le courant de court-circuit I_{SC} , de valeur voisine du courant photo-électrique I_{ph} .

-le point de puissance maximale (V_M, I_M) qui correspond à la puissance fournie à une charge r_C adaptée (Fig.I.7) :

$$P_{max} = V_M I_M$$

-le facteur de remplissage ou facteur de forme :

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{SC}} \tag{I.8}$$

-le rendement de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique par la photopile, donné par:

$$\eta = \frac{P_{fournie}}{P_{reçue}} \tag{I.9}$$

où $P_{fournie} = V_M I_M = FF \cdot V_{OC} I_{SC}$. Ce rendement est défini pour une cellule donnée mais sa valeur est fonction de l'énergie lumineuse incidente. Le rendement monochromatique, dont la variation avec la longueur d'onde de la lumière donne la réponse spectrale de la cellule, reflète plus précisément les propriétés de la photopile. Pour un utilisateur le rendement η est toujours considéré pour une puissance

incidente dont la composition spectrale est celle émise par le soleil et reçue au niveau de la terre : AM0 hors atmosphère ou AM1 après traversée verticale de l'atmosphère (Fig.I.7).

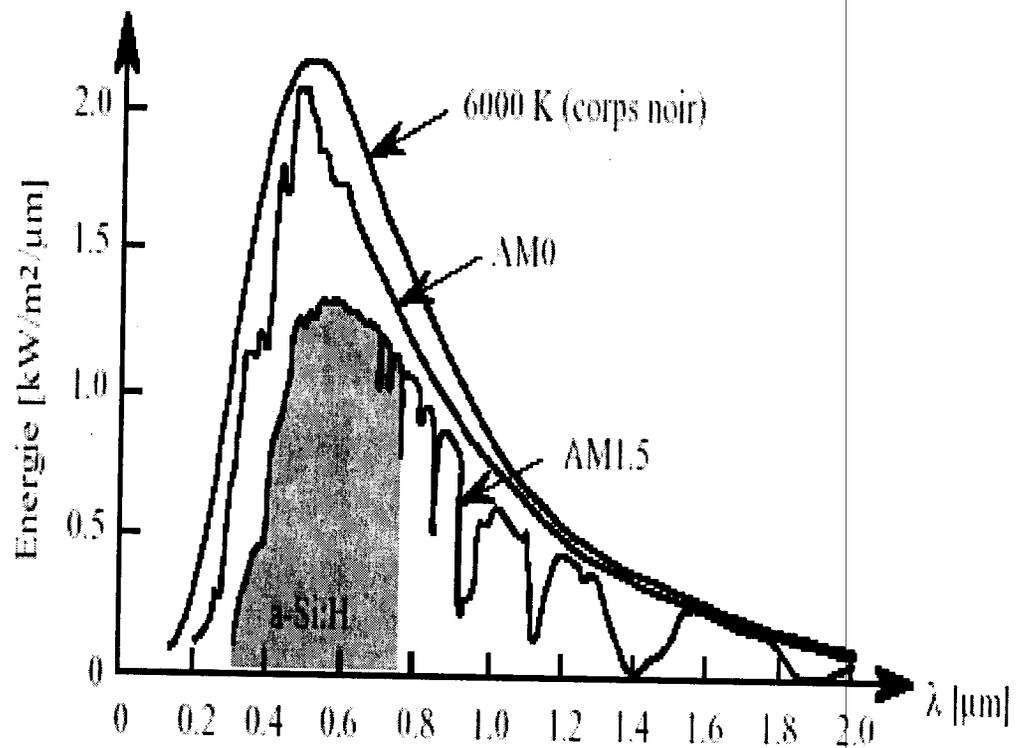


Fig.I.7 Répartition spectrale du rayonnement solaire, d'après [22].

2.6 Les modèles "utilisateurs"

Il faut encore préciser que les différentes familles d'utilisateurs ont adopté des "modèles" qui sont des réductions du modèle général mais qui répondent aux besoins de leurs applications.

- MODELE APPROXIMATION 1

C'est la diode de commutation pour laquelle on ne considère que le seuil de coupure $V=0,7V$ pour le silicium.

- MODELE APPROXIMATION 2

La tension varie linéairement avec le courant au dessus d'un certain seuil:

Selon J. P. Charles et al.[23].

$$V_{BE} = V_{BE0} + h_{11}I_B \quad (I.10)$$

C'est l'équation correspondant au circuit équivalent d'entrée d'un transistor bipolaire en émetteur commun (Figure I.8) dont la caractéristique est généralement représentée dans le troisième quadrant des caractéristiques d'un bipolaire.

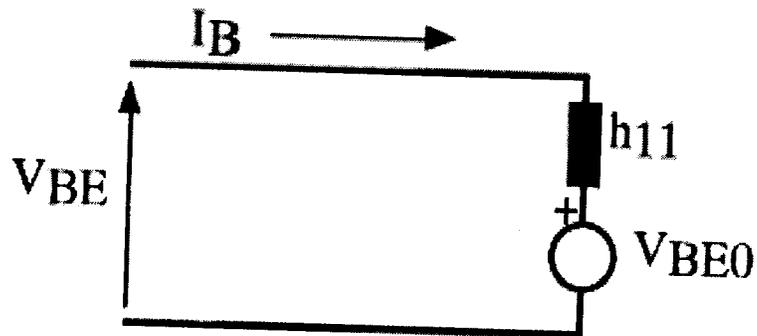


Fig. I.8 - Schéma équivalent du circuit d'entrée d'un transistor bipolaire en émetteur commun.

- MODELE APPROXIMATION 3

L'équation I.1 est celle du Modèle SPICE de la diode en continu considérée comme un récepteur avec pertes résistives série et parallèle. Les paramètres sont I_{od} et I_{or} , courants de saturation inverses associés à la conduction et à la recombinaison, n , le facteur de qualité (Ideality Factor), R_s et R_{sh} , les résistances série et parallèle. Un jeu de paramètres devrait décrire toute la caractéristique, en admettant qu'aucun des paramètres ne dépend de la polarisation, ce qui semble être une approximation lorsqu'on sait qu'une caractéristique modélisée en direct ne reproduit pas les mesures en mode inverse. Le problème, maintenant, est de déterminer les paramètres de cette équation générale ou particulière.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bernard Equer, Energie Solaire Photovoltaïque, Physique et Technologie de la Conversion Photovoltaïque, Vol1, Edition Ellipses (1993).
- [2] Alain Ricaud, Photopiles Solaires, de la Physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés, Collection Cahiers de Chimie (1997).
- [3] Jean Pierre Charles, Caractérisation I (V) et fonctionnement des photopiles solaires, thèse de Doctorat (1984), Montpellier France.
- [4] F.A.LINDHOLM, J.G. FOSSUM et E.L.BURGESS, Application of the Superposition Principle to Solar-Cell Analysis, IEEE Trans. On Electron Devices, ED-26 (3)(1979) 165-171 .
- [5] W.SHOCKLEY, « The Theory of p-n Junctions and semiconductors and p-n Junction Transistors », The Bell Syst.Tech.J., 28(3) (1949)435-489
- [6] B.L.SHARMA et R.K.PUROHIT, « Semiconductor Heterojunctions », International Series of Monographs in the Science of the Solid State, Vol.5, Pergamon Press,1974.
- [7] W.SHOCKLY et W.T.READ, Jr., "Statistics of the Recombination of the Holes and Electrons", Phys.Rev. 87(5)(1952)835-842.
- [8]R.N.HALL,"Electron-Hole Recombination in Germanium", Phys.Rev.,87(1952)387-402.
- [9] R.N.HALL, "Review Paper: Silicon Photovoltaic Cells", Solid-State Electronics, 24(7A) (1981)595-616.
- [10] M.WOLF, G.T.NOEL et R.J.STIRN, "Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cells », IEEE Trans. on Electron Devices, ED-24(4)(1977)419-428

- [11] S.CHOU, "An Investigation of the Lateral Transistors D.C. Characteristics", Solid-State Electronics, 14(9) (1971)811-826
- [12] R.J.STIRN, "Junction Characteristics of Silicon Solar Cells", Proc. 9th. IEEE Photovoltaic Specialists' Conf., Silver Spring, Maryland, May 2-4, 1972, IEEE, New York, 1972, pp.72-82
- [13] A.NUSSBAUM, "Generation-Recombination Characteristic Behavior of Silicon Diodes", Phys. Stat. Sol. Sol.(a), 19(2)(1973)441-450.
- [14] K.LEE et A.NUSSBAUM, « The Influences of Traps on the Generation-Recombination Current in Silicon Diodes », Solid-State Electronics, 23(1980)655-660.
- [15] C.-T.SAH, "Effect of Surface Recombination and Channel on p-n Junction and Transistor Characteristics", IRE, Trans. On Electron Devices, ED-9, Jan. (1962)94-108.
- [16] E.A.FAULKNER et M.J.BUCKINGHAM, « Modified Theory of the Current/Voltage Relation in Silicon p-n Junctions », Electronics Letters, 4(17) (1968)359-360.
- [17] C.T.SAH, R.N.NOYCE et W.SHOCKLEY, « Carrier Generation and Recombination in p-n Junction Characteristics », Proc. IRE, 45(Sept.)(1957) 1228-1243.
- [18] E.FABRE, "MIS Silicon Solar Cells", Applied PHYS.Letters, 29(9) (1976) 607-610.
- [19] W.SHOCKLEY et H.J.QUEISSER, « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells », J. of Applied Physics, 32(3)(1961) 510-519.
- [20] D.REDFIELD, Revised Model of Asymmetric p-n Junctions », Appl. Phys. Lett., 35(2)(1979)182-184

- [21] E. BUCHER, Solar Cell Materials and their Basic Parameters, Appl. Phys., 17(1978)1-26.
- [22]. Green M.A., Solar Cells, éd. Prentice Hall, 1982.
- [23] Jean-Pierre Charles, Ahmed Haddi , Alain Maouad, Hazri Bakhtiar, Abdellatif Zerga, Alain Hoffmann et, Pierre Mialhe, La Jonction, du Solaire à la Microélectronique, Rev. Energ. Ren. Vol.3 (2000)1-16.

CHAPITRE II

CONCENTRATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR L'OPTIQUE GEOMETRIQUE

CHAPITRE II

CONCENTRATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR L'OPTIQUE GEOMETRIQUE

Introduction

Le rayonnement solaire direct représente entre 50% et 90% de la totalité du rayonnement solaire [1-2]. Plus abondante dans une zone géographique appelée communément la ceinture solaire indiquée sur la figure II.1, la ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire. Un calcul simple montre qu'en appliquant un rendement de conversion énergétique de 10%, une surface de collecteurs de 550000 km² (soit la superficie de la France) recevant un ensoleillement direct annuel moyen de 2200 kWh/m²/an fournirait à elle seule 10,4 Gtep/an, c'est-à-dire l'équivalent des besoins mondiaux en énergie [3]. On compte également dans la ceinture solaire 70 villes de plus d'un million d'habitants et de nombreux pays à fort taux de développement attendu prochainement.

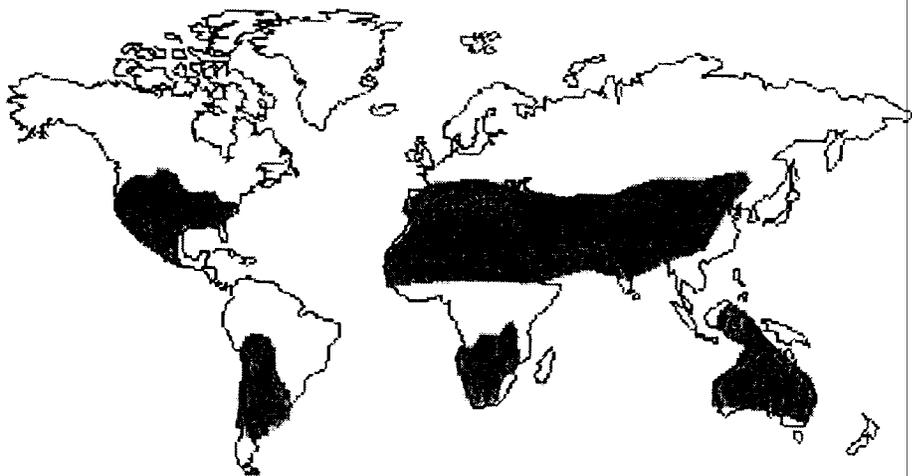


Fig.II.1 : La ceinture solaire, régions du globe pour lesquelles l'ensoleillement direct moyen annuel excède 2000 kWh/m²/an [4].

La figure II.2 donne des statistiques pour la production de l'énergie électrique par les panneaux solaires photovoltaïques dans le monde [5].



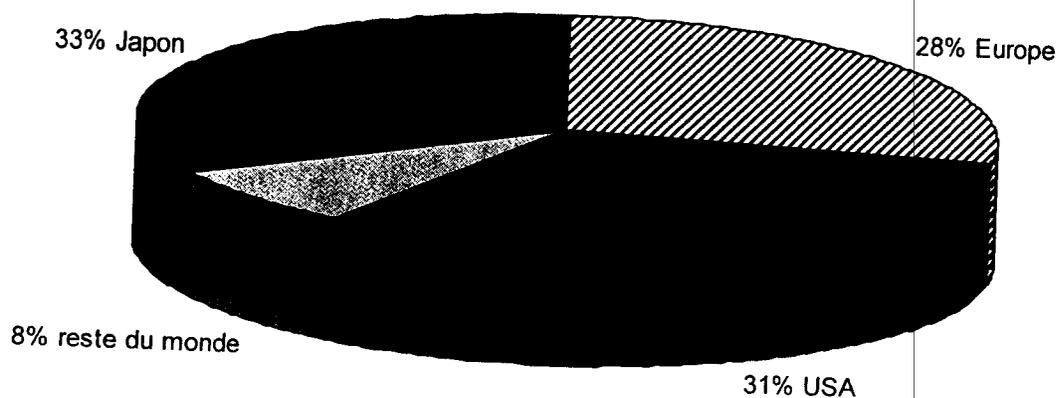


Fig.II.2 Production mondiale de l'énergie électrique par les panneaux solaires photovoltaïques.

Il s'agit en effet de mettre à profit les capacités de recherche et de développement en vue de produire les composants photovoltaïques à meilleur rendement et moindre coût, et parallèlement de mettre en œuvre des solutions peu onéreuses à moyen terme. L'une d'elles consiste à diminuer artificiellement la surface des cellules en superposant sur leur partie active plusieurs images de la source lumineuse. Dans la mesure où le système optique réalisant cette opération demeure peu coûteux et où le rendement de conversion reste stationnaire avec le niveau d'illumination [6], l'intérêt de cette filière, appelé « concentration », apparaît immédiatement. Elle fait l'objet de ce chapitre.

La filière « concentration » nécessite la mise en jeu de un ou plusieurs sous systèmes qui conditionnent l'efficacité de la conversion énergétique au niveau du système photovoltaïque :

- un système optique qui réalise la focalisation des rayons solaires sur la surface réceptrice,
- un système de pointage asservi sur la position du soleil, plus ou moins précis selon la directivité de l'optique focalisante,
- un système de refroidissement des photopiles, destiné à garantir leur fiabilité et à compenser la décroissance de leur rendement avec l'augmentation de leur température lorsqu'elles sont soumises à des niveaux d'éclairement pouvant être élevés[7-9].

I- Aspect général du problème de la concentration : les concentrateurs

Les concentrateurs augmentent l'angle solide de réception du rayonnement solaire. Dans le cadre de l'optique géométrique, les calculs de la répartition de flux obtenue peuvent être fait, soit en admettant l'hypothèse simplificatrice de l'uniformité de la luminance du disque solaire, soit en tenant compte de l'assombrissement vers les bords [10].

Considérons le rayonnement reçu au point M du plan (Fig.II.3) par l'intermédiaire d'un dispositif concentrateur. De M, dans la direction Δ , on voit un élément de surface solaire de luminance B sous l'angle solide $d\omega$, et l'éclairement partiel créé au point M par cet élément est égal à $B d\omega \cos\alpha$.

Traçons l'hémisphère S de centre M et de rayon 1, limitée au plan P. La projection sur P de l'aire découpée sur l'hémisphère S par le cône d'angle solide $d\omega$ est égale à :

$$d\sigma = d\omega \cos \alpha \quad (\text{II.1})$$

et l'éclairement au point M s'exprime par l'intégrale :

$$E = \iint B d\sigma \quad (\text{II.2})$$

étendue à l'aire plane correspondant à l'ensemble des directions Δ dans lesquelles des rayons parviennent effectivement en M.

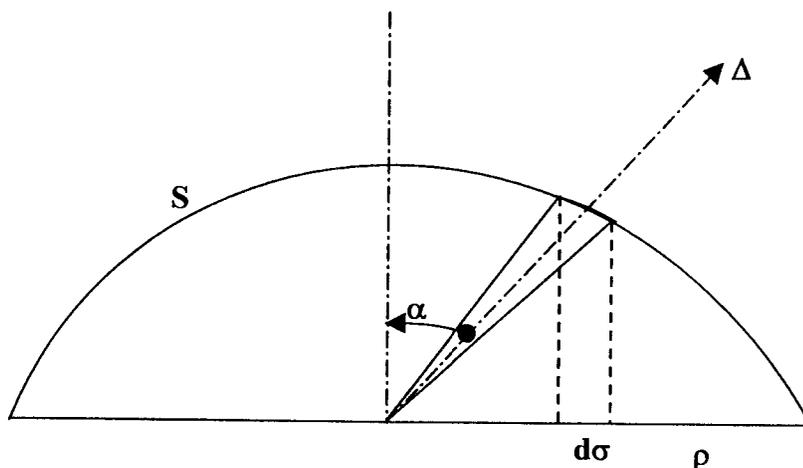


Fig.II.3-Eclairement donné par un concentrateur de révolution (soleil uniforme).

Dans l'hypothèse simplificatrice d'un disque solaire de luminance uniforme égale à B_1 . Si le rayonnement est reçu en M de toutes les directions contenues dans un cône de révolution d'angle 2α , d'axe normal à P, on a :

$$E = B_1 \iint d\sigma = \pi B_1 \sin^2 \alpha \quad (\text{II.3})$$

Le domaine d'intégration étant le cercle de centre M et de rayon $\sin\alpha$.

La formule (II.3) suppose seulement, comme cela a été dit, que le rayonnement soit reçu de toutes les directions contenues dans le cône de révolution d'angle au sommet 2α ; ce résultat peut être obtenu de différentes manières : transmissions (lentilles simples, lentilles de Fresnel), réflexion, simples ou multiples, ou par une combinaison de ces dispositifs.

I-1 Miroirs paraboliques, calcul simplifié de l'éclairement moyen dans l'image de Gauss

Un miroir parabolique de grande ouverture relative ne donne pas l'image du soleil, mais nous présentons toujours comme référence le diamètre de l'image de Gauss, égal à

$$d = 2 f \varepsilon_0 \quad (\text{II.4})$$

où f est la distance focale et $2\varepsilon_0 = 32'$ est le diamètre apparent du soleil dans le plan focal par la partie centrale du miroir.

Comme l'éclairement du soleil direct, vu sous l'angle solide $\pi\varepsilon^2$ est égale à $\pi B_1 \varepsilon^2$, on peut exprimer la « concentration » par le rapport :

$$C = \frac{\pi B_1 \sin^2 \alpha}{\pi B_1 \varepsilon_0^2} \# 46200 \sin^2 \alpha \quad (\text{II.5})$$

La constante solaire étant $\pi B_1 \varepsilon_0^2 = 0.14 \text{ W/cm}^2$

on retrouve, pour $\alpha = \pi/2$, la valeur $46200 \times 0.14 \# 6470 \text{ W/cm}^2$ de l'émittance moyenne du disque solaire supposé uniforme.

Si nous prenons sur le miroir une couronne comprise entre les rayons α_1 et α_2 (Fig. II.4), l'éclairement fourni par cette couronne est donné par :

$$e = \pi B_1 (\sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1) \quad (\text{II.6})$$

en supposant un facteur de réflexion égal à 1 .

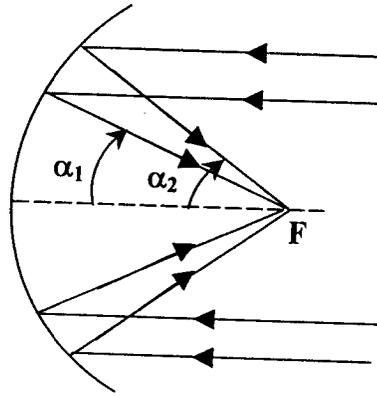


Fig.II.4. Eclairage partiel fourni par une couronne parabolique

Le facteur πB_1 émittance moyenne du disque solaire est de 6470 W/cm^2 . Mais, pour une installation au sol, on tiendra compte de l'absorption atmosphérique en multipliant par $\frac{0.1}{0.14} = 0.7$, rapport de l'éclairage hors de l'atmosphère.

Le tableau II.1 donne les puissances incidentes au sol et hors atmosphère pour différentes valeurs de α_1 et α_2 .

Tableau II.1 Variations de puissance incidente au sol et hors atmosphère avec les angles α_1 à α_2

Couronne de α_1 à α_2		W/cm ² (hors de l'atmosphère)	W/cm ² au sol
α_1	α_2		
0°	10°	195	136
10°	20°	562	393
20°	30°	850.5	602
30°	40°	1056	739
40°	50°	1123	786
50°	60°	1056	739
60°	70°	860.5	602
70°	80°	862	393
80°	90°	195	136

I-2 Cas des miroirs cylindro-paraboliques

Pour certaines applications ne nécessitant pas des fortes densités énergétiques, on utilise des concentrateurs à une seule direction de courbure. C'est le cas du miroir cylindro-parabolique engendré par la translation d'une parabole (Fig.II.5).

Dans ce genre de miroirs l'éclairement est égal à :

$$E = B_1 \int_{-\alpha}^{+\alpha} 2\epsilon_0 \cos \alpha d\alpha \tag{II.7}$$

ce qui donne, pour $\alpha=\pi/2$, $E=4 B_1 \epsilon_0$.

L'éclairement du soleil direct étant $\pi B_1 \epsilon_0^2$.

La concentration maximum est égale à :

$$C = \frac{4B_1\epsilon_0}{\pi B_1\epsilon_0^2} = \frac{4}{\pi\epsilon_0} \tag{II.8}$$

où $C=274$, pour $\epsilon_0=0.00465$ radian

Cette valeur de la concentration donnerait pour une intensité solaire de 0.1 W/cm^2 , une température d'équilibre de corps noir de 1200 °C environ.



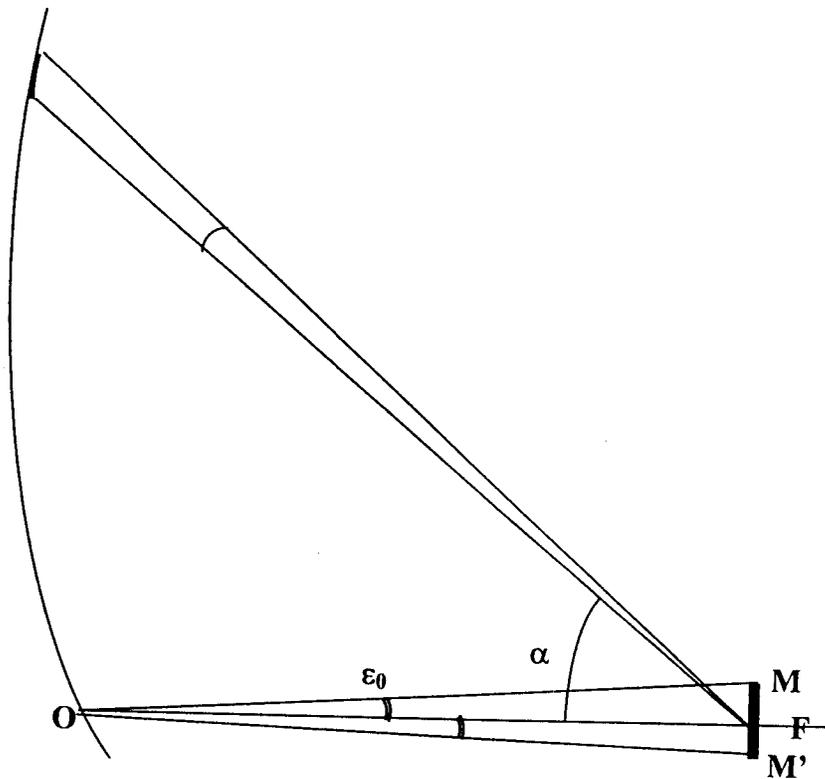


Fig.II.5. Miroir cylindro-parabolique

I-3 Concentration par réflexion

I-3-1 Concentration d'une lentille simple

La concentration du rayonnement solaire peut être obtenue par réflexion ou par réfraction.

Les lentilles circulaires (ou cylindriques) concentrent un faisceau lumineux parallèle autour d'un point (ou d'une ligne). L'utilisation des lentilles classiques soulève cependant de nombreuses difficultés.

En effet, considérons une lentille de diamètre d'ouverture D et de distance focale F . En négligeant les aberrations, le diamètre a de l'image est (Fig.II.6)

$$a = 2 f \sin \theta_c \quad (\text{II.9})$$

où θ_c est l'angle maximum entre un rayon lumineux et l'axe optique. La concentration géométrique est donc :

$$C = \left(\frac{D}{a}\right)^2 = \left(\frac{D}{2f}\right)^2 \frac{1}{\sin^2 \theta_c} = \left(\frac{D}{2f}\right)^2 C_{\text{idéal 3d}} \quad (\text{II.10})$$

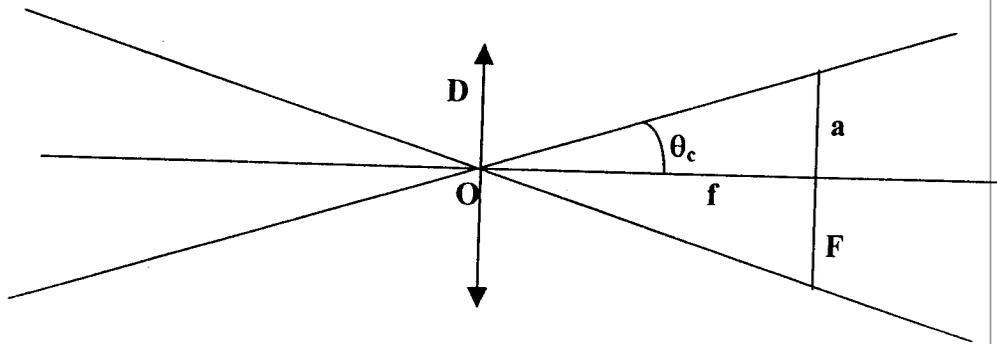


Fig.II.6 Concentration d'une lentille

Pour un champ θ_c donné, il faut donc, pour atteindre une concentration importante, des lentilles de grande ouverture et de faible distance focale.

Pour une lentille mince, la distance focale est donnée par :

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (\text{II.11})$$

où n est l'indice de réfraction du milieu constituant la lentille et R_1 et R_2 les rayons de courbures de ses faces.

I-3-2 Lentilles de Fresnel

Les problèmes des lentilles classiques sont cependant en partie résolus grâce aux lentilles de Fresnel. Les lentilles de Fresnel sont constituées au centre d'une lentille mince et sur les bords de petits segments prismatiques dont les angles sont calculés de telle sorte que les rayons incidents soient déviés vers la tache focale (Fig.II.7)

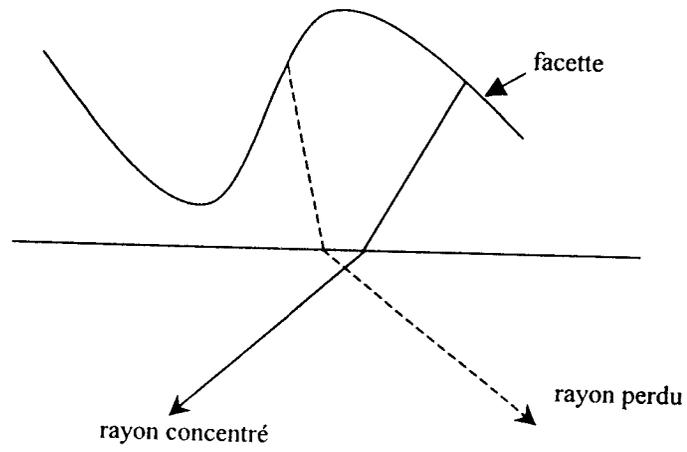


Fig.II.8. Rayons perdus dans une lentille de Fresnel

Les performances des lentilles peuvent être améliorées par l'utilisation d'un concentrateur secondaire au voisinage de foyer (Fig.II.9) ou encore grâce à des lentilles de forme plus évoluée que les lentilles de Fresnel traditionnelles.

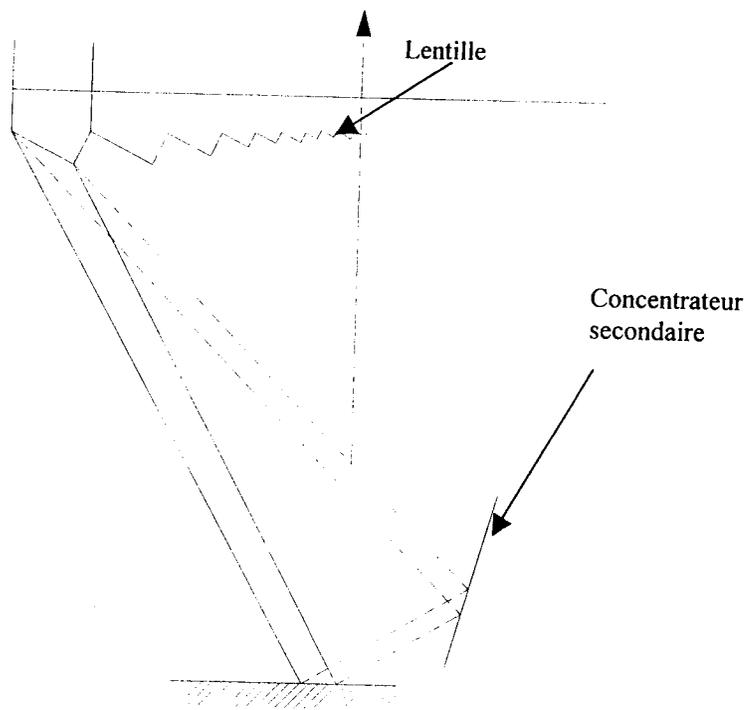


Fig.II.9. Concentration secondaire pour une lentille de Fresnel

On obtient ainsi des lentilles telles que celle présentée sur la figure II.10 dont la concentration est proche de l'idéal [11-12].

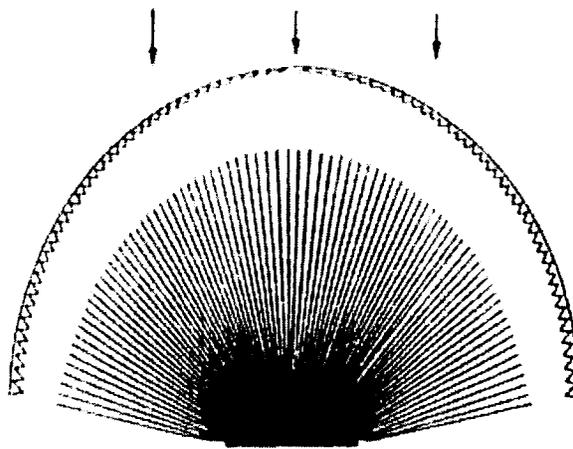


Fig.II.10 Lentille de Fresnel évoluée.

I-3-3 Concentrateur par prismes

Il est possible de concentrer la lumière avec un simple prisme (Fig.II.11). Pour un faisceau parallèle incident incliné d'un angle h_1 sur la face supérieure, la concentration efficace de rayonnement est, en négligeant les pertes par réflexion et transmission :

$$C = \frac{\sin h_1}{\sin \alpha} \quad (\text{II.12})$$

la concentration maximum étant obtenue par $h_1 = h_{1\max}$

où

$$h_{1\max} = \text{Arc cos} \left[n \cos \left(\text{Arc cos} \left(\frac{1}{n} \right) + 2\alpha \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

où α est l'angle au sommet du prisme. Le champ du concentrateur est défini par :

$$0 \leq h_1 \leq h_{1\max} \quad (\text{II.14})$$

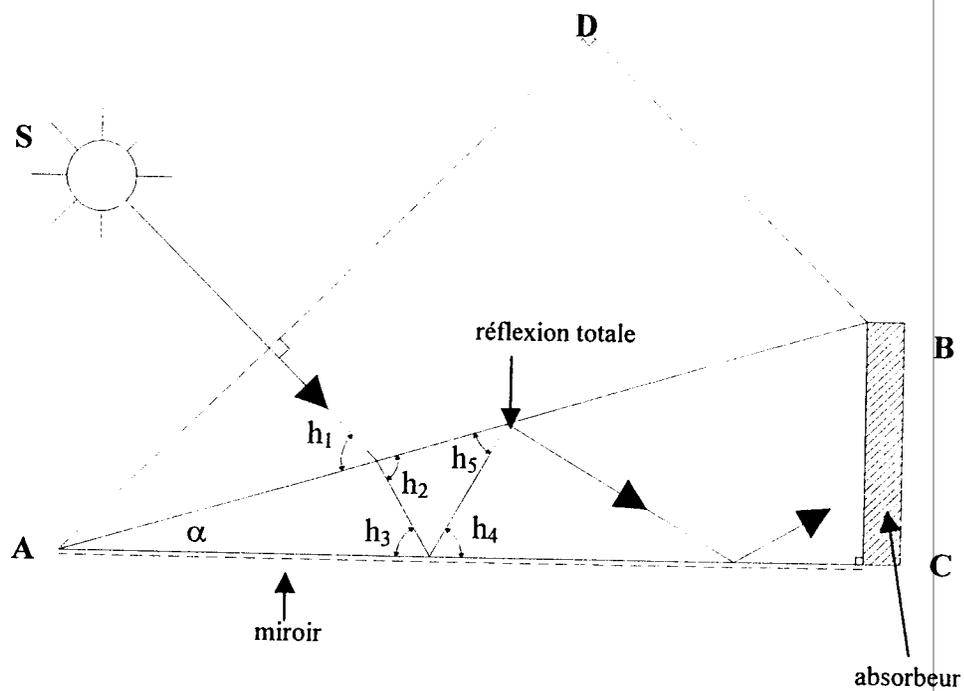


Fig.II.11 Concentrateur par prisme simple

Ces éléments prismatiques peuvent être associés pour former des concentrateurs systématiques comme l'indique la figure II.12 [13].

