

12/77  
100

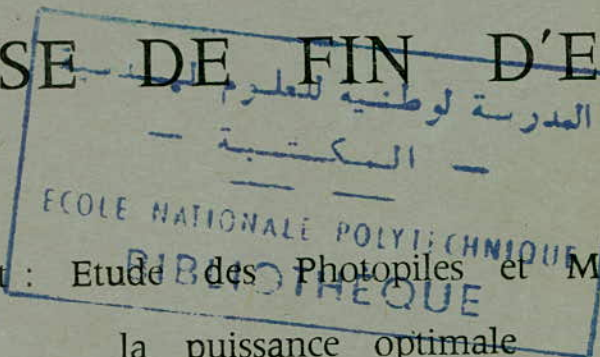
UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electricité  
Filière Électronique

THESE DE FIN D'ETUDES

Sujet : Etude des Photopiles et Mesure de la puissance optimale



Proposé par :  
A. Adane

Etudié par :  
A. Bouallouche  
A. Larbi-Bouamrane



— 1977 —

74 p. + Annexes

UNIVERSITE D'ALGER

---

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electricité  
Filière Electronique

# THESE DE FIN D'ETUDES

Sujet : Etude des Photopiles et Mesure de  
la puissance optimale .

Proposé par :

A. ADANE

Etudié par :

A. Bouallouche

A. Larbi-Bouamrane

BOUALLOUCHE Amar

A mes Parents

LARBI BOUAMRANE Abdennour

A mes Parents

REMERCIEMENTS

-o-o-o-o-o-o-o-o-

-Nous remercions vivement M<sup>r</sup>. A . ADANE,  
Docteur Ingénieur, de nous avoir suivi et orienté tout  
au long de notre travail.

-Que M<sup>r</sup>. P . SIBILLOT, Professeur à l'U.S.T.A.  
et Chercheur à l'Institut de l'Énergie Solaire, trouve  
ici l'expression de notre profonde gratitude pour nous  
avoir enrichi de ses connaissances.

-Nous tenons à remercier M<sup>r</sup>.A. BOUALLOUCHE,  
de nous avoir aidé dans notre travail.

TABLE DES MATIERES  
 =0=0=0=0=0=0=0=0=0=0=

LES PHOTOPILES

PAGES

Introduction	1
<u>Chapitre 1</u> - L'Energie Solaire	2
1-1- Exploitation de l'énergie solaire	2
1-2- Variation de l'énergie solaire	3
1-3- Perspectives et avenir de l'énergie solaire	4
<u>Chapitre 2</u> - Le rayonnement solaire	5
2-1- Caractéristiques de ce rayonnement	5
2-2- Distribution spectrale des photons dans la lumière solaire	6
<u>Chapitre 3</u> - Les Photopiles	8
3-1- Généralités	8
3-2- Photopiles à jonction P-N	10
3-2-1- Principe de fonctionnement	10
3-2-2- Rendement du transfert photoélectrique	13
3-2-3- Rendement de la jonction	15
3-2-4- Rendement global R	15
3-2-5- Influence des paramètres de la photopile sur le rendement et facteurs limitatifs	16
3-2-6- Collection des charges minoritaires	22
3-2-7- Conditions optimales de fonctionnement	27
3-3- Photopiles à jonction M-S	30
3-3-1- Considérations sur la structure MOS	30
3-3-2- La structure M-S	31
3-3-3- L'effet photoélectrique dans une jonction M-S	33
3-3-4- Caractéristiques de la jonction M-S	36
3-4- Aperçu sur les cellules photovoltaïques particulières	38
3-4-1- Photopiles à hétérojonctions	38
<del>1-13</del> 3-4-2- Cellules organiques	39
3-4-3- Photocellules à concentration	39

<u>Chapitre 4 -</u>	Fabrication des cellules photovoltaïques	40
4-1-	Photopiles à jonction P-N; cas particulier du silicium	40
4-1-1-	Extraction et purification du Si.	40
4-1-2-	Tirage des monocristaux	42
4-1-3-	Le silicium polycristallin	42
4-1-4-	Obtention de la jonction et des contacts dans le cas du silicium monocristallin	43
4-2-	Plaques photovoltaïques au CdS	46
4-2-1-	Dépot de l'élément CdS	46
4-2-2-	Protection, contact et cellule finie	47
4-2-3-	Caractéristiques et coût des photoéléments à CdS	47
4-3-	Photopiles à jonction M-S fabrication des cellules au sélénium	49
4-3-1-	Préparation du sélénium utile et support	49
4-3-2-	Formation de la couche d'arrêt	50
4-3-3-	Le contact	50
4-4-	Technique de production de photocellules d'AsGa, utilisant des substrats de qualité médiocre	51
<u>Chapitre 5 -</u>	Les effets de la température sur les cellules solaires	54
<u>Chapitre 6 -</u>	Analyse comparative des cellules photovoltaïques	55
<u>Chapitre 7 -</u>	Les panneaux solaires	56
<u>LA MESURE SUR LES PHOTOPILES.</u>		
<u>Chapitre 1 -</u>	Présentation des différentes mesures	59
1-1-	Les mesures physiques	59
1-2-	Les mesures de fabrication	61
1-3-	Le fonctionnement sur le terrain	62
<u>Chapitre 2 -</u>	Choix d'étude d'une mesure particulière	63
2-1-	Le laboratoire de mesure	63
<u>Chapitre 3 -</u>	Mesures électriques	68
3-1-	Mesure du courant de court-circuit	69
3-2-	Mesure de la tension à vide	69
<u>Chapitre 4 -</u>	Mesure d'un signal proportionnel à la valeur maximale de la puissance	70

4-1-	Recherche manuelle du maximum de puissance	70
4-2-	La mesure automatique	71
4-2-1-	La régulation extrémale	71
4-2-2-	Régulateur à mémoire et à maintient de l'extrémum	73
<u>Chapitre 5 -</u>	<u>Proposition d'un schéma électronique à régulation extrémale</u>	76
5-1-	Obtention d'un signal proportionnel à la puissance à réguler	76
5-2-	Fonctionnement du système régulateur	77
5-3-	Etude du schéma proposé	80

ANNEXES

- Annexe 1: Le rayonnement solaire et le Corps Noir
- Annexe 2: La jonction M-M
- Annexe 3: Calcul de la puissance optimale de la photopile
- Annexe 4: Mesure de la resistivité par la méthode des quatres pointes

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

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

L'énergie solaire offre l'intérêt d'être inépuisable gratuite et non polluante. De plus, elle peut être convertie directement en électricité par l'intermédiaire des cellules solaires ou photopiles. Ce type d'énergie nouvelle a été développé en raison de la crise énergétique et des besoins de l'industrie actuelle, notamment l'industrie spatiale. Elle a aussi son importance du fait que les réserves fossiles telles que le pétrole, le charbon paraissent limitées.

La photopile convertira cette énergie en électricité par un effet photoélectrique interne ou effet photovoltaïque; il apparaîtra alors à ses bornes une force électromotrice qui varie avec l'éclairement.

Le but de notre travail est de faire le point sur les photopiles. On analysera la théorie du fonctionnement ainsi que les différentes techniques de fabrication. Une étude comparative permettra de distinguer les diverses photopiles avec leurs applications correspondantes.

Dans une seconde étape, nous présenterons les principales techniques de mesures. Parmi celles-ci, nous nous intéresserons particulièrement à la recherche de la puissance optimale fournie par la cellule photovoltaïque. L'information précédente nous permettra de connaître le facteur de forme qui caractérise la performance de la photopile. La mesure du courant de court-circuit, de la tension à vide et la recherche de la puissance maximale obtenue grâce à un système automatique, serait un moyen de trier les photopiles de manière à les associer pour en faire des panneaux solaires.



## I. L'ENERGIE SOLAIRE

### 1-1. Exploitation de l'énergie solaire.

L'exploitation de l'énergie solaire et son utilisation sont variées.

-Production d'électricité par voie photovoltaïque ou thermodynamique pour une application terrestre.

-Batteries pour satellites et vaisseaux spatiaux.

-Pompes solaires pour l'alimentation en eau des oasis, des régions désertiques.

-Traitement à haute température dans les fours solaires (3600°).

-Chauffage des maisons.

-Dessalement des eaux de mer.

-Conversions biologiques et accélération des réactions biochimiques (photosynthèse).

-Production d'hydrogène par photoélectrolyse.

Cependant les réalisations actuelles sont rares et limitées. Les investissements en moyens de captage, de concentration et de stockage ainsi que d'autres facteurs économiques freinent l'exploitation de l'énergie solaire qui doit avoir une valeur industrielle appréciable dans un proche avenir et ce, par une éventuelle compétitivité de son prix de revient. Afin d'illustrer l'importance d'une telle énergie, on montre qu'en recouvrant le 1/1000 de la surface de la terre par des capteurs de rendement 5%, on recueillerait 60 milliards de MW.h annuellement, soit l'équivalent de 40 fois la consommation énergétique mondiale. Le rayonnement incident représente 5 à 10 fois l'ensemble des réserves énergétiques fossiles.

### 1-2. Variation de l'énergie solaire.

Subissant des lois aléatoires, la puissance de l'énergie solaire au niveau de la mer, varie suivant le climat

les saisons, le moment diurne, l'altitude et l'impureté de l'atmosphère. Au dessus des nuages, une surface plane horizontalement de 1 m<sup>2</sup> reçoit environ 1350 watts, par contre au niveau du sol, cette puissance varie de 0 à 1100 watts (1). Une telle variabilité du rayonnement solaire cause un problème d'exploitation (relevant de la discordance "offre-demande" de l'énergie solaire) : le stockage. Les fluctuations gênantes de cette énergie, ont fait penser à un capteur poursuivant le mouvement du soleil donc asservi en position par rapport à celui-ci; cet asservissement peut être continu ou échantillonné.

Convertie, cette énergie doit être stockée. La résolution de ce problème a eu pour idée première, l'utilisation d'accumulateurs à plomb qui sont les plus économiques, mais leurs poids fait leur défaut; en outre, ils ne sont utilisables que pour de petites installations.

Il est plus avantageux d'emmagasiner l'énergie solaire sous une forme plus chimique très condensée, en employant des procédés photochimiques (dissociation de l'eau à haute température grâce à la focalisation et récupération de l'hydrogène utilisé par la suite comme combustible). D'autres formes de stockage, demeurent dans le domaine de la recherche ou sont purement théoriques :

- Les rotors d'inertie, pour les fortes puissances (2).

- Fusion d'un métal et récupération de l'énergie lors de sa solidification.

- Conservation de l'énergie électrique dans des spires de supraconducteurs (2).

Les méthodes utilisées sont généralement limitées à quelques jours de stockage.

§

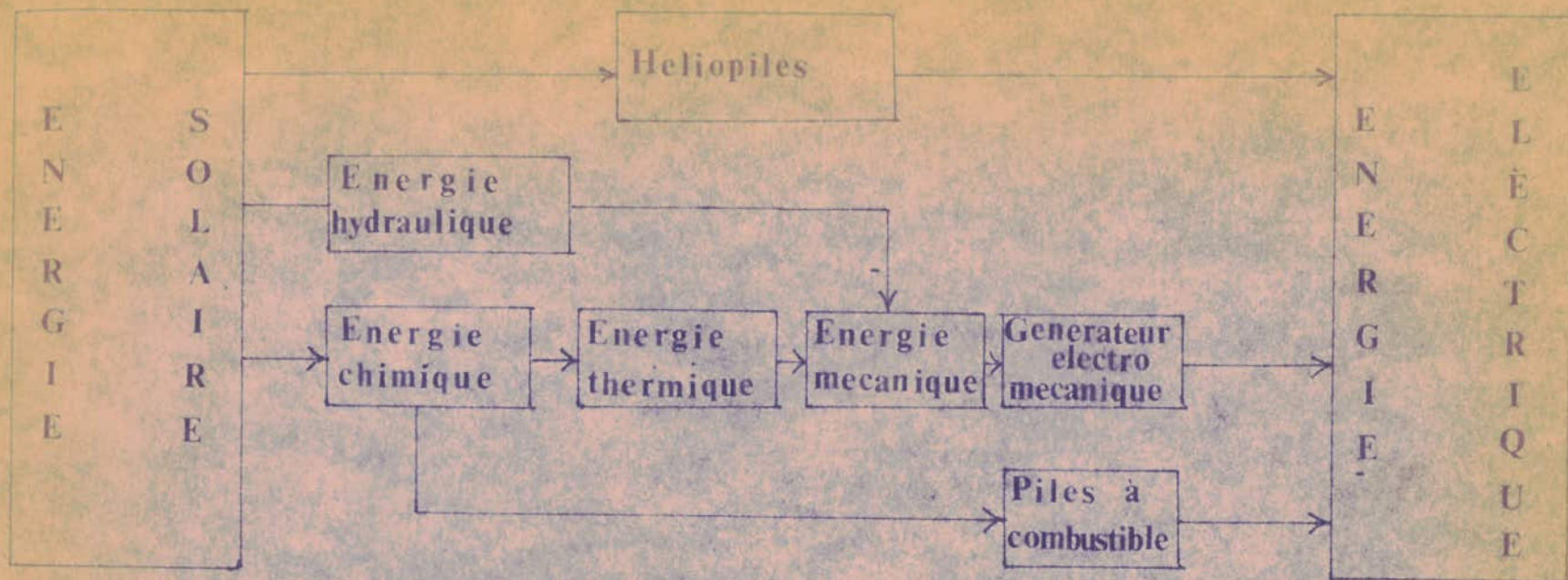


fig.(1,1) Transformations possibles de l'énergie solaire en énergie électrique

### 1- 3. Perspective et avenir de l'énergie solaire pour moyenne puissance.

Les fortes et moyennes puissances, correspondent ici aux énergies fournies respectivement par les fours et les panneaux solaires. Ces derniers étant l'assemblage de cellules photovoltaïques, peuvent faire l'objet d'une conception de microcentrales solaires susceptibles d'être installées dans les régions désertiques (sahara) de manière séante pour alimenter les stations de transmissions, les balises d'aérodromes, les relais de TV, et peut être des habitations pourvues d'éventuelles batteries. Actuellement on connaît quatre modes de conversion de l'énergie solaire :

- Conversion thermique
- " " thermoélectrique (thermopile)
- " " thermoionique
- " " photovoltaïque

La transformation thermique pratiquée dans les fours, est réservée essentiellement aux puissances élevées (MW) Pour des puissances moins importantes, la transformation photovoltaïque est plus utilisée, car le rendement des photocellules est relativement élevé ( 10 % ) (fig.1,1).

