

PA00978

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

led
T₁+T₂

PROJET DE FIN D'ETUDES

الجامعة الوطنية للعلوم الهندسية
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

CARACTERISATION ELECTRIQUE DES CONVERTISSEURS PHOTOVOLTAIQUES

(VOLUME I)

Proposé par **Monsieur A. ADANE**

Docteur Ingénieur, Chef du Département Electricité

Etudié par Messieurs

HOCINE Amar et IGHILAH RIZ Mohammed

JANVIER 1978

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**CARACTERISATION ELECTRIQUE DES
CONVERTISSEURS PHOTOVOLTAIQUES**

(VOLUME I)

Proposé par **Monsieur A. ADANE**
Docteur Ingénieur, Chef du Département Electricité

Etudié par Messieurs
HOCINE Amar et IGHILHRIZ Mohammed

JANVIER 1978

A mes parents,

A mes frères, mes sœurs

A mes amis

Amar BOUINE

A la mémoire de mon frère

A ma mère et mon père

A mon frère, mes sœurs

A mes amis

ICHILLANRIZ Mohammed

REMERCIEMENTS

- Nous remercions vivement Monsieur A. ADAMS, Chef du Département Electricité de nous avoir constamment suivis et orientés tout au long de notre travail.

- Que Monsieur DESCLANES, Professeur à l'E.N.P.A., trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

- Nous tenons à remercier tout le personnel du département de Génie Mécanique.

- Que Madame MAROUCHE soit vivement remerciée pour le soin apporté à la présentation de ce fascicule.

S O M M A I R E

	Pages
CHAPITRE I	Introduction 1
CHAPITRE II :	Principe de la mesure 3
2.1.	Introduction 4
2.2.	Les méthodes de mesures 7
2.2.1.	Méthode directe 7
2.2.2.	Méthode d'opposition 9
2.2.3.	Choix de la méthode 11
CHAPITRE III :	Realisation du Banc de mesure de la caractéristique I-V d'une photopile par la méthode directe
3.1.	Introduction 13
3.2.	Choix du Voltmètre..... 13
3.3.	Choix du milliampere-mètre..... 14
3.3.1.	Milliampere-mètre à thermocouple 14
3.3.2.	Milliampere-mètre MX 309 I 15
3.3.3.	Voltmètre shunté par une résistance 20
3.4.	Mesure de l'éclairement 20
3.4.1.	Choix d'un capteur étalon..... 21
3.4.2.	Conception d'une source lumineuse 26
3.4.3.	Réalisation de la source lumineuse 26

CHAPITRE IV :	Manipulation	32
4.1.	Description de la manipulation . .	33
4.2.	Description de la photodiode PHG1.	34
4.3.	Description des convertisseurs photovoltaïques au silicium	34
4.3.1.	Principe de la fabrication	34
4.3.2.	La photodiode BPX42	34
4.3.3.	La photopile BPX46	36
4.3.4.	Le panneau solaire japonais S224	36
4.3.5.	Le panneau solaire BPX47A	36
4.3.6.	La photopile EPY 70	37
4.4.	Principe de la fabrication et description de la cellule au CdS Cu_2S	37
4.5.	Réalisation des portes-échantillons	40
4.6.	Résultats de mesure (Volume II)	40
4.7.	Calcul des principaux paramètres...	42
4.7.1.	Valeurs de V_0 et I_{cc} pour les différentes cellules	42
4.7.2.	Puissance maximale	42
4.7.3.	Facteur de forme	43
4.7.4.	Rendement	43
4.7.5.	Etude de la protection des cellules solaires contre les agents mécaniques et atmosphériques.....	44

CHAPITRE V	Interprétation des résultats	46
5.1.	Etude générale de l'allure des courbes	47
5.2.	Influence de l'éclairement	49
5.3.	Influence de la température	52
5.4.	Comparaison des Facteurs de Forme	53
5.5.	Comparaison des Rendements	54
5.6.	Influence des verres	55
5.7.	Conclusion	57
CHAPITRE VI	CONCLUSION	61
ANNEXE I	Photopile	
ANNEXE II	Eclairement	
ANNEXE III	Soleil	
ANNEXE IV	Corps noir	

I N T R O D U C T I O N

Ce projet a été entièrement consacré à des expériences de caractérisation de convertisseurs photovoltaïques.

En effet, l'utilisation d'une cellule solaire pour des besoins d'électricité, nous impose de déterminer rapidement et correctement ses paramètres électriques.

Ainsi le relevé de la courbe courant-tension à éclairement donné nous permet d'en déduire, le courant de court-circuit, la tension à vide et le point pour lequel la puissance débitée est optimale.

Ce type de mesure a été fait sur :

- la photodiode au germanium PHG1
- la photodiode au silicium BPX42
- des photopiles au silicium BFX46 et BPY70
- des photopiles au $CdS-Cu_2S$ fabriquées par le CSTN
- un panneau solaire BPX47A.

Toutes ces manipulations ont été effectuées sur la terrasse du Bâtiment Electricité (ENP) ou dans une salle voisine, permettant ainsi, la naissance d'une structure de laboratoire d'opto-électronique au sein du département d'Electronique et d'Electrotechnique.

La mesure du flux solaire en Watts/m² a nécessité l'emploi d'une thermopile qui a permis par la suite l'étalonnage de photodiodes.

Dans le cas du travail en salle, il a fallu réaliser à l'aide d'une lampe de photographie, une source lumineuse jouant, ainsi, le rôle du soleil artificiel.

CHAPITRE II

PRINCIPE DE LA MESURE

2.1 - INTRODUCTION

Une photopile est un générateur qui, sous l'action du rayonnement solaire, fournit de l'électricité par effet photovoltaïque.

Les batteries solaires les plus couramment employées dans les applications terrestres sont des cellules à jonction P-N dont le semi-conducteur est du silicium monocristallin.

Ainsi, la cellule BPX46 de la société R.T.C. se compose d'une plaquette de semi-conducteur de type N (pastille de 40 mm de diamètre et 300 microns d'épaisseur) recouverte d'une très mince couche de semi-conducteur P qui est obtenue par diffusion et dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques microns (fig. 1).

Pour décrire sommairement le fonctionnement d'une telle photopile, on peut représenter la jonction P-N par le modèle de bandes d'énergie (fig.2) ; l'analyse plus détaillée de l'effet photovoltaïque dans une cellule solaire étant faite dans l'annexe 1.

Le diagramme de la figure 2 montre que, dans la zone de la jonction, il s'établit une barrière de potentiel due à la diffusion des porteurs majoritaires d'un semi-conducteur à l'autre.

Si on éclaire la jonction P-N, des paires électrons-trous sont produites par photo-électricité et sont, ensuite, triées par la barrière de potentiel.

En effet, un photon qui pénètre dans un cristal semi-conducteur, avec une énergie $h\nu$ supérieure au gap SE , peut être absorbé par un électron de la bande de valence. Dans ce cas, ce dernier effectue une transition vers la bande de conduction et laisse un trou dans la bande de valence.

Or, la barrière de potentiel favorise le passage des minoritaires d'une région à l'autre et, au contraire, limite la diffusion des majoritaires en les repoussant vers les extrémités. Par suite la barrière va briser les paires électrons-trous, augmentant ainsi le nombre de trous dans le cristal P et le nombre d'électrons dans le cristal N.

En conclusion, ceci va se traduire par une force électromotrice fournissant un courant électrique dans le cas où la cellule est branchée à un récepteur.

Il apparaît, donc, que les propriétés électriques les plus importantes de la photopile sont de nature électrique. En effet, pour adapter ce mode de production d'électricité à des besoins domestiques ou professionnels, il est nécessaire de connaître les courbes courant-tension des cellules solaires en fonction de l'éclairement (fig.3). Trois points suffisent à déterminer ces caractéristiques : le courant de court-circuit, la tension à vide, et le point pour lequel la cellule débite la puissance maximale.

A partir de ces courbes, on peut évaluer le rendement de conversion et fixer les conditions optimales de fonctionnement d'une installation de photopiles.

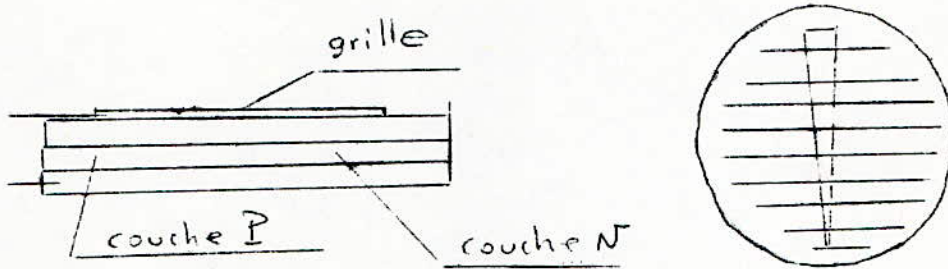


Fig1: Structure d'une cellule solaire BPX46.

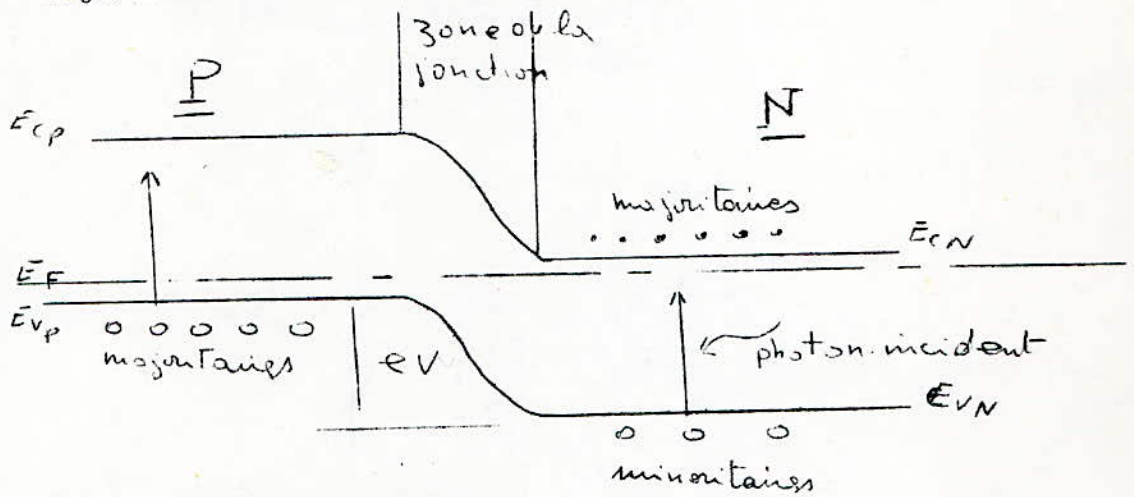


FIG2: Modèle de bande d'énergie.

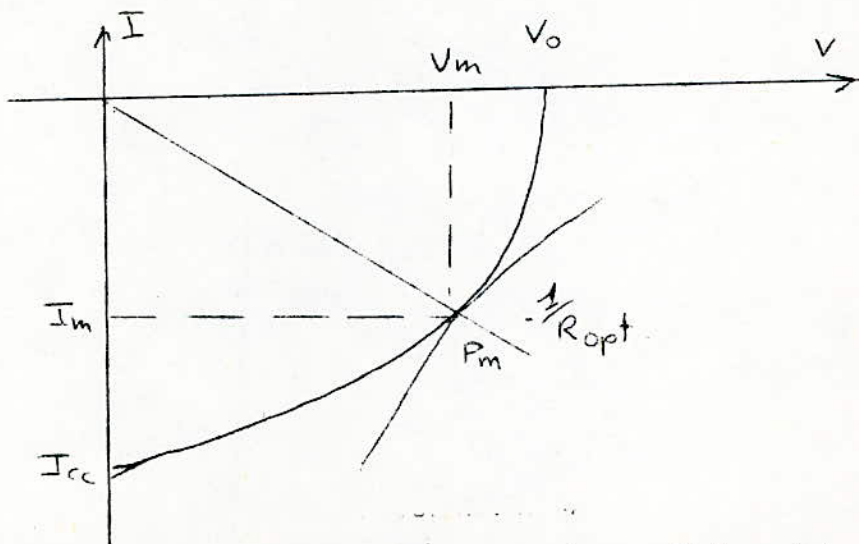


Fig3: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.

La caractéristique I-V à éclairement donné peut-être obtenue, soit par mesure directe à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre (fig.4) ; soit par une méthode d'opposition. La tension à vide étant de l'ordre de 0,8 volts et le courant de court-circuit étant inférieur à 1 ampère, il faut utiliser un millivoltmètre à grande impédance d'entrée et un milliampèremètre à faible résistance interne (inférieur à 0,1 Ω). En outre, la jauge qui sert à mesurer le flux lumineux doit être graduée en W/m².

2.2. - Les méthodes de mesures

2.2.1 - Méthode directe :

Le principe de la méthode est donnée par le schéma de la figure 4.

La photopile qui est soumise à un éclairement E constant, débite dans une résistance de charge R. En agissant sur cette résistance, on peut faire varier le courant I débité par la photopile et la tension V à ses bornes. D'où, le tracé point par point de la caractéristique I-V à éclairement donné.

Comme nous l'avions déjà fait remarquer, cette méthode nous impose un milliampèremètre à faible résistance interne r_A .

En effet, lorsque la résistance de charge R est nulle, la photopile débite dans le milliampèremètre et on mesure un courant $I = \frac{V}{r_A}$ dont la valeur est très proche du courant de court-circuit I_{cc} de la photopile.

Notons que le choix de la résistance r_A peut-être fixée par l'inégalité suivante : $r_A \ll \frac{V_0}{I_{cc}}$ (2,1)

A titre d'exemple, si une photopile débite un courant de court-circuit de 700 μ A (la tension à vide étant de 0,8 V), le milliamperemètre devra avoir une résistance interne

$$r_A \ll 1 \frac{V_0}{I_{cc}}$$

Si nous prenons $r_A = 0,1 \Omega$, la chute de tension résiduelle aux bornes du milliamperemètre sera $V = 0,08$ V et l'incertitude relative de la mesure sera :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta I}{I} = 10 \% \quad (2,2)$$

Si nous voulons une meilleure précision, il faudra naturellement prendre un appareil dont la résistance interne r_A soit plus faible.

Mais, au voisinage du courant de court-circuit, la caractéristique I-V est presque horizontale et le courant I_{cc} peut-être obtenu par interpolation.

Par contre, le diagramme $I = f(V)$ s'incurve très rapidement au voisinage de la tension à vide V_0 . Le courant débité I décroît très rapidement vers des valeurs très faibles, et il faut employer un millivoltmètre à grande résistance d'entrée r_V ; afin d'éliminer l'incertitude due à la consommation de l'appareil de mesure. Pour cela, on fixe cette résistance à l'aide de l'inégalité :

$$r_V \gg \frac{V_0}{I_{cc}} \quad (2,3)$$

Dans le cas où il est nécessaire de tracer la courbe I-V en appliquant une tension inverse à la photopile, on utilise le schéma de la figure 5.

2.2.2. -

2.2.2. - Méthode d'opposition :

On utilise 1 générateur branché en opposition avec la cellule (fig. 5).

Ce générateur débite un courant I_2 qui s'oppose au courant photoélectrique I_1 .

A l'aide de la résistance variable R ; on règle le débit du courant dans le circuit, et la tension V aux bornes de la cellule.

Si $I_1 = I_2$ le courant I total dans le circuit est nul. Le voltmètre indique donc la force-électromotrice à vide de la photopile.

On peut faire varier R afin d'avoir $V = 0$.

En pratique on obtient $V = 5$ microvolt qui est due à la dérive du millivoltmètre.

Dans ce cas la cellule est rigoureusement en court-circuit.

On a donc $I = I_{cc}$.

Pour obtenir la caractéristique inverse il faut faire varier I_2 tel que $I_2 > I_{cc}$.

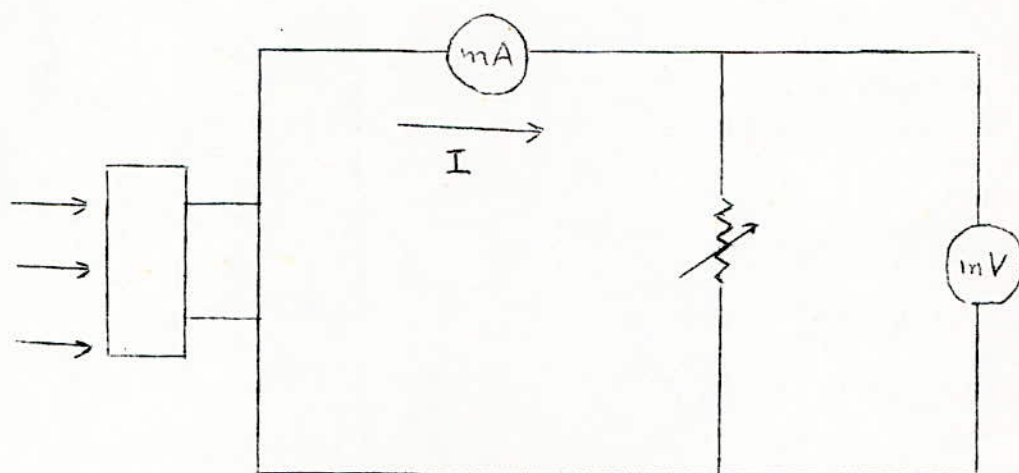


FIG4: Mesure de la caractéristique courant-tension; par la méthode directe.

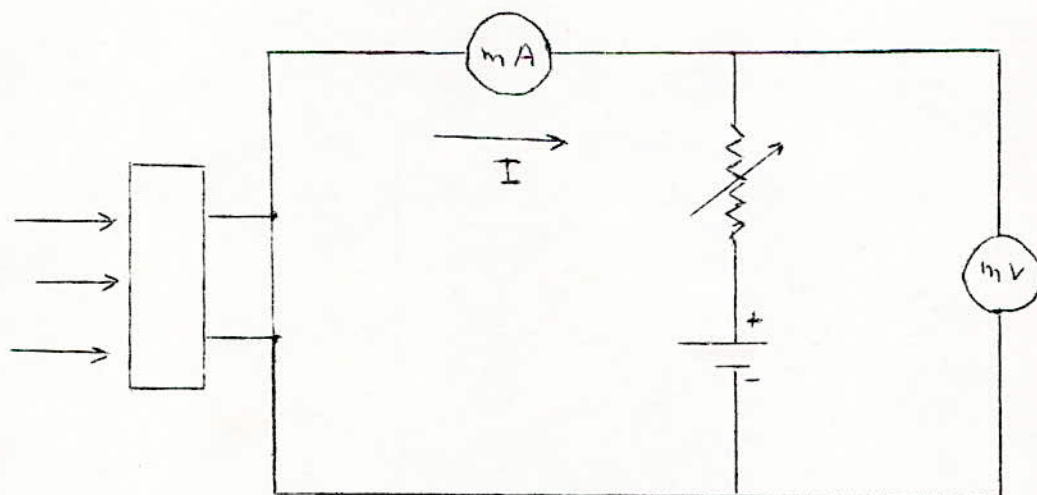


Fig5: Mesure de la caractéristique courant-tension par la méthode d'opposition .

Cela nous permet de déterminer la tension de claquage de la cellule.

2.2.3 - Choix de la méthode :

Contrairement à la méthode directe, il n'y a pas d'interpolation pour déterminer le courant de court-circuit.

Nous avons établi la méthode directe pour 2 raisons :

- c'est une méthode simple et rapide

En effet, il est délicat d'annuler le courant dans le circuit par la méthode d'opposition.

- du point de vue erreur, elle est satisfaisante pour le but de nos manipulations.

CHAPITRE III

REALISATION DU BANC DE MESURE DE
LA CARACTERISTIQUE I-V D'UNE
PHOTOPILE PAR LA METHODE DIRECTE

3.1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons justifié au chapitre précédent, le schéma utilisé est celui de la figure 4.

3.2. Choix du Voltmètre:

Parmi tous les convertisseurs photovoltaïques que nous devons étudier, la photodiode au germanium PBG1 est celle dont la tension à vide est la plus faible. Cette dernière vaut 0,1 volt.

Si nous voulons mesurer le courant de court-circuit de cette photodiode à 1% près, il subsisterait une tension résiduelle aux bornes de l'amperemètre de $\frac{0,1V}{100} = 1mV$

D'autre part, le panneau solaire BPX47A qui est une association de 34 cellules au silicium, délivre une tension à vide de l'ordre de 28V.

Par suite, le voltmètre que nous devons utiliser devra couvrir une gamme de tensions allant de 1 mV à 30 V

Pour évaluer la résistance d'entrée r_v de ce voltmètre, on peut se fixer $r_v = \frac{V_0}{I_{cc}}$ et choisir la mesure la plus défavorable qui est celle d'une photodiode PBG1 débitant un courant de court-circuit de 0,5 mA. Il vient :

$$r_v = 100 \times \frac{0,1}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 20 \text{ K}\Omega$$

Ce voltmètre qui a été choisi est un appareil Philips 6020. Il est caractérisé par une grande indépendance d'entrée

qui est de 1 à 100 M Ω , une gamme de mesure allant de 0,1mV pleine échelle à 1 000 V pleine échelle et une dérive inférieure à 5 μ V.

3.3. - choix du milliampèremètre :

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, le courant de court-circuit le plus faible est celui de la photodiode PEG1, soit 0,5 mA et le plus élevé est celui du panneau solaire BPX47A, soit 700 mA.

A partir de ces valeurs, on peut fixer la gamme de mesure des courants, qui doit aller à quelques dizaines de mA à 1 Ampère.

Pour couvrir la gamme de courant ainsi définie, nous avons utilisé trois types de milliampèremètre.

- un milliampèremètre à thermocouple pour les forts courants :

$$100 \text{ mA} < I < 1 \text{ A}$$

- un milliampèremètre classique METRIX, MX3094 A pour les moyens courants :

$$1 \text{ mA} < I < 100 \text{ mA}$$

- un voltmètre shunté par une résistance étalon pour les courants faibles :

$$0,1 \text{ mA} < I < 1 \text{ mA}$$

3.3.1. Milliampèremètre à thermocouple :

Le milliampèremètre à thermocouple que nous avons réalisé se compose d'un galvanomètre à cadre mobile G 323 associé à deux thermocouples TE 75 dont les filaments ont été branchés en parallèle et les soudures (cuivre-constantan) en série.

Ce qui donne une résistance interne de l'ordre de 1 Ω et une mesure de courant jusqu'à 800 mA (Fg. 6).

La caractéristique d'un thermocouple est donnée par la figure 7.

Cette courbe est de la forme $e=ki^2$ pour une température donnée. En effet, dans le thermocouple, le courant à mesurer passe dans le filament et chauffe une soudure. La force électromotrice obtenue à la sortie de cette jonction est proportionnelle à la puissance thermique ainsi produite (43 μ V/ $^{\circ}$ C), donc au carré du courant qui traverse le filament.

La figure 8 donne les courbes d'étalonnage du milliampèremètre à la température ambiante $T = 22^{\circ}$ C. Cette courbe est donc de la forme $\theta = ki^2$ où θ est la déviation du spot du galvanomètre. Il faut bien remarquer que si on s'écarte trop de la température ambiante, cet étalonnage n'est plus valable.

3.3.2. milliampèremètre MX309A :

L'appareil utilisé est un MX309A dont la gamme de mesure s'étend : 1 μ A - 10 A.

Néanmoins, nous avons utilisé la gamme 1mA - 100 mA pour laquelle l'appareil présente une résistance interne variant de 10 à 0,1 Ω .

La gamme inférieure à 1 mA n'a pas été utilisée car l'appareil présente une résistance trop élevée.

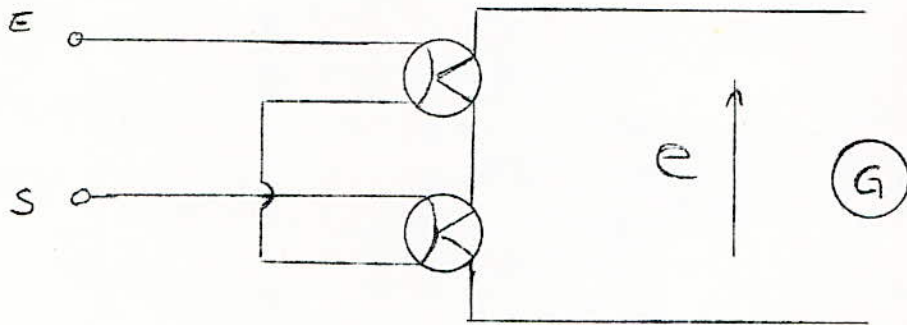


Fig6: Milliampere metre à thermocouples.

