

M0016/05B

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية متعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique.



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE

MAGISTER

EN ELECTRONIQUE
Option Electricité Solaire

Présenté par

BIRANE Abdelkader

Ingénieur d'Etat en Electronique
Université AMAR TELIDJI – Laghouat

Thème

**Caractérisation et tri de cellules solaires
par leur temps de recouvrement inverse**

Devant le Jury d'examen composé de:

M. MEHENNI Mohamed	Professeur (ENP)	Président
M. HADDADI Mourad	Professeur (ENP)	Rapporteur
M. AOUCHER Moussa	Professeur (USTHB)	Examineur
M. MALEK Ali	Maître de Recherches (CDER)	Examineur
M. BOUSSEKSOU Boulem	Chargé de cours (ENP)	Examineur

2005

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية متعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique.



DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE

MAGISTER

EN ELECTRONIQUE
Option Electricité Solaire

Présenté par

BIRANE Abdelkader

Ingénieur d'Etat en Electronique
Université AMAR TELIDJI – Laghouat

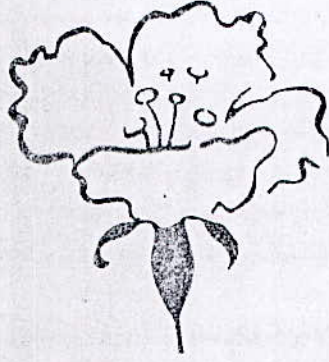
Thème

**Caractérisation et tri de cellules solaires
par leur temps de recouvrement inverse**

Devant le Jury d'examen composé de:

M. MEHENNI Mohamed	Professeur (ENP)	Président
M. HADDADI Mourad	Professeur (ENP)	Rapporteur
M. AOUCHER Moussa	Professeur (USTHB)	Examineur
M. MALEK Ali	Maître de Recherches (CDER)	Examineur
M. BOUSSEKSOU Boulem	Chargé de cours (ENP)	Examineur

2005



الإهداء

الحمد لله على إحسانه والشكر له على توفيقه وامتنانه
إلى الذين ربباني صغيرا وعلما كبيرا والدي الكريمين، مورد الجنان
ومنبع الحب والامتنان أمي وأبي، إجلالا و عرفانا .
إلى إخوتي وأخواتي .
إلى ...
إلى كل من سعى جادا متقانيا وجاهد مخلصا دون تواني من أجل
بعث أمجاد هذه الأمة .
إلى أولئك وهؤلاء ...
وآخرين ...
ارفع هذا العمل .

عبد القادر بيران

Remerciement

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de l'Electricité Solaire de l'Ecole Nationale Polytechnique.

J'exprime ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse M. HADDADJ Mourad, pour leurs soutiens, encouragements et précieux conseils.

J'exprime ma profonde reconnaissance à M. MEHENNI Mohamed, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements et ma plus vive gratitude à M. AOUCHER Moussa, M. MALEK Ali, M. BOUSSEKSOU Boulem, qui ont accepté de juger mon travail.

Je tiens également à remercier M C. LARBES, ainsi que tous les autres enseignants du Laboratoire de l'Electricité Solaire et tout le personnel du Département d'Electronique.

Mes remerciements chaleureux à tous mes collègues, en particulier Abdelhak BACHRI et Seddik MAKHLOUFA.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail soient remerciés.

Caractérisation et tri de cellules solaires par leur temps de recouvrement inverse

ملخص
الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم و إنشاء منضدة اختبار للتمييز السريع للخلايا الضوئية بهدف فرزها. تعتمد هذه الطريقة على قياس زمن الاسترجاع العكسي للخلايا الضوئية. تولد نبضات بواسطة المراقب الدقيق ثم نضخمها لنمررها عبر الخلية الضوئية. نعالج الإشارة المتحصل عليها ثم نشحن بها المكثفة هذه الأخيرة تؤدي إلى انقطاع خارجي بالمراقب الدقيق يسمح له بحساب زمن الاسترجاع العكسي. ان نجاح هذه الطريقة يسمح باستبدال طريقة الفرز الكلاسيكية. نعرض في هذه المذكرة مختلف مراحل تصميم و إنشاء منضدة الاختبار ثم نتائج التجارب و مناقشتها.

كلمات مفتاحية
خلية ضوئية - زمن الاسترجاع العكسي - فرز - تمييز

Résumé

Le but principal de ce travail est de concevoir et de construire un banc d'essai destiné à la caractérisation rapide de cellules solaires dans le but de les trier. La méthode que nous avons préconisée est la mesure de temps de recouvrement inverse. Des impulsions sont générées à l'aide d'un microcontrôleur (PIC 16f84), puis amplifiées par un étage push pull avant de charger un condensateur qui provoquera une interruption externe permettant ainsi au microcontrôleur de calculer par programme le temps de recouvrement inverse. Cette méthode qui conduit à la caractérisation et au tri rapide des cellules solaires selon leur temps de recouvrement inverse pourra remplacer la méthode classique plus longue basée sur le tracé des courbes courant-tension.

Nous présentons dans ce mémoire les différentes étapes de la conception et de la réalisation de notre banc d'essais ainsi que les résultats expérimentaux obtenus avec leur interprétation.

Mots clés

Cellule solaire – temps de recouvrement inverse – tri – caractérisation

Abstract

The main aim of this work is to design and build a test bench for fast characterization of cells in order to sort them out; the method used is based on the measurement of the reverse recovery time.

First, pulses are generated using a microcontroller, the PIC 16f84. Then they are amplified by a push pull stage and feeded to the component under test. The obtained signal go through a conditioning circuit and then charge a capacitor which causes an external interrupt allowing the microcontroller to measure the RRT by an appropriate program.

This method which gives good characterization and fast sorting out of solar cells according to their RRT, could replace the traditional method which is based on the plotting of the curves current-voltage for each cell.

In this thesis, the different stages of the design and the implementation of the test bench are presented together with the experimental results obtained and their discussion.

Key words

Solar cell – reverse recovery time – sort – characterization

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1

Convertisseur photovoltaïque

I.1. INTRODUCTION.....	1
I.2. LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	2
I.2.1. L'effet photovoltaïque	2
I.2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium	2
I.2.2.1 Le dopage d'une cellule PV au silicium	6
I.2.3 La technologie d'une cellule PV.....	7
I.2.3.1 Description d'une cellule PV	7
I.2.4 Les caractéristiques énergétiques d'une cellule PV	8
I.2.4.1 Le rendement d'une cellule PV	8
I.2.4.2 La réponse spectrale	9
I.2.5 Les caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	13
I.2.5.1. Circuit équivalent et modèle mathématique	13
I.2.5.2. La courbe courant-tension d'une cellule PV	14
I.2.5.3. La puissance caractéristique d'une cellule PV	16
I.2.6 L'influence de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement d'une cellule PV.....	20
I.2.6.1 L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement d'une cellule PV.....	20
I.2.6.2 L'influence de la température sur le fonctionnement d'une cellule PV.....	21
I.2.6.3 L'influence de la température et du rayonnement sur le fonctionnement d'une cellule PV.....	24
I.3. L'ASSOCIATION DES CELLULES PV	25
I.3.1 Photopile fonctionnant en récepteur	25
I.3.2 L'association en série de cellules PV	26
I.3.3 L'association parallèle de cellules PV	28
I.3.4 Utilisation des diodes by-pass et séries.....	31

Chapitre 2

Physique de la jonction PN

II.1. INTRODUCTION.....	31
II.2. MECANISME DE TRANSPORT DES PORTEURS.....	31
II.2.1. mobilité – conductivité.....	31
II.2.2. Equation de densité de courant totale.....	33
II.2.3. Equation de continuité.....	34

II.3. MECANISME DE RECOMBINAISON DES PORTEURS EN EXCES.....	35
II.3.1 La recombinaison radiative	35
II.3.2 La recombinaison Auger	36
II.3.3 La recombinaison indirecte	36
II.4. LA JONCTION PN.....	37
II.4.1. La Jonction PN en Circuit Ouvert	37
II.4.2. La Jonction PN Polarisée.....	39
II.4.2.1 Densité des porteurs minoritaires au niveau de la jonction.....	39
II.4.2.2 Caractéristique statique	41
II.4.3 Modélisation de la jonction PN	43
II.4.3.1 Modèles résistifs en basse fréquence	43
II.4.3.2 Influence des capacités.....	45

Chapitre 3

Méthode de caractérisation

III.1. INTRODUCTION.....	49
III.2. PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISANT UNE CELLULE SOLAIRE....	49
III.3. METHODES DE CARACTERISATION DE CELLULES SOLAIRES	50
III.3.1. Mesure de la caractéristique I - V (courant - tension).....	50
III.3.2. Mesure de la réponse spectrale	52
III.3.3. Caractérisation en régime transitoire	54
III.3.4. Etude des profils de dopage par effet HALL	56
III.4. CONCLUSION.....	56

Chapitre 4

Phénomène de recouvrement inverse

IV.1. INTRODUCTION.....	56
IV.2. LE RECOUVREMENT DIRECT.....	56
IV.3. LE RECOUVREMENT INVERSE.....	57
IV.3.1. phénomène de recouvrement inverse.....	58
IV.3.2. Charge recouverte	60
IV.3.3. les deux phases de recouvrement inverse	60
IV.3.5. les paramètres caractéristiques du recouvrement inverse	62
IV.3.6. Temps de recouvrement inverse	63
IV.3.6.1. Influence de la résistance sur le temps de recouvrement inverse	64
IV.3.7. Mesure de temps de recouvrement inverse	66
IV.4. CONCLUSION.....	68

Chapitre 5 *Etude expérimentale*

V.1. INTRODUCTION	70
V.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	70
V.2.1 Le schéma de circuit électrique	72
V.3. BLOC DE TRAITEMENT	74
V.4. BLOC DE CONDITIONNEMENT	75
V.4.1 Redresseur sans seuil	75
V.4.2 Amplificateur inverseur	76
V.5. BLOC D'AMPLIFICATION	77
V.5.1 Le montage "push-pull"	77
V.6. BLOC D'AFFICHAGE	77
V.7. LE PROGRAMME	79
V.8 TESTS ET RESULTATS DES MESURES	82
V.9 CONCLUSION	83

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEXES

Liste de figures

Convertisseur Photovoltaïque

Figure 1.1	Cellule photovoltaïque	02
Figure 1.2	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	03
Figure 1.3	Représentation d'une photopile en silicium parfait	04
Figure 1.4	Le modèle des bandes d'énergie	05
Figure 1.5	Efficacité en fonction des gaps (E_g) pour différents types de semi conducteurs (courbe verte)	05
Figure 1.6	Schéma de descriptif d'une cellule photovoltaïque	07
Figure 1.7	Réponse spectrale d'une cellule PV au silicium comparée au rayonnement solaire au sol	09
Figure 1.8	Réponse spectrale d'une cellule PV couches minces en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident	10
Figure 1.10	Circuit équivalent d'une cellule solaire.	12
Figure 1.11	Caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule PV au silicium	14
Figure 1.12	Caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule PV au silicium sous différents éclairagements	15
Figure 1.13	Courant généré par une cellule PV idéale	16
Figure 1.14	Courant généré par une cellule PV	17
Figure 1.15	Courbe du courant en fonction de la tension, et courbes d'isopuissances	18
Figure 1.16	Courbes de puissances en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV	18
Figure 1.17	Les courbes d'isopuissances et les courbes de puissances en fonction de la tension	19
Figure 1.18	Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairément	20
Figure 1.19	Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairément	21
Figure 1.20	Influence de l'irradiation sur le rendement en fonction de la température	21
Figure 1.21	Tension V_{co} en fonction de la température	22
Figure 1.22	Intensité I_{CC} en fonction de la température	22
Figure 1.23	Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à éclairément constant en fonction de la température	23
Figure 1.24	Influence de la température sur la puissance en fonction de la tension	23
Figure 1.25	Influence de la température sur le rendement en fonction de l'rradiation	23
Figure 1.26	Fonctionnement de cellules en série, caractéristiques courant-tension de l'ensemble	26
Figure 1.27	Fonctionnement de 4 cellules en série, l'une d'entre elles étant occultée partiellement	26
Figure 1.28	Schéma électrique du montage série	27
Figure 1.29	Schéma électrique du montage série - parallèle	27
Figure 1.30	Courbe caractéristique d'un montage parallèle, deux cellules (une étant occultée)	28
Figure 1.31	Courbe caractéristique d'un montage parallèle, 4 cellules (une étant occultée)	29

Figure 1.32	Courbe caractéristique d'un montage parallèle, deux cellules (une étant occultée)	29
Figure 1.33	Schéma électrique du montage parallèle	30
Figure 1.34	Schéma électrique équivalent du montage parallèle	30

Physique de La jonction PN

Figure 2.1	Déplacement statistique des électrons dans le semiconducteur et effet du champ électrique sur ces déplacements	32
Figure 2.2	Tranche d'un barreau orienté suivant x	35
Figure 2.3	La recombinaison radiative	36
Figure 2.4	La recombinaison Auger	37
Figure 2.5	La recombinaison indirecte	37
Figure 2.6	Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique	38
Figure 2.7	Jonction PN polarisée	40
Figure 2.8	Répartition du potentiel interne dans une jonction PN polarisée	40
Figure 2.9	Répartition des trous injectés côté N	42
Figure 2.10	Caractéristique courant-tension d'une diode 1N4148	44
Figure 2.11	Définition des différents modèles résistifs d'une jonction PN	44
Figure 2.12	Schéma équivalent d'une diode à jonction	45
Figure 2.13	Capacité de transition se la jonction polarisée en inverse	46
Figure 2.14	Variations de capacité de diodes varicap	47
Figure 2.15	Répartition des trous minoritaires pour une variation de charge stockée dQs	48
Figure 2.16	Schéma équivalent d'une jonction PN polarisée en direct	49

Méthodes de Caractérisations

Figure 3.1	Spectres solaires AM0 et AM1.5	52
Figure 3.2	Courbes I-V d'une cellule solaire simple mesurée sous simulateur solaire (mesures effectuées à l'UDTS-Alger)	52
Figure 3.3	Principe de fonctionnement de l'installation de mesure de réponse spectrale	53
Figure 3.4	Mesure de la réponse spectrale des cellules solaires	54
	(Mesures effectuées à l'UDTS-Alger)	
Figure 3.5	mesure de temps de recouvrement inverse	55
Figure 3.6	charge temps de recouvrement inverse (Q_s et t_{tr})	56

Phénomène de Recouvrement Inverse

Figure 4.1	Impulsion électrique	59
Figure 4.2	Graphiques de concentration	59
Figure 4.3	Temps de recouvrement direct de la diode	59
Figure 4.4	Génération d'un courant très important dans le sens inverse	60
Figure 4.5	Evacuation des porteurs en excès.	60
Figure 4.6	Evacuation totale des porteurs en excès	62
Figure 4.7	Circuit de commutation	63
Figure 4.8	temps de recouvrement inverse et charge recouvrée	63

Figure 4.9 (a)	L'impédance du circuit ne limite pas le courant inverse	65
Figure 4.9 (b)	L'impédance du circuit limite Le courant inverse	65
Figure 4.10	Influence de la résistance placée dans le circuit sur le T_{rr}	66
Figure 4.11	Influence de la résistance sur le temps de recouvrement inverse	67
Figure 4.12	Le circuit de test approuvé par JEDEC	68
Figure 4.13	Dispositif expérimental pour la mesure du temps de recouvrement inverse	69
Figure 4.14	circuit de mesure de temps de recouvrement inverse	70

Etude Expérimentale

Figure 5.1	Schéma synoptique du système de mesure	72
Figure 5.2	Schéma électrique globale	74
Figure 5.3	Bloc de traitement	75
Figure 5.4	Redresseur sans seuil	76
Figure 5.5	Amplificateur inverseur	77
Figure 5.6	Schéma du redresseur avec l'inverseur	77
Figure 5.7	Schéma de principe du montage push-pull	78
Figure 5.8	Un inverseur a transistor PNP	79
Figure 5.9	schéma de circuit d'affichage	79

Introduction Générale



La production d'électricité par conversion de la lumière à l'aide de cellules photovoltaïques connaît un essor fulgurant à l'aube du 21ème siècle avec un taux de croissance record de plus de 40% en 2000. De nouvelles approches technologiques seront toujours nécessaires afin de réaliser des cellules à faible coût et à haut rendement de conversion énergétique afin de permettre au photovoltaïque de dépasser d'ici l'an 2010 le seuil de compétitivité par rapport aux autres sources de production d'électricité.

La réalisation de cellules à base de silicium cristallin reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les panneaux solaires sont, par conséquent, réalisés par association d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Ces cellules sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques associant, généralement en série pour élever la tension, un certain nombre de cellules élémentaires de technologie et caractéristiques identiques. Suivant les besoins de l'utilisation, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés.

Cependant, leur fonctionnement est altéré si l'une des cellules associées est occultée (ombre par exemple), ce qui provoque par la suite un problème de déséquilibre dans les modules solaires, donc il faut qu'on prenne soin de n'associer en série ou en parallèle que des cellules identiques ayant une même densité de courant, d'où la

nécessité en production de tester et trier soigneusement les cellules et de les classer en fonction de leurs caractéristiques.

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de photopiles en fonctionnement.

En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairage et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau. La mise en place de dispositifs de protection efficaces contre les effets négatifs de ces déséquilibres sur le comportement et la fiabilité doit être prévue.

Dans ce travail nous nous intéressons à la réalisation d'un moyen de tri rapide des cellules solaires pour faciliter la réalisation de module solaire.

Organisation du mémoire :

Ce mémoire est divisé en deux parties. La première, constituée des chapitres 1 et 2, détaille les principes de base des convertisseurs photovoltaïques et les notions fondamentales de la physique des photopiles.

Dans le premier chapitre, nous rappelons quelques définitions utiles, puis nous énonçons les principes de base des convertisseurs de lumière en électricité et on étudie la photopile à travers ses caractéristiques électriques en fonction de l'éclairage et de la température. Nous analysons ensuite comment se comporte un groupement de cellules solaires en série et en parallèle, pour former un module en étudiant le problème de déséquilibre dans ces groupements.

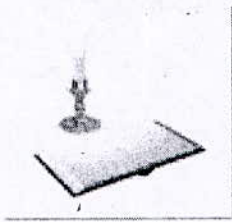
Le deuxième chapitre décrit la physique des photopiles. On y présente en termes simples les notions fondamentales de la physique des semiconducteurs puis nous étudions la jonction PN à l'équilibre et sous polarisation.

La seconde partie, constituée des chapitres 3 à 5, traite des méthodes de caractérisations des cellules solaires et du phénomène de recouvrement inverse, nous y parlerons des tests et des expérimentations, pour trier les cellules solaires selon le temps de recouvrement inverse, ce qui a fait l'objet de ce travail.

Le troisième chapitre est une transition vers la deuxième partie plus pratique de notre thèse, consacré aux méthodes de caractérisations des photopiles et des matériaux semiconducteurs.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude détaillée du phénomène de recouvrement inverse dans la jonction PN et les diodes. Nous étudions dans ce chapitre les paramètres caractéristiques de ce phénomène, spécialement le temps de recouvrement inverse ainsi que les différents montages proposés pour la mesure de ce dernier.

Dans le cinquième chapitre on présente la partie expérimentale de notre travail, dans laquelle nous décrivons notre circuit de test et les résultats expérimentaux.



Une brève histoire des photopiles

Le physicien français Edmond Becquerel décrivit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela reste une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre.

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratories qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. Ce furent en fait les programmes spatiaux qui donnèrent à cette technique ses premières applications commerciales. En 1958, le satellite artificiel américain "Vanguard" emportait un petit panneau de cellules solaires pour alimenter sa radio. Elles fonctionnèrent si bien que les générateurs solaires ont depuis fidèlement accompagné la conquête spatiale et ce sont des centaines de milliers de cellules solaires qui nous permettent aujourd'hui de communiquer par téléphone et par télévision d'un continent à l'autre.

L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. Après tout, une cellule solaire classique n'est rien d'autre qu'une grande diode au silicium ayant la surface de la totalité de la plaquette sur laquelle elle est déposée. La taille des photopiles accompagna d'ailleurs la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 2 pouces dans le début des années 70, à 3 pouces à la fin des années 70, 4 pouces

au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingets multicristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquette carrées de 10 cm de côté, et qui atteignent aujourd'hui couramment 12,5 à 15 cm de côté.

Jusqu'au milieu des années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre. Ce n'est que depuis le deuxième choc pétrolier au début des années 80 qu'un intérêt véritable s'est rapidement manifesté à travers le monde pour les applications énergétiques terrestres photopiles.

La première partie

Chapitre 1

Convertisseur Photovoltaïque

Convertisseur photovoltaïque

1.1. INTRODUCTION

Face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium...), face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet de serre, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites "renouvelables" et notamment vers la plus ancienne, le soleil, qui déverse chaque jour l'équivalent de 100 000 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole). Cette valeur est à comparer aux 9,58 milliards de TEP que représente la consommation annuelle mondiale en énergie primaire (1998).

Considéré dans l'Antiquité comme un dieu, le soleil est aujourd'hui réduit au statut d'énergie une énergie qu'il nous faut apprendre à capter, à transformer, à stocker... capter cette énergie solaire et la transformer directement en électricité par effet photovoltaïque est une alternative.

Nous décrirons successivement dans les pages qui suivent :

- les principes de base qui régissent le fonctionnement de la cellule photovoltaïque (PV) et plus particulièrement de la cellule photovoltaïque à base de silicium,
- le groupement des cellules solaires en série et en parallèle et le problème de déséquilibre lors de l'association de ces cellules.

I.2. LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

I.2.1. L'effet photovoltaïque

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques externes (appelés électrons de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, son agitation se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Le terme photovoltaïque vient du grec " photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

I.2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium

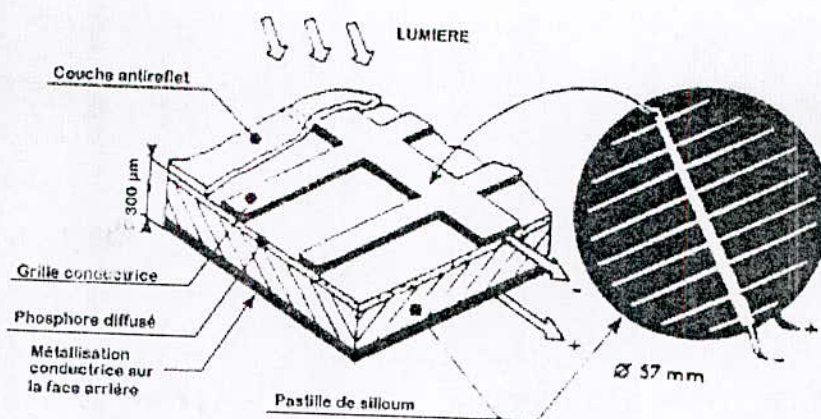


Figure 1.1. Cellule photovoltaïque

Dès qu'elle est éclairée, une cellule photovoltaïque, appelée également photopile, génère un courant électrique continu à ses bornes, sous une tension électrique. Son principe de

fonctionnement (illustré ci-dessous) est simple : il consiste à convertir l'énergie cinétique des photons (particules de lumière composant du rayonnement solaire) en énergie électrique (Figure1.2).

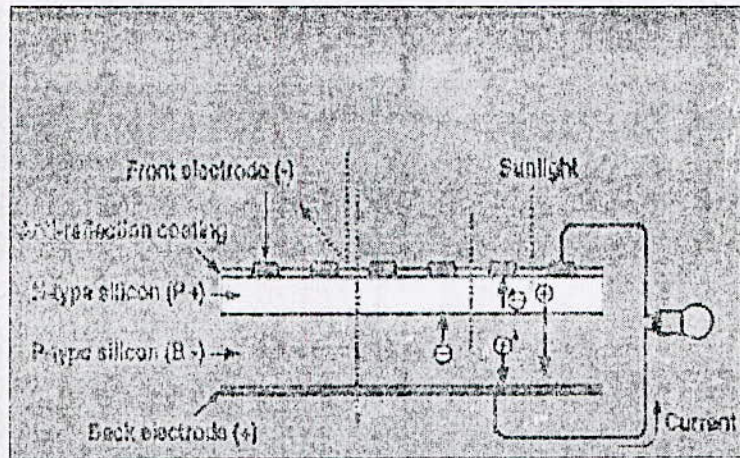


Figure1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

En première approximation, on peut considérer ce système comme un générateur de courant continu. Il convient de noter que ce générateur ne possède aucune pièce mobile.

Les cellules photovoltaïques (PV) sont réalisées à partir de matériaux semi-conducteurs, et en particulier le silicium à partir duquel la majorité des cellules PV sont fabriquées (99 % des cellules fabriquées en 2001).

Le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur la planète Terre : il représente 28 % de l'écorce terrestre. Il n'est pas présent à l'état pur mais, par exemple, sous forme de sable siliceux. Il est parfaitement homogène (isotrope), stable et non toxique. Le silicium pur est obtenu par purification (par exemple par centrifugation en fusion sous vide) d'un lingot de silicium provenant de la fonderie.

Dans un matériau semi-conducteur, la situation électrique est intermédiaire entre un isolant et un conducteur : les électrons de valence ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes (énergie solaire par exemple), c'est à dire que le matériau semi-conducteur devient conducteur seulement si on lui apporte de l'énergie.

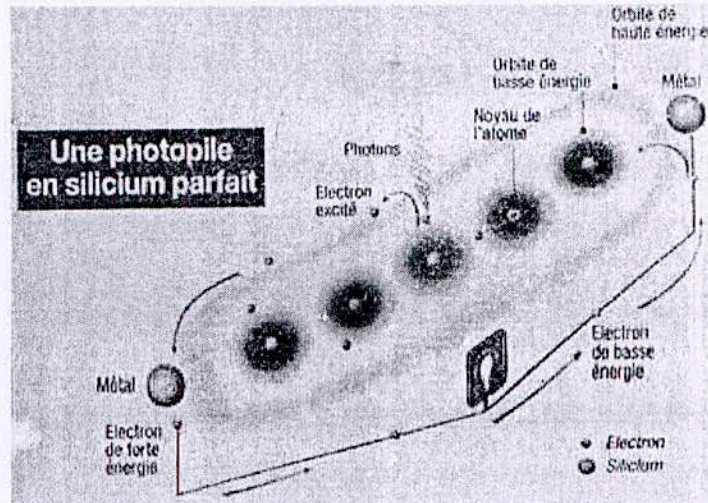


Figure 1.3. Représentation d'une photopile en silicium parfait

Les électrons tournent autour des noyaux, dans la cellule photovoltaïque. Sous l'effet de la lumière, les électrons de la couche supérieure des atomes sont "arrachés" sous l'action du choc d'un photon lumineux (Figure 1.3). Les électrons "déchirés" des atomes créent ainsi un courant continu directement utilisable aux bornes de la cellule, sous une tension électrique continue (tension de circuit ouvert de l'ordre de 0,4 à 0,6 Volt pour les cellules photovoltaïques au silicium monocristallin, dans des conditions de fonctionnement standards (STC)).

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques au silicium repose sur les propriétés électroniques de ce matériau, dont les atomes sont parfaitement rangés en lignes et en colonnes et liés les uns aux autres par quatre paires d'électrons périphériques : le silicium est dit tétravalent.

En outre, on améliore sa conduction en dopant ce cristal, c'est-à-dire en ajoutant, dans le réseau cristallin, des atomes étrangers (impuretés) de même taille, en petit nombre, qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons de valence du silicium.

Le modèle des bandes d'énergie

Pour des atomes à 4 électrons de valence (structure en $ns^2 np^2$) tel que le silicium ou le carbone, on a deux ensembles de niveaux d'énergies très proches les uns des autres. Ces deux

ensembles forment deux bandes d'énergie : une bande liante contenant $2n$ niveaux (pouvant recevoir $4n$ électrons) et une bande anti-liante à $2n$ niveaux également :

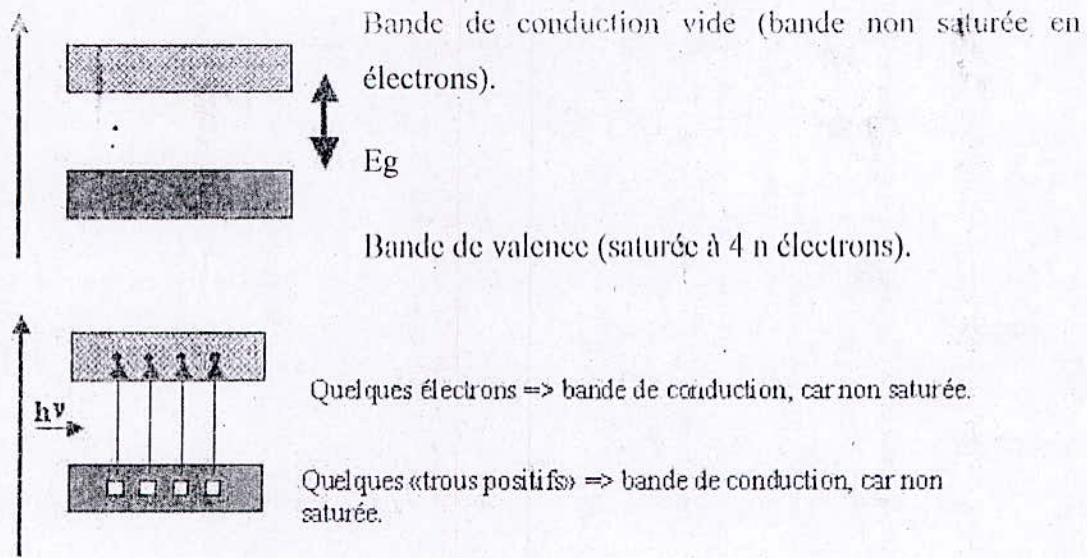


Figure 1.4. Le modèle des bandes d'énergie

E_g est la valeur de l'écart entre les 2 bandes (gap). Les isolants correspondent à $E_g > 5$ eV et les semi-conducteurs à $E_g < 5$ eV. En effet, si E_g n'est pas trop grand et si un photon est absorbé par le matériau (ou si la température augmente) un électron peut " sauter " la bande d'énergie E_g et " peupler " la bande de conduction.

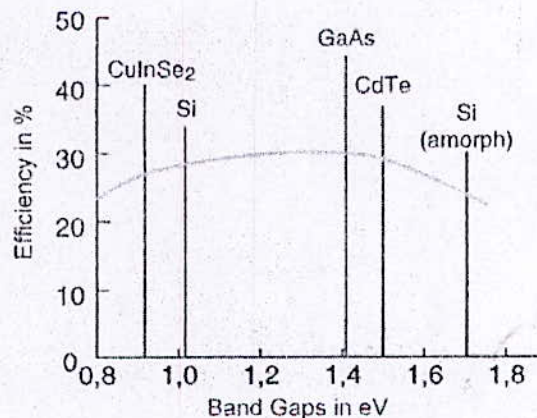


Figure 1.5. Efficacité en fonction des gaps (E_g) pour différents types de semi conducteurs

1.2.2.1 Le dopage d'une cellule PV au silicium

En quittant la bande de valence, l'électron laisse un " trou " qui va se comporter comme une charge positive, et qui va se recombiner avec le premier électron qu'il rencontrera. Il suffit donc de créer un champ électrique qui sépare les électrons des trous afin d'éviter qu'ils se recombinent, ce qui a également pour effet de créer un courant électrique.