Placée dans un contexte plus général et comparée aux autres types d'énergies (nucléaire, pétrole, éolienne, marée) , la voie photovoltaïque n'est ni épuisable ni polluante. Le problème important est l'investissement énorme qu'elle demande pour la fabrication. La pile solaire dont le prix actuel est élevé, ne serait rentable industriellement que si elle était vulgarisée, ce qui diminuerait son prix. Ayant une durée de vie d'une vingtaine d'années, ces cellules solaires ne sont réellement rentables que pour un investissement à moyen terme (moins de 20 ans). Le problème de fiabilité reste toujours posé.

## II. LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Le flux d'énergie provenant du soleil nous parvient sous forme de rayonnement électromagnétique. Environ  $10^{-9}$  de cette énergie est captée par la terre ( annexe 1 )

### 2-1. Caractéristiques de ce rayonnement

La sensibilité spectrale du rayonnement solaire est décrite par la fig. (2, 1). Ce rayonnement est reçu sous forme de lumière dont la composition spectrale est la suivante :

-3 % d'ultra-violet

-42 % de visible

-55 % d'infrarouge.

On distingue deux sortes de rayonnement :

Le rayonnement direct. C'est celui qui n'est pratiquement pas absorbé par les couches nuageuses. La terre le reçoit directement et il est à incidence normale. Dans la direction du soleil, le ciel reste clair, sans nuages interposés.

Le rayonnement diffus. Une partie du rayonnement est diffusée par les molécules de gaz et des gouttelettes de vapeur d'eau. Elle parvient au sol sans direction privilégiée. C'est le cas quand le ciel est nuageux ou brumeux.

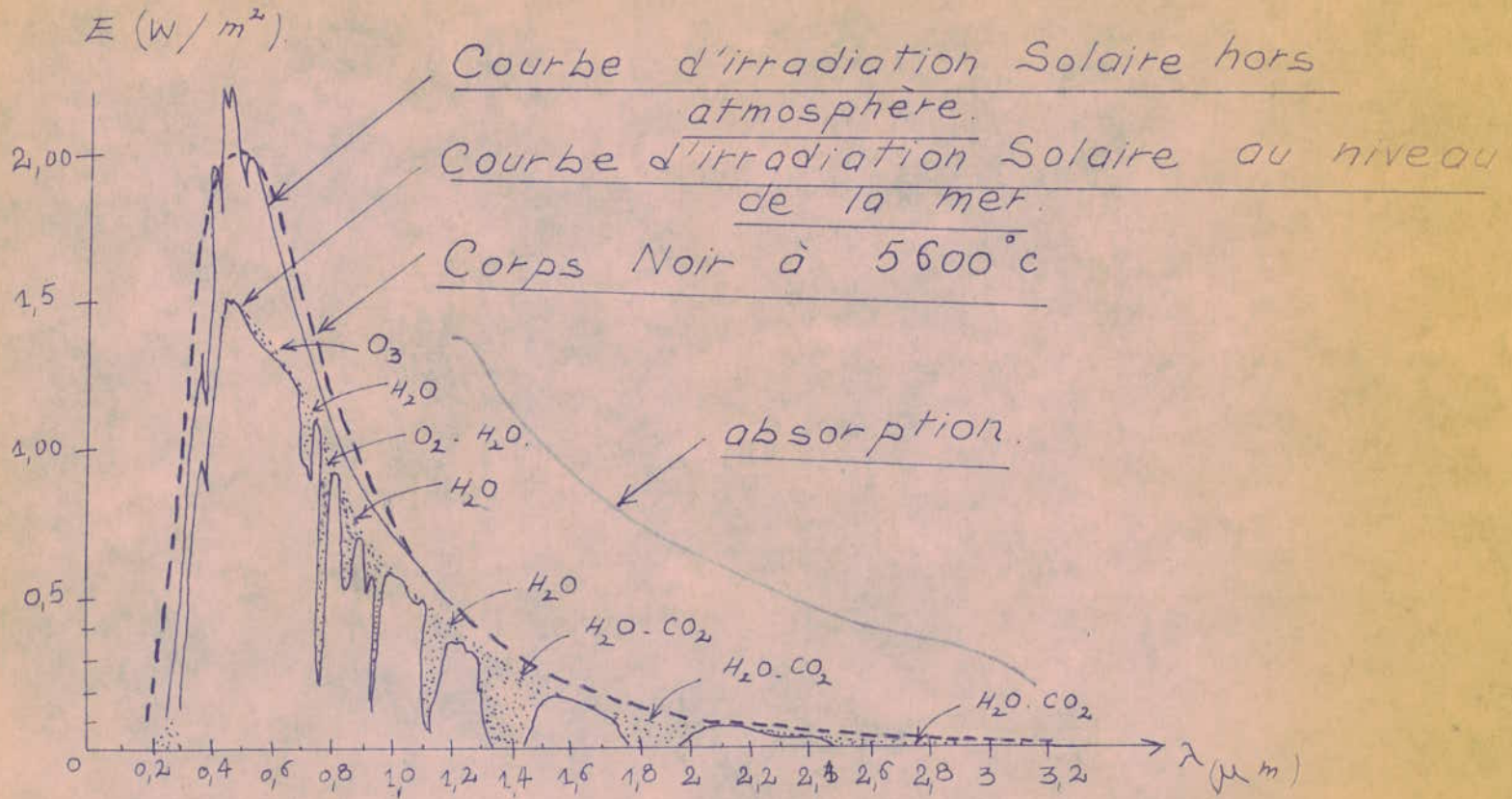
La sensibilité spectrale donc la puissance, varie selon que les radiations sont absorbées ou non par les couches atmosphériques, ce qui est montré dans la fig.(2, 1) par des chutes brusques (trous) à certaines fréquences.

### 2-2. Absorption du rayonnement solaire.

L'atmosphère est douée d'absorptions sélectives. Ces dernières sont dues à la présence de l'oxygène, de la vapeur d'eau et des gaz comme l'ozone et le  $CO_2$ . Comme exemple l'ultraviolet de longueur d'onde inférieur à  $0,29 \mu$  est absorbé par l'ozone de la haute atmosphère.

# Spectre Solaire

fig 2,1 hors atmosphère et au niveau de la mer



Bandes d'absorption des différents constituants de l'atmosphère.

-Ozone ( $O_2+O$ ): Fortes bandes (pics) entre 0,2  $\mu$  et 0,3  $\mu$ , faibles bandes entre 0,45 et 0,75  $\mu$

-Oxygène: Faibles bandes vers 0,69 et 0,75  $\mu$

-Gaz carbonique: Bandes étroites très faibles vers 1,6 et 2,0  $\mu$ , fortes bandes centrées sur 2,75  $\mu$  et sur 4,25  $\mu$ .

-Vapeur d'eau: Fortes bandes entre 0,7 et 2,9  $\mu$

On définit le rayonnement global G comme étant l'éclairement énergétique, d'une surface horizontale, par les rayonnements directs S et diffus D.

Pour le flux direct, il importe de prendre la composante utile, correspondant à la normale à la surface réceptrice. Si h est l'inclinaison du soleil par rapport au point considéré, la composante utile serait:

$$S = I \sin h$$

Où I est le rayonnement provenant seulement du disque solaire, alors:

$$G = I \sin(h) + D \quad (4)$$

D ne peut être connu précisément, car la répartition angulaire de ce rayonnement suit des lois complexes car les paramètres, hauteur du soleil, impureté de l'atmosphère, entrent en jeu.

Par ciel couvert, la relation empirique d'Angström donne la valeur de D :

$$D = D_0 \quad (0,235 + 0,765 \cdot \frac{S}{S_0})$$

D  $\neq$  rayonnement vrai.

$D_0$ : " " théorique.

$S_0$ : durée d'insolation théorique.

S: " " mesurée. (6)

2.3. Distribution spectrale des photons dans la lumière solaire :

Une radiation correspondant au rayonnement d'une seule fréquence, est un transport de photon, d'énergie

$$W = h \mu = u.$$

$h$  = constante de Planck.

$\mu$  = fréquence de la radiation.

On remarque ici que les radiations de l'ultra-violet sont les plus énergétiques, donc les plus aptes à exciter les électrons des cellules photovoltaïques. La représentation spectrale des photons solaires est donnée par la courbe de la fig. (2,2). Elle exprime le rapport du nombre de photons  $dE$  à la largeur d'énergie  $du$ , en fonction de l'énergie des photons  $u$ . Pour un état stationnaire cette quantité est constante. Cette distribution spectrale est donnée aux trois conditions suivantes:

- Au soleil, sur un plan de front, dans l'exosphère
- Au " " " " " " " " , au niveau de la mer.
- Avec la lumière du corps noir à 5760° K.

On remarque ici que le spectre du corps noir correspond dans le domaine du visible (1,7 eV à 3 eV) à la distribution spectrale relative de la lumière moyenne du jour, au niveau de la mer; cet ~~éclairage~~ <sup>éclairage</sup> a servi de lumière conventionnelle pour plusieurs études concernant le rendement théorique des cellules photovoltaïques. (cf. annexe 1).



3-1. Généralités.

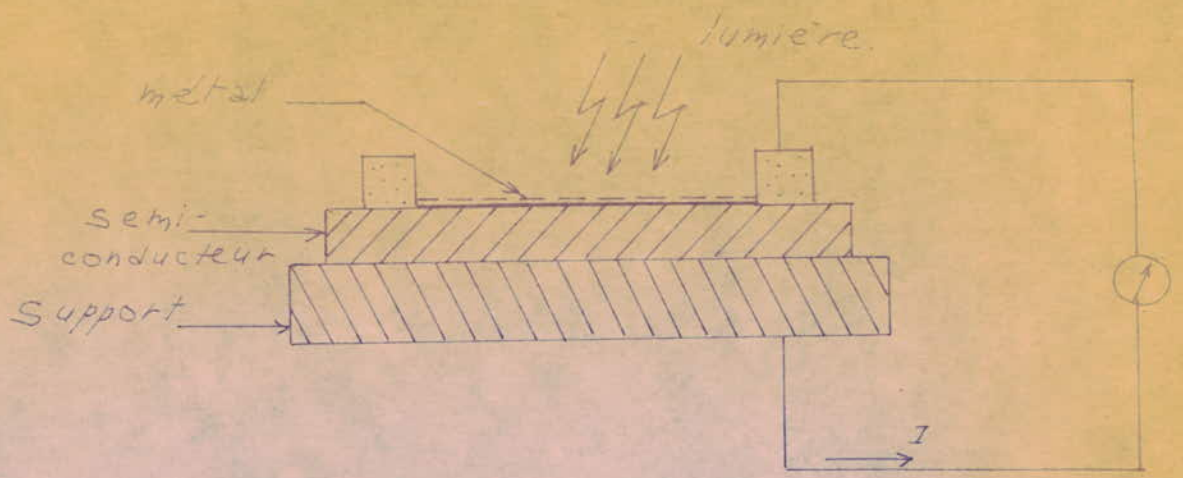
La photopile est un capteur photovoltaïque simple, statique et fiable. Elle transforme directement en électricité l'énergie lumineuse reçue. En effet sans qu'il soit besoin d'un potentiel accélérateur quelconque, la lumière crée un courant électrique aux bornes de la photopile. Cette cellule photovoltaïque peut donc être considérée comme un générateur de courant lorsqu'elle est soumise à la lumière (figure 3,1).

Elle est constituée soit par la jonction d'un métal et d'un semi-conducteur, soit par la jonction de deux semi-conducteurs. On rencontre aussi des photopiles de constitution hybride: comme les cellules hétérojonctions qu'on verra plus loin.

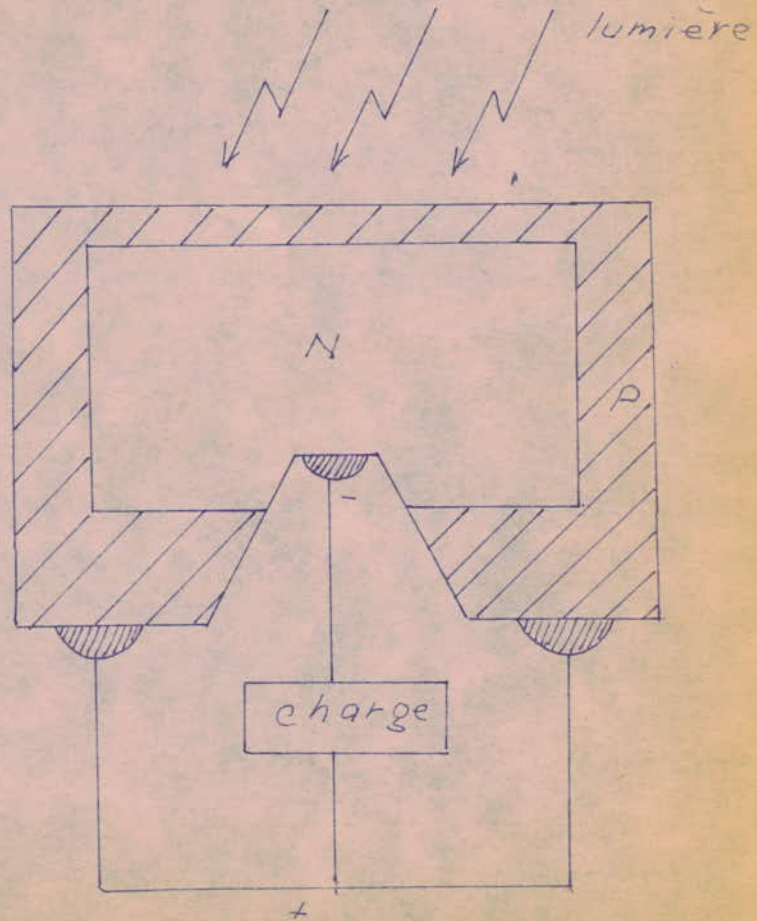
L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une force électromotrice à la jonction quand cette dernière est soumise à l'action de la lumière. Elle est de 700mV en moyenne. Le courant de court-circuit atteint 500mA .