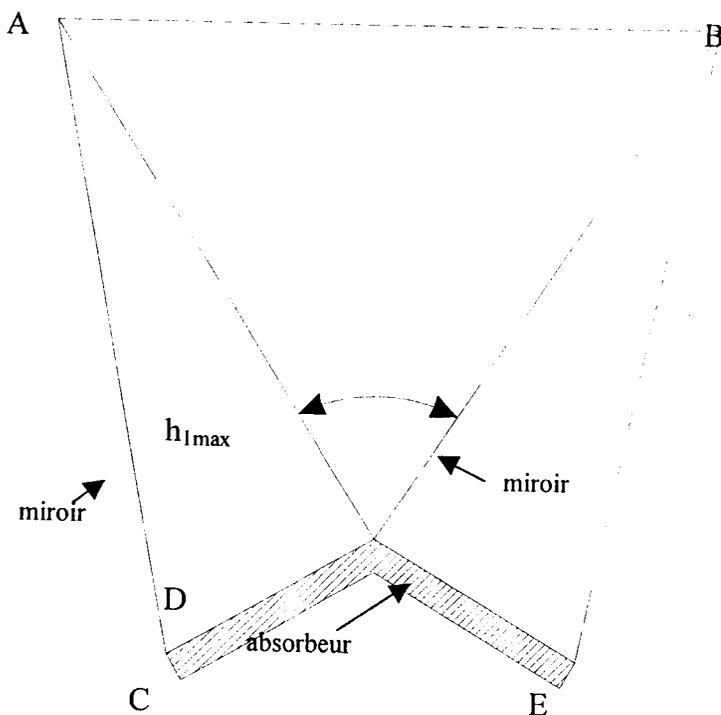


Fig. II.12. Concentrateur symétrique à deux prismes

II Résultats des travaux de recherche sur les concentrateurs solaires dans le monde

II.1-Premières expériences

Le premier système de concentration solaire photovoltaïque a été développé aux laboratoires nationaux de SANDIA dans les années approchant 1970 (Fig.II.13) [14]. Ce système utilisait des lentilles de Fresnel focalisant sur des cellules solaires à base de silicium et de structures de poursuite munis de deux axes. Le refroidissement était assuré par une alimentation par de l'eau froide. Les lentilles de Fresnel sont faites d'un matériau acrylique. Ce concept fut réalisé au niveau de plusieurs prototypes de recherche ; parmi lesquels on peut citer : le panneau de « Ramón Areces » qui était

installé aussi dans les années approchant 1970. Dans ce prototype, le refroidissement des cellules solaires se faisait par un système de refroidissement passive [15]. En outre la lentille de Fresnel est faite de verre silicone hybride (Fig.II.14).

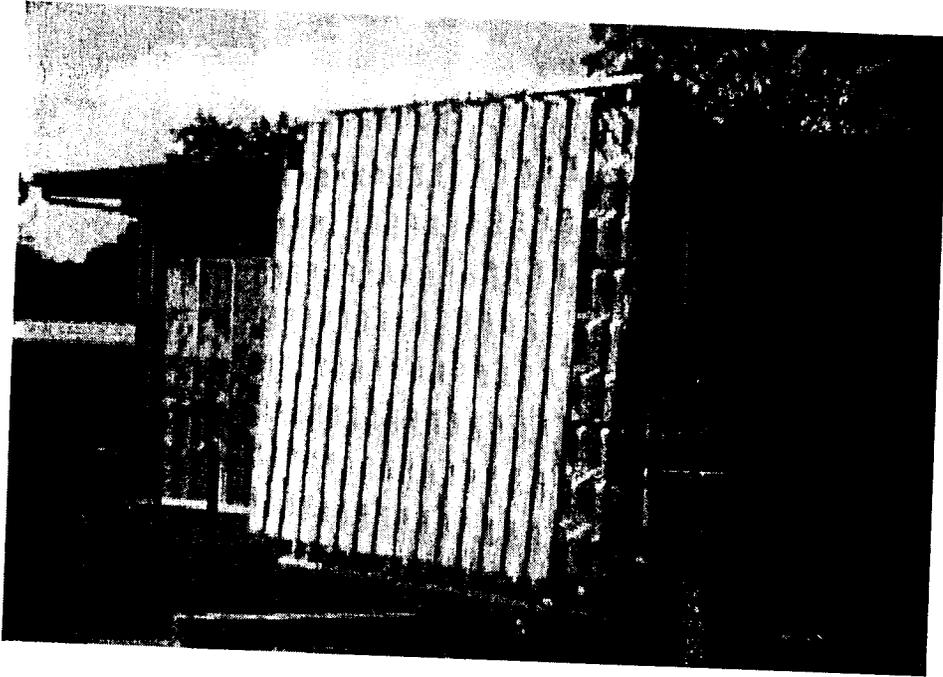
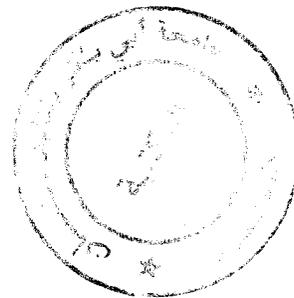


Fig.II.13. Prototype de système de concentration construit par les Labos SANDIA.



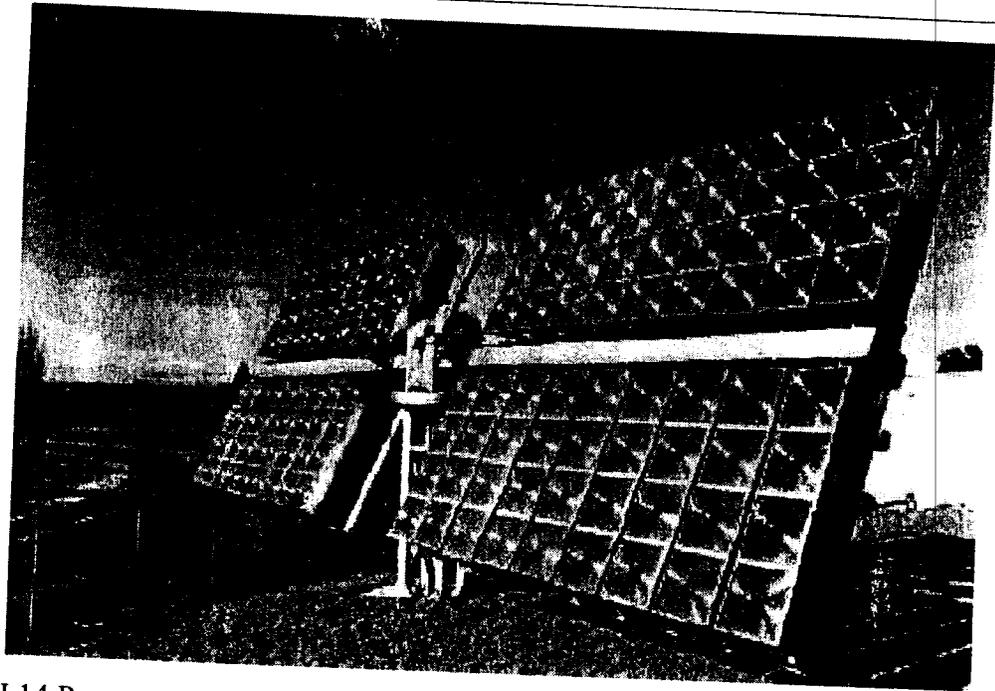
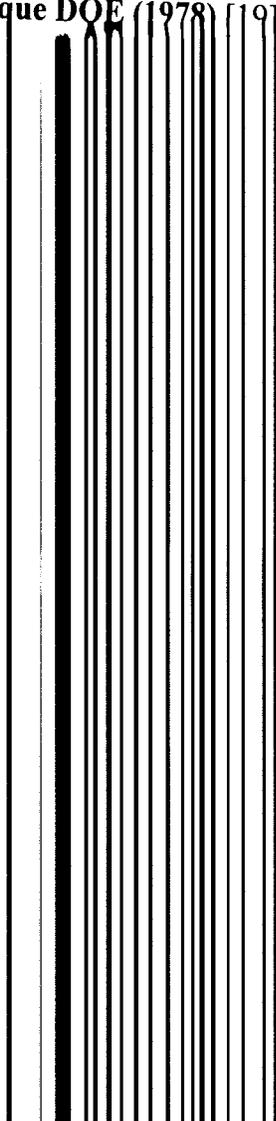


Fig.II.14 Panneau « Ramón Areces ». Les modules comprennent un point foyer d'une lentille de Fresnel qui défléchit les rayons de soleil sur une cellule circulaire de diamètre 5 cm. Le taux de concentration est de l'ordre de 40 X et la puissance nominale est environ 1 kWp. IES-UPM (1980).

Comme dans le cas de SANDIA, des compagnies européennes, Sophocle (LAAS, Toulouse, France) et PCA (Ansaldo, Genoa Italy), développaient leurs travaux dans ce domaine en utilisant des lentilles de Fresnel au cours des années 70 [16-18].

Ansaldo a utilisé aussi des concentrateurs paraboliques dont le matériau réfléchissant était de verre argenté et le refroidissement est assuré par une circulation forcée d'un fluide.

II.2-Projet Photovoltaïque DOE (1978) [19]



-lentilles réfringentes de Fresnel et les miroirs réfléchissantes avec des géométries circulaires et linéaires.

-cellules solaires à base de Si et AsGa,

-deux types de refroidissement : passif et actif,

-système de poursuite à un et à deux axes.

Le tableau II.2 résume les caractéristiques de ces systèmes à concentration.

Tableau II.2 les caractéristiques des systèmes à concentration photovoltaïque

Type de système	Optiques	Taux concentration	de	Type de cellules	Refroidissement	Tracking	Application	Dimension	Année							
Point focalisant sur une seule cellule	Lentilles	50<X<500	Si		Passif	Deux axes	Panel Ramón Areces -UPM Madrid	1 kW	1978							
							PCA-Ansaldo. Italy	1 kW	1978							
Le point focalisant sur un paquet de cellules	Parabolique dish	X>500	Ga			Deux axes	SOLERAS Village in Saudi Arabia	350 kW	1981							
							Sky Harbour Airport Phoenix	250 kW	1982							
							POCA Alpha Solarco Array	10 kW	1989							
							Amonix IHPVC System in Nevada Power Company	18 kW	1995							
							Amonix HCPV California Polytechnic University Pomona	15 kW	1998							
							Solar fram in Broken Hill (Australia)	1 MW	In progress							
							Systèmes de focalisation linéaire (Linear focus system)	Lentilles	15<X<60	Si		Passif	Deux axes	Entech-3M/Austin System	300 kW	1990
														Entech-20 Kwpvusa System	20 kW	1991
														Entech-CSW Solar Park	100 kW	1995
														Entech-TU Electric Energy Park	100 kW	1995
	Miroirs	15<X<60	Si		Actif	Un seul axe	PVI-Clean Air Now, Los Angeles, CA	30 kW	1996							
							PVI, Sacramento Municipal Utility District	30 kW	1996							
							PVI Arizona Public Service	3 kW	1996							
							E-Systems-PV/Thermal System for Dallas Airport	25 kW	1982							
							EUCLIDES System	450 kW	1999							
					Actif		PV/Thermal Acureux-System	60 kW	1981							
							BDM Corp. Office Block, Albuquerque	50 kW	1982							

II.3-Progrès dans la technologie de concentration photovoltaïque durant les années 80 [20-24]

Bien que cette décennie a connu des progrès remarquables dans le domaine de la concentration photovoltaïque pouvant être expliqués par les énormes expériences réalisées depuis lors, tels que :

- SOLERAS (350 kW),
- Phoenix Sky Harbour Airport (225 kW),
- Dallas Airport (27 kW).

Mais ces systèmes ne trouvaient pas un succès commercial; parce qu'ils ne répondaient pas au seuil rendement-coût, étant donné que le rendement maximal atteinte était entre 10 % et 11 %. Malgré cette situation, les travaux de recherche ne cessaient pas de se développer dans le domaine de concentration photovoltaïque au cours des années 1980 (Fig.II.15).



Fig.II.15 Concentrateurs photovoltaïques Soleras Plant (350 kW) implantés dans l'Arabie Saoudite par Marin Marietta. Les modules comprennent des lentilles de Fresnel à un point focalisant.

En 1986, les laboratoires des dispositifs à base de silicium démontraient un rendement de 28% :

- Université de Stanford a rendu compte à un rendement de 28 % sous un taux de concentration 140 X avec une résistivité élevée.
- Université de la Nouvelle Galles de sud montrait un rendement de 25 % sous un taux de concentration de 110 X mais avec une basse résistivité.
- L'université Polytechnique de MADRID et la société espagnole ISOFOTON S.A avaient travaillé pour développer le concentrateur statique avec un taux de concentration 2X qui utilise des cellules bifaciales (Fig.II.16)

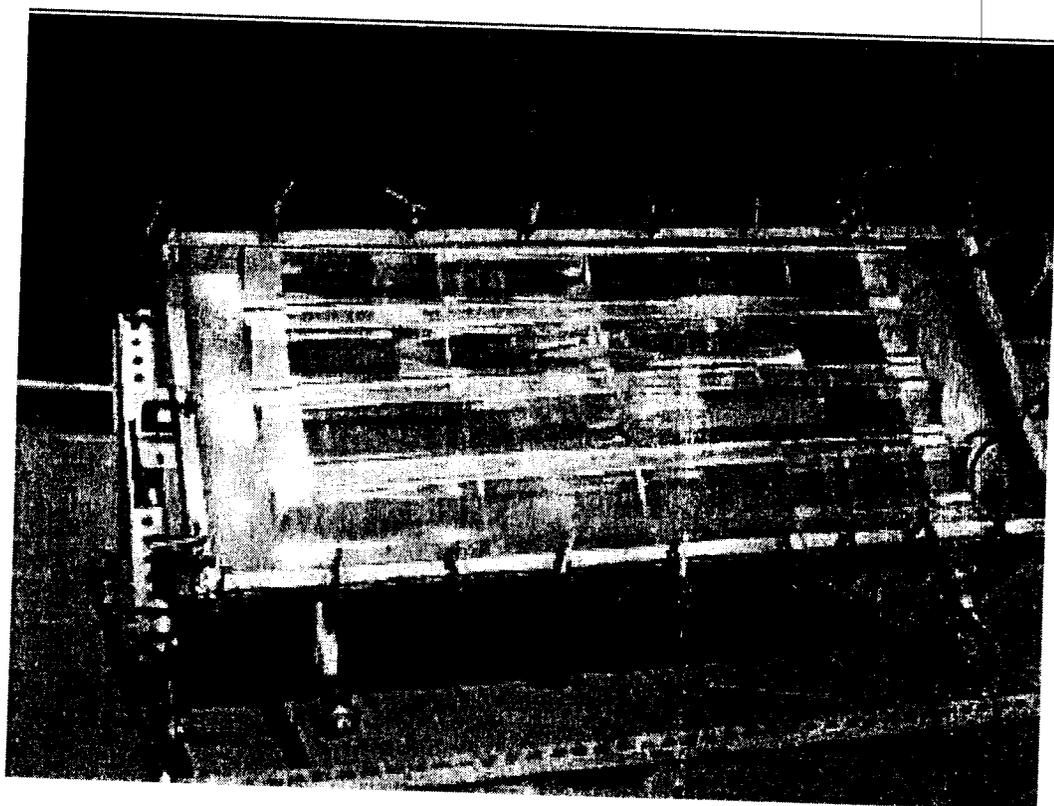


Fig.II.16 Le prototype de concentrateur statique battu à UPM (Universidad Politécnica de Madrid) muni des cellules bifaciales

Les deux grands systèmes PV à concentrateurs étaient en cours de construction dans les années 1980. Le premier était le système linéaire de Fresnel (<300 kW) installé par ENTECH à Austin TEXAS et le second était le système de Fresnel à point focalisant installé par Alpha Solarco. Le rendement maximum obtenu était de l'ordre de 14.5 %. Ces systèmes n'ont été jamais commercialisés à cause du facteur coût-rendement.

II. 4-Progrès au cours des années 1990 [25-27]

On peut citer à titre d'exemples :

*Projet PVUSA (PhotoVoltaic for Utility Scale Applications) (1991) : la société ENTECH a installé le système de concentration à lentille linéaire pour la société PGEC (Pacific Gas & Electric Company) à Davis, Californie.

Au début des années 90 DOE a créé le programme initiative de concentrateur photovoltaïque (Photovoltaic Concentrator Initiative program : PVICI). Cette initiative était constituée par quatre industriels : ASEC, Spectrolab, Sunpower et Solarex., et quatre fabricants de modules : Entech, Solar Kinetics, Alpha Solarco et la compagnie SEA.

Dans le domaine des concentrateurs statiques, un haut rendement était atteint avec des cellules bifaciales sous une concentration 4X, par l'Université de la Nouvelle Galles de sud.

II.5-Les concentrateurs au début de XXI^{ème} siècle [14, 25,28-30]

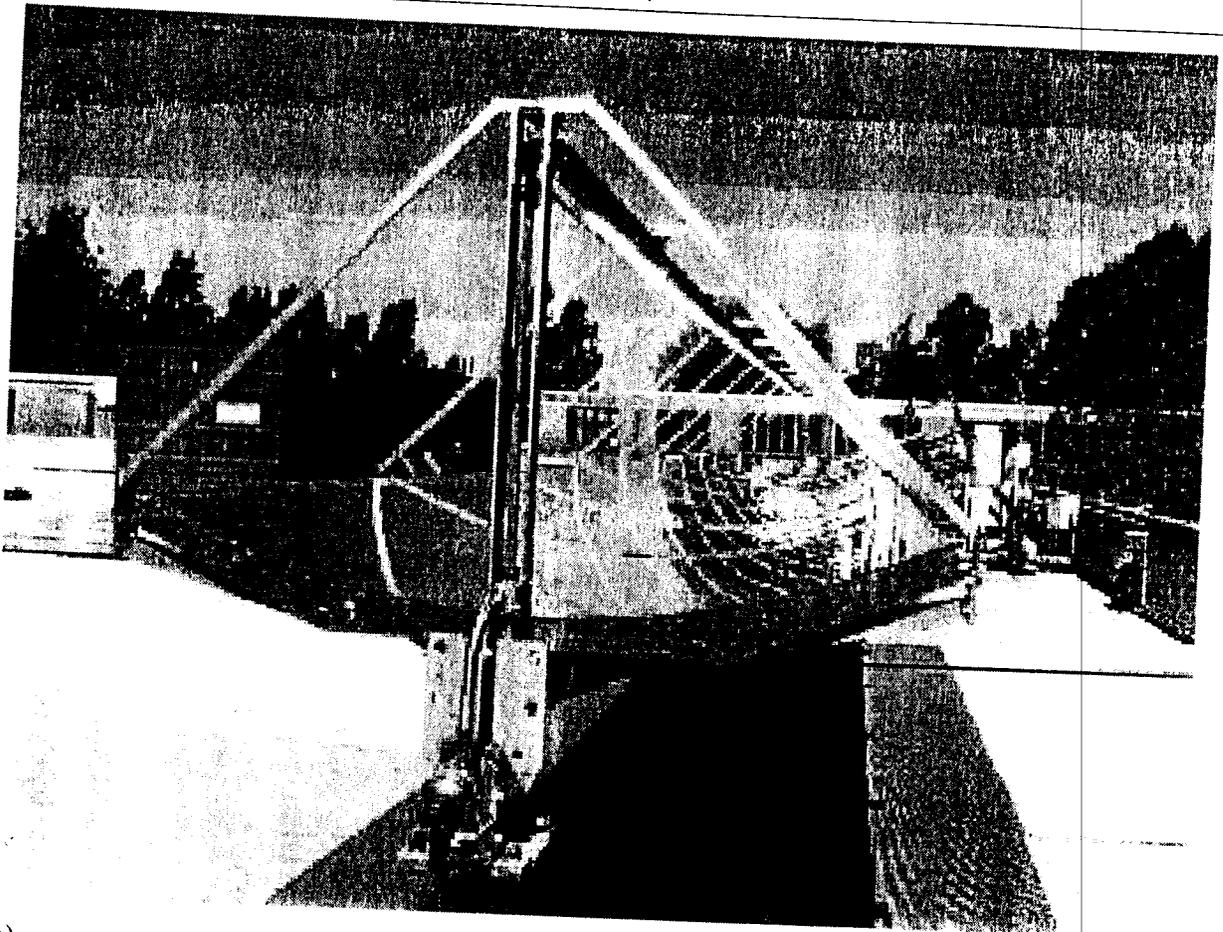
Au début de ce siècle, les recherches se sont penchées pour améliorer le seuil rendement-coût des concentrateurs photovoltaïques, cependant diverses institutions de recherche ont montré des progrès dans ce domaine :

- Alpha Solarco développe les lentilles de Fresnel en utilisant ainsi le procédé de film à lentille «3M » le taux de concentration étant 250 X.
- Amonix a développé le système des lentilles de Fresnel. Amonix a installé récemment plus que 200 kW des systèmes au profit de service public en Arizon.
- la compagnie « Solar Research » développe encore les concentrateurs réfléchissant plans,
- l'Université de la Nouvelle Galles de sud a développé le concentrateur statique avec un taux de concentration de 4X,
- l'université de TOKYOU avait fait des recherches sur les concentrateurs statiques à deux et à trois dimensions. Les lentilles à deux dimensions ont un taux de concentration de 1.65 X et celles à trois dimensions un taux de concentration 2X.
- le Collecteur photovoltaïque/thermique (PV/T) développé par CSES (Centre for Sustainable Energy Systems) à l'Université Nationale australienne (ANU : The Australian National University), sous un taux de concentration (37X) (Fig.17). Les collecteurs dits « collecteurs mixtes » : chauffage et énergie solaire, constituent par des miroirs faits de verre métallisé qui focalisent la lumière sur des cellules solaires à base de silicium (mono) à haut rendement [31]

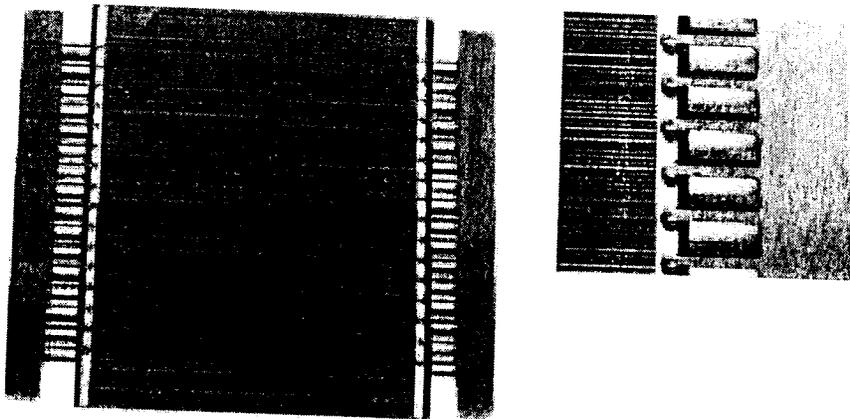
* **Algérie** : Dans le cadre de son engagement à étendre ses capacités de production d'électricité, l'Algérie vise à augmenter la part de l'énergie solaire dans sa production d'électricité jusqu'à 5 pour cent en 2010. Elle souhaite fournir de l'électricité au départ de centrales solaires algériennes en partenariat avec l'Union européenne. Un projet est en cours

pour poser deux câbles de transmission sous-marins d'une capacité de 1,2 GW chacun, destinés à approvisionner l'Espagne et l'Italie depuis l'Algérie en électricité produite partiellement à base d'énergie solaire.

L'accord de mise en oeuvre de l'AIE SolarPACES, conclu en 1977, porte sur un programme de recherche et développement dans le domaine de la concentration de l'énergie solaire (CSP) et des systèmes d'énergie chimique. Le développement systématique de trois technologies à concentration d'énergie solaire - collecteurs cylindro-paraboliques, collecteurs centrale à tour et collecteurs paraboliques - a permis de concentrer et de mettre l'énergie solaire au service de la production électrique et d'autres utilisations efficaces, fiables et rentables. Des applications commerciales allant de quelques kilowatts (kW) à des centaines de megawatts (MW) sont maintenant réalisables. On espère que d'ici 2010, les technologies CSP contribueront substantiellement à la fourniture d'énergie propre et durable dans les régions chaudes. SolarPACES compte 14 pays membres, dont beaucoup sont bien placés pour tirer profit de l'application des technologies de concentration solaire. Depuis sa création en 1974, l'AIE offre un cadre juridique, connu sous le nom d'accords de mise en oeuvre, à la collaboration internationale pour la R&D et le déploiement dans le domaine des technologies de l'énergie. De meilleures technologies énergétiques sont la clé d'une protection durable de l'environnement en même temps que de la croissance économique et de la sécurité énergétique [32].



(a)



(b)

Fig.II.17 Prototype CHAPS : (a) Collecteur complet, (b) Concentrateur à cellules solaires

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alain Ferriere, Les centrales solaires thermodynamiques : l'état de l'art et les perspectives mondiales, Les énergies renouvelables : l'alternative sans crise », Colloque de l'Institut ENSAM de Corse, Bastia, 31 mars 2005, pp.1-15.
- [2] Sargent & Lundy, "Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts", SL-5641, Chicago, Illinois, USA, May 2003.
- [3] Key World Energy Statistics, Agence Internationale de l'Energie, 2003
- [4] F. Pharabod et C. Philibert, « Luz solar power plants: success in California and worldwide prospects », Deutsche forshungsanstalt für Luft und Raumfahrt e.V., IEA-SSPS, 1991.
- [5] Energy Statistics Yearbook, UNO (2001).
- [6] J.C.SUAU, Modèle optoélectronique pour la conception de piles solaires à semiconducteur. Thèse de 3^{ème} Cycle Toulouse-Avril 1977.
- [7] K.Araki,H.Uozumi,M.Yam aguchi, A simple passive cooling structure and its heats analysis for 500X concentrator PV module, Conference record, 29 th IEEE PVSC,2002, pp.1568-1571.
- [8] Anja Royne, Christopher J.Dey,David R.Mills,Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination:a critical review, Sol.En.Ma & Sol.Cells. Volume 86(4)(2005)
- [9] H.C.Koehler, Cooling photovoltaic (PV) cells during concentrated solar radiation in specific arrangement in coolant with as low electric conductivity as possible, Patent DE1990 4717, 2000, Germany
- [10] MEINEL (A.B) et MEINEL (M.P), "Applied Solar Energy", Addison Wesley Pub.Co.Reading (1976).
- [11] KRITCHMAN(E.M),FRIESEN(A.A) et YEKUTELY(G.)."Efficiency Fresnel Lens for Solar concentration",Solar Energy,22,119-123(1979).
- [12] KRITCHMAN (E.M), FRIESEN (A.A) et YEKUTELY (G.). "Convex Fresnel Lenses with Large grooves", Solar Energy, 27,129-137(1981).
- [13] Serge HABRAKEN, Jean-Marc DEFISE, Jean-Paul Collette, Pierre ROCHUS, Pierre-Alexis D'ODMENT and Michel HOGGE, Space Solar Arrays And Concentrators, 51st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro-Brazil,1-9 (2000).
- [14] Richard M. Swanson, The promise of concentrators, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Prog.Photovolt. Res. Appl.8, 93-11 (2000).



- [15] Anja Royne, Christopher J. Dey and David R. Mills, Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 86, Issue 4, 1 pp 451-483 (2005).
- [16] M. A. Green, J. Zhao and A. Wang, '23% module and other silicon solar cell advances', in Proc. 2nd World Conf. and Exhibition on Photovoltaic Solar Power Energy Conversion, Vienna, 6-10 July, 1998, pp. 1187-1192.
- [17] L. Fraas, J. Avery, V. Sundaram, V. Dinh, T. Davenport and J. Yerkes, 'Over 35% efficient GaAs/GaSb stacked concentrator cell assemblies for terrestrial applications', in Proc. 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Orlando, Florida, 1990.
- [18]. M. A. Green et al., 'Solar cell efficiency tables (version 14)', *Progress in Photovoltaics, Research and Applications*, 7(4), 321-326 (1999).
- [19] R. M. Swanson, 'Straight talk about concentrators', in 1st Conf. on Future Generation Photovoltaic Technologies, Denver, 24-27 March, 1997
- [20] V. Garboushian, S. Yoon, G. Turner, A. Gunn and D. Fair, 'A novel high-concentration PV technology for cost competitive utility bulk power generation', in Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 5-9 December, 1994, pp. 1060-1063.
- [21] A. W. Blakers and J. Smeltink, 'The ANU PV/trough concentrator system', in Proc. 2nd World Conf. On Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6±10 July, 1998, pp. 2193-2195.
- [22] The Ben-Gurion National Solar Energy Centre, *Sun World*, 23(1), 14 (1999).
- [23] N. B. Mason, T. M. Bruton, C. Heasman and R. Russel, 'Optimisation of low-cost concentrator solar cells', in Proc. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Nice, France, 23-27 October, 1995, pp. 2110-2112.
- [24] M. Brunotte, A. Goetzberger and U. Blieske, 'Two-stage concentrator permitting concentration factors of around 300 with one-axis tracking', in Proc. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Amsterdam, 11-15 April, 1994, pp. 556-559.
- [25] V. P. Khvostikov, E. V. Paleeva and M. Z. Shvarts, 'AlGaAs/GaAs LPI grown concentrator solar cells', in Proc. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Nice, 23-27 October, 1995, pp. 65-68.
- [26] K. Yoshida, A. Suzuki and T. Saitoh, 'Evaluation of a non-imaging, two-dimensional lens for PV concentrator by using an insolation model', in Proc. 2nd World Conf. and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6-10 July, 1998, pp. 2177-2180.

- [27] Renewable Energy Technology Characterizations, Topical Report, TR-109496, U.S. Department of Energy and EPRI, December 1997. Project Managers E. A. DeMeo and J. F. Galdo (available on www.eren.doe.gov/power/techchar.html).
- [28] M.J. O'Neill et al., "Development Of Terrestrial Concentrator Modules Incorporating High-Efficiency Multi-Junction Cells," 28th IEEE-PVSC, 2000.
- [29] M.J. O'Neill et al., "The Stretched Lens Array (SLA), an Ultralight Concentrator for Space Power," 36th IECEC, Savannah, 2001.
- [30] Michael F. Piszczor, Mark J. O'Neill, Michael I. Eskenazi, Henry W. Brandhorst, Jr., stretched lens array (sla) photovoltaic concentrator hardware development & testing, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11-18, 2003, Osaka, Japan.
- [31] Joe S. Coventry, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. Solar Energy, Volume 78, Issue 2, February 2005, Pages 211-222
- [32] International Energy Agency: IEA/PRESS (03)01 Paris 13 janvier 2003.

CHAPITRE III

OPTIMISATION DE LA GEOMETRIE

DE LA GRILLE

CHAPITRE III**OPTIMISATION DE LA GEOMETRIE DE LA GRILLE****Introduction**

En l'absence de matériaux semiconducteurs transparents et suffisamment conducteurs, nous sommes amenés pratiquement à collecter les porteurs sur une grille métallique n'utilisant qu'une très faible partie de la surface métallique de la cellule. Le rôle de cette grille est de réduire la résistance série de la couche diffusée et d'amener le courant le plus directement possible au contact assurant la connexion entre les cellules unitaires [1].

Dans ce chapitre nous allons, tout d'abord, montrer l'influence de la concentration solaire sur le rendement énergétique, en tenant compte de la résistance série R_S de la cellule ainsi que la température. Ensuite, nous étudierons théoriquement la conception des masques. Notre étude portera essentiellement sur la distance inter-doigts et la largeur des lignes métalliques qui seront choisies de telle sorte que les pertes (pertes dues au courant horizontal dans l'émetteur, pertes de conduction dans les doigts métalliques, perte due à l'ombrage créé par la grille) de puissances produites par la chute de tension, soient minimales.

I. Influence de la concentration solaire et effets de la résistance série et température**I.1. Influence de la concentration et effet de la résistance série**

Dans ce paragraphe, nous étudierons l'influence de la concentration solaire sur le rendement énergétique, en tenant compte de la résistance série R_S de la cellule. On se place dans le cas où l'injection reste faible.

Si l'on considère que la résistance shunt R_{SH} tend vers l'infini, la caractéristique courant tension est donnée par l'équation suivante :

$$I = CI_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + R_S I)}{n_f k T} \right) - 1 \right] \quad (\text{III.1})$$

*Lorsque $R_S=0$, le rendement obtenu pour 500 soleils AM1 est de 17.4% pour une cellule à homojonction en silicium.

*Pour $R_S=20\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, cette valeur devient 16.9% pour la même cellule.

En vue d'établir une relation explicite du rendement en fonction de la concentration solaire et de la résistance série, considérons les deux cas suivants :

a) $R_S=0$

La puissance incidente est $C \cdot P_i$ (P_i : Puissance incidente sous un soleil). Le courant de court-circuit étant égal au courant d'éclairement, la tension de circuit ouvert s'écrit d'après l'équation (III.1) :

$$V_{co}(C) = \frac{n_f kT}{q} \text{Log} \left(\frac{C I_{cc}(1) - I_s}{I_s} \right) = \frac{n_f kT}{q} \text{Log} \left(\frac{C I_{cc}(1)}{I_s} \right) = V_{co}(1) + \frac{n_f kT}{q} \text{Log}(C) \quad (\text{III.2})$$

$$\text{avec } V_{co}(1) = \frac{n_f kT}{q} \text{Log} \frac{I_{cc}(1)}{I_s}$$

$V_{co}(1)$ et $I_{cc}(1)$ se rapportent à un soleil. Le rendement à C soleils s'écrit :

$$\eta(C) = \frac{V_{co}(C) I_{cc}(C) \cdot FF}{C P_i} = \frac{V_{co}(1) I_{cc}(1) \cdot FF}{P_i} + \frac{I_{cc}(1) \cdot FF \cdot n_f kT \cdot \text{Log}(C)}{P_i}$$

Soit :

$$\eta(C) = \eta(1) \left(1 + \frac{n_f kT}{q V_{co}(1)} \text{Log}(C) \right) \quad (\text{III.3})$$

où, $\eta(1)$ est le rendement pour un rayonnement non concentré. La relation linéaire entre $\eta(C)$ et $\text{Log}(C)$ est évidente sur la Fig.III.1

b) $R_S \neq 0$

$$P_{R_S}(C) = R_S I^2$$

Si nous supposons que $I_{cc} = C \cdot I_{PH}$, le rendement s'écrit :

$$\eta(C)_{R_S} = \eta(C)_{R_S=0} - \frac{P_{R_S}(C)}{C P_i} = \eta(C)_{R_S=0} - \frac{R_S C^2 I_{cc}^2}{C P_i}$$

Le rendement $\eta(C)_{R_S=0}$ est donné par la relation (III.3).

$$\eta(C)_{R_s} = \eta(1) \left[1 + \frac{n_f kT}{qV_{CO}(1)} \text{Log}(C) - \frac{R_s C^2 I_{CC}^2}{C \pi} \right] \quad (\text{III.4})$$

Pour les faibles valeurs de C l'accroissement du premier terme n'est pas compensé par les pertes dues à la résistance série. En conséquence le rendement varie quasi-linéairement avec Log (C).

Pour les fortes concentrations, les pertes dues à la résistance série, augmentent et ne sont pas compensées par le terme $\eta(1)n_f kT \frac{\text{Log}(C)}{qV_{CO}(1)}$

Le rendement en fonction de C présente un maximum qui dépend de R_s et I_{PH} . Plus R_s et C sont élevés et plus la valeur de C correspondant au rendement maximum est faible (Fig.III.1). En pratique on constate sur cette figure que le rendement commence par augmenter, conformément à la relation (III.4), passe par un maximum puis il décroît. Il y a deux causes à cette limitation, l'effet de la température et celui de la résistance série.