L'un des moyens le plus employés généralement est de créer une jonction " P-N ", obtenue en " dopant " le semi-conducteur, c'est à dire en y introduisant de faibles quantités d'un autre matériau appelé impureté : si les atomes d'un matériau tel que le phosphore contiennent plus d'électrons que le matériau semi-conducteur avec lequel il sera mélangé et qu'il dopera, le semiconducteur dopé contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type " N ". Le dopage " N " consiste donc par exemple à ajouter au semi-conducteur des atomes possédant 5 électrons périphériques (phosphore par exemple). Quatre de ces électrons vont participer à la structure et l'électron supplémentaire va se retrouver libre et pouvoir se déplacer. Ce sont des porteurs de charges mobiles. Ce dopage se fait sur la face avant exposée à la lumière ;

Si, au contraire, les atomes d'impureté - bore par exemple - contiennent moins d'électrons que le matériau semi-conducteur avec lequel il sera mélangé et qu'il dopera (comme le bore), le semiconducteur dopé sera déficitaire en électrons : il sera dit de type " P ". Le dopage " P " consiste donc par exemple à ajouter au silicium des atomes possédant 3 électrons de valence (bore par exemple). Ceux-ci participent à la structure, mais un " trou " est créé par chaque atome étranger puisqu'il lui manque un électron périphérique. Ce dopage se fait sur la face arrière du semi-conducteur.

En " liant " solidairement un cristal N et un cristal P, on crée une jonction P-N, au sein de laquelle il est possible de faire apparaître un champ électrique interne pour entraîner vers le circuit extérieur les charges électriques libérées sous illumination. Ainsi, sous l'action du choc du photon, l'électron en excès sur l'atome d'impureté N est arraché, créant un " trou électronique " Figure 1.3.

L'électron arraché est capté naturellement par l'atome d'impureté P qui est déficitaire en électrons, créant ainsi une " bosse électronique ". La liaison est alors devenue instable électroniquement et aura tendance à revenir à son état d'équilibre électronique initial - le " trou " précédemment créé sera comblé par un électron et ainsi de suite, créant donc une circulation d'électrons, et donc un courant électrique Figure 1.6.

1.2.3 La technologie d'une cellule PV

1.2.3.1 Description d'une cellule PV

Les technologies utilisées par les différents fabricants varient, mais les caractéristiques de base des composants d'une cellule sont les mêmes

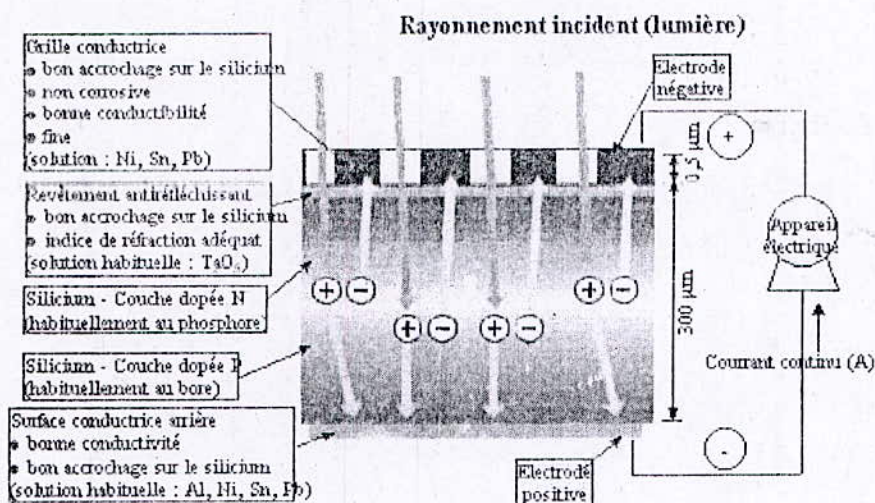


Figure 1.6. Schéma de description d'une cellule photovoltaïque

Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces (Figure 1.6) à savoir :

- une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion ;
- une grille conductrice avant " collectrice des électrons " qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion ;
- une couche dopée N avec porteurs de charge libres négatifs (électrons) ;
- une couche dopée P avec porteurs de charge positifs (trous) ;
- une surface de contact conductrice en métal " collectrice des électrons ", ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium ;

Remarques

Afin que la collecte des électrons soit la meilleure possible, il conviendra de réaliser une " grille collectrice avant " sur la couche N la plus dense possible, ce qui aura pour effet de couvrir la couche réceptrice et donc de réduire la surface de la couche N et ainsi de réduire d'autant la quantité des photons frappant la cellule PV, et donc la production d'électricité. Le meilleur compromis entre les deux contraintes est de laisser passer la lumière en déposant l'électrode avant sous la forme d'un peigne aussi serré que possible.

1.2.4 Les caractéristiques énergétiques d'une cellule PV

Comme dans tous les systèmes énergétiques, l'énergie disponible aux bornes d'une cellule PV est fonction de l'énergie entrante et des pertes, ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} - E_{\text{thermique}} \quad (1.1)$$

Avec :

$E_{\text{électrique}}$: L'énergie disponible aux bornes de la cellule PV (tension-courant).

$E_{\text{lumineuse}}$: L'énergie incidente (flux lumineux).

$E_{\text{thermique}}$: Les pertes thermiques (par convection, rayonnement et conduction).

1.2.4.1 Le rendement d'une cellule PV

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique (Wh ou J) qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement (visible ou invisible à l'œil, lumineux ou solaire) (Wh ou J) reçue ou incidente, c'est à dire le rapport :

$$\eta = E_{\text{électrique}} / E_{\text{lumineuse}} \quad (1.2)$$

L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction des caractéristiques du type de rayonnement - de la répartition spectrale, de l'angle d'incidence - de la quantité d'énergie reçue, de la surface de la cellule, de ses caractéristiques dimensionnelles, de la forme de la cellule, et des conditions ambiantes de fonctionnement de la cellule PV (température de l'environnement, vitesse du vent ...).

En pratique, les cellules photovoltaïques ne transforment qu'une partie de l'énergie incidente en électricité. La cellule PV, comme l'œil, n'utilise pas la totalité du spectre solaire de plus,

une grande partie n'est pas utilisée et est transformée en chaleur. Nous décrivons ci-après le rôle, l'importance et l'influence des paramètres intervenant dans le fonctionnement d'une cellule PV.

1.2.4.2 La réponse spectrale

Comme l'œil, une cellule photovoltaïque (PV) n'utilise pas indifféremment toutes les longueurs d'onde du spectre solaire. On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau constituant la cellule PV.

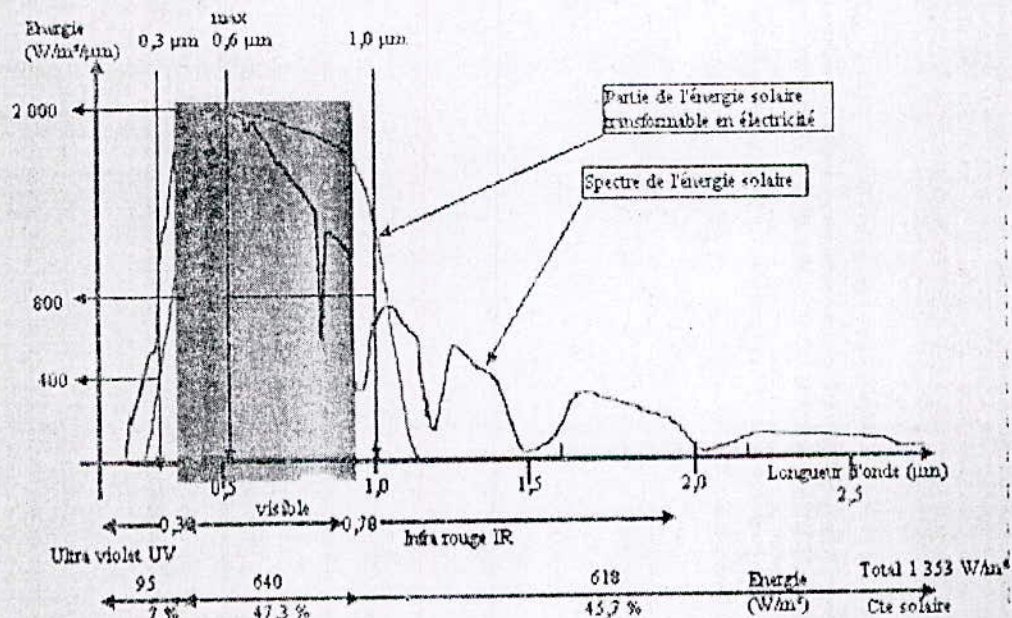


Figure 1.7. Réponse spectrale d'une cellule PV au silicium comparée au rayonnement solaire au sol

Ainsi, lorsqu'une cellule PV est soumise au rayonnement solaire, seule une partie de ce rayonnement sera transformée en électricité. Le rayonnement solaire est réparti sur une plage de longueurs d'onde débutant en deçà de l'ultraviolet (longueurs d'onde inférieures à 0,4 microns) et s'étendant au delà de l'infrarouge (longueurs d'onde supérieures à 0,7 microns). L'œil n'est sensible qu'aux longueurs d'onde comprises entre ces deux valeurs. Comme l'œil la cellule n'est sensible qu'à une partie du rayonnement solaire - celle comprise entre 0,35 et 1,1 microns - partie du rayonnement solaire essentiellement visible, et une partie du rayonnement ultraviolet (de 0,35 à 0,4 μm) et du rayonnement infrarouge (de 0,7 à 1,1 μm).

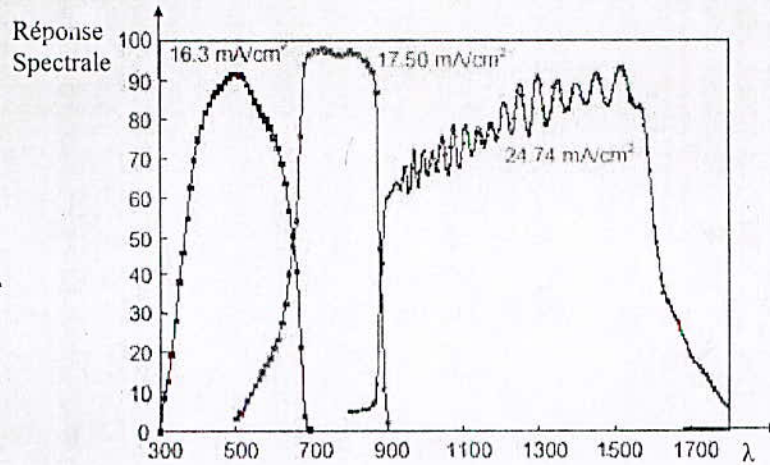


Figure 1.8. Réponse spectrale d'une cellule PV couches minces en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident

Cette sélection des longueurs d'onde s'explique par le fait que le photon doit avoir suffisamment d'énergie pour arracher un électron.

Bien que le photon ait par définition une masse nulle, il a cependant une énergie : une énergie cinétique. Cette énergie (l'énergie de rayonnement) est de la forme :

$$E = h \cdot \nu \tag{1.3}$$

E (J) Joule : Energie cinétique d'un photon de longueur d'onde λ

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J . s : Constante de Planck

ν (Hz) Hertz : Fréquence du rayonnement, liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante :

$$\nu \cdot \lambda = c \tag{1.4}$$

c (m / s) = $3 \cdot 10^8$ m / s : Célérité de la lumière dans le vide.

$$E = h \cdot c / \lambda \tag{1.5}$$

L'énergie d'arrachement des électrons est donc inversement proportionnelle à la longueur d'onde du photon.

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du bande "gap", E_g , en électronvolt [eV] ($1 \text{ eV} = 160,217 \cdot 10^{-21} \text{ Joule} = 44,505 \cdot 10^{-24} \text{ Wh}$). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et s'étend de 1,0 à 1,8 eV

pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV ($1,76 \cdot 10^{-19}$ Joules) pour le silicium cristallin (c-Si), et de 1,7 eV ($2,72 \cdot 10^{-19}$ Joule) pour le silicium amorphe (a-Si). Ainsi, pour pouvoir générer de l'électricité, les photons doivent avoir suffisamment d'énergie pour "décrocher" un électron de la couche "N".

Dans le cas du silicium, l'énergie minimum nécessaire correspond à l'énergie de photons ayant une longueur d'onde inférieure à 1,1 μ m.

En conséquence, les photons de grandes longueurs d'onde ($\lambda > 1,1 \mu$ m pour le silicium), peu énergétiques, "décrochent" peu d'électrons et sont donc peu générateurs d'électricité et peu efficaces et donc inutilisables. Par contre, si la longueur d'onde du photon est très courte ($\lambda < 0,4 \mu$ m), l'énergie du photon associée est très grande et il sera absorbé près de la surface dans une région perturbée, peu propice à la création, au "déplacement" d'électrons.

C'est la raison pour laquelle la cellule PV en silicium de votre calculatrice, dont l'efficacité est meilleure avec un rayonnement de courte longueur d'onde est plus sensible - (fonctionne mieux) - en extérieur avec la lumière solaire riche, en rayonnement de courte longueur d'onde, qu'en intérieur avec la lumière artificielle, riche en rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde.

De plus, il faut noter que le photon ne cède sous forme électrique qu'une fraction de son énergie cinétique, l'énergie nécessaire à la libération d'un électron, le reste étant dissipé sous forme de chaleur. Ainsi une part importante de l'énergie des photons de courte longueur d'onde est perdue en chaleur dans la cellule PV.

Il est intéressant de comparer les rendements des différentes technologies qui existent actuellement.

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	théorique	en laboratoire	Disponibles	
Si mono (silicium monocristallin)	27,0 %	24,7 %	14,0-16,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Si poly (silicium polycristallin)	27,0 %	19,8 %	12,0-14,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Si a (silicium amorphe)	25,0 %	13,0 %	6,0-8,0 %	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29,0 %	27,5 %	18,0-20,0 %	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CdTe	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)
Si ruban (silicium en ruban)	27,0 %	27,0 %	9,0-11,0 %	Module non spécifique

Tableau 1 - Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

Les différences de rendement sont dues essentiellement aux structures internes des matériaux utilisés pour les différents types de cellules photovoltaïques et à leurs caractéristiques

intrinsèques. Les rendements indiqués dans ce tableau correspondent très certainement à des conditions de fonctionnement standard en laboratoire (STC) c'est-à-dire une répartition du rayonnement de type solaire $AM = 1,5$, un rayonnement incident normal sur la cellule PV de $1\,000\text{ W/m}^2$, et une température de cellule à $+25\text{ }^\circ\text{C}$ plus ou moins $2\text{ }^\circ\text{C}$, la vitesse de l'air circulant autour de la cellule - environ à 2 m/s - n'est pas précisée car elle est prise en compte dans la température de la cellule.

1.2.5 Les caractéristiques électriques d'une cellule PV

1.2.5.1. Circuit équivalent et modèle mathématique

Pour la modélisation de la cellule solaire on a choisi le modèle fréquemment utilisé afin de décrire ses caractéristiques électriques, modèle qui prend en compte les différentes résistances internes, (Figure 1.10).

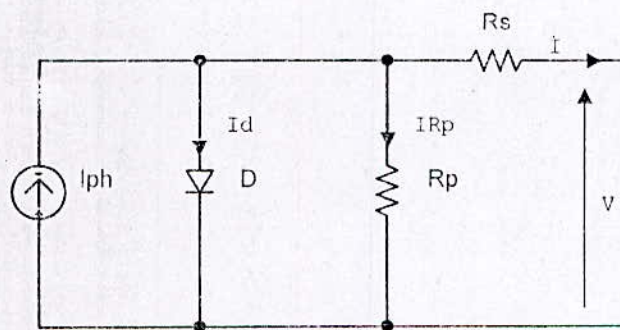


Figure 1.10. Circuit équivalent d'une cellule solaire.

R_p représente la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour de la cellule solaire ; R_s prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de silicium ; I_{ph} est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses, et la diode D représente la jonction PN de la cellule.

A partir du modèle précédent on a :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{e(V + IR_s)}{\alpha k T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.6)$$

Avec R_s la résistance série de la cellule (Ω), R_p la résistance parallèle (Ω), α facteur d'idéalité, T la température de la cellule (K), e la charge élémentaire d'électron ($1.6021 \cdot 10^{-19} C$) et K la constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$).

I.2.5.2. La courbe courant-tension d'une cellule PV

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension a ses bornes depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, rayonnement donné, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée). En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement. Si par exemple la température de la surface évolue, la courbe n'est plus la même.

Nous verrons par la suite l'influence de la température et de l'ensoleillement sur la courbe courant-tension.

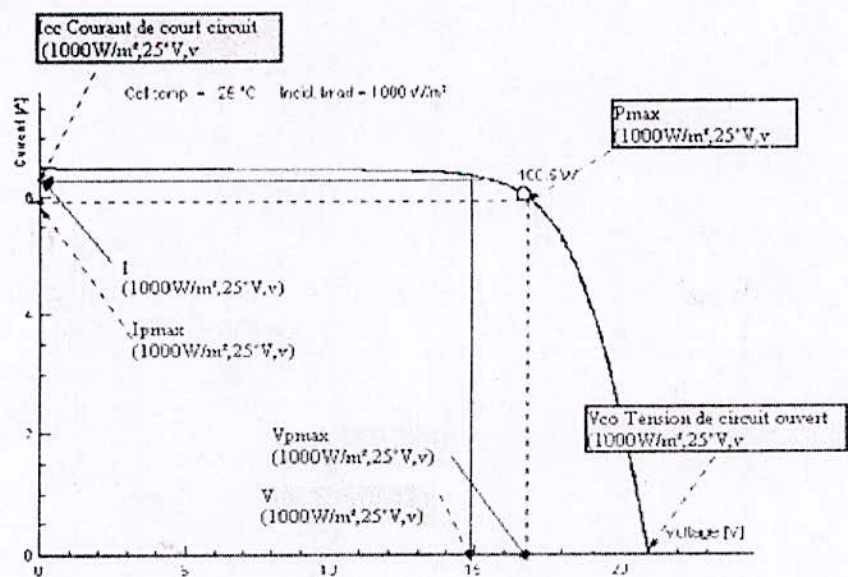


Figure 1.11. Caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule PV au silicium

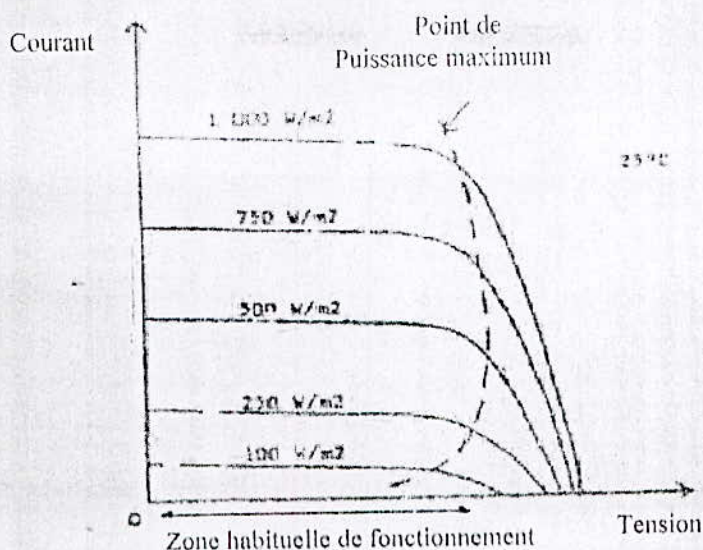


Figure 1.12. Caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule PV au silicium sous différents éclairagements

A. Tension de circuit ouvert V_{CO} (pour $I_{CO} = 0$)

Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux. Pour une cellule donnée, elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, au moins pour des éclairagements supérieurs à 100 W/m^2 (ce qui correspond au rayonnement solaire sur terre d'une journée très couverte). On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

B. Courant de court-circuit I_{CC} (pour $V_{CC} = 0$)

Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue, c'est-à-dire à l'éclairage G (W/m^2), à la température ambiante, à la vitesse de circulation de l'air ambiant. Il est également directement fonction de la surface de la cellule. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.

Dans les cellules PV au silicium, la tension V_{CO} est de l'ordre de 0,4 à 0,6 V et la densité du courant I_{CC} est de l'ordre de 12 mA/cm^2 pour des conditions de test standard (STC) en laboratoire, c'est-à-dire une répartition du rayonnement de type solaire $AM = 1,5$, un rayonnement incident normal sur la cellule PV de 1000 W/m^2 , et une température de cellule à $+25 \text{ °C}$ plus ou moins 2 °C , la vitesse de l'air circulant autour de la cellule – environ à 2 m/s – n'est pas précisée car elle est prise en compte dans la température de la cellule.

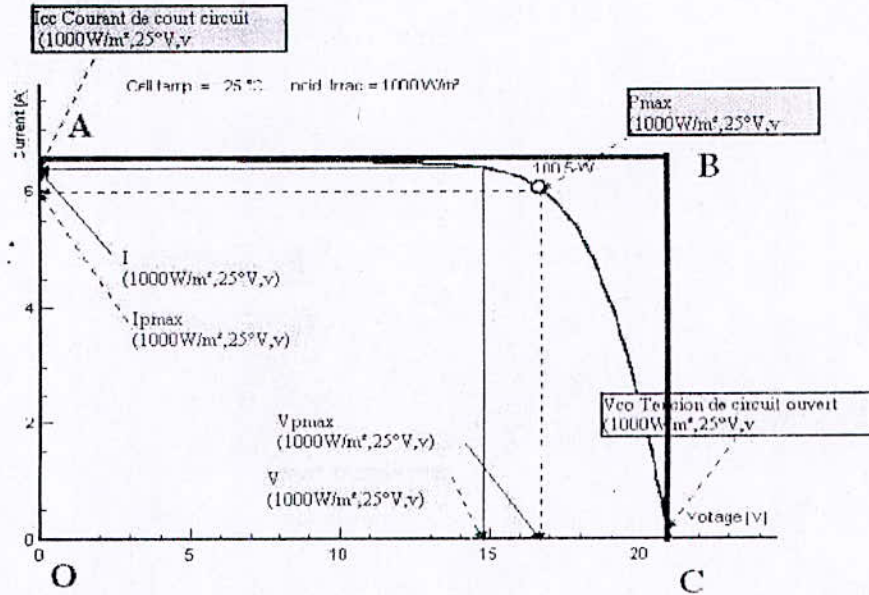


Figure 1.13. Courant généré par une cellule PV idéale

- Noter la courbe courant = f (tension) d'une cellule idéale (ABC)

Une cellule PV idéale présenterait, pour un éclairement, une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, une courbe en forme de marche : le courant restant constant jusqu'à la tension de circuit ouvert, puis la tension demeurant constante jusqu'à un courant nul, le courant passe brusquement du courant de court-circuit I_{cc} à 0.

1.2.5.3. La puissance caractéristique d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), la puissance électrique P (W) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I \tag{1.7}$$

P (W), Watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

U (V), Volt : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I (A), Ampère : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

A. La puissance maximale

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum P_{max} idéale correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (c'est-à-dire à la surface du rectangle OABC) :

$$P_{\text{max idéale}} = V_{\text{CO}} \cdot I_{\text{CC}} \tag{1.8}$$

$P_{\text{max idéale}}$ (W), Watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V_{CO} (V), Volt : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{CC} (A), Ampère : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV.

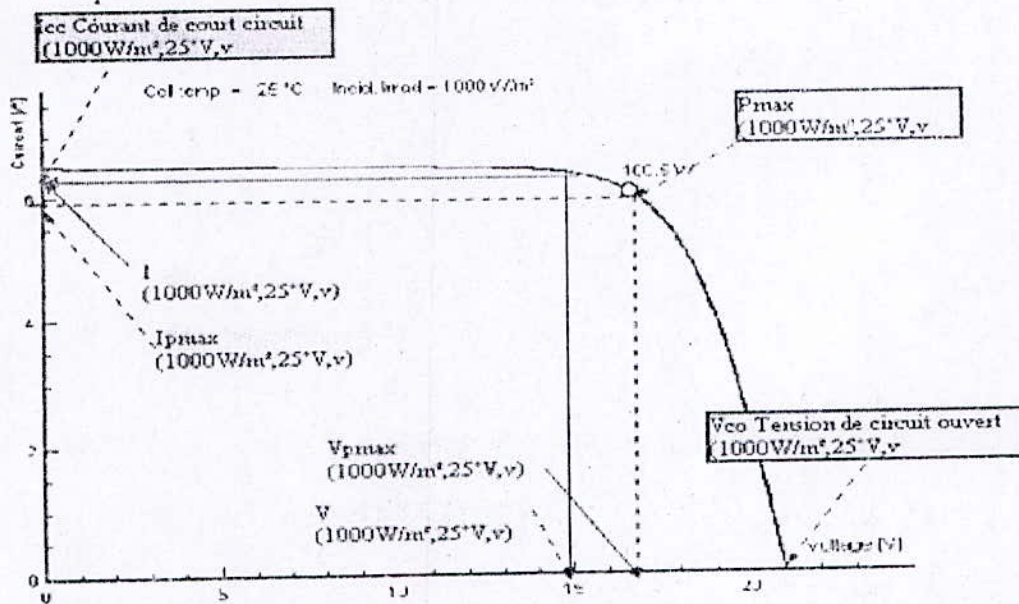


Figure 1.14. Courant généré par une cellule PV - Noter le point de puissance maximum P_{max}

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum V_{Pmax} est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de même que le courant fourni I_{Pmax} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

B. Le facteur de forme

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit ouvert V_{CO} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

$$FF = P_{\text{max}} / (V_{\text{CO}} \cdot I_{\text{CC}}) \tag{1.9}$$

FF : Facteur de forme

P_{max} (W) Watt : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV.

V_{CO} (V) Volt : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{CC} (A) Ampère : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV.

Le facteur de forme FF est de l'ordre de 70 % pour une cellule de fabrication industrielle.

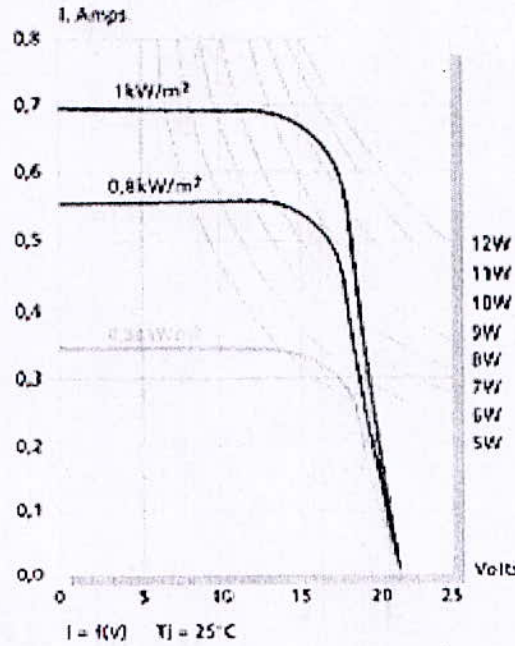


Figure 1.15. Courbe du courant en fonction de la tension, et courbes d'isopuissances

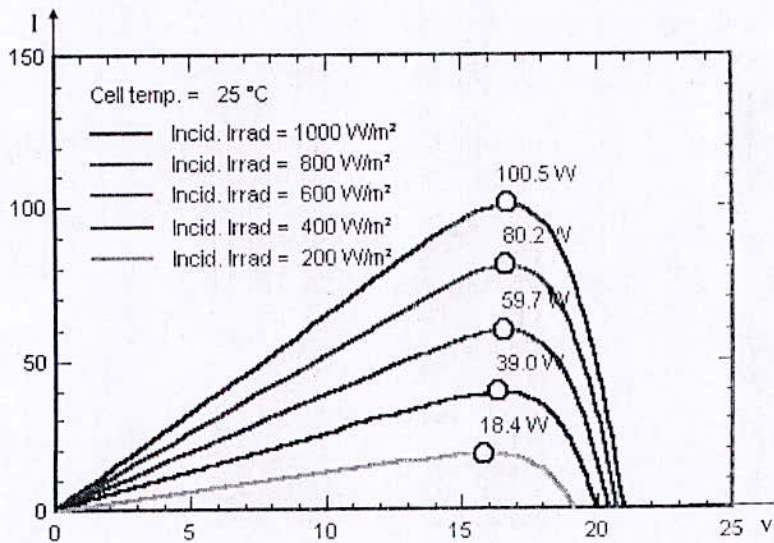


Figure 1.16. Courbes de puissances en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV

De plus, nous avons représenté les courbes d'isopuissances qui sont des hyperboles dans l'espace (I, V) (Figure 1.17). Ces courbes sont intéressantes car elles permettent de voir les limites du module pour des conditions de fonctionnement données.

La figure suivante représente les courbes des puissances où sont également symbolisés les points de puissance max pour différentes valeurs d'éclairement.

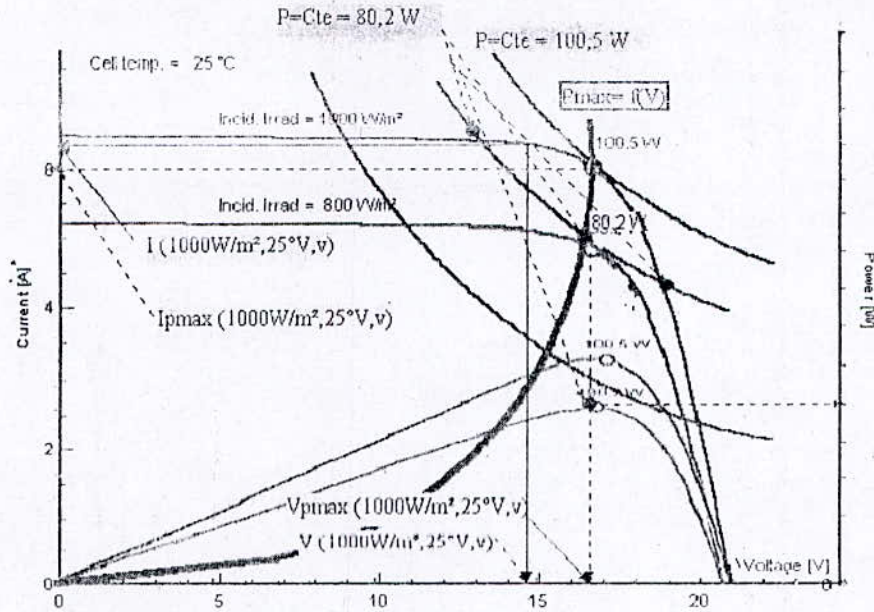


Fig.1.17. Les courbes d'iso puissances et les courbes de puissances en fonction de la tension. Les courbes d'iso-puissance, de puissance et la courbe de puissance max sont représentées donc le repère $I = f(U)$ (Fig.1.9).

C. La puissance crête d'une cellule PV

Dans le cas d'utilisation de photopiles avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance "catalogue", notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :

- éclairement solaire de 1 kW/m^2 (correspondant à peu près à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil à midi par temps clair d'été) ;
- température de la cellule PV égale à $+ 25^\circ\text{C}$.
- répartition spectrale du rayonnement dit AM.1,5 (correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé une atmosphère de masse 1 à 45°);

Note : la masse d'air optique : Lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire direct (provenant du disque solaire) est affaibli par absorption et diffusion sur les molécules gazeuses et les particules atmosphériques. Cet affaiblissement du rayonnement (extinction) est fonction du nombre de ces particules et molécules et également de la longueur du trajet parcouru par les photons avant de parvenir sur la cellule PV (trajet plus long au coucher du soleil qu'à midi solaire notamment). L'extinction unitaire correspondant à une masse d'air

optique de 1 représente l'extinction du rayonnement extraterrestre ayant traversé verticalement l'atmosphère jusqu'à un point situé au niveau de la mer, pour une pression atmosphérique de 1 013 mb.