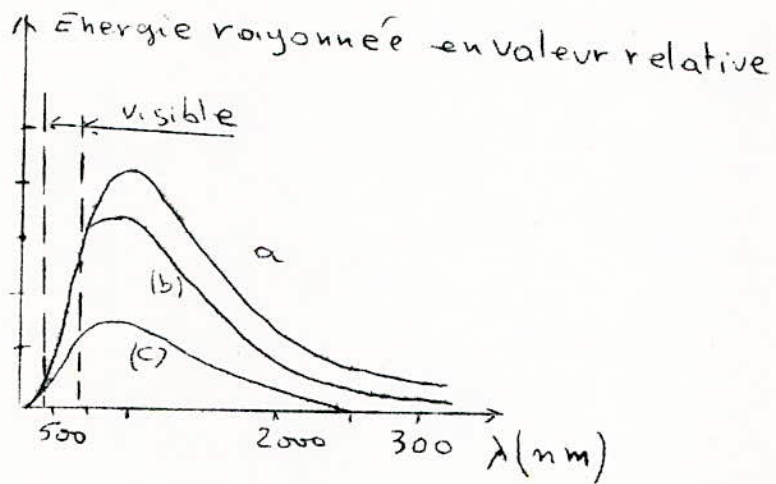


Fig14: Courbes de répartition énergétique du tungstène (b) et du corps noir (a) à 3000°K.

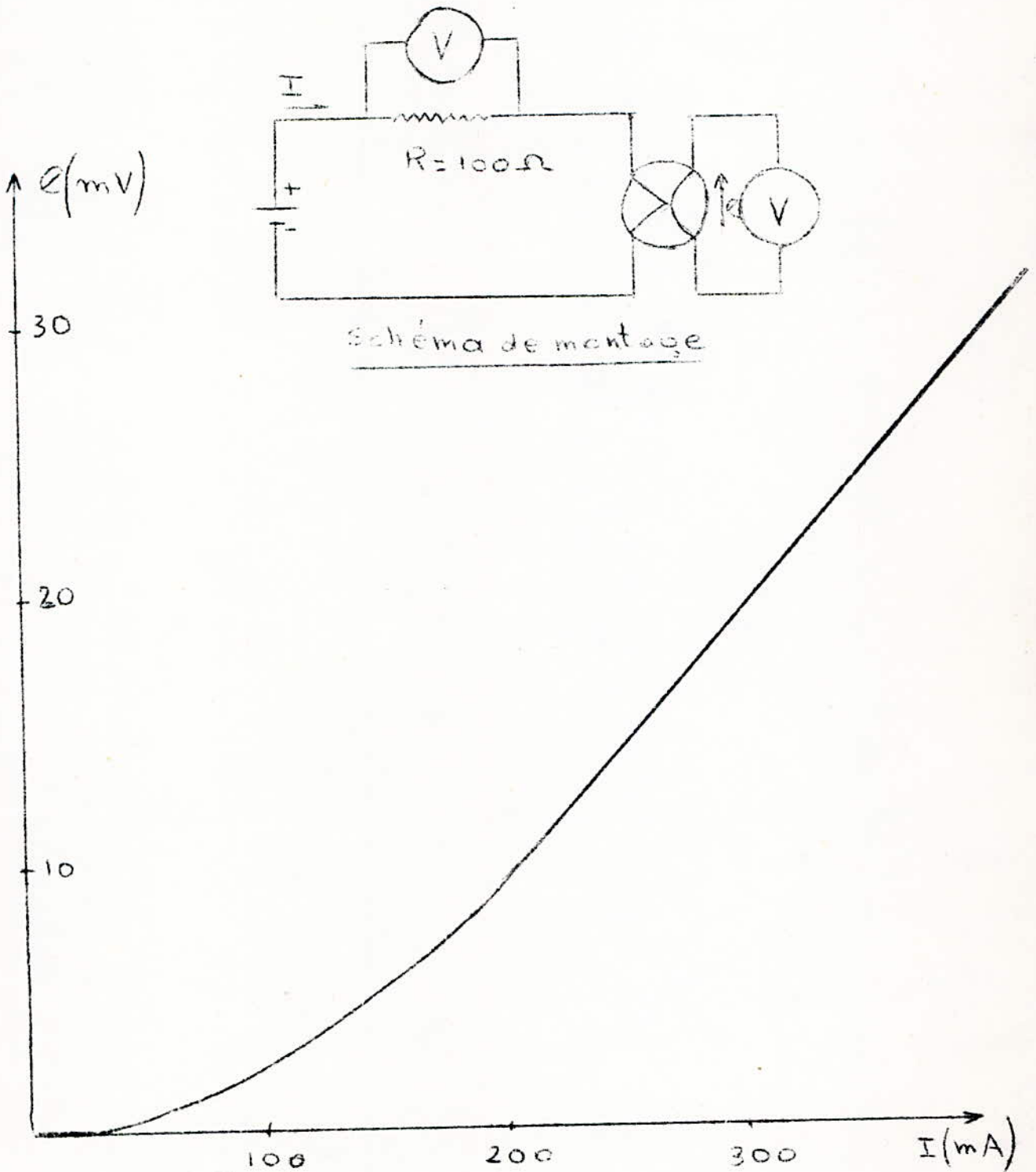


Fig7: Caractéristique du thermocouple TH75.

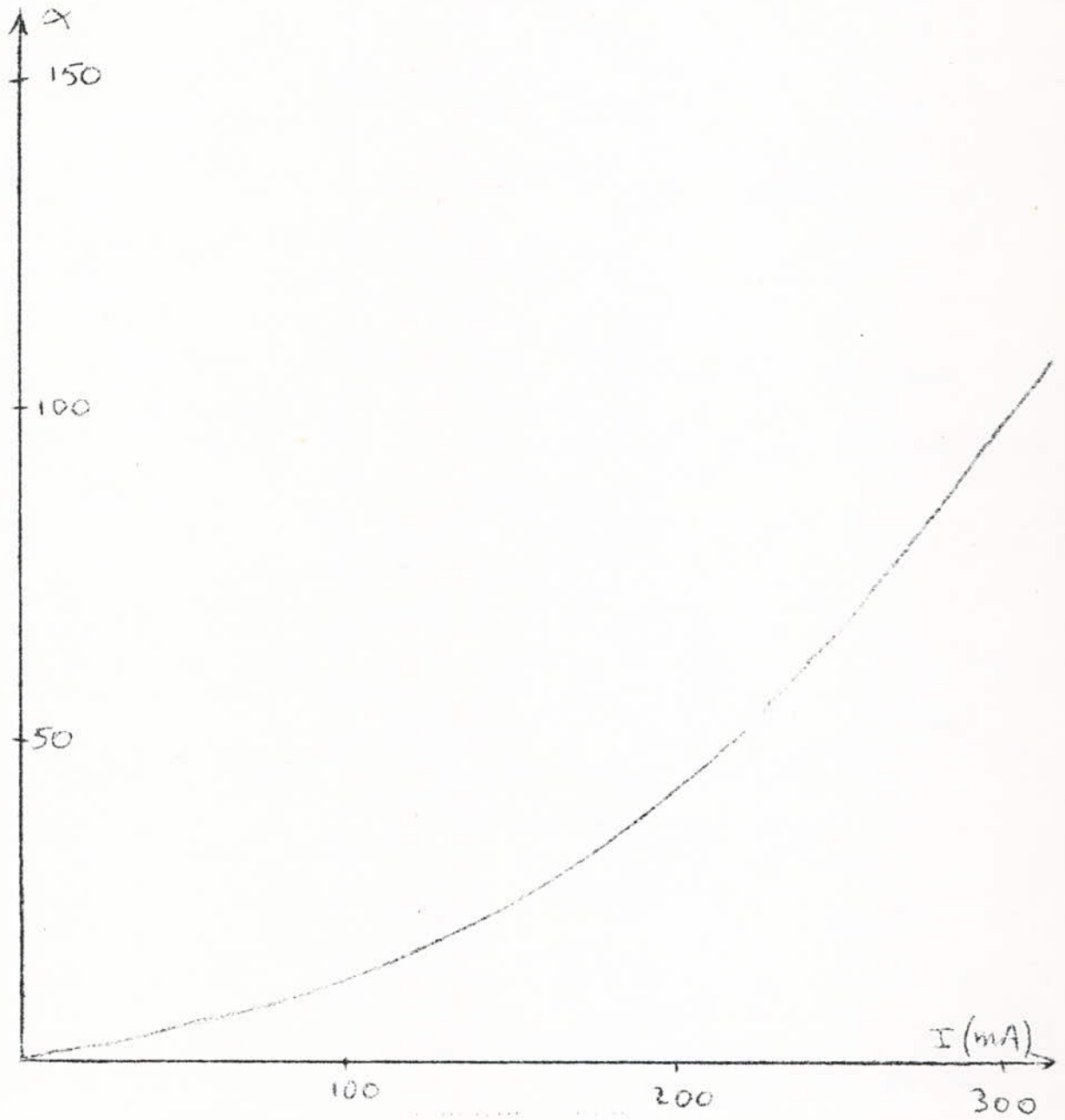


Fig 8a: Etalonnage du milliamperemètre à thermocouple.
Calibre 15.

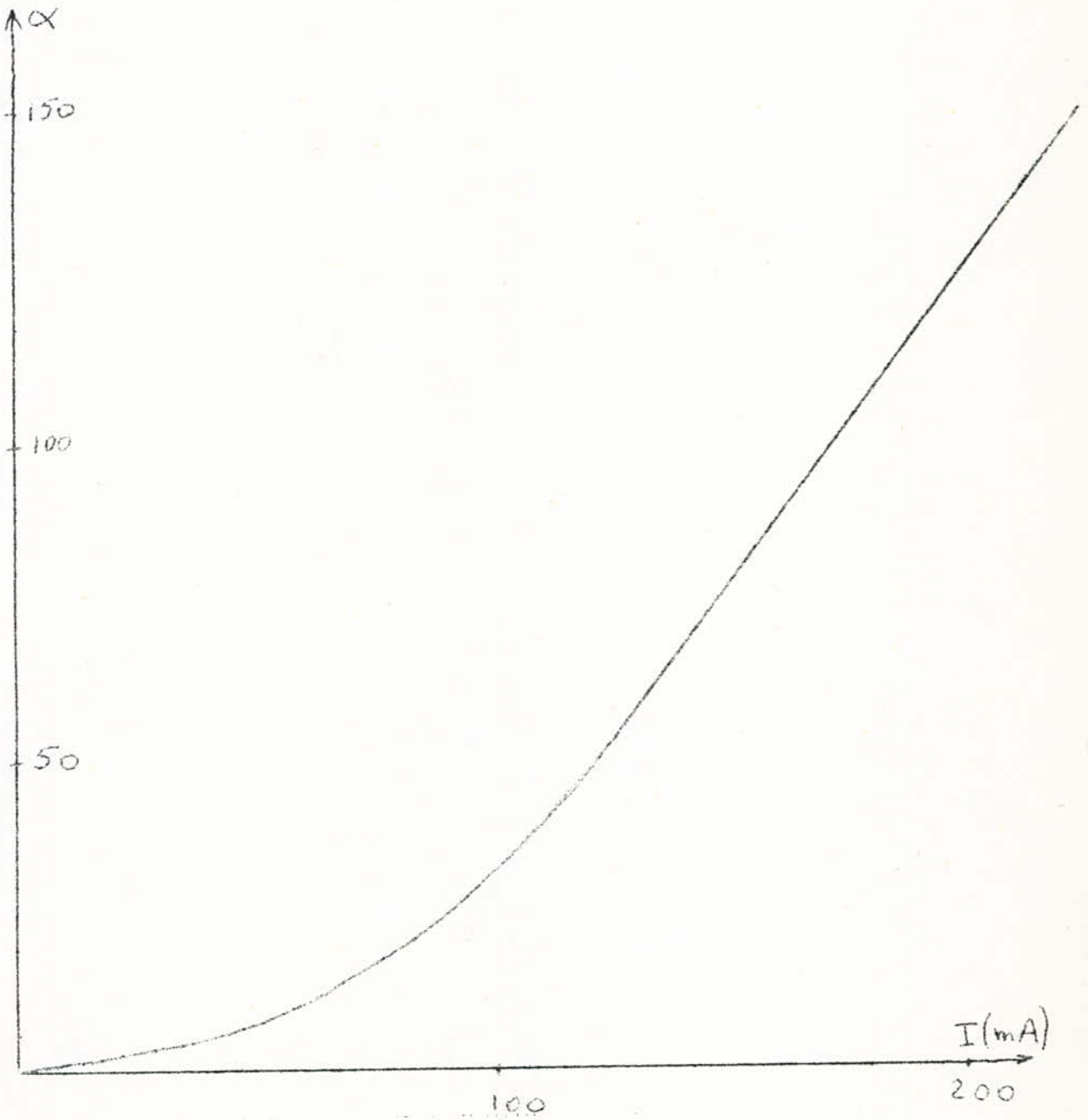


Fig0b: Etalonnage du milliampèremètre à thermocouple.
Calibre 5.

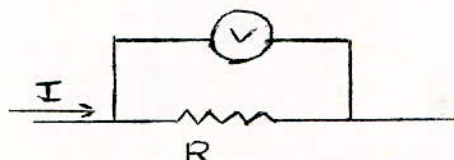
Par contre, pour la gamme supérieure à 100 mA, les lectures ne pouvaient se faire que dans le premier tiers de l'échelle ou les mesures sont mauvaises.

A titre d'exemple, si on considère le calibre 300 A (cas le plus favorable) on trouve une résistance interne de :

$$r = \frac{10 \text{ mV}}{300 \text{ A}} \quad r = 33 \Omega$$

3.3.3. - Voltmètre shunté par une résistance :

Pour les faibles courants, nous avons préféré utiliser un millivoltmètre électronique Philips 6020 en parallèle avec une résistance étalon de 0,1 Ω .



La plus petite tension que l'on peut mesurer à l'aide du millivoltmètre est de l'ordre de 10 mV. La gamme de mesure pour les courants est donc :

$$0,1 \text{ mA} < I < 1 \text{ mA}$$

3.4. Mesure de l'éclairement

Pour évaluer correctement le rendement d'un convertisseur photovoltaïque, nous devons chiffrer l'éclairement reçu en grandeur énergétique (Annexe II), c'est-à-dire en Watts/m².

Mais la plupart des jauges qui mesurent l'éclairement sont données en unités photométriques, c'est-à-dire en lux ou en lumen/m² (1 lux = 1 lumen/m²).

En outre, les relations existant entre les unités photométriques et énergétiques sont empiriques et dépendent de la constitution de la source lumineuse employée.

Ainsi pour réaliser une jauge mesurant l'éclairement en W/m², il faut utiliser un capteur constitué d'un corps noir (voir Annexe III), ce dernier ayant la propriété d'absorber ou d'émettre totalement un rayonnement.

3.4.1. choix d'un capteur étalon :

Celui-ci est une thermopile. Elle comprend un corps noir qui reçoit le rayonnement à mesurer. Ce corps noir se compose d'une substance qui est du platine noirci au noir de fumée. Celle-ci réalise une excellente adaptation optique en milieu ambiant tout en ayant une capacité calorifique aussi réduite que possible. Dans ce capteur, les photons reçus sont totalement absorbés et leur énergie transformée en chaleur. L'énergie est convertie en électricité par un réseau de thermocouples.

La thermopile que nous avons utilisée est une thermopile de ZERNIKE. Elle comporte huit couples à base d'alliages de bismuth donnant une force électromotrice de 120 μ V par degré. Les couples sont entièrement couverts par un récepteur en cuivre, épais de 2 microns et de 2 mm de diamètre. La pile thermoélectrique de ZERNIKE est enfermée hermétiquement dans un tube de cuivre de 1 centimètre de diamètre fermé par une lame de quartz. L'équilibre de température est

atteint en trois secondes. Le tube est fixé dans une monture compensatrice éliminant toute influence thermique extérieures.

La résistance électrique de la thermopile est de 20 Ω et la surface irradiée est de 0,03 cm².

Cette thermopile n'étant pas étalonnée, nous l'avons comparée à un panneau solaire BFX47A, dont le constructeur a donné les caractéristiques en Watts/m² (fig.9).

Pour cela nous les avons soumis simultanément au rayonnement solaire et aux mêmes conditions expérimentales d'où la courbe d'étalonnage de la thermopile (fig 10).

Sur celle-ci on voit que l'énergie du rayonnement reçue est proportionnelle à la force électromotrice délivrée par la thermopile (Annexe II).

Cette courbe d'étalonnage est valable dans le domaine 4 000 à 2 000 Å, dans lequel la courbe de réponse spectrale de la thermopile est pratiquement constante.

Notons que cette thermopile mesure la totalité du rayonnement.

Pour éviter de trop manipuler sur la thermopile qui est fragile, nous avons préféré réaliser un étalon secondaire avec une photodiode BFX42 (fig. 11).

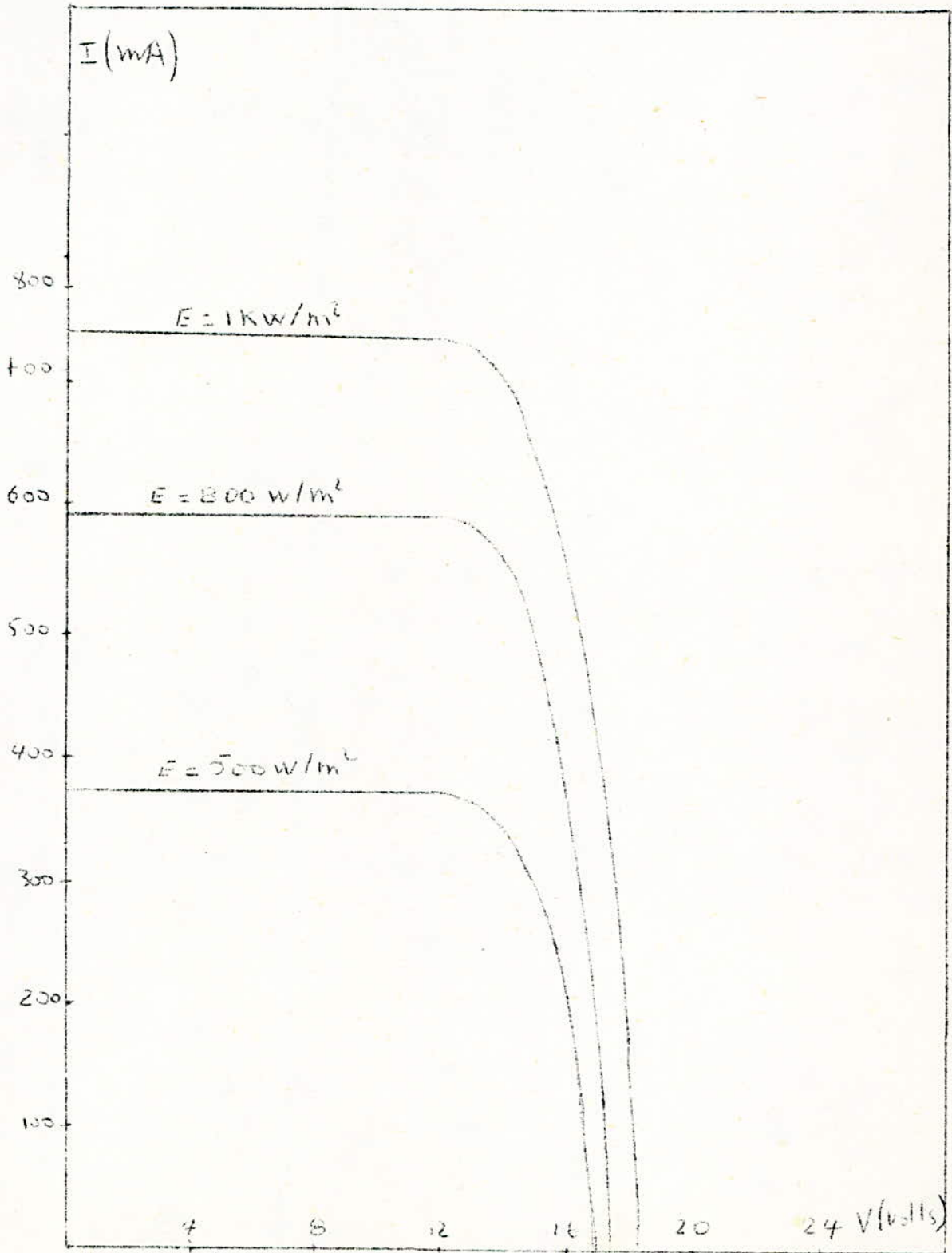
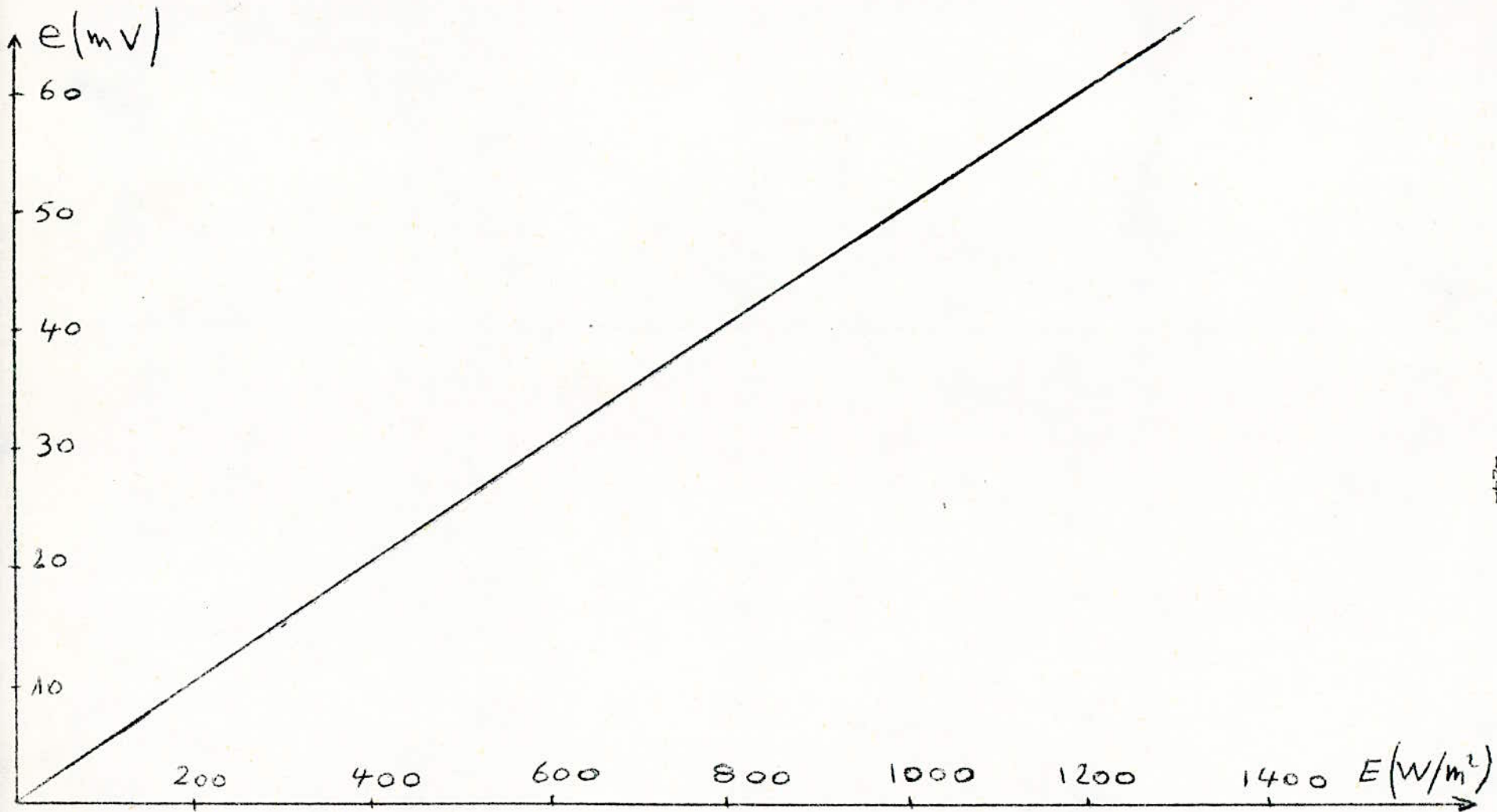


Fig9: Caractéristique courant-tension du panneau solaire BPX47A.



courbe d'étalonnage de la thermopile en W/m^2

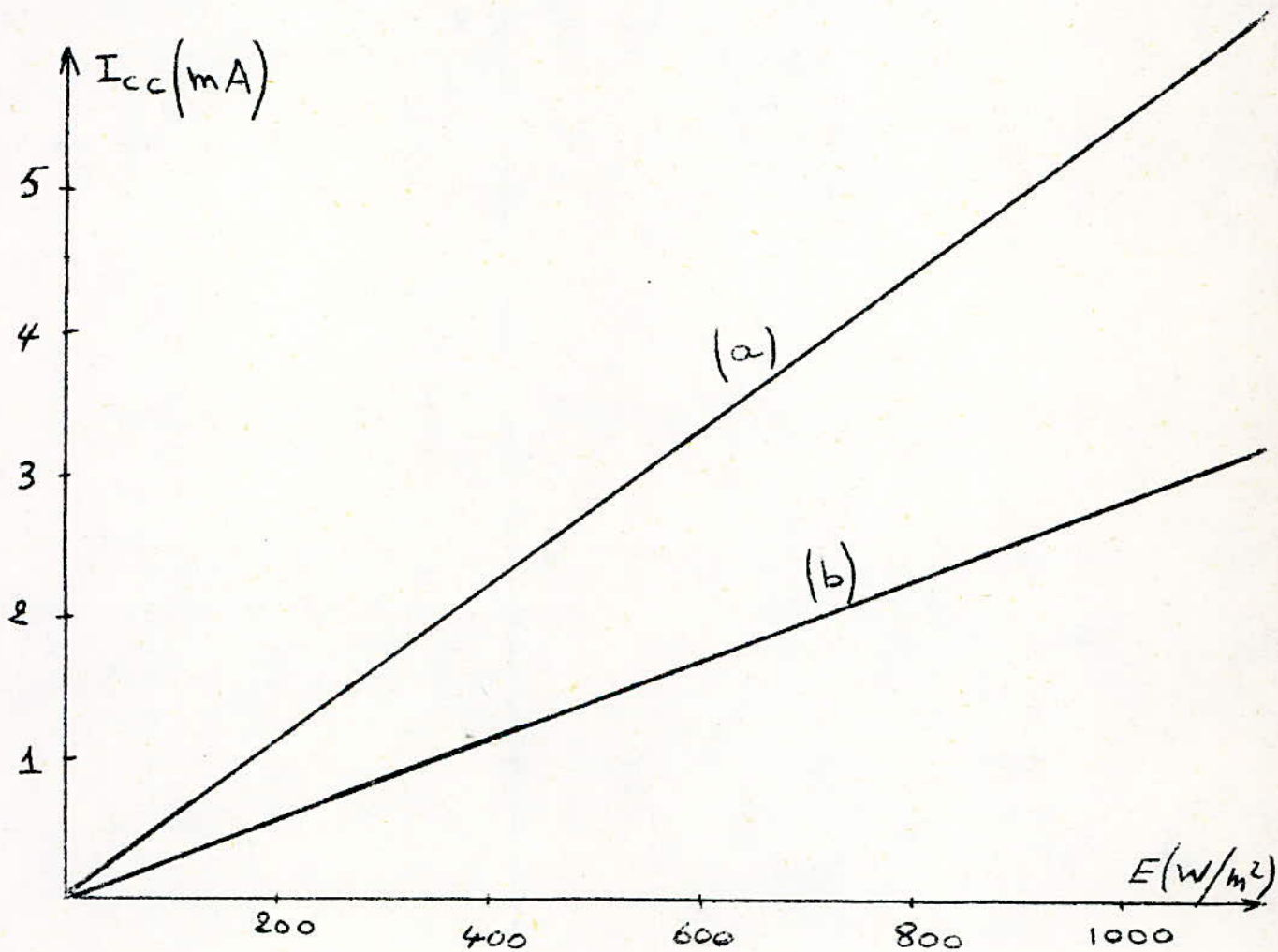


Fig11: Etalonnage secondaire à l'aide de la photodiode DPX42:

(a): sous éclairement du soleil

(b): sous éclairement de la lampe.