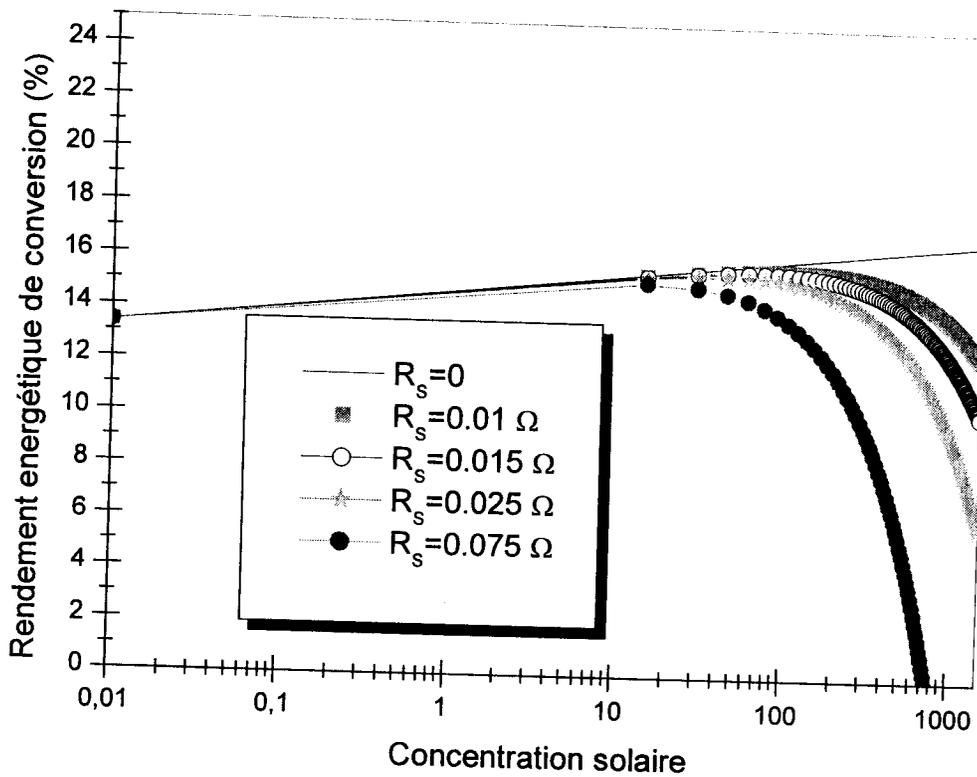


Fig. III.1 Variations du rendement de conversion avec la concentration solaire pour différentes résistances séries pour une photopile à base de silicium Si (p^+n) de surface $2\text{cm} \times 2\text{cm}$. sous éclaircment AM1.5

II.2 Effet de la température

A l'exception des pertes par réflexion, les 80 à 90 % d'énergie incidente non exploitée par photopile sont finalement transformés en chaleur et servent donc à échauffer le dispositif. Sauf N_A et N_D , tous les paramètres d'une photopile dépendent de la température [1-2].

- Les durées de vie, radiatives ou Auger, en dépendant fortement par l'intermédiaire de la concentration intrinsèque des porteurs (n_i) et s'accroissant donc avec T , ce qui est favorable. Par contre les durées de vie associées aux pièges γ sont peu sensibles.
- Les mobilités varient mais faiblement et de façon complexe.
- la réponse spectrale, donc la densité du courant en court-circuit J_{CC} est alors modifiée mais cette variation demeure faible.
- Par contre, le courant d'obscurité augmente fortement avec T . La variation est de la forme : $J_0 \sim T^{3+\gamma/2} (\exp(-E_G/kT) + \exp(-E_G/2kT))$, avec γ voisin de 1. Donc, l'influence de température sur le courant d'obscurité est importante et dépend de la largeur de la bande interdite E_G ; plus la bande interdite est large, plus le courant d'obscurité est faible. Le terme le plus important étant $\exp(-E_G/kT)$ pour le courant de diffusion et $\exp(-E_G/2kT)$ pour celui de recombinaison.
- Enfin E_G diminue quand la température augmente, selon la relation $E_G(T) = E_G(0) - a \frac{T^2}{(T+b)}$, avec les données suivantes (Tableau III.1) pour le cas de silicium :

Tableau III.1, les constantes a et b pour le matériau de silicium.

	$E_G(0)$ (eV)	a (10^{-4} V)	b (K)
Si	1.16	7.0	1.100

La figure III.2 représente les variations du rendement avec la température.

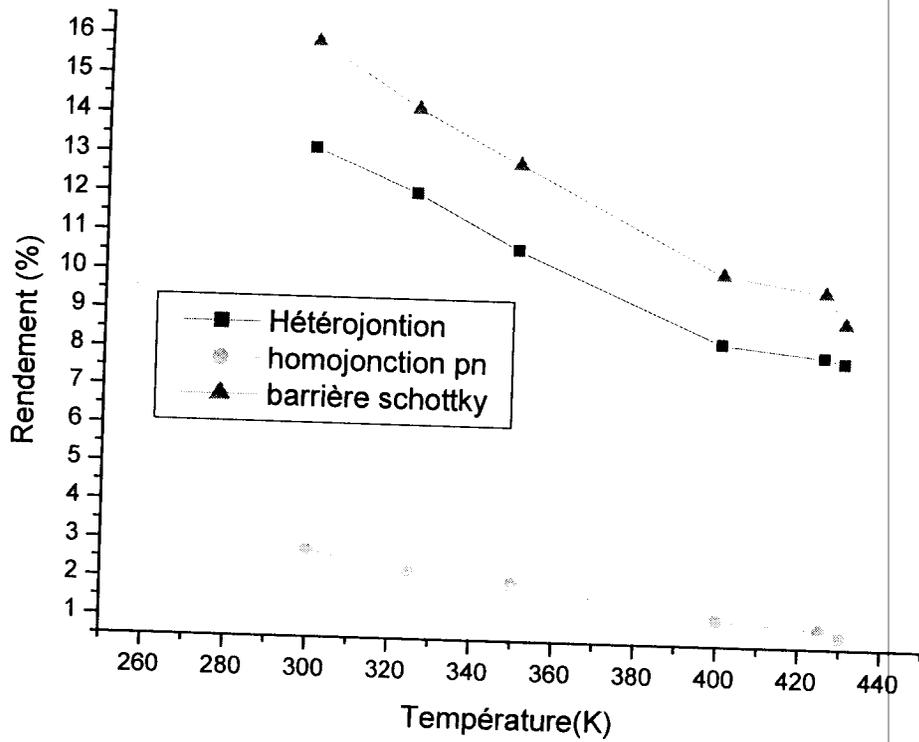


Fig. III.2 Variations du rendement de conversion avec la température pour des cellules solaires à base de silicium, leurs substrats sont de type n. Sous éclairage AM0.

De cette analyse, on peut dire que le rôle de refroidissement est primordial pour le fonctionnement normal du dispositif sous concentration solaire. Celui-ci peut être actif ou passif [2]. Dans le premier cas on utilise l'eau ou l'air. Ceci nécessite une dépense d'énergie supplémentaire et entraîne une complication du système ce qui finalement pèse assez lourd sur le prix final du kilowatt. Il est donc préférable, lorsque cela est possible, d'utiliser un refroidisseur passif utilisant le rayonnement et la convection naturelle [3] (Fig.III.3).

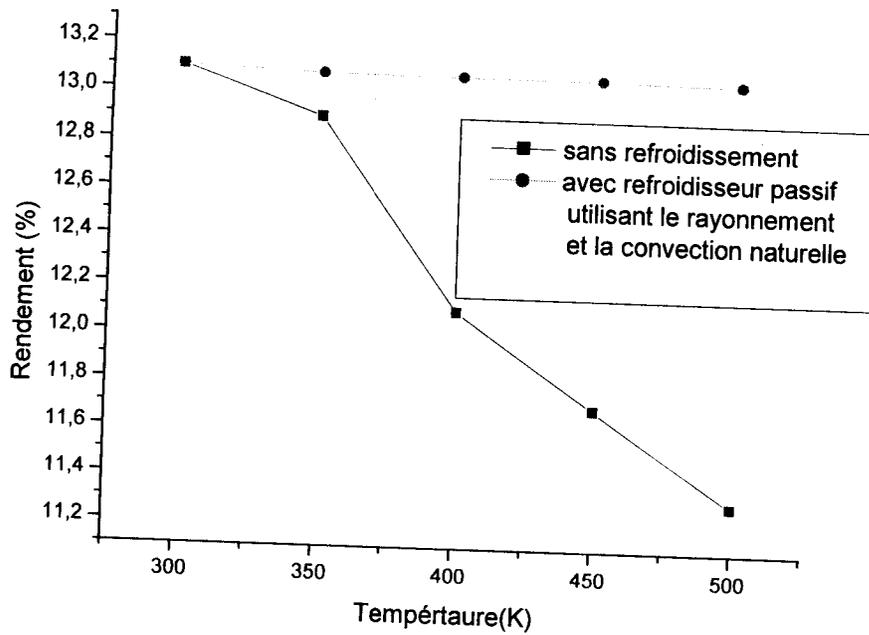


Fig.III.3 Performance d'une cellule à base de Si avec et sans refroidisseur.

II. Optimisation de la conception de la grille pour les photopiles à fortes concentrations solaires

Il n'existe pas la méthode systématique donnant la meilleure forme à adopter. Sous concentration de la lumière, la densité de courant atteint plusieurs ampères par cm^2 ; la géométrie de cette grille devient alors particulièrement délicate à réaliser, les doigts étant parcourus par une densité de courant pouvant être très élevée. Le but à atteindre consiste à réduire le taux d'ombre sans augmenter la résistance série.

La conception de la structure de la grille pour les photopiles à forte concentration est primordiale pour la détermination du rendement énergétique maximum. Si les lignes de la grille sont trop étroites ou trop espacées, une densité de courant importante s'y développe, ce qui provoque une perte de puissance élevée dans les différentes résistances parasites.

Le problème se subdivise, donc, en deux parties principales. Le premier étant le choix de la structure de grille. Cependant, il n'existe pas de méthode mathématique générale de prévision de la meilleure forme, bien que Napoli et al. [4] ont montré qu'une structure croisée de lignes de grille est toujours moins performante que la structure en lignes droites. La Fig. III.4 présente quelques formes géométriques de grille rencontrées dans la littérature [5].

La deuxième partie consiste en l'optimisation de la structure choisie de telle manière que la largeur et l'épaisseur des lignes de la grille entraînent une perte minimale de puissance ou une maximisation de la puissance de sortie. Quand l'optimisation est complète, les résultats optimaux pour des structures variées, sont comparés pour le choix du meilleur.

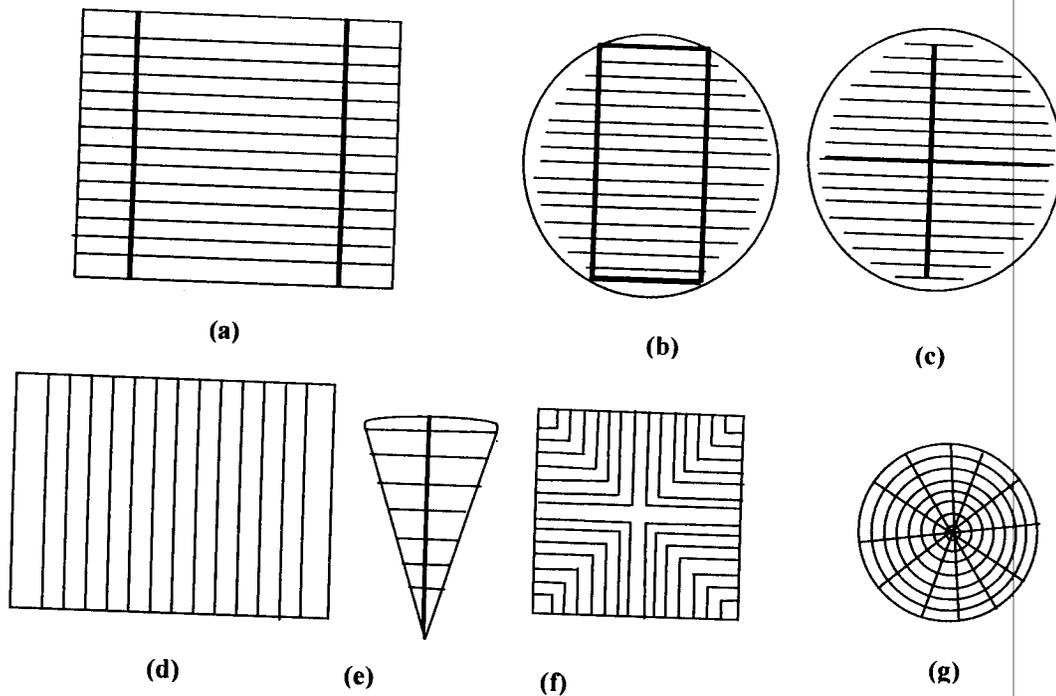


Fig.III.4 : Exemples de géométrie de grille épousant la forme de la surface d'après [5].

Le but de notre étude dans cette section est de faire une comparaison quantitative entre la structure linéaire simple et une structure plus complexe.

Il y a trois sources de pertes dues aux résistances parasites : résistance de couche superficielle, résistance de la grille et la résistance de contact métal-semiconducteur [6]. Le second élément qui contribue à la perte de puissance est l'ombrage de la grille. Il est supposé ici que, pour les cellules à faible surface, le bus principal de collecte se situe à l'extérieur de la zone illuminée et donc, dans ce cas, il peut être large/épais de telle sorte à rendre les pertes négligeables. Nous calculons la fraction

de perte de puissance pour chaque contribution, définie comme la perte de puissance disponible dans cette surface, en minimisant ainsi la fraction totale de puissance en fonction des variables indépendantes. Ceci entraîne un ensemble d'équations simultanées dont la solution donne la géométrie optimale désirée. Il est nécessaire d'inclure une contrainte sur l'épaisseur de la ligne de la grille stipulée comme le rapport largeur/épaisseur qui est pratique du point de vue technologique. Ce rapport est généralement pris pour être de l'ordre de 4, mais les formules utilisées permettent tous les choix. La contrainte, bien que mathématiquement correcte mais irréalisable dans la pratique, due à l'impossibilité d'obtenir une ligne infiniment étroite, infiniment épaisse mais à conductance finie. Il est meilleur de calculer la perte de puissance $\int I^2 dR$ pour chaque contribution plutôt que la chute de tension. Dans le cas de résistance de couche et les lignes de la grille, la méthode de chute de tension surestime la perte de puissance parce que le flux du courant total ne passe pas à travers toute la couche à la ligne [1]. La différence sera prise dans les calculs qui suivent.

II.1 Grille linéaire

La structure de la grille linéaire montrée sur la Fig. III.4.d est la plus simple structure de grille et elle forme, pour nous la base de calcul pour les structures les plus compliquées.

Nous supposons, en premier lieu, que la surface de devant qui porte la grille est éclairée d'une manière homogène et en second lieu que le photocourant ainsi produit s'écoule uniformément dans la couche superficielle jusqu'à ce qu'il atteigne les lignes collectrices de la grille.

II.1.1 Perte due à la résistance de couche entre deux doigts

La résistance carrée ou résistance par carrée d'une couche est la résistance qu'on mesure entre deux électrodes larges de l et distantes de l (Fig. III.5)

Cette résistance est indépendante de la distance l :

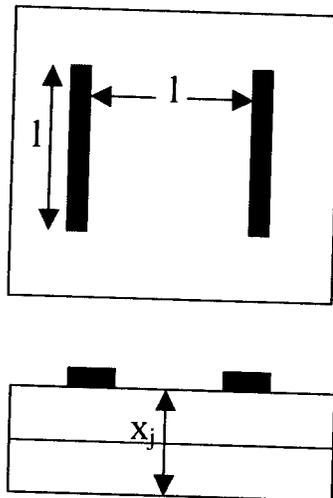


Fig.III.5 : Résistance carrée mesurée entre deux électrodes

Si la couche est uniformément dopée (couche épitaxiée) sa résistance carrée ρ_s se relie à sa résistivité ρ par :

$$\rho_s = \frac{\rho}{x_j} \quad (\text{III.5})$$

x_j : épaisseur de la couche.

Si la couche n'est pas uniformément dopée, sa résistance carrée se relie au profil de concentration de porteur $n(x)$ et de mobilité $\mu_n(x)$ par la relation:

$$\rho_s = \left(\int_0^{x_j} qn(x)\mu_n(x)dx \right)^{-1} \quad (\text{III.6})$$

Nous représentons sur la Fig. III.6 les variations de la résistance carrée avec l'épaisseur de la couche x_j .

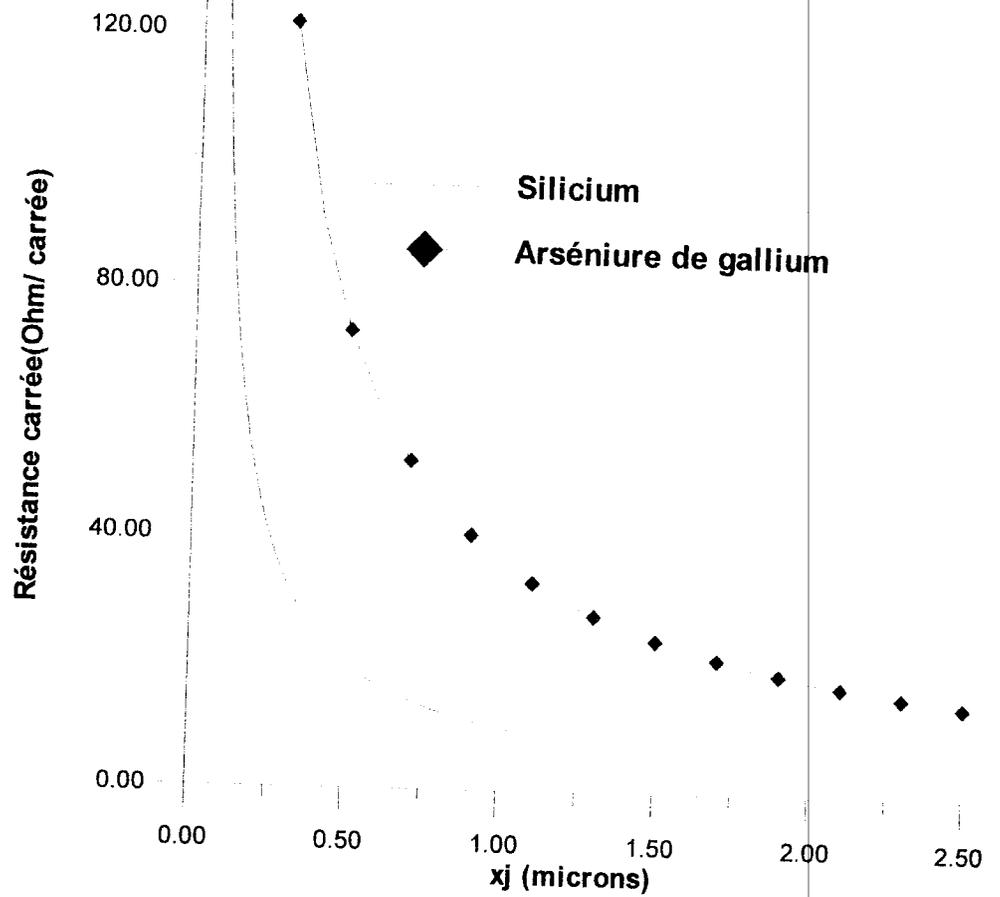
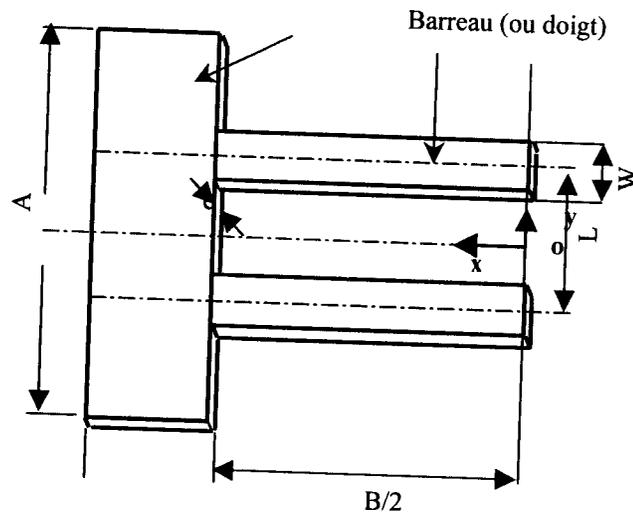


Fig. III.6 Variation de la résistance carrée avec l'épaisseur de la jonction (Si : $N_D=10^{20}\text{cm}^{-3}$, GaAs : $N_D=2.10^{18}\text{cm}^{-3}$).

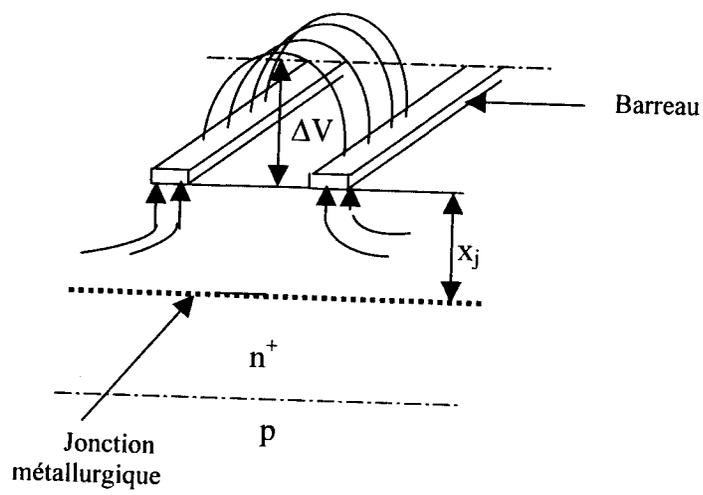
- **Calcul de perte due à la résistance de couche avant**

Le courant qui passe à travers l'émetteur entre deux doigts et collecté à mi-distance par la grille est fonction de la distance par rapport à l'axe de symétrie OO' :

$$I(y) = J_m \frac{B}{2} y \quad (\text{III.7})$$



(a)



(b)

FigIII.7 : a) Motif de grille linéaire, b) Collection du courant par les doigts

La résistance élémentaire de la couche est donnée par la relation suivante :

$$dR = 2\rho_s \frac{dy}{B} \quad (\text{III.8})$$

Cet élément de résistance introduit une chute de tension qui s'exprime par :

$$\Delta V = \int_0^{L/2} I(y) dR$$

$$\text{Soit:} \quad \Delta V = \rho_s \frac{J_m L^2}{8} \quad (\text{III.9})$$

Tant que ΔV reste inférieur au potentiel thermodynamique U_T (26millivolts à 20° C) [5], on peut admettre que la résistance de couche ne dégrade pratiquement pas les performances électriques de la pile solaire. Dans ces conditions, l'espacement L entre les doigts doit satisfaire la condition suivante:

$$L < \sqrt{\frac{8U_T}{\rho_s J_m}} \quad (\text{III.10})$$

La puissance dissipée dans l'élément de résistance dR est donnée par :

$$dP_C = I^2(y).dR$$

$$P_C = \int_0^{L/2} dP_C = \rho_s \frac{J_m^2 BL^3}{48} \quad (\text{III.11})$$

Nous déduisons le facteur de perte de puissance de la couche avant par la relation suivante :

$$\tau_C = \frac{P_C}{P_f} = \rho_s \frac{J_m L^2}{12V_m} \quad (\text{III.12})$$

J_m et V_m sont respectivement les densités du courant et de la tension à la puissance maximale.

P_f est la puissance que pourrait fournir la photopile dans un demi-motif sans perte de puissance telle que :

$$P_f = V_m \cdot J_m \cdot S_{1/2 \text{ motif}} = V_m \cdot J_m \cdot L \cdot B/4 \quad (\text{III.13})$$

$S_{1/2 \text{ motif}}$: Surface d'un demi-motif.

II.1.2 Perte de puissance dans la métallisation de grille [7]

Les pertes de puissance dans la métallisation de la grille se décomposent entre celles provenant des doigts et celles de la ligne collectrice.

(a) Pertes de puissance des doigts

Le courant qui passe dans un doigt, dépend de la distance x par rapport à l'axe de symétrie OO' :

$$I(x) = J_m Lx \quad (\text{III.14})$$

La résistance élémentaire d'un doigt est donnée par :

$$dR = \rho_M \frac{dx}{We} \quad (\text{III.15})$$

ρ_M : Résistivité du métal ($\Omega \cdot \text{cm}$)

La puissance totale perdue dans un doigt est :

$$dP_b = I^2(x) \cdot dR \quad (\text{III.16})$$

Soit :

$$P_b = \int_0^{B/2} dP_b = \rho_M \frac{J_m^2 L^2 B^3}{24We} \quad (\text{III.17})$$

(b) Perte de puissance de la ligne collectrice

Certains auteurs calculent la puissance dissipée le long de la ligne collectrice, en supposant une distribution uniforme des doigts infiniment étroits [8]. Dans ce cas si le courant est recueilli en un seul point ou en deux extrémités de cette ligne, le courant qu'y passe est fonction de y :

$$I(y) = J_m y \frac{B}{2} \quad (\text{III.18})$$

La résistance élémentaire de la ligne collectrice est :

$$dR = \rho_M \frac{dy}{d.e} \quad (\text{III.19})$$

Dans ce cas, la puissance totale dissipée s'exprime par :

$$P_{lc} = 2 \int_0^{L/2} I^2(y) dR = \rho_M \frac{J_m^2 B^2 L^3}{48 d.e} \quad (\text{III.20})$$

Le taux de perte de puissance due à la métallisation de la grille se calcule ainsi :

$$\tau_m = \frac{P_{lc} + P_b}{P_{f(\text{motif})}} = \rho_M \frac{J_m L B^2}{12 W e V_m} + \rho_M \frac{J_m \cdot B \cdot L^2}{24 \cdot V_m \cdot d.e} \quad (\text{III.21})$$

II.1.3 Perte de puissance due à la résistance de contact entre le métal et le semi-conducteur

L'expérience montre que l'accès à une région semiconductrice via un contact métallique présente généralement une résistance plus forte que l'on espère d'un contact idéal. La résistance additionnelle se présente comme une résistance série avec le contact idéal et doit être imputée à la résistance de contact [9]

La grille de collecte métallique assure le contact métal/semiconducteur qui, à son tour, crée une résistance de contact donnée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{\rho_c}{S} \quad (\text{III.22})$$

ρ_c : résistance spécifique de contact (Ohms.cm²)

S : surface de contact (cm²)

On pourrait avoir une résistance faible de contact en augmentant la surface de contact, mais, en contre partie, la densité du courant diminue. Donc, pour remédier

cet inconvénient, on surdope la partie du semiconducteur là où on veut établir le contact ; le courant tunnel étant privilégié par rapport au courant thermoionique au niveau de la jonction métal/semiconducteur (Fig. III.8)

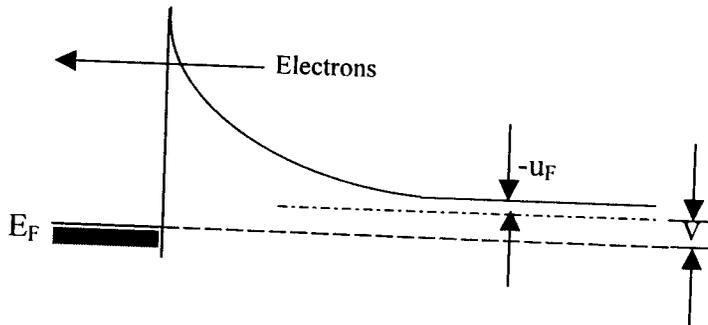


Fig. III.8 Courant tunnel dans la région surdopée du contact métal/semiconducteur.

Nous calculons la résistance spécifique du contact par l'approximation WKB, d'après la caractéristique tunnel I-V [7-9].

$$\rho_C = \frac{dV}{dJ}(V=0) = \left[\frac{A\pi q}{kT \sin(\pi c_1 kT)} \exp\left(\frac{-\Phi_B}{E_{00}}\right) - \frac{Ac_1 q}{(c_1 kT)^2} \exp\left(\frac{-\Phi_B}{E_{00}} - c_1 u_F\right) \right]^{-1} \quad (\text{III.23})$$

ù : A est la constante de Richardson multipliée par T^2 .

$$c_1 = \frac{1}{2E_{00}} \ln\left(\frac{4\Phi_B}{u_F}\right)$$

$$f_1 = \frac{1}{4E_{00}u_F}$$

$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_D}{m^* \epsilon}}$$

N_D : concentration en donneurs (cm^{-3})

Pour $c_1 u_F \gg 1$, On a :

$$\rho_C = \exp\left(\frac{\Phi_B}{\sqrt{N_D}}\right) \quad (\text{III.24})$$

Φ_B Est la barrière de potentiel créé entre le métal et le semiconducteur.

Pour calculer la résistance de contact entre un doigt et le semiconducteur, nous appliquons la formule donnée dans l'équation (III.22)

$$R_C = \frac{2\rho_C}{WB} \quad (\text{III.25})$$

D'où la puissance perdue due à ce contact métal/semiconducteur :

$$P_{ms} = I^2 R_C = \rho_C \frac{J_m^2 L^2 B}{2W} \quad (\text{III.26})$$

Le taux de perte qui correspond au contact métal/semiconducteur dans les doigts est donné par l'expression suivante :

$$\tau_{ms} = \frac{\rho_C J_m L}{WV_m} \quad (\text{III.27})$$

II.1.4 Calcul de taux de perte de puissance par conduction

Le taux de perte par conduction est le rapport entre la puissance totale perdue par effet Joule à la puissance fournie donnée par l'équation (III.13) :

$$\tau_R = \frac{P_T}{P_{fournie}} \quad (\text{III.28})$$

Or:

$$P_T = P_C + P_b + P_{lc} + P_{mc} \quad (\text{III.29})$$

Ce qui donne :

$$\tau_R = \rho_S \frac{J_m L^2}{24V_m} + \rho_M \frac{J_m LB^2}{12WeV_m} + \rho_M \frac{J_m BA^3}{24d.eLV_m} + \rho_C \frac{J_m L}{WV_m} \quad (\text{III.30})$$

II.1.5 Perte due à l'effet d'ombre

Du point de vue optique, le taux de couverture ou d'ombre doit être faible, car la surface cachée par la métallisation est inactive. Du point de vue électrique, le drainage des photoporteurs doit se faire avec le minimum de chute de tension dans le semiconducteur comme dans le métal. Par conséquent il y a un compromis entre ces deux situations, qui tendent à améliorer le rendement de conversion énergétique [13-14].

Le taux d'ombre est défini comme le rapport de la surface métallisée à la surface totale :

$$\tau_O = \frac{S_m}{S_t} \quad (\text{III.31})$$

avec :

$$S_m = W.B \text{ et } S_t = L \frac{B}{2}$$

$$\text{D'où : } \tau_O = 2 \frac{W}{L} \quad (\text{III.32})$$

Les dimensions optimales sont celles qui rendent minimales τ_O et τ_R soit $\tau_O = \tau_R$ [1]. Ce qui sera réalisé plus bas.

II.1.6 Calcul de la résistance série

Au début de ce chapitre, nous avons dit que la résistance série est la résultante de plusieurs effets résistifs [13]. Pour calculer la résistance série, on décompose la photopile solaire en n petites cellules solaires (Fig. III.9 a) dont le schéma équivalent est représenté sur la Fig. III.9 b.

Le calcul des différentes résistances qui composent la résistance série est donnée par :

- La résistance de la grille de collection R_1

$$R_1 = \frac{r_1}{n} \quad (\text{III.33})$$

D'après l'équation (III.15) ;

$$r_1 = 2 \int_0^{B/2} \rho_M \frac{dx}{We}$$

Donc $R_1 = \rho_M \frac{B}{nWe}$ (III.34)

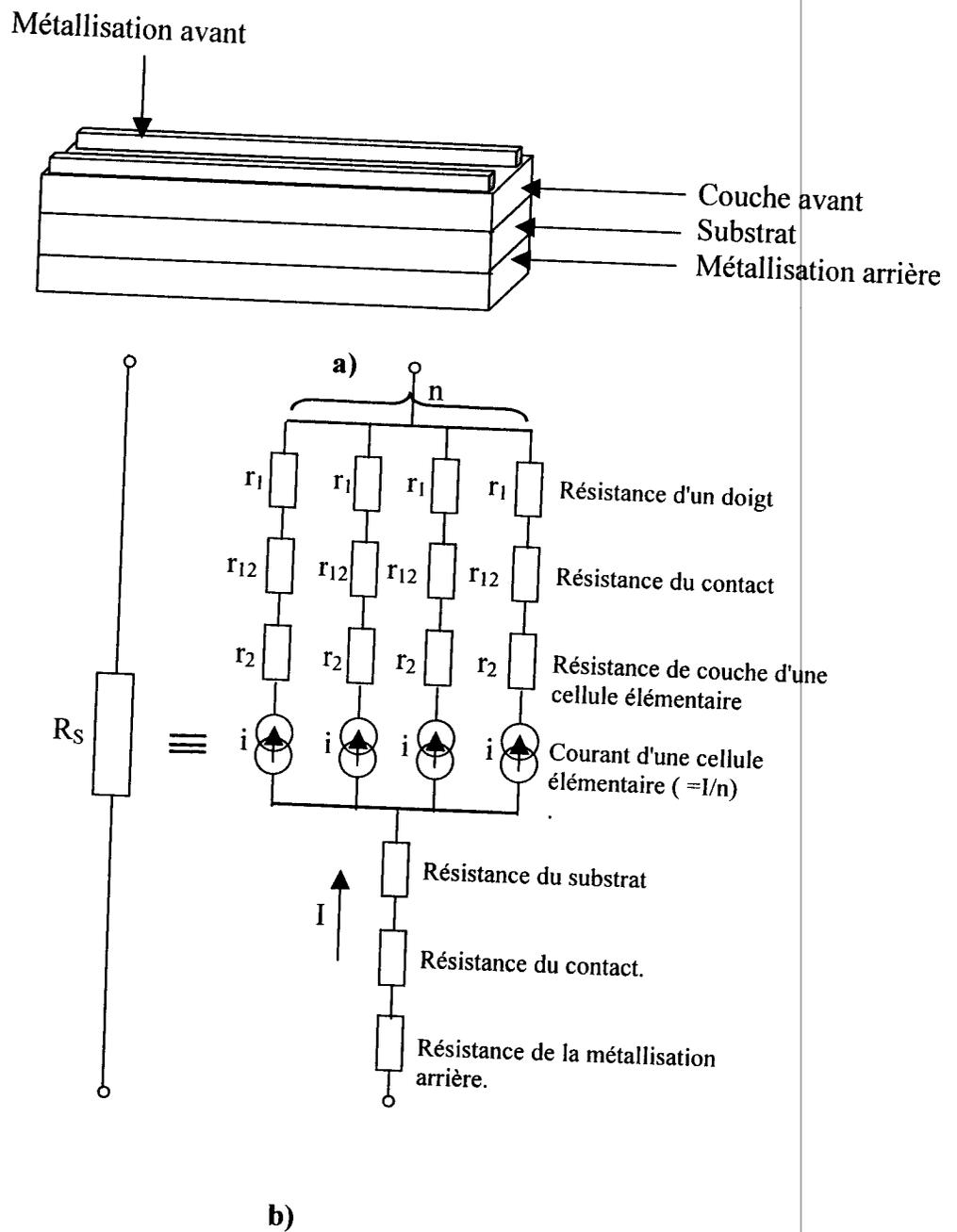


Fig. III.9 : a) Coupe d'une cellule élémentaire,
b) Schéma équivalent de la résistance série.

- La résistance du contact avant R_{12}

$$R_{12} = \frac{r_{12}}{n} \tag{III.35}$$

D'après l'équation (III.25) :

$$r_{12} = \frac{\rho_C}{WB}$$

D'où :

$$R_{12} = \frac{\rho_C}{nWB} \quad (\text{III.36})$$

- **La résistance de la couche avant R_2**

$$R_2 = \frac{r_2}{n} \quad (\text{III.37})$$

r_2 est calculée par la relation (III.8) :

$$r_2 = 4 \int_0^{L/2} 2 \cdot \rho_s \frac{dy}{B} = 4 \frac{\rho_s L}{B}$$

D'où :

$$R_2 = 4 \frac{\rho_s L}{B} \quad (\text{III.38})$$

- **La résistance de substrat R_3**

La résistance de la couche active et celle de la couche tampon, sont négligeables devant la résistance du substrat au vu des épaisseurs respectives.