Les photons énergétiques frappant une partie de la cellule sont susceptibles de créer des paires "électron-trou". On observe un effet photovoltaïque quand la séparation des charges élémentaires de signes opposés, s'opère avant qu'il y ait eu possibilité de recombinaisons. La barrière de potentiel qui existe entre deux régions de types N et P est capable d'opérer cette séparation. L'énergie excédentaire communiquée à la charge libérée une quantité de mouvement rapidement transformée en chaleur(phonons).

La figure(3,1) décrit une photopile classique. Cette cellule comprend une couche mince de semi-conducteur déposée sur un support en acier doux. Le semi-conducteur est ensuite recouvert d'une couche métallique très fine et transparente. Le métal qui forme ainsi la surface sensible de la jonction peut être en Or / Ou ou en argent. Le substrat en acier



Cellule Solaire Métal-Semiconducteur



Cellule Solaire à jonction PN

Fig 3,1

doux, constitue l'une des électrodes, l'autre étant formée par un anneau de peinture conductrice placé sur la surface sensible. Le semi-conducteur utilisé est le silicium, le sélénium, le sulfure de cadmium ou le sulfure de plomb. Il existe aussi des batteries solaires à jonction P-N qui comportent une plaquette de semi-conducteur de type N (pastille de 5 cm  $\phi$  et 300  $\mu$  d'épaisseur) recouverte d'une très mince couche de semi-conducteur de type P, qui est obtenue par diffusion et dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques microns.

Les contacts électriques qui relient la photopile au circuit extérieur ne doivent pas présenter d'effet redresseur, et surtout pas d'effet photovoltaïque parasite. Pour éviter cet inconvénient, on les dispose à l'arrière de la cellule solaire.

#### Choix du semi-conducteur.

Le choix du semi-conducteur sera déterminé par le rendement de transfert photons-paires "électron-trou". La courbe de la figure (3,2) montre la variation de ce rendement en fonction de la bande interdite d'énergie  $E_g$ . On remarque que le saut  $E_g$  d'énergie (gap) le plus favorable se situe entre 1 eV et 1,2 eV d'où le choix du silicium pour les jonctions PN qui est très utilisé pour la fabrication des photopiles (son gap étant de 1,1 eV).

Le rendement des photopiles dépasse rarement 20 %. En pratique, il est de l'ordre de 14 % pour le silicium. C'est la raison pour laquelle les piles solaires se limitent à des installations de faibles puissances (de l'ordre d'une centaine de watts), destinées à l'alimentation des récepteurs isolés (ex. relais de T.V.). Les photopiles peuvent être associées en série ou en parallèle pour former des panneaux solaires qui délivrent une puissance fonction du nombre de cellules solaires associées.

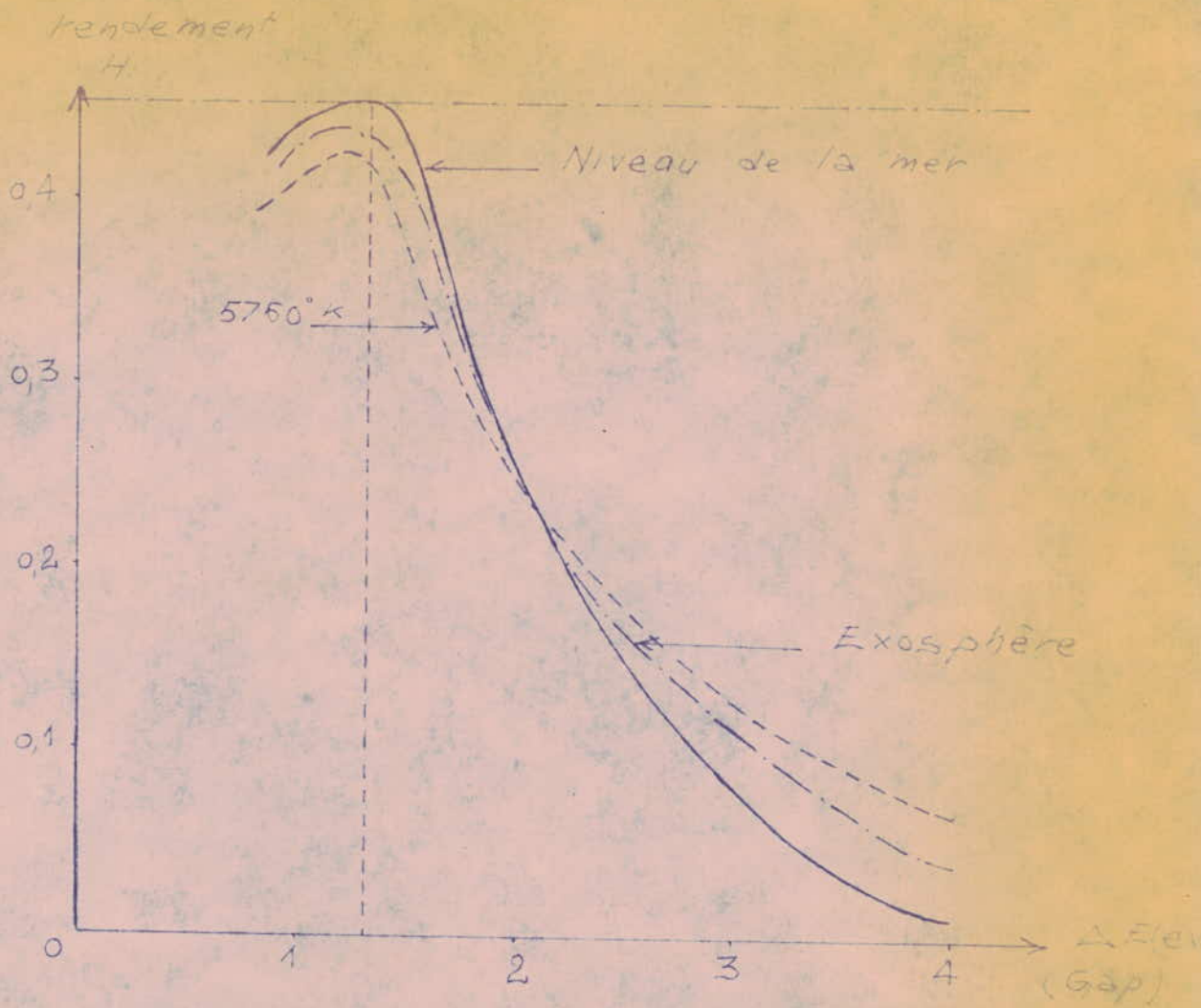


fig. 3,2. Variation du rendement en  
fonction de la largeur de la  
bande interdite  $\Delta E$ .

### 3-2- -PHOTOPILES A JONCTION P . N .

#### Formation de la jonction P.N.

Selon des technologies qu'on verra plus loin, on peut réaliser un contact parfait entre le semiconducteur de type P et celui de type N. La région au niveau de laquelle le nombre d'atomes donneurs est égal au nombre d'atomes accepteurs, est appelé e jonction.

#### Diagrammes énergétiques:

Chaque semiconducteur dopé (P ou N) a son diagramme d'énergie (~~annexe #~~). Après le contact entre le semiconducteur P et N, le niveau de Fermi ne varie plus en fonction de la distance. A l'équilibre, il est du même niveau dans tout le semiconducteur (P.N). La figure (3,3) décrit les niveaux d'énergie au niveau de la jonction ainsi que le comportement des porteurs majoritaires et minoritaires dans la région de cette jonction.

#### 3-2-1-Principe de fonctionnement:

##### 3-2-1-1. Cellules éclairées en court-circuit:

Si un photon éclaire la cellule et si son énergie est supérieure à la bande interdite d'énergie du semiconducteur, alors l'absorption de ce photon par un électron de valence donnera naissance à une paire "électron-trou". Si la cellule est en court-circuit, la d.d.p. entre les deux régions est inchangée; Les débits des porteurs minoritaires ( $w_n^-$  et  $w_p^-$ ) sont augmentés de la contribution photoélectrique, alors que les débits des majoritaires ( $w_n^+$  et  $w_p^+$ ) sont restés ce qu'ils étaient à l'équilibre. En fait, quand la cellule n'est pas éclairée et à l'équilibre thermo-dynamique, les débits des majoritaires et des minoritaires se compensent par diffusion.

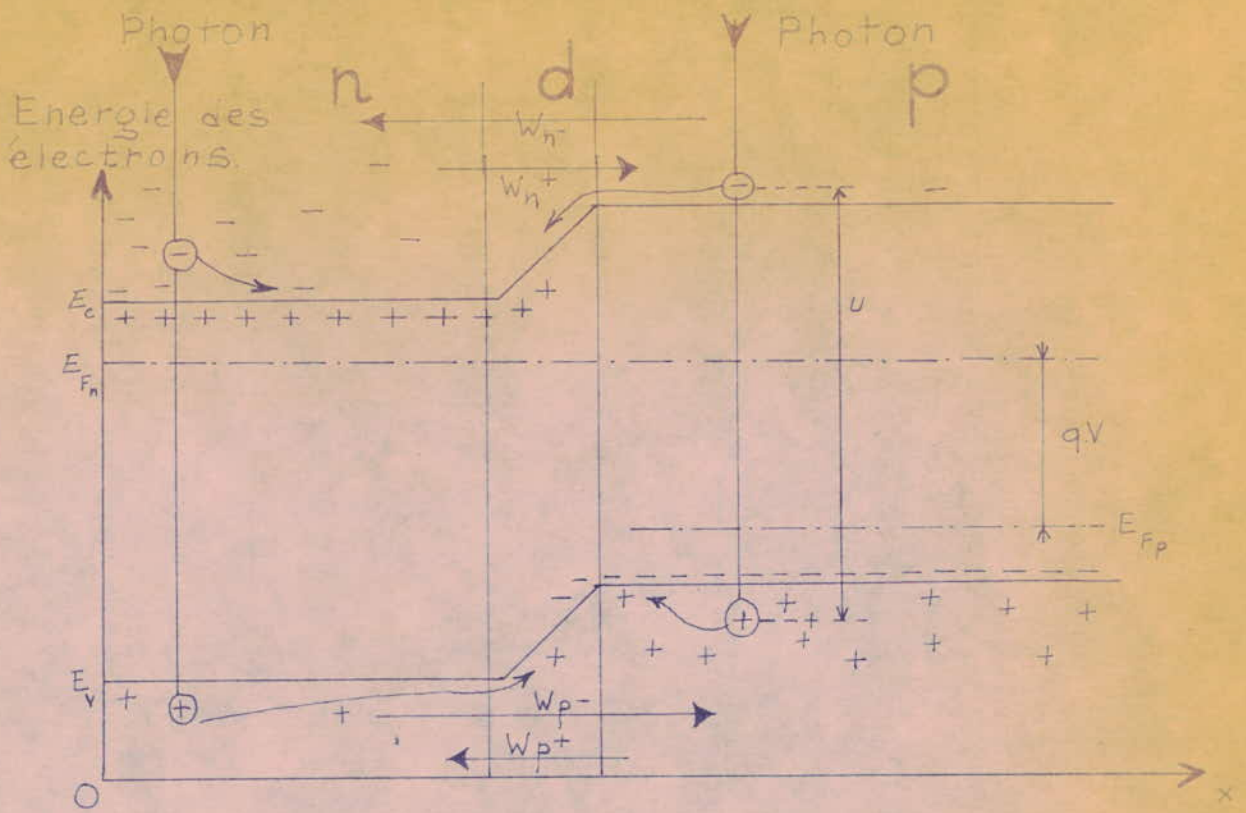


fig. 3,3 Diagramme énergétique d'une jonction P.N.