1.2.6 L'influence de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement d'une cellule PV :

Pour les applications solaires, les caractéristiques standard des cellules PV (puissance crête, I_{cc} , V_{co}) sont indiquées dans le cas de tests de fonctionnement standard en laboratoire (STC).

1.2.6.1 L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement d'une cellule PV

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante représente la caractéristique courant-tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

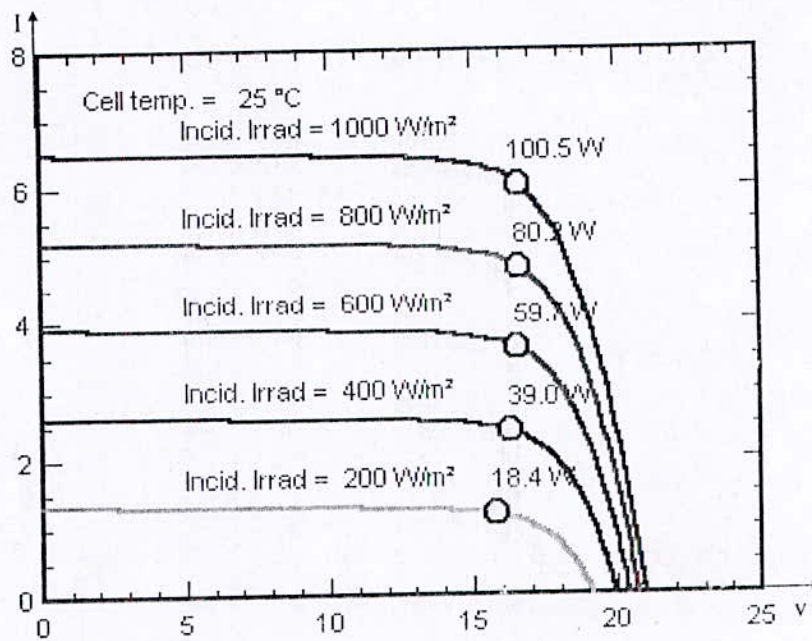


Figure 1.18. Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement

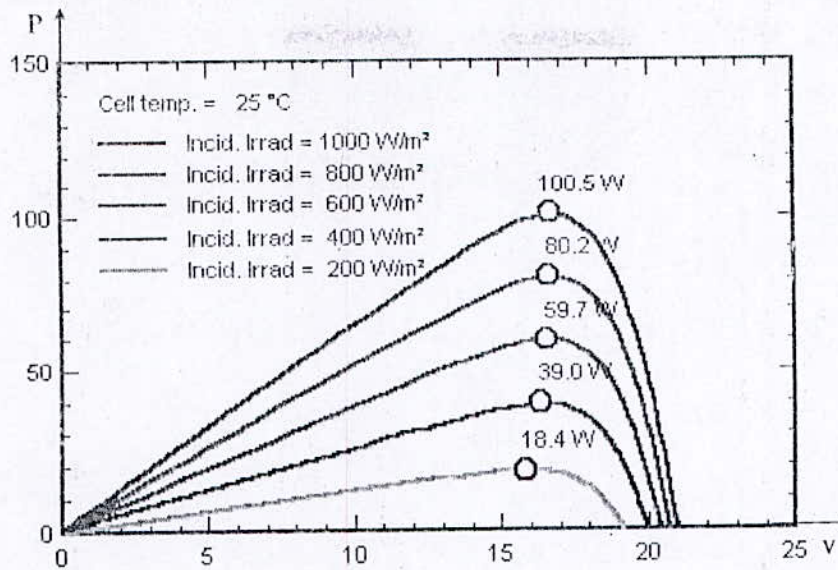


Figure1.19. Courbes de puissances d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement.

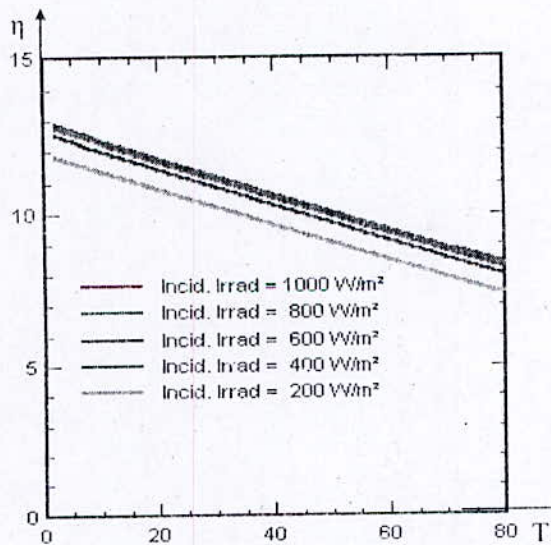


Figure1.20. Influence de l'irradiation sur le rendement en fonction de la température.

1.2.6.2 L'influence de la température sur le fonctionnement d'une cellule PV

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.

Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de jonction de la cellule, les autres conditions extérieures restant fixes :

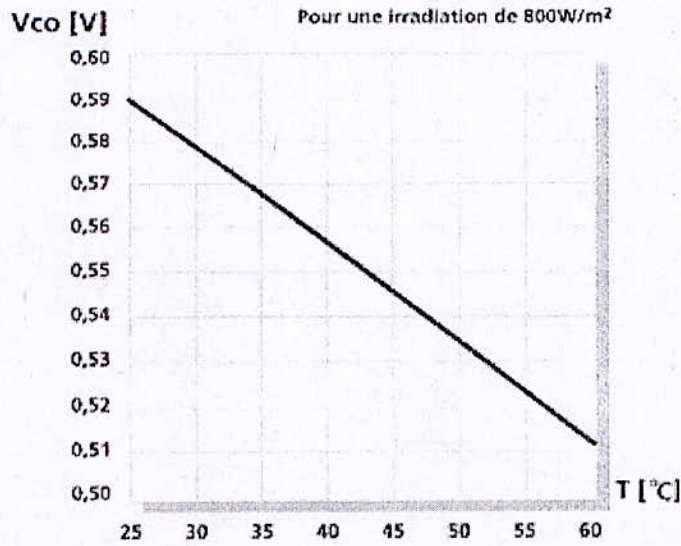


Figure1.21. Tension V_{co} en fonction de la température

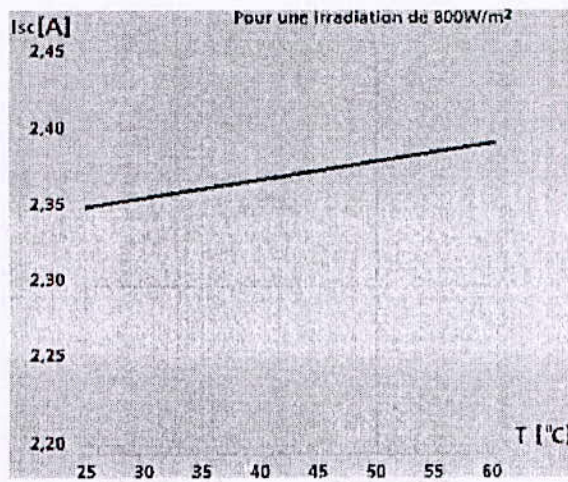


Figure1.22. Intensité I_{cc} en fonction de la température

Lorsque la température augmente, la tension diminue alors que le courant augmente.

Dans le cas de cellules au silicium, le courant augmente d'environ 0,025 mA / cm² °C alors que la tension décroît de 2,2 mV / °C. La baisse globale de puissance est d'environ de 0,4 % / °C. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante.

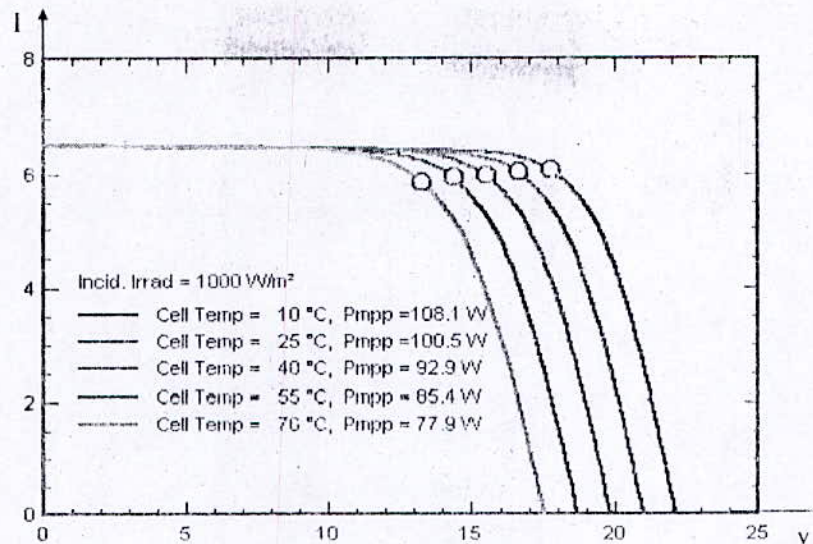


Figure 1.23. Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à éclairement constant en fonction de la température

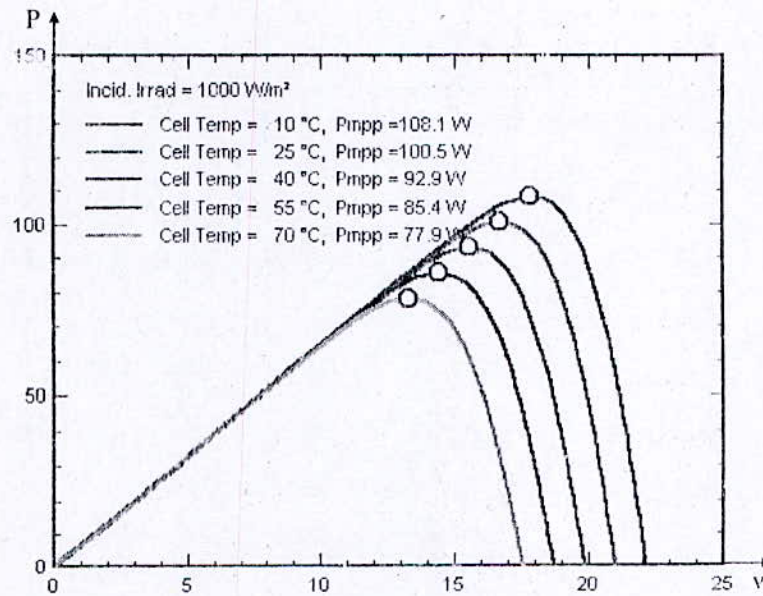


Figure 1.24. Influence de la température sur la puissance en fonction de la tension

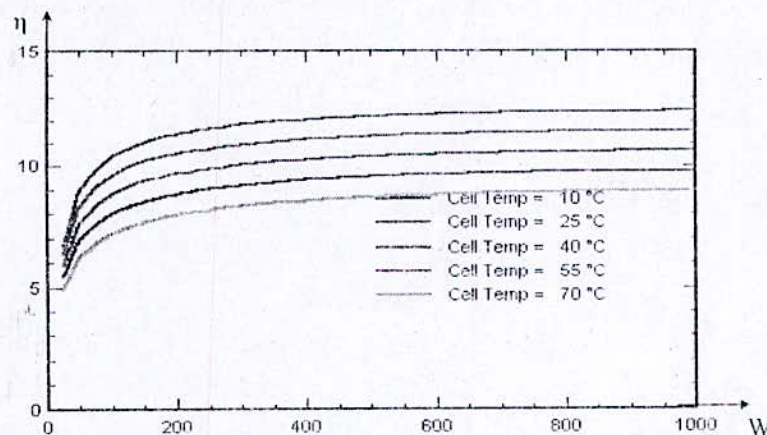


Figure 1.25. Influence de la température sur le rendement en fonction de l'irradiation

A. Le calcul de la température d'équilibre d'une cellule PV

La température d'équilibre d'une cellule PV est fonction des apports énergétiques (le rayonnement incident), de l'énergie électrique extraite (la production électrique consommée), et des pertes thermiques fonction de la convection environnante.

On peut calculer la température d'équilibre d'une cellule PV avec la formule suivante : [1,2]

$$T_c = T_a + k \cdot P_s \quad (I.10)$$

T_c (K), degré Kelvin : température d'équilibre de la cellule.

T_a (K), degré Kelvin) : température ambiante.

k (K / m² . W), Degré. Kelvin / m².Watt : Coefficient d'échauffement de déperdition.

P_s (W), Watt : Puissance de rayonnement solaire incident en kW / m².

Les caractéristiques thermiques de la majorité des modules photovoltaïques disponibles sur le marché sont très voisines.

Dans le cas d'utilisation de cellules PV au sol, le coefficient k dépend davantage de l'angle d'inclinaison des cellules avec l'horizontale, de leur distance au sol, de la vitesse de circulation de l'air ambiant (du vent) que du type d'encapsulation utilisé. Ainsi, en pratique, pour des modules identiques, k varie de 20° K / W. m² pour des modules inclinés à 10 ° et placés à 1 m du sol jusqu'à 30° K / W. m² pour des modules inclinés à 0 ° et placés à 0,1 m du sol.

I.2.6.3 L'influence de la température et du rayonnement sur le fonctionnement d'une cellule PV

Dans le cas d'utilisation de cellules PV avec le rayonnement solaire, les conditions ambiantes extérieures (température, rayonnement solaire, vitesse de circulation de l'air ambiant - vitesse du vent) varient en permanence.

Pour le calcul d'une installation solaire, il faut donc tenir compte du fait que l'éclairement et la température varient simultanément. Ce point est très souvent négligé lors du dimensionnement d'ensembles solaires photovoltaïques.

Lors du dimensionnement d'une installation solaire, il conviendra donc de tenir compte des conditions et des variations climatiques du site choisi.

I.3. L'ASSOCIATION DES CELLULES PV

En fait, l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant : en série, leurs tensions s'ajoutent, en parallèle, leurs courants s'ajoutent.

Cependant, leur fonctionnement est altéré si l'une des cellules associées est occultée (ombre par exemple) ou a des performances inférieures, ce qui provoque par la suite un problème de déséquilibre dans les module solaires donc il faut qu'on prenne soin de n'associer en série ou en parallèle que des cellules identiques ayant une même densité de courant, d'où la nécessité en production de tester et trier soigneusement les cellules et de les classer en fonction de leur caractéristiques. [1,2]

Pour ce la on propose dans notre travail de trier les cellules solaires et les classer selon leur temps de recouvrement inverse, et on réalise un circuit de test qui mesure ce dernier.

I.3.1 Photopile fonctionnant en récepteur

La figure 1.26 montre la caractéristique complète (dans les trois quadrants) d'une photopile sous illumination. Le quadrant 1 correspond au fonctionnement en générateur avec $I > 0$ et $V > 0$. Si la tension aux bornes de la cellule est, en raison du circuit extérieur, amenée à dépasser V_{oc} (quadrant 2), la cellule travaille alors en récepteur de très faible impédance, comme une diode polarisée en directe. Si c'est le courant traversant la cellule qui, en raison du circuit extérieur, est amené à dépasser la valeur du courant de court-circuit, la cellule va à nouveau travailler en récepteur, mais cette fois de très forte impédance, comme une diode polarisée en inverse. On notera dans ce cas, qu'en raison de la résistance série R_s , la jonction n'est polarisée en inverse qu'à partir du point A pour lequel $V = R_s I$

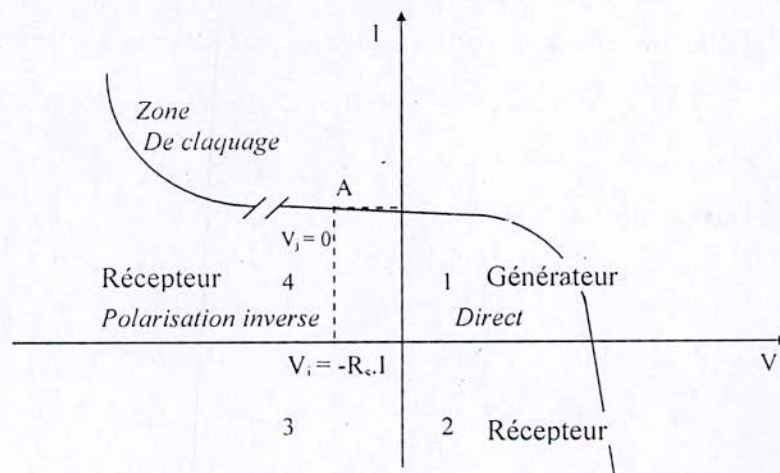


Figure 1.26 Caractéristique courant tension d'une photopile éclairée et polarisée à l'aide d'un générateur de tension extérieur.

I.3.2 L'association en série de cellules PV

Si on assemble en série des cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

$$U = \sum U_c \tag{I.11}$$

U (V), Volt : Tension aux bornes de l'assemblage.

U_c (V), Volt : Tension aux bornes de la cellule d'indice " c ".

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes. [1]

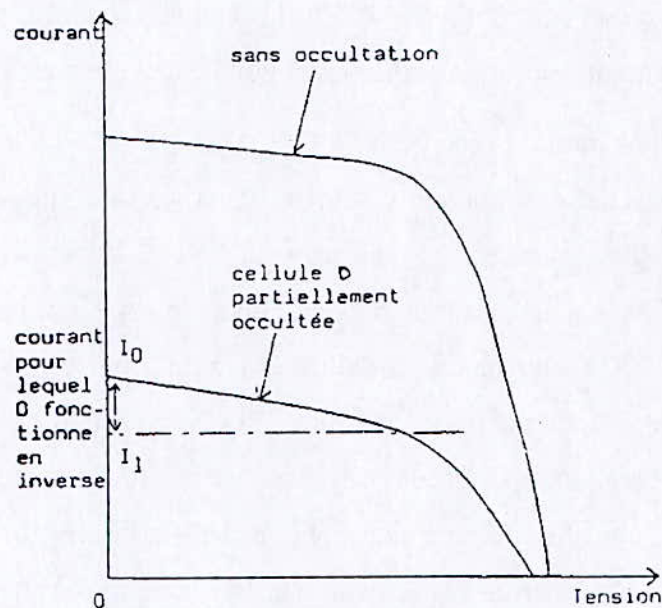


Figure 1.27. Fonctionnement de cellules en série, caractéristiques courant-tension de l'ensemble

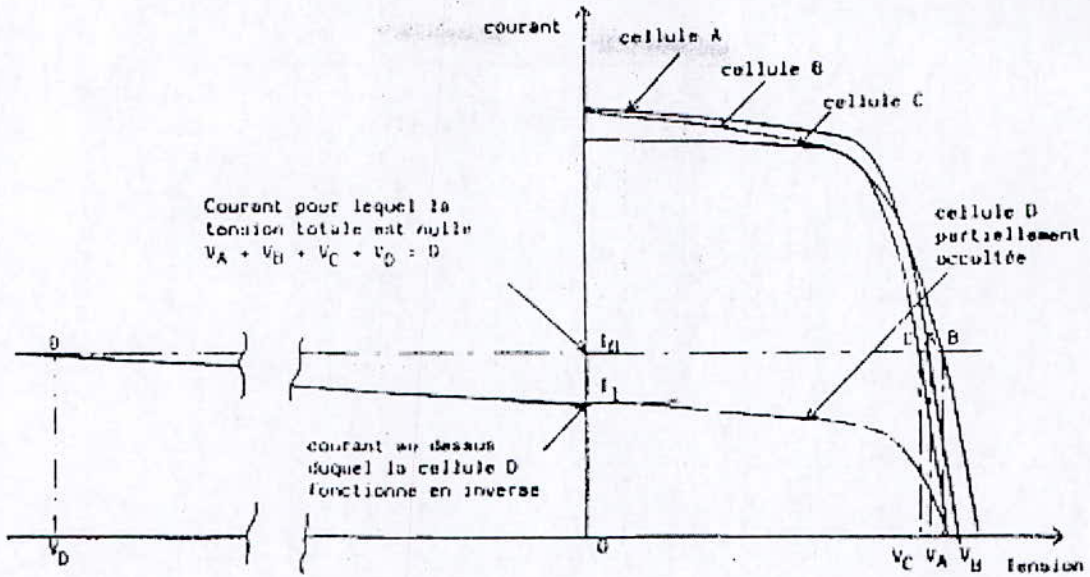


Figure1.28. Fonctionnement de 4 cellules en série, l'une d'entre elles étant occultée partiellement

Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle produite en direct) par rapport aux autres cellules du module qui elles, délivrent un courant supérieur à ce courant limité. En fonctionnant ainsi, un échauffement de la cellule apparaît et peut provoquer son claquage.

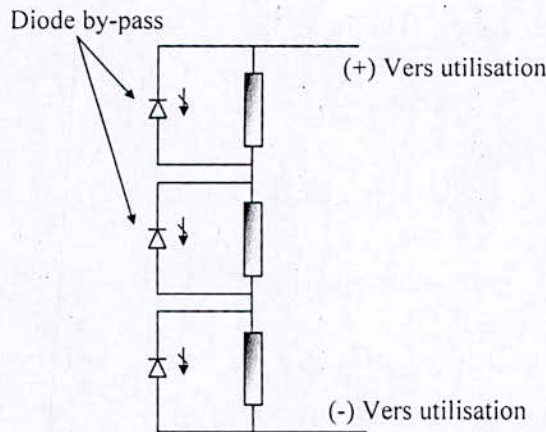


Figure1.29. Schéma électrique du montage série

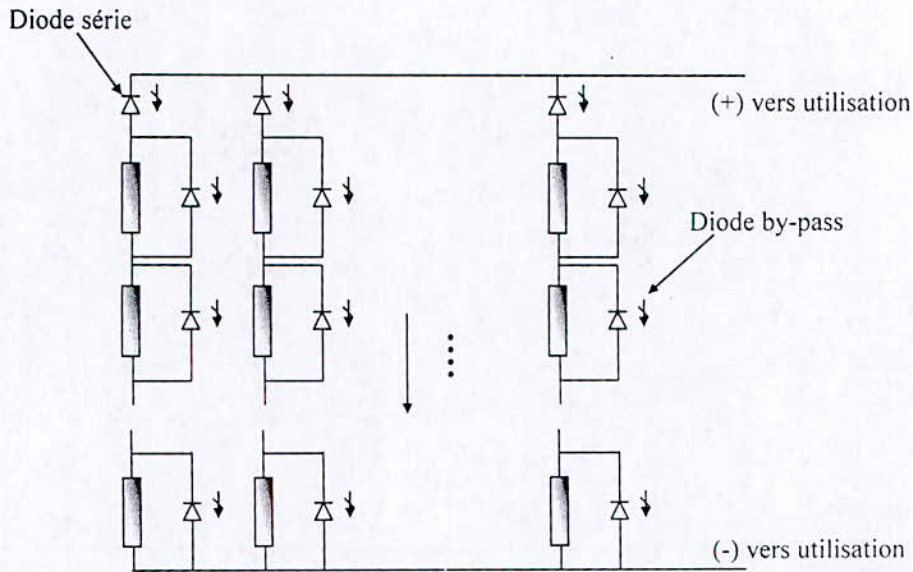


Figure 1.30. Schéma électrique du montage série - parallèle

Les recherches sur ce sujet ont montré que dans le cas de cellules PV au silicium, au-delà d'une tension inverse de 20 V, la probabilité de claquage d'une cellule (destruction de la jonction électrique) devient importante. Pour limiter la tension inverse maximum susceptible de se développer aux bornes d'une cellule, les fabricants de modules photovoltaïques placent donc une diode parallèle, appelée diode by-pass, toutes les 18 à 36 cellules.

1.3.3 L'association parallèle de cellules PV

Dans le cas d'un montage en parallèle, le courant de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

$$I = \sum I_c \tag{1.12}$$

I (A), Ampère : Courant circulant dans l'assemblage.

I_c (A), Ampère : Courant circulant dans chaque cellule d'indice " c ".

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents [1].

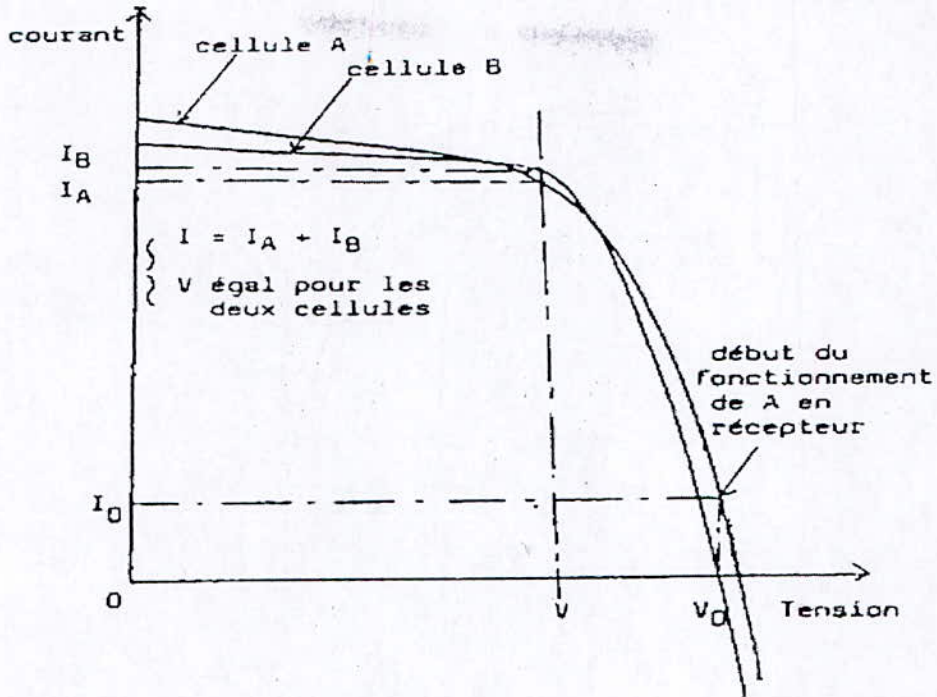


Figure 1.31. Courbe caractéristique d'un montage parallèle, deux cellules (une étant occultée)

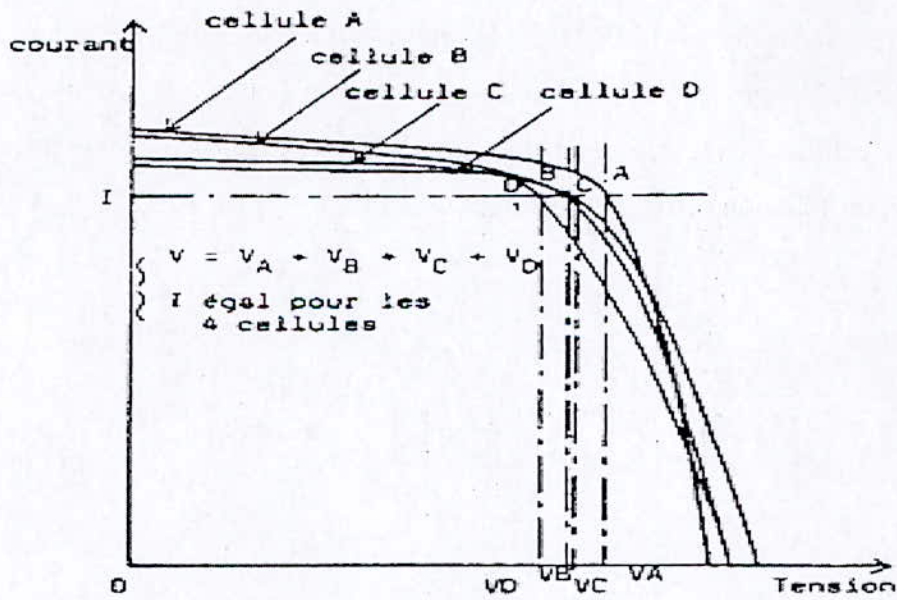


Figure 1.32. Courbe caractéristique d'un montage parallèle, 4 cellules (une étant occultée)

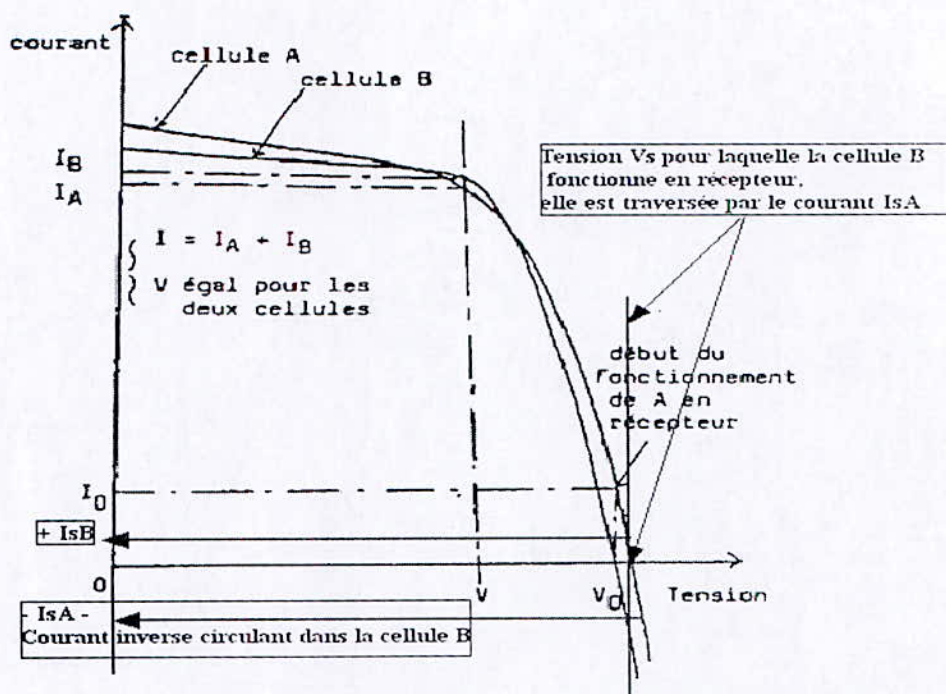


Figure1.33. Courbe caractéristique d'un montage parallèle, deux cellules (une étant occultée)

Cependant, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices car la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour, laquelle empêche également de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement. Pour limiter ces pertes et protéger les cellules, on place donc une diode en série, appelée diode série, toutes les n cellules (n étant fonction des caractéristiques du montage). [1]

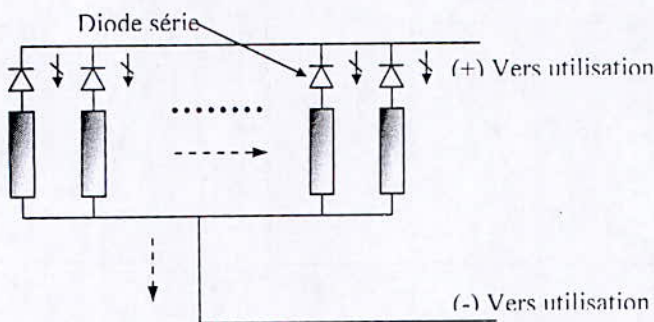


Figure1.34 Schéma électrique du montage parallèle

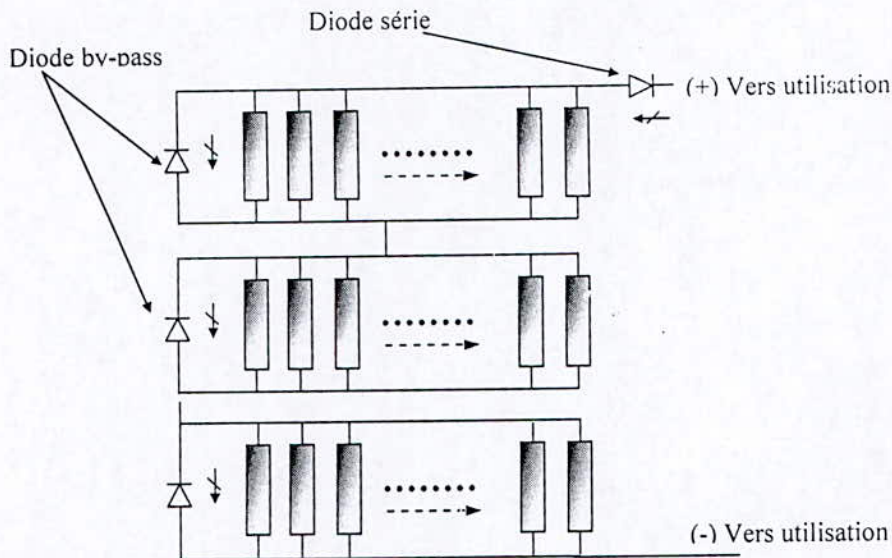


Figure 1.34. Schéma électrique équivalent du montage parallèle

Afin de limiter les pertes de puissance au niveau de ces diodes, les fabricants emploient généralement des diodes de type Schottky (par exemple les séries 1 N 5817, 18 et 19 pour des courants de l'ordre de 1 A, et SD 51 ou MBR 340 M pour les courants de 20 A ou plus) dont les chutes de tension en fonctionnement direct sont souvent inférieures à 0,4 V.