La résistance du substrat est donnée par :

$$R_3 = \frac{r_3}{n} \quad (\text{III.39})$$

avec :

$$r_3 = \frac{\rho_{SU} e_S}{S_T}$$

ρ_{SU} : résistivité du substrat,

e_S : épaisseur du substrat,

S_T : surface totale de la photopile

- **La résistance du contact arrière R_{34}**

$$R_{34} = \frac{\rho_C}{S_T} \quad (\text{III.40})$$

- **La résistance de la métallisation arrière R_4**

$$R_4 = \frac{\rho_M \cdot e}{S_T} \quad (\text{III.41})$$

Nous calculons donc la résistance série R_S :

$$R_S = \frac{r_1}{n} + \frac{r_{12}}{n} + \frac{r_2}{n} + R_3 + R_{34} + R_4 \quad (\text{III.42})$$

Nota : Les photopiles solaires sont caractérisées par un coefficient optique appelé coefficient de transparence T :

$$T = \frac{\text{Surface totale} - \text{surface de la grille}}{\text{Surface totale}} \quad (\text{III.43})$$

Les tableaux III.2 et III.3 donnent les paramètres caractéristiques les dimensions de la photopile solaire étudiée, les valeurs des différentes résistances qui composent la résistance série, et ainsi que le coefficient de transparence T dont la valeur est mentionnée dans la dernière colonne des deux matériaux argent et silicium.

La cellule solaire étudiée comporte 5 doigts.

Tableau III.2 Paramètres électriques et géométriques de la photopile solaire étudiée.

ρ_S (Ω/μ)	ρ_M ($\Omega.\text{cm}$)	ρ_C ($\Omega.\text{cm}^{-2}$)	ρ_{SU} ($\Omega.\text{cm}$)	W (μm)	L (cm)	e (cm)	e_s (cm)	S_T (cm^2)
100	$1.6.10^{-6}$	10^{-5}	$3.5.10^{-3}$	50	0.4	4	$3.5.10^{-2}$	4

Tableau III.3 Valeurs de différentes résistances composant la résistance série, et coefficient de transparence

R_1 (Ω)	R_{12} (Ω)	R_2 (Ω)	R_3 (Ω)	R_{34} (Ω)	R_4 (Ω)	R_S ($\Omega.\text{cm}^2$)	T
0.32	2.10^{-4}	8	$3.5.10^{-6}$	$2.5.10^{-6}$	$1.6.10^{-10}$	2.08	0.98

Les valeurs des résistances illustrées dans le tableau II.4 montrent que :

- ✓ La résistance de la couche avant R_2 est prédominante par rapport aux autres résistances qui composent la résistance série,
- ✓ Les résistances de substrat, contact arrière, et métallisation arrière sont négligeables par rapport R_1, R_{12}, R_2 ,
- ✓ La résistance série est relativement élevée ; cette valeur élevée provenant essentiellement du fait que la géométrie de la grille de collecte n'est pas optimisée par rapport à la résistance série.

Dans ce cas, le rendement de conversion optimisé pour un taux de 100 soleils est de l'ordre de 16.25 %.

II.1.7 Optimisation des dimensions géométriques de la grille

Nous avons énoncé précédemment dans ce chapitre que les dimensions optimales sont celles qui rendent les taux d'ombre et conduction, minimaux. Cependant nous contentons à optimiser la longueur d'espacement L entre deux doigts consécutifs. De ce fait nous traçons les courbes représentatives des fonctions $\tau_o(L)$ et $\tau_r(L)$ sur le même repère (FigIII.10). Ensuite nous déduisons graphiquement la longueur d'espacement optimal L_{OP} , qui est l'abscisse du point d'intersection des deux courbes. Cette opération graphique se réalise d'une manière précise par une simple manipulation sur le logiciel Matlab.

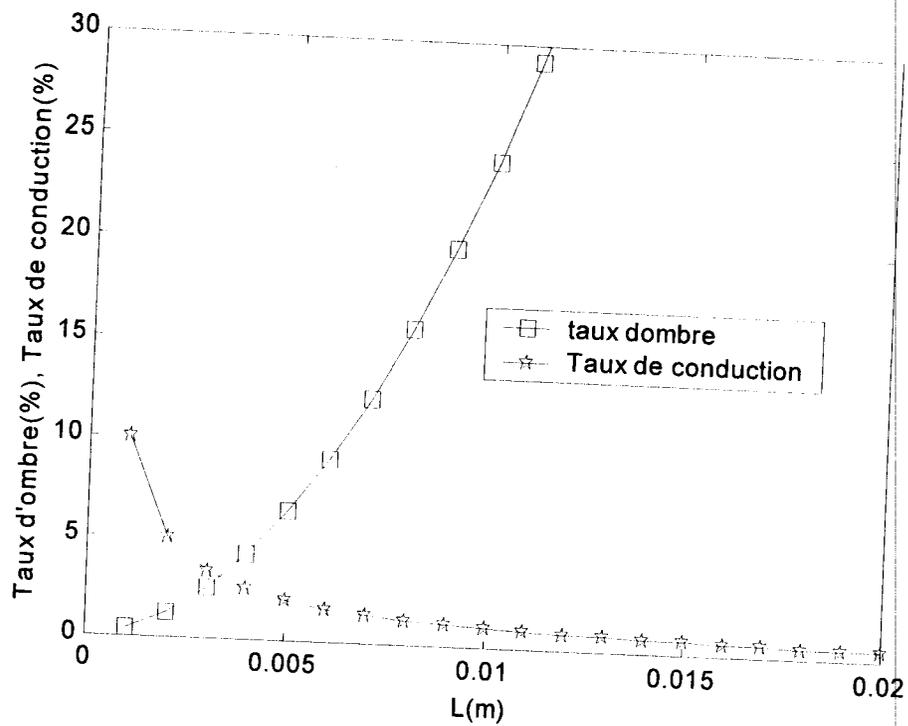


Fig. III.10 Variations des taux d'ombre et conduction avec la longueur d'espacement.

Les résultats obtenus par optimisation sont donnés dans le tableau III.5 :

Tableau III.4 : Résultats de l'optimisation de la longueur d'espacement L entre deux doigts consécutifs.

L_{OP} (cm)	τ_{oop} (%)	τ_{ROP} (%)	R_s ($\Omega.cm^2$)	T
0.331	3.03	3.03	1.73	0.952

Nous constatons que, d'après le tableau II.4, l'optimisation entraîne une diminution de la résistance série et du coefficient de transparence.

Le rendement de conversion énergétique sous 100 soleils s'améliore ainsi à une valeur de 16.73%.

Etant donné le facteur prédominant, la résistance de la couche avant augmente parce que le dopage augmente ou bien l'épaisseur de la zone avant diminue.

Nous montrons, sur la Fig. III.10, l'effet de cette résistance sur le taux de perte total de puissance, qui est la somme des taux d'ombre et conduction. Nous le notons par τ_T .

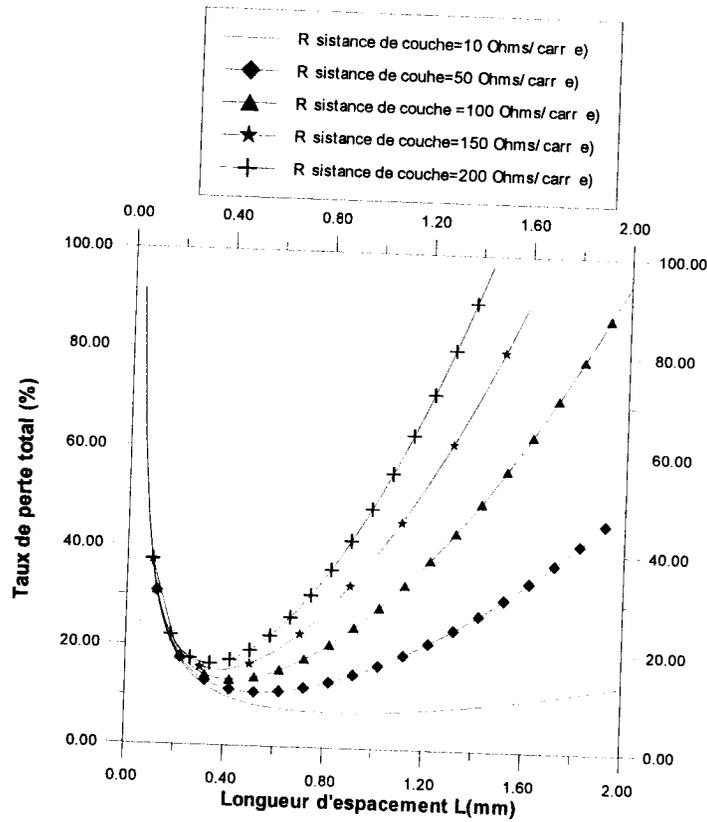


Fig. III.11 : Variation de taux de perte total en fonction de longueur d'espacement L.

II.2 Grille circulaire

Nous proposons dans ce cas un modèle dont le motif est représenté sur la Fig. III.12. Le motif est constitué de deux doigts et n collecteurs avec son axe de symétrie Ox.

Les rayons $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ constituent une progression arithmétique de premier terme r_1 et de raison r_1 .

La puissance qui pourrait être fournie sans aucune perte dans un motif est donnée par :

$$P_f = V_m J_m n^2 r_1^2 \tag{III.44}$$

Afin d'améliorer le rendement de conversion énergétique des photopiles présentant des grilles circulaires semblables à celle que nous étudions ici, nous procédons de la même manière que dans le modèle linéaire étudié précédemment. C'est à dire pour optimiser les dimensions géométriques de la grille, nous optons à minimiser les taux d'ombre et conduction.

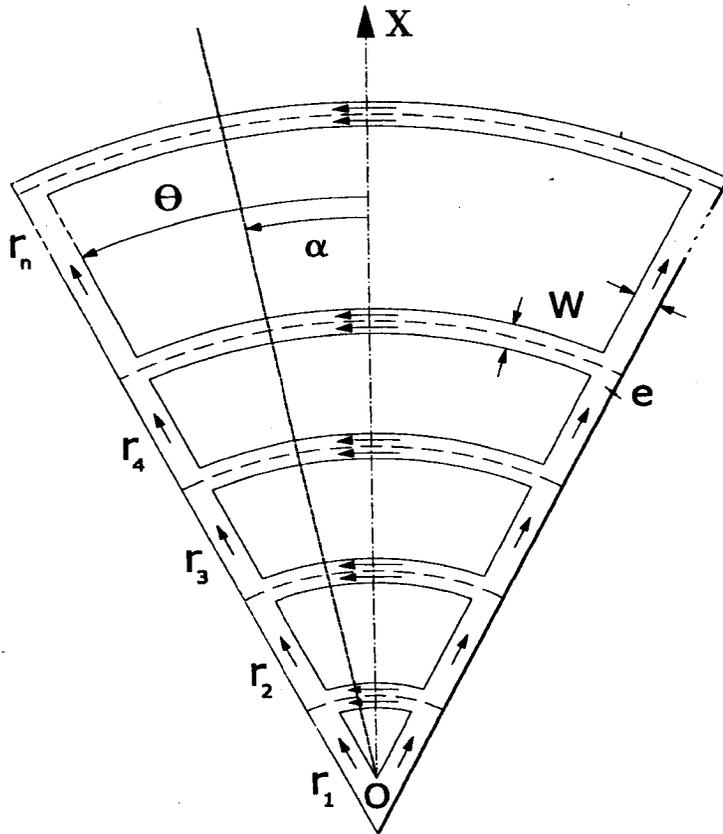


Fig.III.12 Motif d'une grille circulaire [14].

II 2.1 Perte de puissance due à la résistance de la couche avant

Le courant dans la couche active (émettrice) est fonction de l'angle α formé avec l'axe Ox :

$$I(\alpha) = J_m S_{active} \quad (\text{III.45})$$

avec :

$$S_{active} = S_{total} - S_{nCOL} \quad (\text{III.46})$$

$$S_{total} = \frac{\alpha}{2} \left(r_n + \frac{W}{2} \right)^2 \quad (III.47)$$

$$S_{nCol} = \frac{\alpha}{2} W \sum_1^n r_k = \frac{\alpha}{4} W n(n+1) \quad (III.48)$$

Par conséquent :

$$I(\alpha) = J_m \frac{\alpha}{2} A \quad (III.49)$$

avec :

$$A = 2n^2 r_1^2 + Wn(1-n)r_1 + \frac{W^2}{4}$$

La résistance élémentaire de la couche se calcule par :

$$dR = \rho_s \frac{dl_1}{r_1 - \frac{W}{2}} + \sum_2^n dR_k \quad (III.50)$$

$$dR_k = \rho_s \frac{dl_k}{r_k - r_{k-1} - W} = \rho_s \frac{dl_k}{r_1 - W} = \rho_s \frac{\left(r_k - \frac{W}{2} \right) d\alpha}{r_1 - W} \quad (III.51)$$

En remplaçant dR_1 par sa valeur dans l'équation (III.50), on trouve ainsi :

$$dR = \rho_s (1 + B) d\alpha \quad (III.52)$$

où :

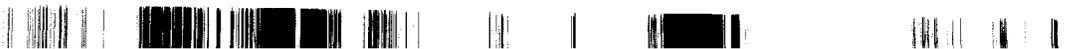
$$B = \frac{n(n-1)r_1 - W(n-1)}{2(r_1 - W)}$$

Nous calculons la puissance dissipée dans la résistance R (pour 1/2 motif) et nous trouvons :

$$P_{dis} = \int_0^\theta I^2(\alpha) . dR = \rho_s \frac{J_m^2 A^2 (1+B)\theta^3}{48} \quad (III.53)$$

Le rapport entre cette puissance dissipée et la puissance fournie (Eq.III.44) donne le taux de perte de puissance dû à la résistance de la couche avant qui s'exprime par :

$$\tau_c = \rho_s \frac{J_m^2 A^2 (1+B)\theta^2}{24 . V_m n^2 r_1^2} \quad (III.54)$$



II 2.2-Pertes dans la métallisation de la grille

(a) Doigts

Le courant qui passe dans un doigt de largeur W et d'épaisseur e dépend du rayon r :

$$I(r) = J_m \theta r^2 \quad (\text{Pour un motif}) \quad (\text{III.55})$$

L'élément de résistance se calcule par :

$$dR = \rho_M \frac{dr}{W.e} \quad (\text{III.56})$$

Nous calculons la puissance perdue dans un doigt par la relation suivante :

$$P_{dis} = \int_0^{r_n} I^2(r) dR = \rho_M \frac{J_m^2 \theta^2 n^5}{5We} r_1^5 \quad (\text{III.57})$$

(b) Collecteurs

En se référant au paragraphe III.1.2. (b), nous calculons la puissance perdue dans les collecteurs constituant le motif :

$$dP_{dis} = \sum_{k=1}^n dP_k \quad (\text{III.58})$$

Considérons un collecteur d'ordre k , nous évaluons le courant qui le traverse par :

$$I_k(\alpha) = J_m \frac{\alpha}{2} r_k^2 \quad (\text{III.59})$$

La résistance élémentaire calculée pour un collecteur d'ordre k , est :

$$dR = \rho_M \frac{r_k}{We} d\alpha \quad (\text{III.60})$$

Cette résistance élémentaire est le siège d'une perte de puissance dont l'expression est donnée par :

$$P_{dis} = \sum_1^n \left(\int_0^{2\theta} I_k^2(\alpha) dR_k \right) = \frac{2}{3} \rho_M \frac{J_m^2 \theta^3}{We} \sum_1^n r_k^5 \quad (\text{III.61})$$

Par conséquent le taux de perte de puissance due à la métallisation de la grille se calcule par la relation suivante :

$$\tau_m = \rho_M \frac{J_m \theta n^3 r_1^3}{5 W e V_m} + \frac{2}{3} \rho_M \frac{J_m \theta^2}{W e V_m n^2 r_1^2} \sum_1^n r_k^5 \quad (\text{III.62})$$

II 2.3 Perte de puissance due au contact métal/semiconducteur

D'après l'équation (III.22), nous pouvons écrire :

$$R_{\text{contact}} = \frac{\rho_C}{S_T} \quad (\text{III.63})$$

où S_T est la surface totale du contact métal/semi-conducteur. Elle est donnée par :

$$S_T = S_{\text{doig.}} + S_{\text{col.}}$$

$$\text{avec } S_{\text{col.}} = 2W \cdot \theta \cdot \sum_1^n r_k, \quad S_{\text{doig.}} = 2W r_n$$

$S_{\text{doig.}}$: surface du contact entre le métal du doigt et le semi-conducteur ,

$S_{\text{col.}}$: surface du contact entre le métal de collecteur et le semi-conducteur.

Par conséquent :

$$R_C = \frac{\rho_C}{2W\theta \sum_1^n r_k + 2W.r_n} \quad (\text{III.64})$$

La puissance dissipée dans cette résistance est donnée par la relation suivante:

$$P_{\text{dis}} = \rho_C \frac{J_m^2 r_1^4 n^3 \theta^2}{2W r_1 + W\theta(n+1)} \quad (\text{III.65})$$

D'où le taux de perte de puissance causée par le contact métal/semiconducteur dans la photopile :

$$\tau_{ms} = \frac{\rho_C J_m r_1^2 n \theta}{[2W r_1 + W \theta (n+1)] V_m} \quad (\text{III.66})$$

Le calcul de différents taux de pertes permet de déduire le taux de perte de puissance par conduction τ_R qui est donné par :

$$\tau_R = \tau_C + \tau_m + \tau_{ms} \quad (\text{III.67})$$

II.2.4 Perte de puissance due à l'effet d'ombre

Comme nous avons énoncé dans le paragraphe I.1, l'occultation est une forme de perte de puissance dont la minimisation entraîne une amélioration du rendement de conversion énergétique. La définition du taux d'ombre nous permet de le calculer par :

$$\tau_O = \frac{S_m}{S_t} \quad (\text{III.68})$$

avec :

$S_t = r_1^2 n^2 \theta$: Surface métallisée par la grille de collecte.

$S_m = S_{m\text{doigt}} + S_{m\text{COL}} = 2nr_1W + \theta \sum_1^n \left[\left(r_k + \frac{W}{2} \right)^2 - \left(r_k - \frac{W}{2} \right)^2 \right] = W\theta n(n+1)r_1$ (Surface totale de la couche avant).

Par conséquent :

$$\tau_O = \frac{2W + W\theta(n+1)}{\theta r_1 n} \quad (\text{III.69})$$

L'expression (III.69) montre que le taux d'ombre est fonction des dimensions W , r_1 , θ et n de la grille. Nous représentons sur les Fig. III.13, III.14 et III.15, les variations de taux d'ombre avec W , θ et n (nombre des collecteurs dans un motif).



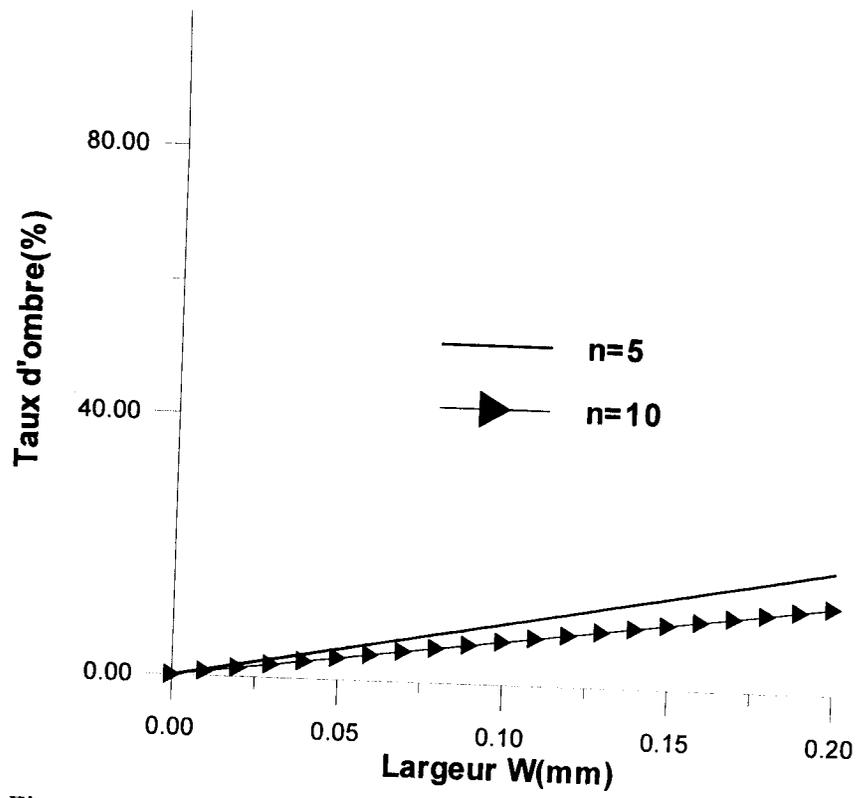


Fig. III.13 Variations du taux d'ombre avec la largeur d'un doigt.

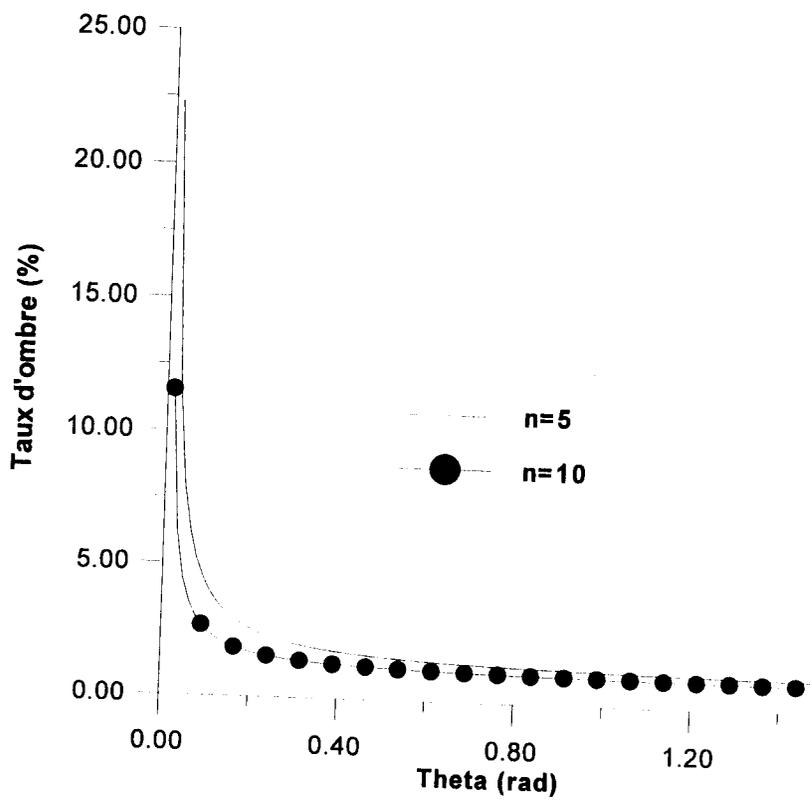


Fig. III.14 Variations du taux d'ombre avec l'angle entre deux doigts consécutifs.



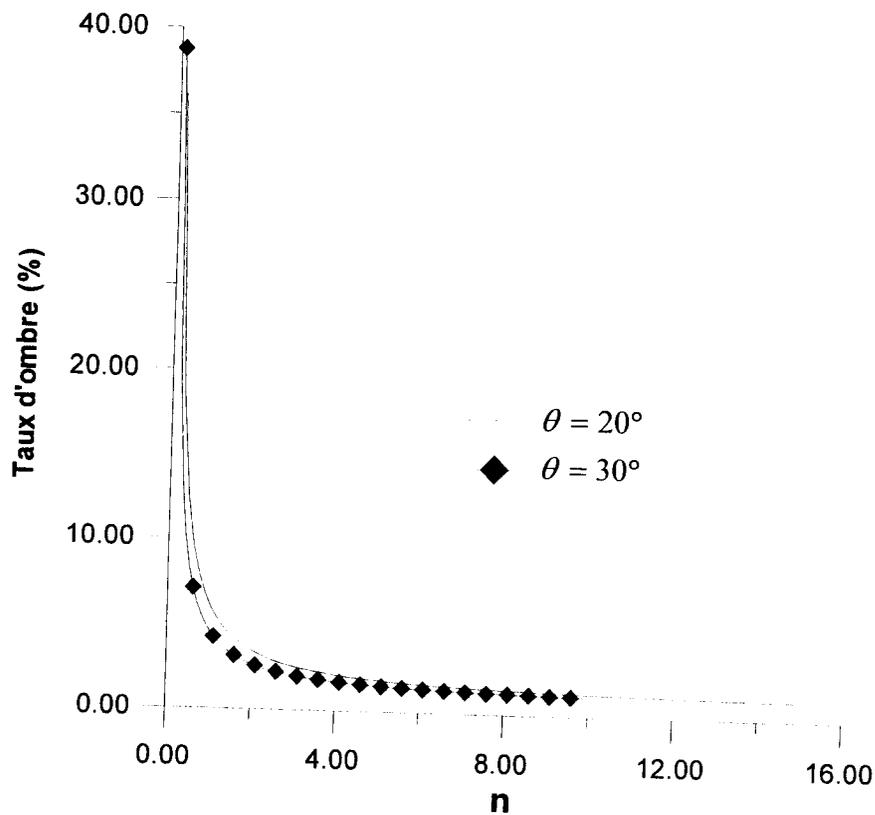


Fig. III.15 Variations du taux d'ombre avec le nombre n des collecteurs.

II.2.5 Calcul de la résistance série

D'après le calcul réalisé au paragraphe III.1.6, nous avons déduit que les résistances de substrat, contact arrière et métallisation arrière sont négligeables par rapport aux autres composantes de la résistance série. De ce fait, nous nous contentons, dans ce paragraphe de calculer la résistance de la couche avant, la résistance de la métallisation de la grille et la résistance du contact métal/semiconducteur.

◆ Résistance de la couche avant

$$R_C = \frac{r_c}{m} \quad (\text{III.70})$$

où :

r_c se calcule par la relation (III.50) et m représente le nombre de motifs dans une photopile solaire.

$$r_c = 2\rho_s(1+B) \int_0^\theta d\alpha = 2\rho_s(1+B)\theta \quad \text{avec } B = \frac{n(n-1)r_1 - W(n-1)}{2(r_1 - W)}$$

◆ **Résistance de métallisation de la grille**

(a) **Doigts**

$$R_d = \frac{r_d}{m} \quad (\text{III.71})$$

r_d se calcule par l'équation (III.56)

$$r_d = \frac{\rho_M}{We} \int_0^{n_1} dr = \rho_M \frac{nr_1}{We}$$

(b) **Collecteurs :**

$$R_{cl} = \frac{r_{cl}}{m} \quad (\text{III.72})$$

$$r_{cl} = \int_0^{2\theta} \frac{\sum_1^n dR_k}{n} \quad n \text{ est le nombre des lignes collectrices}$$

dR_k se calcule par la relation (III.60).

Nous trouvons ainsi :

$$r_{cl} = \frac{2\rho_M(1+n)r_1\theta}{We}$$

◆ **Résistance de contact métal/semiconducteur**

$$R_{CS} = \frac{r_{CS}}{m} \quad (\text{III.73})$$

La résistance r_{CS} est calculée par la relation (III.63)

$$r_{CS} = \frac{\rho_C}{2W\theta r_1^2 n(1+n) + 2Wr_1 n}$$

Par suite, nous calculons la résistance série totale par la relation :

$$R_S = R_C + R_d + R_{cl} + R_{CS} \quad (\text{III.74})$$

II.2.6 Optimisation des dimensions géométriques

Le calcul de la résistance série sans optimiser les dimensions géométriques de la grille de collecte donne une valeur élevée. Par conséquent, le rendement de conversion énergétique décroît. Parmi ces dimensions géométriques, on se contente d'optimiser le premier rayon r_1 .

La Fig. III.16 représente les variations du taux d'ombre et du taux de conduction avec le rayon r_1 pour différentes résistances carrées. L'intersection de leurs courbes donne le rayon optimal r_{1op} .

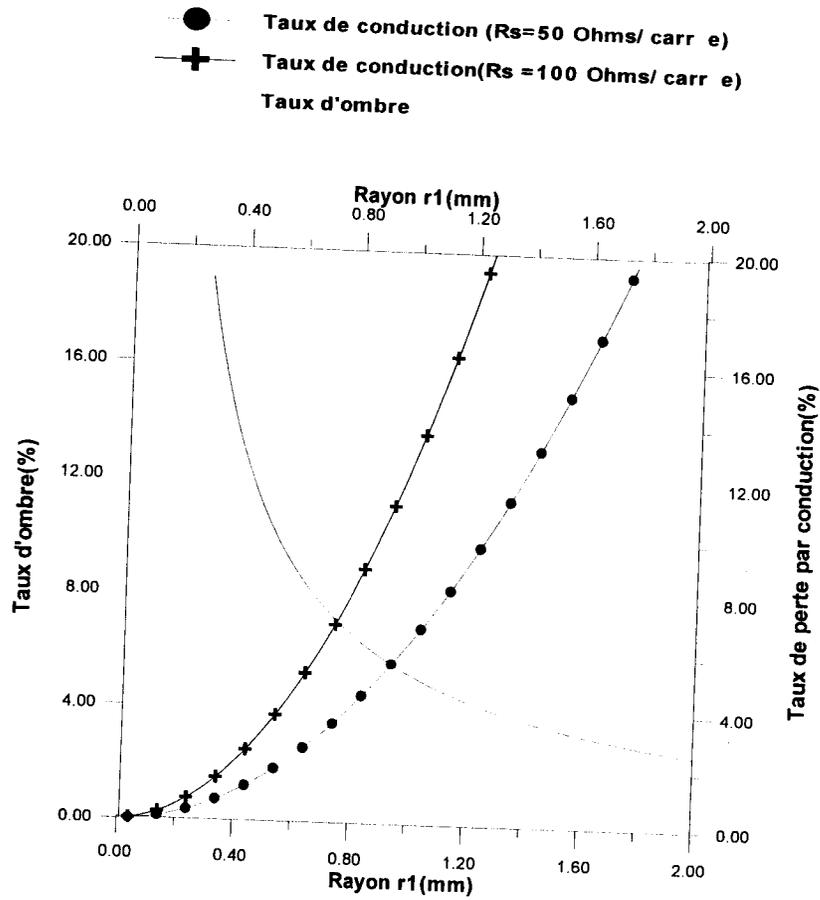


Fig. III.16 : Variation du taux d'ombre et du taux de conduction avec le rayon r_1 du premier collecteur.

Les dimensions et les paramètres électriques des matériaux silicium et argent utilisés dans notre optimisation dans une photopile de surface 4 cm^2 , sont donnés dans le tableau III.5 :

Tableau III.5 : Dimensions et paramètres électriques utilisés dans l'optimisation du rayon r_1 .

n	W (μm)	e (μm)	θ ($^\circ$)	ρ_M ($\Omega \cdot \text{cm}$)	ρ_C ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
5	20	4	20	$1.6 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}



Nous déduisons d'après la Fig. III.16 :

$$\tau_{ROP} (\%) = \tau_{OOP} (\%) = 5.45\% \text{ pour un rayon optimal } r_{1op} = 1\text{mm} (\rho_s = 50\Omega/\square)$$

$$\tau_{ROP} (\%) = \tau_{OOP} (\%) = 7\% \text{ pour un rayon optimal } r_{1op} = 0.7\text{mm} (\rho_s = 100\Omega/\square)$$

Les rayons optimaux sont utilisés pour le calcul de la résistance série.

Le tableau III.6 résume les valeurs des différentes résistances qui composent la résistance série R_S :

Tableau III.6 : Valeurs des résistances composant la résistance série.

	$R_C (\Omega)$	$R_d (\Omega)$	$R_{CS} (\Omega)$	$R_{cl} (\Omega)$	$R_S (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
$\rho_s = 50\Omega/\square$ $r_{1op} = 1\text{mm}$	9.09	9.32×10^{-7}	4.43×10^{-7}	8.1×10^{-7}	2.27
$\rho_s = 100\Omega/\square$ $r_{1op} = 0.7\text{mm}$	18.53	6.52×10^{-7}	6.34×10^{-7}	5.67×10^{-7}	4.63

Pour un taux de concentration de 100 soleils, nos résultats d'optimisation sont le suivant :

- Pour une résistance série égale à $2.27 \Omega \cdot \text{cm}^2$, le rendement étant 16.293%,
- Pour $R_S = 4.63 \Omega \cdot \text{cm}^2$, le rendement est de 15.98%.

Conclusion

Etant donné le canal du photocourant généré, la grille dont les dimensions sont optimisées améliore le rendement de conversion énergétique. Cette optimisation nécessite donc le bon choix de la géométrie de la grille, ainsi que de son matériau de fabrication. L'étude faite sur les deux modèles géométriques de la grille (linéaire et circulaire), appliqués pour deux photopiles de même surface (4 cm^2), permet de conclure que :

- ✓ Le modèle linéaire (pour $\rho_s = 50\Omega/\square$, le taux d'ombre=3.03% et la résistance série=1.73 Ω/cm^2) est plus performant que celui du modèle circulaire (pour $\rho_s = 50\Omega/\square$ le taux d'ombre=6% et la résistance série=2.27 Ω/cm^2).
- ✓ La résistance série est influencée principalement par la résistance de la couche avant pour les deux modèles étudiés.
- ✓ La réduction de la résistance série se fera au détriment du coefficient de transparence de la grille. Il s'agit donc de faire un compromis entre la valeur de résistance série et celle de taux de transparence de la photopile, pour l'obtention d'un rendement énergétique élevé.
- ✓ La résistance de la métallisation de la grille vient en deuxième position. Nous pouvons réduire sa valeur en augmentant simplement l'épaisseur des doigts.
- ✓ Le taux d'ombre constitue une forme de perte pour les deux modèles. Sa minimisation ne doit pas être réalisée au détriment du coefficient de transparence. Donc, nous sommes amenés, dans notre étude, à choisir un compromis, en introduisant ainsi un autre facteur de perte dit 'taux de conduction' qui représente les pertes par effet Joule. A partir du point d'intersection des deux courbes (taux de conduction et le taux d'ombre) nous déduisons les dimensions géométriques de la grille de collecte optimisées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Thérès, cellules solaires sous concentration solaires. Thèse de Doctorat, Toulouse (1981).
- [2] A.Laugier et J.-A.Roger, Les Photopiles Solaires : Du matériau au dispositif, du dispositif aux application, Edition Technique & Documentation (1980), p.154.
- [3] Anja Royne, Christopher J.Dey,David R.Mills,Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination :a critical review, Sol. En. Ma & Sol. Cells. Vol. 86(4) (2005).
- [4] A.R.Moore, An optimized Grid Design for a Sun-Concentrator Solar cell, RCA review, Vol.40 Jun 1979 pp.141-151.
- [5] M.Orgeret, Les piles solaires, Edition MASSON, 1985.
- [6] Hamid EL OMARI, Amélioration des Contacts Ohmiques sérigraphies des cellules solaires en silicium multicristallin, Thèse de Doctorat, (1994) Univ. Lyon (France).
- [7] A.Antonini, M.Stefancich, D.Vincenci, C.Malagù, F.Bizzi, A.Ronzonni, G.Martinelli, Contact grid Optimization methodology for front contact concentration solar cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.80 (2003) pp.155-166
- [8] R. Daniel., S.H.BURGERD, Proceedings Of the Symposium on materials an New processing Technologies for Photovoltaic.p141, 1982.
- [9] JaeSung You, Jinmo Kang, Donghwan Kim, James Jungho Pak, Choon Sik Kang, Copper metallization for crystalline Si Solar cells , Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.79 (2003) pp.339-345.
- [10] SZE, S.M. Physics of Semiconductor devices.Second Edition. New York: Wiley, 1969, p868.