3.4.2. - Conception d'une source lumineuse :

En laboratoire, il serait plus agréable de travailler avec une source fournissant un rayonnement dont la répartition spectrale serait identique à celle de la lumière et dont l'intensité lumineuse serait facilement réglable.

Pour réaliser une telle source, il faudrait choisir une lampe ou un groupe de lampes et les étalonner à l'aide d'un spectrophotomètre.

La lampe lumineuse simulant le rayonnement solaire est constituée par une lampe à filament de tungstène et un ensemble de filtres colorés (fig. 12). Entre la lampe, portée à une température de couleur de 2 850 °K, et la cellule à mesurer sont interposés une cuve d'eau et deux filtres à faces planes et parallèles. La cuve à eau absorbe les radiations de longueur d'onde supérieur à 1,2 μ et évite un échauffement de la cellule solaire. L'épaisseur de chaque filtre a été calculée pour que la répartition spectrale de la lumière solaire reçue au niveau du sol dans un domaine spectral compris entre 0,4 et 1,15 microns. On peut faire varier l'éclairement de la source en modifiant la distance Δ qui sépare le récepteur du plan du filament de la lampe.

3.4.3. - Réalisation de la source lumineuse :

Ne disposant pas de tous les éléments cités au chapitre (3.4.2.), nous nous sommes contentés d'une lampe à tungstène de 800 W dont la température de couleur est de 3 400°K.

Les caractéristiques de cette lampe (Fig.13) sont :

- tension : 220-230 V
- durée de vie moyenne : 15 heures
- flux lumineux : 22 000 lumens

Le filament de la lampe étant au tungstène, il serait intéressant de connaître avec exactitude le maximum d'émission énergétique de cette lampe.

La figure 14 donne les courbes de répartition énergétique du tungstène et du corps noir pour une température de 3400 °K.

On peut dans notre cas déterminer avec précision le maximum de spectre énergétique de la source lumineuse en appliquant la loi du déplacement des maximums (Annexe II) :

$$\lambda_m T = 0,289$$

Pour $T = 3\,400\text{ °K}$, on trouve $\lambda_m = 0,85\mu$

A $T = 3\,400\text{ °K}$ on obtient un maximum d'énergie $\lambda_m = 0,85\mu$ qui est situé dans le proche infra-rouge.

Pour le soleil, la température du corps noir est $T = 5\,900\text{ °K}$ ce qui donne un maximum se trouvant à $\lambda_m = 0,489\mu$

En conclusion, les répartitions spectrales du soleil et de la lampe de tungstène ont une même allure générale qui est celle du corps noir aux températures respectives 6 000 °K et 3 400 °K. Mais, les maximas de ces répartitions spectrales ne coïncident pas.

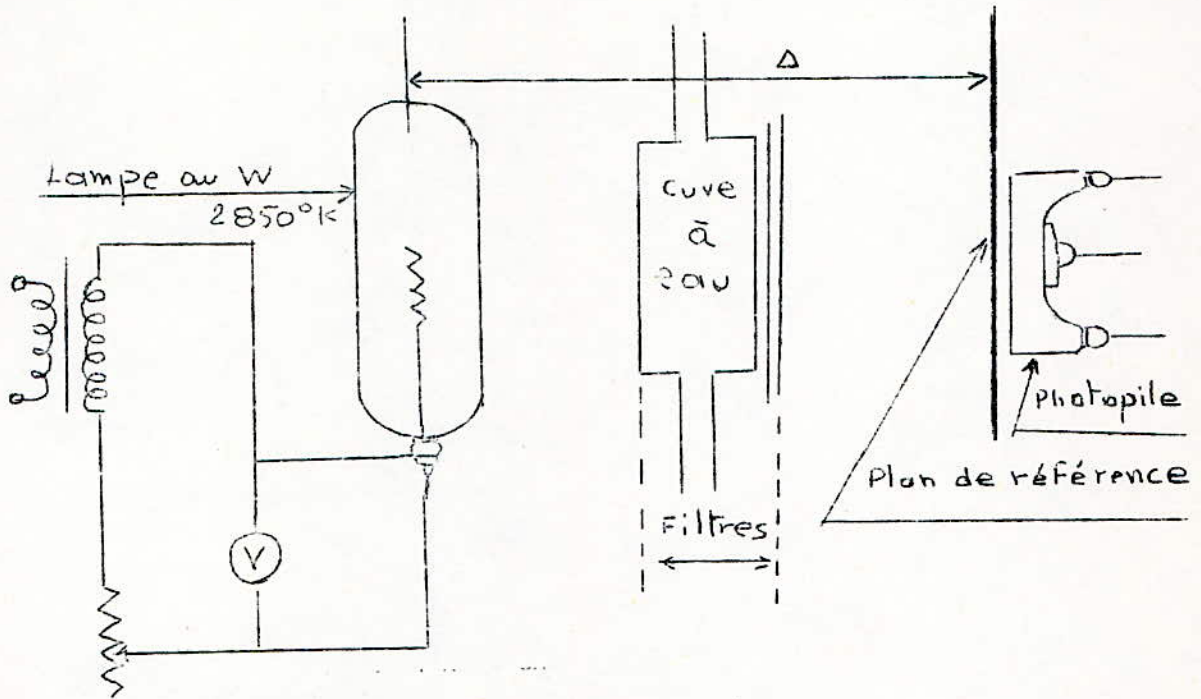


Fig12: Conception d'une source lumineuse.

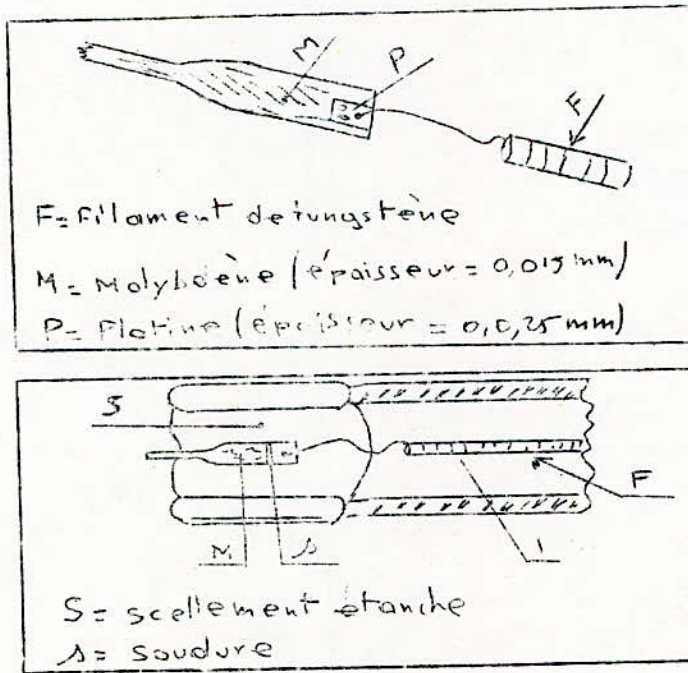


Fig13: Schéma de la lampe.

Or, la courbe de réponse spectrale d'un convertisseur photovoltaïque est sélective. Par suite, les mesures faites sur ces derniers en plein soleil seront différentes de celles effectuées sous l'éclairement de la lampe, même si l'énergie du rayonnement reçu est identique.

En particulier, il faudra tenir compte de cette remarque lors de l'étalonnage de la photodiode BPX42 (Fig. 11).

La figure 15 montre la disposition de cette source. La lampe et un réflecteur d'automobile sont fixés sur la tige horizontale (1) qui coulisse librement sur un tube perpendiculaire gradué en centimètre.

Le refroidissement du système (réflecteur-lampe) est assuré par un ventilateur placé à proximité, alimenté sous 220 V.

L'étalonnage de cette source est représentée par la courbe $W = f(d)$, c'est-à-dire l'éclairement en fonction de la distance - fig. 16 a et 16 b.

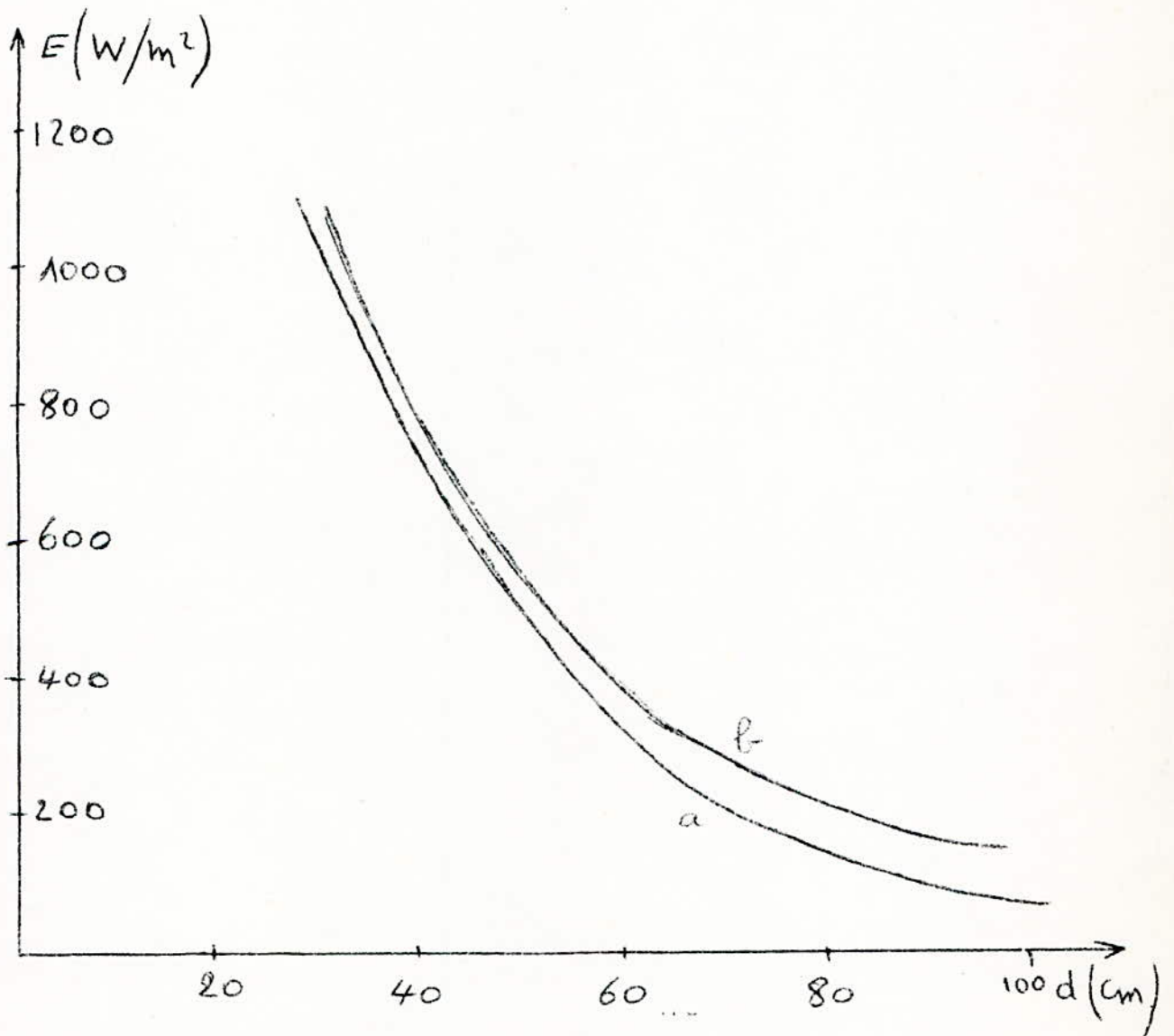


Fig16: Etalonnage de la source lumineuse $W_f(d)$.

(a): sans réflecteur

(b): avec réflecteur.

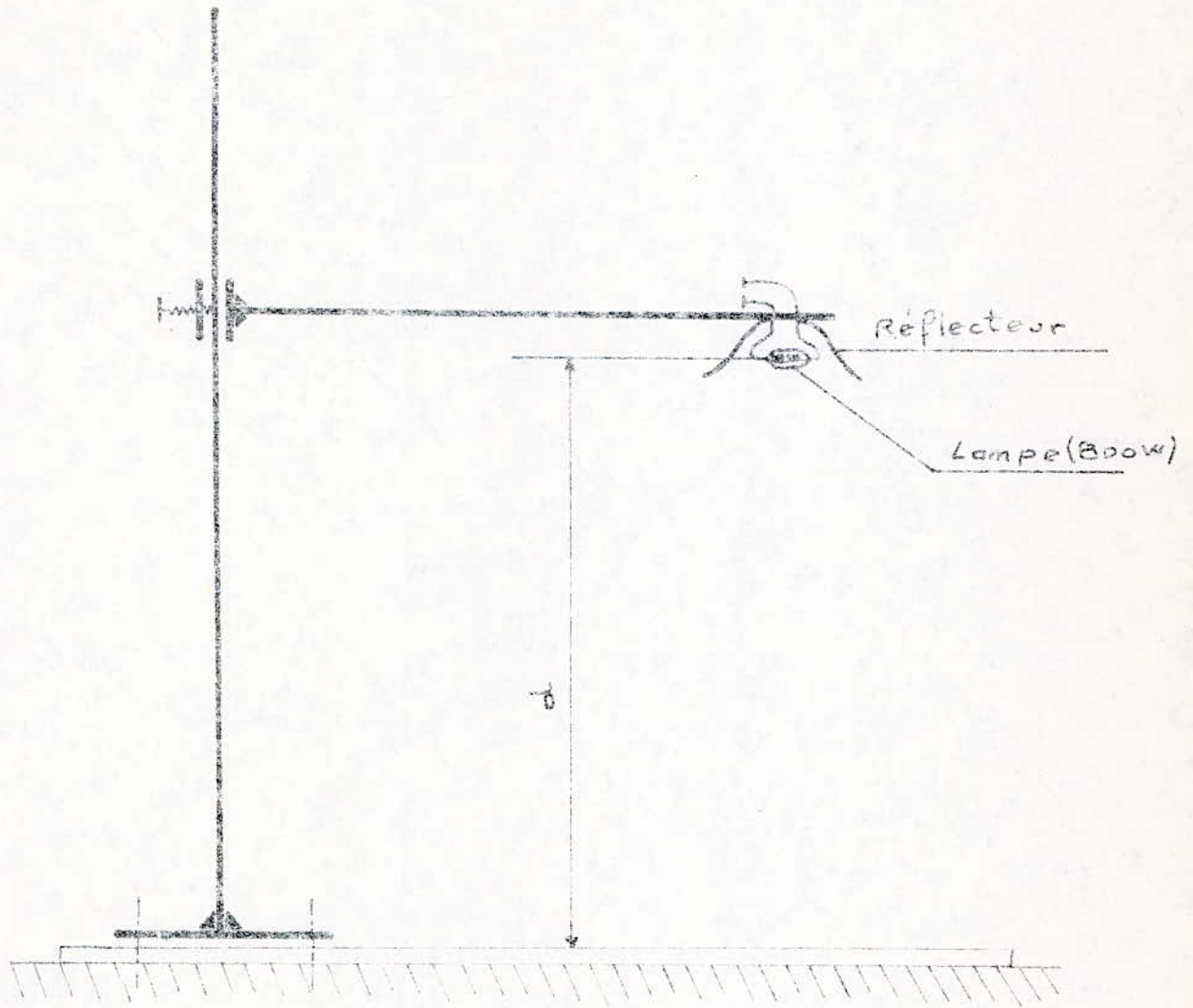


Fig 15 : Support de la source lumineuse.

CHAPITRE IV

MANIPULATION

4.1. DESCRIPTION DE LA MANIPULATION

Comme nous l'avons déjà dit dans les chapitres précédents, les mesures de caractéristiques I-V de convertisseurs photovoltaïques ont été faites par la méthode directe. Le schéma de principe de cette méthode est celui de la figure 4 et l'appareillage utilisé est décrit au chapitre 3.

Les mesures ont été faites sur les convertisseurs photovoltaïques suivants :

- une photodiode au germanium BP61
- une photodiode au silicium BPX42
- deux photopiles au silicium BPX46 et BPV70
- un panneau solaire au silicium S 224 de marque japonnaise
- un panneau solaire au silicium BPX47A commercialisé par la société R.T.C.
- quatre cellules au CdS/Cu_2S fabriquées par le service "Cristaux et couches minces" au Centre des Sciences et des Techniques Nucléaires.

Les manipulations ont été faites en lumière solaire sur la terrasse du département électricité, et au laboratoire sous l'éclairnement de la lampe au tungstène.

L'utilisation d'une lampe en laboratoire nous permet de continuer à travailler lorsque le climat est défavorable.

4.2. Description de la photodiode au germanium PHG1

La photodiode se compose d'une jonction P-N au germanium obtenue par alliage. Celle-ci est enfermée dans un tube de verre, dont une extrémité est munie d'une petite lentille destinée à concentrer la lumière incidente sur la jonction (fig. 17).

4.3. Description des convertisseurs photovoltaïques au silicium

4.3.1. - Principe de la fabrication :

Les rondelles de silicium monocristallin ont généralement de 20 à 40 mm de diamètre et 250 μ m d'épaisseur. On les emploie ainsi, sans les découper en pastilles. Ces rondelles sont dopées au bore (p), lors du tirage, et ont une résistivité assez faible : de l'ordre de 0,1 Ω .cm. Elles sont diffusées dans une atmosphère de phosphore, pour créer une couche du type n de 2 μ m d'épaisseur (fig. 72). La diffusion étant faite sur toute la plaquette, il faut décaper une partie de la face inférieure, pour laisser apparaître le cristal p, sur lequel est pris un contact ohmique qui forme la connexion positive au centre de la cellule. La connexion négative est prise sur des contacts en forme de grilles parallèles afin de diminuer la résistance série R_s qui affecte beaucoup le rendement.

4.3.2. - La photodiode BPX42

La photodiode BPX42 comporte une jonction P-N au silicium dont la surface photosensible, carrée fait 25 mm². Contrairement à la PHG1, cette surface photosensible n'est pas protégée.

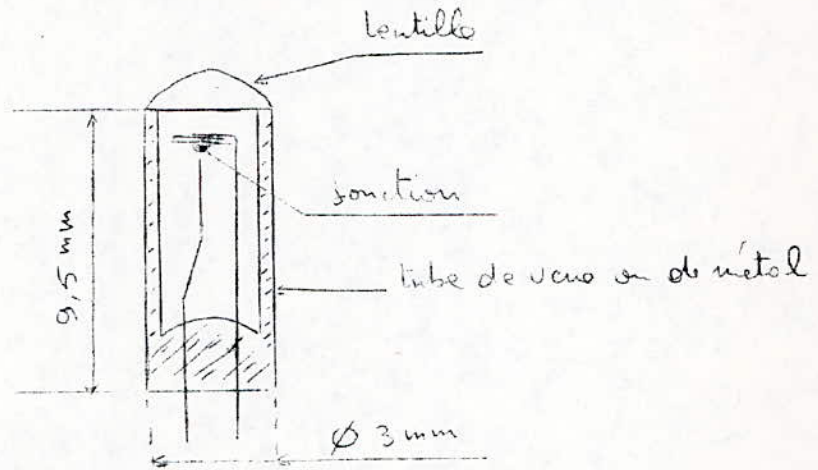


Fig17: Photodiode à jonction.

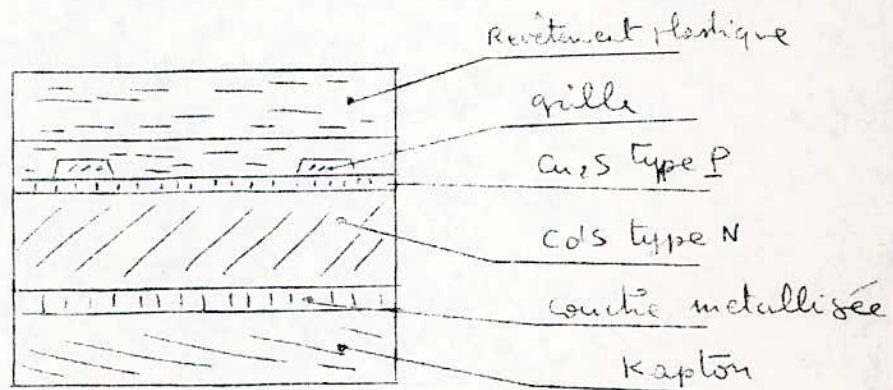


Fig19: Coupe schématique d'une photopile CdS-Cu₂S.

4.3.3. - La photopile EPX46

C'est une photopile circulaire, comportant une jonction P-N au silicium dont la surface photosensible fait 1256 mm², et dont l'épaisseur fait 300 μ m. (fig.1).

Nous remarquons sur la face active de la cellule, 9 grilles parallèles qui servent à réduire la résistance série des photopiles.

En effet, les connaissances acquises dans la technologie montre que si l'on veut que la résistance due à la face active ne provoque pas une perte de rendement, il faut que le courant I n'ait pas à parcourir dans cette couche une longueur moyenne à 5 ou 10 mm. Cette conclusion conduit à la réalisation de réseau de contacts à grilles.

4.3.4. - Le panneau solaire japonais S 224

Il est composé de 20 cellules à jonction P-N au silicium, en série. Chaque cellule a la forme d'un demi-disque de 22,5 mm de diamètre. Les 20 cellules sont encapsulées entre deux plaques de verre. La surface du panneau est d'environ 100 cm².

4.3.5 - Le panneau solaire BPX47A

Le panneau BPX47A comporte 34 cellules au silicium du type BPX46, associées en série, de 57 mm de diamètre chacune. On compte sur la face antérieure de chaque cellule, 17 grilles parallèles.

Les cellules ainsi que les connexions sont moulées dans une résine, matière très mauvaise conductrice de l'électricité et de la chaleur. Le tout recouvre des deux côtés, par

deux plaques de verre trempé qui résiste aux agents atmosphériques et aux variations de température.

Le panneau est encadré sur les quatre côtés latéraux, d'une première ceinture isolante et protectrice en caoutchouc, puis autour de celle-ci, d'une seconde ceinture en aluminium anodisé. Le poids total est de 2,4 kg; les dimensions extérieures sont : longueur = 468 mm ; largeur = 365 mm; épaisseur = 15 mm (fig.18).