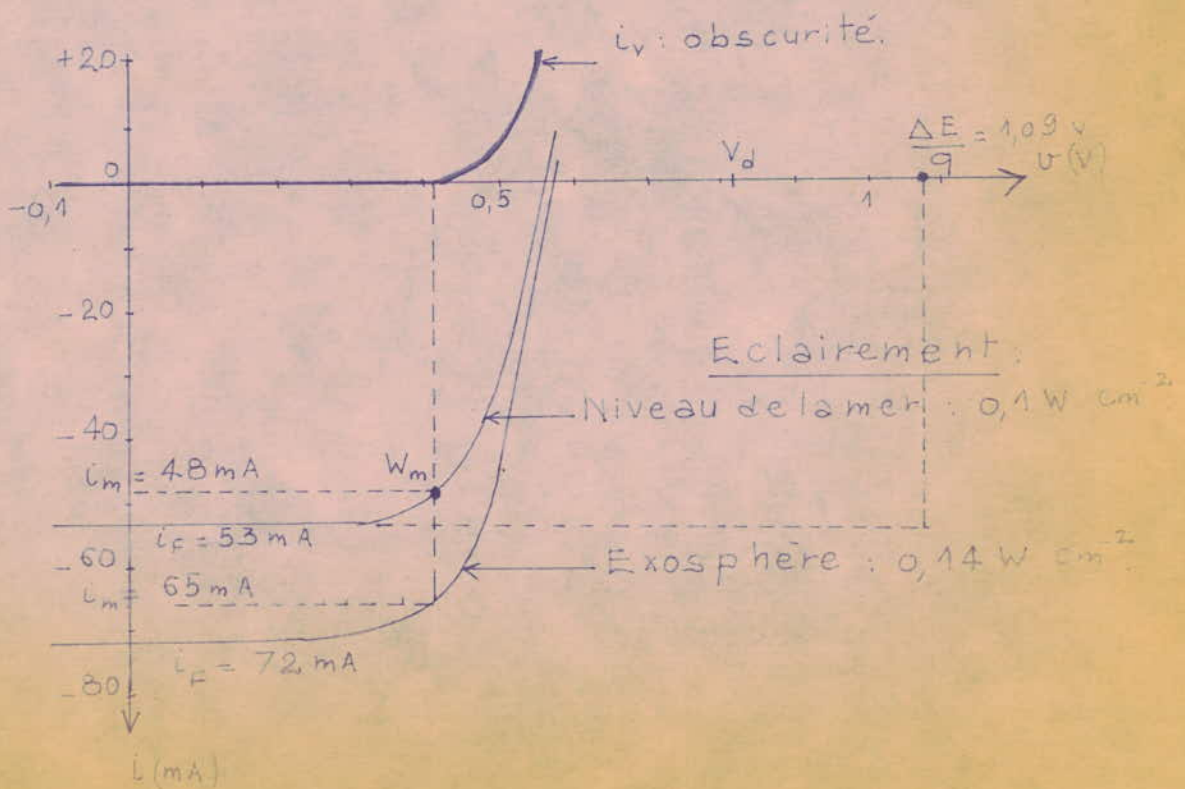


fig. 3,4 Caractéristique  $(I, V)$  d'une cellule au silicium.

Soit  $F$  le flux de photons absorbés et supposant que tous les porteurs minoritaires libérés sont collectés par la jonction, on trouve que le courant de court-circuit vaut :

$$i_f = - qF$$

En pratique, il est intéressant de connaître la relation entre le courant  $i_f$  et le flux  $F$  reçu. On doit alors tenir compte de diverses causes de pertes de photons (réflexion, transmissions, absorptions parasites) et de minoritaires (recombinaisons dans le volume de semi-conducteur et aux surfaces libres), si bien que l'on aura une relation de la forme :

$$i_f = - qKF$$

$K$  : coefficient qui dépend de la composition spectrale de la lumière incidente et de la structure géométrique, chimique et cristalline de la cellule. Il est inférieur à l'unité.

### 3-2-1-2. Cellules polarisées dans l'obscurité

Soit une d.d.p.  $V$  aux bornes de la cellule. Dans ce cas la hauteur de la barrière de potentiel est modifiée et devient :

$$W_n - W_p = V_d - V$$

$V_d$  représente la barrière de potentiel.

Suivant que la polarisation est directe ou inverse ( $V$  positif ou négatif), les débits positifs ( $w_n^+$  et  $w_p^+$ ) c'est-à-dire les majoritaires, sont favorisés ou défavorisés par rapport aux débits négatifs ( $w_n^-$ ,  $w_p^-$ ) c'est-à-dire les minoritaires qui restent constants. Le courant qui traverse alors la jonction varie avec la d.d.p. ( $V$ ) suivant une loi exponentielle.

En polarisation positive, le courant croît très vite avec la d.d.p.  $V$ . Les chutes de potentiel dans les contacts et dans le matériau semi-conducteur deviennent vite importantes si bien qu'il est pratiquement impossible d'annuler la barrière de potentiel.

Sous éclairement, le courant  $-i_f$  qui est pratiquement indépendant de  $W_n - W_p$  (sauf pour  $W_n - W_p$  inférieur à  $\frac{KT}{q}$ ) s'ajoute toujours au courant d'obscurité  $i_v$  si bien que la caractéristique (courant-tension) de la jonction éclairée peut être déduite de la somme des deux termes:

$$i = i_v - i_f$$

$i_v$  dépend seulement de  $V$  (polarisation) et  $i_f$  seulement de  $F$  (flux lumineux). La fig. (3,4) décrit la caractéristique (I-V) d'une cellule au silicium de diamètre 15mm à la température de 35°C.

On constate que, dans le quatrième quadrant où  $V$  est positif et  $i$  négatif, la cellule se comporte comme un générateur d'énergie. On voit qu'au point de puissance maximale  $W_m$ , le courant débité  $i_m$  est inférieur à  $i_f$ , et la différence de potentiel  $V_m$  est inférieure à la différence de potentiel de circuit ouvert ( $i = 0$ ), qui est plus petite elle-même que  $E_g/q$ . Notons que cette caractéristique est donnée au niveau de la mer et en exosphère.

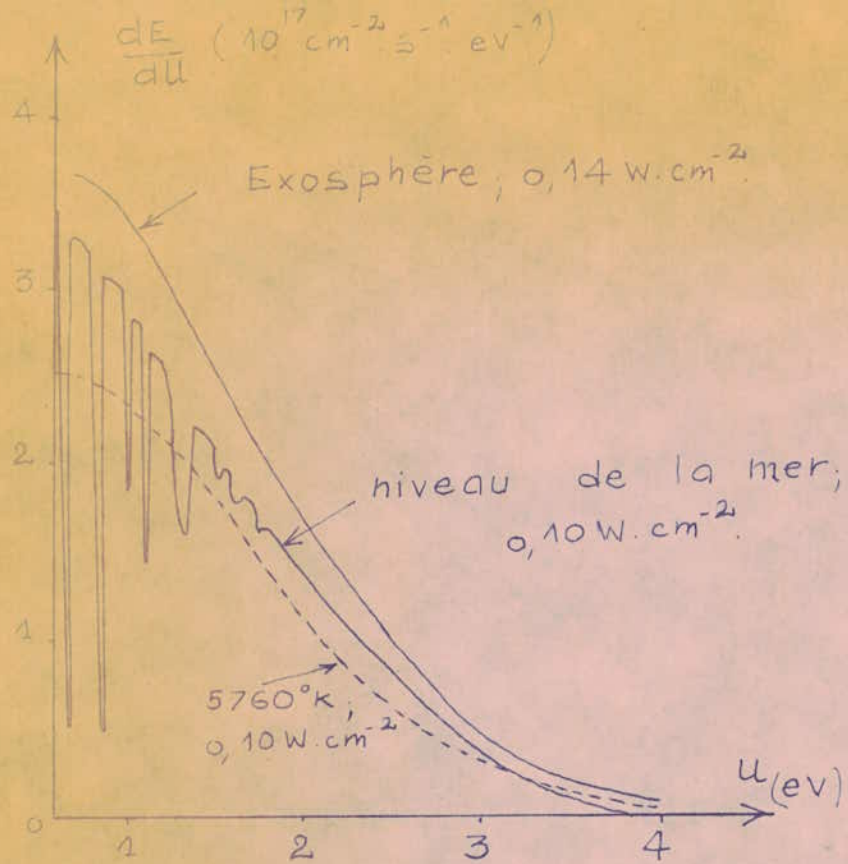
L'étude du transfert de l'énergie des photons à la charge placée dans le circuit extérieur peut être décomposée en trois phases distinctes :

- Formation de paires "électron-trou" par absorption de photons.
- Diffusion de porteurs minoritaires libérés jusqu'aux frontières de la couche de charge d'espace.
- Transfert de l'énergie des minoritaires (collectés à la barrière de potentiel) à la charge placée dans le circuit extérieur.

Les pertes qui interviennent sont dues:

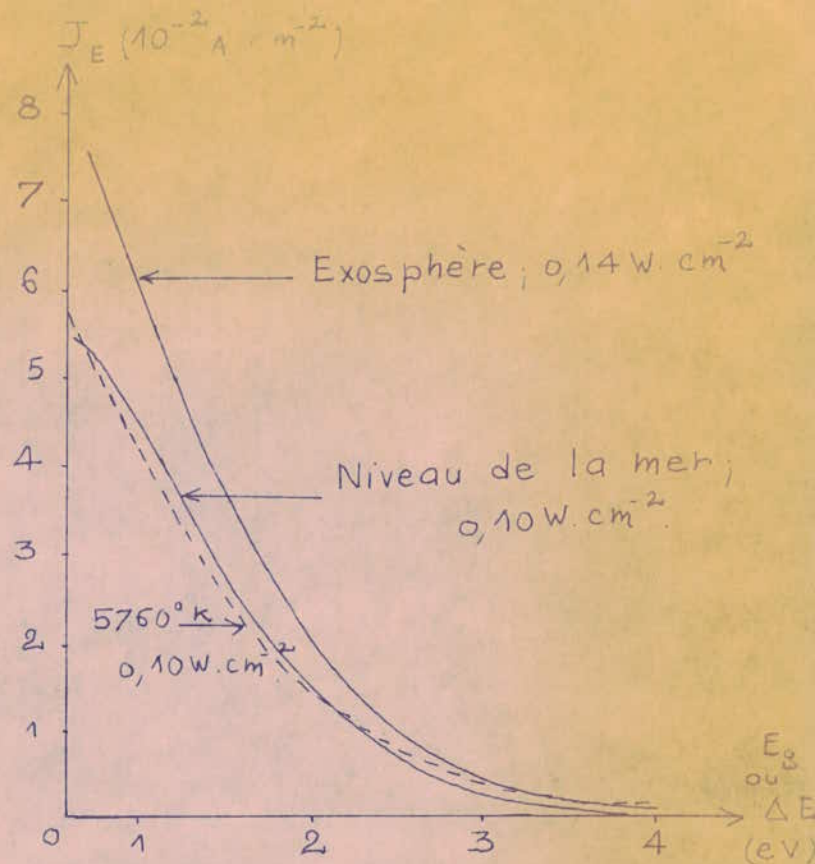
- Aux réflexions à la surface de la cellule.
- Aux résistances intérieures à la cellule au matériau semi-conducteur et aux contacts.





distribution Spectrale des Photons.

fig. 2,2



Variation du courant photoelectrique avec la Largeur de bande interdite.

fig. 3,5

### 3-2-1-3. Densité maximale du courant photoélectrique

Si l'on admet que les pertes par réflexion et par transmission dans la cellule sont négligeables, que tous les photons absorbés, dont l'énergie  $u$  est supérieure à  $E_g$  ( bande d'énergie interdite ), donnent une paire "électron-trou", et que toutes les charges minoritaires contribuent au courant photoélectrique, ce courant  $i_f$  vaudra :

$$i_f = q \cdot \int_{E_g}^{\infty} \frac{dF}{du} \cdot du,$$

ou, dans le cas d'une géométrie unidimensionnelle pratiquement valable ici, on a la densité courant qui s'écrit :

$$J_E = q \cdot \int_{E_g}^{\infty} \frac{dE}{du} \cdot du,$$

$E$  représente l'éclairement.

La fig. (3,5) représente la variation du courant photoélectrique, ainsi calculé en fonction du saut d'énergie  $E_g$  du matériau semi-conducteur.

### 3-2-2 Rendement du transfert photoélectrique

Toute l'énergie des photons absorbés n'est pas utilisée. En effet, si l'énergie  $u$  est sensiblement supérieure à  $E_g$ , l'excédent  $u - E_g$  est cédé à l'électron sous forme d'énergie cinétique, énergie qu'il perd rapidement par collision avec les phonons : Cette énergie ne sert qu'à élever la température du cristal. La majorité des électrons libres des trous se trouve respectivement entre les niveaux  $E_c + kT$  et  $E_c$  d'une part et  $E_v$  et  $E_v - kT$  d'autre part. Il résulte de cette remarque que quelque soit l'énergie du photon, celle recueillie par une paire électron-trou n'est guère supérieure à  $E_g$ .

Le rendement énergétique du transfert ou rendement photonique est donc égal à :

$$H = \frac{E_g \cdot \int_{E_g}^{\infty} \frac{dP}{du} du}{\int_0^{\infty} u \frac{dP}{du} du} \quad (16)$$

C'est le rapport entre la puissance recueillie sous forme de paires "électron-trou" à la puissance totale des photons incidents.

Ce rendement peut être aussi formulé par l'intégrale de la fonction de Planck. Dans ce cas l'énergie incidente par rapport à la surface est proportionnelle à la quantité suivante :

$$B = \int_0^{\infty} \frac{u^3 du}{(e^u - 1)}$$

l'énergie capable d'exciter des paires, donc transformable en énergie électrique est proportionnelle à la quantité :

$$A = u_g \int_{u_g}^{\infty} \frac{u^2 du}{(e^u - 1)}$$

avec  $u = \frac{hu}{kT_s}$  ;  $u_g = \frac{E_g}{kT_s}$  ( $T_s$  est la température de la source  $T_s = 6000^\circ \text{ K}$  si le soleil est assimilé à un corps noir).

Le rendement photonique est alors égal à  $H = \frac{A}{B}$  c'est à dire :

$$H = \frac{u_g \int_{u_g}^{\infty} \frac{u^2 du}{e^u - 1}}{\int_0^{\infty} \frac{u^3 du}{e^u - 1}} \quad (18)$$

La figure (3,6) donne la variation de  $\frac{u dE}{du}$  fonction de  $u$ . L'aire totale représente toute l'énergie des photons incidents.

### Les énergies:

- Non absorbée (  $\int_0^{E_g} u \frac{dE}{du} du$  ),
  - Recueillie sous forme de paires ( $E_g \int_{E_g}^{\infty} \frac{dE}{du} du$ )
  - Transformée en chaleur ( $\int_{E_g}^{\infty} (u-E_g) \frac{dE}{du} du$ )
- sont décrites dans la fig. (3,6) respectivement par l'aire (1), (2), (3).