- [11] A.K.Sharma, R.Gopal, R.Dwivedi and S.K.Srivastava, Modified Lumped Series resistance model of solar cells under shadow conditions, *Photonics* Vol.33, N°3, pp.309-312 1990.
- [12] L.S. Napoli, G.A.Swartz, S.G.Liu, N.Klein, D.Fairbanks, and D.Tamutus, High level Concentration Of Sunlight on Silicon Solar cells, *RCA Review*. Vol.38 March 1977 pp-76-107.
- [13] A.Cheknane, B.Benyoucef and R.Zerdoum, Determination of series resistance in solar cell, *Pro. International Cong.On Photovoltaic and Wind Energies, Tlemcen* Dec20-22 (2003) p150.
- [14] Ali Cheknane, B.Benyoucef, J,-P Charles et R.Zerdoum, Optimisation et Conception d'une Grille Collectrice Appliquée aux Photopiles Fonctionnant sous Haute Concentration Solaire, *Rev. Energ. Ren.* Vol.7 (2) (2004)1-16.

CHAPITRE IV

METHODES NUMERIQUES APPLIQUEES A LA DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES SOUS CONCENTRATION SOLAIRE



CHAPITRE IV**METHODES NUMERIQUES APPLIQUEES A LA DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES SOUS CONCENTRATION SOLAIRE****Introduction**

La résistance série est un facteur de perte de puissance qui baisse la puissance maximum de sortie. Les méthodes appliquées généralement pour la détermination de la résistance série R_s sont classées ici selon le type de test employé :

***Tests sous obscurité**

On peut citer :

- méthode statique [1],
- méthode dynamique [2],

***Tests sous illumination**

Tels que :

- méthode de pente au point ($V_{CO}, 0$) [3],
- méthode de deux caractéristiques [4],
- méthode du flash de lampe [5],
- méthode de Quanxi Jia et Anderson [6],
- méthode de Singal [7],
- méthode de puissance maximum [8],
- méthode de la surface [9],
- méthode de la surface généralisée [10],
- méthode de la différence entre le photocourant et le courant de court-circuit [11],
- méthode d'optimisation verticale [12-13],
- méthode analytique de quatre points modifiée [14],
- méthode d'optimisation de conductance [15],



- technique de conductance simple (méthode de Werner) [16],
- méthodes d'analyses basées sur le modèle à une ou deux exponentielles [17].

Dans ce chapitre, nous calculons les paramètres électriques régissant le fonctionnement de la photopile selon les deux modèles (modèle à une diode et le modèle à deux diodes) à l'aide de Matlab. Par le Simulink, nous réalisons ainsi une simulation appliquée sur quelques échantillons.

I. Calcul de la résistance série en utilisant le Simulink

I.1 Modèle à une seule diode.

L'équation courant-tension pour une photopile solaire modélisée à une seule diode est donnée par :

$$I = I_{PH} - I_S \left[\exp\left(\frac{V + R_S I}{n_f U_T}\right) - 1 \right] - \frac{(V + R_S I)}{R_{SH}} \quad (IV.1)$$

L'équation (IV.1) contient 5 paramètres. C'est une équation implicite et non linéaire (implicite parce qu'elle est de la forme $I=f(I, V)$, et non linéaire car c'est une somme d'un terme linéaire et autre exponentiel). Cette équation n'ayant pas de solution analytique, le calcul de ses paramètres peut être fait en utilisant une méthode d'ajustement numérique sur micro-ordinateur.

I.1.1 Principe du calcul des paramètres

A partir de la courbe $I(V)$ expérimentale, on relève les caractéristiques :

- Tension de circuit ouvert V_{CO} ;
- Courant de court-circuit I_{CC} ;
- Pentes de la caractéristique $I(V)$ au point $V=V_{CO}$ et au point $I=I_{CC}$

$$R_{S0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{V=V_{CO}}, R_{SH0} = -\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{CC}} \quad (IV.2)$$

Lorsque $V=0$, $I=I_{CC}$

$$I_{CC} = CI_{PH} - I_S \left[\exp\left(\frac{R_S I_{CC}}{n_f U_T}\right) - 1 \right] - \frac{R_S I_{SC}}{R_{SH}} \quad (IV.3)$$

Lorsque $I=0$, $V=V_{CO}$

$$0 = I_{PH} - I_S \left[\exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_{SH}} \quad (IV.4)$$

L'équation (IV.3) moins l'équation (IV.4) donne :

$$I_{CC} - \frac{V_{CO}}{R_{SH}} + \frac{R_S I_{CC}}{R_{SH}} = I_S \left[\exp\left(\frac{V_{CC}}{n_f U_T}\right) - \exp\left(\frac{R_S I_{CC}}{n_f U_T}\right) \right] \quad (IV.5)$$

D'où :

$$I_S = \frac{I_{SC} \left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}} \right) - \frac{V_{CO}}{R_{SH}}}{\exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right) - \exp\left(\frac{R_S I_{CC}}{n_f U_T}\right)} \quad (IV.6)$$

Si nous dérivons l'équation (IV.1) par rapport au courant I. Nous obtenons:

$$\frac{dI}{dI} = 1 = \left(\frac{dV}{dI} + R_S \right) \left[-\frac{I_S}{n_f U_T} \exp\left(\frac{V + R_S I}{n_f U_T}\right) - \frac{1}{R_{SH}} \right] \quad (IV.7)$$

Les conditions de court-circuit et de circuit ouvert appliquées à l'équation (IV.7) et en utilisant l'équation (IV.2) permettent d'écrire :

$$\frac{I_s}{U_T} \exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right) + \frac{1}{R_{SH}} = \frac{1}{R_{SO} - R_s} \quad (IV.8)$$

$$-\frac{1}{R_{SH0} - R_s} = \frac{1}{R_{SH}} + \frac{I_s}{U_T} \exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{n_f U_T}\right) \quad (IV.9)$$

Les équations (IV.6) et (IV.8) donnent :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s = R_{SO} - \frac{1}{\frac{1}{R_{SH}} + \frac{1}{n_f U_T} \left[\frac{I_{CC} \left(1 + \frac{R_s}{R_{SH}}\right) - \frac{V_{CO}}{R_{SH}}}{\exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right) - \exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{n_f U_T}\right)} \right] \exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right)} \\ R_{SH} = \frac{1}{\lambda - \frac{1}{n_f U_T} \left[\frac{I_{CC} \left(1 + \frac{R_s}{R_{SH}}\right) - \frac{V_{CO}}{R_{SH}}}{\exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right) - \exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{n_f U_T}\right)} \right] \exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{n_f U_T}\right)} \end{array} \right. \quad (IV.10)$$

avec: $\lambda = \frac{1}{R_{SH0} - R_s}$

où R_{s0} et R_{SH0} peuvent être calculées par une interpolation polynomiale de la caractéristique I-V (mesures expérimentales) par un polynôme de degré satisfaisant un bon « fitting » de la caractéristique. Dans nos modèles ce degré vaut 5 ou 6. La relation (IV.10) est un système à deux équations non linéaires dont les inconnus sont : R_s et R_{SH} . L'outil utilisé ici pour résoudre ce système est le Simulink (Matlab). La figure IV.1 montre le bloc de Simulink de résolution.



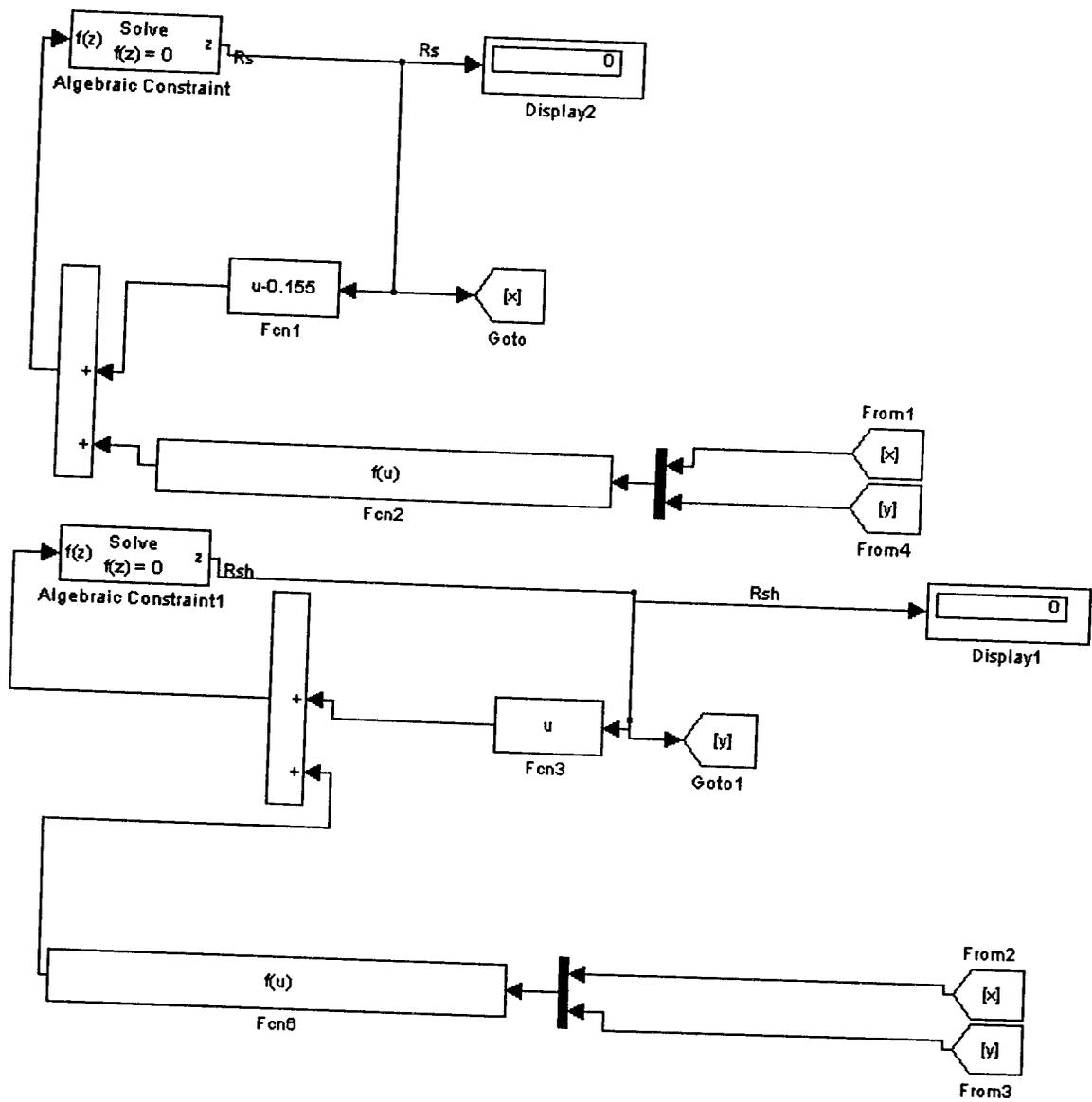


Fig.VI.1 Bloc1 : Calcul de R_S et R_{SH} par le Simulink (Matlab)

Après avoir calculé R_S et R_{SH} nous passons ensuite au calcul des autres paramètres tels : le facteur de qualité, le courant de saturation et le photocourant :

i)Le facteur de qualité n_f

Nous calculons le facteur de qualité à partir de l'équation implicite (IV.1) :



$$I_{PH} - I_s \left(1 + \frac{R_s}{R_{SH}} \right) - \frac{V_m}{R_{SH}} = I_s \left[\exp \left(\frac{V_m + R_s I_m}{n_f U_T} \right) - 1 \right] \quad (IV.11)$$

I_m et V_m sont le courant et la tension pour la puissance maximale.

L'équation (IV.11) est une équation non linéaire, à 3 inconnus, n_f , I_m et V_m .

Pour se faire, nous calculons d'abord I_m et V_m :

La puissance débitée à la sortie de la photopile est :

$$P = V \cdot I \quad (IV.12)$$

Nous tirons V à partir de l'équation (IV.1) et on la remplace dans l'équation (IV.12). On aura :

$$P = I \cdot n_f \cdot U_T \ln \left(\frac{I_s - C I_{PH} - I}{I_s} \right) - R_s I^2 \quad (IV.13)$$

Dérivons l'équation (IV.13) par rapport au courant I , et résolvons l'équation :

$$\frac{dP}{dI} = 0 \quad (IV.14)$$

L'équation (IV.14) est une équation non linéaire dont l'inconnue est le courant I_m . Pour la résoudre, nous appliquons la méthode de Newton-Raphson modifiée (NRM) qui donne une précision meilleure que celles obtenus par d'autres méthodes numériques. La résolution numérique sur micro-ordinateur, donne le courant I_m .

Le calcul de la tension V_m , est donné par :

$$V_m = U_T n_f \ln \left(\frac{I_s + C I_{PH} - I_m}{I_s} \right) - I_m R_s \quad (IV.15)$$

N.B. Le facteur de qualité n_f , le courant de saturation I_s et le photocourant I_{PH} étant auparavant initialisés. Le facteur de qualité n_f est calculé après avoir déterminé I_m et V_m .

ii) Le courant de saturation I_s et le photocourant I_{PH} .

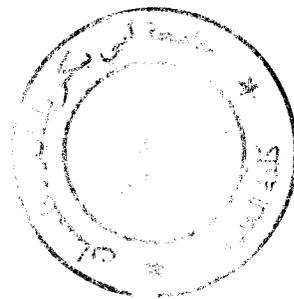
L'équation (VI.5) permet de déterminer le courant de saturation I_s :

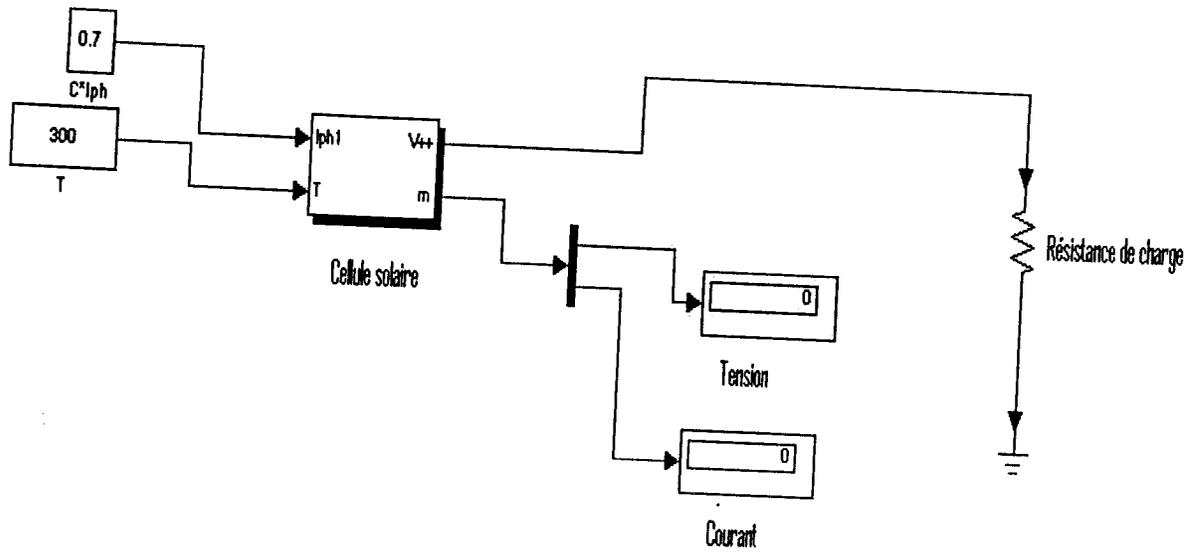
$$I_s = \frac{I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{SH}} \right) - \frac{V_{CO}}{R_{SH}}}{\exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right) - \exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{n_f U_T}\right)} \quad (VI.16)$$

L'équation (IV.4) donne le photocourant I_{PH} :

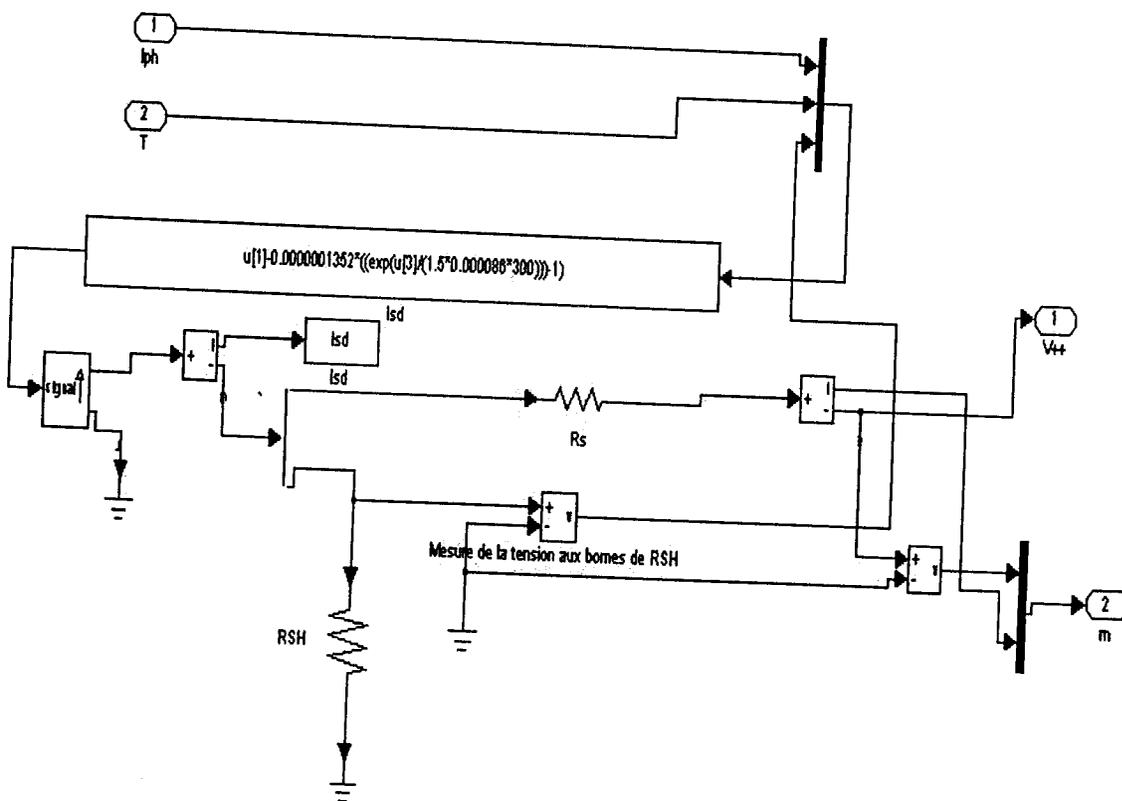
$$I_{PH} = I_s \left[\exp\left(\frac{V_{CO}}{n_f U_T}\right) - 1 \right] + \frac{V_{CO}}{R_{SH}} \quad (IV.17)$$

Afin de pouvoir varier chaque fois la concentration de l'illumination solaire C nous avons réalisé le bloc Simulink de la figure IV.2.





a)



b)

Fig.IV.2 Bloc2 : Modélisation de la cellule solaire sous concentration solaire par Simulink : a) Bloc de simulation, b) Détail du bloc de simulation.

Nous utilisons à la sortie de la cellule une résistance de charge. Par variation de sa valeur nous pouvons ainsi varier le courant I avec la tension V , de cette manière nous obtenons les caractéristiques courant-tension pour différentes concentrations solaires.

I.1.2 Organigramme

La Fig.IV.3 représente l'organigramme de l'enchaînement de calcul, pour simuler quelques échantillons sous concentration solaire.

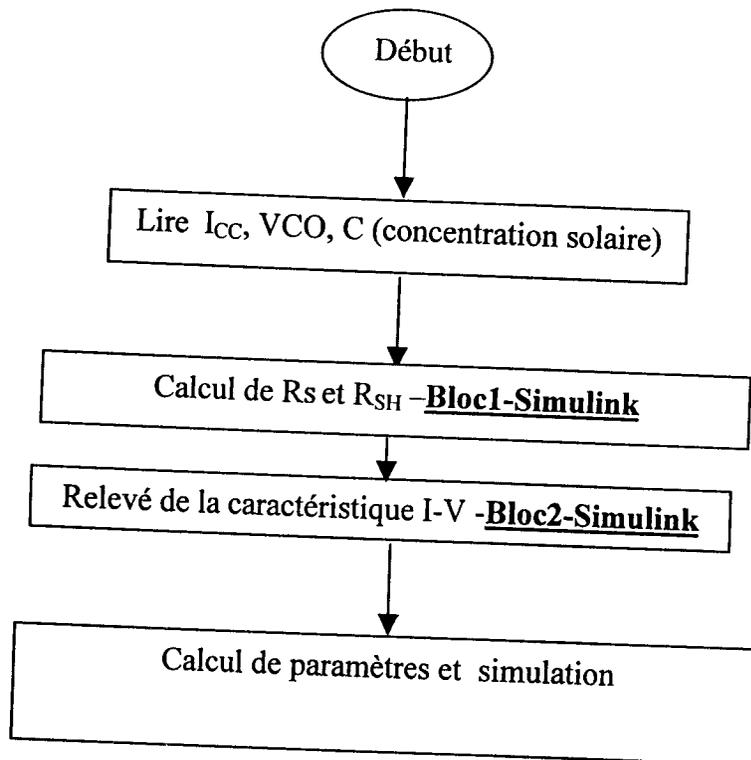


Fig. IV.3 Organigramme d'enchaînement du calcul.

I.2. Modèle à deux diodes

L'équation courant- tension dans le modèle à deux diodes est donné par :

$$I = I_{PH} - I_{S1} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{U_T}\right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{n_f U_T}\right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{SH}} \quad (IV.18)$$

où I_{S1} et I_{S2} sont respectivement le courant de saturation inverse dû à la diffusion des porteurs minoritaires dans la jonction et le courant de saturation dû aux

recombinaison et génération des porteurs à travers de centres localisés dans la zone de charge d'espace.

1.2.1 Calcul des paramètres électriques (R_s , R_{SH} , A , I_{PH} , I_{S1} , I_{S2}) de l'équation (IV.18)

*Méthode de moindre carré

Principe de méthode

Cette méthode numérique peut être utilisée dans les deux situations (sous obscurité et sous luminescence). Cette technique fut publiée par Polman et al. [18-19].

a- critère de minimisation

Ce paramètre, noté χ^2 , permet d'aboutir à une bonne précision de l'ajustement de mesures expérimentales avec celles calculées théoriquement, tel que :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{I_{mi} - I(V_i)}{S_i} \right\}^2 \quad (IV.19)$$

avec:

I_{mi} : valeur expérimentale du courant qui correspond à la tension mesurée V_i .

$I(V_i)$: valeur du courant calculée par l'équation (IV.18) pour une tension V_i .

N : nombre des points mesurés relevés de la caractéristique expérimentale I-V,

S_i : écart type du courant mesuré.

b- recherche de minimum

Calculons la dérivée première de la fonction donnée par (IV.19) :

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{I_{mi}}{S_i^2} \right) \frac{\partial I}{\partial a_j} - \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{S_i^2} \right) I \frac{\partial I}{\partial a_j} = 0 \Bigg|_{a_j = \min \chi^2} \quad (IV.20)$$

où: a_j sont les paramètres électriques: R_s , R_{SH} , I_{PH} et A c'est-à-dire $j=1-4$ ($j=1-3$ sous obscurité).

Le développement de Taylor de premier ordre permet d'écrire :

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = \frac{\partial I}{\partial a_j} \Bigg|_{a_j = \min \chi^2} + \sum_{k=1}^{3,4} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial a_k \partial a_j} \Bigg|_{a_k, a_j = \min \chi^2} \right) \delta a_k \quad (IV.21)$$

$$I \frac{\partial I}{\partial a_j} = \frac{\partial I}{\partial a_j} \Big|_{a_j = \min \chi^2} + \sum_{k=1}^{3,4} \left(\frac{\partial}{\partial a_k} \left(I \frac{\partial I}{\partial a_j} \right) \Big|_{a_k, a_j = \min \chi^2} \right) \delta a_k \quad (IV.22)$$

avec δa_k est l'incrémentation des paramètres a_k .

En substituant les équations (IV.21) et (IV.22) dans l'équation (IV.23) on obtient un ensemble d'équations linéaires en δa_k , représenté par l'équation suivante :

$$M \cdot \delta a_k = D \quad (IV.23)$$

où M est une matrice dont les éléments sont donnés par :

$$M_{jk} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{S_i^2} \right) \left\{ (Im_i - I) \frac{\partial^2 I}{\partial a_j \partial a_k} - \left(\frac{\partial I}{\partial a_k} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial a_j} \right) \right\} \Big|_{a_j, a_k = \min \chi^2} \quad (IV.24)$$

Les écarts types des paramètres sont données par les éléments de diagonale de la matrice inverse de M, tels que :

$$S_k^2 = M_{kk}^{-1} \quad (IV.25)$$

Comme montré dans l'équation (IV.24), ces déviations sont déterminées après avoir calculé les dérivées premières et secondes du courant I par rapport aux différents paramètres envisagés, soient :

$$\frac{\partial I}{\partial R_s} = - \frac{I \lambda_1}{(1 + R_s \lambda_1)} \quad (IV.26)$$

$$\frac{\partial I}{\partial R_{SH}} = - \frac{(V + IR_s) (1/R_{SH}^2)}{1 + R_s \lambda_1} \quad (IV.27)$$

$$\frac{\partial I}{\partial I_{PH}} = \frac{-1}{(1 + R_s \lambda_1)} \quad (IV.28)$$

$$\frac{\partial I}{\partial A} = -I_{S2} \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{n_f U_T} \right) \right\} \left(\frac{V + IR_s}{U_T} \right) (1/A^2) (1 + R_s \lambda_1) \quad (IV.29)$$

avec

$$\lambda_1 = \left(\frac{I_{S1}}{U_T} \right) \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{U_T} \right) \right\} + \left(\frac{I_{S2}}{n_f U_T} \right) \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{n_f U_T} \right) \right\} + \frac{1}{R_{SH}} \quad (IV.30)$$

En dérivant les équations (IV.26)-(IV.29) par rapport aux paramètres on obtient ainsi les dérivées secondes.



II. Applications

Les méthodes ci-dessus sont appliquées sur des résultats expérimentaux réalisés au laboratoire, pour des cellules solaires à base de silicium sous différentes concentrations.

Première photopile

Caractéristiques

Cellule solaire de type (n^+p) de surface 3.94 cm^2 dont la métallisation frontale est de: Ti/Pd/Ag et une métallisation arrière : Al/Ti/Pd/Ag. Le tableau IV.1 résume nos résultats. La caractéristique I-V est relevée à une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ sous 1 soleil.

Tableau.IV.1 Courants mesurés et calculés pour des tensions choisies de la caractéristique I-V sous obscurité.

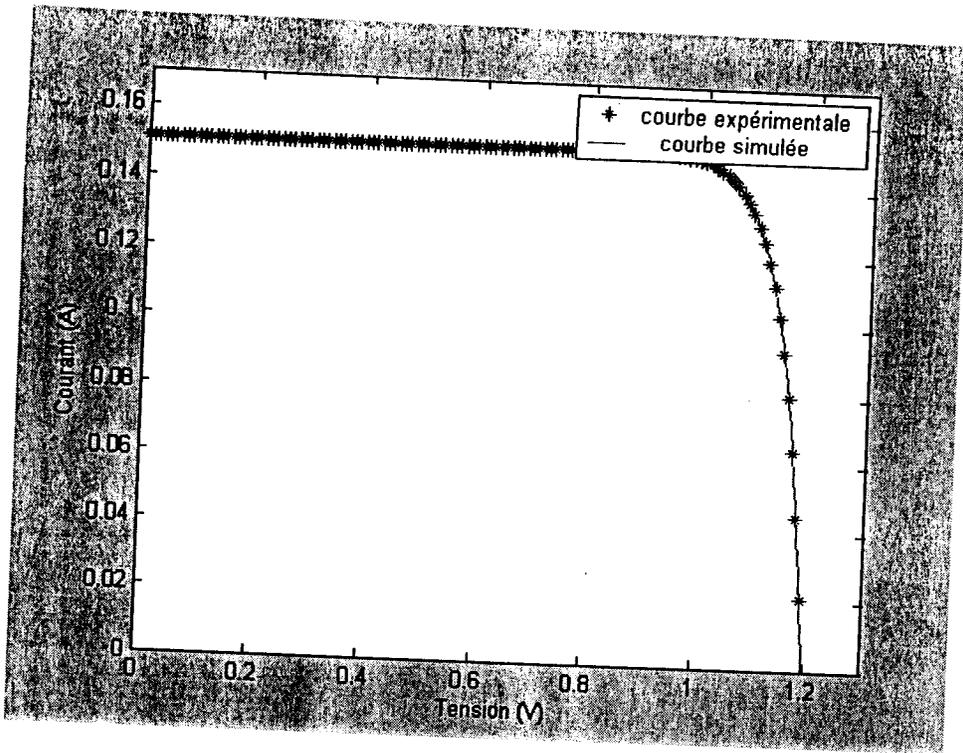
Tension V_i (mV)	Courant mesuré I_{mi} (mA)	Courant calculé I (mA)	Ecart type (S_i) de courant (mA)
300.0	0.0449	0.0446	0.0010
320.0	0.0698	0.0696	0.0010
340.0	0.1120	0.1119	0.0010
360.0	0.186	0.1866	0.010
380.0	0.323	0.324	0.010
400.0	0.587	0.587	0.010
420.0	1.110	1.107	0.010
440.0	2.16	2.159	0.10
460.0	4.34	4.328	0.10
480.0	8.85	8.829	0.10
500.0	18.10	18.13	0.10
520.0	36.7	36.9	1.0

Tableau .IV.2 Courants mesurés et calculés pour des tensions choisies de la caractéristique I-V sous illumination (condition : AM0, 135 mWcm⁻², 25 °C).

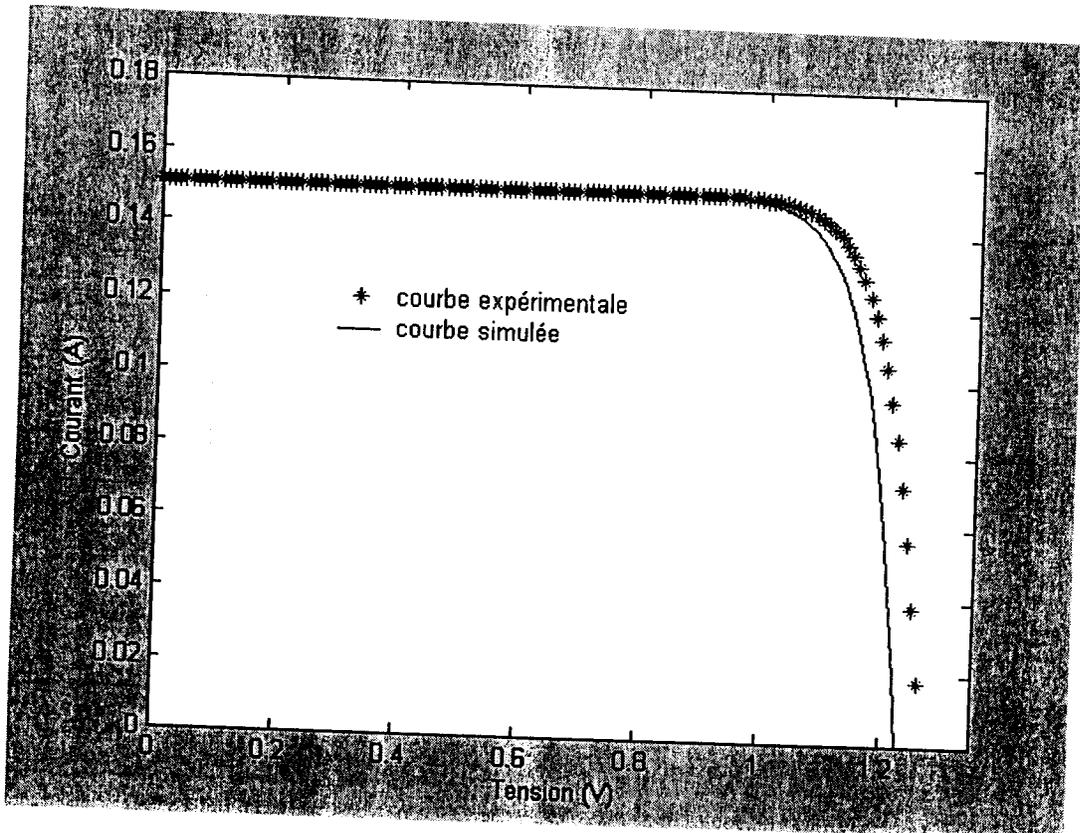
Tension V _i (mV)	Courant mesuré I _{mi} (mA)	Courant calculé I (mA)	Ecart type (S _i) de courant (mA)
0.0	151.0	151.06	1.0
98.0	151.0	151.06	1.0
198.0	150.9	151.03	1.0
298.0	150.8	150.84	1.0
398.0	149.4	149.24	1.0
448.0	144.8	144.57	1.0
478.0	135.5	135.60	1.0
498.0	122.4	122.53	1.0
508.0	111.7	112.11	1.0
518.0	98.0	97.91	1.0
528.0	79.1	78.82	1.0
538.0	53.5	53.61	1.0
548.0	21.3	21.05	1.0
558.0	-20.1	-19.91	1.0

Tableau. IV.3 Paramètres calculés par la méthode numérique de moindre carré.