4.3.6. - La photopile BPY70

C'est une photopile carrée de 400 mm², dont la structure est identique à celle de la BPX46. En général les cellules carrées sont destinées pour les applications spatiales. On découpe un carré dans chacune des rondelles avant traitement. Ces carrés sont placés bord-à-bord. Il n'y a aucun espace entre eux.

On obtient ainsi l'énergie maximale par unité de surface. Ces cellules sont plus coûteuses, car leur fabrication exige une opération de découpage supplémentaire et une partie du silicium de la rondelle est perdue.

4.4. - Principe de la fabrication et description de la cellule au CdS - Cu₂S

Les quatre cellules sur lesquelles nous avons manipulés ont été fabriquées dans le laboratoire de "cristaux et couches minces" du Centre des Sciences et de la Technique Nucléaire.

Caractéristiques dimensionnelles

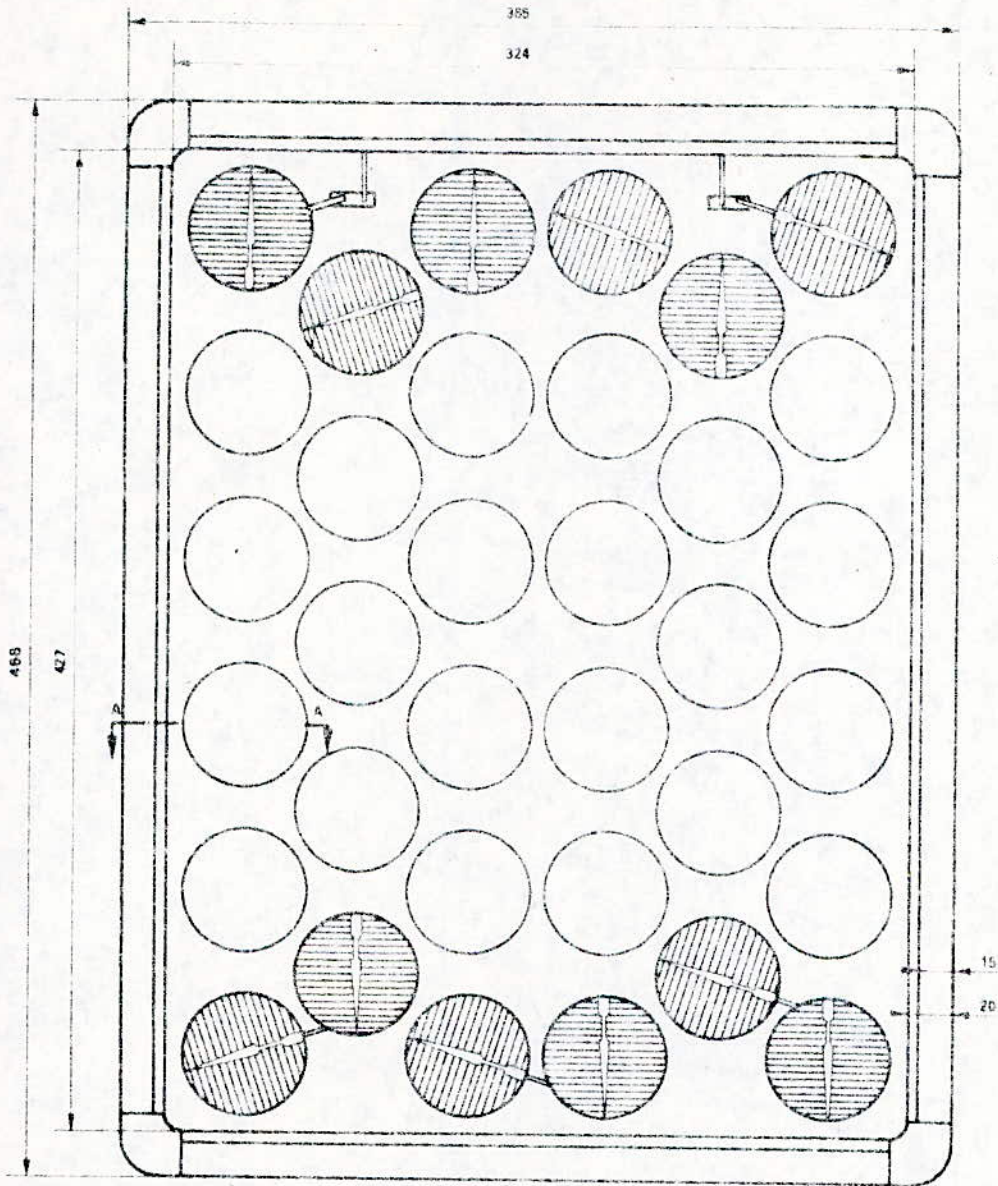
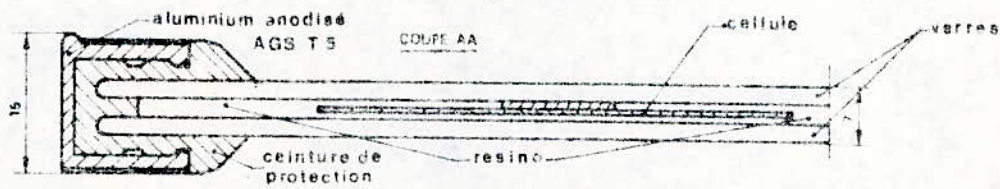


FIG. 13



Sortie électrique

par câble bifilaire
 longueur 1 m
 Ø exc. du câble 5,5 mm
 Ø ext. des fils 2 x 1,8 mm
 polarité noir = -

Trois particularités principales distinguent ces piles des piles classiques.

Tout d'abord, ce sont des piles en couches minces, le semi-conducteur utilisé est sous forme d'un film de 20μ d'épaisseur. Ces piles sont par conséquent, légères ; elles ne nécessitent qu'une très petite quantité de semi-conducteur, caractéristique très intéressante pour les applications terrestres où on cherche à obtenir le prix de revient le plus faible possible.

La figure 19 représente, en coupe, la structure d'une pile Cds. L'électrode arrière est une feuille de KAPTON métallisé, sur laquelle est déposé, par évaporation contrôlée sous vide, un film de Cds qui constitue le semi-conducteur de type N. Ce film est ensuite converti, en surface, en Cu_2S , par réaction chimique ; Cu_2S qui forme la couche semi-conductrice de type P de la diode. Puis on dépose par électrolyse une grille métallique en Or ou en Indium.

La seconde particularité de ces piles est liée à la qualité cristalline du Cds. Le film Cds est polycristallin, constitué de bâtonnets d'environ 10μ de base. Cette structure polycristalline permet donc d'utiliser des méthodes de préparation rudimentaires puisque la qualité cristalline n'est pas indispensable.

La troisième particularité est liée au semi-conducteur. Le Cu_2S est à transition directe, donc son coefficient d'absorption est très élevé. L'absorption a lieu dans une couche superficielle et les longueurs de diffusion des porteurs de charge pourront être très faibles.

Le semi-conducteur utilisé pourra donc être impur.

Les quatre cellules que nous disposons ont toute la même surface : $528mm^2$.

4.5. - Réalisation des portes-échantillons :

Les cellules solaires utilisées sont très fragiles. Il est donc indispensable de prévoir un porte-échantillon pour chacune des photopiles afin de faire des mesures électriques sur celles-ci sans les casser.

Le support est constitué de deux plaquettes de plexiglas de même surface, accolés. La plaquette supérieure comporte une fenêtre qui permet ainsi, pour une cellule donnée, l'exposition directe de celle-ci au rayonnement lumineux.

La cellule repose sur une feuille de cuivre très mince permettant un contact avec la face postérieure (face non éclairée).

Le contact de la face antérieure est réalisé avec un petit ergot en cuivre, qui permet aussi de fixer la cellule à son support (fig.20).

Le porte-échantillon qui est à son tour monté sur un support, peut tourner autour d'un axe. On peut, ainsi, orienter la cellule par rapport au rayonnement.

4.6. - Résultats de mesure :

Nous avons réuni toutes les courbes I-V prises au soleil et sous l'éclairement de la lampe au tungstène, dans le volume II "Résultats de mesure".

Dans chaque courbe nous trouverons les principaux paramètres : I_{cc} , V_0 , F , η , P_m , ainsi que le nom de chaque cellule.

On identifiera les cellules fabriquées par le C.S.T.N. par O_1 , O_2 , E_1 , E_2 .

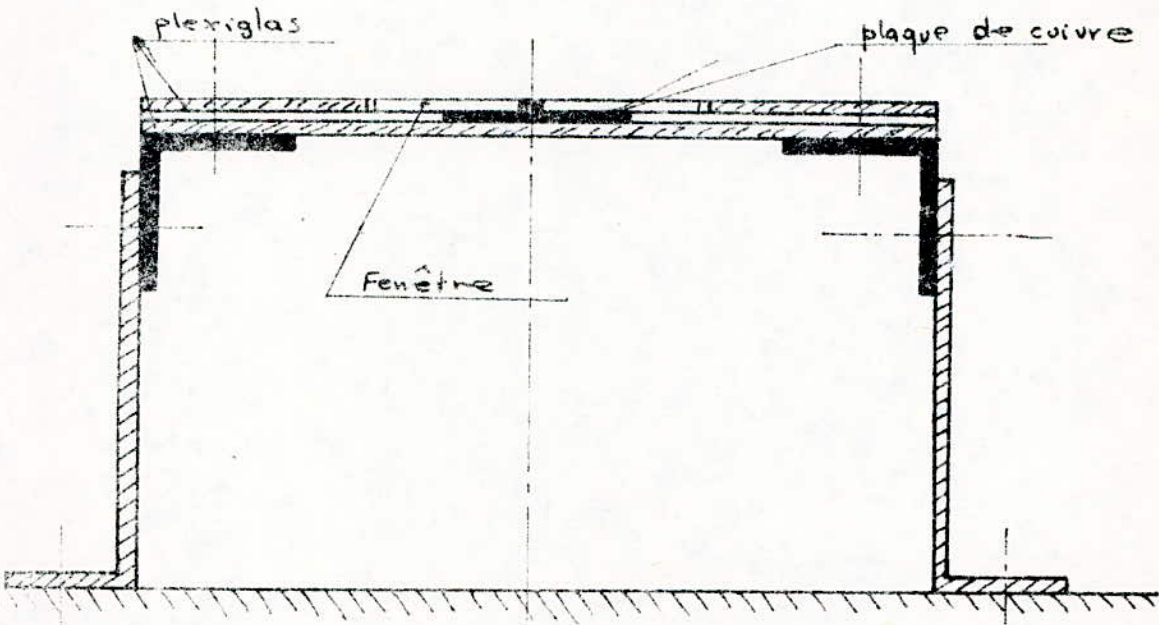
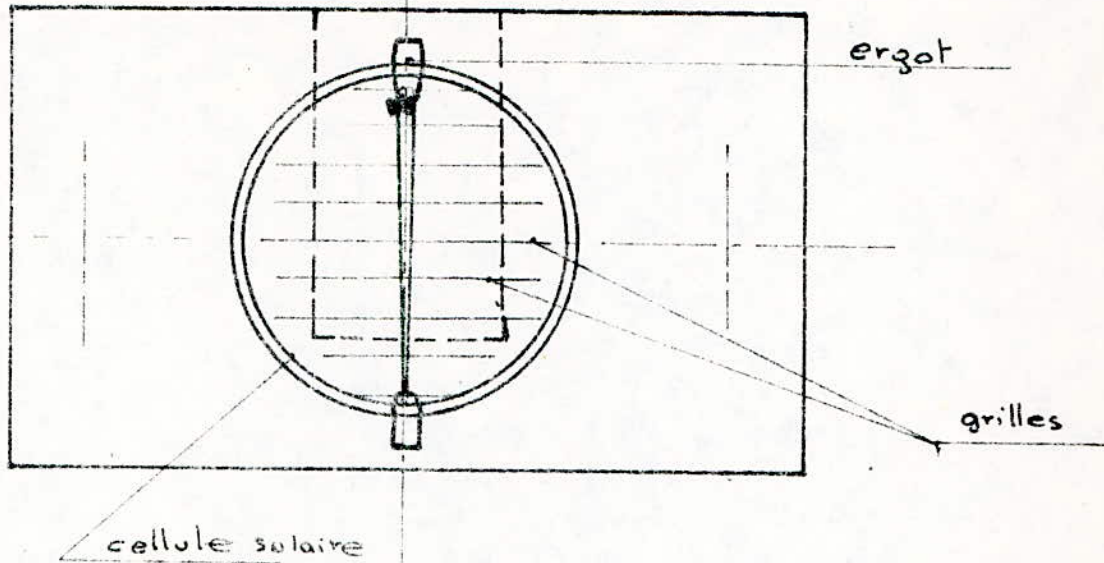


Fig. 12: SUPPORT de la CELLULE

4.7 - Calcul des principaux paramètres

4.7.1. - Valeur de V_0 et I_{cc} pour les différentes cellules.

Pour un éclairement en lumière solaire $E = 792W/m^2$

Cellules	BPX46	BPY70	S224	O_1	O_2	E_1	E_2
V_0 (mV)	550	560	5,2V	168	200	53	56
I_{cc} (mA)	220	100	77	0,35	1,32	1,2	0,89

4.7.2. - Puissance maximale :

Soit une caractéristique I-V. Les lieux des points tels que la puissance P est une constante et une hyperbole ; en effet, $P = VI$.

Si P est une constante alors $I = \frac{P}{V}$. C'est l'équation d'une hyperbole.

Lorsque cette hyperbole est tangente avec une courbe I-V donnée, le point correspondant est celui pour lequel la cellule débite la puissance maximale.

Pour tracer l'hyperbole de dissipation de Puissance P_1 , nous devons considérer tous les points de coordonnées I_i , V_i tel que $P_i = V_i I_i$.

Cette hyperbole coupe la caractéristique I-V en deux points I et J (fig. 21).

En considérant un point de coordonnées I_2 , V_2 à l'intérieur du domaine hachuré, l'hyperbole de dissipation de puissance P_2 se déduit comme précédemment.

De proche en proche, on obtient l'hyperbole de dissipation maximale qui est tangente en P_m à la caractéristique I-V. Ce point P_m de coordonnées V_m , I_m détermine la puissance maximale.

4.7.3. - Facteur de forme :

Pour voir l'écart qui existe entre la caractéristique expérimentale I-V d'une photopile et la courbe

$$I = I_{cc} - I_s \left(e^{\frac{V + R_s I}{V}} - 1 \right) \text{ pour laquelle } R_s = 0,$$

il est intéressant de définir un facteur F , appelé facteur de forme. Ce dernier a pour expression :

$$F = \frac{V_m I_m}{V_c I_{cc}}$$

En quelque sorte, il permet de chiffrer grossièrement de combien la forme d'une courbe I-V s'éloigne ou se rapproche du contour rectangulaire (I_{cc} , V_c).

4.7.4. - Rendement :

C'est le rapport entre la puissance électrique disponible et la puissance lumineuse reçue à la surface photosensible de la cellule, soit :

$$= \frac{I_m V_m}{S E}$$

E = éclairement en W/m^2

S = surface photosensible de la cellule.

4.7.5 - Etude de la protection des cellules solaires contre les agents mécaniques et atmosphériques :

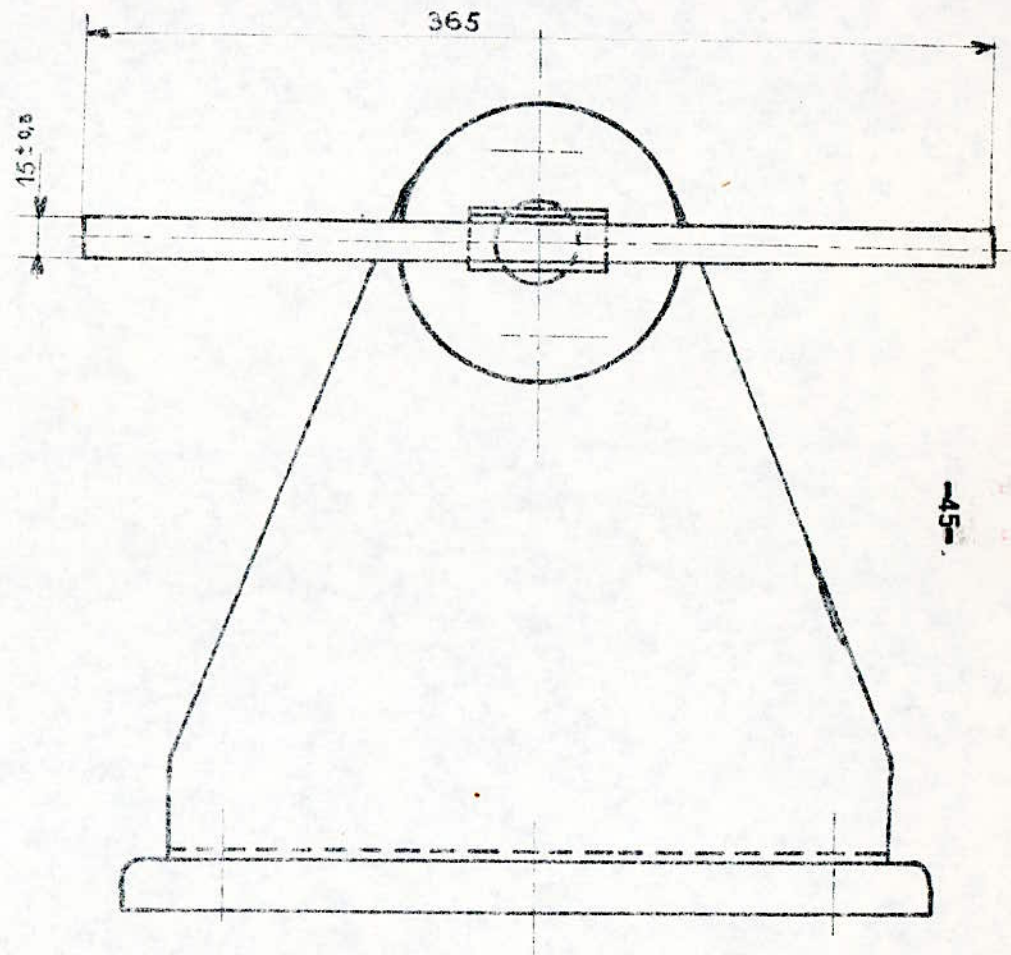
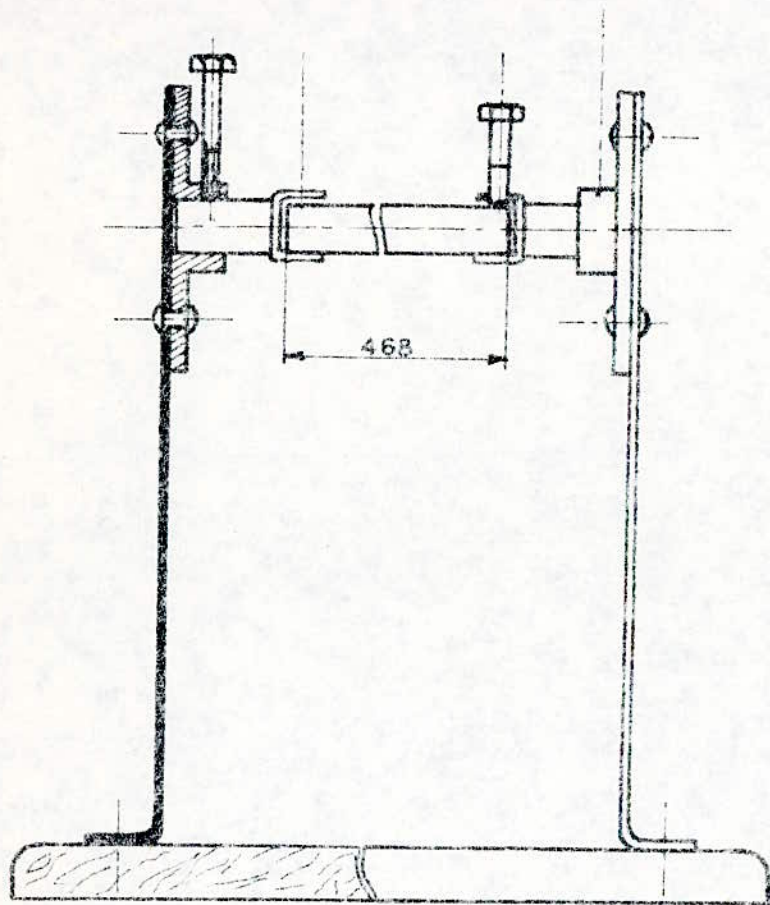
Un panneau est constitué de cellules encapsulées entre deux plaques de protection transparentes. Ces plaques doivent avoir la propriété de réfléchir les infra-rouges pour éviter l'échauffement des cellules, laisser passer la lumière, et amener une protection contre les agents atmosphériques et mécaniques. Un problème intéressant est de rechercher un matériau qui puisse réaliser toutes ces propriétés.

Pour cela, nous avons étudié :

- le verre ordinaire
- le verre stop-sol
- le verre feuilleté
- le verre dialux

Les mesures ont été faites sous l'éclairement de la lampe au tungstène.

Les cellules BPY70 et BPX46 sont recouvertes respectivement des quatre verres. Les figures 22 et 23 montrent les caractéristiques I-V sous un éclairement de 1130 W/m². La figure 24 traduit la variation du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur du verre ordinaire et du verre dialux. Dans notre cas, c'est le verre ordinaire qui influence le moins le courant de court-circuit.



Echelle: 1/3

SUPPORT de PANNEAU SOLAIRE BPX47A

CHAPITRE V

INTERPRETATION

INTERPRETATION

5.1 - Etude générale de l'allure des courbes

Les courbes obtenues ont l'allure d'un morceau de caractéristiques d'une diode tracée dans le sens direct et ayant subi une translation dans le sens négatif des ordonnées.

Les calculs théoriques montrent que l'expression générale du courant débité par la photopile est de la forme :
(Annexe I)

$$I = I_{cc} - I_s \left(e^{\frac{V+R_s I}{\psi}} - 1 \right) \quad (5,1)$$

avec

I_s : courant de repos de la jonction

I_{cc} : courant de court-circuit

R_s : résistance série

ψ : $\frac{kT}{q}$

à partir de cette expression, on pourrait représenter la photopile par le schéma équivalent de la figure 1 ; c'est-à-dire un générateur de courant qui exprime l'effet photoélectrique, et qui est en parallèle avec une diode ; l'ensemble étant en série avec une résistance R_s . La résistance série R_s peut être attribuée à deux causes principales :

- la résistance des contacts, localisée aux surfaces de séparation semi-conducteur-électrode ;

- la résistance du matériau semi-conducteur répartie dans le volume des régions n et p.

Pour voir dans quelle mesure, les courbes expérimentales suivent la loi qui est donnée par l'expression (5,1), nous avons tracé à l'aide de cette dernière la courbe théorique en se fixant les mêmes paramètres I_{cc} , T et V_0 que ceux obtenus expérimentalement.

Dans une première approximation, on peut dire que les caractéristiques I-V de tous les convertisseurs photovoltaïques étudiés, sauf les photopiles CdS/Cu₂S obéissent à la loi donnée par l'expression (5,1) si on trace les courbes théoriques $I = f(V)$ pour un éclairement donné et en faisant varier le paramètre R_s , on constate que les courbes expérimentales coïncident avec les caractéristiques dont la résistance série R_s est comprise entre 0 et 1 Ω (fig. 2).

Ainsi, nous avons calculé la résistance série de la photopile BPX46 soumise à un éclairement de 803 W/m². Pour cela, nous avons, d'abord, déterminé les coordonnées du point correspondant à la puissance maximale débitée par la photopile : soit $V_m = 400$ mV et $I_m = 185$ mA .

Puis, nous avons utilisé l'expression suivante : (Annexe I) pour déterminer R_s .

$$R_s = \frac{\text{Log} \left(1 + \frac{I_{cc} \cdot I_m}{I_s} \right) - \frac{V_m}{V_0}}{I_m} \quad (5,2)$$

et nous avons trouvé :

$$R_s = 0,57 \Omega$$

Ce calcul qui a été fait pour différents éclairements (fig.3) montre que R_s dépend de l'éclairement.

E_w/m^2	105,6	209	528	730,4	1 760
$R_s (\Omega)$	5,6	4,8	3,2	2,5	0,749

À partir de ces valeurs on peut déduire la courbe $R_s = f(E)$ (fig.4)

Si R_s était nulle, la puissance maximale que pourrait fournir la photopile serait de 97 mW (fig.2), soit un rendement de 9,68.

Mais avec $R_s = 0,57 \Omega$, cette puissance est de 74 mW et le rendement est de 7,33 % ce qui donne une perte de puissance de 23 mW due à la résistance série, soit 24 % de la puissance maximale maximum.

En conclusion, la diminution de la résistance série améliore le rendement et les caractéristiques I-V prennent une allure presque rectangulaire, se traduisant par un facteur de forme légèrement inférieur à 1.

Mais, il faut bien voir que cette dernière propriété n'est pas fondamentale. En effet, lors de l'utilisation, l'intensité du rayonnement solaire varie énormément au cours de la journée.