### 3-2-3-3 Rendement de la jonction

Pour une cellule donnée, la puissance recueillie à la barrière de potentiel sous forme de porteurs minoritaires d'origine photoélectrique est égal à  $(E_g/q) \cdot i_f$ .

Pour la caractéristique obtenue avec le flux  $F$ , la puissance fournie par la cellule au circuit extérieur dépend du point de fonctionnement choisi. Elle est maximum au point de coordonnées  $(V_m, I_m)$  (voir caractéristique 3,4).  
 $P_m = V_m I_m$ . Le rendement de la jonction est alors:

$$M = \frac{V_m \cdot I_m}{\frac{E_g}{q} \cdot i_f}$$

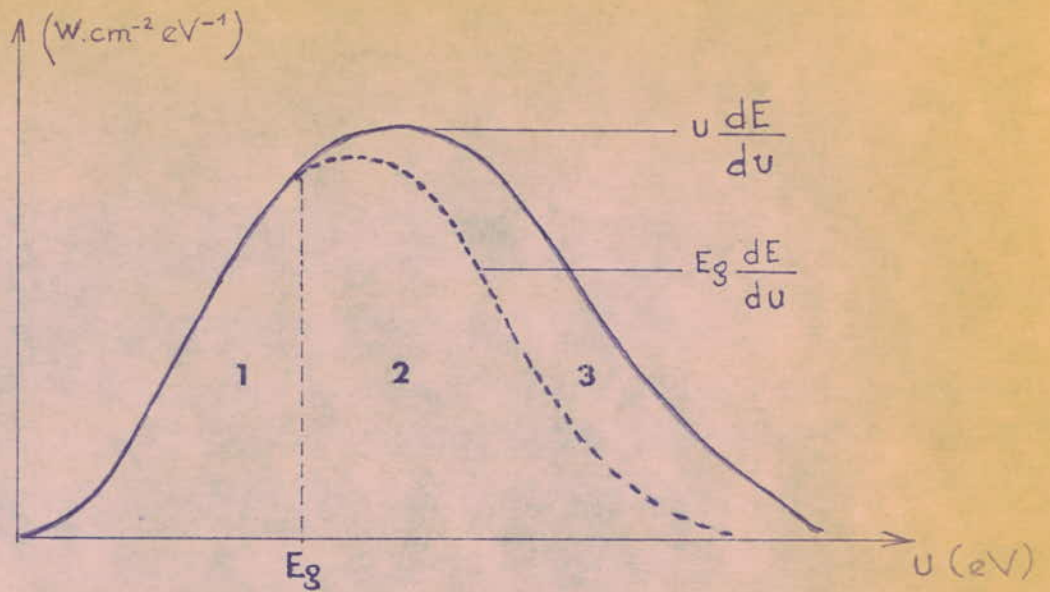
### 3-2-4.4 Rendement global R de la photopile

Le rendement  $H$  du transfert photons-paires maximale pour le silicium, est une fonction décroissante de  $E_g$  alors qu'au contraire le rendement de jonction  $M$  est une fonction croissante. Le rendement maximale théorique  $R$ , ici égal à  $HM$ , dépend peu du saut d'énergie  $E_g$  dont l'intervalle (1-1,5) eV. Ordre de grandeur pour une photopile au silicium

$$H \leq 0,45$$

$$M \leq 0,44$$

$$\text{d'où } R \leq 0,2$$



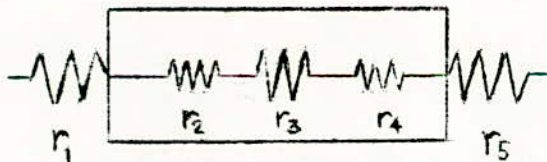
Fig(3,6). Analyse du rendement dans le transfert de l'énergie des photons aux paires "electron-trou".

1-3-2-5- Influence des paramètres de la photopile sur le rendement et facteurs limitatifs.

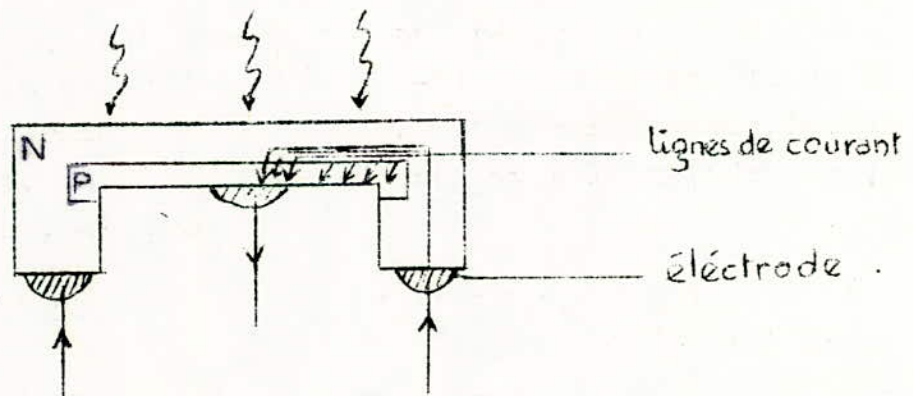
3-2-5-1 Influence de la résistance serie  $R_s$ .

C'est l'un des facteurs limitatifs le plus important qui affecte beaucoup le rendement, car elle est en série avec la charge aux bornes de la photopile. La puissance optimale est conditionnée par cette résistance série qui modifie donc la caractéristique (I-V) de la photopile de manière à diminuer le produit  $V_m \cdot I_m$ . Cette résistance diminue avec l'éclairement, de même qu'elle varie avec la température; dans ce dernier cas, elle augmente.

Origine de cette résistance: Elle est due aux contacts des électrodes avec le semi-conducteur et à la résistance intérieure homogène de celui-ci. En effet, si la soudure à la surface de séparation semi-conducteur -électrode n'est pas de qualité, alors les lignes de courant qui traversent la jonction se déforment d'où une perte par effet Joule de la puissance utile.



$$R_s = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5$$



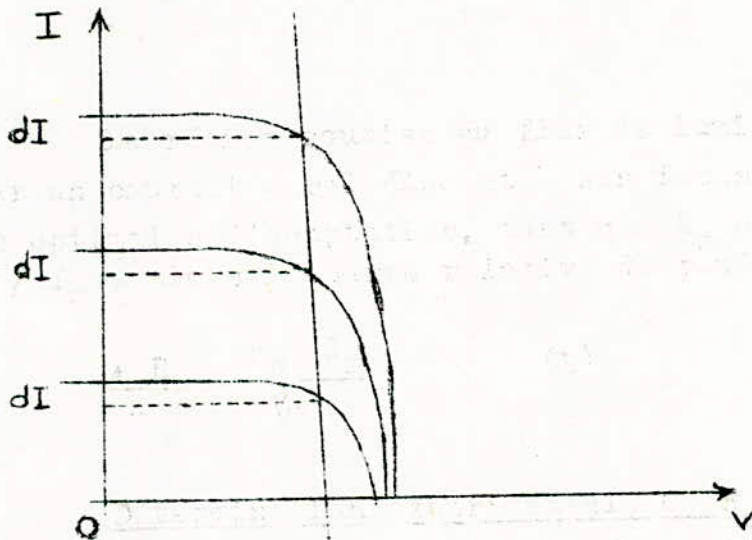
La région soumise au flux de lumière est traversée par un courant parallèlement à ses faces. Dans les conditions optimales d'adaptation, tant que  $R_s$  est petite devant  $V_m / I_m$ , alors la perte relative de rendement est :

$$\frac{dR}{R} = \frac{R_s I_m}{V_m} \quad (16)$$

### Détermination expérimentale de $R_s$ (31)

Soit la caractéristique (I-V) d'une photopile. On choisit un intervalle  $dI$  de courant et on note les points sur la courbe, pour lesquels  $I = I_{cc} - dI$ .

On effectue cette opération pour trois ou quatre éclairagements différents; On trace alors la droite qui joint ces points de la courbe. Cette droite aura pour pente  $R_s = \frac{dV}{dI}$



Pour des niveaux de puissances inférieures à  $30 \text{ mW/cm}^2$ , la relation (I - V) est :

$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) - I_{cc}$$

Pour des niveaux de puissances tels que  $50 \text{ mW/cm}^2$  à  $400 \text{ mW/cm}^2$ , alors l'effet de  $R_s$  intervient et on a :

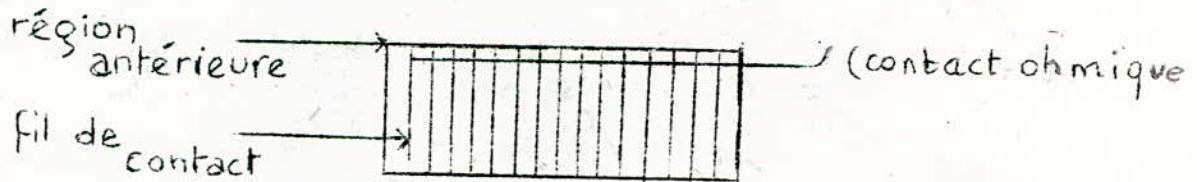
$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V - R_s I)}{kT} \right) - 1 \right) - I_{cc}$$

Ordre de grandeur de  $R_s$ : Pour la cellule au silicium, elle varie de 0,561ohms à 0,958ohms, pour différentes proportions.

### Réduction de la résistance $R_s$ .

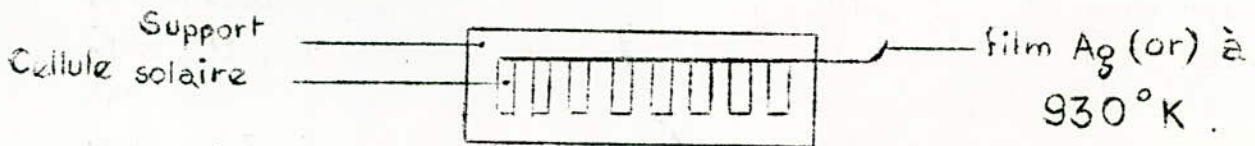
C'est un problème important qui se pose à la technologie des cellules solaires. Un compromis existe entre l'épaisseur de la région antérieure éclairée et la résistance série. En effet si l'on diminue l'épaisseur de cette région, la probabilité pour qu'un photon soit absorbé est élevée, ce qui fait augmenter la contribution du courant photoélectrique. Parallèlement la résistance série augmente (voir fabrication). Il en résulte l'existence d'une épaisseur optimale de la région antérieure.

Une solution pour diminuer la résistance série est le contrôle de la géométrie de la cellule et de la concentration d'impuretés dans cette cellule. Si la région antérieure est constituée en grilles (figure ci-dessous), alors la résistance série diminue et par variation de la caractéristique (I-V), la puissance optimale augmente alors que le courant  $I_{cc}$  diminue à cause de la réduction de la région active de la cellule.



En fait, cette cellule devient composée d'une infinité de cellules qui sont mises en parallèle moyennant un contact ohmique de bonne qualité.

La mise en parallèle des cellules solaires permet aussi la réduction de la résistance série. Les contacts ohmiques de ces cellules sont réalisés par évaporation d'une couche d'or ou d'argent à 930° K.





### 3-2-5-2 Résistance parallèle $R_0$ .

La cause principale de l'existence de cette résistance est liée aux effets de surface de la cellule. En effet si la surface du matériau utilisé n'est pas parfaite, (existence de fissures) alors, elle devient le siège de phénomènes physiques assimilables à une résistance. Au niveau de la jonction, le phénomène est nuisible. Notons que cette résistance a tendance à augmenter quand la diode ( cellule ) fonctionne sous rayonnement.

### Réduction de cette résistance .

La technologie planar est capable de réduire cette résistance.

On dépose une couche de dioxyde de silicium, obtenue par voie thermique, au niveau de la jonction. Ceci réduit les effets de surface et par conséquent se traduit par un meilleur contrôle des caractéristiques du dispositif.

### 3-2-5-3 Capacité de la jonction.

Son influence intervient quand la cellule travaille en signaux variables.

La valeur de la capacité dépend de l'injection des photons et donc du passage des minoritaires à travers la jonction. Pour une cellule au silicium de surface:  $(1/3) \text{ cm}^2$ ; elle est égale à 12.000pF .

### 3-2-5-4 Autres facteurs limitatifs du rendement .

La puissance utile augmente dans le même sens que  $V_0$  et  $I_{cc}$ . La limite supérieure de  $V_0$  est  $(E_g / q)$ . En effet la tension créée aux bornes de la cellule par effet photovoltaïque agit comme une tension de polarisation positive et au moment où elle devient égale à la tension de la barrière de potentiel qui est pratiquement égale à  $(E_g / q)$ , alors la barrière de potentiel s'élimine. Donc:  $V_0 < E_g / q$  .

Pour  $I_{cc}$ , il est limité par les recombinaisons en volume, en surface, et les dislocations qui peuvent exister.

Limitation due à l'absorption: Soit  $(\alpha)$  le coefficient d'absorption du semi-conducteur relativement à la radiation.