Paramètre	Condition illuminée	Condition obscure
R _S (Ω)	0.0586 ± 0.0078	0.056 ± 0.018
R _{SH} (Ω)	(0.50 ± 46) × 10 ⁶	(0.30 ± 0.27) × 10 ⁶
I _{PH} (mA.cm ⁻²)	38.34 ± 0.12	-
n _f	2.09 ± 0.17	2.101 ± 0.045



(a)



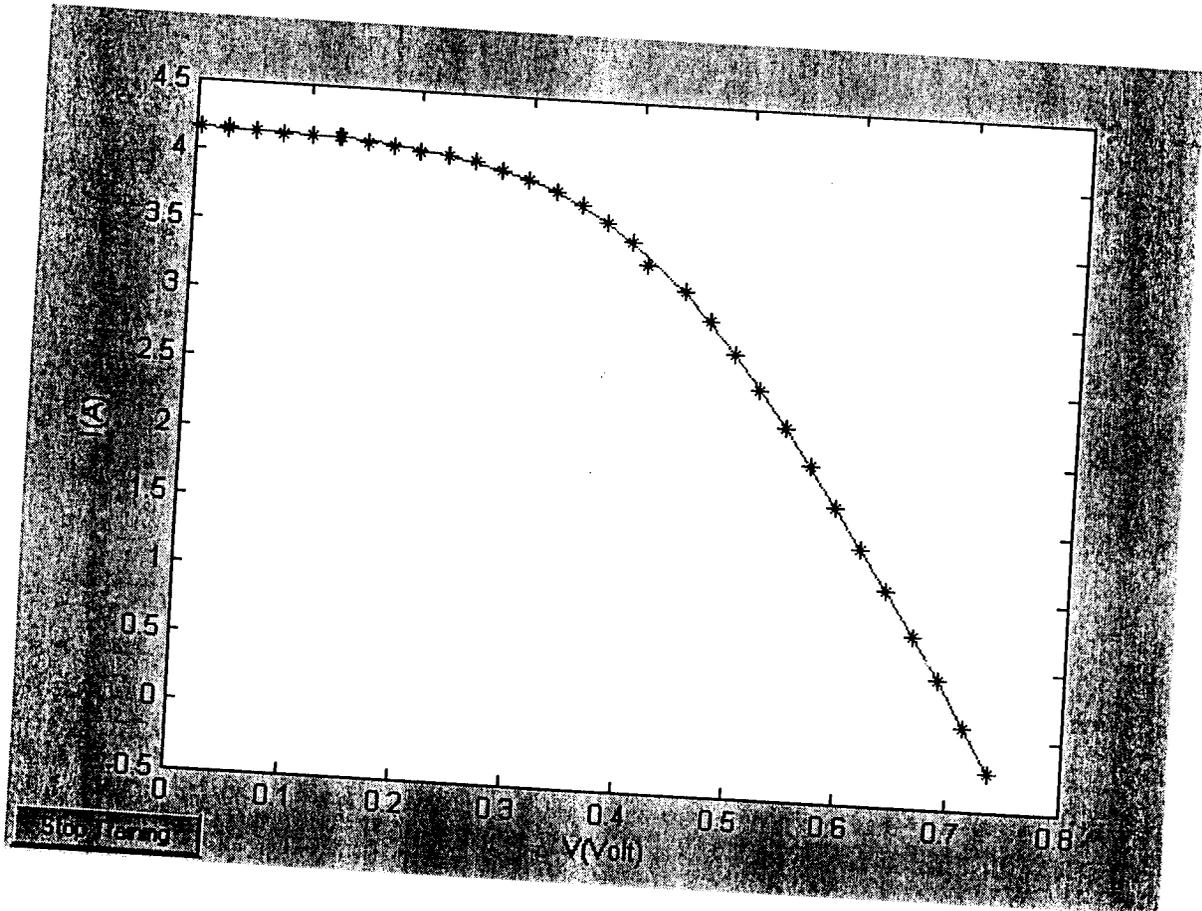
(b)

Fig.IV.4 Caractéristique courant-tension (courbes simulée et expérimentale) : a) selon le modèle à une seule diode, b) selon le modèle à deux diodes.

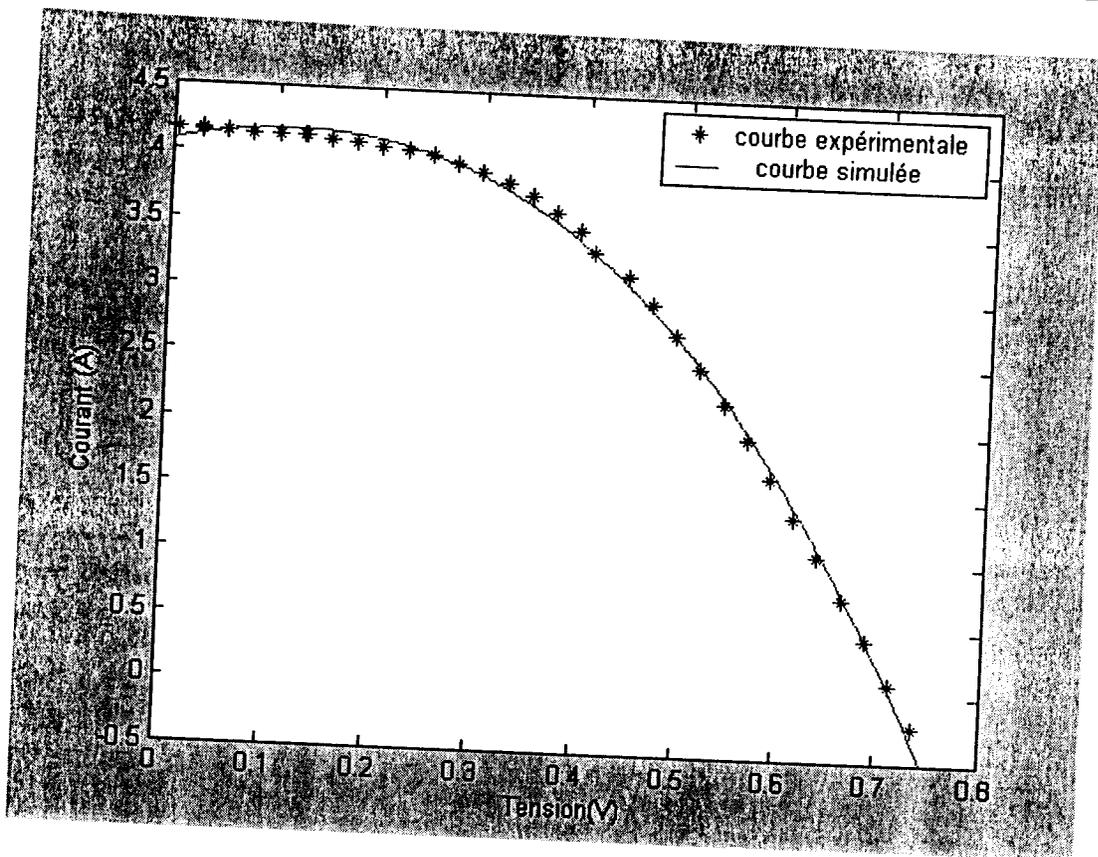


Deuxième photopile (réf : BP0803052)**Caractéristiques**

Cellule solaire de type (n⁺p) de surface 3.94 cm² dont la métallisation frontale est de : Ti/Pd/Ag et une métallisation arrière : Al/Ti/Pd/Ag .T=70, Concentration=142.2788 soleils. La simulation de cette photopile est illustrée sur la figure IV.5.



(a)



(b)

Fig.IV.5 Caractéristique courant-tension (courbes simulée et expérimentale) : a) selon le modèle à une seule diode, b) selon le modèle à deux diodes.

Le tableau.IV.4 donne les valeurs mesurées et celles calculées par notre simulation (selon les deux modèles).

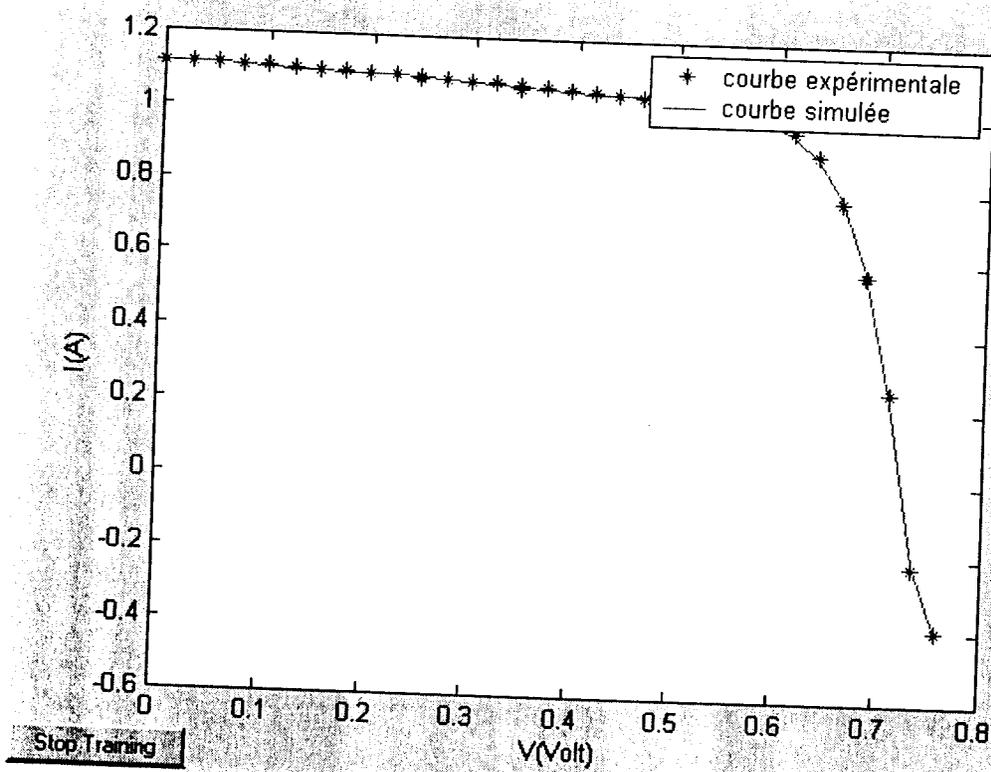
Tableau.IV.4 Valeurs mesurées et simulées selon les deux modèles

	$R_{SH}(\Omega.cm^2)$	$R_S(\Omega.cm^2)$	$I_m(A)$	$V_m(V)$	A	$I_{PH}(A)$
Valeur mesurée	650	3.6	3.141	0.445	1.3208	4.15
Valeur calculée selon le modèle à une seule diode	547.3	3.576	3.1408	0.4442	1.33207	4.151
Valeur calculée selon le modèle à deux diodes.	543.4	3.38	3.12	0.408	1.28	4.136

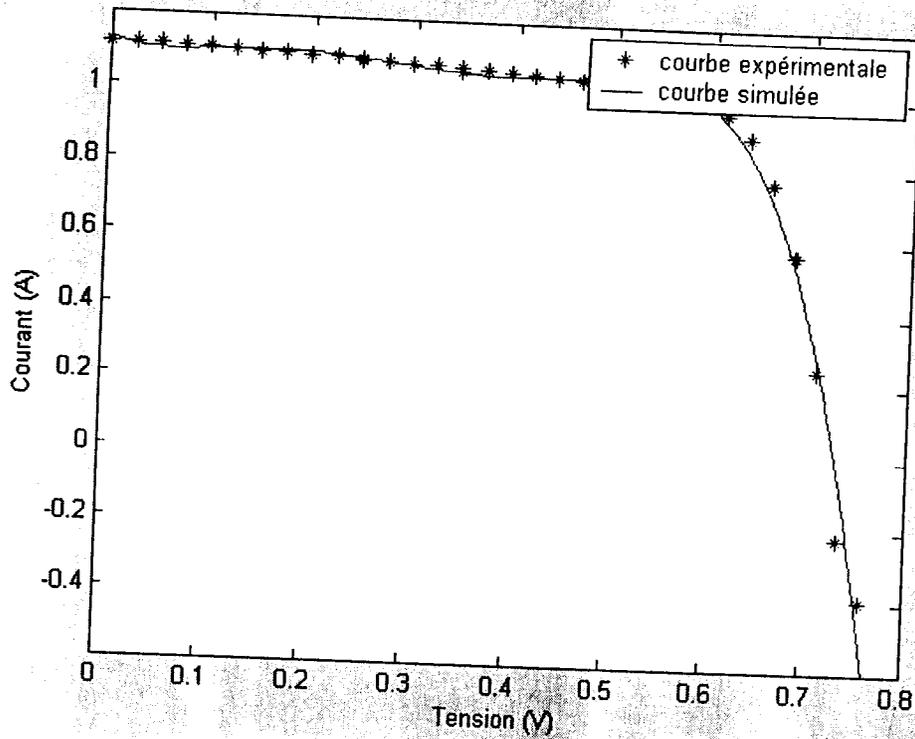


Troisième photopile (réf : BP080305 9)**Caractéristiques**

Cellule solaire de type (n^+p) de surface 3.94 cm^2 dont la métallisation frontale est de : Ti/Pd/Ag et une métallisation arrière : Al/Ti/Pd/Ag, $T=35 \text{ }^\circ\text{C}$, Concentration=38.8753 soleils. La figure IV.6 montre la simulation réalisée dans ce cas.



(a)



(b)

Fig.IV.6 Caractéristique courant-tension (courbes simulée et expérimentale) : a) selon le modèle à une seule diode, b) selon le modèle à deux diodes.

Nous résumons dans le tableau.IV.5 les valeurs mesurées et celles calculées par notre simulation (selon les deux modèles).

Tableau IV.5 Valeurs mesurées et simulées selon les deux modèles

	$R_{SH}(\Omega.cm^2)$	$R_S(\Omega.cm^2)$	$I_m(A)$	$V_m(V)$	A	$I_{PH}(A)$
Valeur mesurée	550	2.75	0.959	0.613	1.3208	1.422
Valeur calculée selon le modèle à une seule diode	547.3	2.776	3.1408	0.4442	1.33207	4.151
Valeur calculée selon le modèle à deux diodes.	543.4	2.38	3.12	0.408	1.28	4.136



Conclusion

La revue des méthodes numériques présentée dans ce chapitre pour le calcul des paramètres des circuits équivalents des cellules solaires et en particulier la résistance série, nous permet de conclure que :

Pour des éclaircissements concentrés, le bon accord avec le modèle à une exponentielle peut s'expliquer par le fait que dans ces conditions les pièges susceptibles d'intervenir dans la recombinaison sont saturés et alors le processus de diffusion devient prépondérant.

Le modèle à deux exponentielles est obtenu, dans des conditions de faible injection, en prenant en compte trois mécanismes essentiels [Charles et al. 2000]:

-la diffusion [Neugroschel 1977, Frhrenbruch et Aranvich 1979] qui rend compte des mécanismes de recombinaison dans les régions quasi-neutres (notamment aux contacts).

-la recombinaison dans la zone de charge d'espace, par les centres recombinants associés à des niveaux situés dans la bande interdite pour une homojonction, qui est représentée par un terme exponentiel.

-le troisième type de mécanisme pris en compte est l'effet Joule qui est traduit par des pertes d'énergie dans la résistance série, R_S , et shunt, R_{SH} .

Donc le modèle à deux exponentielles est le plus approprié pour envisager une simulation précise de la photopile silicium en situation réelle [Charles et al. 1980].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.BASHAHU and A.HABYARIMANA, Review and Test of Methods for Determination of the Solar Cell Series Resistance, *Renewable Energy*, Vol.6 No.2 pp.129-138,1995.
- [2] A.M.Cowley and S.M.Sce.*J.Appl.Phys.*30, 3212 (1965).
- [3] J.Boucher, M.Lescure and J.Vialas, *Proc.EEC Photovoltaic Solar Energy Conf.Luxembourg*, p.1044. (27-30 sep.1977).
- [4] D.W.Kammer and M.A.Ludington, Laboratory experiments with silicon solar cells.*Am.J.Phys.*45(7),602-605 (1977).
- [5] M.Wolf and H.Raushenbach, Series resistance effects on solar cell measurements, In *Solar cells*, édité par C.E.Backus,pp.146-170,IEEE Press (1976).
- [6] J.A.Cape,J.R.Oliver and R.J.Chaffin,A simplified flash lamp technique for solar cell series resistance measurements. *Solar cells* 3,215-219(1981).
- [7] Quanzi Jia and W.A.Anderson, A novel approach for evaluating the series resistance of solar cells. *Solar Cells* 25,311-318(1988).
- [8] C.M.Singal, Analytical expression for the series resistance dependent maximum power point and curve factor for solar cells. *Solar Cells* 3,163-177 (1981)
- [9] M.A.Hamdy and R.L.Cell, The effect of the diode ideality factor on the experiment determination of series resistance of solar cells. *Solar cells*. 20.119-126 (1987).
- [10] B.Arcipiani, Generalization of the area method for the determination of the parameters of a non-ideal solar cell, *Rev.Phys.Appl.*20, 269-272(1985).
- [11] S.K.Agarwal et al., A new method for the measurement of series resistance of solar cells.*J.Phys.D: Appl.Phys.*14, 1643-1646(1981).
- [12] M.Chegaar, Z.Ouennoughi and F.Guechi, Extracting dc parameters of solar cells under illumination, *Vacuum* 75 (2004) 367-372.
- [13] Easswarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I, Boutrit C.*Int J Solar Eng* 1986, 4:169-178.
- [14] Chan DSH, Philips GR, Phang JCH.*Solid-State Electron* 1986, 29: 329-337.
- [15] Chegaar M, Ouennoughi Z, Hoffmann A. *Solid-State Electron* 2001, 45:293-296
- [16] Werner JH.*ApplPhys A*1988, 47:291:300.



- [17] J.-P. Charles, I.Mekkaoui-Alaoui, G.Bordure et P.Mialhe, A Critical Study of the Effectiveness of the Single and Double Exponential Models for I-V Characterization of Solar Cells, *Solid-State Electronics*, 28/8(1985)807-820.
- [18] N.VEISSID, A method for the determination of the standard deviations of the solar cell I-V characteristic parameters, *Solar cells*, 28 (1990) 351-357.
- [19] A.Polman, W.G.J.H.M.van Sark, W.Sinke and F.W.Saris, *Sol.Cells*, 17 (1986)241.



CHAPITRE V

REALISATION DE CONTACTS METALLIQUES ET TECHNIQUES DE MESURE



CHAPITRE V

REALISATION DE CONTACTS METALLIQUES ET TECHNIQUES DE MESURE

Introduction

La quasi-totalité de la production des cellules solaires est à base de silicium monocristallin et semicristallin [1-2]. Les principales technologies du procédé de réalisation de la photopile sont les suivantes :

- 1-Traitement de la surface des plaquettes et texturation
- 2-Formation de la jonction n^+/p ou de la structure n^+/pp^+
- 3-Isolation de la jonction parasite
- 4-Passivation de la surface et des joints de grains
- 5-Métallisation : dépôt de la grille collectrice et du contact arrière
- 6-Dépôt de la couche antireflet (C.A.R)

La formation de la grille face avant est la partie du procédé la plus délicate, car il s'agit d'établir un contact ohmique dont la résistance soit minimale, dont le coefficient de couverture soit également minimal, à une température inférieure à celle des étapes précédentes, avec un matériau soudable, économique et résistant à la corrosion [3].

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu les différents procédés technologiques utilisés pour la métallisation de la photopile solaire pour utilisation sous concentration solaire ; en deuxième lieu, notre étude se portera sur une analyse des principales techniques conçues pour la mesure de la résistance de contact et de la résistance carrée qui constituent les composantes fondamentales de la résistance série.

I. Techniques de réalisation des contacts ohmiques

I.1 Méthode de dépôt par évaporation sous vide

C'est une technique classique développée par Solarex au milieu des années 70 sous le nom de TRIMET et qui consiste à évaporer sous vide à travers un masque déposé au préalable par photoresist une première couche de titane Ti suivie d'une couche de palladium Pd et à déposer ensuite une couche d'argent Ag par électrolyse. Pour l'adhérence, le Ti forme un siliciure avec le substrat ; contre la corrosion, le Pd joue le



rôle de barrière de diffusion et l'Ag permet la soudabilité des contacts. L'évaporation du métal s'effectue par chauffage de creuset soit par effet Joule, soit par bombardement au moyen d'un canon à électrons (Fig.V.1). Lorsque la température du métal est assez élevée sa pression de vapeur devient suffisamment élevée (tableau V.1). Cette technologie est longtemps restée la référence en matière de fiabilité, de résistance série et de coefficient de perte d'ombrage. Elle avait cependant l'inconvénient majeur d'être trop coûteuse.

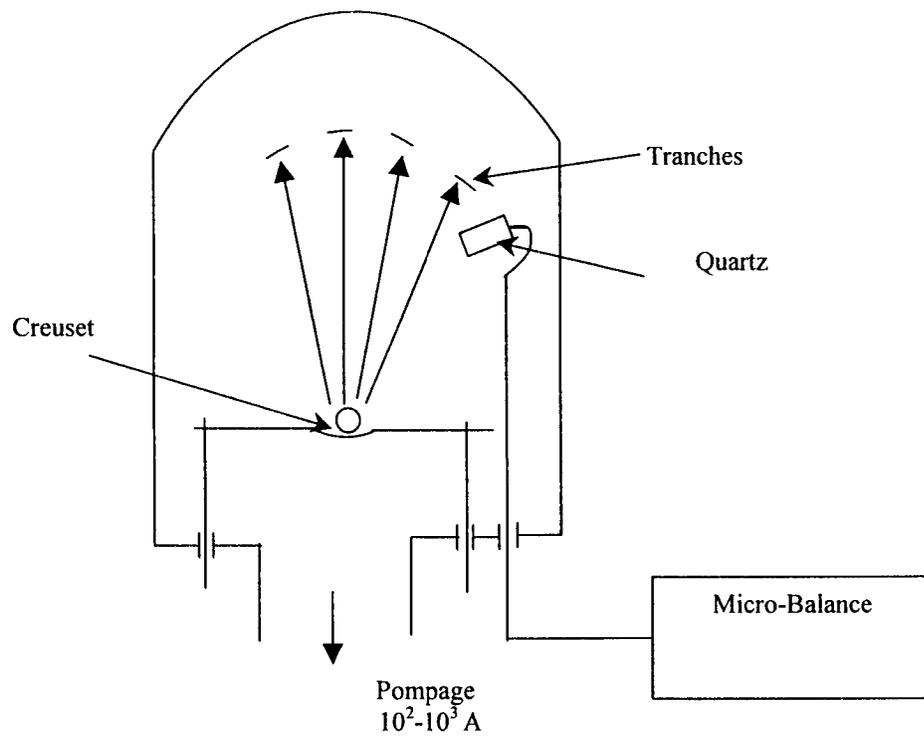


Fig.V.1. Dispositif d'évaporation sous vide par effet Joule.

Tableau V.1 : Températures de fusion de quelques métaux et températures correspondant aux pressions partielles

Métal	Point de fusion (°C)	Température °C correspondant à une pression partielle de :	
		10^{-6} torr	10^{-4} torr
Al	660	821	1010
Ag	961	958	1105
Au	1062	947	1132
Cr	1890	977	1157
Mo	2610	1822	2117

I.2 Dépôt chimique de nickel sur le silicium (Electroless Nickel deposition)

Cette alternative de bon marché, est développée par Brenner dès 1947 et utilisée par France-Photon et par Solavolt (USA) de 1980 à 1985. Les cellules sont immergées pendant 10 min environ, dans un bain de nickel filtré en permanence en boucle fermée maintenu à 85 °C et à pH constant de 8.5.

Le dépôt est autocatalytique. La composition du bain est la suivante :

- Chlorure de nickel ($\text{NiCl}_2, 6 \text{H}_2\text{O}$) : 30 g/l ;
- Trictrate de sodium ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_7, 2 \text{H}_2\text{O}$) : 84 g/l, il agit à la fois comme agent complexant et comme tampon (buffer) pour les ions Ni ;
- Chlorure d'ammonium (NH_4Cl) : 50 g/l ;
- Hypophosphite de sodium ($\text{NaH}_2\text{PO}_2\text{H}_2\text{O}$) : 10 g/l, qui agit comme agent reducteur.

Le pH est ajusté en permanence par l'introduction automatique d'ammoniaque (NH_4OH) dans le bain par une pompe péristaltique.

L'adhérence n'est pas sûre à 100 %. Elle s'améliore par un prétraitement par PdCl_4 , (procédé Motorola) ou par recuit des cellules à 200 °C pendant 15 min, ou encore par l'utilisation de couches de Ni-Cu [4] (Fig.V.2).



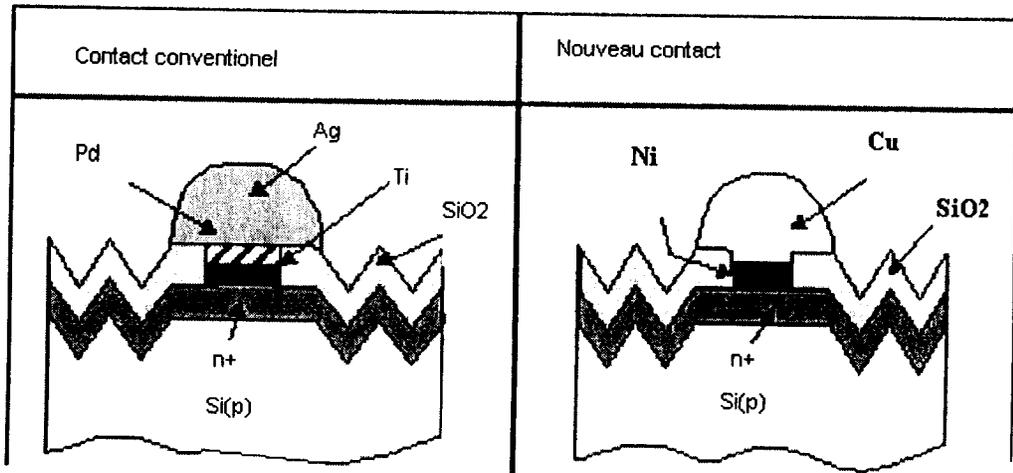


Fig.V.2 Diagramme schématique des contacts Ti/Pd/Ag et Ni/Cu

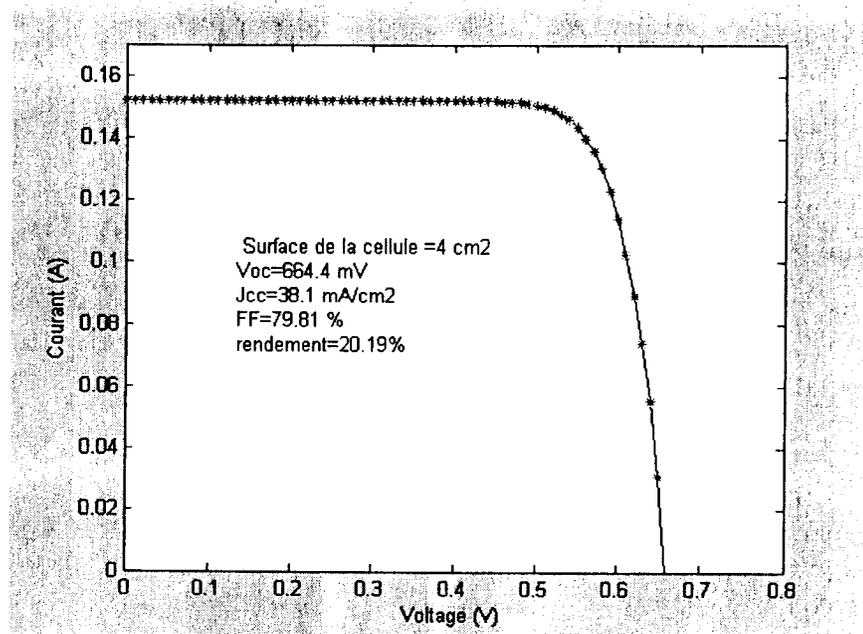
Ce procédé présente l'avantage de métalliser en même temps les faces avant et arrière des cellules, de réaliser le dépôt de façon conforme, d'être soudable, et surtout d'être très bon marché : cinq fois moins cher que le procédé TRIMET [3] qui vient d'être vu.

Les inconvénients sont de deux ordres :

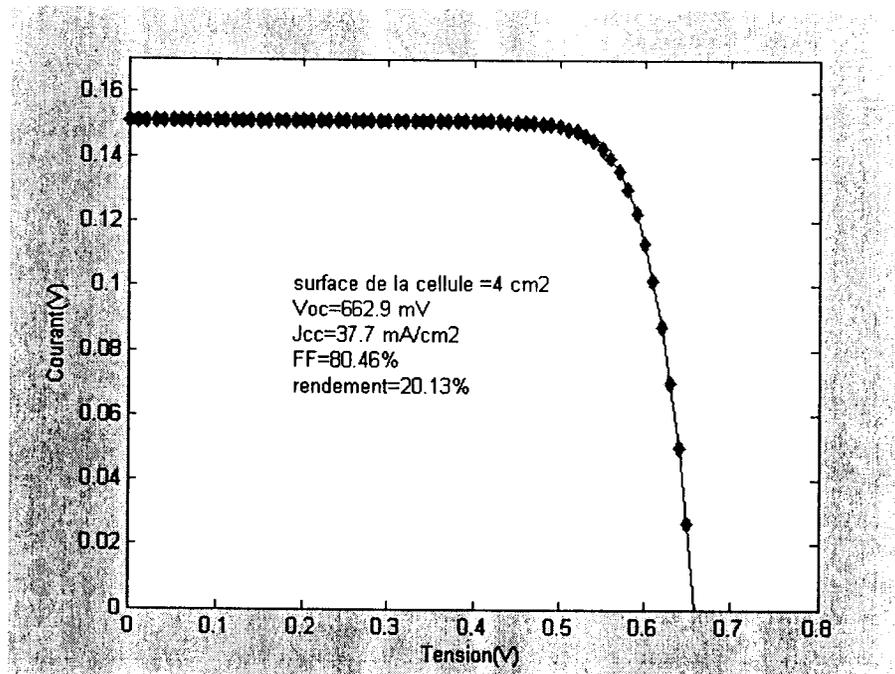
- instabilités du bain parfois difficiles à maintenir en production ;
- le nickel chimique en pH alcalin ne convient pas aux photopiles multicristallines dont la profondeur de jonctions est variable ; en effet, une corrélation est observée entre l'adhérence, un faible facteur de forme FF et une faible résistance shunt. Ceci s'explique par le fait que l'adhérence est d'autant meilleure qu'il se produit une attaque préalable du silicium et donc un risque non nul de perçage de l'émetteur de place en place.

La figure V.3 illustre les caractéristiques courant-tension de deux cellules solaires dont les contacts sont de type : Ti/Pd/Ag et Ni/Cu respectivement. E.J.Lee et al. [4] ont montré que les cellules solaires à base de Ni/Cu sont plus performantes que celles à base de Ti/Pd/Ag.





(a)



(b)

Fig.V.3 Caractéristiques courant-tension : (a) photopile solaire (Si) avec un contact Ni/Cu, (b) photopile solaire (Si) avec un contact Ti/Pd/Ag.



I.3 Dépôt sérigraphique

L'alternative qui combine le meilleur coût, la meilleure performance et la simplicité d'exécution est la sérigraphie d'une pâte.

I.3.1 Principe de la technique

Ce procédé qui est bien connu des artistes [1,5-6], consiste en l'application d'une pâte sur un substrat, la cellule, au travers d'un masque. Cet écran sérigraphique, ou pochoir, est négatif du motif à reproduire (Fig.V.4). Un traitement thermique à suivre va permettre la solidification de la pâte, sa densification et sa solidarisation à la cellule. C'est lors de cette étape que le contact, en face avant comme en face arrière, est réalisé par la diffusion des éléments métalliques de la pâte dans le semiconducteur. Ces éléments

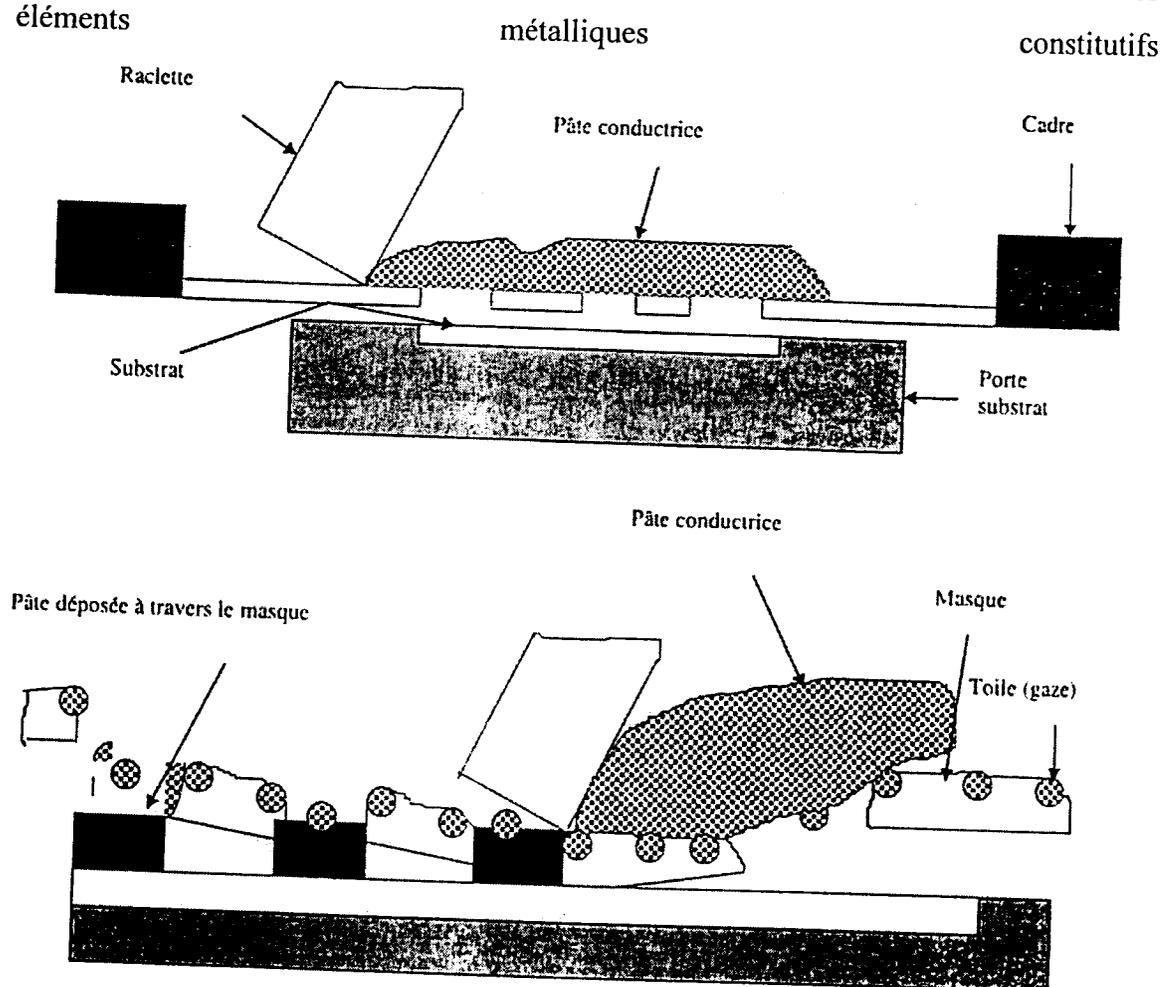


Fig. V.4 Procédé de sérigraphie d'une pâte conductrice ou semiconductrice.



sont l'argent pour la pâte de la face avant (type n) et un mélange argent et aluminium pour la face arrière (type p).

Pour un gain de productivité, les contacts métalliques avant et arrière déposés subissent un traitement thermique commun. En conséquence, la manipulation des cellules sur la chaîne de production exige le déroulement des étapes préalables suivantes :

- Sérigraphie du schéma de grille avant sur la couche antireflet.
- Séchage par étuve à air : 150 °C pendant 15 minutes environ.
- Sérigraphie du schéma de grille arrière.
- Séchage par étuve à air - même température, même durée.

Ce traitement se divise en deux étapes (Figure V.6) : une cuisson enchaînée d'un recuit sous gaz réducteur. Photowatt a récemment mis en place un nouveau système d'élaboration des cellules au moyen d'une chaîne automatisée. Elle a pour conséquence d'effectuer la cuisson et le recuit dans un même « run ». Les cellules ne redescendent plus en température jusqu'à l'ambiante mais jusqu'à la température nominale du recuit 420 °C environ. La figure V.5 montre les profils schématiques de température en fonction du temps respectivement avant et après automatisation.