Et si on considère les caractéristiques I-V d'une cellule solaire ayant un bon facteur de forme, le point pour lequel la puissance débitée est maximale, se déplacera, en fonction de l'éclairement le long d'une courbe presque rectiligne et parallèle à l'axe des ordonnées.

Au contraire, si on a affaire à une photopile dont le facteur de forme est mauvais, cette courbe sera inclinée notablement dans le plan I-V. Or, si le récepteur de l'utilisation est une résistance R, le lieu des points sur la caractéristique I-V qui réalise son adaptation à la source photovoltaïque sera une droite de pente $-\frac{1}{R}$

Il en résulte que l'adaptation du récepteur à la photopile pourra se faire dans un domaine plus large pour les cellules solaires à mauvais facteur de forme que pour celles ayant des courbes I-V presque rectangulaires.

Un fabricant de photopiles devrait, donc, tenir compte du compromis rendement-adaptation à l'utilisation.

5.2 - Influence de l'éclairement

N'ayant pu travailler avec de grandes variations de l'intensité du rayonnement solaire, nous avons préféré étudier les courbes qui ont été tracées sous éclairement de la lampe au tungstène. Des caractéristiques des figures 3, 5, 6, 7 .

On peut déduire $I_{cc} = f(E)$ (fig.8).

On trouve que le courant de court-circuit est pratiquement proportionnel à l'éclairement, sauf pour les cellules au CdS/Cu₂S . Pour ce type de photopile, la courbe $I_{cc} = f(E)$ présente une variation logarithmique.

La proportionnalité entre le courant de court-circuit, et l'éclairement peut s'expliquer de la manière suivante :

Si ρ est la probabilité que possède un photon de faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction, N photons produiront ρN paires électrons-trous.

Si on suppose que toutes ces paires n'ont pas le temps de se recombiner lors de la formation de la force électromotrice photovoltaïque la quantité d'électricité traversant le circuit sera proportionnelle au nombre de photons incidents.

On peut déduire, aussi, des courbes I-V, la caractéristique $V_0 = f(E)$ pour une cellule donnée.

Pour les cellules BPY70 et BPX46, la tension à vide V_0 croît linéairement et très lentement en fonction de E (fg. 9).

En examinant la figure 3; on trouve 70 mV de variation pour V_0 entre les éclairagements extérieurs ($E_1 = 105,6 \text{ W/m}^2$ et $E_2 = 1760 \text{ W/m}^2$)

Il y a donc une différence de 14 %.

Ces résultats sont en bon accord avec ceux de la théorie qui prévoit une valeur limite du potentiel V_0 lorsque le flux devient infiniment grand.

Dans ce cas, toutes les paires électrons-trous se recombinent à travers la jonction.

La relation entre la tension à vide V_0 et l'éclairement E peut être définie par une expression empirique qui a été

établie par M O S S et qui s'écrit :

$$V_0 = \frac{kT}{q} \text{Log} \left(1 + \frac{Q}{A} \right) \quad (5.3)$$

ou Q = nombre de paires libérées par seconde

A = taux de génération thermique.

elle a été établie sur la base d'un calcul des recombinaisons des paires électrons-trous. Elle n'est valable que pour les faibles éclairagements. Pour des illuminations très élevées, la tension V_0 devient infiniment grande : ce qui est en désaccord avec l'expérience. En ce qui concerne les figures 6 et 7 : V_0 croît fortement avec l'éclairagement et tend vers une limite pour les éclairagements élevés.

En comparant les forces-électromotrices délivrées par la BPX46 et E_1 par exemple, on voit qu'il y a un rapport de 10.

D'autre part, on vérifie que le courant de court-circuit est proportionnel à la surface de la cellule.

A noter qu'il faut prendre la précaution de choisir deux cellules de ~~mêmes~~ structures, et de mêmes procédés de fabrication.

En effet, comparons les courants délivrés par la BPX46 et une cellule du panneau solaire, sous un même éclairagement.

Pour un éclairagement de 836 W/m² la BPX46 délivre un courant de court-circuit égal à 220 mA (fig.10); et la cellule du panneau 627 mA (fig.11).

La surface de la BPX46 est de 1256,64 mm² ; l'une des cellules du panneau est de 2551,76 mm².

En faisant le rapport $\frac{I_{cc}}{S}$ pour les deux cellules ont a :

$$\frac{I_{cc}}{S} (BPX46) = 0,18$$

$$\frac{I_{cc}}{S} (\text{panneau}) = 0,24$$

la différence entre les deux rapports s'explique par le fait que les cellules du panneau sont encapsulées entre deux vitres, alors que la photopile BPX46 ne comporte aucun revêtement protecteur.

5.3 - Influence de la température

Les propriétés photoélectriques d'une cellule solaire dépendent fortement de la température.

Pour la BPX42, la figure 13 montre que pour un éclairement donné, V_o diminue quand la température augmente. Dans ce cas la variation est de 10 mV/°C.

D'autre part, le rendement est affecté de façon notable pour la BPX42 ; sous un éclairement de 866,4 W/m² (fig.13) on a :

$$\eta_1 = 1,84 \text{ mW} \text{ à } T_1 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{et } \eta_2 = 1,565 \text{ mW} \text{ à } T_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Dans ce cas, le rendement accuse une baisse de 7,47 %/°C. La figure 14 donne la courbe de variation du rendement en fonction de la température pour la BPX46.

5.4 - Comparaison des Facteurs de Forme :

Les photopiles étant des convertisseurs d'énergie lumineuse en énergie électriques, un bon critère de comparaison entre les différentes cellules est le facteur de forme qui s'écrit $P = \frac{V_m I_m}{V_o I_{cc}}$.

Ce facteur traduit l'écart de la caractéristique expérimentale par rapport au contour rectangulaire défini par la droite horizontale I_{cc} et la droite verticale V_o . Cette courbe étant définie par un facteur de forme égal à 1.

En examinant les figures 15, 16, 17, 18, 19 et 20, on remarque que les cellules BPX46, BPY70, et S 224 ont un facteur de forme du même ordre de grandeur (0,6).

Pour les cellules au CdS/Cu_2S , leur facteur de forme est constant et égal à 0,25. Ayant obtenus pratiquement des droites pour les caractéristiques I-V. Ce facteur de forme se déduit aisément d'une propriété géométrique du rectangle de côtés I_{cc} et V_o .

En particulier, la variation du facteur de forme en fonction de l'éclairement (fig.12), déduite du réseau de caractéristiques de la BPY 70 (fig 3) montre que le facteur de forme est indépendant de l'éclairement.

Tableau comparatif des facteurs de forme

Cellules	O ₂	E ₁	O ₁	E ₂	BPX46	BPY70	S224
Facteur de forme	0,25	0,25	0,25	0,25	0,56	0,72	0,61

Sous un éclairement de $E = 792 \text{ W/m}^2$

5.5.- Comparaison des Rendements

C'est l'un des facteurs les plus importants des convertisseurs photovoltaïques. En réalité, c'est le facteur coût-rendement qui est fondamental et qu'on cherche à optimiser.

Le but essentiel des manipulations est de chiffrer le rendement des différentes cellules en lumière solaire et sous l'éclairement de la lampe.

En premier lieu, nous avons chiffré le rendement des cellules BPY 70 et BPX46 pour différents éclairagements (fig.3,5)

Les résultats obtenus montrent que le rendement augmente quand l'éclairement diminue (fig. 3,5); ce qui n'est pas conforme à la théorie.

Cela provient des conditions des manipulations, en effet on ne peut garder la température constante, en faisant varier l'éclairement. D'autre part, la résistance série intervient, ainsi que la structure de la photopile.

La réflexion de la lumière à la surface éclairée de la cellule est une première cause. Pour les cellules au silicium, le facteur de réflexion est généralement inférieur à 10 %.

Le rapport "efficacité de collection K" intervient dans le rendement (Annexe I). Il dépend entre autres de la répartition spectrale des photons.

Les résultats obtenus en lumière solaire sous un éclairage de 792 W/m², sur les cellules BPY70, BPX46, S224, E₁, E₂, O₁, O₂ (fig. 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21) donnent pour la cellule BPY70 le rendement le plus élevé (12,78 %).

Quant au quatre cellules au CdS/Cu₂S leur rendement est toujours très inférieur à 1.

Tableau comparatif des rendements

Cellules	O ₁	O ₂	E ₁	S224	BPX46	BPY70
Pm (mW)	0,0145	0,132	0,018	245,5	68	40,48
η %	1%	1%	1%	7,79%	6,47%	12,78%

5.6 Influence des verres

Pour la réalisation d'un panneau solaire, nous devons disposer d'une part, des cellules, et, d'autre part, de plaques de verre pour l'encapsulation des cellules et de leurs connexions. Ce revêtement doit résister aux agents atmosphériques et aux variations de température.

Il assurera aussi un faible échauffement des cellules au rayonnement solaire.

D'autre part, les plaques de verre ne doivent pas trop modifier les caractéristiques I-V des cellules.

Pour cela, on a relevé les caractéristiques I-V des cellules BPY70 (fig.22) et BPX46 (fig.23) avec les quatre types de verre.

On remarque que la force-électromotrice V_0 ne varie pratiquement pas, tandis que le courant de court-circuit diminue fortement.

Le meilleur verre, serait celui qui affectera le moins la caractéristique réelle. Dans notre cas, c'est le verre ordinaire.

-Influence de la nature du verre sur le courant de court-circuit : BPY70

Verres	Feuilleté	Ordinaire	Stopsol	Dialux
Icc (mA)	50	60	45	52
Absorption	37%	16%	43,9%	34,2%

-Influence de l'épaisseur du verre sur le courant de court-circuit :

la figure 24 montre que Icc décroît linéairement lorsque l'épaisseur du verre augmente.

5.7 - CONCLUSION :

Tous les résultats obtenus précédemment appellent plusieurs remarques. Si on analyse un réseau de caractéristiques $I = f(V)$ pour divers éclairagements, nous remarquons que la différence de potentiel V_m correspondant à la charge optimale est à peu près indépendante de l'éclairagement (fig.3).

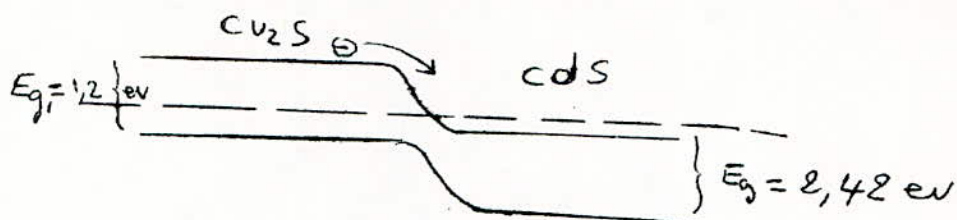
D'autre part, le rendement obtenu avec des cellules au silicium est bien supérieur au CdS/Cu₂S.

En effet, l'optimisation de la puissance par rapport au matériau, pour un spectre d'éclairagement donné, est un problème abordé depuis longtemps. On sait ainsi qu'il existe une valeur optimale de bande interdite voisine de 1,4 eV pour réaliser une photopile solaire sous la forme d'une jonction P-N.

Le silicium ayant un saut d'énergie de 1,09 eV et le CdS 2,4 eV. Cette valeur (1,4 eV) assure le meilleur compromis entre une absorption étendue, d'où découle un photocourant intense, ce qui requiert une faible bande interdite et une tension de circuit ouvert importante, exigence qui demande, par contre, une bande interdite large. Dans la pratique, le silicium constitue le dispositif de rendement énergétique optimal. Le rendement maximal théorique étant de 19,6%.

Les médiocres performances des cellules au CdS/Cu₂S peuvent d'abord s'expliquer du fait que le gap ΔE qui est de 2,4eV est éloigné de la valeur optimale de 1,4 eV.

D'autre part, ces cellules font appel à une hétérostructure.



En effet, la jonction d'une cellule CdS/Cu₂S est formée de deux matériaux à gap différents ($\Delta = 1,2$ eV pour Cu₂ et $\Delta = 2,4$ eV pour CdS) ; tandis que la barrière de potentiel à jonction P-N au silicium a été formée à partir de matériaux identiques donc ayant le même gap.

L'absorption des photons et la tension s'effectuent dans des matériaux différents ; mais il est difficile d'exploiter ce phénomène, car il est encore mal connu. Les rendements maximums obtenus avec le CdS/Cu₂S est de 8%.

D'autre part, on remarquera certains résultats inattendus pour les photopiles CdS/Cu₂S :

- la tension à vide varie très fortement avec l'éclairement (fig. 9), contrairement aux photopiles classiques (Si, Ge) qui tendent tous vers un potentiel limite V_0 .

Cette force électromotrice à vide varie expérimentiellement en fonction de l'éclairement et tend vers une limite finie V_{∞} .

L'équation mathématique est de la forme :

$$V_0 = V_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{E - E_0}{U}} \right) \quad (5,4)$$

Le terme $E-E_0$ qui apparaît dans l'exponentielle provient du fait que la courbe ne passe pas par l'origine.

τ est déterminé par la tangente à la courbe (fig.9).

On trouve pour E_1 :

$$\bar{I} = 500 \text{ W/m}^2$$

$$E_0 = 300 \text{ W/m}^2$$

$$V_{oc} = 40 \text{ mV}$$

$$V_o \text{ (mV)} = 40 \left(1 - e^{-\frac{E-300}{500}} \right) \quad (5,5)$$

(fig.9)

- le courant de court-circuit n'est pas proportionnel à l'éclairement mais suit une loi de même forme que V_o .

$$I_{cc} \text{ (mA)} = 0,6 \left(1 - e^{-\frac{E-340}{660}} \right) \quad (5,6)$$

(fig.8)

- le calcul de la résistance série, à partir du modèle classique donne une valeur négative.

En conclusion, il semblerait que les calculs théoriques sur les cellules CdS/Cu₂S sont différents, de ceux qui expliquent le fonctionnement des cellules au silicium à jonction P-N.

En particulier, on ne peut rendre compte des courbes spectrales de sensibilité qu'en admettant que l'effet photo-électrique fait intervenir un ou plusieurs niveaux situés dans la bande interdite.

4°/- Nous avons remarqué une détérioration rapide de ces thermopiles. En effet, on a montré récemment que la stabilité de ces cellules dépendait essentiellement des matériaux CdS et Cu₂S.

Les photopiles CdS/Cu₂S peuvent évoluer par deux processus très différents :

- une modification réversible de la caractéristique de jonction est observée quand la cellule est éclairée ou polarisée. Cet effet est expliqué par la présence de pièges à l'interface entre CdS et Cu₂S. Si les électrons injectés de Cu₂S dans CdS sont capturés par ces pièges, la hauteur de barrière, et par conséquent V_0 sont modifiées.

Or ces pièges sont surtout actifs si CdS est non dopé, et on a montré que les instabilités électroniques réversibles sont importantes dans ce cas, mais pratiquement absentes si CdS est fortement dopé.

- La deuxième cause d'instabilité résulte de la diffusion de Cu⁺ dans CdS et de la décomposition électrochimique de la couche de Cu₂S, qui entraînent des courts-circuits localisés et une chute rapide et irréversible du facteur de forme et du rendement de la photopile.

C O N C L U S I O N

Le tracé expérimental des caractéristiques I-V de différents convertisseurs photovoltaïques et l'interprétation des résultats obtenus doivent nous permettre, dans un proche avenir, d'utiliser les cellules solaires, à la manière d'une pile électrique.

L'étude ainsi faite pourrait présenter une certaine analogie avec celle des générateurs tournants du type dynamo ou alternateur.

Pour montrer cette identité, prenons l'exemple d'une dynamo shunt qui est entraînée, à vitesse constante, par un moteur, et qui débite sur une résistance de charge réglable.

La courbe I-V obtenue s'infléchit vers les valeurs croissantes du courant. Ceci est justement le type de manipulations que nous avons faites sur les photopiles et le genre de résultat que nous avons trouvé. On pourrait poursuivre l'analogie en disant que le paramètre vitesse de rotation jouerait le même rôle que l'éclairement solaire. Mais, ces deux grandeurs diffèrent par leur nature. Alors que l'une est réglable à volonté, l'autre correspond à une énergie qui varie énormément selon les régions, les saisons et les heures.

Il en résulte que, pour domestiquer cette énergie "sauvage" ainsi constituée par le rayonnement solaire et employer les photopiles comme un classique générateur d'énergie électrique, il faut leur associer des organes de régulation, de distribution et de stockage.

Dans le cas des applications terrestres, les besoins du public en électricité sont très divers. La gamme de consommation pour chaque individu fluctue du Watt à quelques kilowatts. Dans le domaine professionnel, la consommation en énergie électrique est constante, car il s'agit là d'alimenter des équipements bien déterminés, tels que les relais hertziens ou les balises d'aéroport.

Aussi, les systèmes de régulation, de distribution et de stockage devront être adaptés au type de problème rencontré.

Il faut ajouter, comme nous l'avons déjà vu au chapitre 4 que les conditions de débit de puissance maximale par une cellule solaire, imposent un récepteur dont la caractéristique I-V n'est pas ohmique ; mais ressemble plutôt à celle d'un accumulateur électrique. Nous avons donc, intérêt à faire débiter les photopiles d'abord dans des accumulateurs, et se servir, ensuite, de l'électricité ainsi stockée. Les accumulateurs réalisant les meilleures performances de stockage et de fiabilité étant les batteries au plomb doux.

Ce type de distribution est très avantageux car, à partir d'une batterie d'accumulateurs, il est très facile d'alimenter, d'une manière rentable, n'importe quel appareil électrique de la vie courante, soit directement, soit par une conversion continu-alternatif.

Pour collecter le maximum d'énergie dans la journée, on pourrait penser à faire suivre, à un panneau solaire, la course du soleil.

Mais, la résolution d'un tel problème montre que le fonctionnement est plus simple, fiable et rentable, lorsque le panneau reste fixe et orienté vers le zénith.

(Projet de fin d'études suivant : étude de la commande automatique d'un panneau solaire).

Si un concentrateur de rayonnement était associé à un convertisseur photovoltaïque, un dispositif d'asservissement en position serait indispensable. En effet, l'ensemble devrait être orienté constamment de façon à suivre le soleil dans sa course quotidienne.

Malgré les inconvénients d'une installation plus complexe et moins fiable, le coût de la puissance électrique pourrait être notablement réduit. Actuellement un panneau BPX47A coûte environ 2 000 DA. Sa surface est de 1 m² et il délivre au maximum 11 W, sous un rayonnement solaire non concentré. On voit, donc, que si on multipliait l'intensité du rayonnement solaire par 10 à l'aide d'un dispositif de focalisation, le panneau solaire délivrerait au maximum 110 W. Cette puissance serait obtenue pour presque le même investissement que dans le cas où le panneau serait soumis à un rayonnement solaire non concentré ; le coût des concentrateurs étant marginal.

La situation économique pour des cellules solaires utilisant des monocristaux de silicium peut être considérée aujourd'hui comme assez bien connue. (environ 40 DA par Watt).

Cette situation économique actuelle limite très sévèrement les applications terrestres. Il est primordial de gagner un facteur dix.

Depuis 1970, une nouvelle filière s'est ouverte pour les photopiles en couche mince au CdS. On sait que ces piles ont un intérêt particulier. L'inconvénient majeur qui influe sur leur développement est leur faible durée de vie.

Il convient de signaler qu'on peut réaliser des photopiles à partir de presque tous les matériaux semi-conducteurs, le critère de choix étant moins le rendement que le prix par Watt électrique débité. L'effort de recherche dans ce domaine est encore trop limité, si bien qu'à court terme le silicium et le CdS resteront seuls en compétition.

Enfin, les manipulations réalisées en plaçant un verre devant une photopile doivent permettre de guider notre choix du support et de la protection des cellules solaires, lors de la réalisation d'un panneau.

Ce type d'expérience associé aux travaux de réalisation de photopiles CdS-Cu₂S qui sont faits au C.S.T.N. pourrait, souhaitons-le, aboutir à la construction du premier panneau solaire national !

ANNEXES

ANNEXE I - PHOTOPILE

1.1. - Introduction :

Une photopile est un capteur photovoltaïque. Elle transforme directement en électricité l'énergie solaire reçue.

1.2. - Constitution :

Une photopile peut être constituée soit par la jonction d'un métal et d'un semi-conducteur (fig A1), soit par la jonction de deux semi-conducteurs de conductibilité opposée. (fig A2) -

La première structure comporte un semi-conducteur formant un mince revêtement sur un support métallique. Une couche de métal, très mince et très transparente recouvre le semi-conducteur.

La deuxième structure est constituée de rondelles de silicium monocristallin dopées au bore (P) lors du tirage. Celles-ci sont soumises à une diffusion sous atmosphère de phosphore. On obtient ainsi une couche photosensible de type N de 2 μ d'épaisseur. La diffusion étant faite sur toute la plaquette, on procède ensuite au décapage de la surface inférieure afin de faire apparaître le cristal P.

1.2. - Fonctionnement :

Une jonction PN est constituée d'un monocristal contenant une zone P et une zone N. Lorsqu'on réalise cette jonction, il s'établit un phénomène de diffusion des porteurs

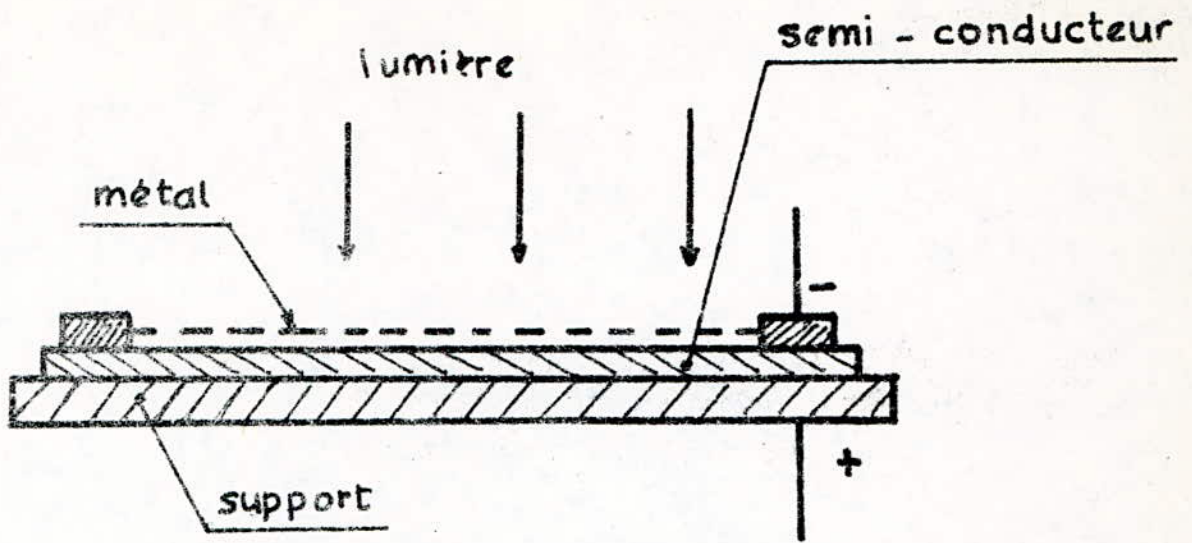


Fig A₁: jonction métal - semi-conducteur.

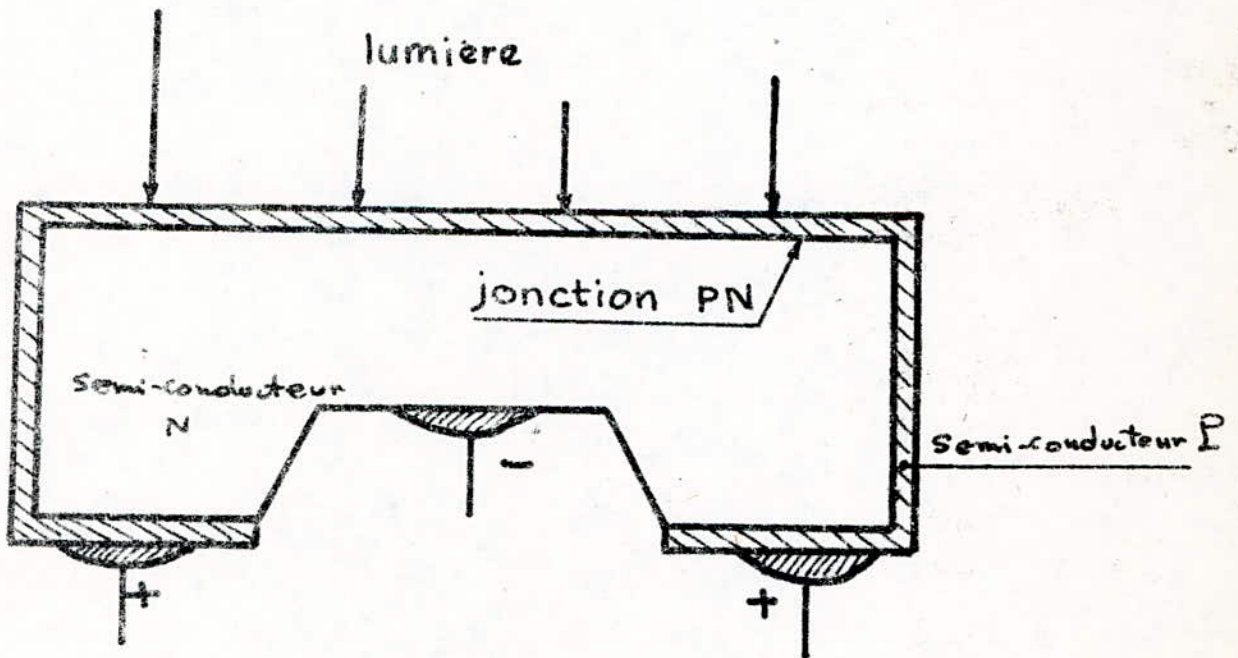


Fig A₂: jonction semi-conducteur - semi-conducteur.

majoritaires. Les électrons diffusés par N dans P laissent derrière eux une charge d'espace positive, les trous diffusés par P laissent une charge d'espace négative.