Seules les longueurs d'ondes voisines de  $(1/\alpha(\lambda_0) = \bar{x})$  contribuent à la conversion. Le semi-conducteur est transparent pour les radiations de longueurs d'ondes supérieures à  $\lambda_0$ , tandis que les recombinaisons annihilent les effets des radiations de longueurs d'ondes inférieures à  $\lambda_0$ ; en effet, les photons de très courtes longueurs d'ondes sont très rapidement absorbés au voisinage de la face d'entrée de la cellule. (18)

Soit  $F$ , le flux de photons non encore absorbés après avoir traversé une épaisseur  $x$  du matériau et  $F_0$  le flux de photons incidents. On a alors :

$$F = F_0 \cdot e^{-(\alpha) \cdot x}$$

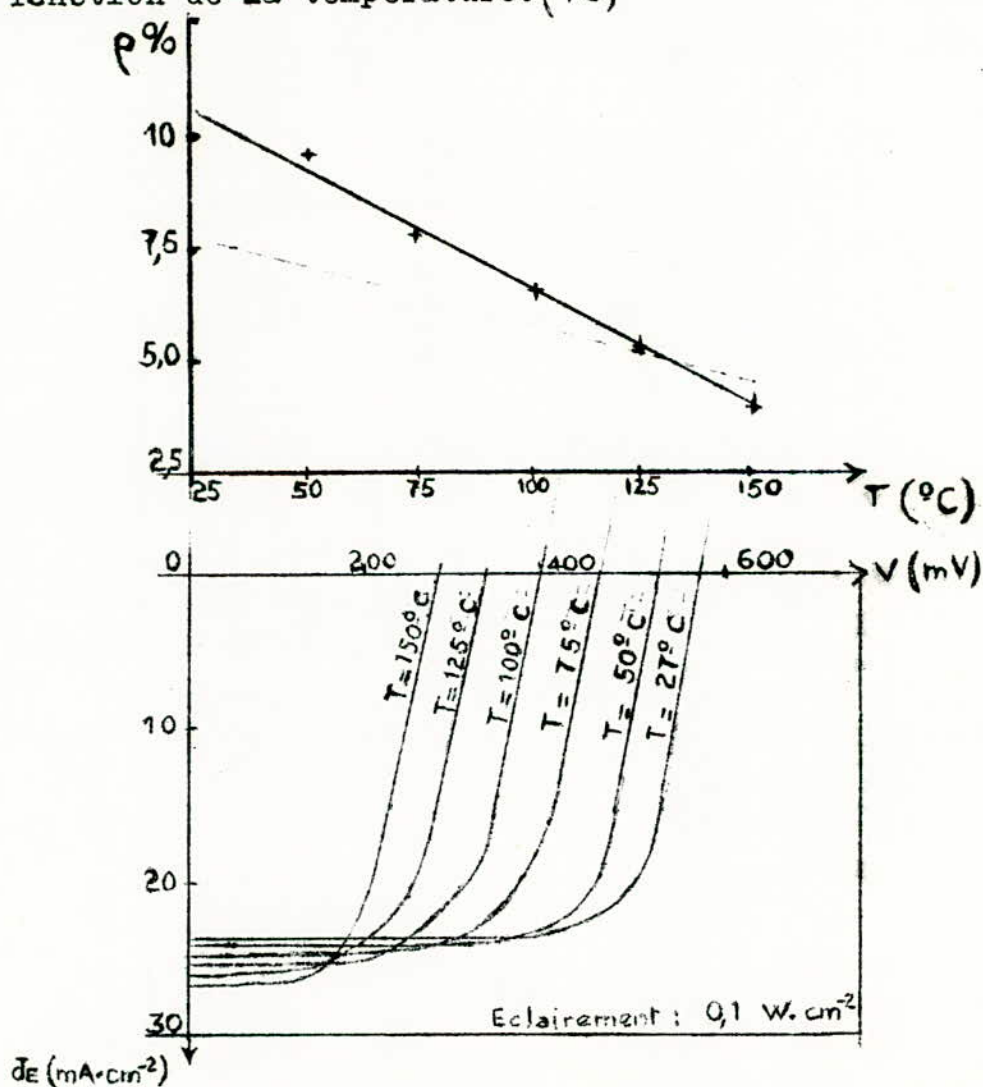
On peut définir ainsi une profondeur moyenne  $\bar{x}$  d'absorption pour chaque longueur d'onde, correspondant à une atténuation  $(1/e)$  du flux incident:  $\bar{x} = \frac{1}{\alpha}$ .

#### Limitation due à la température .

En general, les propriétés photoélectriques des cellules solaires sont mesurées dans des conditions telles que la température de la cellule proprement dite est voisine de 25°C. Lorsque les cellules sont en service, elles sont exposées de manière prolongée à un rayonnement dont près de 75% de l'énergie est transformée en chaleur soit dans la cellule elle-même soit dans son boîtier : une fraction (15% environ) est réfléchie; une autre (10%) est transformée en énergie électrique dans la charge .

Lorsque la température  $T$  de la cellule augmente, la densité  $j_E$  du courant photoélectrique croît très légèrement, mais la différence de potentiel en circuit ouvert diminue sensiblement, suivant une loi à peu près linéaire. Dans le domaine des températures comprises entre 25 et 150°C, les mesures ont montré que la variation relative du rendement, à la charge optimale, est d'environ 0,5 % /° C. Il est donc important de minimiser l'élévation de température des cellules: des mesures effectuées sur divers types de boîtiers, conçus pour qu'un bon

contact thermique puisse être établi entre les cellules et l'air ambiant (convection naturelle, conduction), ont montré qu'il était possible d'arriver à ce que la différence entre la température de la cellule et celle de l'air ne dépasse pas  $10^{\circ}\text{C}$  - pour l'état stationnaire, sous un éclairement de  $1\text{ kW/m}^2$ , en air calme - sans sacrifier l'étanchéité des boîtiers ni l'isolement électrique de batteries. Dans la conception d'une installation il faut tenir compte par conséquent des propriétés des cellules à la température de fonctionnement: celle-ci dépend à la fois de la structure des boîtiers, de leurs conditions de refroidissement, de la température du milieu ambiant et des éclaircements maximaux reçus. Les deux figures suivantes décrivent respectivement la variation du rendement et de la caractéristique (I, V) en fonction de la température. (16)



En conclusion les deux paramètres : température et résistance série affectent beaucoup le rendement des cellules. Le tableau ci-dessous donne les différents rendements pour des cellules solaires au silicium. (16).

	cellule théorique	cellule experiments	
		niveau de la mer	exposée
Transfert des photons aux paires (H)	0,42	0,45	0,45
Efficacité de collection (K)	1,00	0,81	0,79
Rendement de jonction	$\frac{0,55 \cdot 35,5}{1,09 \cdot 38,5} =$		
$M = \frac{q v_m}{E_g} \cdot \frac{j_m}{j_E}$	0,466	0,355	0,350
Transmission par la surface de la cellule :	1,00	0,93	0,93
Rendement global de la cellule	0,196	0,120	0,114

### 3-2-6-8 Collection des charges minoritaires

La libération d'une paire "électron-trou" est en elle-même incapable de produire un effet électrique puisque la charge totale mise en jeu est nulle. Dans les cellules solaires, le champ séparateur est le champ interne dû aux variations locales de concentration des impuretés. Tant que la paire reste dans une région homogène, donc en pratique équipotentielle, on n'observe rien; mais si la charge minoritaire atteint la barrière de potentiel, le champ l'oblige à passer dans la région où elle devient majoritaire. On peut recueillir dans le circuit extérieur une partie de l'énergie que perd cette charge lorsqu'elle descend la barrière de potentiel. Avant que la charge minoritaire atteigne la barrière de potentiel, elle peut se recombiner avec une charge majoritaire, avec émission d'un photon ou cession de l'énergie  $E_g$  au réseau cristallin; cette paire sera alors perdue par effet photovoltaïque.

### 3-2-6-1- Variation de la collection des charges minoritaires avec la profondeur dans la cellule.

La probabilité  $G$  pour qu'une charge libérée aux points

donné dans le milieu semi-conducteur atteint la jonction avant de se recombiner. Ou probabilité de collection, dépend du point considéré, des propriétés du matériau semi-conducteur et de la structure géométrique de la cellule.

Soit un semi-conducteur de géométrie unidimensionnelle. Pour la région N, la probabilité est:

$$G_n = \frac{1}{\text{sh}\left(\frac{a}{L_n}\right)} \left[ \frac{\text{sh}\left(\frac{a-x}{L_n}\right)}{\text{sh}\left(\frac{a}{L_n}\right) + \text{ch}\left(\frac{a}{L_n}\right)} + \text{sh}\left(\frac{x}{L_n}\right) \right]$$

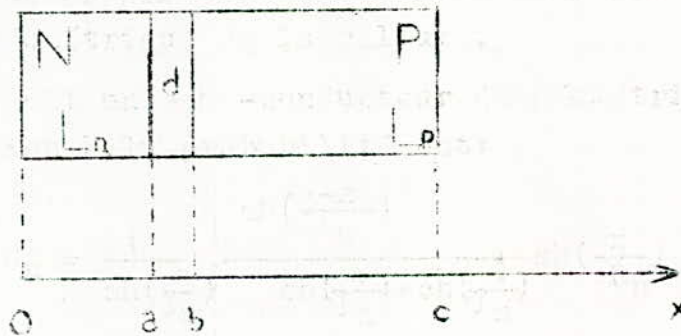
Où:

a: représente la longueur de la région antérieure

$L_n$ : " " de diffusion des porteurs dans la région N;

Pour la région P supposée très épaisse devant  $L_p$ , qui représente la longueur de diffusion des porteurs dans P; la probabilité est telle que:

$$G_p = e^{-\left(\frac{x-b}{L_p}\right)}$$



Dans la charge d'espace désertée par les charges majoritaires, on peut admettre que la probabilité de collection  $G=1$  ce qui veut dire qu'il n'y a pas de recombinaisons.

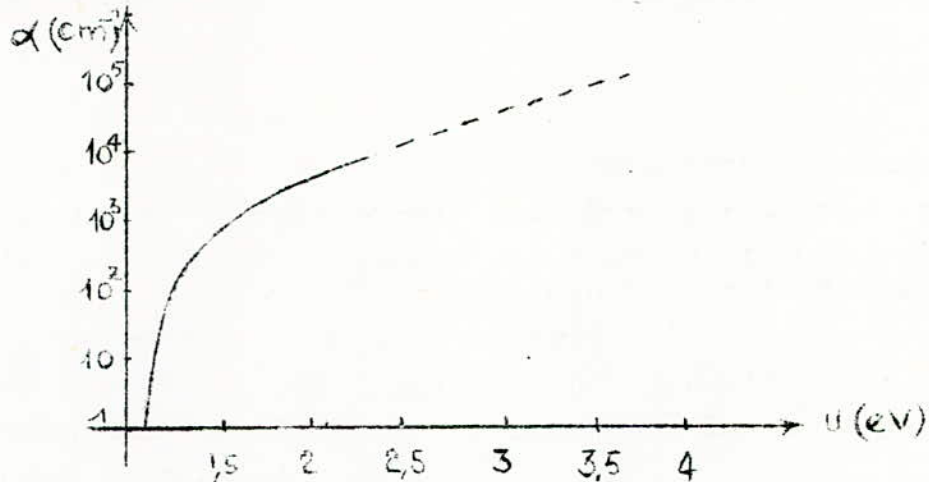
3-2-6-2 Probabilité pour qu'un photon du rayonnement solaire donne une charge minoritaire qui atteint la jonction.

Comme on l'a vu précédemment dans la collection de charge minoritaires, la paire "électron-trou" peut être perdue par recombinaison d'un électron ou d'un trou avec une charge majoritaire respectivement dans Pou N. Il existe donc une probabilité pour qu'un photon du rayonnement solaire absorbé puisse créer une paire "électron-trou" qui ne se perd pas par recombinaison. Il faut donc tenir compte de la distribution spatiale de la probabilité, pour qu'un photon soit absorbé.

Pour une lumière monochromatique, se propageant selon un axe x, et caractérisée par l'énergie u de ses photons; le nombre de photons -dE absorbés par la tranche d'épaisseur dx par unité d'aire est telle que:

$$-dE = \alpha E_x dx$$

$\alpha$  : coefficient d'absorption qui dépend de l'énergie u des photons. La figure ci-dessous montre la variation de  $\alpha$  en fonction de u.



La dernière relation conduit à la variation du nombre de générations photoélectriques par unité de volume et de temps en fonction de x.

$$-\left(\frac{dE_u}{dx}\right) = \alpha_u E_u e^{-\alpha_u x}$$

Pour une distribution à spectre continu on a

$$\frac{d\left(\frac{dE}{du}\right)_u}{dx} = \alpha \left(\frac{dE}{du}\right)_u e^{-\alpha x}$$

Pour l'ensemble du spectre on aura:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = \int_0^{\infty} \alpha \left(\frac{dE}{du}\right) e^{-\alpha u} du$$

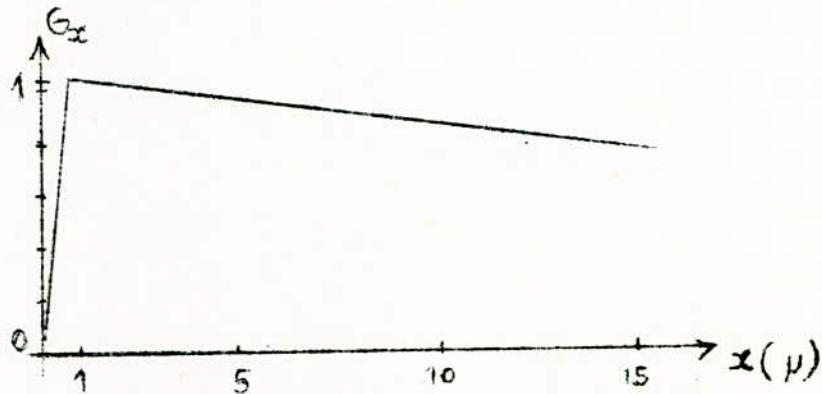
avec  $\alpha$ : coefficient d'absorption;  $u$  = énergie des photons;  $E$  = éclairement.

-Calcul du nombre de minoritaires d'origine photoélectrique qui atteignent la barrière de potentiel par unité de surface et de temps, ce qui représente la densité du courant photoélectrique  $j_e$ :

$$j_e = q \int_0^c -\frac{dE}{dx} G_x dx$$

ou  $-\frac{dE}{dx} G_x$  représente la contribution locale au courant photoélectrique.