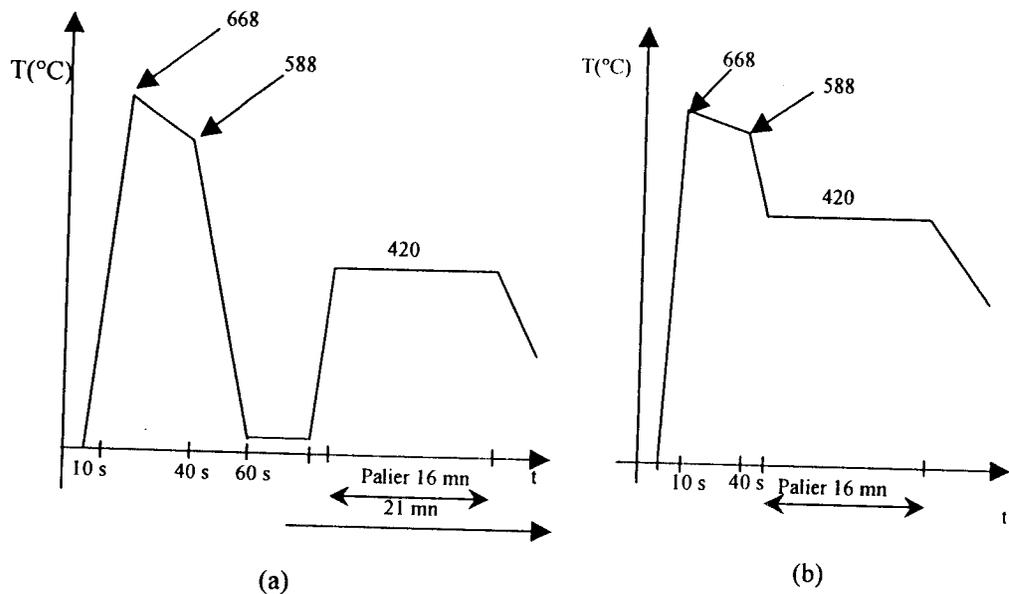


Fig.V.5 Profil de température en fonction du temps. (a) avec four à passage et four sous H_2 , (b) avec four BTU.

I.3.2 Pâte de sérigraphie

Les contacts se présentent sous forme d'une pâte métallique. Les éléments qui la composent sont [6-7] :

- Une fritte de verre
- Le métal actif
- Les liants

Les oxydes SiO_2 et PbO sont les éléments principaux de la fritte de verre, à ceux-là viennent s'ajouter Al_2O_3 (face arrière), B_2O_3 et ceux dits fondants ZnO (face avant). Ils sont les régulateurs [8], suivant leur teneur, de la température de fusion de la fritte.

La matière de remplissage est constituée de grains très fin de métaux dont les dimensions peuvent aller jusqu'à $0.5 \mu m$. Les métaux utilisés généralement sont l'argent pour la pâte de type n de la face avant et l'argent plus l'aluminium en face arrière.

Les liants sont des composés hydrocarbonés permettant la cohésion des éléments pulvérulents et d'assurer une bonne viscosité de la pâte.

I.3.3 Qualités de la sérigraphie

Les moyens techniques que nécessite cette méthode sont peu importants par rapport à des contacts évaporés. Elle bénéficie en outre d'une rapidité d'exécution qui supporte la cadence de production industrielle élevée d'environ une cellule toute les deux secondes.

Les différents paramètres dont dépend la qualité de la sérigraphie sont résumés dans le tableau V.2 [9].

Tableau V.2 Paramètres intervenants dans la sérigraphie.

Eléments	Paramètres
Raclette	Vitesse
	Pression
	Angle d'attaque
Encre	Viscosité (température de la pièce)
	Comportement thixotrope
Ecran de sérigraphie	Distance écran/cellule
	Hauteur de l'émulsion
	Ouverture des lignes

En revanche cette technique affiche ses limites pour les motifs sérigraphiés trop fins. De viscosité importante, les effets de capillarité de la pâte sur les bords du pochoir deviennent non négligeables devant les dimensions. La pâte ne s'étale pas complètement au fond du masque malgré son caractère thixotrope et la distance entre le masque et la cellule. Nous rappelons que la thixotropie est le phénomène par lequel la viscosité de certaines substances varie avec la pression à laquelle elles sont soumises. Ces substances reprennent leur viscosité première une fois remises à la pression atmosphérique.



La largeur critique des lignes de collecte est d'une centaine de micromètres ; en deçà la résistivité de contact s'en trouve accrue de manière considérable et les traitements thermiques provoquent leur sectionnement transverse.

Ce problème revêt une importance toute particulière en face avant. Le rendement d'une cellule solaire étant fonction de sa surface éclairée, les contacts seront les plus fins possibles dans le but de diminuer le taux d'ombre.

II. Techniques de mesure de la résistance du contact métal/semiconducteur

II.1 Définition

L'expérience montre que l'accès à une région semi-conductrice via un contact métallique présente généralement une résistance plus forte que ce que l'on pouvait espérer d'un contact idéal et doit être imputée à la « la résistance de contact » [9].

Les contacts réels ne sont pas idéaux pour deux raisons principales :

*Dans une mince couche de semi-conducteur, sous le contact, la densité des porteurs de charge diffère de celle du substrat (couche de déplétion ou d'accumulation) : elle provient de la différence des travaux de sortie du métal et du semi-conducteur et des états d'interface du semi-conducteur.

*Des couches d'éléments étrangers empêchent quelquefois un contact rigoureux entre le métal et le semiconducteur.

Le paramètre fondamental qui caractérise un contact métal-semiconducteur est sa résistivité de contact ρ_c , appelée aussi résistance spécifique de contact, définie à partir de la caractéristique $I(V)$ par :

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V \rightarrow 0}^{-1} \quad (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (\text{V.1})$$

Les contacts métal-semiconducteur présentent une caractéristique courant-tension non linéaire de la forme :

$$J = J_0 \left\{ \exp\left(\frac{V}{V_0}\right) - 1 \right\} \quad (\text{V.2})$$

La résistance spécifique de contact est donc :

$$\rho_c = \frac{V_0}{J_0} \quad (\text{V.3})$$



II.2 Type et nature des contacts en technologie « planar »

II.2.1 -Type de contact

Selon la direction du flux de courant dans le semiconducteur près du contact planar, deux types de contacts peuvent être envisagés :

-le contact « horizontal »,

-le contact vertical.

La figure V.6, représentant une coupe d'un transistor bipolaire NPN, montre une bonne illustration de ces deux sortes de contacts. Au contact collecteur, le courant circule perpendiculairement à l'interface métal-semiconducteur, le contact est alors dit « vertical » ; dans ce cas la résistivité de contact s'obtient facilement en multipliant la résistance de contact par la section de transfert des électrons du métal au semiconducteur. Pour un contact homogène et avec une densité de courant uniforme, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\rho_c = R_C A_C \quad (V.4)$$

où R_C est la résistance de contact.

A_C est la surface de prise de contact (section de transfert des électrons).

Par contre près du contact base, la majorité des lignes de courant est parallèle à cette interface, finissant par se resserrer au bord du contact : ceci caractérise le contact dit horizontal. Ce resserrement de ligne de courant rend difficile l'accès notamment à la résistivité de contact.

II.2.2 Nature des contacts

Il est nécessaire de distinguer deux types de contacts de natures totalement différentes :

*Les contacts alliés,

*Les contacts non alliés.

Le contact dit non allié est fondé sur l'hypothèse suivante : trois couches totalement distinctes, métal/interface fine/semiconducteur, constituent le contact.

Un contact allié est obtenu à la suite d'un recuit long, à haute température, ou une diffusion de contact. Dans ce cas, les trois couches s'interpénètrent et le contact se présente sous forme d'une unique couche qui passe de façon progressive du métal au



semiconducteur. Cette couche est constituée de composées intermétalliques dont la nature et les propriétés sont peu connues. Ce type de contact est souvent utilisé pour les contacts arrière des cellules solaires.

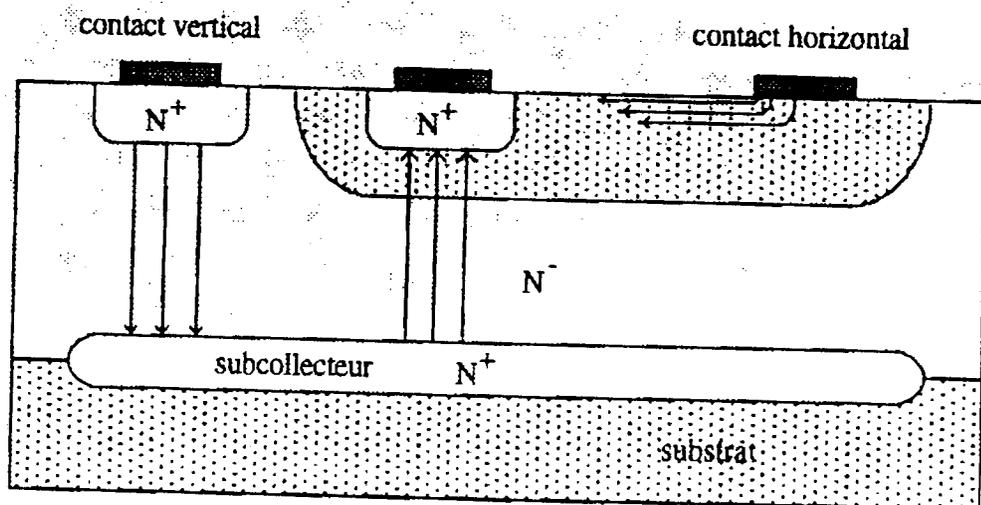


Fig.V.6 Vue en coupe d'un transistor NPN illustrant les contacts de type vertical et horizontal.

II.3 Caractéristiques d'un bon contact ohmique

Tous les dispositifs à base de semiconducteur, diodes, transistors, circuits intégrés et cellules solaires qui sont faits à base de technologie planar, ont des structures de contacts métalliques. Ces derniers sont aussi importants en tant que liaisons vers le boîtier que contact métallique de l'élément silicium lui même. Pour les dispositifs à base de silicium, il doit avoir un bon contact électrique avec une couche diffusée dopée n ou p ; le contact doit avoir en plus les propriétés suivantes :

- Une caractéristique ohmique (la courbe I(V) doit être linéaire).

- La résistance de contact doit être petite en comparaison avec autres résistances du circuit (résistance de base et de front pour les cellules solaires).
- La résistance spécifique de contact, dépendance de la structure de bande d'énergie des zones limites entre le métal et le semiconducteur, doit avoir la plus faible valeur possible. Ceci peut être réalisé en rendant inactif les états de surface qui se présentent sous la forme d'une densité de charges superficielles. Ainsi des paramètres décisifs sont : la valeur de la concentration en surface du silicium dopé, le type de réaction métallurgique avec le silicium.

Par ailleurs, un contact ohmique doit satisfaire aux exigences d'un bon contact :

- Bonne stabilité mécanique.
- Bonne stabilité électrique.
- Pas de dégradation par électromigration.
- Bonne tenue en température.

Pour caractériser les propriétés spécifiques d'un contact ohmique (réel), la mesure de la résistance de contact ne peut convenir pour deux simples raisons :

- ✓ Il est évident que ce paramètre diminue quand la surface métallisée augmente.
- ✓ La deuxième et principale raison est que la résistance effectivement mesurée au niveau d'un contact métal-semiconducteur fait intervenir à la fois la contribution des résistances dues aux connexions, au contact et au matériau semiconducteur.

De part sa faible valeur, la résistance de contact ne peut être mesurée directement à partir du tracé de la caractéristique courant-tension ; son influence est en effet masquée par la résistance du matériau semiconducteur.



II.4 Méthodes de mesure des paramètres de contacts.

De nombreuses techniques et analyses ont été mises en œuvre pour l'étude du comportement électrique du contact métal-semiconducteur des dispositifs palmars. Nous pouvons les diviser en deux catégories :

- Les méthodes transverses.
- Les méthodes « planars ».

II.4.1 Méthodes transverses.

Les méthodes transverses caractérisent les contacts de type vertical ; ce sont, dans un ordre chronologique :

- i. La méthode à deux contacts de Vales (1954) [10],
- ii. La méthode des quatre points circulaires avec contact arrière de Cox et Strack (1967) [11],
- iii. La méthode différentielle de Berger (1972) [12].

II.4.2 Méthodes « planars »

Les méthodes « planars » caractérisent les contacts de type horizontal formés sur la même face de l'échantillon sont :

- i. La méthode de Schokley (1964) [13],
- ii. La méthode à deux contacts de Murrmann et Widmann (1969)[14-16],
- iii. La méthode du sondage d'interface de Ting et Chen (1971) [17],
- iv. La méthode à trois contacts de Berger (1972) [18-19],
- v. La méthode à quatre contacts du LAAS (1975) [20].

Les différences entre ces diverses techniques de caractérisation des contacts métal – semiconducteur résident dans le type et la géométrie des contacts d'une part et les différentes hypothèses formulées pour leur modélisation d'autre part. Le reste de ce paragraphe sera consacré à un rappel de quelques études et techniques utilisées dans la modélisation et la caractérisation des contacts ohmiques.



II.4.3 Rappel de quelques études et techniques « palanars » pour la modélisation d'un contact ohmique.

Kennedy et Murly [21], en considérant l'interface du profil de dopage et l'homogénéité de la distribution des éléments dopants, traitent le contact à partir des équations générales dont la résolution numérique ne tient pas compte de la résistance d'interface et donc de la résistivité de contact ($\rho_c=0$). Cette analyse met en évidence le resserrement des lignes de courant au bord du contact et dans des couches localisées près de la surface du semiconducteur.

Ting et Chen [17] ont développé une méthode très astucieuse pour déterminer la résistivité et la résistance de contact : il s'agit de mesurer, en un point x donné, la chute de tension $V(x)$ aux bornes de la « couche interfaciale » (couche formée entre le métal et le semiconducteur qui est caractérisée par la résistance spécifique de contact ρ_c), ainsi que la densité de courant $J(x)$ qui la traverse en ce même point x . La structure de l'échantillon d'étude est montrée sur la Figure V.7

La résistivité de contact est donnée par l'expression suivante :

$$\rho_c = \frac{V(x)}{J(x)} (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (\text{V.5})$$

Etant donné que la chute de tension n'est pas une constante, le seul moyen d'évaluation de la résistance de contact, dans ce cas, est le calcul de la puissance dissipée au niveau de l'interface, dont la variation par rapport à la surface est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\partial P}{\partial S} = V(x) \cdot J(x) \quad (\text{V.6})$$

Ce qui donne après intégration :



$$P = \int_0^{\infty} V(x) \cdot J(x) dx \quad (V.7)$$

Or $P = R_c \cdot I^2$ avec I le courant total.

On en déduit

$$R_c = \frac{w \int_0^{\infty} V(x) \cdot J(x) dx}{I^2} \quad (V.8)$$

Ce qui donne, tenant compte de l'expression (5) :

$$R_c = \rho_c \frac{w \int_0^{\infty} J^2(x) dx}{I^2} \quad (V.9)$$

L'expression (9) peut s'écrire sous la forme :

$$R_c = \frac{\rho_c}{S_T} \quad (V.10)$$

La technique utilisée par Ting et Chen permet de vérifier le resserrement des lignes de courant sur les bords du contact et donc on peut penser que le courant traverse le plot sur une surface $S_T = w \cdot L_T$. Les quantités S_T et L_T représentent respectivement la section et la longueur de transfert des électrons. Elles sont données par :

$$S_T = \frac{I^2}{w \int_0^{\infty} J^2(x) dx} \quad (V.11)$$

$$L_T = \frac{I^2}{w^2 \int_0^{\infty} J^2(x) dx} \quad (V.12)$$

Cette méthode permet ainsi de déterminer tous les paramètres de contact ; cependant, la maîtrise de technique de diffusion ou d'implantation est un paramètre déterminant pour ce genre d'étude, ce qui rend un peu difficile à mettre en œuvre.

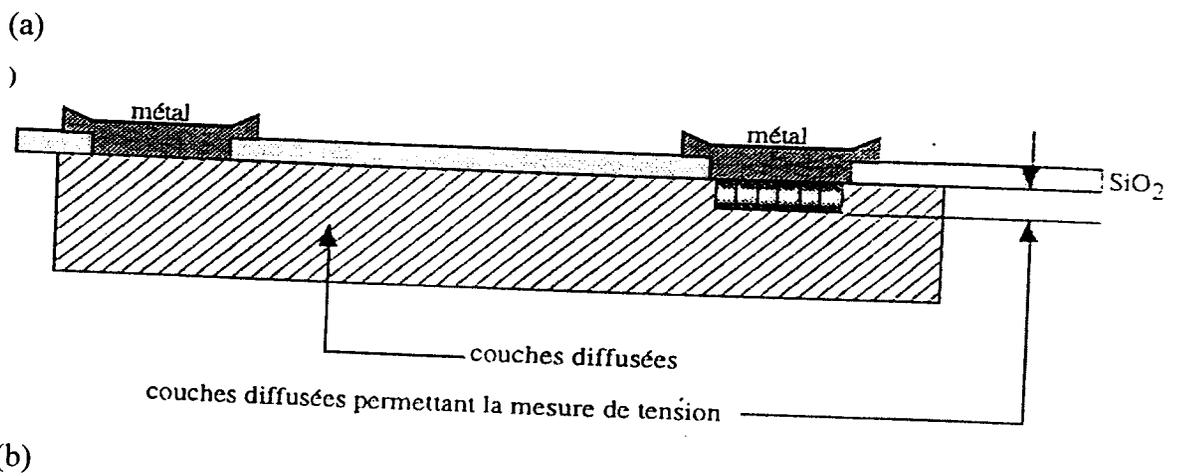
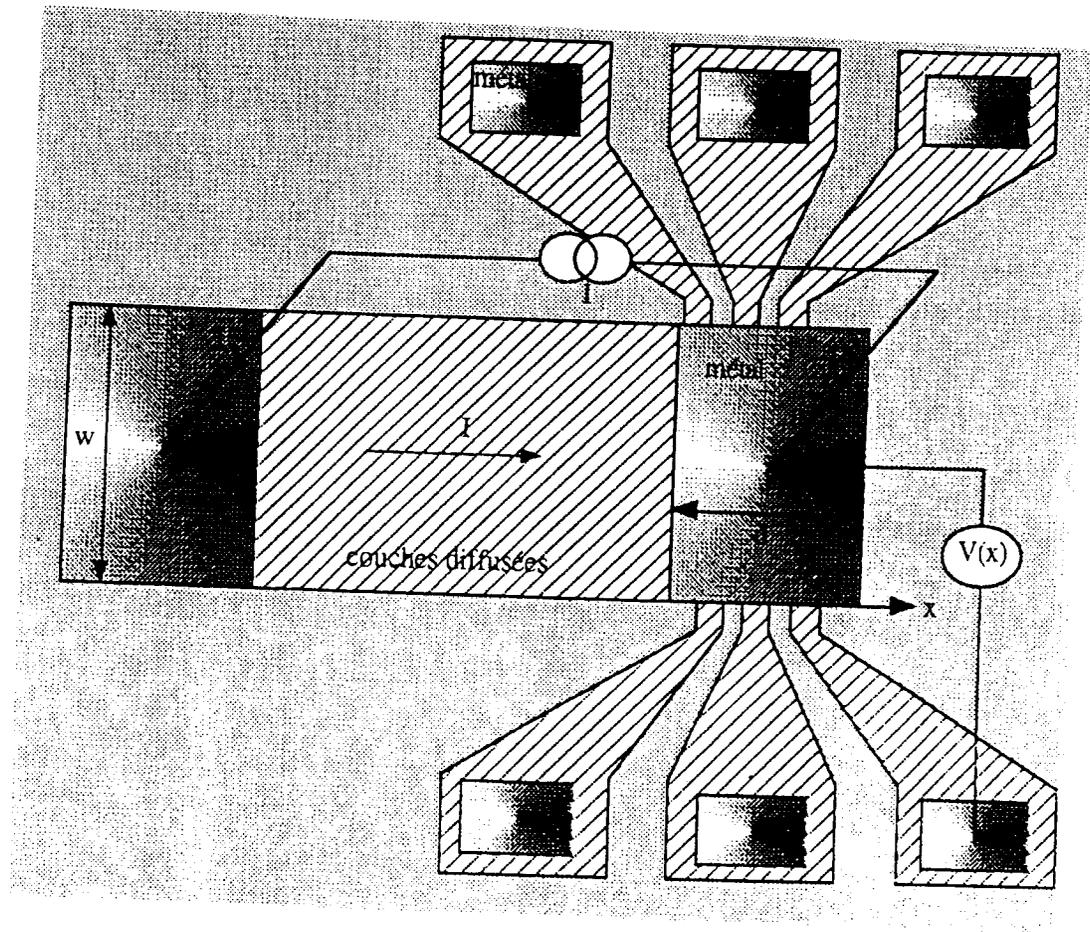


Fig.V.7 Illustration de la méthode de Ting et Chen [17].

(a) vue de dessus, (b) vue de profil.

II.4.4 Méthode TLM (Transmission Line Model en anglais)

Berger [18-19], Murrmann et Widmann [14-16] modélisent le comportement électrique du contact métal-semiconducteur en utilisant les équations différentielles des lignes de transmission (qui découlent de la théorie des quadripôles). Cette théorie, proposée initialement par Shockley [13], assimile le contact à une ligne de transmission et permet un calcul théorique de la loi de variation de la tension sur contact ; elle offre en outre les bases de la plupart des méthodes de détermination des caractéristiques des contacts.

Un contact métal-semiconducteur (figure V.8) peut être ainsi décrit par une chaîne de cellules élémentaires de longueur dx purement résistives, et où figurent les termes dus au semiconducteur d'une part (ceux dus au métal étant négligés), ainsi que les termes transversaux attribués au contact lui-même d'autre part.

Cette représentation schématique « permet » de prendre en compte les pertes dues à la couche interfaciale représentée par la différentielle de conductivité (dG) et celles dues à la différentielle de la résistance (dR) décrite par la résistance étendue de la couche de diffusion en dessous de la prise de contact. Elles sont données par les équations suivantes :

$$dG = \frac{w}{\rho_c} dx \quad (V.13)$$

$$dR = \frac{R_{sh}}{w} dx \quad (V.14)$$

Conformément à la théorie des quadripôles, les distributions de courant et de tension le long d'un contact sont données par les relations suivantes :

$$V(x) = V_1 \operatorname{ch}(\alpha x) - Z I_1 \operatorname{sh}(\alpha x) \quad (V.15)$$

$$I(x) = I_1 \operatorname{ch}(\alpha x) - \frac{V_1}{Z} \operatorname{sh}(\alpha x) \quad (\text{V.16})$$

Les paramètres caractéristiques de la ligne Z et α représentent respectivement l'impédance caractéristique et la constante d'atténuation. Elles sont données par les équations :

$$Z = \frac{\sqrt{R_{sk} \rho_c}}{w} \quad (\text{V.17})$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{sk}}{\rho_c}} \quad (\text{V.18})$$

où R_{sk} représente la résistance par carrée de la couche semiconductrice sous le contact. Il faut distinguer ce paramètre de R_{sh} qui donne la résistance par carrée de la couche vierge du semiconducteur (latéralement loin du métal).

La résistance de contact est définie comme étant la résistance d'entrée du quadripôle :

$$R_C = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (\text{V.19})$$

L'équation (V.16) donne

$$R_C = Z \operatorname{coth}(\alpha d) \quad (\text{V.20})$$

Dans le cas d'un contact électriquement long ($\alpha d > 2$), $\operatorname{coth}(\alpha d)$ prend la valeur 1 et l'expression précédente devient :

$$R_C = Z = \frac{\sqrt{R_{sk} \cdot \rho_c}}{w} \quad (\text{V.21})$$

soit

$$R_C = \rho_c \frac{\alpha}{w} \quad (\text{V.22})$$

La détermination expérimentale de R_C donne accès à ρ_c qui peut s'écrire :

$$\rho_c = R_c \frac{w}{\alpha} \tag{V.23}$$

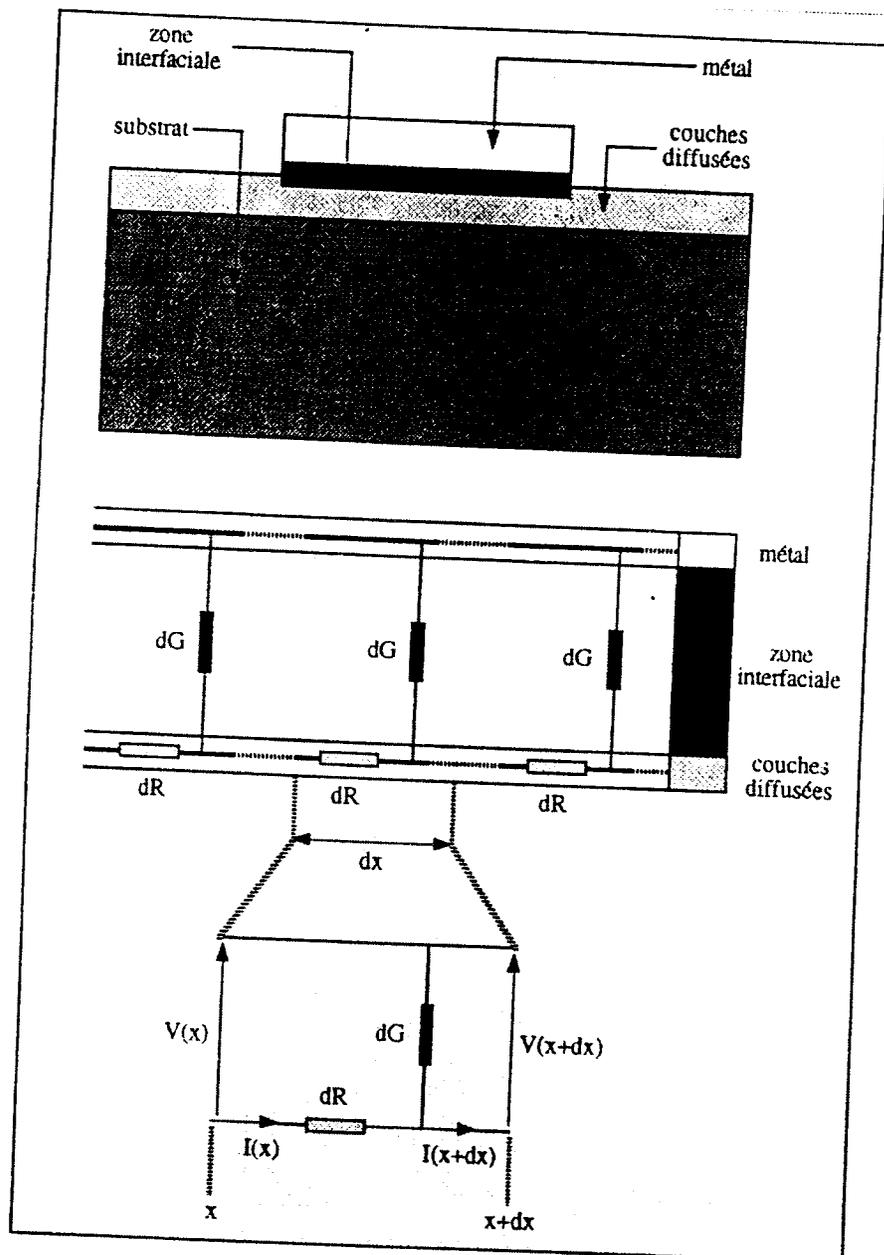


Fig.V.8 Comparaison d'un contact métal-semiconducteur à une ligne de transmission.

$\frac{w}{\alpha}$ représente donc la surface de transfert du courant ; $\frac{1}{\alpha}$ détermine la longueur de transfert L_T du courant sous le contact. Il est clair que, pour une résistance de couche fixe, ce paramètre augmente avec la résistivité de contact. Par conséquent, l'essentiel du



courant passe par une zone plus ou moins étroite du bord de contact suivant que ρ_c est faible ou grande. La figure V.9 permet de confirmer cette affirmation. L_T peut alors s'écrire :

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{sk}}} \tag{V.24}$$

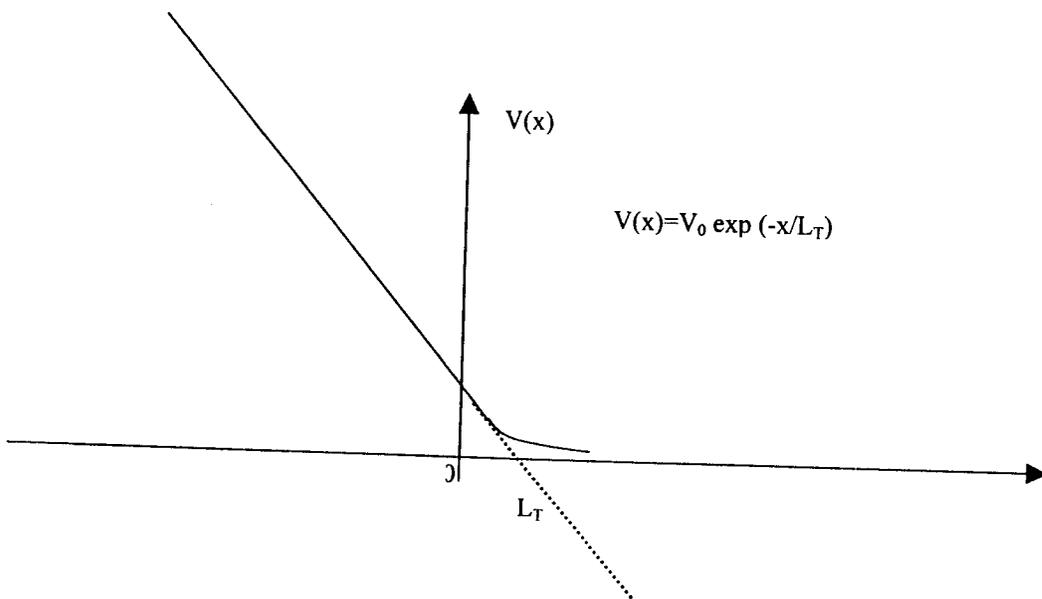
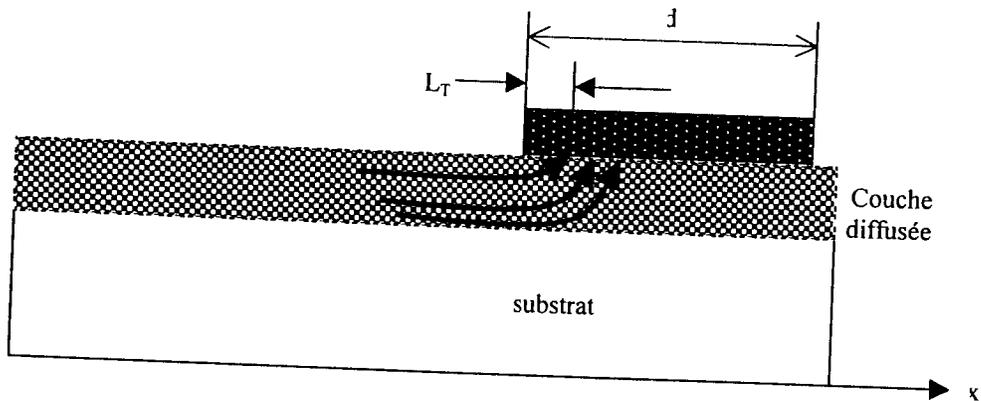
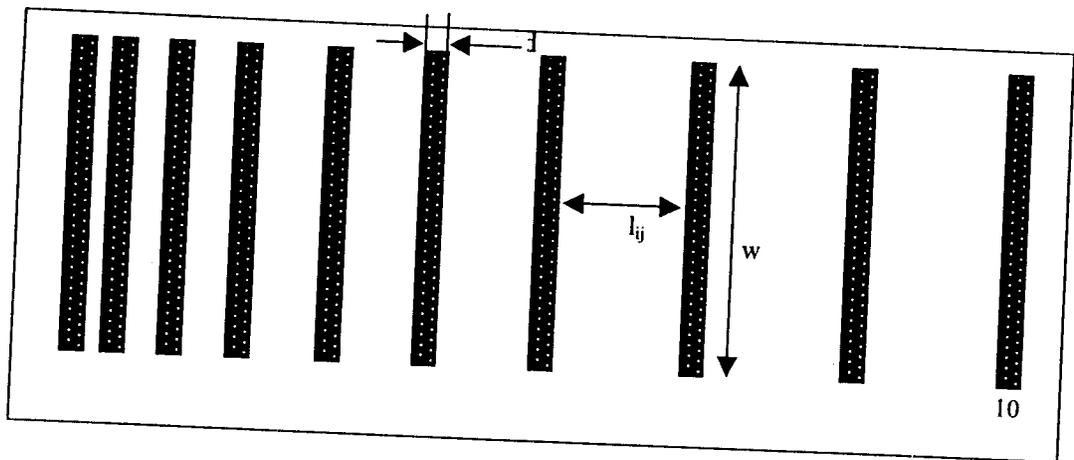


Fig.V.9 Potentiel en fonction de la distance au bord du plot sous un contact. Illustration de la longueur de transfert L_T [22].

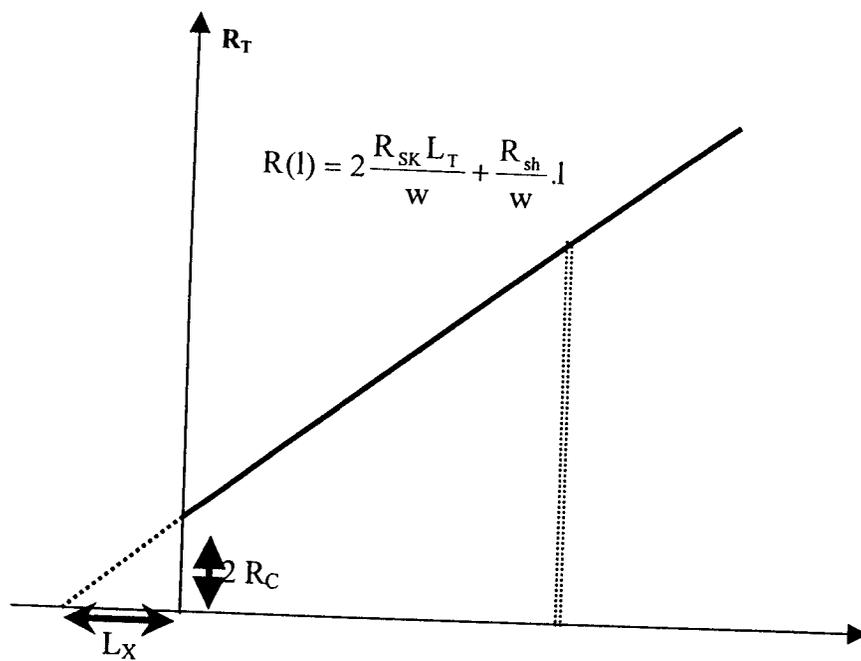


La technique illustrée par la figure V.10 consiste à utiliser des motifs de tests composés de contacts ohmiques « planar » de dimensions identiques (longueur d , largeur w). Ces contacts formés à la surface du semiconducteur sont espacés par des distances variables : $l_{12}, l_{23}, l_{34}, \dots, l_{ij}, \dots$

avec $l_{ij} = j.l_{12}$.



(a)



(b)

Fig.V.10 Détermination des paramètres de contact par la méthode TLM
 a) structure de test, b) Résistance totale mesurée entre deux contacts consécutifs en fonction de la distance qui les sépare.