Il existe donc au niveau de la jonction PN une différence de potentiel, donc un champ électrique qui repousse les électrons vers N et les trous vers P.

Cette barrière de potentiel empêche la diffusion des majoritaires, mais accélère le passage des minoritaires (fig.A3).

Supposons qu'on éclaire la jonction PN avec une lumière contenant des photons dont l'énergie $h\nu$ est supérieure à la largeur de la bande interdite (gap d'énergie).

Chaque photon peut être absorbé par 1 électron de la bande à valence (porteur minoritaire) et donnera naissance à une paire électron-trou.

Lorsque ces paires atteignent la zone de la charge d'espace, la barrière de potentiel les brise et accélère les minoritaires, les électrons dans le cristal P, où ils deviennent majoritaires.

Ceci se traduit par une force électromotrice fournissant un courant électrique dans le cas où la cellule est branchée à un récepteur.

1.3. - Caractéristique et modélisation :

La courbe caractéristique courant-tension d'une cellule solaire, tracée à éclairement constant, et qui s'inscrit

dans un rectangle, est donnée par la figure A4. Elle résulte de la translation de celle d'une diode normale polarisée en direct. Elle permet de représenter en première approximation, la photopile par le schéma de la figure A4 dans lequel une source de courant G est en parallèle avec une diode, l'ensemble en série avec une Résistance R_s .

Le courant débité par la photopile est :

$$I = I_P - I_D \quad \text{A (1,1)}$$

La diode D est donc polarisée en direct sous une tension :

$$V = V + R_s I$$

Le courant dans la diode est donc :

$$I_D = I_s \left(\exp \frac{q(V + R_s I)}{KT} - 1 \right) \quad \text{A (1,2)}$$

où I_s est le courant de saturation

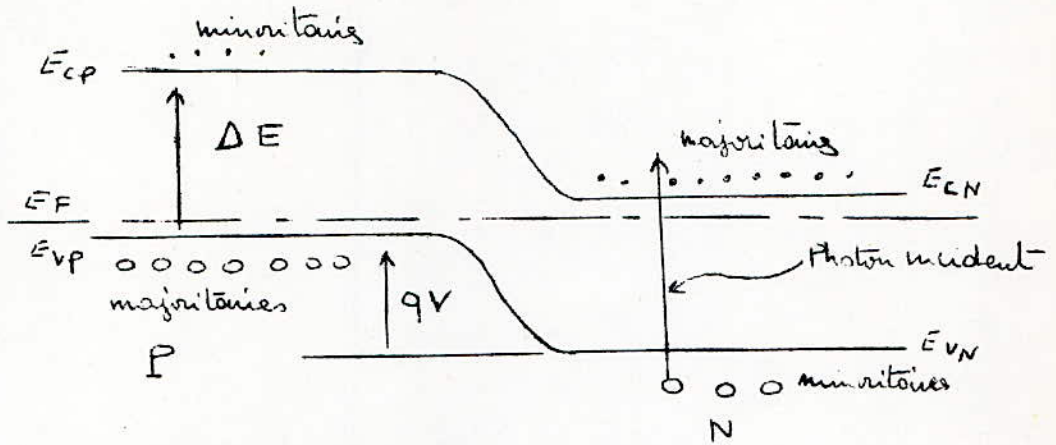
$$I_s = I_o \left(\exp \frac{qV_o}{KT} - 1 \right) \quad \text{A (1,3)}$$

avec

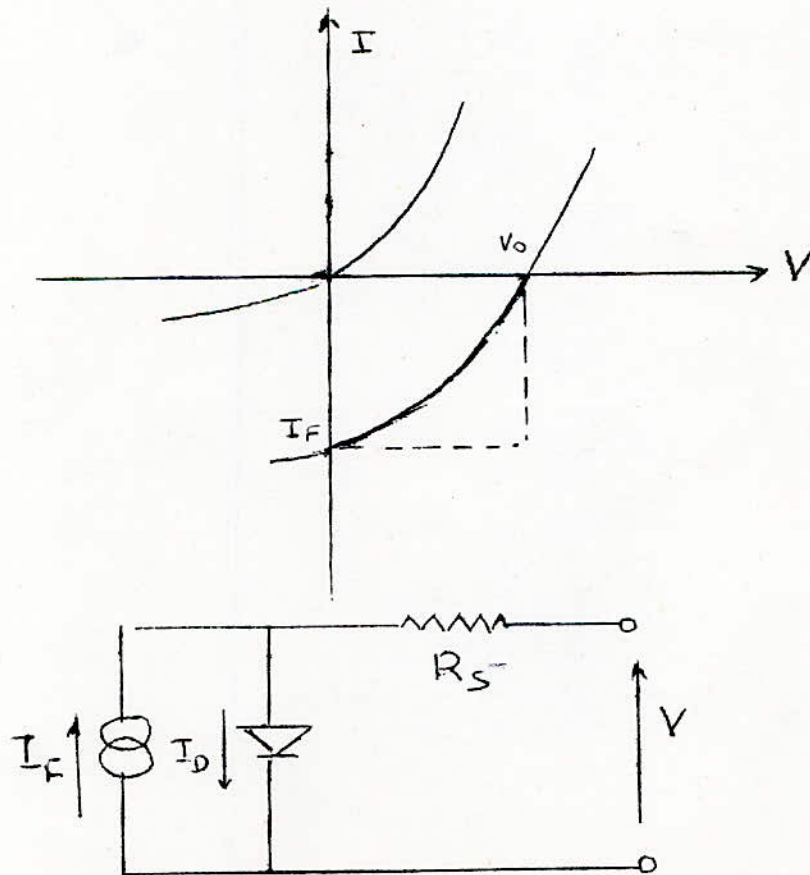
I_o = courant de repos de la diode

q = charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$

K = constante de Boltzman = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/}^\circ\text{K}$.



FigA3: Modèle de bandes d'énergie.



FigA4: Caractéristique I-V d'une cellule solaire et modélisation.

L'expression du courant général débité par la photopile s'écrit :

$$I = I_{cc} + I_s \left(\exp \frac{q(v + R_s I)}{kT} - 1 \right) \quad A (1,4)$$

La tension à vide est obtenue en annulant le courant débité par la cellule. On trouve :

$$V_0 = -\frac{kT}{q} \log \left(1 + \frac{I_{cc}}{I_s} \right) \quad A (1,5)$$

1.4 - Résistance série =

Elle est due d'une part aux contacts entre la surface du semi-conducteur et les électrodes (Résistance localisée), d'autre part à la résistance du matériau semi-conducteur (Résistance répartie).

Il est nécessaire que cette résistance série équivalente soit très inférieure à la résistance de charge si on veut améliorer le rendement.

La résistance due aux contacts est négligeable, par contre celle due à la couche de diffusion ne peut être réduite que si en déposant une très fine grille conductrice sur la couche antérieure éclairée. Celle-ci doit avoir une épaisseur optimale. En effet, une grande partie des charges libérées à la surface et dans un voisinage immédiat n'atteignent la jonction que si la région antérieure est très mince. Parallèlement sa résistance augmente. Il en résulte une épaisseur optimale de la région antérieure.

Détermination de R_s :

La formule A (1,2) permet d'en déduire la relation suivante:

$$R_s = \frac{\frac{KT}{q} \text{Log} \left(1 + \frac{I_{cc} - I}{I_s} \right) - V}{I} \quad \text{A (1,6)}$$

A partir de la caractéristique courant-tension d'une cellule, on peut déterminer sa résistance série :

En effet, connaissant V_0 , I_{cc} et un point quelconque de la caractéristique de coordonnées V_1 et I_1 , la relation A (1,6) devient :

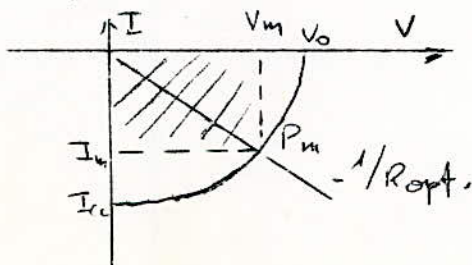
$$R_s = \frac{\frac{KT}{q} \text{Log} \left(1 + \frac{I_{cc} - I_1}{I_s} \right) - V_1}{I_1} \quad \text{A (1,7)}$$

I_s étant calculé à partir de la relation A (1,5)

1.5 - Conditions optimales d'utilisation

La puissance fournie par la cellule au circuit extérieur dépend du point de fonctionnement choisi. Cette puissance est maximale au point de coordonnées V_m , I_m , elle vaut $P_m = V_m \cdot I_m$.

Elle est équivalente à l'aire correspondant de hauteur I_m et de longueur V_m .



Cette puissance optimale peut être déterminée graphiquement à partir de la caractéristique courant-tension. Il suffit de tracer l'hyperbole de dissipation maximale. Le point de tangence détermine les coordonnées du point de vue optimale V_m et I_m .

Relation entre E_m et V_m :

En choisissant comme point de fonctionnement le point pour lequel la puissance débitée est maximale, la relation A (1,4) devient :

$$I_m = I_{cc} - I_s \exp\left(-\frac{qV_m}{KT} - 1\right)$$

d'où
$$I_m = I_{cc} + I_s - I_s \exp\frac{qV_m}{KT}$$

moeynant la valeur de V_0 :

$$\exp\frac{qV_0}{KT} = \left(1 + \frac{qV_m}{KT}\right) \exp\frac{qV_m}{KT}$$

En tenant compte de la relation A (1,5)

$$\left(1 + \frac{qV_m}{KT}\right) \exp\frac{qV_m}{KT} = 1 + \frac{I_{cc}}{I_s}$$

ou

$$I_m = I_{cc} + I_s - I_s \frac{\left(1 + \frac{qV_m}{KT}\right) \exp\frac{qV_m}{KT}}{1 + \frac{qV_m}{KT}}$$

d'où

$$I_m = I_{cc} \left(1 + \frac{I_s}{I_{cc}}\right) = I_{cc} V_m \left(1 + \frac{I_s}{I_{cc}}\right) \frac{qV_m}{KT + qV_m}$$

d'où la relation approchée : $P_m = \frac{q I_{cc} V_m^2}{KT + qV_m}$ A (1,8)

1.6. Rendement du transfert photoélectrique

Toute l'énergie des photons absorbés n'est pas utilisée.

En effet, si l'énergie des photons est supérieure au gap d'énergie, l'excédent d'énergie est transformée en chaleur. Il en résulte que quelle que soit l'énergie du photon, l'énergie recueillie par paire électron-trou n'est guère supérieure au gap.

La figure A5 représente schématiquement les trois aires définissant :

- P_1 = Puissance perdue par non absorption
- P_2 = Puissance recueillie sous forme de paires électron-trou
- P_3 = Puissance transformée en chaleur.

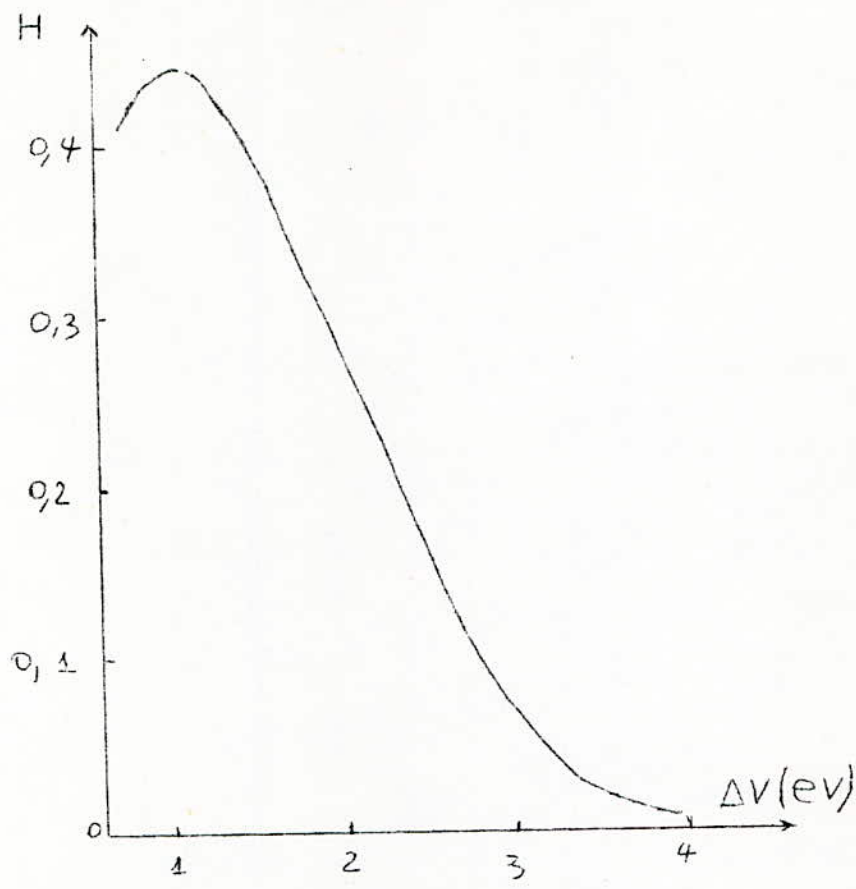
Le rendement de transfert est par définition :

$$\eta = \frac{P_2}{P_0} \quad \text{A (1,9)}$$

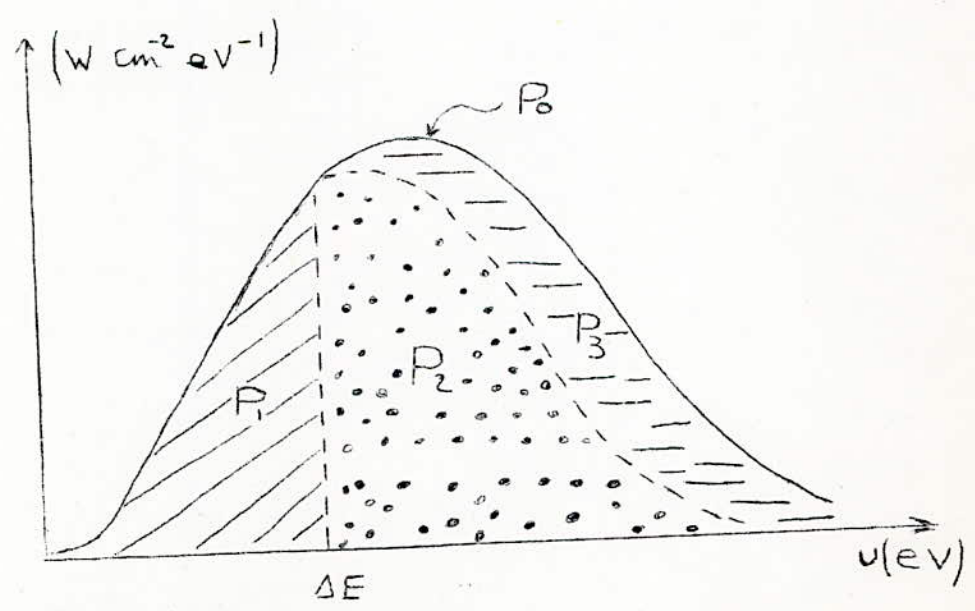
où P_0 représente la puissance totale des photons incidents

La figure A6 donne la variation du rendement énergétique du transfert photon-paire en fonction du gap d'énergie du semi-conducteur.

Cette figure montre que le saut d'énergie le plus favorable se situe entre 1 ev et 1,2 ev.



FigA6: Rendement de transfert H en fonction du saut d'énergie.



FigA5: Analyse du rendement de transfert.

ANNEXE II - ECLAIREMENT

2.1. - Rappels sur les grandeurs photométriques et énergétiques

La lumière transporte de l'énergie, ce qui explique son action sur les récepteurs thermiques et aussi sur l'oeil s'il s'agit de lumière visible.

Il est possible d'évaluer la lumière visible d'après son action sur l'oeil. C'est le rôle de la photométrie. A chaque grandeur énergétique, c'est-à-dire mesurable d'après l'énergie transportée, correspond une grandeur photométrique.

Entre les grandeurs photométriques et les grandeurs énergétiques correspondantes, il existe un rapport qui ne dépend que des unités utilisées et de la composition spectrale de la lumière étudiée, c'est-à-dire de la proportion relative des radiations monochromatiques qui la constituent. Ce rapport K est appelé efficacité lumineuse du rayonnement considéré : il est nul pour toute lumière invisible.

2.1.1. - Energie radiante :

C'est l'énergie transportée par rayonnement. Les unités sont :

$$\begin{aligned} 1 \text{ joule} &= 1 \text{ W/s} = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ Kcal} \\ \text{ou } 1 \text{ eV} &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.} \end{aligned}$$

2.1.2 - Flux énergétique :

Il s'agit d'une puissance transportée par rayonnement. La source qui émet l'énergie de W_e pendant le temps dt a un flux énergétique

$$F = \frac{dW_e}{dt}$$

unités : $1 W = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ Kcal s}^{-1} = 6,29 \cdot 10^{20} \text{ eV/s}$.

2.1.3. - L'intensité énergétique :

C'est le quotient d'une certaine quantité de flux énergétique et d'une certaine quantité d'angle solide $d\omega$

$$\text{unité : } \frac{W}{\text{sr}} \left(\frac{\text{Watt}}{\text{stéradian}} \right)$$

2.1.4. - Émittance énergétique :

C'est le flux énergétique émis par unité de la surface de la source, elle est donnée par :

$$R = \frac{dF}{dS} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

2.1.5. - Éclairement énergétique :

C'est le flux énergétique reçu par unité de surface irradiée

$$E_e = \frac{dF}{dS} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

2.1.6. - Résumé

UNITES PHOTOME- TRIQUES MKS	GRANDEURS	UNITES PHOTOMETRIQUES VISUELLES		
		DERIVEES DE MKS	DERIVEES DE C.GS	AUTRES UNITES
Watt (W)	Flux énergétique	LUMEN (lm)	LUMEN (lm)	LUMEN (lm)
	Flux lumineux			
Watt/sté- radian (W/sr)	Intensité éner- gétique	CANDELA (cd=lm/sr)	CANDELA (cd=lm/sr)	CANDELA (cd=lm/sr)
	Intensité Lumineuse			
Watt par stéradian et par mètre carré (W/sr.m ²)	Luminance éner- gétique ou radiance	nit (nt=cd/m ²)	STILB (sb=cd/m ²)	LAMBERT $L = \frac{1}{\pi} sb$
	Luminance ou Brillance			
	Eclairement et Emittance Energé- tiques	LUX (Lx=lm/m ²)	pHOT (ph=lm/cm ²)	FOOTCANDLE (fc=lm/ft ²)
	Eclairement et Emittance			

L'unité fondamentale de la photométrie est la Candéla qui est la 60ème partie de l'intensité, en direction normale, d'un centimètre carré de Corps noir à la température de solidification du platine (2047 °K).

2.1.7 - Exemples de valeurs de l'éclairement

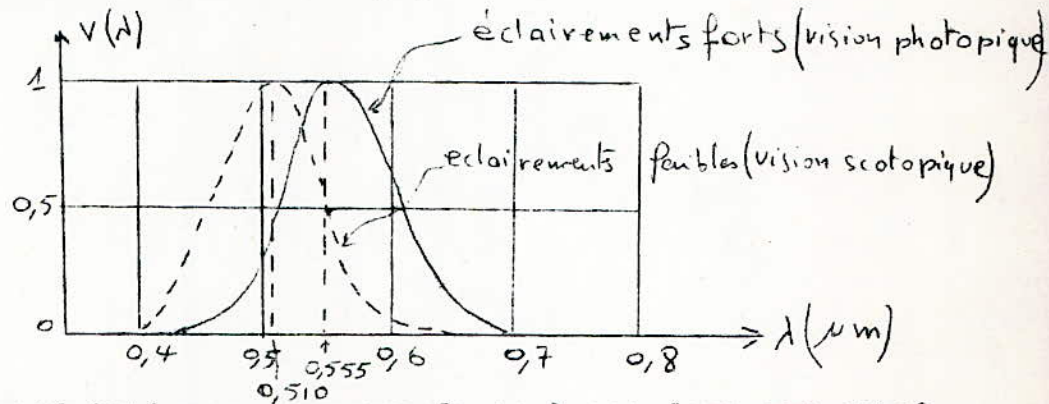
Eclairements produits par :

le ciel nocturne	0,0003 lx
la pleine lune	0,2 lx
éclairage artificiel	des 10 de lx
éclairage naturel	des 100 de lx
plein soleil	environ 100.000 lx

2.1. - Conversion des Unités Visuelles en Unités Energé- Unités Énergétiques

La perception humaine des images

elle fait intervenir un certain nombre de mécanismes physiologiques complexes dont on doit tenir compte dans l'évaluation globale des caractéristiques d'un système de visualisation. Aux forts niveaux d'éclairement. En effet, les éléments sensibles de la rétine qui participent à la perception lumineuse sont exclusivement les cônes (vision photopique); aux faibles niveaux, ce sont au contraire les batonnets (vision scotopique).



Les caractéristiques correspondants à ces deux cas extrêmes sont tracées sur la figure A7 où les maximums ont été normalisés à 1. Elles représentent par définition la sensibilité chromatique de l'œil moyen.

Ainsi, lorsqu'un flux de lumière de densité spectrale $\phi(\lambda)$ tombe sur la rétine d'un œil humain, l'impression ressentie par l'observateur est proportionnelle non à ϕ , mais à

$$P = \int \frac{d\phi}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad A(2,1)$$

c'est cette expression, homogène ici à une puissance donc à des watts, que l'on chiffre habituellement en lumens.

Le coefficient de pondération $V(\lambda)$ qui figure dans l'expression (1) est relatif à la vision photopique, dont le maximum d'efficacité se situe autour de $0,555 \mu\text{m}$.

La conversion des unités visuelles en unités énergétiques est plus délicate car elle est fonction de la longueur spectrale considérée si ϕ_E et ϕ_V mesurent respectivement le flux énergétique (exprimé en Watts) et le flux lumineux (exprimé en lumen) on écrira conformément à l'équation A (2,1)

$$\phi_V = K \max \int_0^\infty V(\lambda) \frac{d\phi_E}{d\lambda} d\lambda \quad A (2,2)$$

L'Intégrale est limitée en pratique à l'intervalle $(0,380 - 0,760 \mu\text{m})$ qui est le spectre visible.

Dans le cas de la vision photopique, on admet que

$$K_{\max} = 680 \text{ lm/W}$$

en d'autres termes, à $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$, on a sensiblement

$$1 \text{ lumen} = 1,45 \text{ mW (photopiques)}$$

ANNEXE III : SOLEIL

3.1. - Rayonnement solaire

L'énergie du rayonnement solaire est essentiellement variable :

- dans sa répartition spectrale
- suivant la composition gazeuse de l'atmosphère terrestre
- en amplitude et en attitude
- suivant les différentes périodes de l'année et de la journée

Le soleil est une source isotrope qui émet un rayonnement dont la répartition spectrale est voisine de celle d'un corps noir porté à 6 000°K (fig.A7).

Chaque seconde, le soleil perd 4,5 millions de tonnes de sa substance transformées en rayonnement soit 390 milliards de tonnes par jour. Ce chiffre est dérisoire en comparaison de sa masse qui est de 2.10^8 milliards de tonnes.