$G_x$  représente la probabilité de collection dont la variation en fonction de l'épaisseur  $x$  est donnée par la figure ci-dessous.



La probabilité pour qu'un photon absorbé donne une charge minoritaire recueillie à la jonction est le rapport entre la densité de courant réel et la densité de courant maximale théorique.

$$\frac{j_e}{J_e} = K = \text{efficacité de collection.}$$

Cette efficacité de collection va varier avec l'énergie des photons; en effet pour un éclairement monochromati-

-que donnée on a :

$$j_{E_u} = \int \left( - \frac{dE_u}{dx} G_x dx \right) \text{ et } j_{E_d} = \int - \frac{dE_u}{dx} G_u dx$$

$G_u = 1$  (la collection est entière) alors  $j_{E_u} = E_u$

On a alors :

$$K_u = \frac{\int_0^c - \frac{dE_u}{dx} G_x dx}{E_u} = \frac{\int_0^c G_x \alpha_j E_u e^{-\alpha_j x} dx}{E_u} = \int_0^c G_x \alpha_j e^{-\alpha_j x} dx$$

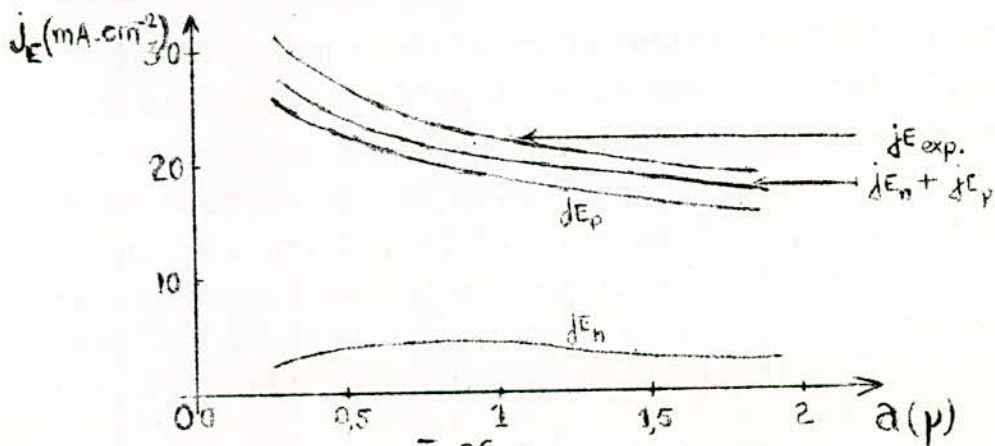
L'étude des variations spectrales de l'efficacité de collection accessible à l'expérience comme au calcul, permet d'obtenir des renseignements intéressants sur les propriétés des régions N et P. Si les paramètres de construction de la cellule ( $S_n, S_p, L_n, L_p, a, b, c$ ) sont connus, il est possible de mettre  $G_x$  sous forme d'une équation différentielle dont les conditions aux limites sont connues. Grâce aux formules précédentes, on écrit les densités de courant :

$$\text{Région N : } j_{E_n} = q \int_0^{\infty} K_{u_n} \left( \frac{dE}{du} \right) du$$

$$\text{Région P : } j_{E_p} = q \int_0^{\infty} K_{u_p} \left( \frac{dE}{du} \right) du$$

L'aire de la courbe  $-\left(\frac{dE}{dx}\right) G_x$  entre 0 et C de la variable  $x$  représente le nombre total de charges minoritaires.

2-2-6-3 Influence de l'épaisseur "a" de la couche antérieure sur la contribution  $j_{E_n}, j_{E_p}$  à la densité de courant photoélectrique.





En pratique, la contribution de la région antérieure pour un coefficient d'absorption élevé est toujours relativement faible; Cela est dû à ce que cette couche réalisée par diffusion d'impureté donne soit caractérisée par une longueur de diffusion faible, et par une recombinaison en surface assez forte. (16)

Contribution de la région N :

$$j_{En} = a \int_0^a \left(-\frac{dE}{dx} Gx\right) dx$$

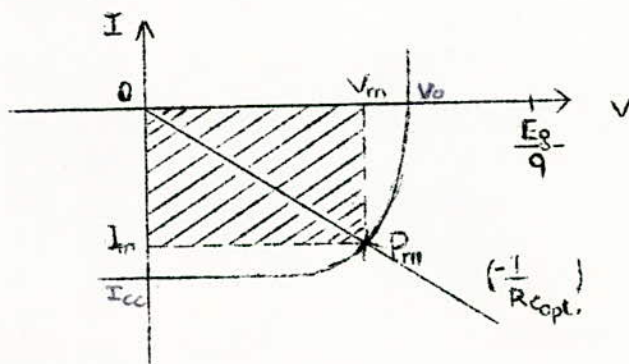
Contribution de la région P :

$$j_{Ep} = a \int_b^c \left(-\frac{dE}{dx} Gx\right) dx$$

Pour des cellules solaires au silicium dont le rendement énergétique pour la lumière obtenue au niveau de la mer est de 12 % environ. L'efficacité de collection pourrait être améliorée par réduction de l'épaisseur "a" de la couche antérieure; Mais alors l'augmentation de la résistance électrique de cette couche compenserait totalement le bénéfice qu'on pourrait obtenir de cette amélioration du rendement d'où l'intérêt de choisir une dimension optimale de la couche antérieure.

### 3-2-7 Conditions optimales de fonctionnement

Ces conditions sont réalisées quand la cellule fournit le maximum de puissance à la charge. Il existe un point  $P_m$  sur la caractéristique (I, V) qui répond à ces conditions. Les coordonnées de point  $P_m$  sont  $V_m$  et  $I_m$  tels que  $V_m \cdot I_m = P_m$ . Cette puissance est représentée par l'aire du rectangle hachuré sur la figure suivante.



Le point de fonctionnement optimal  $P_m$  est obtenu pour une résistance de charge optimal  $R_{opt}$ . En fait, il subsiste une ambiguïté, car la tension  $V_m$ , trouvée théoriquement, donne deux valeurs selon que les recombinaisons se font dans la charge d'espace, avant que les minoritaires aient pu pénétrer dans les régions non chargées, ou dans les régions N,P; ces deux tensions s'écrivent respectivement  $V_{md}$  et  $V_{m(np)}$ . Les deux densités de courant qui en résultent sont:  $J_{vd}$  et  $J_{vnp}$  (annexe 3). Pour réduire les recombinaisons dans les régions N et P, on doit réduire la vitesse de recombinaison  $S_n$ , ce qui est souvent très difficile à réaliser et à maintenir dans le temps, en particulier pour le silicium.

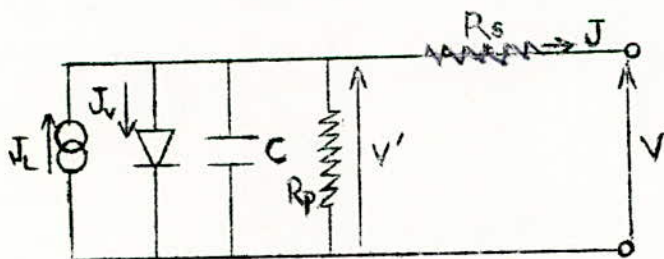
On approxime la densité de courant par:

$$J_v = J_0 \cdot \exp\left(-\frac{V}{\gamma}\right)$$

Où  $J_0$  et  $\gamma$  prennent des valeurs différentes suivant que les recombinaisons ont lieu dans la zone désertée ou dans les régions non chargées. On démontre (annexe 3) que  $V_m$  vérifie la relation suivante :

$$\frac{J_E}{J_0} \equiv \exp\left(-\frac{V_m}{\gamma}\right) \cdot \left(1 + \frac{V_m}{\gamma}\right)$$

Schéma équivalent de la photopile:



$$J = J_L - J_v$$

$$J = J_L - J_0 \left( \exp\left(\frac{q(V + R_s J)}{A K T}\right) - 1 \right)$$

Avec  $V' = V + R_s J$  : tension aux bornes de la diode

$A$  : coefficient dû aux phénomènes de recombinaison.

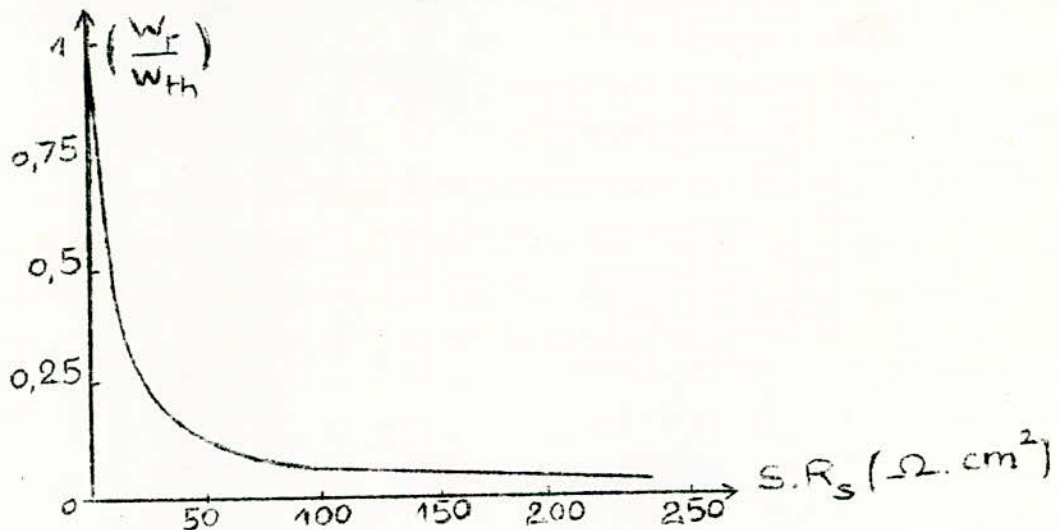
$J_L$   $J_{cc} = qg(I_p + I_n)$  (faibles éclairagements).  
 $g$ , est le nombre de paires "électron-trou".

$$V_0 = \frac{K T}{q} \ln \left( 1 + \frac{J_{cc}}{J_0} \right).$$

La puissance optimale est liée à la tension  $V_m$  par :

$$P_{opt.} = \frac{q J_{cc} \cdot V_m^2}{K T + q V_m} \quad (\text{voir annexe 3}).$$

Cette puissance varie beaucoup avec  $R_s$ . La courbe suivante représente la variation du rapport entre la puissance maximale réelle  $W_r$  et la puissance théorique  $W_{th}$  en fonction de la résistance série  $R_s$



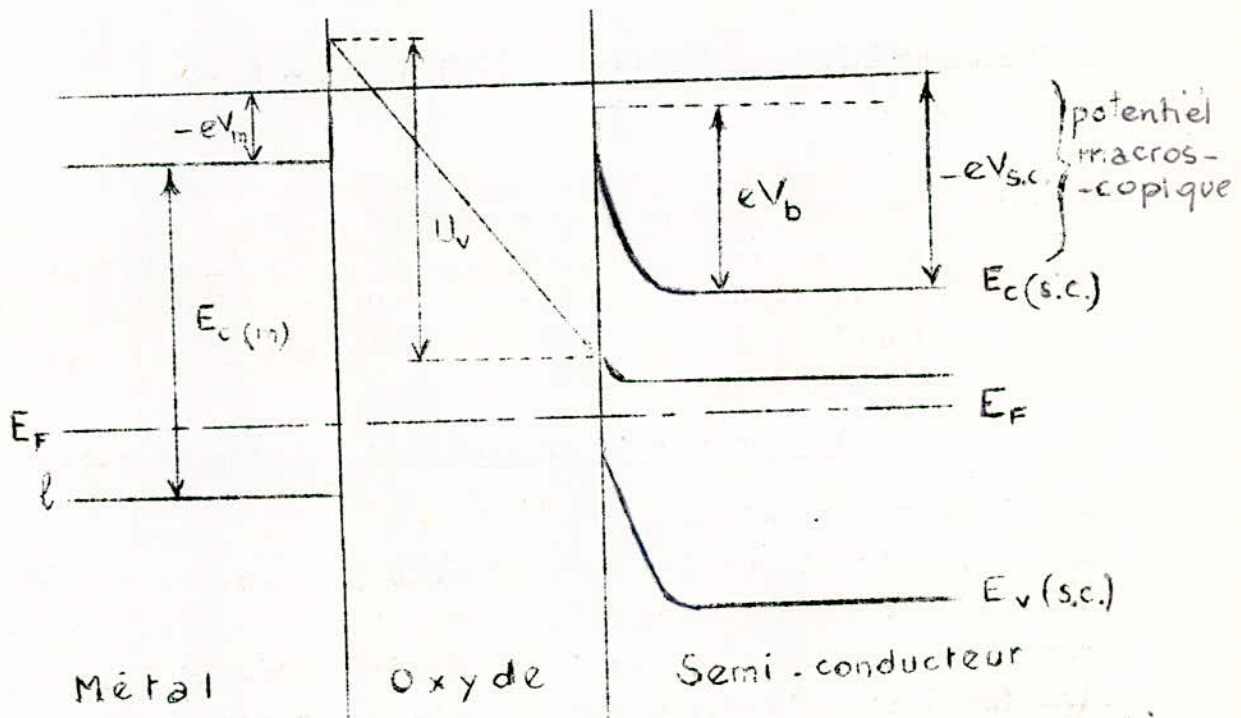
Les calculs ont été faits en considérant que la densité de courant photoélectrique  $j_E$  était égale à  $31 \text{mA}/\text{cm}^2$ , et en prenant pour tension à vide  $V_0 = 0,575$  volts. On voit que le rendement d'une cellule dont la résistance série équivalente est de  $2,5 \Omega/\text{cm}^2$  est égale à 86% du rendement théorique.