1.3.4 Utilisation des diodes by-pass et séries

Les diodes by-pass de protection d'association de cellules en série sont montées : [1]

- par les fabricants lors de l'association des cellules en série (pour protéger les cellules). Elles seront insérées dans les boîtes de connexions des cellules sur chaque module lors de leur fabrication.
- par les installateurs lors de l'association de modules en série dans les boîtes de jonction.

Les diodes séries de protection d'association en parallèle :

- ne sont pas montées par les fabricants lors de l'association des cellules en parallèle (il n'est pas nécessaire de protéger une cellule occultée dans un module compte tenu des faibles courants mis en jeu)
- sont montées par les installateurs lors de l'association de modules en parallèle dans les boîtes de jonction pour les modules occultés dans un ensemble de modules.

La première partie

Chapitre 2

Physique de La jonction PN

Physique de la jonction PN

II.1. INTRODUCTION

La pile solaire est un composant semiconducteur qui transforme l'énergie lumineuse en électricité.

La puissance électrique qu'elle délivre dépend du flux et de la répartition spectrale du rayonnement solaire.

La lumière incidente génère des courants dans la pile solaire. La collecte de ces courants se révèle plus au moins efficace suivant la structure technologique et les caractéristiques physiques du semiconducteur.

Dans ce chapitre purement théorique, on analyse les phénomènes qui interviennent sur le transport des charges, dans les différentes parties de la jonction PN (photopile). Il nous a semblé utile d'introduire d'abord quelques notions fondamentales de physique des semiconducteurs.

II.2. MECANISME DE TRANSPORT DES PORTEURS

II.2.1. mobilité – conductivité

Dans les semiconducteurs, électrons et trous libres sont animés en permanence d'un mouvement rapide d'agitation thermique dont les trajectoires totalement erratiques se caractérisent par une vitesse thermique V_{th} , un libre parcours entre deux collisions successives, un temps τ entre deux collisions (Figure 2.1).

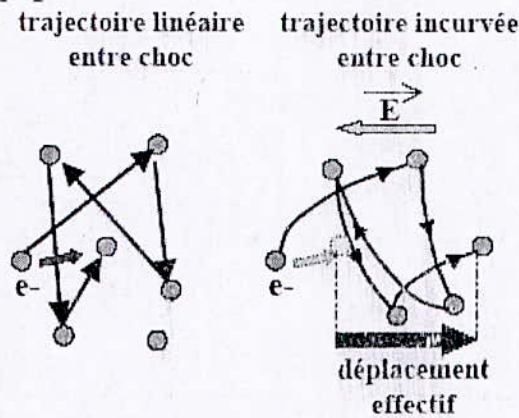


Figure 2.1. Déplacement statistique des électrons dans le semiconducteur et effet du champ électrique sur ces déplacements.

Appliquons un champ électrique à ce semiconducteur. Le porteur accéléré par ce champ acquiert une vitesse V , qui conduit à un transport de charge :

$$\vec{V}_n = \mu_n \cdot \vec{E} \quad (cm.s^{-1}) \tag{2.1}$$

Avec $\mu_n = q \frac{\tau}{m_e} \quad (cm^2.v^{-1}.s^{-1})$

μ_n S'appelle la mobilité des électron, c'est un paramètre très important d'un matériau semiconducteur.

Pour les trous libres on trouve de même :

$$\vec{V}_p = \mu_p \cdot \vec{E} \quad (cm.s^{-1}) \tag{2.2}$$

Avec $\mu_p = q \frac{\tau}{m_h} \quad (cm^2.v^{-1}.s^{-1})$

La mobilité est " un facteur de mérite " d'un matériau semiconducteur plus elle est grande, plus est le courant transporté.

On peut définir la conductivité σ_n pour les électrons et σ_p pour les trous comme suit :

$$\sigma_n = q n \mu_n \quad , \quad \sigma_p = q p \mu_p$$

H.2.2. Equation de densité de courant totale

Le courant circulant dans un dispositif est la somme des trois composantes :

$$J_t = J_{\text{deplacement}} + J_{\text{conduction}} + J_{\text{diffusion}} \quad (2.3)$$

- La composante de déplacement est donnée par la relation :

$$J_{\text{deplacement}} = \epsilon_{sc} \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.4)$$

ϵ_{sc} : Constante diélectrique (sans dimension), $\epsilon_{sc} = 12$ pour le silicium.

ϵ_0 : Permittivité de vide ($8.85 \cdot 10^{-14}$ F.cm⁻¹).

Cette composante est nulle en régime permanent $\frac{\partial E}{\partial t} = 0$.

- La composante de conduction comprend également une composante relative aux électrons J_{cn} et une composante due aux trous J_{cp} :

$$J_{\text{conduction}} = J_{cn} + j_{cp}$$

$$J_{\text{conduction}} = (q n \mu_n + q p \mu_p) \cdot E \quad (2.5)$$

- La composante de diffusion comprend également une composante relative aux électrons J_{Dn} et une relative aux trous J_{Dp} :

$$J_{\text{diffusion}} = J_{Dn} + J_{Dp}$$

$$j_{\text{diffusion}} = q D_n \frac{dn}{dx} - q D_p \frac{dp}{dx} \quad (2.6)$$

La relation d'Einstein entre elles mobilité et constante de diffusion :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (2.7)$$

II.2.3. Equation de continuité

Isolons par la pensée dans le volume un barreau orienté suivant x , de section droite égale à l'unité de surface.

Calculons entre le temps t et le temps $t + dt$ la variation de concentration des électrons libres dans une " tranche du barreau comprise entre les plans x et $x + dx$ (Figure 2.2).

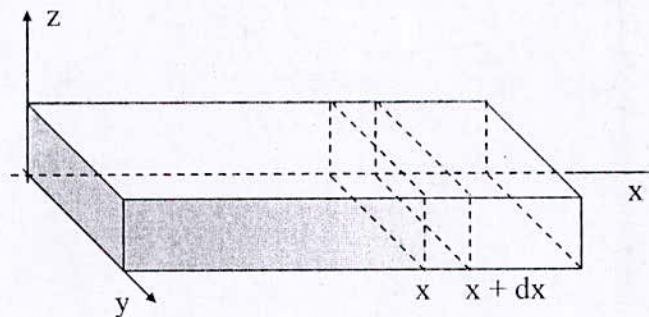


Figure 2.2. Tranche d'un barreau orienté suivant x

La variation cherchée résulte :

1° : de la génération d'électrons due par exemple à un éclairage du dispositif (photopile, photodiode). Appelons $G_n(x, t)$ la vitesse de génération correspondante.

2° : de la recombinaison des électrons en excès. Appelons $U_n(x, t)$ la vitesse de recombinaisons :

$$U_n(x, t) = \frac{\Delta n(x, t)}{\tau_n}$$

3° : de la différence entre le flux d'électrons entrant en x le flux d'électrons sortant en $x + dx$.

$$\phi_n(x, t) - \phi_n(x + dx, t)$$

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} \cdot dx = G_n(x, t) \cdot dx - U_n(x, t) \cdot dx + \phi_n(x, t) - \phi_n(x + dx, t)$$

On divisant par dx :

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = G_n(x, t) - U_n(x, t) - \frac{\partial \phi_n(x, t)}{\partial x}$$

Comme :

$$\phi_n = \frac{J_n}{q} = \frac{J_{Cn}}{q} - \frac{J_{Dn}}{q} = -n\mu_n E - D_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

On arrive à :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \left(E \frac{\partial n}{\partial x} + n \frac{\partial E}{\partial x} \right) + G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (cm^{-3} \cdot s^{-1}) \quad (2.8)$$

Pour les trous on obtiendrait de la même façon :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p \left(E \frac{\partial p}{\partial x} + p \frac{\partial E}{\partial x} \right) + G_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (cm^{-3} \cdot s^{-1}) \quad (2.9)$$

II.3. MECANISME DE RECOMBINAISON DES PORTEURS EN EXCES

Le semiconducteur dans lequel les porteurs excédentaires ont été créés par injection photonique, va tendre à revenir à l'état d'équilibre.

La disparition des porteurs en excès rétablissant l'équilibre thermodynamique se produit par l'intermédiaire de mécanismes de recombinaison.

On distingue trois modes de transfert de l'énergie du porteur :

II.3.1 La recombinaison radiative

Le porteur en excès repasse directement de la bande de conduction à la bande de valence, en évacuant son énergie par émission d'un photon (Figure 2.3).

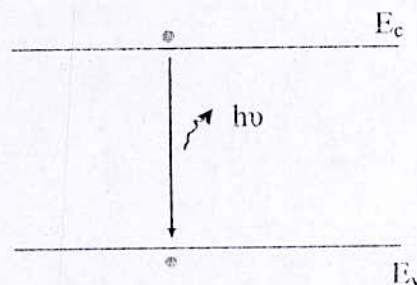


Figure 2.3. La recombinaison radiative

II.3.2 La recombinaison Auger

L'énergie libérée par la recombinaison transfère un électron sur un niveau supérieur de la bande de conduction, ou un trou sur un niveau plus profond de la bande de valence, comme le montre la Figure 2.4.

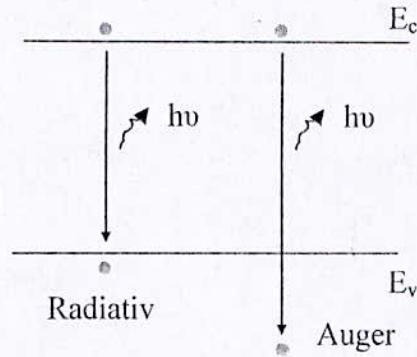


Figure 2.4. La recombinaison Auger

II.3.3 La recombinaison indirecte

C'est le mécanisme le plus probable à température ambiante, dans les matériaux semiconducteurs les plus utilisés pour les photopiles.

La recombinaison s'effectue en deux étapes, par l'intermédiaire d'un centre de recombinaison qui est un défaut ou une impureté, situé à un niveau profond proche du milieu de la bande interdite (Figure 2.5).

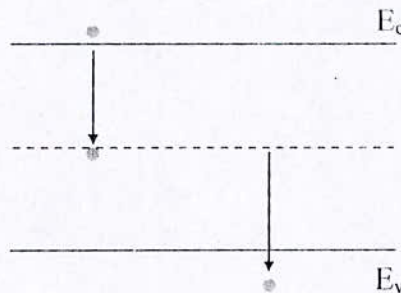


Figure 2.5. La recombinaison indirecte

II.4. LA JONCTION PN

II.4.1. La Jonction PN en Circuit Ouvert

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (Figure 2.6), c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse.

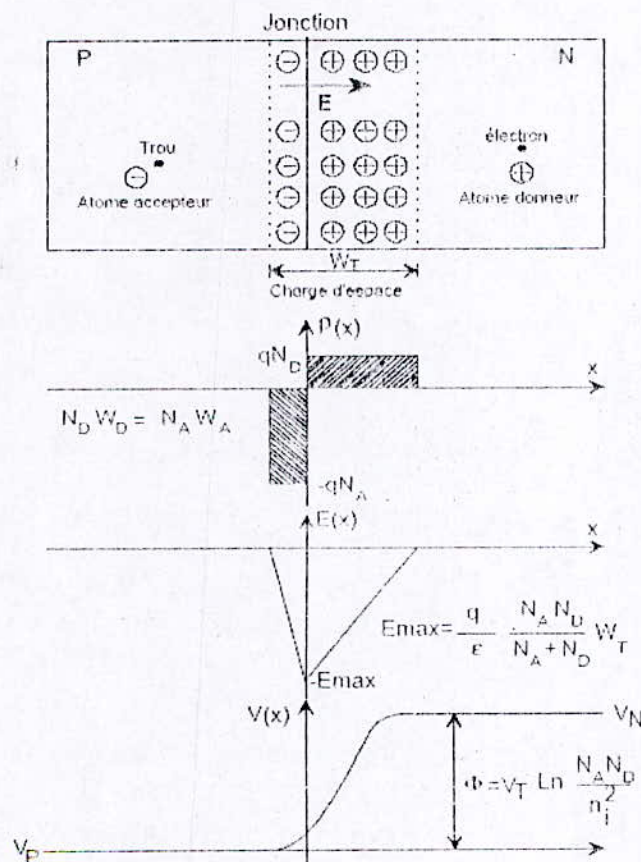


Figure 2.6. Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique

Dans ces conditions, les répartitions des charges, du champ électrique et du potentiel sont représentées sur la Figure 2.6. La région dépeuplée de porteurs mobiles est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Elle a une épaisseur de l'ordre de 0,5 μm . La forme générale de la densité de charges dépend essentiellement du profil de dopage de la jonction. Dans le cas idéal représenté à la Figure 2.6 on peut déduire aisément la forme du champ électrique $E(x)$ ainsi que du potentiel $V(x)$ par application des équations de l'électrostatique.

En effet le potentiel $V(x)$ et le champ électrique $E(x)$ s'expriment en fonction de la densité de charges $\rho(x)$ par :

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{1}{\epsilon} \rho(x) \quad \text{Loi de Gauss} \quad (2.10)$$

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad \text{Expression du champ} \quad (2.11)$$

De plus la neutralité électrique globale du barreau impose la relation:

$$N_A \cdot W_A = N_D \cdot W_D \quad (2.12)$$

On peut remarquer que conformément à la relation de Boltzmann il existe une barrière de potentiel qui constitue le potentiel de diffusion de la jonction:

$$\Phi = V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) \quad (2.13)$$

La largeur de la zone de transition est donnée par :

$$W_T = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \cdot \Phi} \quad (2.14)$$

II.4.2. La Jonction PN Polarisée

II.4.2.1 Densité des porteurs minoritaires au niveau de la jonction

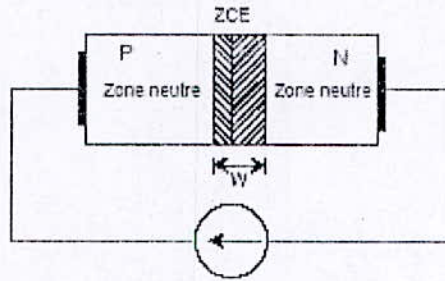


Figure2.7. Jonction PN polarisée

Appliquons aux bornes de la jonction une d. d. p. continue V (Figure2.7). Cette d.d.p se retrouve intégralement appliquée à la zone de charge d'espace du fait de la réalisation technologique des contacts métal semi-conducteur appelés contacts ohmiques, c'est-à-dire dont le potentiel de contact est indépendant du sens du courant et très faible.

La zone située entre les contacts ohmiques et la zone de charge d'espace est appelée zone neutre.

La tension V va donc modifier directement la hauteur de la barrière de potentiel au niveau de la jonction de la façon indiquée à la Figure2.8.

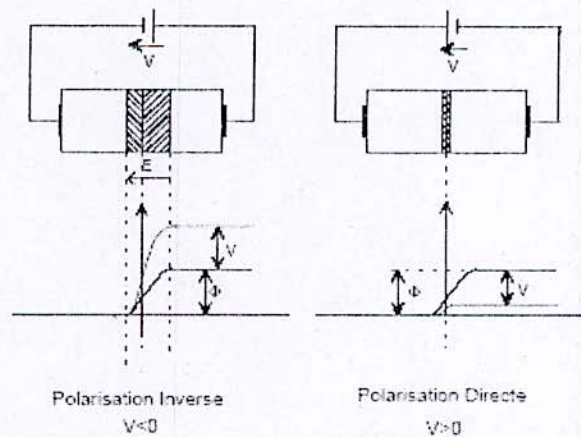


Figure2.8. Répartition du potentiel interne dans une jonction PN polarisée

La hauteur de la barrière de potentiel devient alors $(-V)$ où la tension V est comptée algébriquement. Considérons les concentrations en porteurs minoritaires à la limite de la zone de charge d'espace. Soient:

Côté N p_{N_0} la densité de trous à l'équilibre.

$p_N(0)$ la densité de trous hors d'équilibre.

Côté P n_{P_0} la densité d'électrons à l'équilibre

$n_P(0)$ la densité d'électrons hors d'équilibre.

Compte tenu que $N_A \gg p_{N_0}$ et $N_D \gg n_{P_0}$ les densités de porteurs majoritaires sont respectivement:

N_D Côté N

N_A Côté P

La relation de Boltzmann s'applique aussi bien à l'équilibre que hors d'équilibre pour des régimes de faible injection. On a donc :

$$p_N(0) = N_A \cdot e^{-\frac{\Phi - V}{V_T}} \quad \text{Avec} \quad p_{N_0} = N_A \cdot e^{-\frac{\Phi}{V_T}}$$

Et

$$n_P(0) = N_D \cdot e^{-\frac{\Phi - V}{V_T}} \quad \text{Avec} \quad n_{P_0} = N_D \cdot e^{-\frac{\Phi}{V_T}}$$

D'où l'on tire les relations fondamentales donnant la densité des porteurs minoritaires injectés au niveau de la jonction par rapport à leur densité à l'équilibre (circuit ouvert).

$$p_N(0) = p_{N0} \cdot e^{\frac{V}{V_T}}$$

$$n_P(0) = n_{P0} \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \quad (2.15)$$

Ces deux relations vont nous permettre de déterminer l'équation de la caractéristique statique de la jonction PN.

II.4.2.2 Caractéristique statique

II.4.2.2.1 Caractéristique théorique

Afin de simplifier le calcul de la caractéristique de la jonction nous allons nous intéresser au courant de trous diffusant, côté N. La généralisation aux électrons diffusant, côté P ne pose aucun problème. Examinons donc la répartition des trous minoritaires dans une diode dont la largeur de la zone N est supposée faible devant la longueur de diffusion des trous.

Au niveau de la jonction la densité de trous est donnée par l'équation (2.15). Au niveau du contact ohmique nous supposons que tous les porteurs en excès se recombinent et la densité de trous sera :

$$p_N(W_N) = p_{N0} \quad (2.16)$$

La répartition des trous en excès est alors celle représentée à la Figure 2.9.

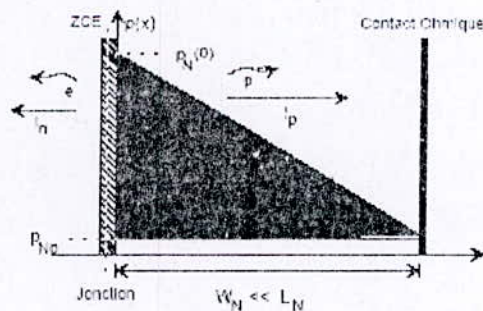


Figure 2.9. Répartition des trous injectés côté N.

On aura une répartition identique des électrons injectés côté P

Le courant traversant la diode, du aux trous est un courant de diffusion dont l'expression est :

$$I_p = -q \cdot D_p \cdot A \cdot \frac{dp(x)}{dx} \quad (2.17)$$

Compte tenu de la répartition donnée sur la figure 2.9, la dérivée $\frac{dp}{dx}$ s'écrit :

$$\frac{dp(x)}{dx} = -\frac{p_N(0) - p_{N0}}{W_N} \quad (2.18)$$

On en tire l'expression du courant de diffusion du aux trous :

$$I_p = \frac{q \cdot A \cdot D_p \cdot p_{N0}}{W_N} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.19)$$

De la même façon le courant d'électrons est donné par :

$$I_n = \frac{q \cdot A \cdot D_n \cdot n_{P0}}{W_P} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.20)$$

Dans ces deux expressions on note que le courant de saturation inverse est proportionnel à la densité de porteurs minoritaires p_{N0} et n_{P0} respectivement côté N et P.

Le courant total traversant la jonction sera donné par :

$$I = I_n + I_p = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad V_T = \frac{k \cdot T}{q} = 26 \text{ mV à } T = 300 \text{ K} \quad (2.21)$$

I_s est le courant de saturation inverse. Son expression est :

$$I_s = q \cdot A \cdot \left(\frac{D_n \cdot n_{P0}}{W_P} + \frac{D_p \cdot p_{N0}}{W_N} \right) \quad (2.22)$$

L'allure de la caractéristique $I(V)$ de la diode est donnée à la figure 2.10 à la fois en échelle linéaire et en échelle logarithmique.

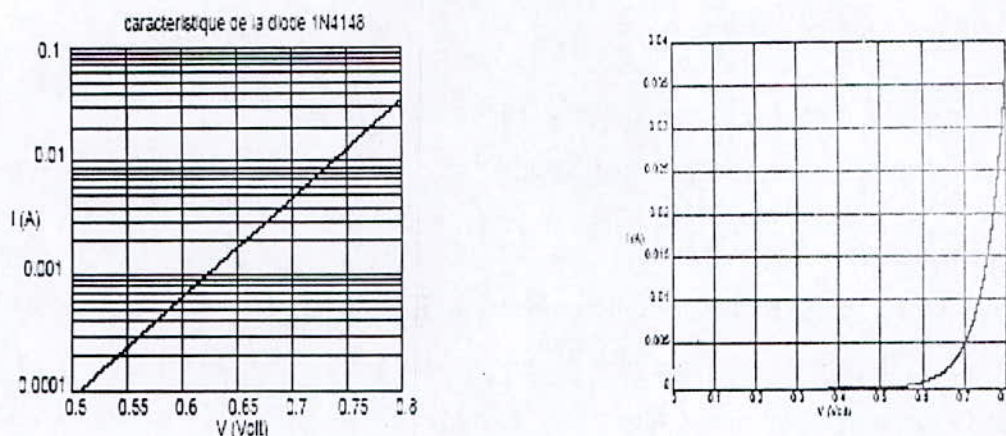


Fig.2.10. Caractéristique courant-tension d'une diode 1N4148.

II.4.3 Modélisation de la jonction PN

II.4.3.1 Modèles résistifs en basse fréquence

La modélisation de la jonction PN aux basses fréquences consiste à établir un schéma électrique équivalent susceptible de décrire le fonctionnement de la jonction vis à vis des signaux appliqués. Ces signaux peuvent être des signaux d'amplitude importante "grands signaux" ou de faible amplitude et dans ce cas on parle de fonctionnement "petits signaux".

Sur la Figure2.11 on a représenté la caractéristique $I(V)$ d'une diode. Sur cette caractéristique on distingue deux types de résistances équivalentes à la jonction:

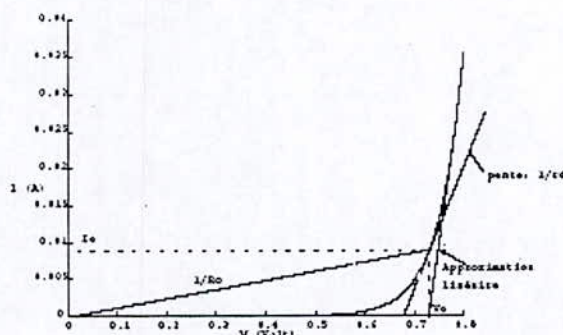


Figure2.11. Définition des différents modèles résistifs d'une jonction PN

La résistance statique est donnée par le rapport $\frac{V}{I} = R_0$. C'est une grandeur fortement variable qui en fait est peu intéressante.

C'est cette résistance que l'on mesure à l'Ohmmètre lorsque l'on teste une diode. Pour un courant de 1mA sa valeur est proche de 600 Ohms.

La Résistance dynamique est la résistance présentée par la jonction à un "petit signal" appliqué autour d'un point de fonctionnement I_0, V_0 . Pour ce point de fonctionnement (polarisation) il est possible d'assimiler la caractéristique $I(V)$ à sa tangente, et pour de faibles variations i et v des courant et tension de la diode on pourra définir la résistance dynamique de la diode par (Figure 2.11) :

$$r_d = \frac{dv}{di} = \left(\frac{dI(V)}{dV} \right)^{-1}_{V=V_0} \quad (2.23)$$

Cette résistance dynamique sera évidemment fonction du point de polarisation (I_0, V_0). En effet, on a en direct:

$$I \cong I_s e^{\frac{V}{hV_T}} \quad \text{d'ou} \quad \frac{1}{r_d} = \frac{I_s}{hV_T} e^{\frac{V_0}{hV_T}} = \frac{I_0}{hV_T}$$

Dans le cas d'une diode au Si on peut retenir la règle simple donnant la résistance dynamique en fonction du courant de polarisation I_0 : $r_d = 50/I_0$ avec I_0 exprimé en mA

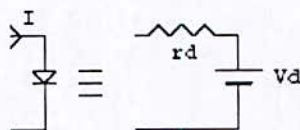


Figure 2.12. Schéma équivalent d'une diode à jonction

$V_d = 0.7 \text{ V}$ et r_d est de l'ordre de quelques Ohms

II.4.3.2 Influence des capacités

II.4.3.2.1 Capacité de transition

Considérons une jonction polarisée en inverse par une tension $V < 0$. La tension appliquée à la zone de transition est alors :

$$\Phi_T = \Phi - V$$

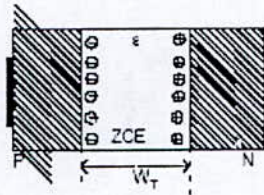


Figure 2.13. Capacité de transition de la jonction polarisée en inverse

Dans ce cas, on peut considérer la jonction comme un condensateur plan d'épaisseur W_T , d'aire A et de constante diélectrique (Figure 2.13) où W_T , A et ϵ représentent respectivement la largeur totale de la zone de transition, l'aire de la jonction et la constante diélectrique du matériau.

La capacité de transition est alors :

$$C_T = \frac{\epsilon \cdot A}{W_T} \quad (2.24)$$

Où W_T est donné par:

$$W_T = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \cdot \Phi_T} \quad (2.25)$$

On en tire finalement:

$$C_T = \frac{\epsilon \cdot A}{\sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \cdot \Phi_T}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Phi - V}} = \frac{C_{T_0}}{\sqrt{1 - \frac{V}{\Phi}}} \quad V < \Phi \quad (2.26)$$

Et la valeur de C_{T_0} est donnée par:

$$C_{T_0} = \frac{\epsilon \cdot A}{\sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \cdot \Phi}} \quad (2.27)$$

Une application typique de cette propriété est la diode varicap ou varactor utilisée comme capacité variable commandée par la tension de polarisation V . Ce composant est utilisé dans les circuits d'accord automatique ainsi que dans des amplificateurs spéciaux, en haute fréquence. La Figure 2.14 montre la variation de capacité d'une telle diode en fonction de la tension de polarisation inverse V .

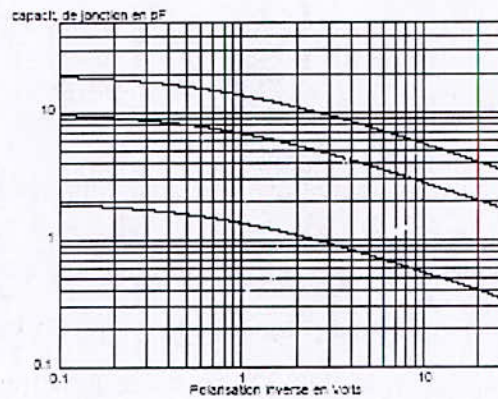


Figure 2.14. Variations de capacité de diodes varicap pour

$$C_{T_0} = 20\text{pF}, \quad C_{T_0} = 10\text{pF} \text{ et } C_{T_0} = 2\text{pF}$$

II.4.3.2.2. Capacité de diffusion ou de stockage

Lorsque la jonction est polarisée en direct des charges (électrons ou trous) sont injectées dans les régions quasi-neutres de la diode. Ces charges diffusent jusqu'aux contacts ohmiques constituant ainsi une charge stockée dans la zone neutre. Reprenons la répartition des trous minoritaires dans la zone N donnée à la Figure 2.15, pour une jonction P+N et modifions légèrement la tension de polarisation V d'une quantité dV . Il en résulte une augmentation $dp_N(0)$ de la densité de trous injectés au niveau de la jonction. La charge stockée dans la région N subit alors une augmentation de dQ_s . (Zone hachurée de la figure 2.15).

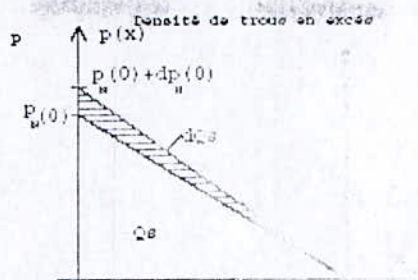


Figure 2.15. Répartition des trous minoritaires pour une variation de charge stockée dQ_s .

Cette variation de charge dQ_s sous l'effet de la variation de potentiel permet la détermination d'une capacité C_d appelée capacité de diffusion telle que :

$$C_d = \frac{dQ_s}{dV} \quad (2.28)$$

Afin de calculer cette capacité, déterminons tout d'abord l'expression de la charge stockée Q_s en statique pour une diode P^+N . (C'est-à-dire dont le courant est uniquement constitué du courant de trous).

On a :

$$Q_s = q.A.(aire\ hachurée) = \frac{q.A.p_N(0)}{2} . W_N \quad (2.29)$$

Où A est l'aire de la jonction. En remplaçant $p_N(0)$ par son expression on obtient:

$$Q_s = \frac{q.A.p_{N0} . W_N}{2} . e^{\frac{V}{h.V_T}} \quad (2.30)$$

En supposant $e^{\frac{V}{V_T}} \gg 1$ on obtient l'expression de la charge stockée en fonction du courant traversant la jonction:

$$Q_s = \frac{q.A.p_{N0} . W_N}{2.I_s} . I = \tau . I \quad (2.31)$$

Cette expression indique que la charge stockée est proportionnelle au courant traversant la jonction. La constante de proportionnalité correspond à la durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la jonction. Pour des jonctions PN cette durée de vie peut varier de quelques ns à quelques μ s.

Nous pouvons maintenant exprimer la capacité de diffusion en dérivant l'expression (2.31) par rapport à V . On obtient:

$$C_d = \frac{dQ_s}{dV} = \frac{dQ_s}{dI} \cdot \frac{dI}{dV} = \frac{\tau}{r_d} \quad (2.32)$$

$$\text{avec } r_d = \frac{\eta V_T}{I}$$

On peut donc donner le schéma équivalent d'une diode polarisée en direct pour les petites variations de la tension et du courant.