L'énergie solaire pouvant être calculée à l'aide de la loi de STEFAN

$$W = \sigma T^4$$

où

$$\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

$$T = 6\ 000 \text{ } ^\circ\text{K}$$

soit

$$W = 7\ 500 \text{ W cm}^{-2}$$

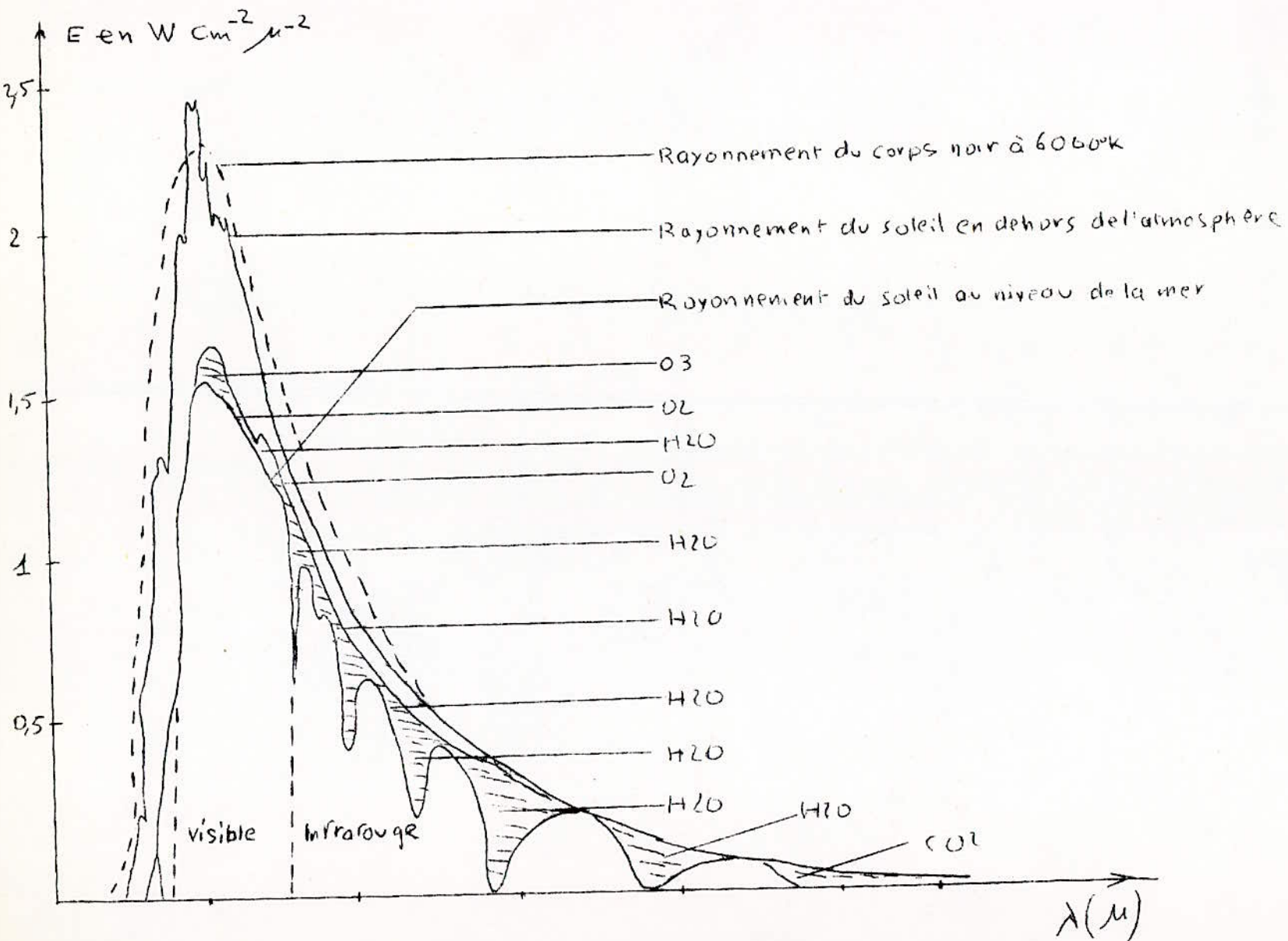


Fig A7: Répartition Spectrale de l'énergie solaire.

Mais, cette énergie est très fortement atténuée par suite d'absorption (diffusions moléculaires dues à la vapeur d'eau, au gaz carbonique, à l'ozone, diffusions par aérosols) et réflexions entre le soleil et la terre.

On a calculé que la constante solaire est de $1\ 395\ \text{W/m}^2$.

Rappelons que celle-ci exprime le taux moyen d'énergie solaire traversant une surface unitaire exposée perpendiculairement au rayonnement incident et située hors de l'atmosphère terrestre à la distance moyenne séparant la terre du soleil, soit $1,496 \cdot 10^8\ \text{km}$.

L'absorption par l'atmosphère d'une partie de cette énergie fait qu'il n'arrive au sol, sur une surface normale de 1m^2 , que $1\ \text{KW}$ environ.

Rayonnement Energétique :

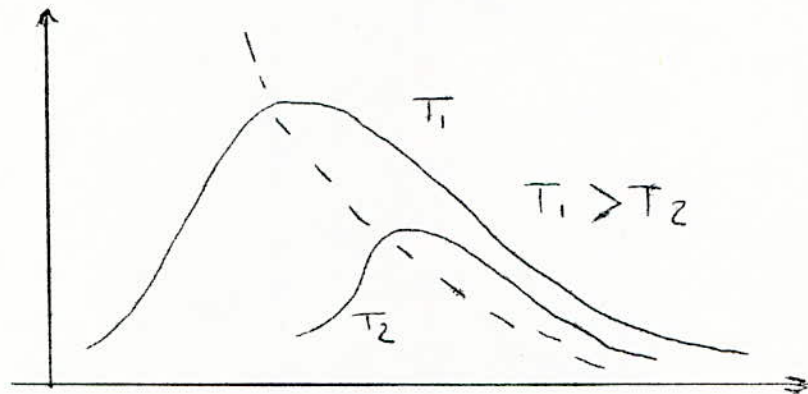
Environ 55 % de l'énergie rayonnée se trouve dans le proche infra-rouge.

La mécanique quantique explique la nature discontinue d'un rayonnement. En effet, à chaque radiation de fréquence donnée il correspond à des photons qui transportent une énergie $W = h\nu$. De ce fait, on peut conclure que le rayonnement ultraviolet est plus énergétique que le rayonnement infra-rouge.

La lumière ultraviolette sera donc celle qui produira le plus facilement l'effet photoélectrique : c'est-à-dire qui pourra facilement arracher les électrons d'un semi-conducteur.

ANNEXE IV - CORPS NOIR

Un corps à une température supérieure à 0°K émet toujours un rayonnement électromagnétique. Un corps noir est un corps qui absorbe intégralement tout le rayonnement électromagnétique, et il émet, non pas une longueur d'onde particulière, mais un spectre continu dont la forme dépend de la température.



4.1. - Luminance :

KIRCHOFF a montré que la luminance par unité de longueur d'onde d'un corps quelconque est égale à celle du corps noir à même température T , multipliée par le facteur d'absorption du corps ϵ , au point considéré, pour la direction d'incidence et la longueur d'onde considérées.

En raisonnant au sujet du rayonnement total, on trouve de même

$$l = \epsilon L$$

l = luminance énergétique totale du corps en un point dans une direction donnée.

L = luminance énergétique du corps noir à même température.

α = facteur d'absorption du corps à T° en un point pour la même direction.

4.2. - Lois du rayonnement du corps noir :

4.2.1. - Relation de Planck :

Dans une enceinte isotherme à la température T , fermée et parfaitement absorbante, on peut définir l'expression de la luminance spectrale ($1^\circ \lambda T$) en équilibre thermodynamique, c'est la relation de Planck :

$$1^\circ (\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \left(-\frac{C_2}{T\lambda} \right) - 1 \right)^{-1}$$

où la luminance monochromatique $1^\circ \lambda T$ s'exprime en Watts par cm^2 par stéradian et par centimètre de longueur d'onde λ

$$C_1 = 2hc^2 = 11,906 \times 10^{-3} \text{ W. cm}^2 \text{ par stéradian}$$

$$C_2 = hck^{-1} = 1,4388 \text{ cm.K}$$

4.2.2. Relation de Wien :

Pour des valeurs suffisamment faibles du produit T par rapport à C_2 , on peut simplifier l'expression précédente et écrire la luminance monochromatique :

$$1^\circ (\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} \exp \left(-\frac{C_2}{T\lambda} \right)$$

4.2.3. - Relation de Stefan :

Le passage des luminances monochromatiques à la grandeur intégrale (luminance) se fait simplement par intégration de l'expression de $l^\circ (\lambda, T)$. On a :

$$L^\circ_T = \int_{-\infty}^{\infty} l^\circ (\lambda, T) d\lambda$$

ou l'expression équivalente si l'on prend le nombre d'onde ν à la place de la longueur d'onde avec la constante de Stefan :

$$\sigma = \frac{C_1}{15} \left(\frac{\pi}{C_2} \right)^4 = 5,68 \cdot 10^{-12} \text{ W. cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

4.2.4. - Relation de Rayleigh :

On peut utiliser une expression simplifiée lorsque T est grand devant C_2 , c'est-à-dire dans le domaine des ondes hertziennes :

à partir de l'expression de Planck en fonction de la fréquence

$$l^\circ (\nu, T) = \frac{h \nu^3}{C_2} \left(\exp \left(\frac{h \nu}{kT} \right) - 1 \right)^{-1}$$

Si on suppose $kT \gg h \nu$, on a :

$$l^\circ (\nu, T) = \frac{h \nu^2}{C_2} T$$

4.2.5. - Relation de Planck : Utilisation des variables réduites :

Dans le cas général où la relation de Planck doit être

utilisée, on peut simplifier les calculs grâce à la variable λ/λ_m .

En différentiant la relation de Planck par rapport à la longueur d'onde, on obtient l'expression :

$$\lambda_m T = \frac{C_2}{4,965}$$

c'est la loi du maximum de luminance.

4.2.6. - Température de luminance :

La température de luminance S_λ d'une source de facteur d'émission monochromatique ϵ_λ est la température T du corps noir possédant pour la longueur d'onde λ la même luminance spectrale que cette source.

On a :

$$\frac{1}{S_\lambda} - \frac{1}{T} = - \frac{\lambda}{C_2} \log_e \epsilon_\lambda .$$

4.2.7. - Température de couleur :

La température de couleur T_c est celle pour laquelle un Corps Noir émet un rayonnement de même rapport d'intensité pour deux longueurs d'ondes données. On a la relation :

$$\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} \right) = \frac{\text{Log} \left(\epsilon(\lambda_1) / \epsilon(\lambda_2) \right)}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

ANNEXES

ANNEXE I PHOTOPILE

1.1. - Introduction :

Une photopile est un capteur photovoltaïque. Elle transforme directement en électricité l'énergie solaire reçue.

1.2. - Constitution :

Une photopile peut être constituée soit par la jonction d'un métal et d'un semi-conducteur (fig A1), soit par la jonction de deux semi-conducteurs de conductibilité opposée. (fig A2) -

La première structure comporte un semi-conducteur formant un mince revêtement sur un support métallique. Une couche de métal, très mince et très transparente recouvre le semi-conducteur.

La deuxième structure est constituée de rondelles de silicium monocristallin dopées au bore (P) lors du tirage. Celles-ci sont soumises à une diffusion sous atmosphère de phosphore. On obtient ainsi une couche photosensible de type N de 2 μ d'épaisseur. La diffusion étant faite sur toute la plaquette, on procède ensuite au décapage de la surface inférieure afin de faire apparaître le cristal P.

1.2. - Fonctionnement :

Une jonction PN est constituée d'un monocristal contenant une zone P et une zone N. Lorsqu'on réalise cette jonction, il s'établit un phénomène de diffusion des porteurs

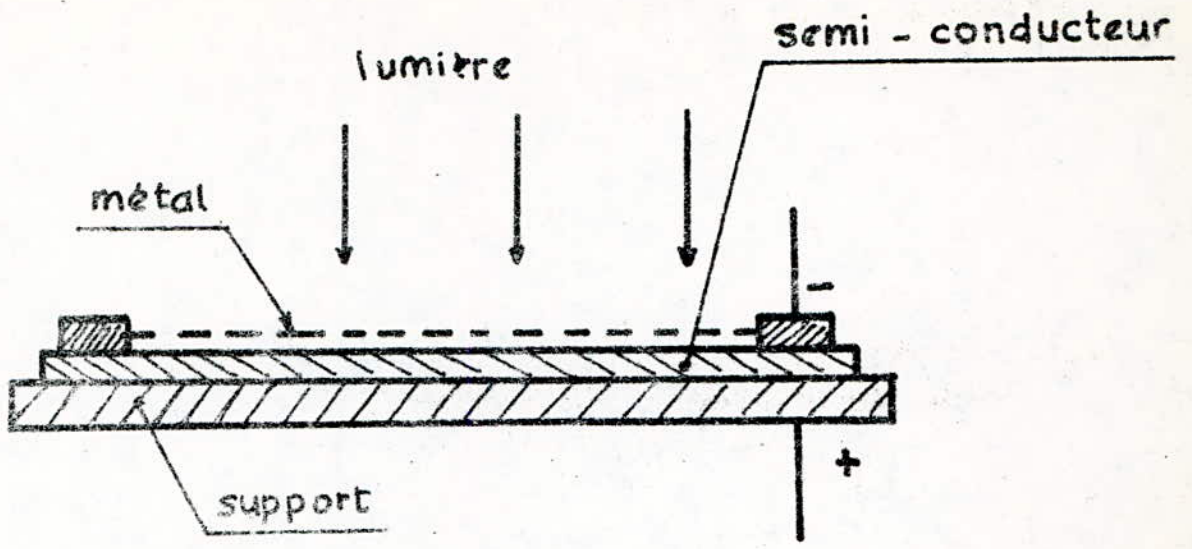


Fig A₁: jonction métal - semi-conducteur.

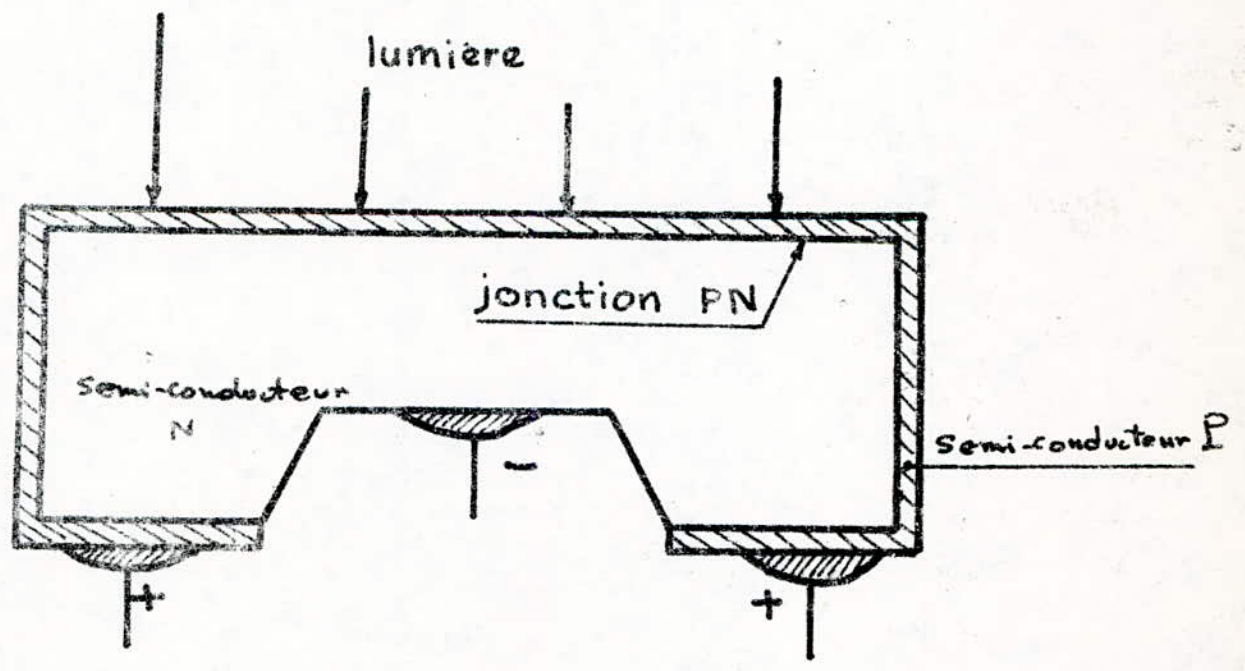


Fig A₂: jonction semi-conducteur - semi-conducteur.

majoritaires. Les électrons diffusés par N dans P laissent derrière eux une charge d'espace positive, les trous diffusés par P laissent une charge d'espace négative.

Il existe donc au niveau de la jonction PN une différence de potentiel, donc un champ électrique qui repousse les électrons vers N et les trous vers P.

Cette barrière de potentiel empêche la diffusion des majoritaires, mais accélère le passage des minoritaires (fig.A3).

Supposons qu'on éclaire la jonction PN avec une lumière contenant des photons dont l'énergie $h\nu$ est supérieure à la largeur de la bande interdite (gap d'énergie).

Chaque photon peut être absorbé par 1 électron de la bande à valence (porteur minoritaire) et donnera naissance à une paire électron-trou.

Lorsque ces paires atteignent la zone de la charge d'espace, la barrière de potentiel les brise et accélère les minoritaires, les électrons dans le cristal P, où ils deviennent majoritaires.

Ceci se traduit par une force électromotrice fournissant un courant électrique dans le cas où la cellule est branchée à un récepteur.

1.3. - Caractéristique et modélisation :

La courbe caractéristique courant-tension d'une cellule solaire, tracée à éclairement constant, et qui s'inscrit

dans un rectangle, est donnée par la figure A4. Elle résulte de la translation de celle d'une diode normale polarisée en direct. Elle permet de représenter en première approximation, la photopile par le schéma de la figure A4, dans lequel une source de courant G est en parallèle avec une diode, l'ensemble en série avec une Résistance R_s .

Le courant débité par la photopile est :

$$I = I_P - I_D \quad \text{A (1,1)}$$

La diode D est donc polarisée en direct sous une tension :

$$V = V + R_s I$$

Le courant dans la diode est donc :

$$I_D = I_s \left(\exp \frac{q(V + R_s I)}{KT} - 1 \right) \quad \text{A (1,2)}$$

où I_s est le courant de saturation

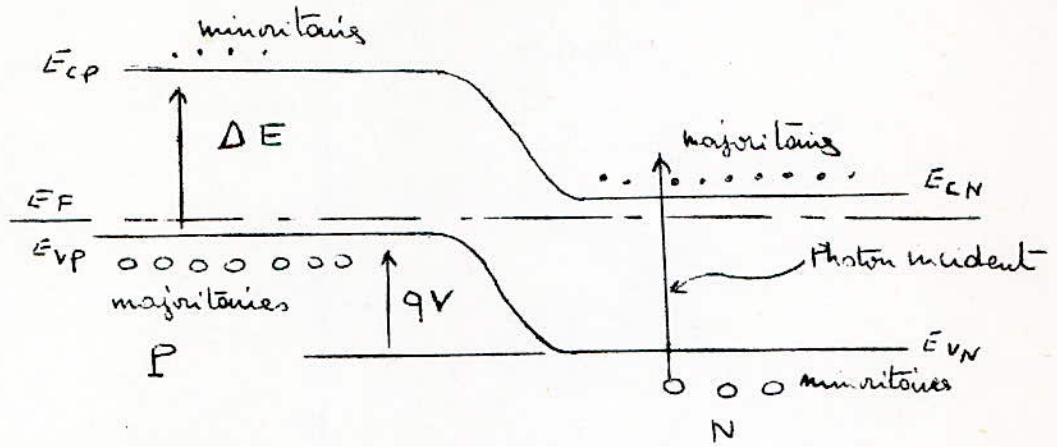
$$I_s = I_0 \left(\exp \frac{qV_0}{KT} - 1 \right) \quad \text{A (1,3)}$$

avec

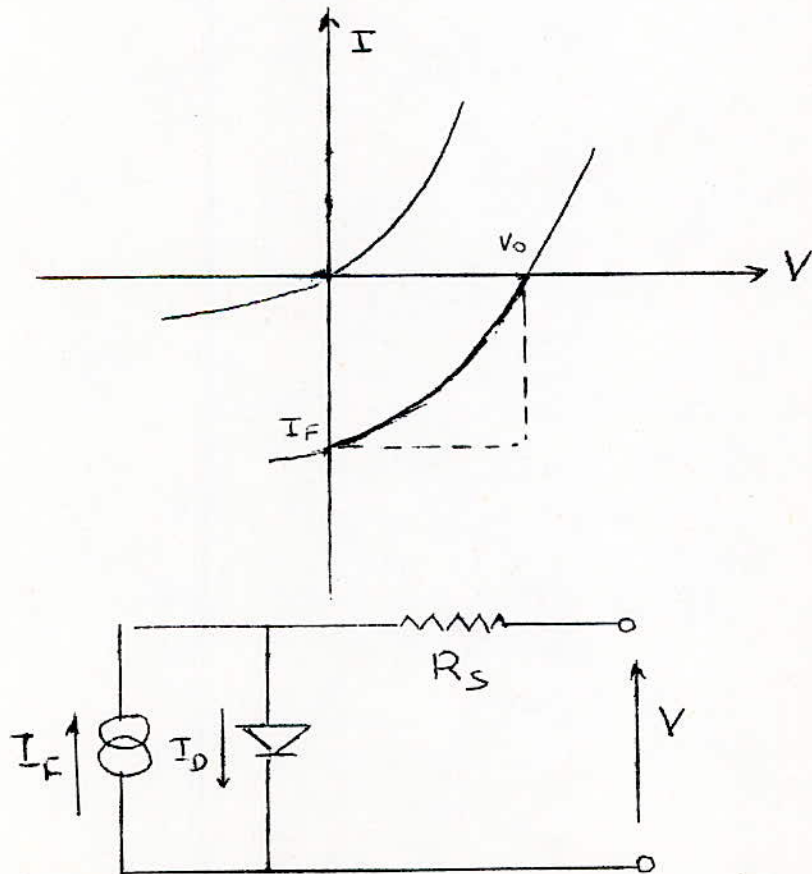
I_0 = courant de repos de la diode

q = charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

K = constante de Boltzman = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$.



FigA3: Modèle de bandes d'énergie.



FigA4: Caractéristique I-V d'une cellule solaire et modélisation.

L'expression du courant général débité par la photopile s'écrit :

$$I = I_{CC} - I_S \left(\exp \frac{q(v + R_S I)}{kT} - 1 \right) \quad A (1,4)$$

La tension à vide est obtenue en annulant le courant débité par la cellule. On trouve :

$$V_0 = -\frac{kT}{q} \log \left(1 + \frac{I_{CC}}{I_S} \right) \quad A (1,5)$$

1.4 - Résistance série =

Elle est due d'une part aux contacts entre la surface du semi-conducteur et les électrodes (Résistance localisée), d'autre part à la résistance du matériau semi-conducteur (Résistance répartie).

Il est nécessaire que cette résistance série équivalente soit très inférieure à la résistance de charge si on veut améliorer le rendement.

La résistance due aux contacts est négligeable, par contre celle due à la couche de diffusion ne peut être réduite que si en déposant une très fine grille conductrice sur la couche antérieure éclairée. Celle-ci doit avoir une épaisseur optimale. En effet, une grande partie des charges libérées à la surface et dans un voisinage immédiat n'atteignent la jonction que si la région antérieure est très mince. Parallèlement sa résistance augmente. Il en résulte une épaisseur optimale de la région antérieure.

Détermination de R_s :

La formule A (1,2) permet d'en déduire la relation suivante:

$$R_s = \frac{\frac{KT}{q} \text{Log} \left(1 + \frac{I_{cc} - I}{I_s} \right) - V}{I} \quad \text{A (1,6)}$$

A partir de la caractéristique courant-tension d'une cellule, on peut déterminer sa résistance série :

En effet, connaissant V_0 , I_{cc} et un point quelconque de la caractéristique de coordonnées V_1 et I_1 , la relation A (1,6) devient :

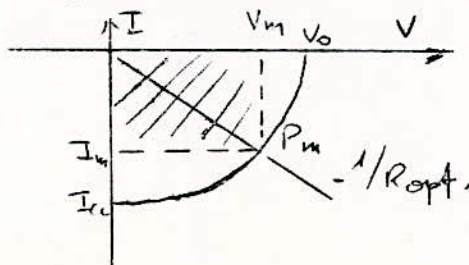
$$R_s = \frac{\frac{KT}{q} \text{Log} \left(1 + \frac{I_{cc} - I_1}{I_s} \right) - V_1}{I_1} \quad \text{A (1,7)}$$

I_s étant calculé à partir de la relation A (1,5)

1.5 · Conditions optimales d'utilisation

La puissance fournie par la cellule au circuit extérieur dépend du point de fonctionnement choisi. Cette puissance est maximale au point de coordonnées V_m , I_m , elle vaut $P_m = V_m \cdot I_m$.

Elle est équivalente à l'aire correspondant de hauteur I_m et de longueur V_m .



Cette puissance optimale peut être déterminée graphiquement à partir de la caractéristique courant-tension. Il suffit de tracer l'hyperbole de dissipation maximale. Le point de tangence détermine les coordonnées du point de vue optimale V_m et I_m .