A l'aide de la méthode dite « à quatre pointes », permettant de s'affranchir des résistances de contact entre les pointes et les plots métalliques, on peut injecter un courant et mesurer une tension entre deux plots consécutifs dont la résistance totale est donnée par l'expression suivante (FigureV.11) :



$$R(l) = 2R_c + \frac{R_{sh}}{w} \cdot l \quad (V.25)$$

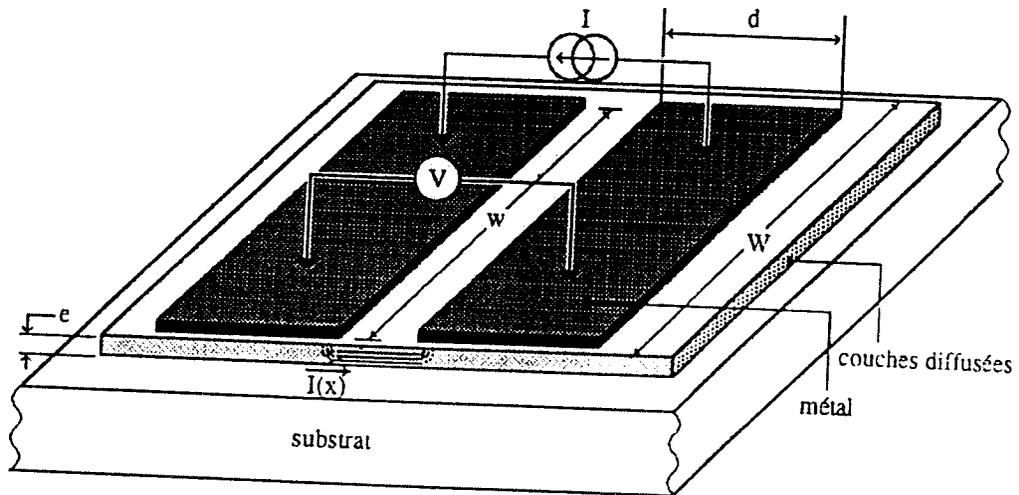


Fig.V.11 Illustration de la méthode à quatre pointes.

Ainsi la mesure et le tracé en fonction de l'espacement de la résistance relevée entre 2 plots consécutifs permet d'extraire ρ_c dans le cas d'une couche semiconductrice homogène à partir du moment où R_c (extrapolation de la droite à $l=0$), R_{sh} (pente de la droite) et longueur de transfert L_T (abscisse à l'origine) sont connus (Figure V.10b).

Dans la pratique, la couche semiconductrice sous le contact est souvent modifiée (par exemple perturbation due à l'alliage) [23]. Il faut tenir compte donc de la différence entre la résistance carrée sous le contact (R_{sk}) et la résistance carrée entre les contacts (R_{sh}) afin d'éviter une sous ou surévaluation de ρ_c . Dans ces conditions :

$$R(l) = 2 \frac{R_{sk} L_T}{w} + \frac{R_{sh}}{w} \cdot l \quad (V.26)$$

Une mesure supplémentaire est donc nécessaire pour résoudre ce problème. Deux méthodes peuvent être utilisées dans ce sens ; il s'agit d'une méthode d'extrapolation de potentiel entre deux contacts ohmiques [24] et une méthode de détermination analytique et expérimentale de la résistance de fin de contact R_e .



*Analytiquement R_e est définie par [18] :

$$R_e = (V_2/V_1)_{I_2=0}$$

Les équations des quadripôles donnent alors :

$$R_e = \frac{Z}{\operatorname{sh}\left(\frac{d}{L_T}\right)} \quad (\text{V.27})$$

*Expérimentalement, deux méthodes permettent de donner la valeur de la résistance de fin de contact R_e :

- La première [18] est obtenue en faisant passer un courant constant entre les plots a t 2 et en mesurant la tension entre les plots 2 et 3 (FigureV.12a), la résistance de fin de contact est alors donnée par $R_e=V/I$.
- La seconde [25-26] s'appuie sur la figureV.12b et donne $R_e=1/2(R_1+R_2-R_3)$.

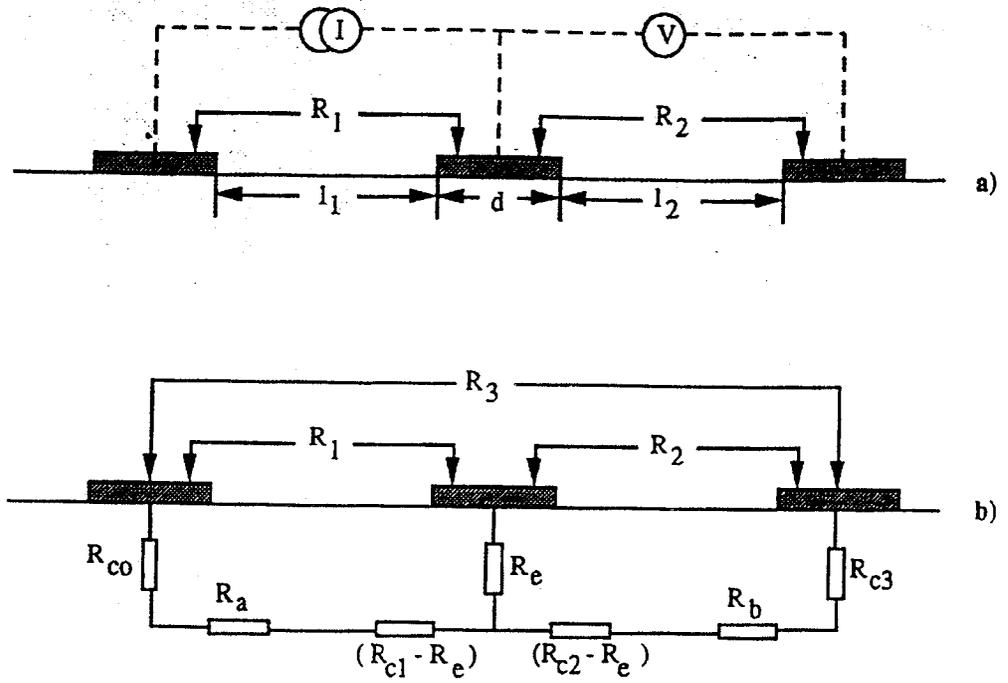
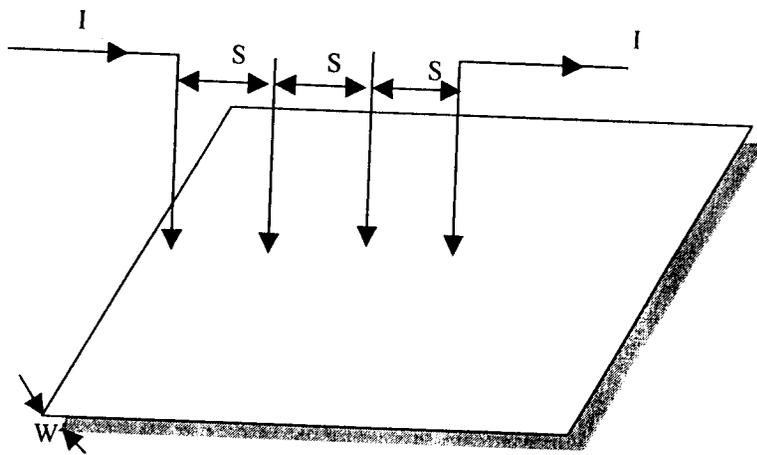


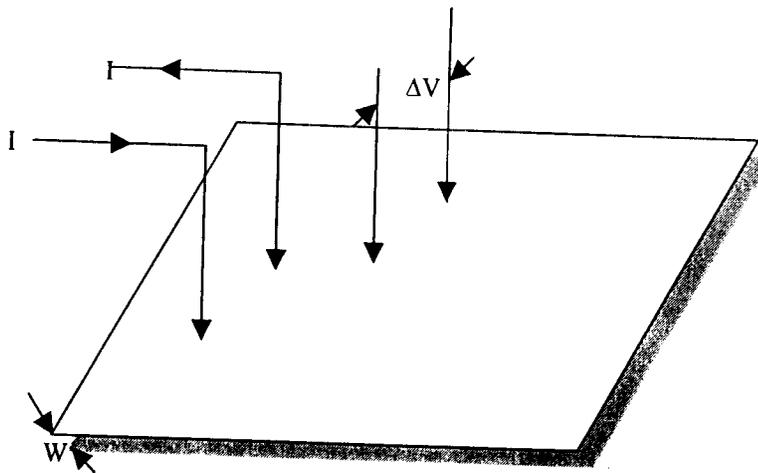
Fig.V.12 Méthodes de mesure de la résistance de fin de contact. a) $R_e = V/I$, b) $R_e = 1/2(R_1 + R_2 + R_3)$

III. Mesure de résistivité et de résistance carrée par la méthode de 4 points

Cette méthode est introduite par Valdes (1954) [27-28]. La méthode peut être utilisée pour un lingot, une tranche ou pour une couche déposée sur substrat isolant ou isolée par jonction. On applique sur l'échantillon 4 points métalliques qui peuvent être soit alignées soit disposées en carré (Fig.V.13).



(a)



(b)

Fig.V.13 Méthode à quatre pointes. a) Disposition alignée, b) Disposition carrée

Deux pointes servent d'amener le courant. Ce sont les deux pointes externes dans la version 'pointes alignées' les deux pointes adjacentes dans la version « pointes en carré », les deux autres pointes servent de prise de potentiel.



On mesure le rapport $\frac{\Delta V}{I}$. Ce rapport peut être relié à la résistivité du matériau, qui dépend de la forme de l'échantillon. Nous allons nous placer dans deux cas extrêmes :

- ◀ Echantillon semi infini : cas d'une mesure sur lingot.
- ◀ Echantillon bidimensionnel (c'est à dire dont l'épaisseur w est petite devant la distance s entre pointes) : cas d'une mesure sur tranche ou sur couche.

Nous allons faire le calcul avec les hypothèses suivantes :

- Le diamètre du contact des pointes sur l'échantillon est petit devant la distance s entre pointes,
- La vitesse de recombinaison à l'interface pointe-échantillon est élevée de sorte que les porteurs injectés s'y recombinent immédiatement et ont un effet négligeable sur la conductivité du matériau.

III.1 Echantillon semi-infini. Pointes en lignes (Fig.V.14)

Le courant injecté par la pointe I diffuse radialement dans le matériau, les équipotentiels sont des demi-sphères, la densité de courant à une distance r de la pointe vaut :

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{V.28})$$

La chute de tension entre r et $r+dr$ est :

$$dV = -\rho \frac{I}{2\pi r^2} dr \quad (\text{V.29})$$

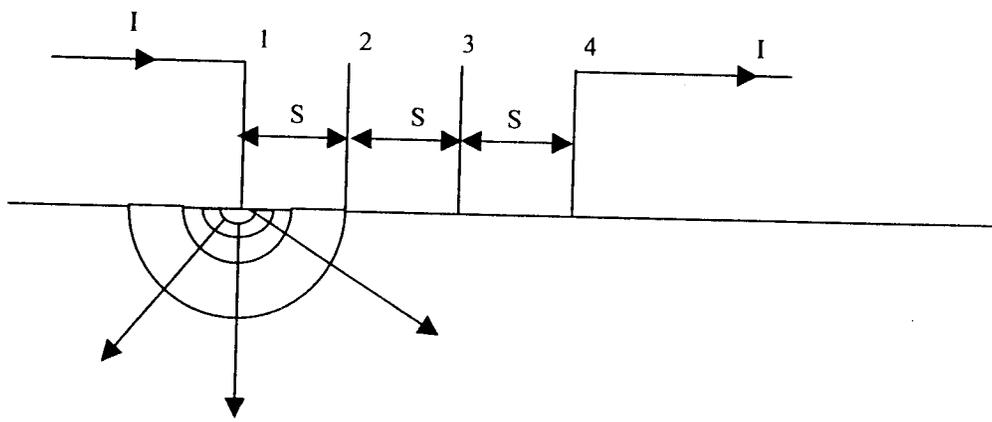


Fig.V.14 Pointes en lignes. Echantillon semi-infini.

Il en résulte que la d.d.p entre les pointes 3 et 2, due à la circulation du courant injecté en 1, vaut :

$$V'_{32} = \int_S^{2S} \left(-\rho \frac{I}{2\pi r^2} \right) dr = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{2S} - \frac{1}{S} \right) \quad (\text{V.30})$$

De même la d.d.p entre les points 3 et 2 résultant du courant I extrait en 4 vaut :

$$V''_{32} = +\rho \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{2S} - \frac{1}{S} \right) \quad (\text{V.31})$$

En appliquant le théorème de superposition, on trouve :

$$|\Delta V| = \frac{\rho I}{2\pi S} \quad (\text{V.32})$$

$$\text{D'où : } \rho = 2\pi S \frac{|\Delta V|}{I} \quad (\text{V.33})$$



III.2 Tranches (ou couche isolée du substrat) d'épaisseur $W \ll S$. Pointes en ligne

On considère que l'échantillon est bidimensionnel. Les équipotentielles du courant injecté en 1 sont cylindriques (Fig.V.15) :

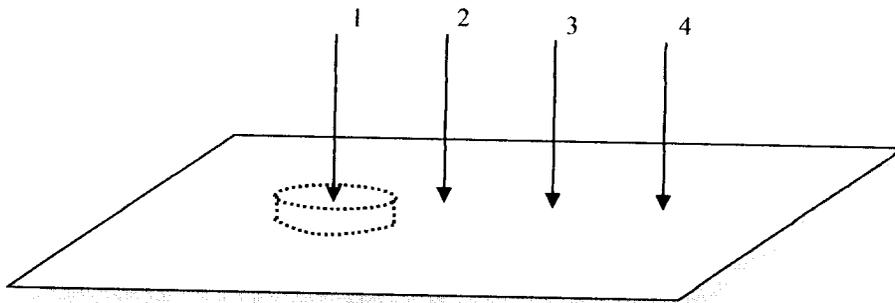


Fig.V.15 Pointes en lignes (Tranches)

La densité de courant à une distance r de la pointe vaut :

$$J = \frac{I}{2\pi r W} \quad (\text{V.34})$$

La chute de tension entre r et $r+dr$ vaut $dV = -\left(\frac{\rho l}{2\pi r W}\right)dr$, par suite :

$$V'_{32} = \int_s^{2s} \left(\frac{-\rho l}{2\pi r W}\right) dr = -\frac{\rho l}{2\pi W} \ln 2 \quad (\text{V.35})$$

$$\text{De même : } V''_{32} = -\frac{\rho l}{2\pi W} \ln 2 \quad (\text{V.36})$$

Et finalement :

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} W \frac{|\Delta V|}{I} = 4.53 W \frac{|\Delta V|}{I} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (\text{V.37})$$

La résistance carrée R_{\square} est donnée par :

$$R_{\square} = 4.53 \frac{|\Delta V|}{I} \quad (\Omega/\text{carrée}) \quad (\text{V.38})$$

La Fig. V.16 montre le montage expérimental d'une mesure à 4 pointes.

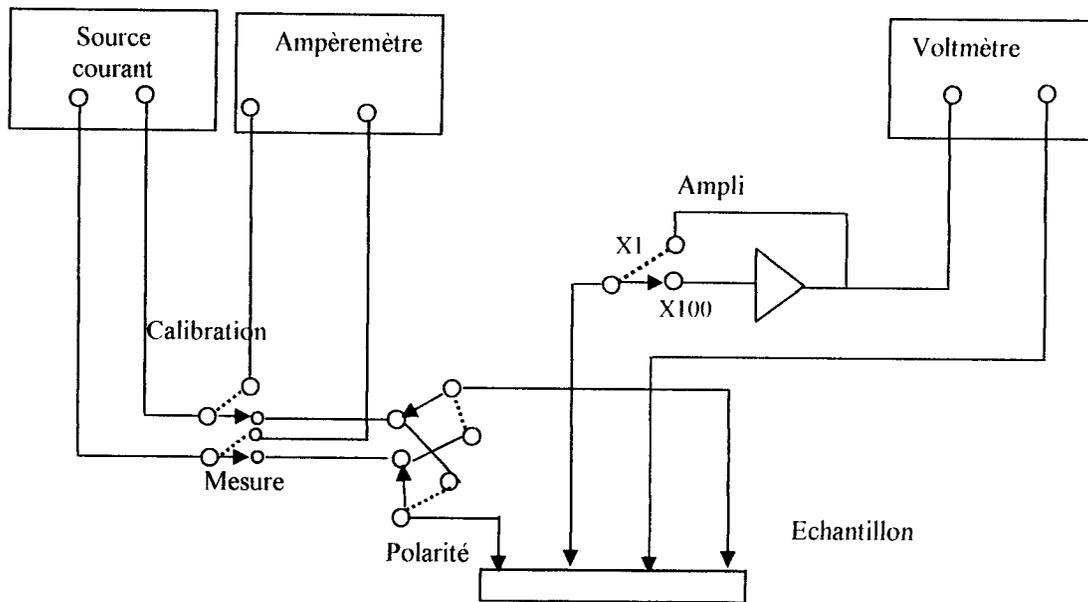


Fig. V.16 : Montage expérimental d'une mesure à 4 pointes [28].



BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.Mouhoub, Procédés Technologiques Alternatifs de réalisation des photopiles solaires au silicium cristallin, Rev.Energ. Vol.4 (2001) 11-22.
- [2] H.Herzer, Proc.10th EC PVSEC, Lisbon, April 8-12; (1999) 501.
- [3] Alain Ricaud, Photopiles solaires, Edition Cahiers de Chimie (1997).
- [4] E.J.Lee, D.S.Kim, S.H.Lee, Ni/Cu metallization for low-cost high-efficiency PERC cells, Solar Energy Materials & Solar Cells 74(2002) 65-70.
- [5] M.Lipinski and T.Zdanwicz, Sol.Energy Mater.and Sol. Cells, 26 (1992) 331.
- [6] Brunu, THUILLIER, Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin, thèse de Doctorat, Lyon (2001).
- [7] S.M.Sce, Semiconductor devices, Physics and Technology, 2nd ed (2001).
- [8] CULIK J.S.,KATZ S., Method to monitor the quality of screen-printed aluminium paste back surface fields, 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimimee Florida, USA., 1981, p.512-517.
- [9] Hamid El OMARI, Amélioration des contacts ohmiques sérigraphies des cellules solaires en silicium multicristallin, Thèse Doctorat, Lyon (1992).
- [10] BERISINE A. and MOTCHALKINA O., Technologie et construction des circuits integrs, Moscou : Edition Mir, 1986, 304 pages.
- [11] COX, R.H and STRACK, H., Ohmic Contacts for GaAs Devices, Solid-State Electronics, 1967, Vol.10 p.1213-1218.
- [12] BERGER, H.H., Contact Resistance and contact Resistivity, J.Electrochem.Soc. 1972, Vol.10, N°4, p.507-514.
- [13] SHOCKLEY, W.,Research and investigation of inverse epitaxial UHF power transistors, Wright-Patterson. Air Force Base (Ohio): Air Force Avionics Laboratory, Research and Technology Division, Air Force systems command, September 1964, 143 p.T.D.R.N°AL-TDR 64-207.
- [14] MURMANN, H. and WIDMANN, D., Current Crowding on metal contacts to planer Devices, IEEE International Solid-State Circuits Confrence, Philadelphia, 1969, p.162-163.
- [15] MURMANN, H. and WIDMANN, D., Current Crowding on metal contacts to planer Devices, IEEE Transactions On Electron Devices, 1969, Vol.ED-16, p.1022-1024.



- [16] MURMANN, H. and WIDMANN, D., Messung Des Übergangsderstandes Zwischen Metal Und Diffusionsschicht in Si-Planarelementen, Solid-State Electronics, 1969, Vol.12, p.879-886.
- [17] TING, C-Y. and CHEN, C.Y., A study of the Contacts of Diffused Resistor, Solid-State Electronics, 1971, Vol.14, p.433-438.
- [18] BERGER, H.H, Contact Resistance on Diffused Resistors, IEEE International Solid-State Circuits Conference, Philadelphia, 1969, p.160-161.
- [19] BERGER, H.H., Models For Contacts To Planar Devices, Solid-State Electronics, 1972, Vol.15.145-158.
- [20] MARTINEZ, A., Etude du Contact Métal-Silicium : Aspect Electrique et physico-chimique, Thèse d'Etat, N°704, 1976, Toulouse 3, 289 p.
- [21] KENNEDY, D.P. and MURELEY, P.C., A two-Dimensional Mathematical Analysis of the Diffused Semiconductor Resistor, IBM J.Res.Dev.1968, Vol.12, p.242-250.
- [22] SCHRODER, D.K. and MEIER, D.L., Solar cell contact Resistance- A review, IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, Vol.ED-31,N°5, p.637-647.
- [23] CHANG, I.F., Contact Resistance in Diffused Resistors, J.Electrochem.Soc., 1970, Vol.13, p.239-247.
- [24] YU, A.Y.C., Electron Tunneling and Contact Resistance of Metal-Silicon Contact Barriers, Solid-State Electronics, 1970, Vol.13, p.239-247.
- [25] REEVES, G.K and HARRISON, H.B, Obtaining the specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurements, IEEE Electron Device Letters, 1982, Vol.EDL-3, N°5, p.111-113.
- [26] A.Cheknane, B.Benyoucef, R.Zerdoum, CONTACT RESISTANCE MEASUREMENTS, proc. Conférences Maghrébine en Génie Electrique CMGE'04 12 -13 avril (2004) pp.70-74.
- [27] L.B.Valdes, Resistivity Measurements on Germanium for Transistors, Proc. IRE 42. 420-427, Feb.1954.
- [28] Dieter K.SCHRODER, Semiconductor Material and Device Characterization, A wiley-Interscience publication, edition (1990) pp.104-129.
- [29] André Vapaille et René Castagné "Dispositifs et circuits intégrés semiconducteurs" Edition MASSON (1997).



CONCLUSION ET PERSPECTIVES



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La résistance série R_s est l'un des paramètres les plus importants agissant sur les performances d'une photopile solaire. R_s est l'expression de trois sources de pertes : celles dues à la résistance de la couche avant, les pertes de puissance dans la métallisation de grille et celles dues au contact métal/semiconducteur. L'effet d'ombre constitue aussi une perte, car la surface cachée par la métallisation est inactive. En l'absence de matériaux semiconducteurs transparents et suffisamment conducteurs, il s'avère nécessaire de collecter les porteurs sur une grille métallique n'utilisant qu'une partie aussi petite que possible de la surface métallique de la cellule. Le rôle de cette grille est de réduire la résistance série de la couche diffusée et d'amener le courant le plus directement possible au contact métallique assurant la connexion entre les cellules unitaires.

Le but de notre travail a été d'optimiser les dimensions des grilles de collectes afin de minimiser l'effet de R_s sous concentration solaire. Sa minimisation ne doit pas être réalisée au détriment du coefficient de transparence. De ce fait, nous sommes amenés à faire un compromis entre l'effet d'ombre et l'effet de la résistance série, en introduisant un facteur de perte dit « taux de conduction » qui représente les pertes par R_s et en optimisant les dimensions optimales. L'optimisation de la structure de la grille pour les photopiles à forte concentration est primordiale pour la détermination du rendement énergétique maximum. Lorsque la puissance incidente sur la cellule solaire est augmentée, le rendement s'améliore. Mais, comme on peut l'imaginer, les problèmes de refroidissement ainsi que les problèmes de résistance série et de sub-linéarité vont limiter cette augmentation du rendement. Quand la concentration croît, le rendement commence par augmenter conformément à une loi mathématique, passe par un maximum puis décroît. Il y a deux causes à cette limitation, l'effet de la résistance série et celui de la température.

Notre optimisation est réalisée sur deux modèles de grille des photopiles, un modèle linéaire et l'autre circulaire. La méthodologie mise en œuvre consiste, pour ces deux modèles, dans une première étape, à calculer les différentes pertes en fonction des dimensions de la grille, puis dans une seconde étape, à déterminer les dimensions optimales qui correspondent à un taux total, d'ombre et de conduction, minimal.



Notre modélisation est faite sur des photopiles à base de silicium monocristallin ayant une métallisation à l'argent de résistivité égale à $1.6 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ et une résistance de contact de $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Pour le modèle linéaire, la largeur d'espacement optimal L_{OP} entre deux doigts consécutifs est égale à 0.331 cm pour une résistance série $R_s = 1.73 \Omega \cdot \text{cm}^2$ correspondant à un taux d'ombre = 3.03%. Le rendement de conversion énergétique a été amélioré à 16.73%.

Pour le modèle circulaire sous un taux de concentration égal à 100 soleils, le rayon optimal (r_{10P}) est égal à 1 mm pour une résistance carrée de 50 $\Omega/\text{carrée}$, qui correspond à une résistance série de $2.27 \Omega \cdot \text{cm}^2$ avec un rendement de 16.293%. Pour une résistance carrée de à 100 $\Omega/\text{carrée}$, le rayon optimal est 0.7 mm avec un rendement 15.98%.

Cette analyse nous permet de conclure que :

- La résistance série est influencée principalement par la résistance de la couche avant pour les deux modèles étudiés.
- La résistance de la métallisation de la grille vient en deuxième position. Nous pouvons réduire sa valeur en augmentant simplement l'épaisseur des doigts.
- Le taux d'ombre constitue une forme de perte pour les deux modèles. Sa minimisation ne doit pas se faire au détriment du coefficient de transparence.
- Un système de refroidissement, passif ou actif, est nécessaire car une élévation de température de fonctionnement de la photopile accroît rapidement le courant d'obscurité et pour conséquence une réduction de la tension en circuit ouvert, donc du rendement de conversion énergétique.

Cette étude doit se poursuivre en se plaçant dans une perspective dynamique et en prenant en compte les phénomènes thermiques associés aux forts courants et aux forts éclaircissements présents dans un dispositif réel avec radiateur. Une collaboration avec des thermiciens est envisagée.

ANNEXE



Annexe

Le réseau de neurone utilisé dans notre simulation dans le chapitre IV (paragraphe II) est de type perceptron multicouches (Fig.a.1).

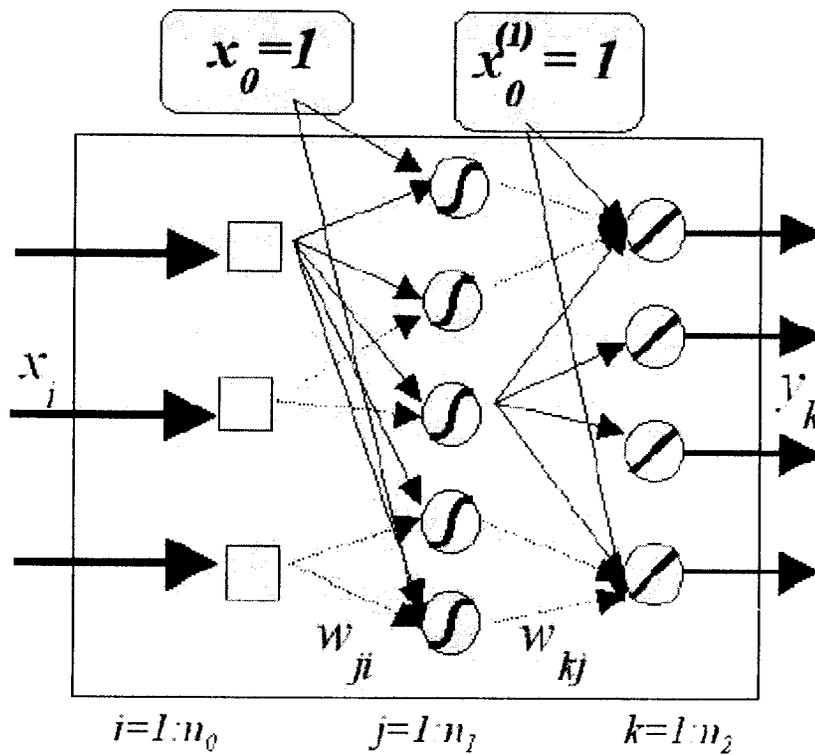


Fig.a.1 Perceptron multicouches

*Le biais de chaque couche devient une "entrée" supplémentaire de la couche

$$\text{Ex : } y_j^{(1)} = f\left(\sum_{i=1}^{n_0} w_{ji} + b_j\right) = f\left(\sum_{i=0}^{n_0} w_{ji} x_i\right) \quad (\text{a.1})$$

avec $x_0=1$ et $w_{j0}=b_j$

*Couche 1 : $W_1 = [w_{ji}]$

*Couche 2 : $W_2 = [w_{kj}]$



Propagation

*Calcul des sorties du réseau en propageant les valeurs de x de couche en couche (Fig.a.2).

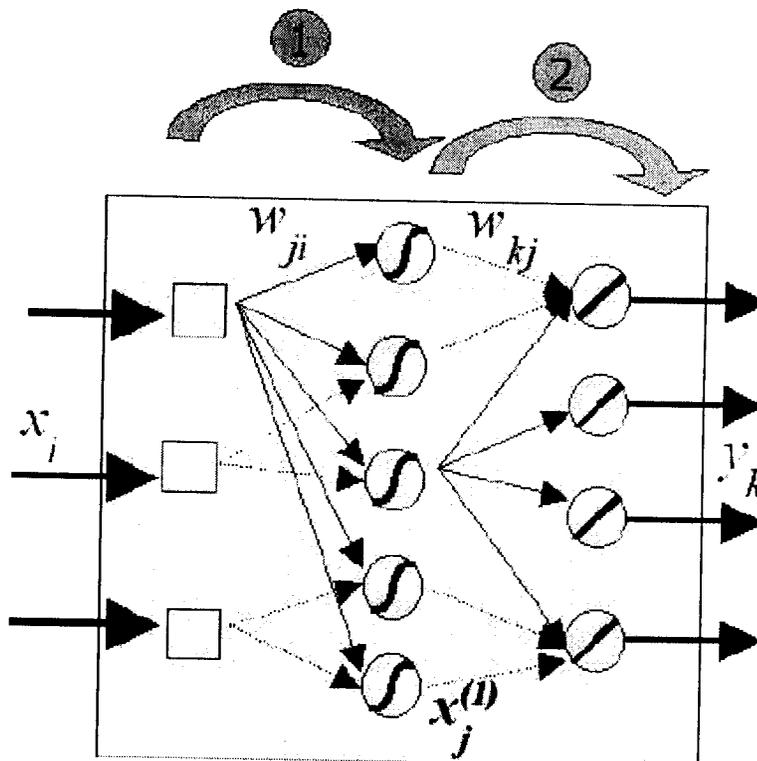


Fig. a.2 Propagation de la valeur de x de couche en couche.

où

$$a_j^{(1)} = \sum_{i=0}^{n_0} w_{ji} x_i \quad (\text{a.2})$$

$$x_j^{(1)} = f(a_j^{(1)}) \quad (\text{a.3})$$

et

$$a_k^{(2)} = \sum_j^{n_1} w_{kj} x_j^{(1)} \quad (\text{a.4})$$

$$y_k = g(a_k^{(2)}) \quad (a.5)$$

Calcul de l'erreur

On présente un exemple $x_\xi = [x_{\xi 1} \dots x_{\xi n_0}]$ dont on connaît la sortie "désirée" :

$y_{d\xi} = [y_{d\xi 1} \dots y_{d\xi n_2}]$. On calcule la sortie du PMC : $y_\xi = [y_{\xi 1} \dots y_{\xi n_2}]$

Erreur pour cet exemple : $e_\xi = y_{d\xi} - y_\xi = [e_{\xi 1} \dots e_{\xi n_2}]$.

Pour notre étude, les entrées sont le photocourant I_{PH} qu'on approxime par I_{CC} , la tension en circuit ouvert V_{OC} et le taux de concentration C , l'évolution de l'erreur avec le nombre d'itérations est représentée sur la figure a.3.

Dans le tableau a.1 nous illustrons le nombre d'itérations et le nombre des couches de réseau pour nos échantillons (utilisant les deux modèles, à une diode, et à deux diodes).

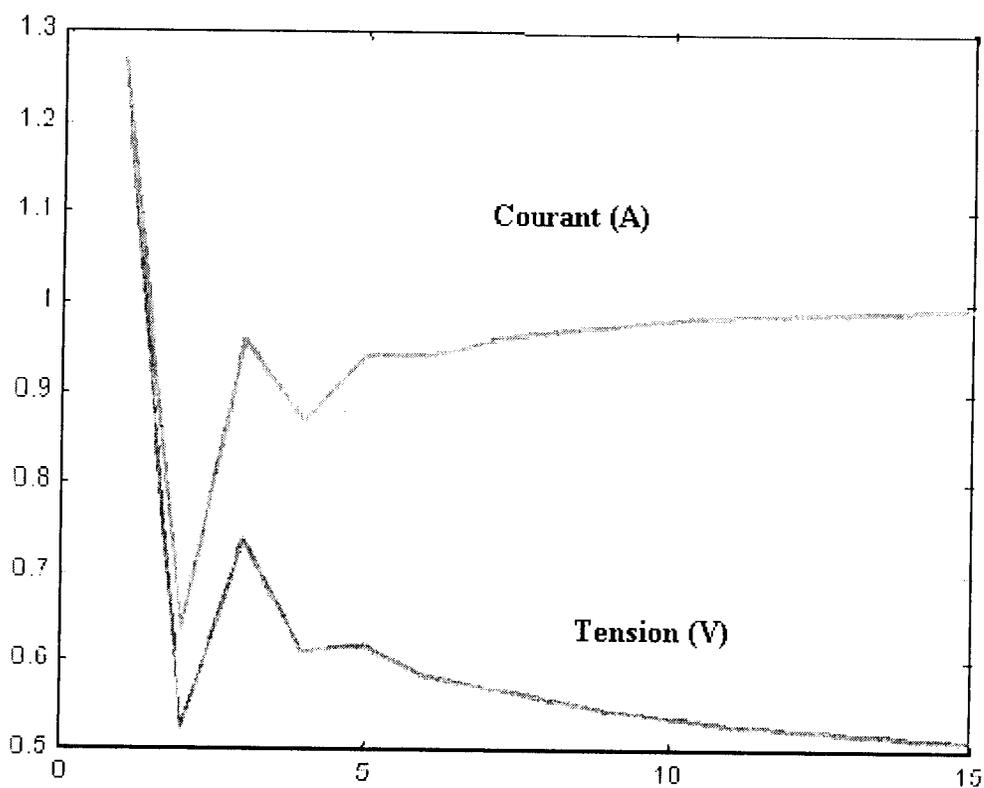


Fig. a.3 Evolution de la sortie en fonction du nombre d'itérations



Tableau a.1 Caractéristiques de la simulation par réseau multicouches pour des cellules solaires à base de silicium sous illumination variable.

	Nombre des couches	Nombre d'itérations	erreur	Type d'apprentissage
Modèle à 1 diode (Echantillon 3)	2	18	2.007 %	supervisé
	4	15	1.73001 %	
	5	17	1.287401 %	
	7	17	2.1587 %	
Modèle à 2 diodes (ex : Echantillon1)	2	18	2.78 %	supervisé
	5	15	1.2107 %	
	6	18	1.002 %	
	7	15	2.176%	

Nota : Ce n'est pas le nombre élevé des couches qui donne une bonne précision. Donc, on a intérêt à faire un bon apprentissage.

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt. Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience: il est souvent impossible de décider à priori des valeurs des poids des connexions d'un réseau pour une application donnée. A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation. Certains modèles de réseaux sont improprement dénommés à apprentissage permanent. Dans ce cas il est vrai que l'apprentissage ne s'arrête jamais, cependant on peut toujours distinguer une phase d'apprentissage (en fait de remise à jour du comportement) et une phase d'utilisation. Cette technique permet de conserver au réseau un comportement adapté malgré les fluctuations dans les données d'entrées.

Dans notre analyse l'apprentissage est supervisé, car les entrées sont : le photocourant, la tension en circuit ouvert et le taux de concentration ; les sorties sont les autres paramètres électriques de la cellule tels que R_S , R_{SH} , n_f , V_m , I_m . Avec ces paramètres nous obtenons la caractéristique courant-tension désirée qu'on compare avec celle expérimentale.