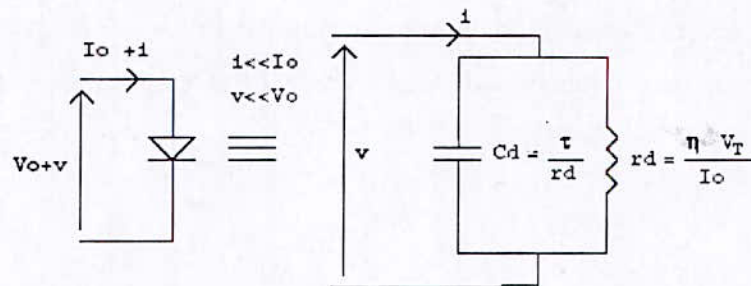


Figure 2.16. Schéma équivalent d'une jonction PN polarisée en direct

En résumé la jonction PN présente deux types de capacités suivant qu'elle est polarisée en inverse ou en direct:

Une capacité de transition en inverse

Une capacité de diffusion en direct

Elle présentera donc un comportement fortement non linéaire et l'étude analytique ne pourra se faire qu'au moyen d'approximations linéaires par morceaux.

La deuxième partie

Chapitre 3

Méthodes de Caractérisations

Méthodes de caractérisation

III.1. INTRODUCTION

Les performances d'une photopile solaire peuvent être caractérisées par cinq processus : [2]

- La capacité à absorber les photons de différentes énergies du spectre solaire ;
- La transformation de l'énergie potentielle sous forme de charges électriques libres ;
- La diffusion de ces charges dans le matériau, sans disparaître sous l'effet de processus de recombinaisons, ce qui constitue le photocourant ;
- La traversée d'une barrière de potentiel générant ainsi une force électromotrice, ce qui constitue la tension ;
- La collecte des charges libérées fournissant de la puissance électrique dans un circuit extérieur.

Nous décrivons dans ce chapitre les principales techniques utilisées pour caractériser les jonctions PN et les cellules solaires.

III.2. PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISANT UNE CELLULE SOLAIRE

Le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} et le facteur de forme FF, constituent les principaux paramètres des cellules solaires [9].

Ces derniers permettent le calcul du rendement de conversion η :

$$\eta = P_m/P_i = I_m \cdot V_m / P_0 \cdot S = I_{cc} \cdot V_{oc} \cdot FF / P_0 \cdot S$$

$$\eta = \frac{P_m}{I_{lum}} = \frac{V_m \cdot I_m}{I_{lum}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{I_{lum}}$$

Où P_0 est la densité de puissance lumineuse incidente ou éclairement du spectre solaire qui varie selon la hauteur du soleil et les conditions météorologiques, S la surface de la cellule solaire, I_m et V_m sont respectivement le courant et la tension correspondant au point de puissance maximale de la courbe I.V. [1]

Le courant de court-circuit est déterminé par la puissance, le spectre de la source lumineuse, le coefficient d'absorption (α) et la durée de vie des porteurs minoritaires.

La tension en circuit ouvert est directement liée au profil de dopage et à la durée de vie des porteurs. Elle dépend également de I_{cc} et du courant de saturation.

On note que le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert sont liées directement à la durée de vie des porteurs minoritaires, cette dernière peut être mesurée par la mesure de temps de recouvrement inverse (§ III.3.3).

III.3. METHODES DE CARACTERISATION DE CELLULES SOLAIRES

III.3.1. Mesure de la caractéristique I - V (courant - tension)

Les caractéristiques I - V (courant - tension) des cellules solaires sont obtenues grâce à un simulateur solaire. Le spectre d'illumination standard AM1.5 est reproduit à l'aide des lampes (xénon et halogène).

L'intensité d'illumination standard est de 100 mW/cm², ce qui correspond à l'illumination moyenne à la surface de la terre lorsque les rayons solaires ont une incidence de 48° par rapport au zénith. Le spectre AM1.5 (Figure 3.1), associé à une illumination de 100 mW/cm² et à une température de 25°C correspondent aux conditions de mesures standards pour des applications terrestres. [4,6]

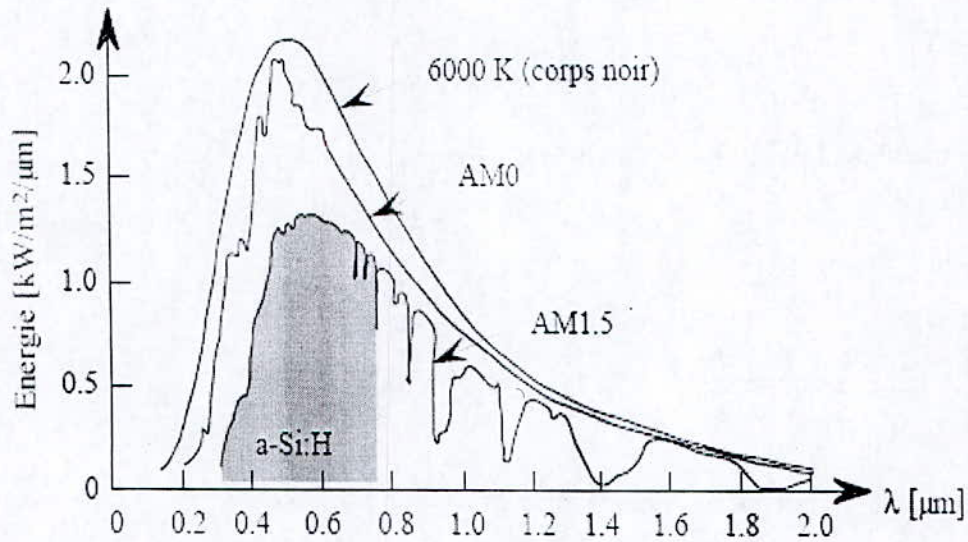


Figure 3.1. Spectres solaires AM0 et AM1.5.

SIMULATION AND ANALYSIS LABORATORY
I-V CHARACTERIZATION

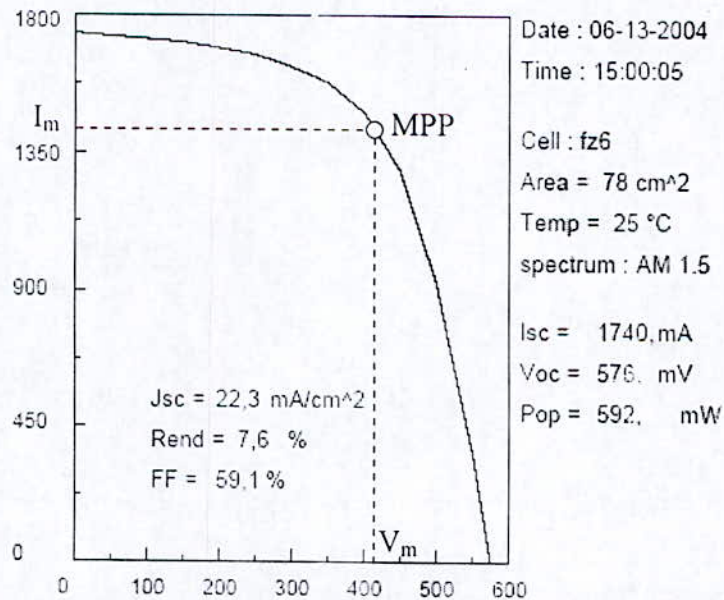


Figure 3.2. Courbe I-V d'une cellule solaire simple mesurée sous simulateur solaire (Mesures effectuées à l'UDTS-Alger).

Les valeurs V_{oc} et I_{cc} correspondent respectivement à la tension en circuit ouvert et à la densité de courant en court-circuit. Les valeurs V_m et I_m correspondent à la tension et à la densité de courant au point de puissance maximum (MPP). Le MPP correspond au point auquel le produit de la tension et de la densité de courant est maximal.

Le facteur de forme FF (fill factor) correspond au rapport $(V_m \cdot I_m) / (V_{oc} \cdot I_{cc})$:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (3.1)$$

Le rendement de la cellule solaire η correspond à la division de la densité de puissance maximale délivrée par la cellule ($P_m = V_m \cdot I_m$) par l'intensité de l'illumination incidente qui est normalisée à 100 mW/cm² pour un spectre de AM1.5:

$$\eta = \frac{P_m}{I_{lum}} = \frac{V_m \cdot I_m}{I_{lum}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{I_{lum}} \quad (3.2)$$

III.3.2. Mesure de la réponse spectrale

Les réponses spectrales des cellules solaires sont obtenues en général avec l'installation de mesure décrite ci après. [5,6]

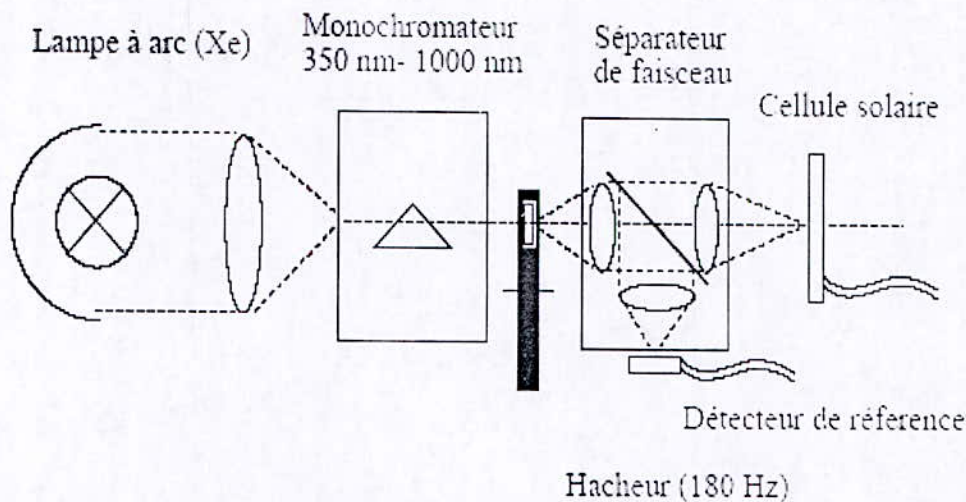


Figure 3.3. Principe de fonctionnement de l'installation de mesure de réponse spectrale.

Une lampe à arc au xénon émet la lumière qui passe au travers d'un monochromateur après avoir été focalisée. La lumière de longueur d'onde unique est ensuite hachée puis séparée en deux faisceaux d'intensité identique. Le premier faisceau est dirigé sur un détecteur de référence et le second sur la cellule solaire à mesurer. Les signaux électriques provenant du détecteur de référence et de la cellule solaire sont ensuite comparés par un amplificateur « lock-in ». La relation suivante nous donne la réponse spectrale de la cellule solaire :

$$SR(\lambda) = \frac{\Delta j_{ext}(\lambda) / q}{\Phi(\lambda)} \quad (3.3)$$

Avec $j_{ext}(\lambda)$: densité de courant délivrée par la cellule solaire mesurée à la longueur d'onde λ .

Et $\Phi(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{hc / \lambda}$: flux de photons monochromatiques incidents.

Il est possible de mesurer la réponse spectrale d'une cellule solaire en appliquant une tension de polarisation aux bornes de cette dernière.

La Figure 3.4 représente des courbes typiques de réponses spectrales obtenues pour les trois échantillons.

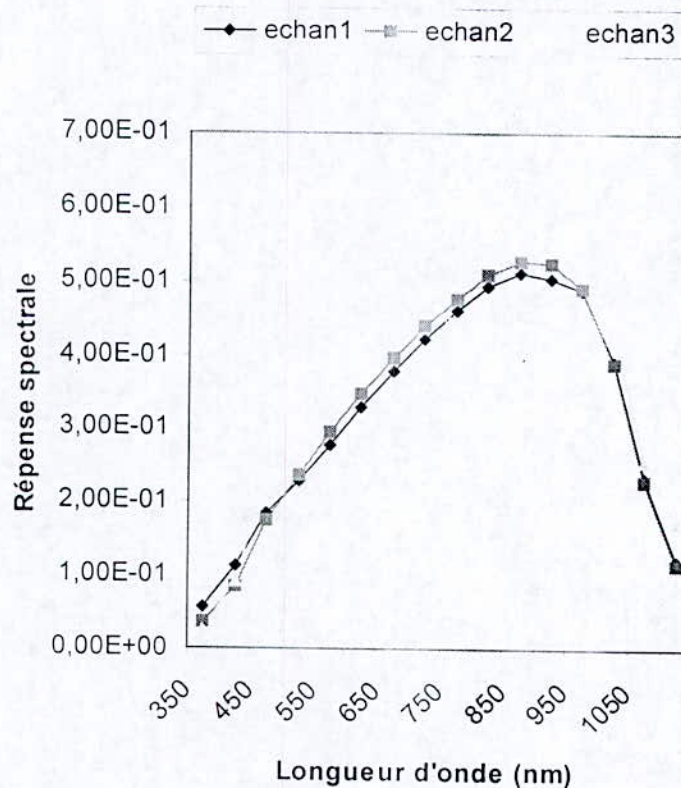


Figure 3.4. Mesure de la réponse spectrale des cellules solaires

(Mesures effectuées à l'UDTS-Alger).

En appliquant une tension de polarisation inverse aux bornes de la cellule solaire, nous superposons un champ électrique externe au champ électrique de la jonction. Lorsque la tension de polarisation inverse est suffisamment élevée, les pertes par recombinaison

deviennent négligeables. La valeur mesurée correspond donc à la totalité des paires électrons - trous photogénérés dans la cellule (état de saturation).

Pour le cas des mesures de réponse spectrale effectuées sous tension de polarisation directe, le choix de la tension V_{MPP} (tension correspondant au point de puissance maximale) permet de mettre la cellule solaire en condition réelle de fonctionnement.

III.3.3. Caractérisation en régime transitoire

Ces caractérisations consistent principalement en des mesures de capacité de jonction et de temps de recouvrement inverse.

Les mesures de temps de recouvrement en inverse s'effectuent en basculant la jonction d'un régime de polarisation direct à un régime de polarisation inverse, en visualisant le courant inverse sur un oscilloscope rapide et en mesurant le temps entre l'instant de commutation et l'instant où le courant inverse est ramené à 1/10 de sa valeur initiale I_{R_0} (Figure 3.6). On règle généralement le circuit de mesure de façon que $I_{R_0} = -I_F$, I_F étant le courant direct avant commutation.

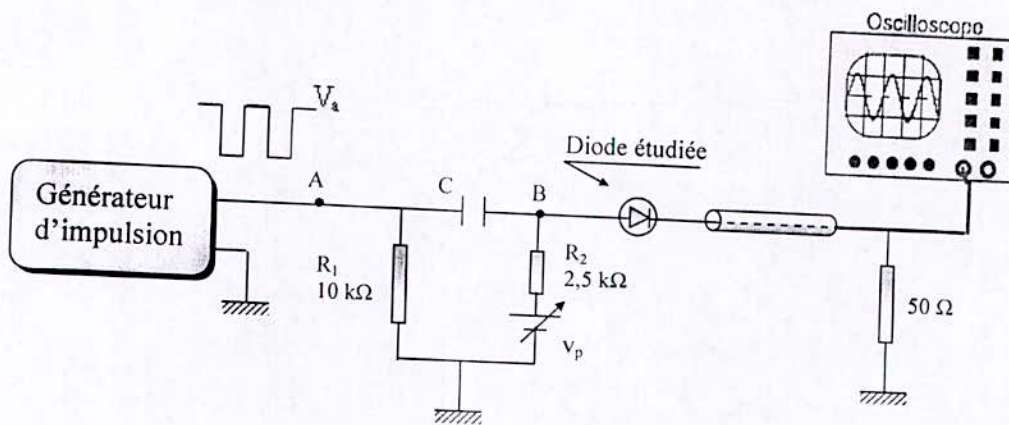


Figure 3.5 Mesure de temps de recouvrement inverse

La Figure 3.5 donne un schéma de mesure : [3]

- a) V_A étant nul, la capacité C se charge à travers R_2 jusqu'à ce que la tension en B soit égale à : $V_B = V_j + R_{ch} \cdot I_F$, (V_j chute de tension dans la diode, $R_{ch} = 50 \Omega$). La diode est en régime permanent direct.
- b) V_A passe brutalement à une valeur négative, la capacité C n'ayant pas le temps de se charger. V_B devient négatif et la diode passe brutalement en inverse. On choisit une constante de temps de charge C grande devant le temps de recouvrement inverse à mesurer de façon que V_B puisse être considéré comme constant pendant le phénomène étudié. La figure 3.6 donne l'allure de l'oscillogramme.

Lorsqu'on commute une jonction PN de polarisation directe à inverse, le courant inverse a tout d'abord une valeur élevée, seulement limitée par le circuit extérieur.

En effet, une jonction ne peut passer en inverse tant que la charge stockée Q_s , accumulée de part et d'autre de la jonction dans le régime direct, n'est pas évacuée.

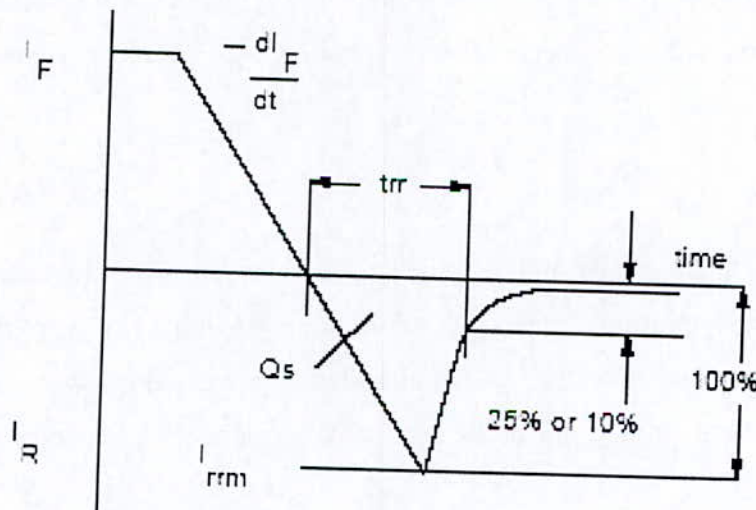


Figure 3.6. Charge et temps de recouvrement inverse (Q_s et t_{rr})

Pour une jonction dissymétrique P^+N : $Q_s = Q_{sN}$, la charge stockée consiste principalement en trous stockés coté N; elle vaut : $Q_{sN} = I_F \cdot \tau_{PN}$

τ_{PN} étant la durée de vie des trous coté N. Le temps d'évacuation de cette charge t_{rr} vaut approximativement : $t_{rr} = Q_{sN} / I_{R0} = \tau_{PN} \cdot I_F / I_{R0}$

Si on règle l'impédance du circuit pour que $I_F = I_{R0}$, on a : $t_{rr} = \tau_{PN}$

III.3.4. Etude des profils de dopage par effet HALL [10]

La compréhension de la diffusion d'impuretés dopantes, doit passer obligatoirement par l'étude des profils de concentrations du dopant en fonction de sa profondeur de pénétration dans le volume du substrat.

Ces profils nous renseignent sur le comportement dynamique des impuretés et nous permet d'extraire la concentration en surface N_s , ainsi que les profondeurs de jonction X_j . La détermination de ces profils peut s'effectuer par diverses techniques, telle que le SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy), la Spreading Resistance, la NAA (Neutron Activation Analysis) ou l'oxydation anodique. Ces méthodes, toutes fois, ne fournissent pas le même type de profils. En effet, certaines d'entre elles donnent la concentration chimique des impuretés (SIMS, NAA), alors que d'autres donnent la concentration des porteurs de charge électrique (Spreading Resistance, oxydation anodique).

Le profileur à effet de Hall est un protocole de mesure complètement automatisé par PC, destiné à la caractérisation des couches semi-conductrices ; il présente essentiellement la détermination des profils de la concentration des porteurs de charge en fonction de la profondeur.

III.4. CONCLUSION

Pour notre travail on s'intéresse à la caractérisation de la cellule solaire en régime transitoire, après excitation par une impulsion électrique. Cette méthode conduit à la mesure de temps de recouvrement inverse (durée de vie des porteurs minoritaire dans certaines conditions) qui est l'un des paramètres très important qui influe sur les performances de la jonction PN et la cellule solaire.

Constatons en conclusion que la caractérisation du semiconducteur et la mesure électrique qui ne se borne pas à la seule détermination de rendement de conversion constituent un faisceau d'informations indispensables aux spécialistes.

La deuxième partie

Chapitre 4

*Phénomène du Recouvrement
Inverse*

Phénomène du recouvrement inverse

IV.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent nous avons présenté quelques méthodes de caractérisations de la diode à jonction PN et de la cellule solaire, parmi lesquelles la caractérisation en régime transitoire, par la mesure de temps de recouvrement inverse.

Dans ce chapitre nous allons effectuer une étude plus détaillée des deux phénomènes de recouvrement direct et inverse.

L'absence de théories sûres et valables pour tous les types de diodes, concernant les phénomènes de recouvrement direct et de recouvrement inverse, conduit à l'emploi de formules expérimentales et de courbes déduites de mesures. Lorsque l'on veut connaître un peu plus que le sens de variation des phénomènes, c'est-à-dire des données chiffrées (c'est ce qu'indiquent les feuilles de données des fabricants de diodes).

IV.2. LE RECOUVREMENT DIRECT

Les graphiques de concentration (Figure 4.2) ont permis de mettre en évidence de grandes différences de forme entre le signal appliqué aux bornes d'un circuit et le courant correspondant. Une tension de générateur parfaitement rectangulaire est accompagnée, durant la première phase transitoire, d'une très forte impulsion de courant dans le circuit.

En réalité, les valeurs très importantes de l'angle déterminé par le graphique de concentration de trous dans la région N, avec l'horizontale, aux abords de la barrière sont à l'origine de diffusions très intenses dont la continuité est assurée par un déplacement en aussi grand nombre d'électrons dans le circuit extérieur. [8]

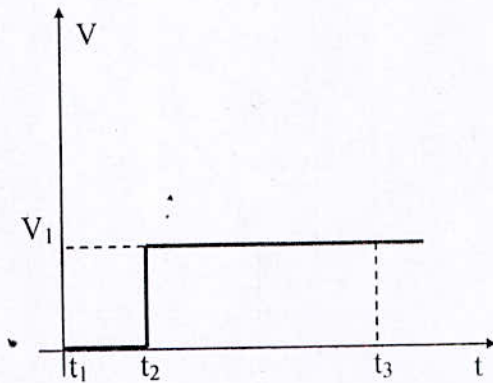


Figure 4.1 Impulsion électrique

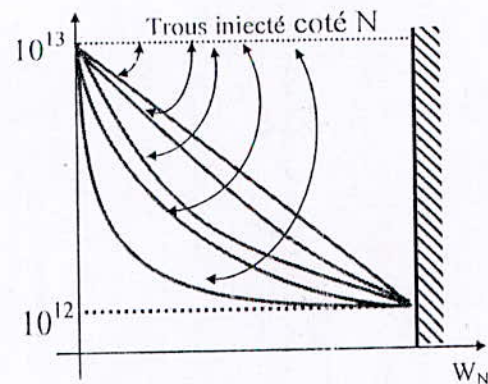


Figure 4.2 Graphiques de concentration

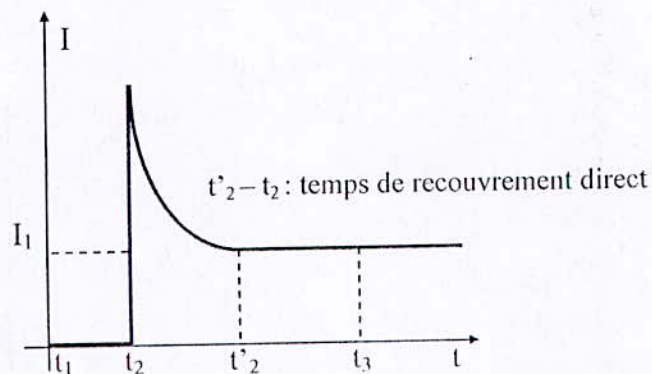


Figure 4.3 Temps de recouvrement direct de la diode

Ce phénomène est appelé « phénomène de recouvrement direct ». La période pendant laquelle la diode « ne réagit plus » aux variations de tension appliquée, est définie dans le lexique par le terme : temps de recouvrement direct de la diode (Figure 4.3).

IV.3. LE RECOUVREMENT INVERSE

A la différence du recouvrement direct, la coupure du courant présente un phénomène plus complexe appelé ; recouvrement inverse :

- D'une part la diode n'est bloquée qu'au bout d'un temps en général plus long que celui correspondant à l'établissement du courant,
- D'autre part il y a apparition d'un courant inverse qui peut momentanément atteindre une valeur importante.

Ce phénomène est dû au fait que la charge de diffusion ne disparaît pas instantanément par recombinaisons, lorsque le courant direct est coupé, et qu'elle peut donner naissance à un courant de sens inverse très élevé.

IV.3.1. phénomène de recouvrement inverse

On peut expliquer le phénomène de recouvrement inverse à l'aide des figures suivantes (Figure 4.4 et Figure 4.5) : [8]

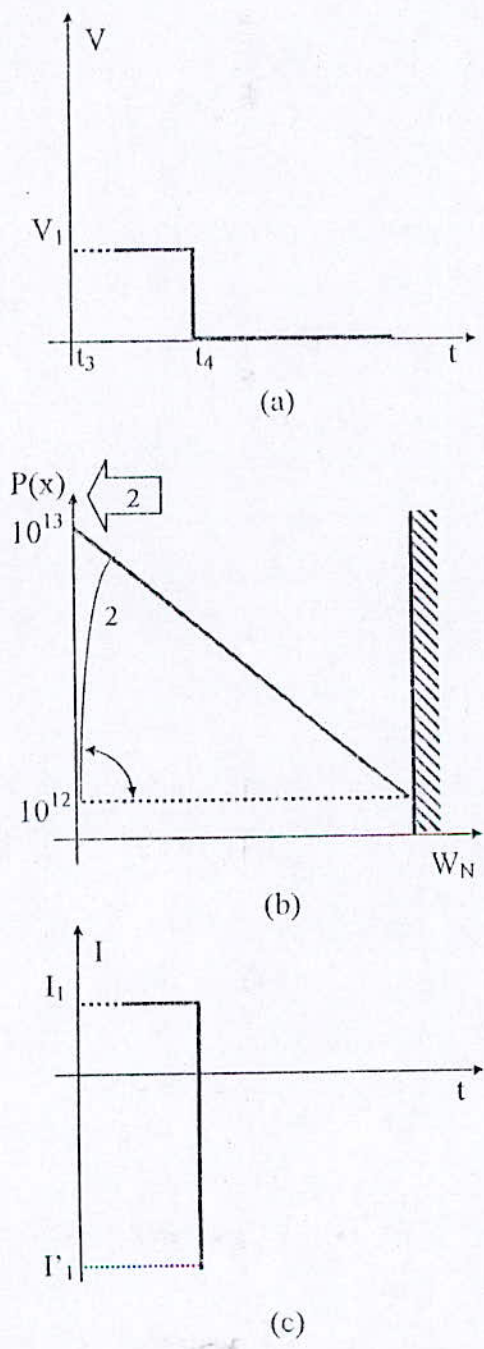


Figure 4.4 Génération d'un courant très important dans le sens inverse

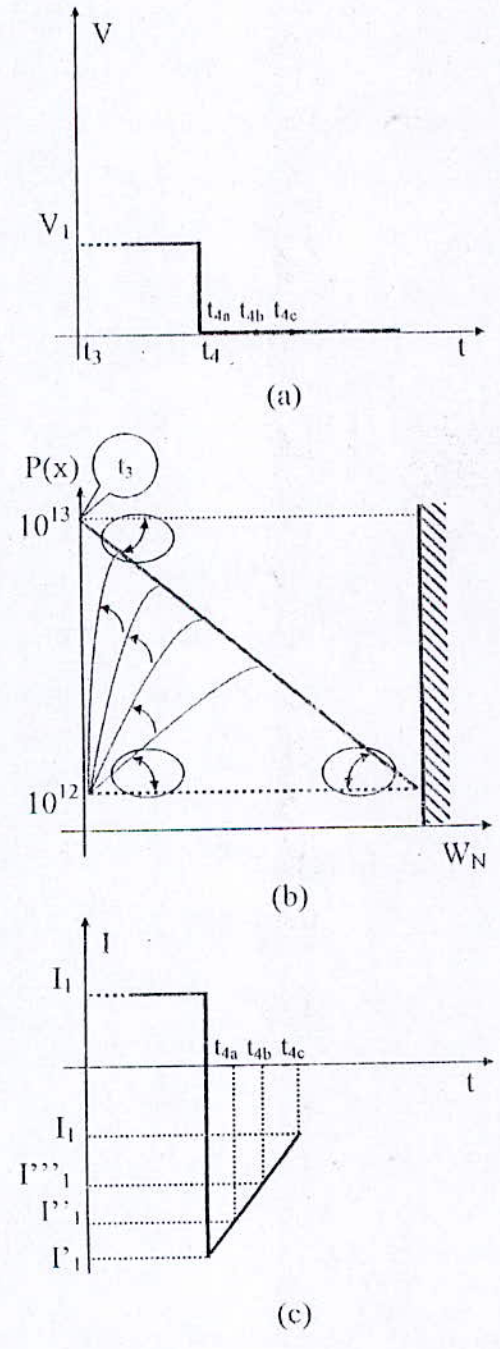


Figure 4.5 Evacuation des porteurs en excès.

A l'instant t_4 , la tension fournie par le générateur disparaît brusquement Figure 4.4.a. La barrière se réélargit immédiatement et reprend son épaisseur d'équilibre ; les trous de la région P ne peuvent plus pénétrer dans la région N ; par contre, les trous contenus en excès dans la région N repassent facilement à l'intérieur de la région P.

Si le circuit ne présente aucune résistance au passage du courant, tous les trous en excès dans la région N retournent instantanément à l'intérieur de la région P. En conséquence à l'instant t_4 , la concentration de trous, aux abords de la barrière dans la région N, passe brusquement de la valeur 10^{13} à son niveau d'équilibre 10^{12} .

Seule la partie extrême gauche de cette région se trouve influencée par le départ de trous ; dans ces conditions, le graphique détermine avec l'horizontale un angle extrêmement grand. Une forte dénivellation apparaît de la droite vers la gauche (position 2 du graphique de concentration, Figure 4.4.b) et un courant très important de trous circule dans le sens inverse. Cette grande impulsion de courant (I'_1) est représentée dans la Figure 4.4.c

De l'instant t_4 , à l'instant t_{4c} (Figure 4.5.a), aucun signal n'est appliqué aux bornes de la jonction.

A l'instant t_{4a} , les trous ayant évacué la partie gauche de la région N, le graphique se situe dans une position oblique intermédiaire entre la position correspondant à l'instant t_4 et l'horizontale. L'angle diminue et le courant prend la valeur ($-I''_1$), (Figure 4.5.c).

De même à l'instant t_{4b} , les trous continuent à diffuser vers la région P, et le courant prend une valeur encore inférieure (soit $-I'''_1$ dans la Figure 4.5.c).

A l'instant t_{4c} , le graphique de concentration se situe dans une position particulière, l'angle de gauche est alors égal à l'angle de droite. Le courant correspondant à l'instant t_{4c} est exactement égal (en valeur absolue) au courant direct associé à l'instant t_3 .