Relation entre E_m et V_m :

En choisissant comme point de fonctionnement le point pour lequel la puissance débitée est maximale, la relation A (1,4) devient :

$$I_m = I_{cc} - I_s \exp\left(-\frac{qV_m}{KT} - 1\right)$$

d'où
$$I_m = I_{cc} + I_s - I_s \exp\frac{qV_m}{KT}$$

moynnant la valeur de V_0 :

$$\exp\frac{qV_0}{KT} = \left(1 + \frac{qV_m}{KT}\right) \exp\frac{qV_m}{KT}$$

En tenant compte de la relation A (1,5)

$$\left(1 + \frac{qV_m}{KT}\right) \exp\frac{qV_m}{KT} = 1 + \frac{I_{cc}}{I_s}$$

ou

$$I_m = I_{cc} + I_s - I_s \frac{\left(1 + \frac{qV_m}{KT}\right) \exp\frac{qV_m}{KT}}{1 + \frac{qV_m}{KT}}$$

d'où

$$I_m = I_{cc} \left(1 + \frac{I_s}{I_{cc}}\right) = I_{cc} V_m \left(1 + \frac{I_s}{I_{cc}}\right) \frac{qV_m}{KT + qV_m}$$

d'où la relation approchée : $P_m = \frac{q I_{cc} V_m^2}{KT + qV_m}$ A (1,8)

1.6. Rendement du transfert photoélectrique

Toute l'énergie des photons absorbés n'est pas utilisée.

En effet, si l'énergie des photons est supérieure au gap d'énergie, l'excédent d'énergie est transformée en chaleur. Il en résulte que quelle que soit l'énergie du photon, l'énergie recueillie par paire électron-trou n'est guère supérieure au gap.

La figure A5 représente schématiquement les trois aires définissant :

P_1 = Puissance perdue par non absorption

P_2 = Puissance recueillie sous forme de paires
électron-trou

P_3 = Puissance transformée en chaleur.

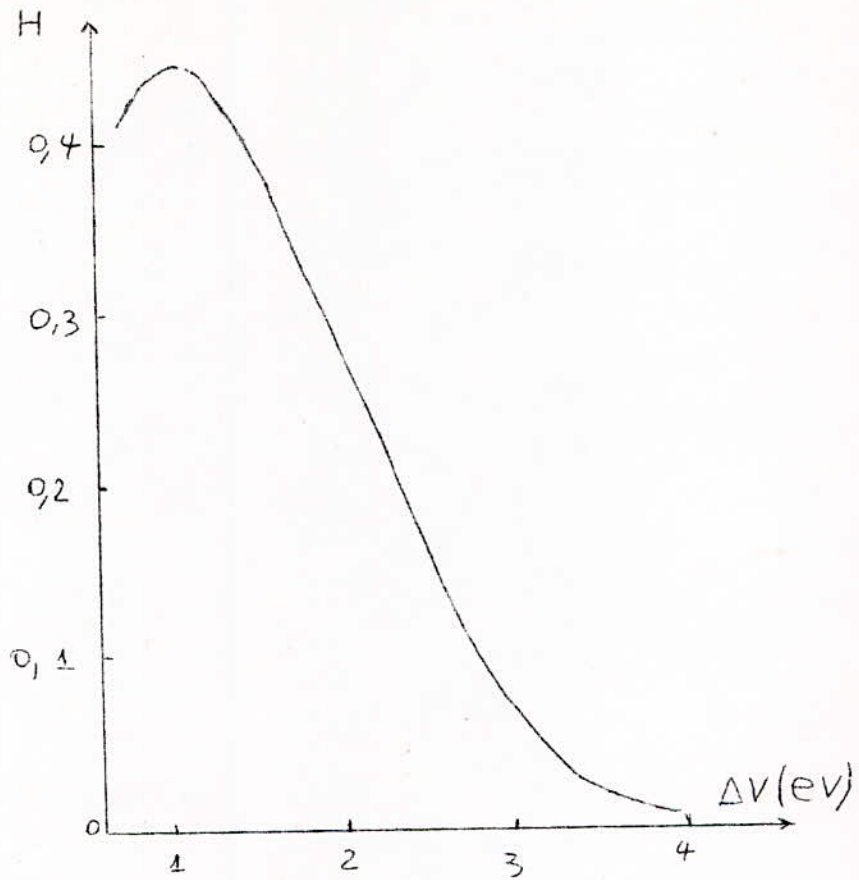
Le rendement de transfert est par définition :

$$\eta = \frac{P_2}{P_0} \quad A (1,9)$$

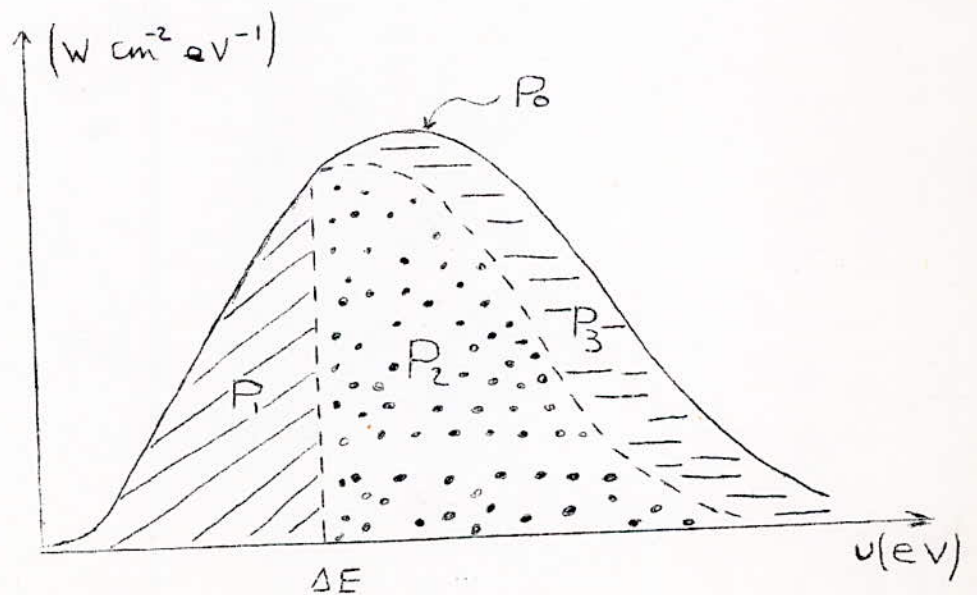
où P_0 représente la puissance totale des photons incidents

La figure A6 donne la variation du rendement énergétique du transfert photon-paire en fonction du gap d'énergie du semi-conducteur.

Cette figure montre que le saut d'énergie le plus favorable se situe entre 1 ev et 1,2 ev.



FigA6: Rendement de transfert H en fonction du saut d'énergie.



FigA5: Analyse du rendement de transfert.

ANNEXE II - ECLAIREMENT

2.1. - Rappels sur les grandeurs photométriques et énergétiques

La lumière transporte de l'énergie, ce qui explique son action sur les récepteurs thermiques et aussi sur l'œil s'il s'agit de lumière visible.

Il est possible d'évaluer la lumière visible d'après son action sur l'œil. C'est le rôle de la photométrie. A chaque grandeur énergétique, c'est-à-dire mesurable d'après l'énergie transportée, correspond une grandeur photométrique.

Entre les grandeurs photométriques et les grandeurs énergétiques correspondantes, il existe un rapport qui ne dépend que des unités utilisées et de la composition spectrale de la lumière étudiée, c'est-à-dire de la proportion relative des radiations monochromatiques qui la constituent. Ce rapport K est appelé efficacité lumineuse du rayonnement considéré : il est nul pour toute lumière invisible.

2.1.1. - Energie radiante :

C'est l'énergie transportée par rayonnement. Les unités sont :

$$\begin{aligned} & 1 \text{ joule} = 1 \text{ W/s} = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ Kcal} \\ \text{ou} \quad & 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.} \end{aligned}$$

2.1.2 - Flux énergétique :

Il s'agit d'une puissance transportée par rayonnement. La source qui émet l'énergie de W_e pendant le temps dt a un flux énergétique

$$F = \frac{dW_e}{dt}$$

unités : $1 W = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ Kcal s}^{-1} = 6,29 \cdot 10^{20} \text{ eV/s.}$

2.1.3. - L'intensité énergétique :

C'est le quotient d'une certaine quantité de flux énergétique et d'une certaine quantité d'angle solide $d\Omega$

$$\text{unité : } \frac{W}{\text{Sr}} \left(\frac{\text{Watt}}{\text{stéradian}} \right)$$

2.1.4. - Emittance énergétique :

C'est le flux énergétique émis par unité de la surface de la source, elle est donnée par :

$$R = \frac{dF}{dS} \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right)$$

2.1.5. - Eclairement énergétique :

C'est le flux énergétique reçu par unité de surface irradiée

$$H_e = \frac{dF}{dS} \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right)$$

2.1.6. - Résumé

UNITES PHOTOME- TRIQUES MKS	GRANDEURS	UNITES PHOTOMETRIQUES VISUELLES		
		DERIVEES DE MKS	DERIVEES DE C.GS	AUTRES UNITES
Watt (W)	Flux énergétique	LUMEN (lm)	LUMEN (lm)	LUMEN (lm)
	Flux lumineux			
Watt/sté- radian (W/sr)	Intensité éner- gétique	CANDELA (cd=lm/sr)	CANDELA (cd=lm/sr)	CANDELA (cd=lm/sr)
	Intensité Lumineuse			
Watt par stéradian et par mètre carré (W/sr.m ²)	Luminance éner- gétique ou radiance	nit (nt=cd/m ²)	STILB (sb=cd/m ²)	LAMBERT $L = \frac{1}{\pi} sb$
	Luminance ou Brillance			
	Eclairement et Emittance Energé- tiques	LUX (Lx=lm/m ²)	pHOT (ph=lm/cm ²)	FOOTCANDLE (fc=lm/ft ²)
	Eclairement et Emittance			

L'unité fondamentale de la photométrie est la Candéla qui est la 60ème partie de l'intensité, en direction normale, d'un centimètre carré de Corps noir à la température de solidification du platine (2047 °K).

2.1.7 - Exemples de valeurs de l'éclairement

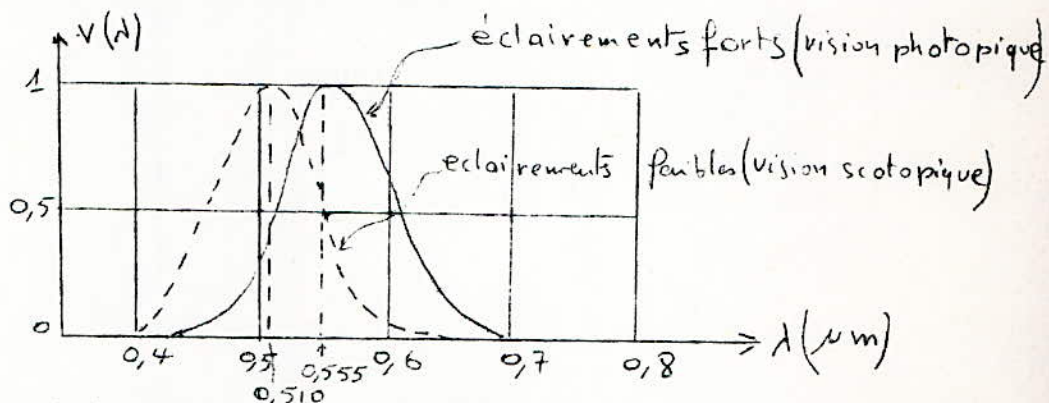
Eclairements produits par :

le ciel nocturne	0,0003 lx
la pleine lune	0,2 lx
éclairage artificiel	des 10 de lx
éclairage naturel	des 100 de lx
plein soleil	environ 100.000 lx

2.1. Conversion des Unités Visuelles en Unités Energé- Unités Énergétiques

La perception humaine des images

elle fait intervenir un certain nombre de mécanismes physiologiques complexes dont on doit tenir compte dans l'évaluation globale des caractéristiques d'un système de visualisation. Aux forts niveaux d'éclairement. En effet, les éléments sensibles de la rétine qui participent à la perception lumineuse sont exclusivement les cônes (vision photopique); aux faibles niveaux, ce sont au contraire les bâtonnets (vision scotopique).



Les caractéristiques correspondants à ces deux cas extrêmes sont tracées sur la figure A7 où les maximums ont été normalisés à 1. Elles représentent par définition la sensibilité chromatique de l'œil moyen.

Ainsi, lorsqu'un flux de lumière de densité spectrale $\varphi(\lambda)$ tombe sur la rétine d'un œil humain, l'impression ressentie par l'observateur est proportionnelle non à φ , mais à

$$P = \int \frac{d\varphi}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad A (2,1)$$

c'est cette expression, homogène ici à une puissance donc à des watts, que l'on chiffre habituellement en lumens.

Le coefficient de pondération $V(\lambda)$ qui figure dans l'expression (4) est relatif à la vision photopique, dont le maximum d'efficacité se situe autour de $0,555 \mu\text{m}$.

La conversion des unités visuelles en unités énergétiques est plus délicate car elle est fonction de la longueur spectrale considérée si ϕ_E et ϕ_V mesurent respectivement le flux énergétique (exprimé en Watts) et le flux lumineux (exprimé en lumen) on écrira conformément à l'équation A (2,1)

$$\phi_V = K \max \int_0^{\infty} V(\lambda) \frac{d\phi_E}{d\lambda} d\lambda \quad A (2,2)$$

L'Intégrale est limitée en pratique à l'intervalle $(0,380 - 0,760 \mu\text{m})$ qui est le spectre visible.

Dans le cas de la vision photopique, on admet que

$$K \max = 680 \text{ lm/W}$$

en d'autres termes, à $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$, on a sensiblement

$$1 \text{ lumen} = 1,45 \text{ mW (photopiques)}$$

ANNEXE III - SOLEIL

3.1. * Rayonnement solaire

L'énergie du rayonnement solaire est essentiellement variable :

- dans sa répartition spectrale
- suivant la composition gazeuse de l'atmosphère terrestre
- en amplitude et en attitude
- suivant les différentes périodes de l'année et de la journée

Le soleil est une source isotrope qui émet un rayonnement dont la répartition spectrale est voisine de celle d'un corps noir porté à 6 000°K (fig.A7).

Chaque seconde, le soleil perd 4,5 millions de tonnes de sa substance transformées en rayonnement soit 390 milliards de tonnes par jour. Ce chiffre est dérisoire en comparaison de sa masse qui est de 2.10^8 milliards de tonnes.

L'énergie solaire pouvant être calculée à l'aide de la loi de STEPHAN

$$W = \sigma T^4$$

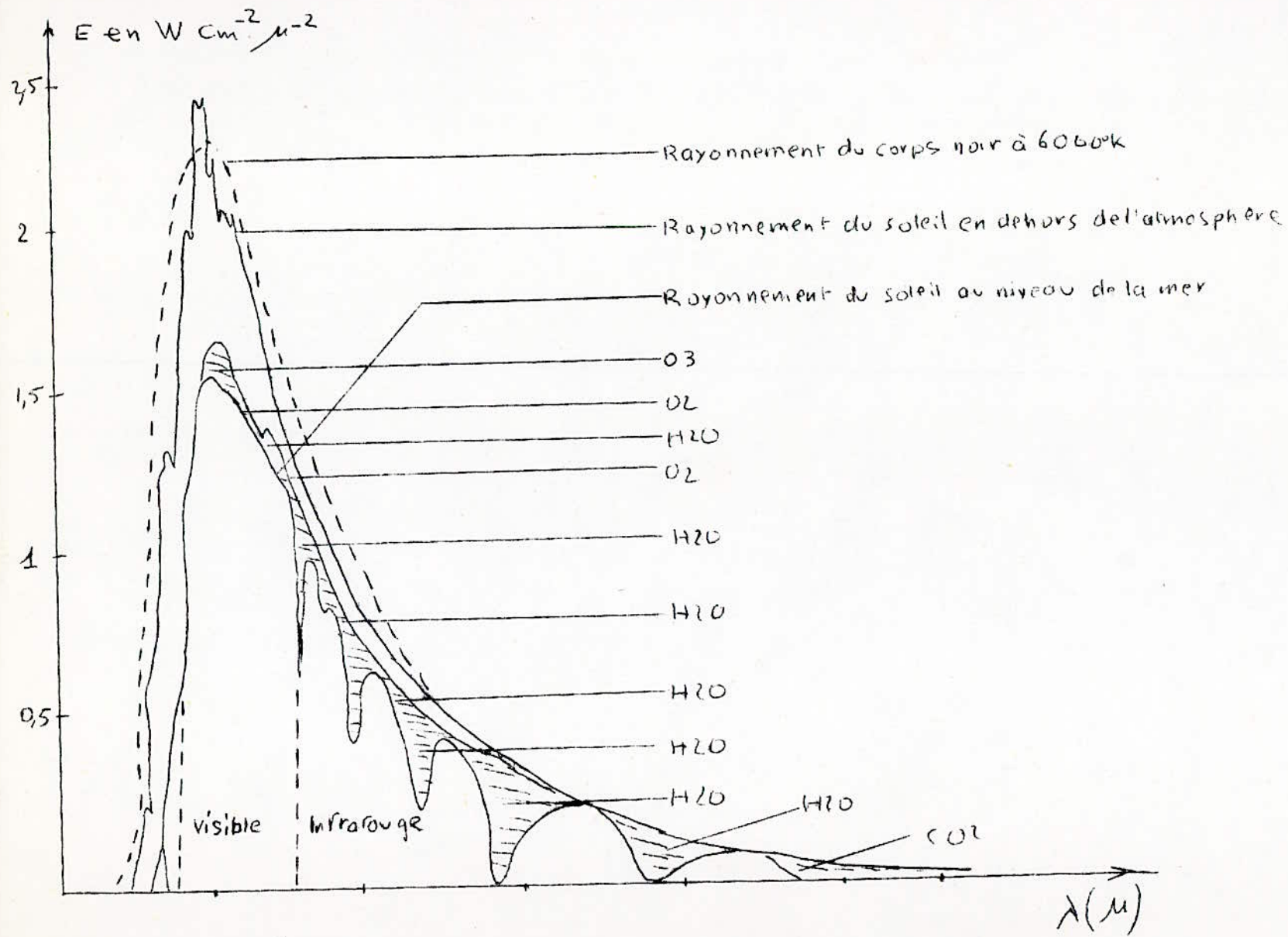
où

$$\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

$$T = 6\ 000 \text{ } ^\circ\text{K}$$

soit

$$W = 7\ 500 \text{ W cm}^{-2}$$



-2-

Fig A7: Répartition Spectrale de l'énergie solaire.

Mais, cette énergie est très fortement atténuée par suite d'absorption (diffusions moléculaires dues à la vapeur d'eau, au gaz carbonique, à l'ozone, diffusions par aérosols) et réflexions entre le soleil et la terre.

On a calculé que la constante solaire est de $1\,395\text{ W/m}^2$.

Rappelons que celle-ci exprime le taux moyen d'énergie solaire traversant une surface unitaire exposée perpendiculairement au rayonnement incident et située hors de l'atmosphère terrestre à la distance moyenne séparant la terre du soleil, soit $1,496 \cdot 10^8\text{ km}$.

L'absorption par l'atmosphère d'une partie de cette énergie fait qu'il n'arrive au sol, sur une surface normale de 1 m^2 , que 1 kW environ.

Rayonnement Énergétique :

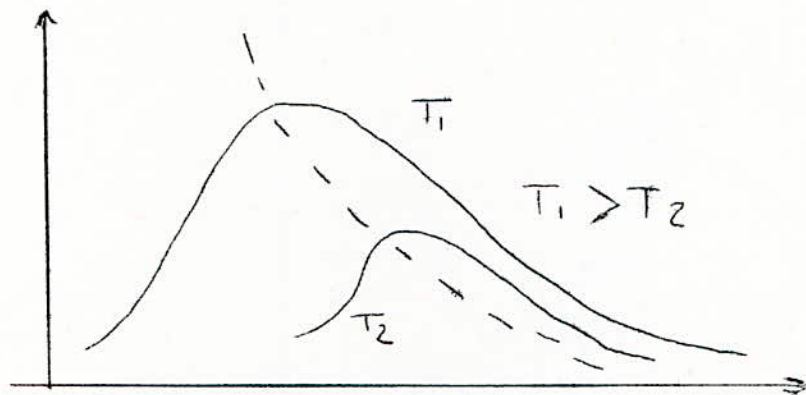
Environ 55 % de l'énergie rayonnée se trouve dans le proche infra-rouge.

La mécanique quantique explique la nature discontinue d'un rayonnement. En effet, à chaque radiation de fréquence donnée il correspond à des photons qui transportent une énergie $W = h\nu$. De ce fait, on peut conclure que le rayonnement ultraviolet est plus énergétique que le rayonnement infra-rouge.

La lumière ultraviolette sera donc celle qui produira le plus facilement l'effet photoélectrique ; c'est-à-dire qui pourra facilement arracher les électrons d'un semi-conducteur.

ANNEXE IV - CORPS NOIR

Un corps à une température supérieure à 0°K émet toujours un rayonnement électromagnétique. Un corps noir est un corps qui absorbe intégralement tout le rayonnement électromagnétique, et il émet, non pas une longueur d'onde particulière, mais un spectre continu dont la forme dépend de la température.



4.1. - Luminance :

KIRCHOFF a montré que la luminance par unité de longueur d'onde d'un corps quelconque est égale à celle du corps noir à même température T , multipliée par le facteur d'absorption du corps ϵ° , au point considéré, pour la direction d'incidence et la longueur d'onde considérées.

En raisonnant au sujet du rayonnement total, on trouve de même

$$l = \epsilon L$$

l = luminance énergétique totale du corps en un point dans une direction donnée.

L = luminance énergétique du corps noir à même température.

α = facteur d'absorption du corps à T° en un point pour la même direction.

4.2. - Lois du rayonnement du corps noir :

4.2.1. - Relation de Planck :

Dans une enceinte isotherme à la température T, fermée et parfaitement absorbante, on peut définir l'expression de la luminance spectrale ($l^\circ \lambda T$) en équilibre thermodynamique, c'est la relation de Planck :

$$l^\circ (\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \left(-\frac{C_2}{T\lambda} \right) - 1 \right)^{-1}$$

où la luminance monochromatique $l^\circ \lambda T$ s'exprime en Watts par cm² par stéradian et par centimètre de longueur d'onde λ

$$C_1 = 2hc^2 = 11,906 \times 10^{-16} \text{ W. cm}^2 \text{ par stéradian}$$

$$C_2 = hck^{-1} = 1,4388 \text{ cm.K}$$

4.2.2. Relation de Wien :

Pour des valeurs suffisamment faibles du produit T par rapport à C₂, on peut simplifier l'expression précédente et écrire la luminance monochromatique :

$$l^\circ (\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} \exp \left(-\frac{C_2}{T\lambda} \right)$$

4.2.3. - Relation de Stefan :

Le passage des luminances monochromatiques à la grandeur intégrale (luminance) se fait simplement par intégration de l'expression de $l^\circ(\lambda, T)$. On a :

$$L^\circ_T = \int_{-\infty}^{\infty} l^\circ(\lambda, T) d\lambda$$

ou l'expression équivalente si l'on prend le nombre d'onde ν à la place de la longueur d'onde avec la constante de Stéfán :

$$\sigma = \frac{c_1}{15} \left(\frac{\pi}{c_2} \right)^4 = 5,68 \cdot 10^{-12} \text{ W. cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

4.2.4. - Relation de Rayleigh :

On peut utiliser une expression simplifiée lorsque T est grand devant c_2 , c'est-à-dire dans le domaine des ondes hertziennes :

à partir de l'expression de Planck en fonction de la fréquence

$$l^\circ(\nu, T) = \frac{h \nu^3}{c_2} \left(\exp \left(\frac{h \nu}{kT} \right) - 1 \right)^{-1}$$

Si on suppose $kT \gg h \nu$, on a :

$$l^\circ(\nu, T) = \frac{h \nu^2}{c_2} T$$

4.2.5. - Relation de Planck : Utilisation des variables réduites :

Dans le cas général où la relation de Planck doit être

utilisée, on peut simplifier les calculs grâce à la variable λ/λ_m .

En différentiant la relation de Planck par rapport à la longueur d'onde, on obtient l'expression :

$$\lambda_{mT} = \frac{C_2}{4,965}$$

c'est la loi du maximum de luminance.

4.2.6. - Température de luminance :

La température de luminance S d'une source de facteur d'émission monochromatique ϵ_λ est la température T du corps noir possédant pour la longueur d'onde λ la même luminance spectrale que cette source.

On a :

$$\frac{1}{S_\lambda} - \frac{1}{T} = - \frac{\lambda}{C_2} \log_e \epsilon_\lambda$$

4.2.7. - Température de couleur :

La température de couleur T_c est celle pour laquelle un Corps Noir émet un rayonnement de même rapport d'intensité pour deux longueurs d'ondes données. On a la relation :

$$\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} \right) = \frac{\text{Log} \left(\epsilon(\lambda_1) / \epsilon(\lambda_2) \right)}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}$$

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Acta Electronica Desvignes 1961 Vol.n°3
 - 2 - R.T.C. (Radio Technique Compelec) cellules solaires
 - 3 - Technologie des composants électroniques R. Besson
(Editions Radio)
 - 4 - Les sources autonomes d'énergie J. Besson L'Onde
Electrique (Vol. n° 55)
 - 5 - Photopiles au silicium C. Elet Dunot
 - 6 - Lumière E. Fleury et J.P. Mathieu, Eyrolles
-