A l'instant t'_4 , le graphique est revenu dans la position horizontale ; aucun courant ne circule. A cet instant, tous les trous contenus en excès dans la région N ont été évacués (Figure 4.6).

($t'_4 - t_4$) définit une période d'initialisation de la diode. Toute information transmise à la diode, de l'instant t_4 à l'instant t'_4 ne pourra influencer la valeur du courant dans le circuit.

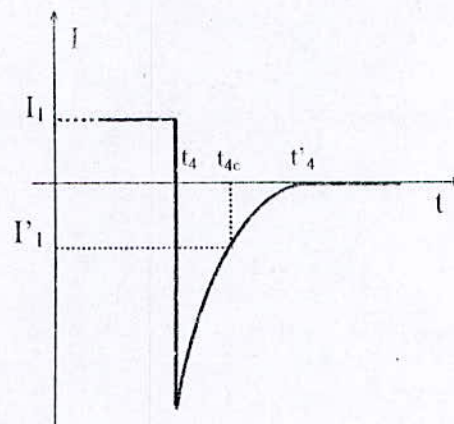


Figure 4.6 Evacuation totale des porteurs en excès

IV.3.2. Charge recouvrée

Pendant la commutation une partie de la charge de diffusion $Q_D = \tau_p \cdot I_F$, présente dans la diode passante disparaît spontanément par recombinaisons internes, (liées à la durée de vie des porteurs minoritaires) tandis que l'autre partie appelée charge recouvrée Q_R est évacuée par le courant inverse circulant dans la diode : c'est cette charge recouvrée qui produit le courant de recouvrement inverse et crée tous les autres phénomènes de commutation (surtension, parasite, échauffement).

Quand la vitesse de commutation augmente ($\frac{dI_F}{dt}$ très grand), on a : $Q_R = Q_D = \tau_p \cdot i_F$, car le phénomène de recombinaison est très négligeable.

IV.3.3. les deux phases de recouvrement inverse

1^{ère} phase- dès la fermeture de l'interrupteur du circuit de commutation (Figure 4.7) le courant décroît avec la vitesse $\frac{di_d}{dt} = -\frac{v}{L}$ qui est imposée par l'inductance du circuit extérieur. Le courant a l'allure d'un début d'exponentielle, (intervalle (t_0, t_1)), (Figure 4.8). [7]

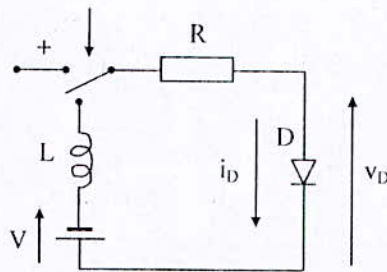


Figure 4.7 Circuit de commutation

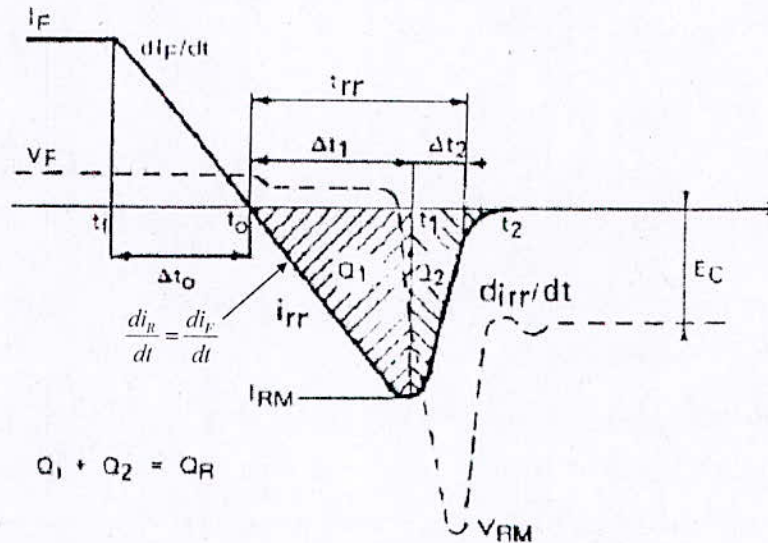


Figure 4.8 temps de recouvrement inverse et charge recouvrée

2^{ème} phase – dans la deuxième phase (t_1 , t_2), c'est la diode qui impose la vitesse de décroissance du courant inverse. A partir de l'instant t_2 la diode commence à retrouver son pouvoir de blocage car les abords de la jonction sont vides de porteurs ; il y a encore à évacuer la charge Q_2 mais elle est faible ; il en résulte, (Figure 4.8), que la vitesse de décroissance du courant inverse $\frac{di_R}{dt}$ est d'autant plus élevée que le courant inverse maximal I_{RM} est plus grand.

IV.3.4. Variation de la charge recouvrée avec les conditions de commutation

La figure 4.8 montre que la charge recouvrée est :

$$Q_R = Q_1 + Q_2 = \int_{t_0}^{t_2} i dt \quad (4.1)$$

Cette charge dépend de la charge de diffusion $Q_D = \tau \cdot I_F$ c'est-à-dire du courant direct et la durée de vie des porteurs minoritaires ; elle dépend de la vitesse de décroissance $\frac{di_F}{dt}$ car on

a : $Q_D = Q_0 + Q_R$, Figure 4.8.

τ est un facteur très important car sa réduction permet de réduire Q_D ; τ décroît lorsque le courant direct I_F croît, ce qui explique que Q_R ne croît pas linéairement avec I_F (la relation $Q_D = \tau \cdot I_F$ n'est qu'approximative).

Quand le courant i_F dans la diode décroît lentement les porteurs minoritaires ont le temps de disparaître par recombinaison interne et la charge recouvrée ne dépend plus du courant direct I_F .

Quand le courant i_F dans la diode décroît rapidement, la charge recouvrée dépend beaucoup du courant direct I_F parce que très peu de charges disparaissent par recombinaisons.

IV.3.5. les paramètres caractéristiques du recouvrement inverse

La figure 4.8 montre les principaux paramètres du recouvrement inverse :

- di_F/dt : vitesse de croissance du courant inverse, des valeurs élevées diminuent le temps de recouvrement inverse mais elle augmentent par contre le courant inverse maximal.
- I_{RM} : le courant inverse maximal .Il dépend de la vitesse de croissance de courant, de la charge inverse, et des composant du circuit.
- Q_{rr} : la charge inverse (charge recouvrée). Elle dépend de la vitesse de croissance du courant et de la température.
- Les pertes d'énergie supplémentaire dues au recouvrement des charges.
- t_{rr} : temps de recouvrement inverse (pendant lequel toute la charge Q_R a été recouvrée).

Pour notre travail on s'intéresse à la mesure de ce dernier paramètre : le temps de recouvrement inverse t_{rr} .

IV.3.6. Temps de recouvrement inverse

Si on admet que $t_2 \neq t_1$ c'est-à-dire qu'au temps t_1 toute la charge Q_R a été recouverte (Figure 4.8).

Il faut distinguer deux cas :

- le circuit ne limite pas la valeur du courant inverse $I_{i \max}$, (Figure 4.9) ; des considérations géométriques simples donnent : [7]

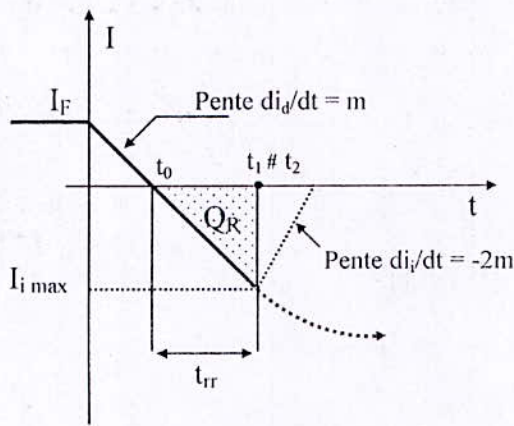


Figure 4.9 (a)

L'impédance du circuit ne limite pas le courant inverse

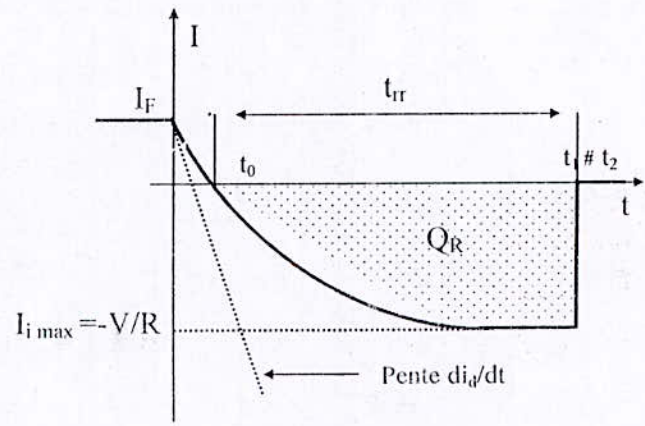


Figure 4.9 (b)

L'impédance du circuit limite le courant inverse

$$t_{rr} = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_R}{\left| \frac{-di_f}{dt} \right|}} \quad (4.2)$$

$$I_{i \max} = -\sqrt{\left| -2 \cdot Q_R \cdot \frac{di_f}{dt} \right|} \quad (4.3)$$

Ou $m = \frac{di_f}{dt} = -\frac{V}{L}$ est imposé par le circuit.

En pratique la remontée du courant n'est pas instantanée ($t_1 \neq t_2$), (Figure 4.9.a), (le tracé en pointillé) si bien que les valeurs réelles de t_{rr} sont supérieures à celle que donne l'expression précédente ; pour $I_{i\max}$ c'est l'inverse. On substitue aux expressions précédentes les formules empiriques suivantes : [7]

$$t_{rr} = \sqrt{\frac{3 \cdot Q_R}{\left| \frac{-di_F}{dt} \right|}} \quad (4.4)$$

$$I_{i\max} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot Q_R \cdot \frac{di_F}{dt}} \quad (4.5)$$

Cela revient à admettre que la pente de la remontée du courant est double de celle de la descente.

- le circuit limite le courant inverse à une valeur bien plus faible que celle que l'on trouverait dans le cas précédent (Figure 4.9.b), indique que l'on a :

$$I_{i\max} = -\frac{V}{R} \quad (4.6)$$

et

$$t_{rr} \cong \frac{Q_R}{|-I_{i\max}|} + 0.63 \cdot \frac{I_{i\max}}{\left| \frac{di_F}{dt} \right|} \quad (4.7)$$

IV.3.6.1. Influence de la résistance sur le temps de recouvrement inverse

Pour déterminer l'influence de la résistance placée dans le circuit, examinons trois valeurs possible de R : soit R_1 plus petite que R'_1 , elle-même moins importante que R''_1 (Figure 4.10).

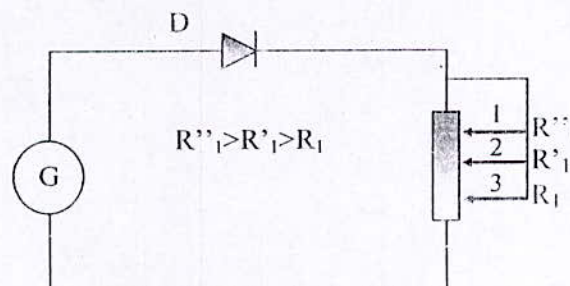


Fig.4.10 Influence de la résistance placée dans le circuit sur le T_{rr} .

Ces trois résistances sont associées à trois positions possibles du curseur du potentiomètre :

- R_1 , faible valeur de résistance (position 3) ;
- R_1' , valeur moyenne de résistance (position 2) ;
- R_1'' , forte valeur de résistance (position 1) ;

Pour une faible valeur de résistance, la disposition de la tension provoque une forte impulsion de courant inverse I_2 (Figure 4.11). Le courant se maintient à cette valeur pendant un temps très court, et décroît ensuite jusqu'à disparaître à l'instant t_4' . $(t_4' - t_4)$ définit alors le temps de recouvrement inverse de la diode.

Dans le cas d'une résistance moyenne R_1' , une impulsion du courant inverse I_2' telle que $|I_2'| < |I_2|$ apparaît à l'instant t_4 . Le courant conserve cette valeur durant un temps plus long que précédemment (Figure 4.11) ; il atteint enfin la valeur zéro à l'instant t_4'' .

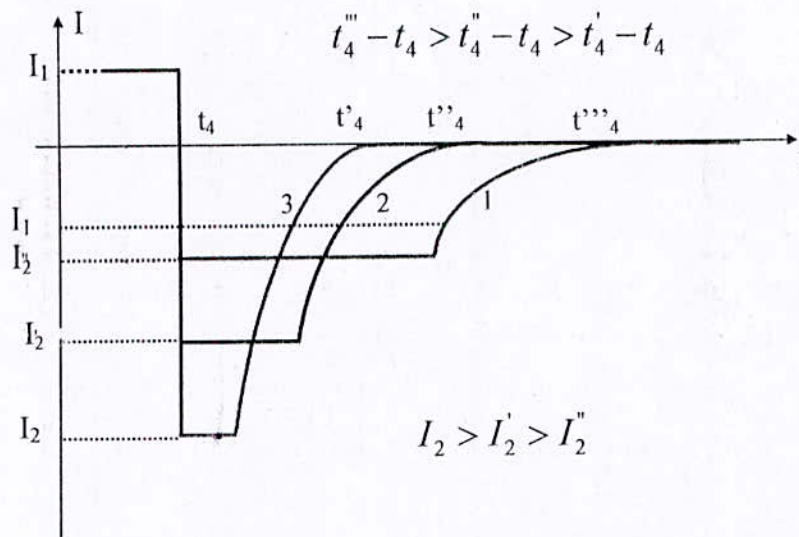


Figure 4.11 Influence de la résistance sur le temps de recouvrement inverse

Si l'on prend une résistance encore plus grande R_1'' (1 dans les Figure 4.10 et Figure 4.11), la variation de tension de V_1'' à 0, à l'instant t_4 , s'accompagne :

- d'une impulsion de courant I_2'' plus petite que I_2' ;
- d'un temps de recouvrement inverse $(t_4''' - t_4)$ plus long que $(t_4'' - t_4)$.

L'accroissement de la résistance provoque, outre une diminution de l'impulsion de courant, un allongement du temps de recouvrement inverse de la diode.

$$R_1'' > R_1' > R_1$$

$$I_2 > I_2' > I_2''$$

$$t_4''' - t_4 > t_4'' - t_4 > t_4' - t_4$$

IV.3.7. Mesure de temps de recouvrement inverse

Plusieurs méthodes ont été envisagées pour la mesure de ce paramètre. On cite quelques exemples de ces méthodes :

Exemple 1

JEDEC a approuvé le circuit de test de la figure 4.12, pour déterminer les caractéristiques du recouvrement inverse :

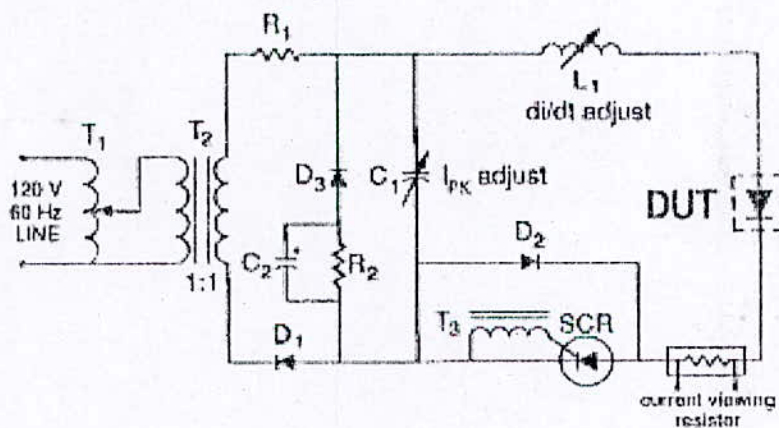


Figure 4.12 Le circuit de test approuvé par JEDEC.

Le principe de fonctionnement de ce circuit est basé sur la décharge d'énergie stockée dans la capacité C_1 à travers l'inductance série L_1 et le composant sous test DUT (*Device Under Test*).

Une impulsion passe à travers le DUT. Quand cette dernière passe sous zéro le DUT devient inversé et bloque le courant. A cet instant le processus de recouvrement inverse est commencé. Pour les composants à temps de recouvrement inverse supérieur à 100 ns ce circuit donne des résultats valables [16], [17].

commencé. Pour les composants a temps de recouvrement inverse supérieur a 100 ns ce circuit donne des résultats valables [16], [17].

Exemple 2 :

Cette méthode consiste a basculer brusquement le DUT d'un régime de polarisation directe à un régime de polarisation inverse. [18]

Le dispositif expérimental de cette méthode est représenté par la Figure 4.13

Les sources V_f et V_r sont réalisées à l'aide de batteries connectées en série

Les deux potentiomètres P_1 et P_2 servant a réglé la valeur du courant direct et du courant inverse dans la diode.

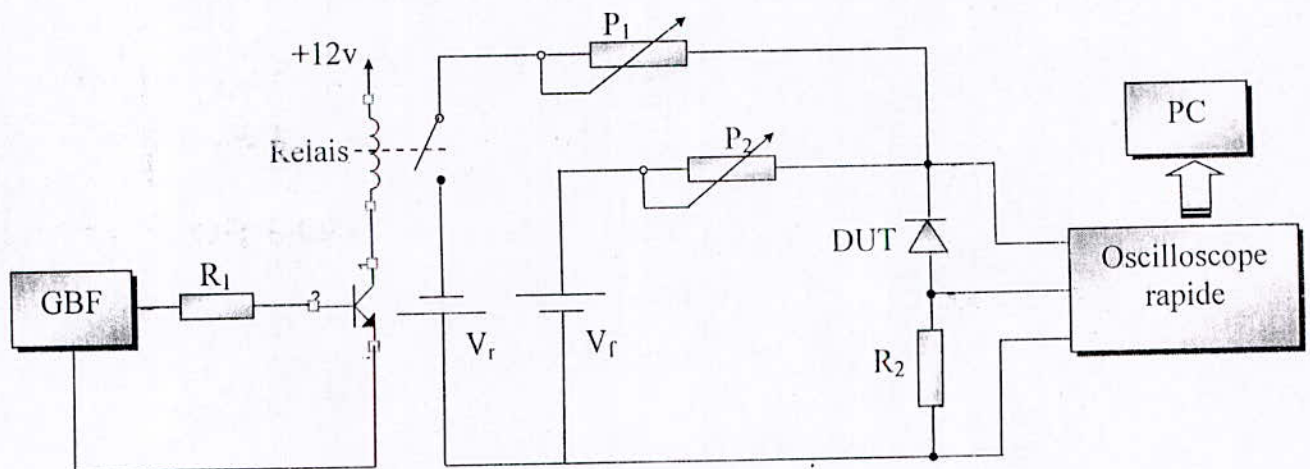


Figure 4.13 Dispositif expérimental pour la mesure du temps de recouvrement inverse.

La tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse sont enregistrés à l'aide d'un oscilloscope rapide et stockés sur un PC.

Le schéma ci-dessous Figure 4.14 représente une autre version de la circuiterie précédente ou on utilise le Ne555 pour générer un signal carré, ce dernier est amplifié par le montage push pull.

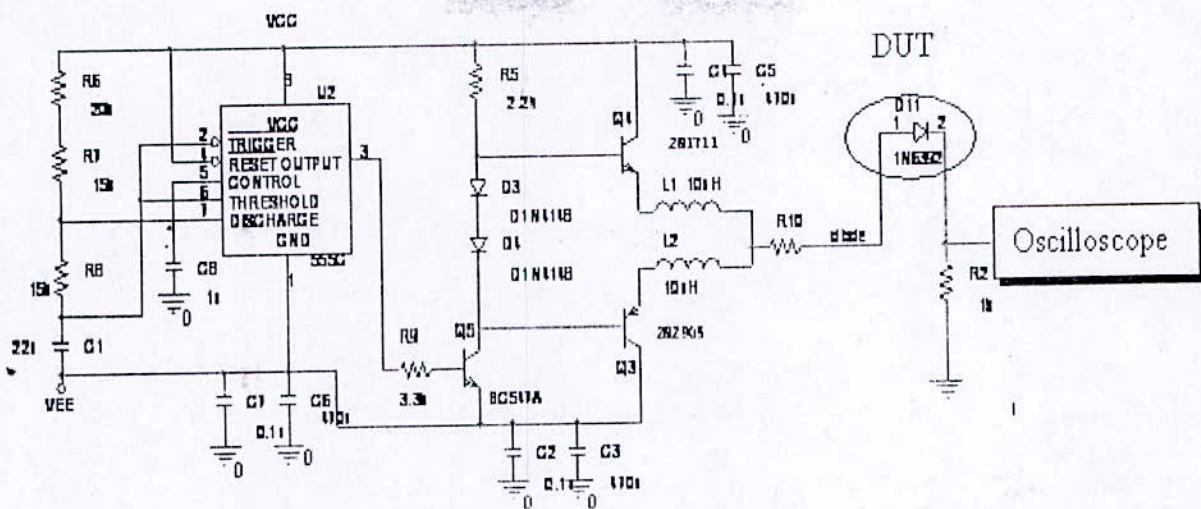


Figure 4.14 circuit de mesure de temps de recouvrement inverse.

IV.4. CONCLUSION

Ce chapitre décrit le principe théorique du phénomène de recouvrement inverse et en étudie les paramètres caractéristiques de ce phénomène, spécialement le recouvrement inverse.

Ensuit le temps de recouvrement inverse, ainsi que quelques montages proposés pour la mesure de ce dernier.

La deuxième partie

Chapitre 5

Etude Expérimentale

Etude expérimentale

V.1. INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est la réalisation d'un banc d'essai pour trier et tester les cellules solaire, le système est basé sur la caractérisation en régime transitoire des jonction PN (cellule solaire), par la mesure du temps de recouvrement inverse.

V.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Comme on a vu dans le chapitre III le principe de cette méthode repose sur la mesure de temps de recouvrement inverse, ceci s'effectue en basculant la jonction d'un régime de polarisation direct à un régime de polarisation inverse, en mesurant le temps entre l'instant de commutation et l'instant où le courant inverse est ramené à 1/10 de sa valeur initiale I_{R_0} .

Le schéma synoptique du système comporte les différents blocs suivants (Figure 5.1):

- Bloc de traitement : le microcontrôleur 16F84 ;
- Bloc d'amplification ;
- Bloc d'affichage : les afficheurs 7segments, le convertisseur BCD/7segments ;
- Bloc du redresseur et inverseur ;

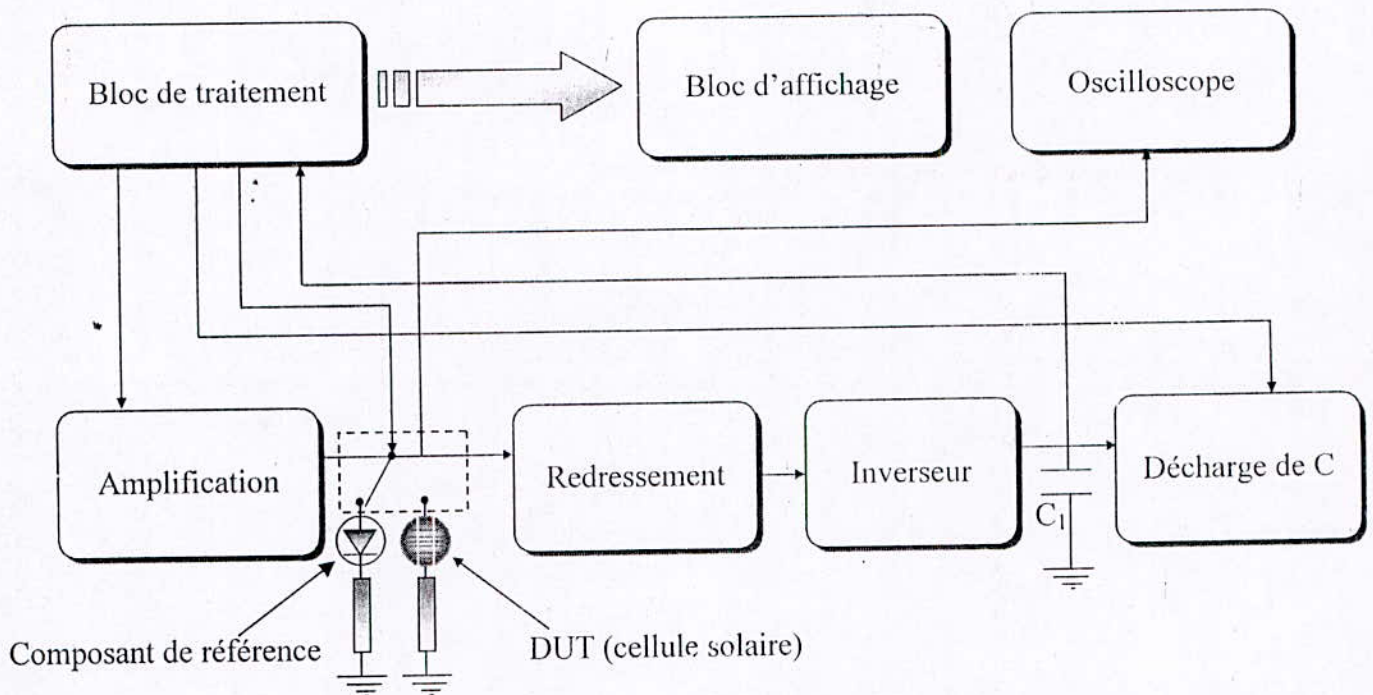


Figure 5.1. Schéma synoptique du système de mesure

Le principe de fonctionnement de notre circuit est basé sur le comptage du nombre des impulsions suffisant (value1) pour que le composant sous test charge le condensateur C_1 jusqu'au seuil qui provoquera une interruption externe sur le bit RB_0 .

On commence la mesure par le composant de référence et on sauvegarde le nombre des impulsions puis on émet un signal sur le bit RA_1 vers le relais pour basculer ce dernier en position de la cellule solaire, après on émet un autre signal sur le bit RA_2 vers la base de transistor Q_5 , le transistor devient passant ce qui assure la décharge du condensateur C_1 .

De la même manière on teste la cellule solaire et on sauvegarde le deuxième nombre des impulsions (value2).

Le temps de recouvrement inverse est calculé par la suite en utilisant une simple relation mathématique entre les deux nombres des impulsions déterminés (value1 et value2).

Au même temps, il sera possible de visualiser les courbes de recouvrement inverse sur un oscilloscope rapide.

Le composant de référence

Le composant de référence est une diode de redressement bien choisie de temps de recouvrement inverse égal à 2000 ns (1N4001).

V.2.1 Le schéma de circuit électrique

Le circuit imprimé de notre montage est réalisé à l'aide du logiciel de routage, après la création du schéma électrique dans un logiciel de dessin (MSimEval).

Notre circuit est partagé en cinq blocs : le bloc d'amplification, le bloc de traitement, le bloc d'affichage, le bloc de mise en forme de signal et le bloc de la décharge du condensateur. Le schéma de circuit électrique global est donné par la Figure 5.2 où chaque partie est encadrée,

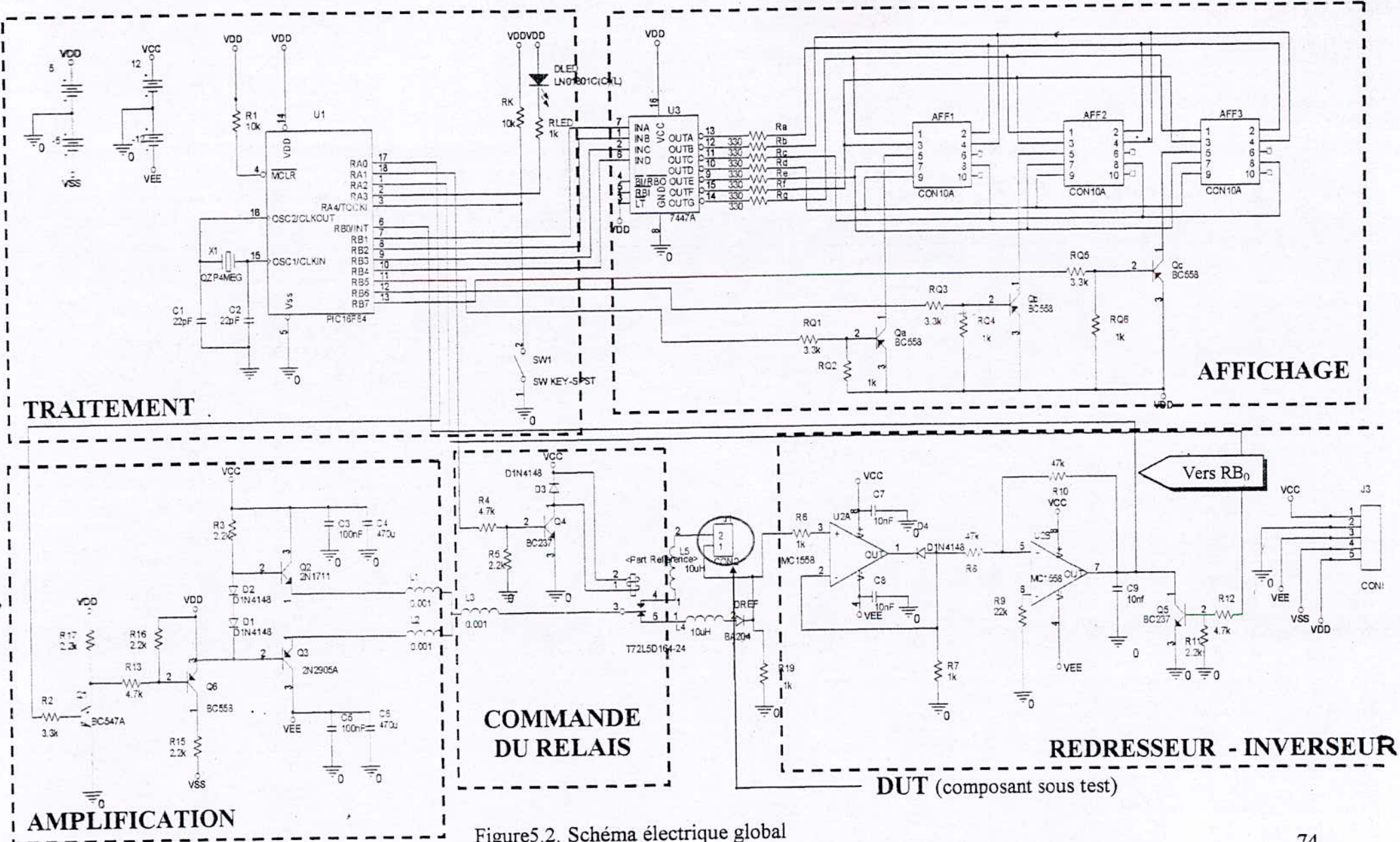


Figure 5.2. Schéma électrique global

V.3. BLOC DE TRAITEMENT

C'est le coeur de notre circuit, il est basé sur le microcontrôleur la pic16f84 de microchip. L'utilisation de ce dernier nécessite une circuiterie minimale. Cette circuiterie est représentée par la Figure 5.3 :

Le circuit comprend le microcontrôleur avec l'horloge de 4 MHz.

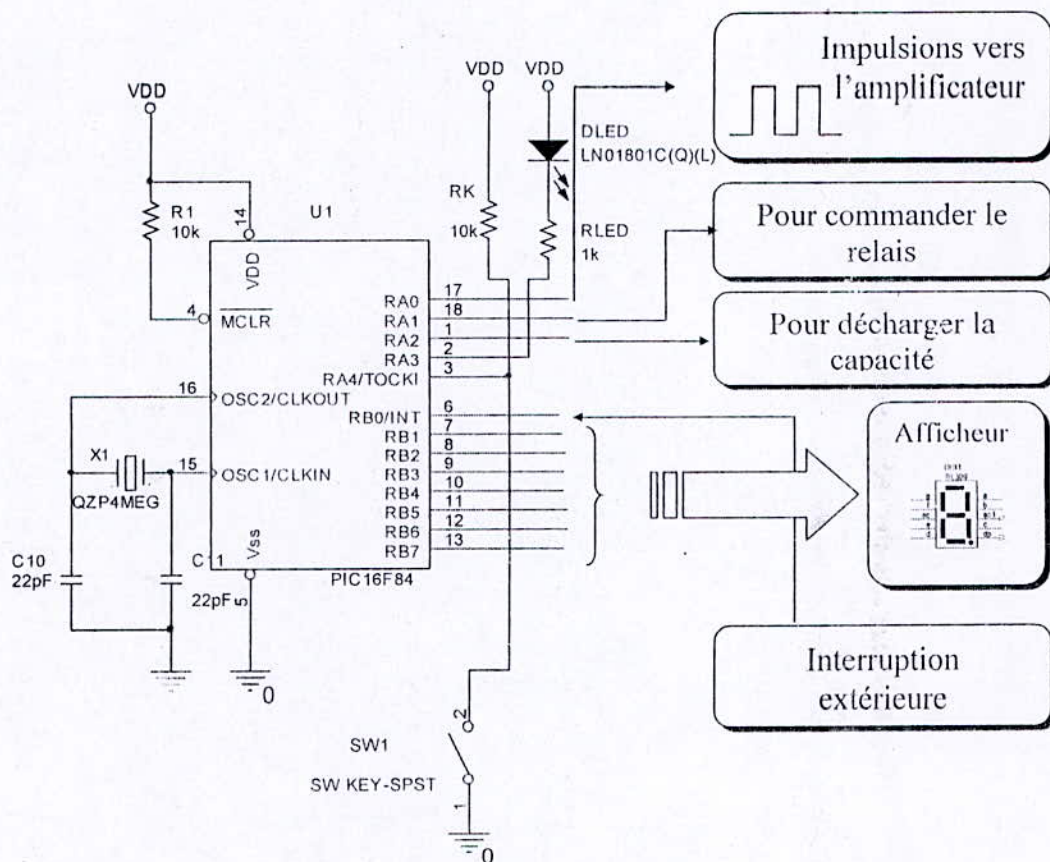


Figure 5.3. Bloc de traitement.

Description du brochage

Port A

RA₀ : émission des impulsions.

RA₁ : émission d'un signal vers le relais.

RA₂ : émission d'un signal vers le transistor Q₅ (pour décharger C₁)

Port B

RB₀ : interruption externe (liée a C₁).

RB₁ → RB₇ : réservé a l'affichage.

V.4. BLOC DE CONDITIONNEMENT

V.4.1 Redresseur sans seuil

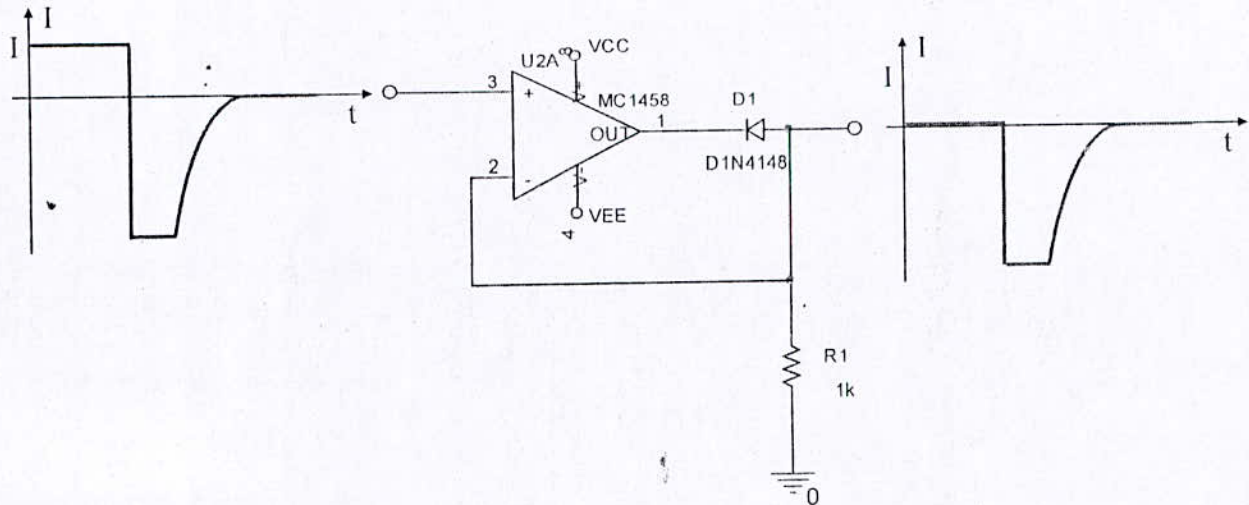


Figure 5.4. Redresseur sans seuil.

Le gros problème pour redresser des faibles tensions, provient de seuil élevé des diodes ($>0.5V$ pour le silicium), qui dépend en plus de la température. Cette caractéristique interdit le redressement de faibles signaux avec une précision suffisante.

Le montage est celui de la figure 5.4 : le montage ressemble à un suiveur auquel on a adjoint une diode en série avec l'amplificateur.

Pour la partie positive de tension de recouvrement inverse, la sortie de l'ampli va avoir tendance à devenir positive, mais, elle est bloquée par la diode : il n'y a pas de contre-réaction, car le signal de sortie de l'ampli ne peut pas revenir sur l'entrée. Dans ce cas, la tension de sortie de l'amplificateur va prendre la valeur V_{sat-} , et la tension de sortie du montage va être nulle.

Lorsque la tension d'entrée va devenir négative, la sortie de l'amplificateur va devenir négative aussi, et elle va augmenter jusqu'à la valeur de la tension de seuil de la diode, et la contre réaction sur l'entrée inverseuse va pouvoir se faire, la tension en sortie de l'ampli prenant la valeur $V_d + V_e$, de manière à ce que V_+ soit égal à V_- (donc à V_s).

Au bilan, pour la partie négative de notre signal, $V_s = V_e$, et pour la partie positive, $V_s = 0$: on a un redresseur idéal.

V.4.2 Amplificateur inverseur

C'est le montage de base à amplificateur opérationnel. L'entrée non inverseuse est reliée à la masse ; le signal d'entrée est relié à l'entrée inverseuse par une résistance R_1 , et la sortie est reliée à cette entrée par une résistance R_2 .

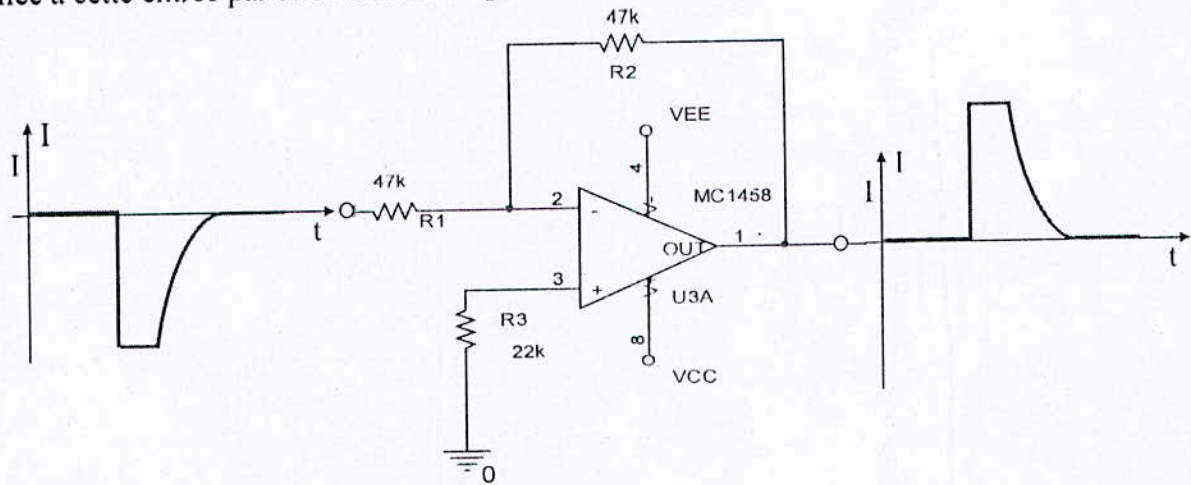


Figure 5.5. Amplificateur inverseur.

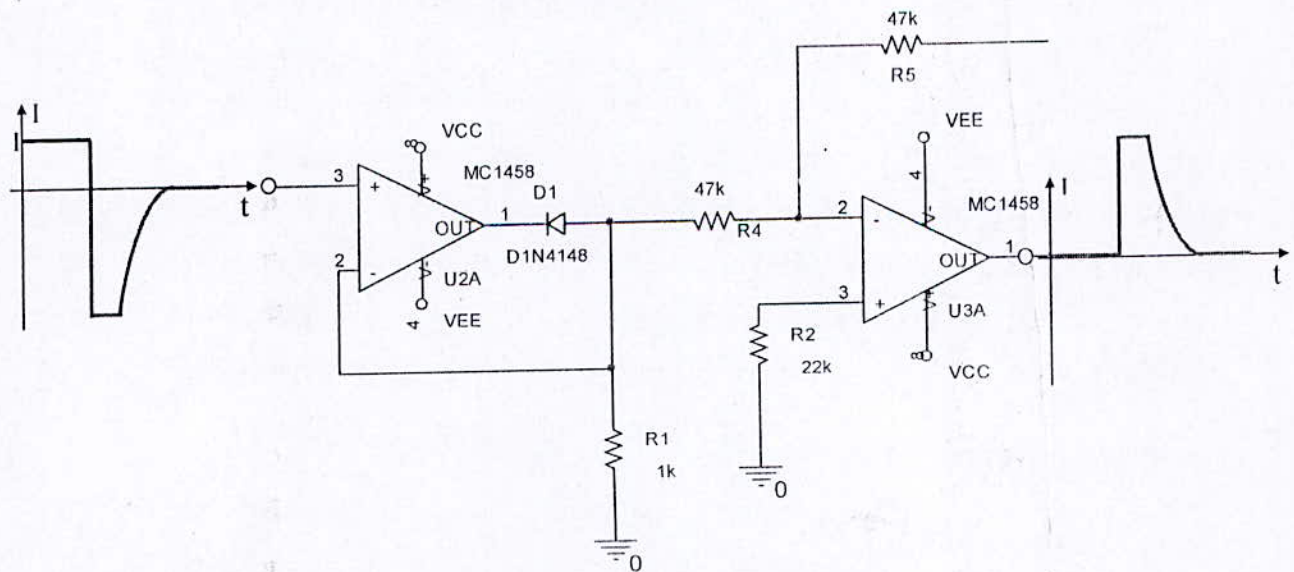


Figure 5.6. Schéma du redresseur avec l'inverseur

V.5. BLOC D'AMPLIFICATION

V.5.1 Le montage "push-pull"

Le montage push-pull (*push*, en anglais, signifie pousser, *pull* signifie tirer), encore appelé montage symétrique, est un grand classique en amplification de puissance des signaux alternatifs. Voici, brièvement, son principe:

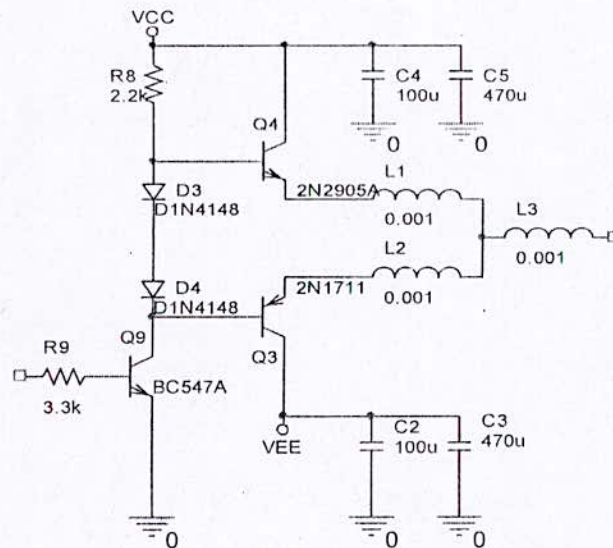


Figure 5.7. Schéma de principe du montage push-pull.

Ce montage est construit autour de deux transistors, un NPN noté Q_4 et son PNP complémentaire, noté Q_3 . Les deux transistors conduisent le courant tour à tour, pendant une alternance du cycle alternatif. Ce qui revient à dire que chaque transistor est bloqué pendant une demi période du signal alternatif et passant durant l'autre. Pour obtenir une amplification correcte, il est ici nécessaire d'employer deux transistors complémentaires (mêmes paramètres, seule la polarité, NPN ou PNP, diffère) et une alimentation symétrique.

V.6. BLOC D'AFFICHAGE

Ce bloc comporte trois parties

- Un inverseur à base de transistor PNP; pour sélectionner l'afficheur de travail ;
- Un décodeur/pilote (le SN74LS47N), qui traduit le code BCD, et pilote directement les afficheurs 7 segments;

- un afficheur 7 segments (le LTS 4801P), ce composant affiche le résultat obtenu ;

L'inverseur est réalisé autour d'un transistor PNP (le BC558), il est représenté dans la Figure 5.8

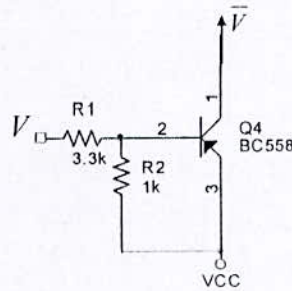


Figure 5.8. Un inverseur a transistor PNP

Le circuit d'affichage est donné par la figure 5.9 :

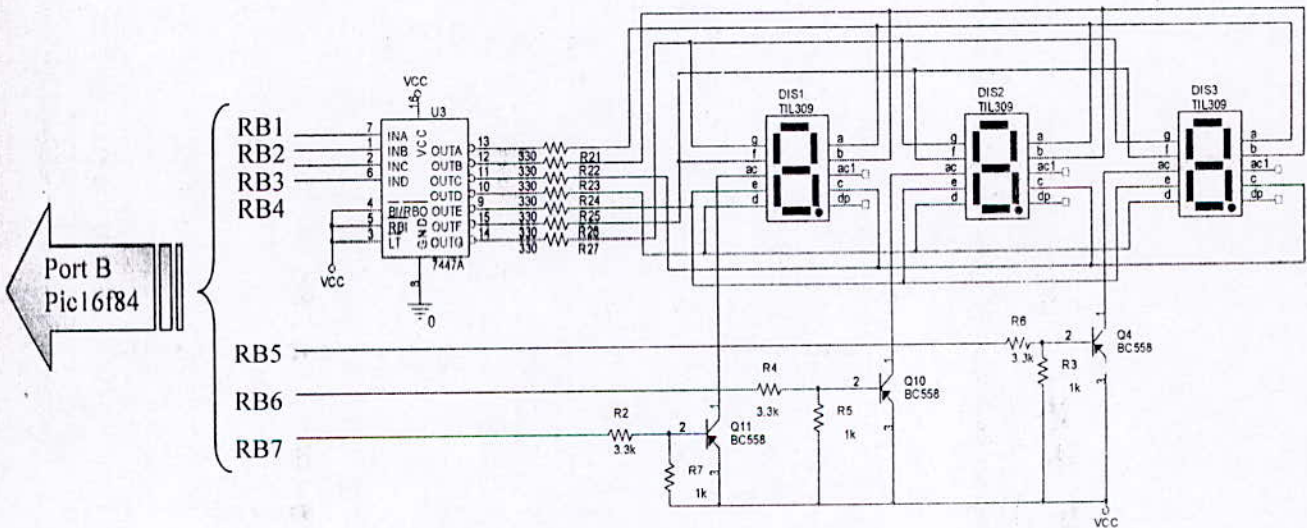


Figure 5.9 Schéma de circuit d'affichage

Trois afficheurs 7 segments sont des anodes communes, leurs diodes reliées aux 8 sorties de décodeur 7447. Les transistors Q1 Q2 et Q3 sélectionnent l'afficheur pour lequel la donnée est destinée.

L'envoi de la donnée par le microcontrôleur se fait par les pins Rb1, Rb2, Rb3 et Rb4 les pins Rb5, Rb6 et Rb7 sont réservés pour les transistors de sélection.

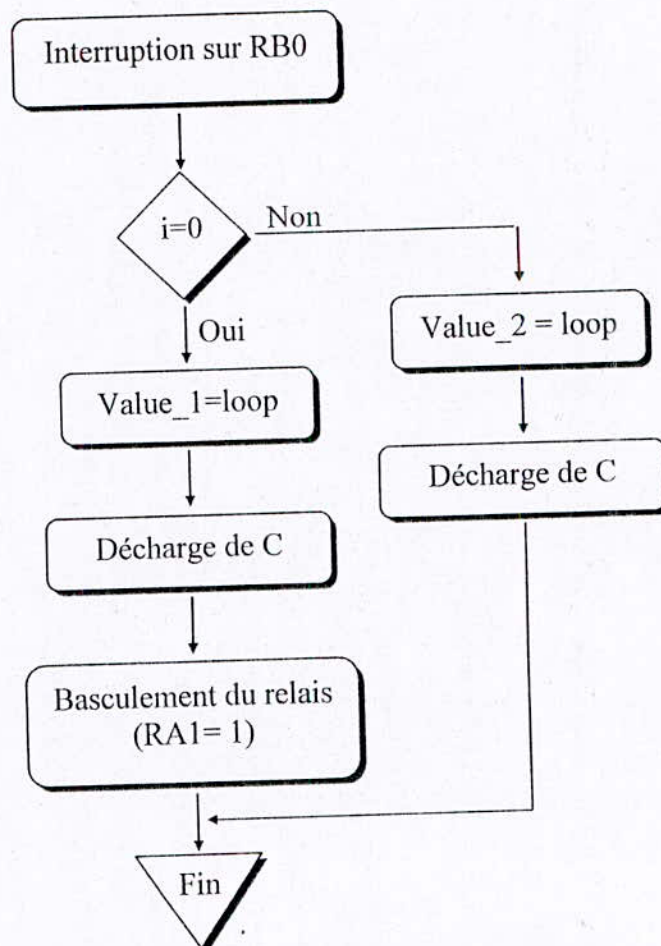
La valeur mesurée est un nombre réel, composé de 3 chiffres (centaines, dizaines, unités) l'affichage de ces chiffres est séquentiel, c'est-à-dire chiffre par chiffre Pour afficher le chiffre des dizaines il faut activer le premier afficheur, ainsi que le décodeur BCD/7 segments.

V.7. LE PROGRAMME

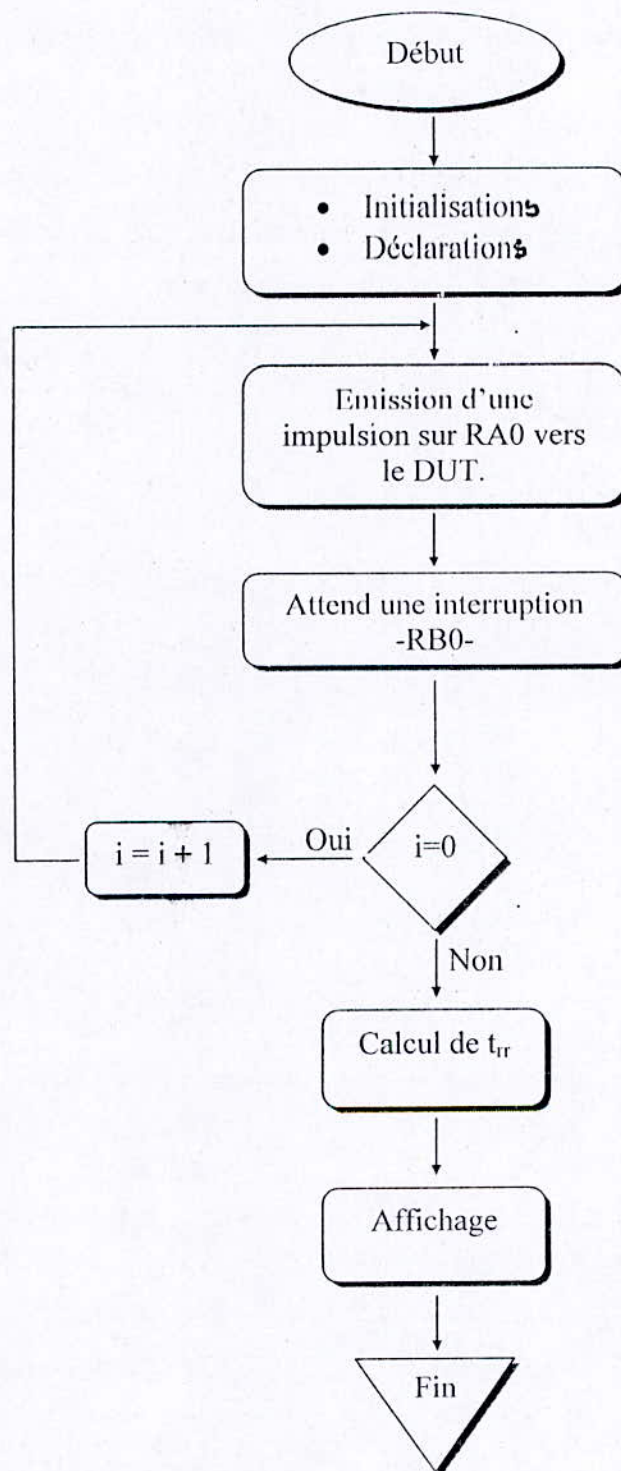
Le programme est écrit en langage C à l'aide d'un logiciel qui est le PIC C. Ce langage est facile et direct.

Les organigrammes du programme principal et du programme d'interruption sont présentés par les figures suivantes :

Organigramme du programme d'interruption



Organigramme de programme principal

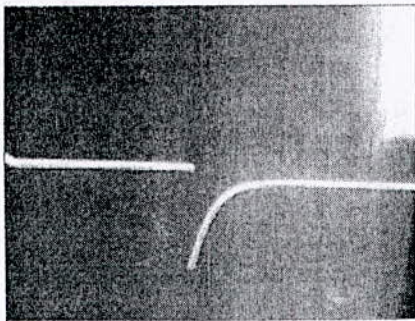


V.8 TESTS ET RESULTATS DES MESURES

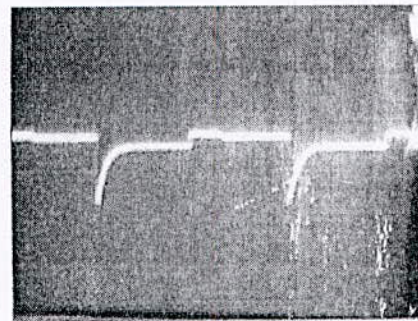
Pour évaluer la qualité et l'efficacité du montage de caractérisation et de tri de cellules solaires proposé, les tests doivent être effectués selon les conditions standards (STC) ($E_s = 1000\text{W}$, $T = 25^\circ\text{C}$).

Les tests sont réalisés avec des cellules solaires de l'UDTS. Ces cellules sont caractérisées par d'autres méthodes (caractéristiques I (V) et réponse spectrale par l'équipe *Simulation And Analysis Laboratory* de l'UDTS d'Alger. Voir annexes).

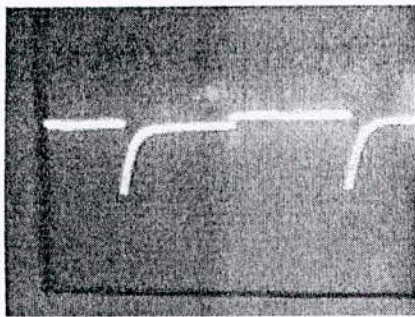
Les différentes courbes visualisées sur oscilloscope sont représentées par les figures suivantes:



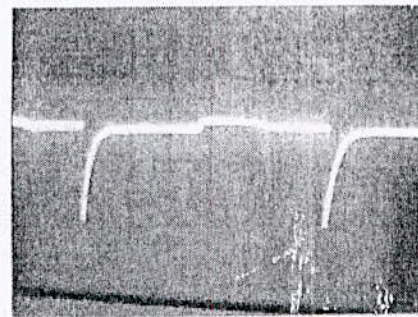
Courbe de réponse de la cellule F1.
1v/div. et 10ns/div.



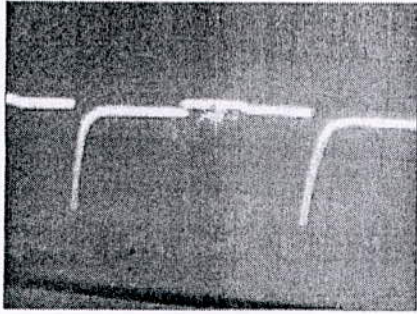
Courbe de réponse de la cellule F1-1.
1v/div. et 10ns/div.



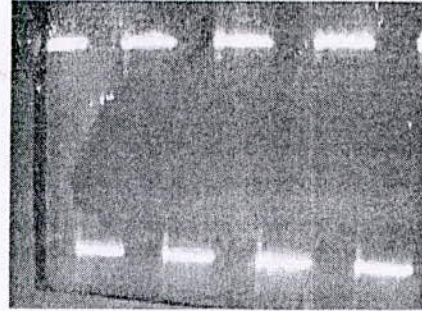
Courbe de réponse de la cellule FZ6-1.
1v/div. et 10ns/div.



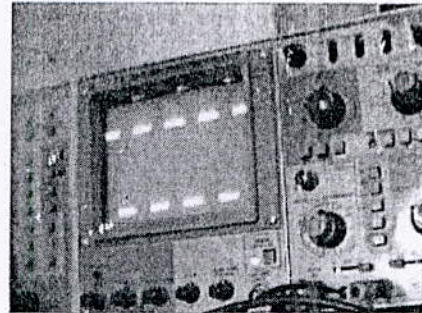
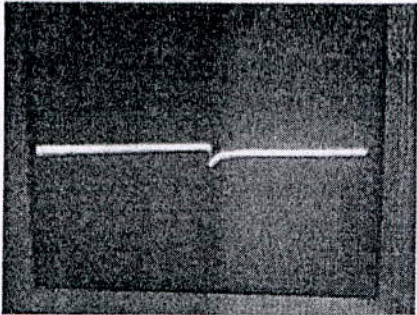
Courbe de réponse de la cellule FZ6-2.
1v/div. et 10ns/div.



Courbe de réponse de la cellule carre
1v/div. et 10ns/div.



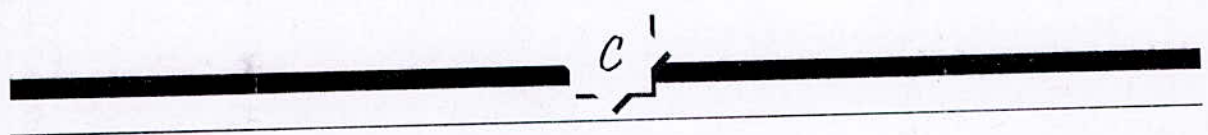
Impulsions électriques.



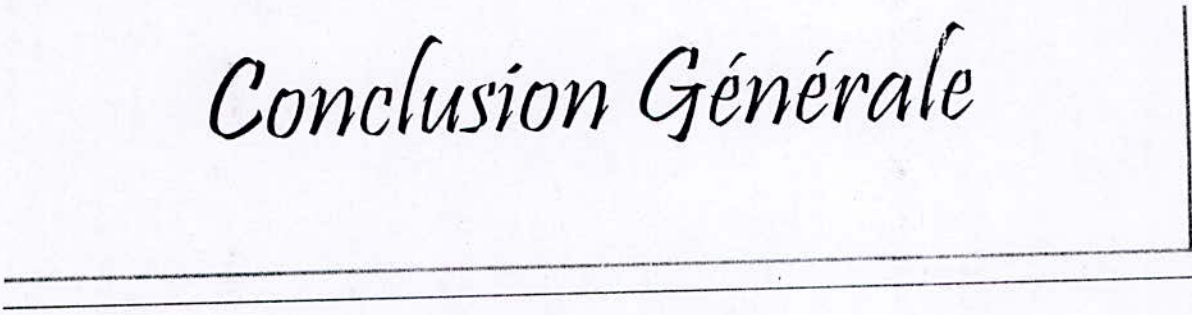
V.9 CONCLUSION

Dans ce dernier chapitre réservé à l'étude expérimentale, nous avons expliqué le principe de fonctionnement de notre banc d'essais ainsi que celui de chacun de ses principaux blocs.

Nous avons aussi expliqué la manière adoptée pour caractériser et trier les cellules solaires. Le programme implanté dans la mémoire du microcontrôleur a été présenté. Enfin, à titre indicatif, nous avons exposé quelques photographies des signaux obtenus.



Conclusion Générale



CONCLUSION

Les modules photovoltaïques sont généralement conçus en associant un certain nombre de cellules élémentaires de technologie et caractéristiques identiques. Leur fonctionnement sera altéré si l'une des cellules associées est détruite ou occultée, ce qui provoque un problème de déséquilibre dans les modules, d'où la nécessité en production de tester et trier soigneusement les cellules et de les classer en fonction de leurs caractéristiques.

Les études faites dans le cadre de ce mémoire portent essentiellement sur la caractérisation et le tri des cellules solaires selon leurs temps de recouvrement inverse. Nous avons alors proposé notre circuit de test rapide réalisé autour du microcontrôleur 16F84A de Microchip.

Auparavant, nous avons effectué une étude théorique sur

- le principe de base des convertisseurs photovoltaïques et l'analyse de comportement du groupement des cellules solaires en série ou en parallèle en étudiant les problèmes du déséquilibre dans ces groupements.
- les notions fondamentales de la physique des semi-conducteurs et les mécanismes de transport des porteurs de charge électrique.
- l'étude détaillée du phénomène de recouvrement dans les jonctions PN.

Les travaux réalisés ainsi que les principales conclusions qui en ont découlé sont résumés ci-dessous :

- le bloc que nous avons mis au point, grâce à l'utilisation d'un microcontrôleur permet de produire des impulsions électriques d'une manière simple, reproductible et efficace.
- Le bloc d'amplification des impulsions générées et le bloc d'interface entre le composant de référence et le composant à tester ont été aussi réalisés.
- Une comparaison de nos résultats avec la caractérisation des échantillons (cellules) utilisés par d'autres méthodes a été effectuée. (Mesure des caractéristiques I (V) et mesure de la réponse spectrale au sein de laboratoire de systèmes de caractérisation de l'UDTS d'Alger).

L'étude du comportement des cellules solaires soumises aux impulsions électriques qui a été menée dans le présent travail aura ainsi permis de proposer une méthode de caractérisation électrique pour le tri rapide des cellules selon leurs temps de recouvrement inverse.

La caractérisation des cellules solaires ne se borne pas à la seule détermination du rendement de conversion car un faisceau d'informations est indispensable aux spécialistes. La connaissance du temps de recouvrement inverse est aussi un paramètre important qui, à notre avis permet de classer les cellules.

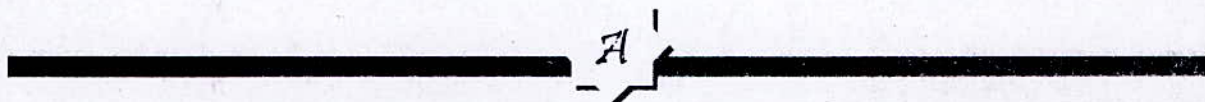
Le phénomène observé et les résultats apportés par cette étude conduisent également à un certain nombre de perspectives de travail :

- L'amélioration du circuit électronique proposé afin de déterminer directement la valeur numérique de temps de recouvrement inverse sans l'utilisation de composants de référence.
- Etablir les tests dans les conditions de fonctionnement standard en laboratoire (STC) sur un nombre suffisant de cellules solaires (ce nombre était insuffisant pour notre travail).
- L'utilisation de l'outil informatique pour la visualisation des courbes et l'analyse des résultats directement sur PC.
- Enfin, la mise en œuvre du modèle électrique des cellules solaires selon leur temps de recouvrement inverse dans un logiciel complet de caractérisation du comportement de la cellule solaire soumise à des impulsions électriques.

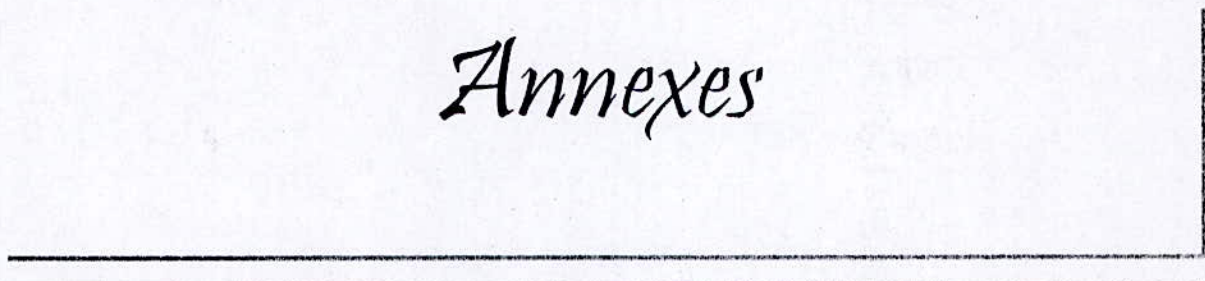
BIBLIOGRAPHIE

- [1] Marc ORGERET, Les piles solaires, le composant et ses applications, MASSON, Paris, 1985.
- [2] Alain RICAUD, Photopiles solaires. De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [3] André VAPAILLE et René CASTAGNE, Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs - Physique et technologie, Dunod, Paris, 1987.
- [4] Jamil KÜNDIG, " Cellules solaires en couches minces de silicium: résistance aux radiations et applications spatiales" Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne, thèse N^o 2874 (2003).
- [5] Pascal PERNET, " Développement de cellule solaires au silicium amorphe de type n-i-p sur substrats souples" Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Thèse n^o 2303, (2000).
- [6] Christian HOF, " Thin film solar cells of amorphous silicon: influence of i-Layer material on cell efficiency", Thèse de doctorat, UFO Atelier für Gestaltung & Verlag, Band 379, ISBN 3-930803-78-X, (1999).
- [7] Georges METZGER, Jean-paul VABRE, Electronique des impulsions – circuit éléments localisés tome 1, MASSON, Paris, 1985.
- [8] G. FONTAINE, Les transistors en régime d'impulsions, DUNOD, Paris, 1970.
- [9] M.R.I RAMADAN, Effect of minority carrier lifetime in solar cells, Solar & Wind Technology, 1989
- [10] B. BENYAHIA, " Contribution à l'étude et la réalisation des cellules solaires, au silicium semi cristallin à émetteur sélectif", Mémoire de magistère, ENP, Alger, 2004.
- [11] F. DRAGHICI, X. JORDA, G. BREZEANU, "A system for measure reverse recovery time and stored charge at ultrafast power diodes", IEEE, pp. 473-476, 2001

- [12] A. YAHATA, Y. YAMAGUCHI, A. NAKAGAWA, "New method of carrier lifetime measurement for accurate power device simulation", IEEE, pp.171-175, 2001.
- [13] M.T. RAHIMO, N.Y.A. SHAMMAS, "Design considerations of the diode effective area with regard to the reverse recovery performance", Microelectronics journal, 30, pp. 499-503, 1999
- [14] R.S. ANAND, B. MAZHARI, J. NARAIN, "A study into the applicability of p^+n^+ (universal contact) to power semiconductor diodes for faster reverse recovery ", Solid-state electronics, 47, pp. 83-91, 2003.
- [15] R.S. CHOKHAWALA, E.I. CARROLL, "A snubber design tool for P-N junction reverse recovery using a more accurate simulation of the reverse recovery waveform", IEEE, vol. 27, pp. 74-84, 1991.
- [16] C.WINTERHALTER, S. PENDHARKAR, K. SHENAI, "A novel circuit for accurate characterization and modelling of the reverse recovery of high-power high-speed rectifiers", IEEE, vol. 13, pp. 924-931, 1998.
- [17] "Rectifier Application Handbook ", 3rd ed. Motorola. Inc. 1993.
- [18] CHRISTOPHE COMBARET, " Comportement thermique des composants de protection contre les effets indirects de la foudre " Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2000).
- [19] PIC16F8X Data Sheet, *Microchip*, site www.microchip.com
- [20] BIGONOFF, La Programmation des PIC, www.abcelectronique.com/bigonoff



Annexes



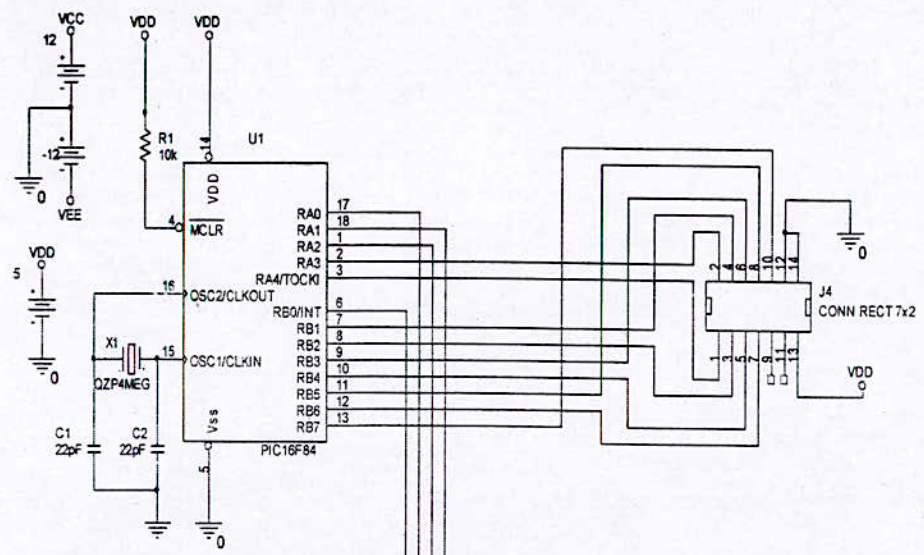


Schéma du bloc de contrôle

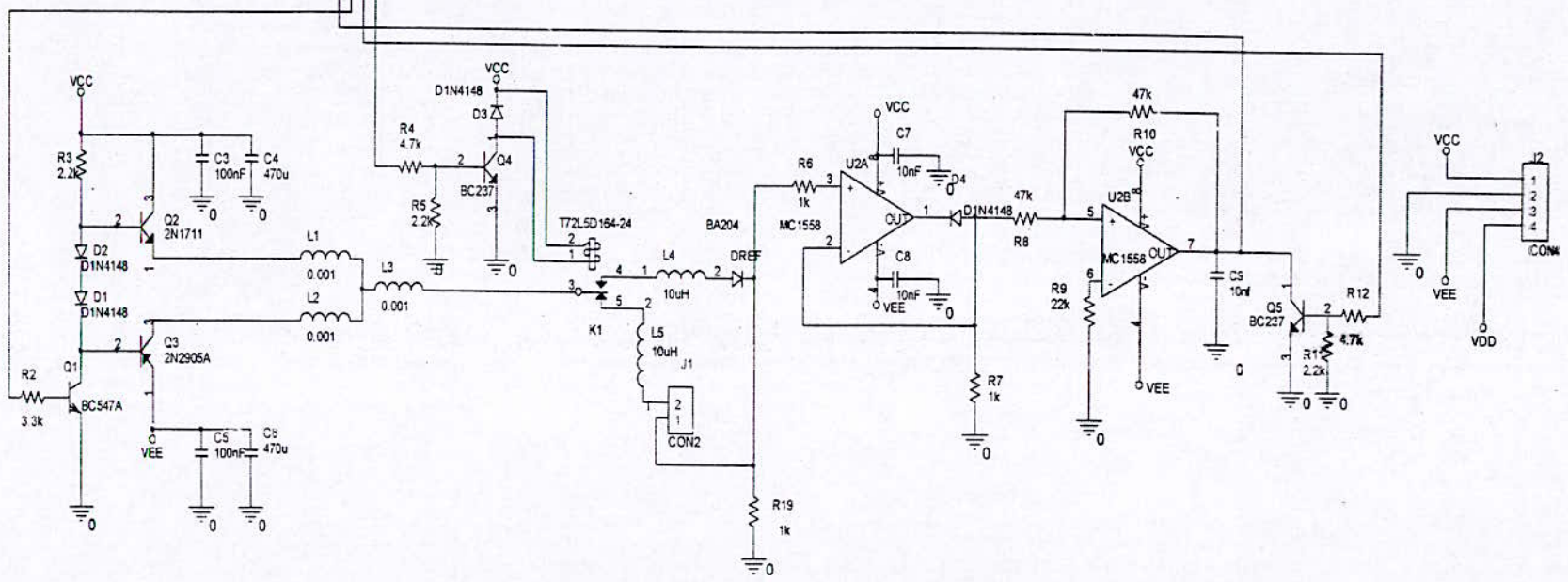
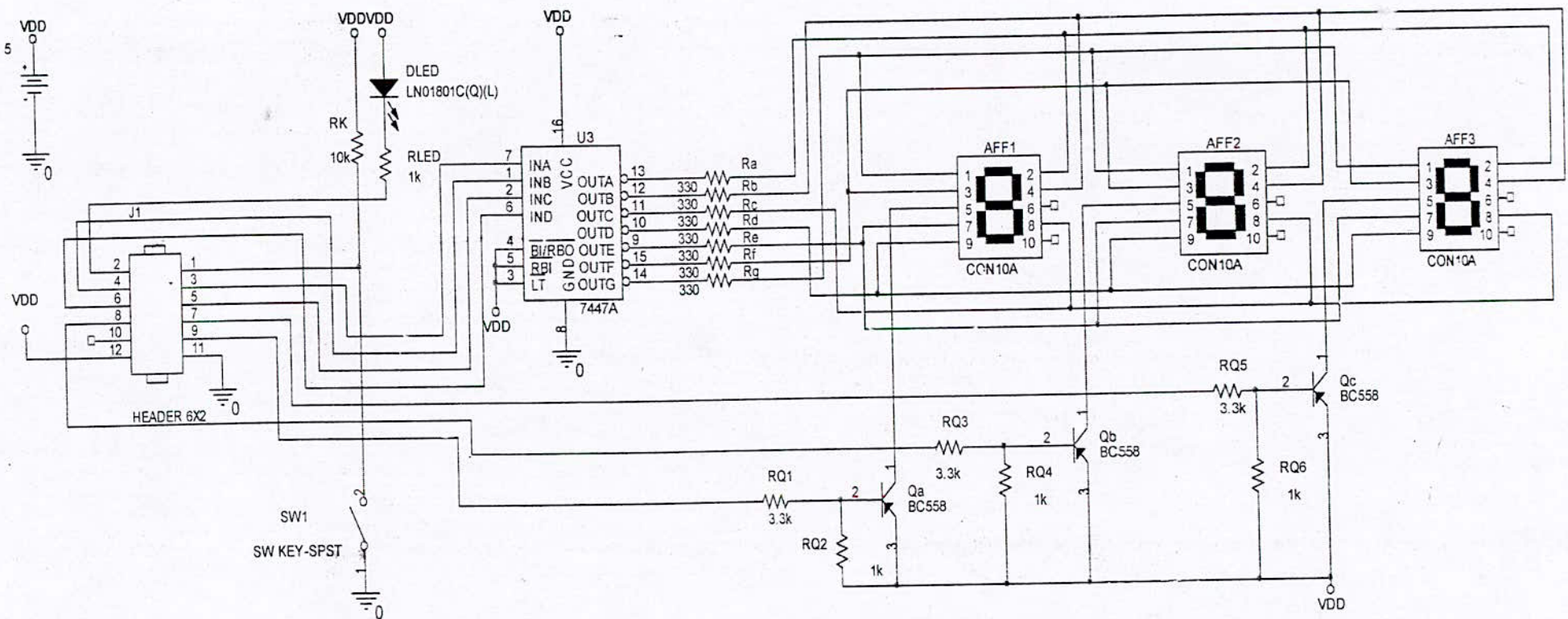
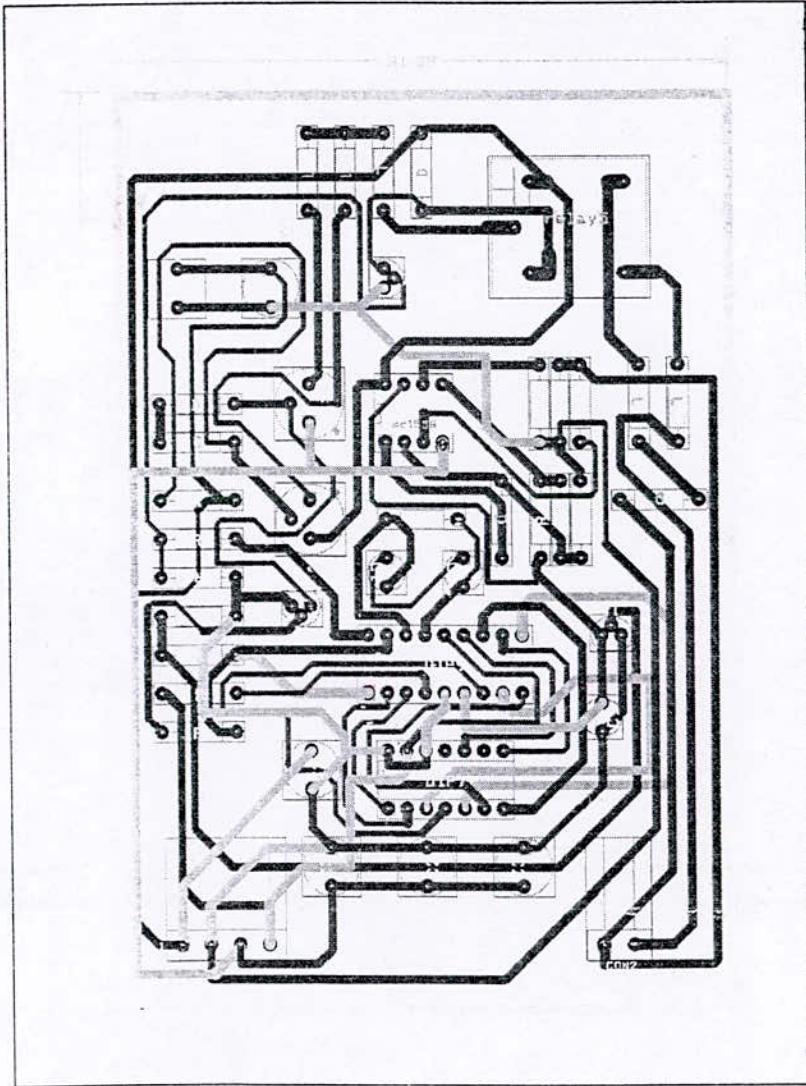
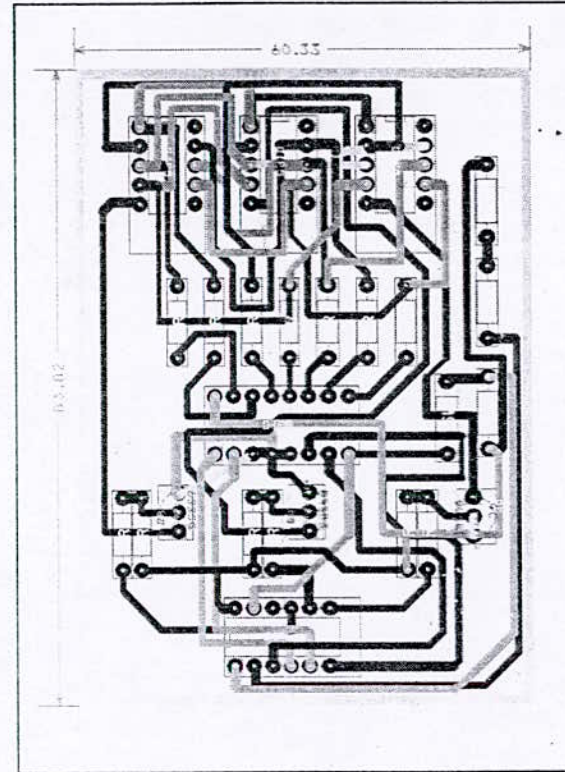


Schéma du bloc d'affichage

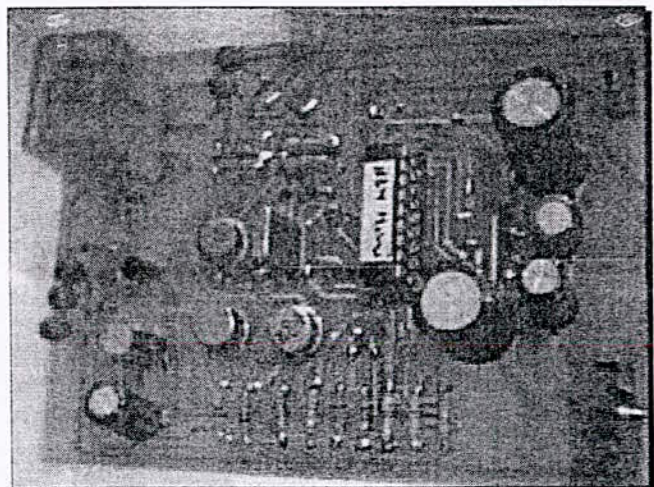




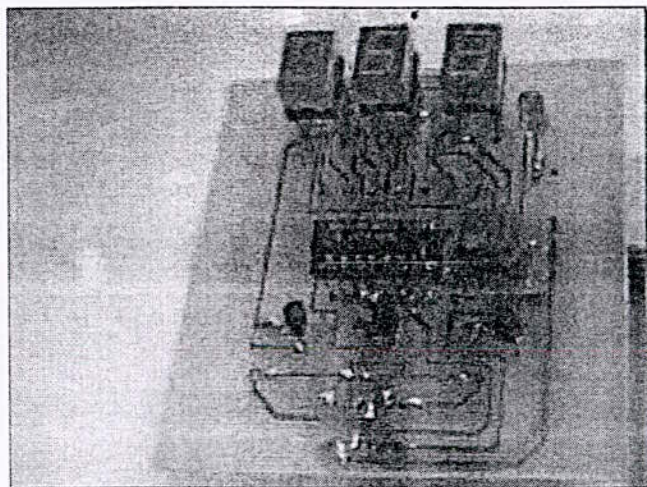
Circuit imprimé de la carte Controle



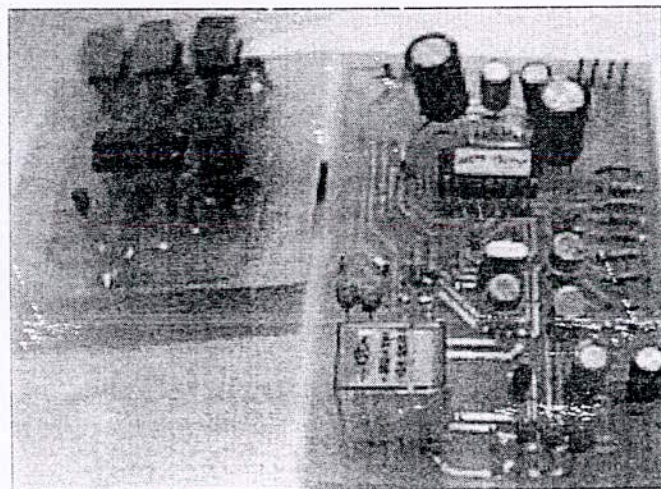
Circuit imprimé de la carte Display



Circuit de contrôle



Circuit d'affichage



Nomenclature

↓ Résistances

- 7 x 330 Ω .
- 6 x 1 k Ω .
- 4 x 3.3 k Ω .
- 4 x 2.2 k Ω .
- 2 x 4.7 k Ω .
- 2 x 47 k Ω .
- 1 x 10 k Ω .

↓ Condensateurs

- 2 x 22 pF.
- 2 x 100 μ F.
- 2 x 470 μ F.
- 1 x 10 nF.

↓ Diodes

- 4 x BAV 18.
- 1 x

↓ Transistors

- 1 x 2N1711.
- 1 x 2N2905A.
- 3 x BC558.
- 3 x BC237.

↓ Circuit intègres

- PIC 16F84.
- Décodeur BCD 7447.
- MC 1558.

↓ Divers

- 3 x afficheur 7 segments.
- Relais T72L5D16424.
- Quartz QZP4MEG.
- Connecteur CON 2.
- Connecteur CON 4.

Programme

```
#include <16F84A.h>
#include delay(clock=4000000)
#include HS,NOWDT
struct port
{
    int no:1;
    int LEDES:4;
    int SELECT:3;
} port_b;
byte CONST LED_MAP[10] =
{0x90,0xb7,0x19,0x15,0x36,0x54,0x50,0xb5,0,0x24};
```

```
//=====
//      VARIABLES GLOBALES
//=====
```

```
long int trr,loop,value1,value2,i;
```

```
//=====
//      DISPLAY DATA
//=====
```

```
void display_data( long int data )
```

```
{
    byte NUM,AFF;
    set_tris_b(0);/* set port_b as outputs */
    port_b=0;
    for(;;)
    {
        for (AFF=1; AFF<4; AFF++)
        {
            port_b.SELECT= AFF;
            for (NUM=0; NUM<10; NUM++)
            {
                port_b.LEDES=LED_MAP[NUM];
                DELAY8MS(1000);/* One second delay */
            }
        }
    }
}
```

```
//=====
//      INTERRUPTION
//=====
```

```
#int_EXT
EXT_isr()
{
    if (i==0)
    {
        value1=loop;
        output_low(PIN_A0);
        output_high(PIN_A2);
```

```

delay_us(20);
output_low(PIN_A2);
output_high(PIN_A1);
goto A;
}
else
{
value2=loop;
A:
loop=0;
}
}

```

```

//=====
//      FONCTION
//=====

```

```

void puls()
{
while(1)
{
loop++;
output_high(PIN_A0);
delay_us(20);
output_low(PIN_A0);
delay_us(20);
}
}

```

```

//=====
//      PROGRAMME PRINCIPAL
//=====

```

```

void main()
{
loop=0;
trr=0;
i=0;
setup_counters(RTCC_INTERNAL,RTCC_DIV_64);
enable_interrupts(INT_EXT);
enable_interrupts(global);
set_tris_a(0);
output_a(0);
display_data( trr );
B: puls();
{
if(i==0)
{
goto B;
}
}
else
{
trr=(value1*200)/value2;
}
display_data( trr );
}
}

```

Les courbes I (V) des cellules solaires étudiées, mesurées sous simulateur solaire au laboratoire d'analyse et de simulation de l'unité de développement de technique de silicium – UDTS- d'Alger.

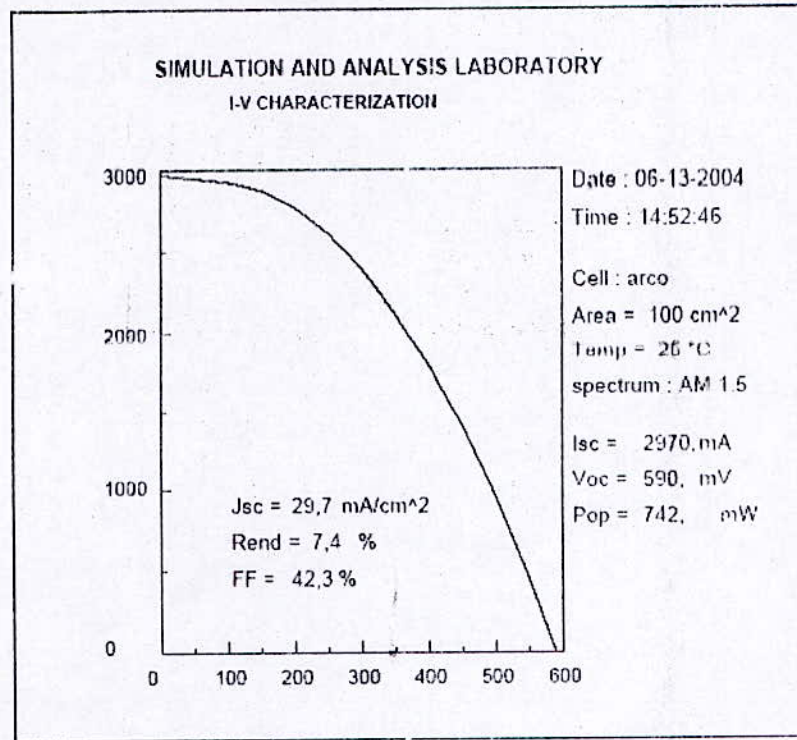


Fig.1 Courbe I (V) de la cellule solaire "arco".

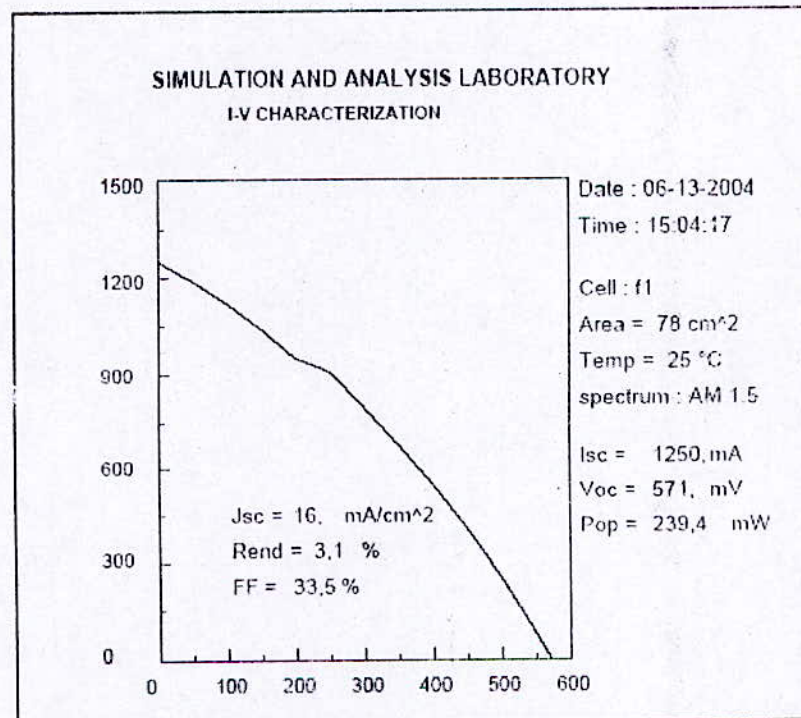


Fig.2 Courbe I (V) de la cellule solaire "f1".

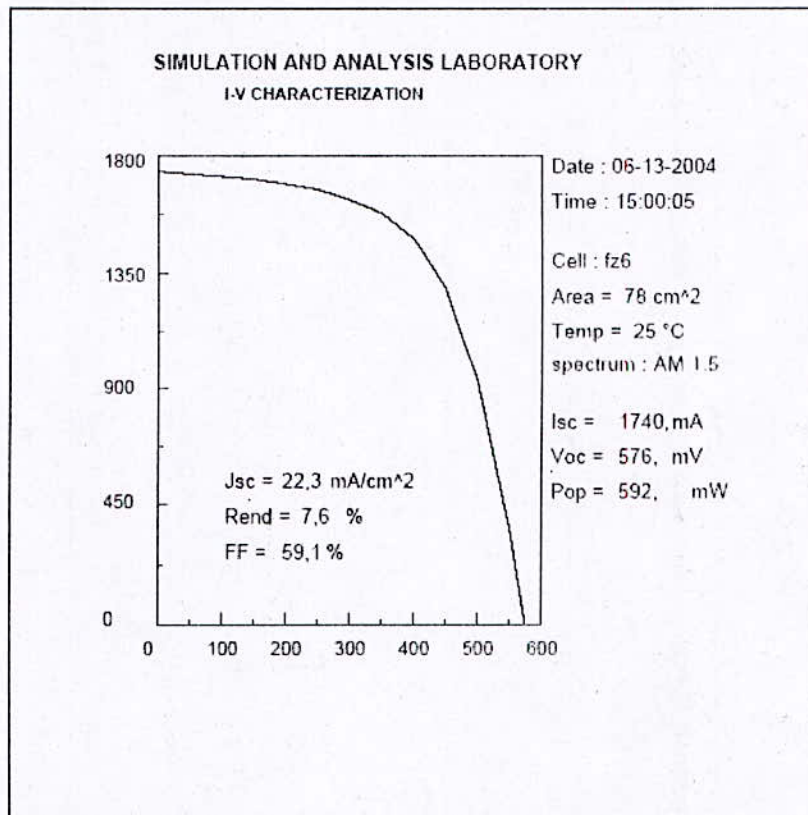


Fig.3 Courbe I (V) de la cellule solaire "fz6".

Les courbes la réponse spectrale des cellules solaires étudiée, mesurée au laboratoire d'analyse et simulation de l'unité de développement de technique de silicium – UDTS- d'Alger.

Mesures Réponse Spectrale en Amp/Watt

λ (nm)	ECH1	ECH2	ECH3
350	5,65E-02	3,68E-02	2,64E-02
400	0,1133727	8,54E-02	9,14E-02
450	0,1851143	0,1752783	0,2367053
500	0,2301751	0,2364071	3267053
550	0,2790677	0,294919	0,3915493
600	0,3293927	0,3481758	0,4382254
650	0,3784045	0,3964983	0,4761224
700	0,4226522	0,4399981	0,509484
750	0,4616982	0,4767695	0,5371521
800	0,4932337	0,5099326	0,5646896
850	0,5117891	0,5275763	0,5778434
900	0,503627	0,5254436	0,5744822
950	0,4877683	0,4920263	0,5400397
1000	0,3902303	0,3879162	0,4316453
1050	0,2332648	0,2280069	0,2575664
1100	0,1219109	0,1165943	0,1715898

Mesure de rendement quantique en % nm

λ (nm)	ECH1	ECH2	ECH3
350	20.05447	13.05151	9.36387
400	35.18098	26.50205	28.36703
450	51.06071	48.34761	65.29122
500	57.14098	58.68806	80.09332
550	62.98051	66.55785	88.36557
600	68.14311	72.02888	90.65788
650	72.2607	75.71593	90.92107
700	74.9453	78.0211	90.34499
750	76.41105	78.90536	88.89867
800	76.52829	79.11924	87.61513
850	74.73626	77.04166	84.38213
900	69.45856	72.46742	79.23067
950	63.73078	64.28712	70.56046
1000	48.43733	48.1501	53.57798
1050	27.57523	26.95368	30.44802
1100	13.75653	13.1566	19.36235