### 3-3-1 PHOTOPILES A JONCTION METAL-SEMI-CONDUCTEUR

Le rapprochement des surfaces d'un métal et d'un semi-conducteur est la cause d'une courbure de bandes et de la formation d'une barrière de Schottky, dans le semi-conducteur à l'interface des deux matériaux (10).(11)  
(cf. Annexe: 2)

#### 3-3-1 Considérations sur la structure MOS :

Le métal et le semi-conducteur étant isolés par un oxyde (ou un isolant tel que le vide), la différence des niveaux d'énergie s'exprime par le travail d'extraction. Celui-ci définissant l'énergie requise, pour transporter un électron, au niveau de Fermi à l'oxyde (isolant). Le schéma ci-dessous représente la jonction MOS, où  $V_m$  représentera le potentiel macroscopique, donnant l'image de l'électron dans le réseau cristallin.



où  $\ell$  = plus bas niveau de la bande de conduction

### 3-3-2 Structure métal-semi-conducteur :

La jonction directe de deux solides, métal - semi-conducteur, induit un courant de déplacement ( $\epsilon.E$ ), Ce qui donne naissance à une charge d'espace à l'interface, déterminant une barrière de potentiel qui croît avec le débit du courant électronique. Cette tension augmente, jusqu'à ce que toute la d.d.p de Volta du vide se produisent à la limite (annexe.2) . La hauteur d'énergie sera la barrière de Schottky à quelque approximation près. En effet, l'égalité  $U_v(\text{Volta}) = U_p$  (potentiel) est vérifiée seulement si la rapprochement des deux surfaces est très faible ( de l'ordre de l'atome) ce qui est un cas idéal, impossible à réaliser.

En outre, cette égalité s'obtient avec des surfaces métalliques parfaitement propres, (ce qui conduit à des difficultés dans les performances de fabrication), à cause de la différence des deux travaux d'extraction  $\phi_m$  et  $\phi_{sc}$ , l'énergie potentielle d'un électron au voisinage du métal est supérieure à celle proche du semi-conducteur. Pour un espace, d, assez grand, entre les deux solides, le champ électrique s'exprime par :

$$E = \frac{\phi_m - \phi_{sc}}{q \cdot d} \quad (14)$$

Si la chute de potentiel à la surface du métal est négligée, celle du semi-conducteur ne l'est pas: C'est la cause principale de l'existence de la barrière de Schottky . En raison du champ  $\vec{E}$  qui se développe, les électrons s'éloignent de la surface créant ainsi une charge positive. (fig. 3, 2)

#### 3-3-2-1 Contact métal-semi-conducteur à couche limite d'appauvrissement et d'enrichissement :

Dans le cas sus-décrit, il se forme dans le semi-conducteur et en surface, une densité électronique d'équilibre  $n_s$ , et telle que:

$$n_s = N_c \cdot \exp\left(-\frac{\phi_{n-s}}{kT}\right)$$

où  $\phi_m$  est l'énergie d'extraction, ou travail de sortie du métal dans le semi-conducteur. Les impuretés n'interviennent pas dans le terme  $n_s$ . Par contre, en profondeur, la concentration en volume  $n_v$ , est fortement influencée (fig. 37).

On obtient une couche d'appauvrissement ou d'enrichissement (fig. 37), selon que  $n_s < n_v$ , ou  $n_s > n_v$ . A la surface, on n'a pas de neutralité  $n_v$ , ceci conduit à une charge d'espace  $\rho(x)$  telle que :

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = - \frac{4\pi}{\epsilon} \cdot \rho(x) \quad (\text{Equation de Poisson})$$

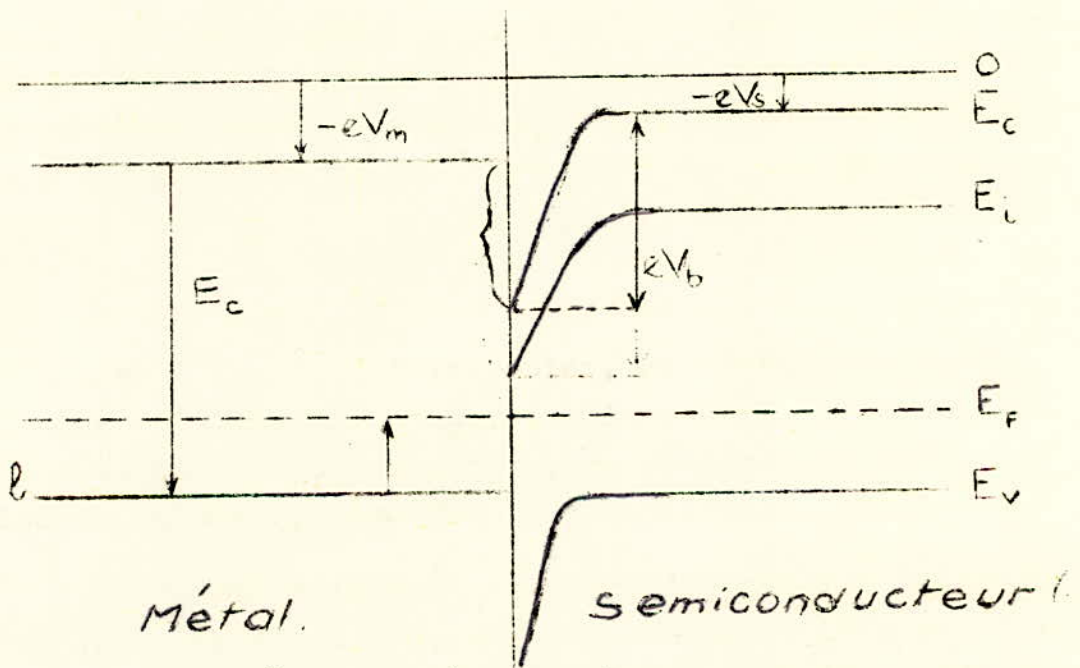
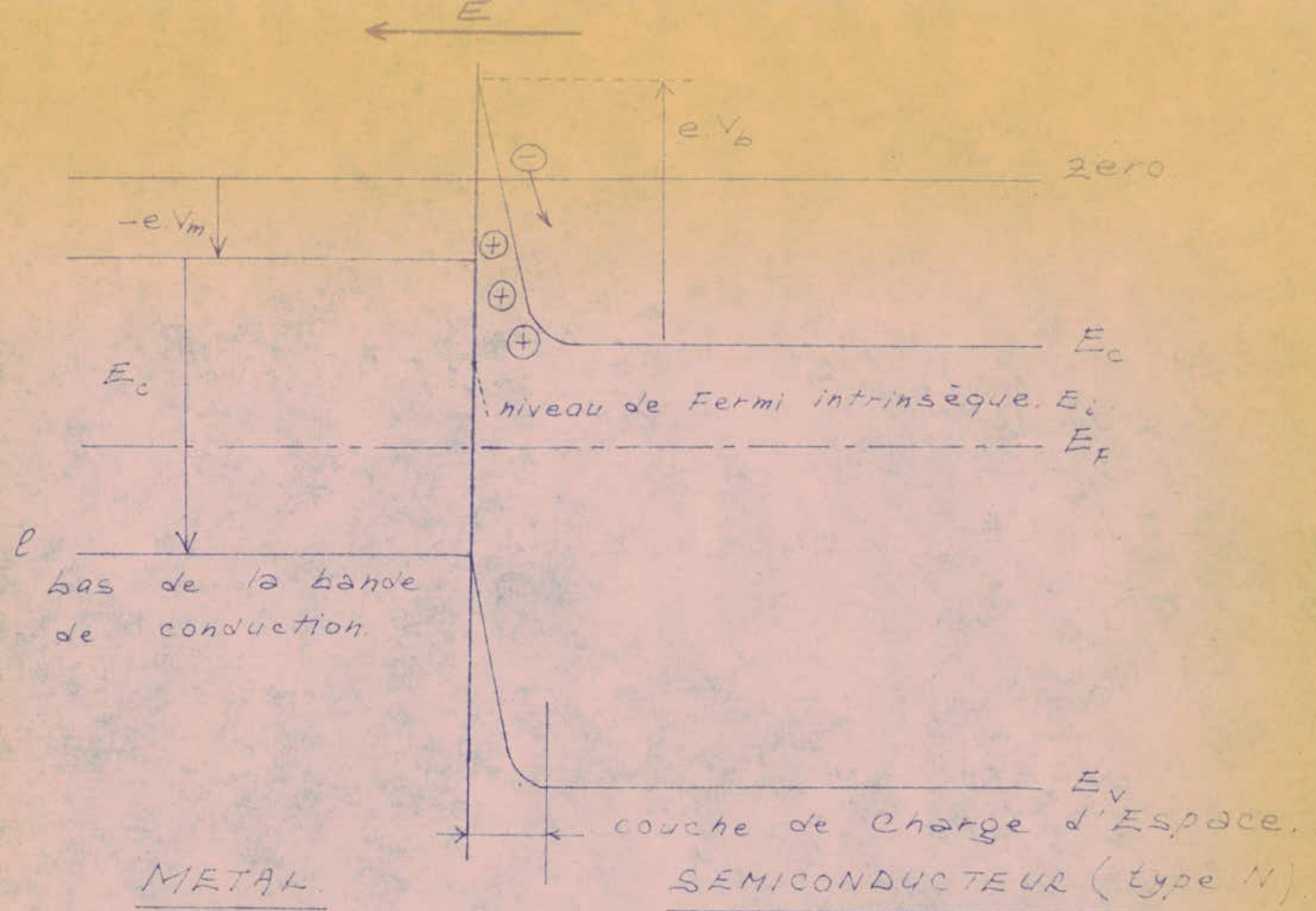


fig. 37a. ( $n_s > n_v$ )

Cette charge d'espace courbera la répartition de  $(-e \cdot V(x))$ , d'où la naissance d'un potentiel  $U_b$ , donc d'un champ et par conséquent d'un courant de compensation. Il est dû au gradient des concentrations  $n_s$  et  $n_v$ . A l'équilibre le courant s'annule.



$n_s < n_v$

fig (3,7. b)

diagramme énergétique de la jonction M-S.

### 3-3-3 Effet photoélectrique dans une jonction métal-semi-conducteur.

#### 3-3-3-1 Cas d'une couche limite d'appauvrissement:

Choisissons un semi-conducteur tel que  $n_s < n_v$  dopé N. Chaque électron arraché de ce semi-conducteur se meut avec une énergie d'ionisation :

$$E_i \approx E_g + X_{sc}$$

Où  $X_{sc}$  représente l'affinité électronique. Soit alors, un rayonnement lumineux, solaire par exemple, incident sur ce type de jonction. Les photons portés par ce flux, et dotés d'une énergie supérieure à la bande d'énergie interdite ( $E_c - E_v$ ), créeront des paires "électrons-trous", dans le semi-conducteur. Les charges positives de ce solide étant favorisées au déplacement par le champ  $E$ , on observera une conduction par trous ( fig 38. a)

Par ailleurs, Les photons d'énergie supérieure à  $U_b$ , transmettront leur énergie aux électrons du métal qui traverseront la barrière de Schottky:

$$e U_b = (\Phi_m - \Phi_{s.c.})$$

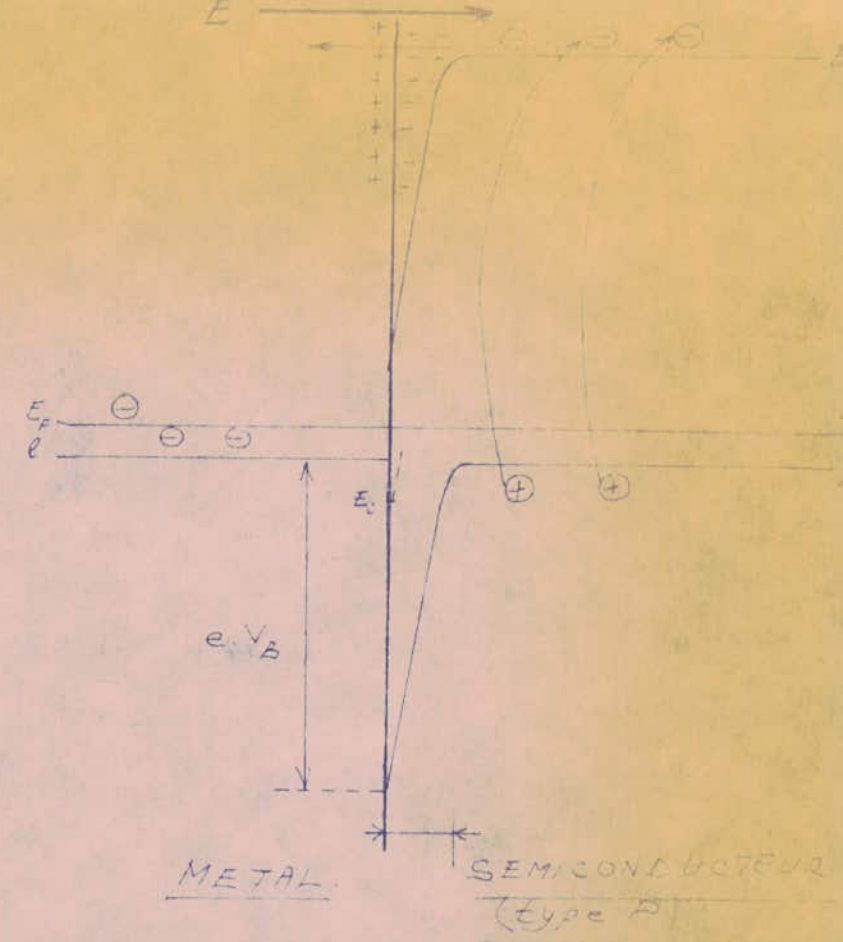
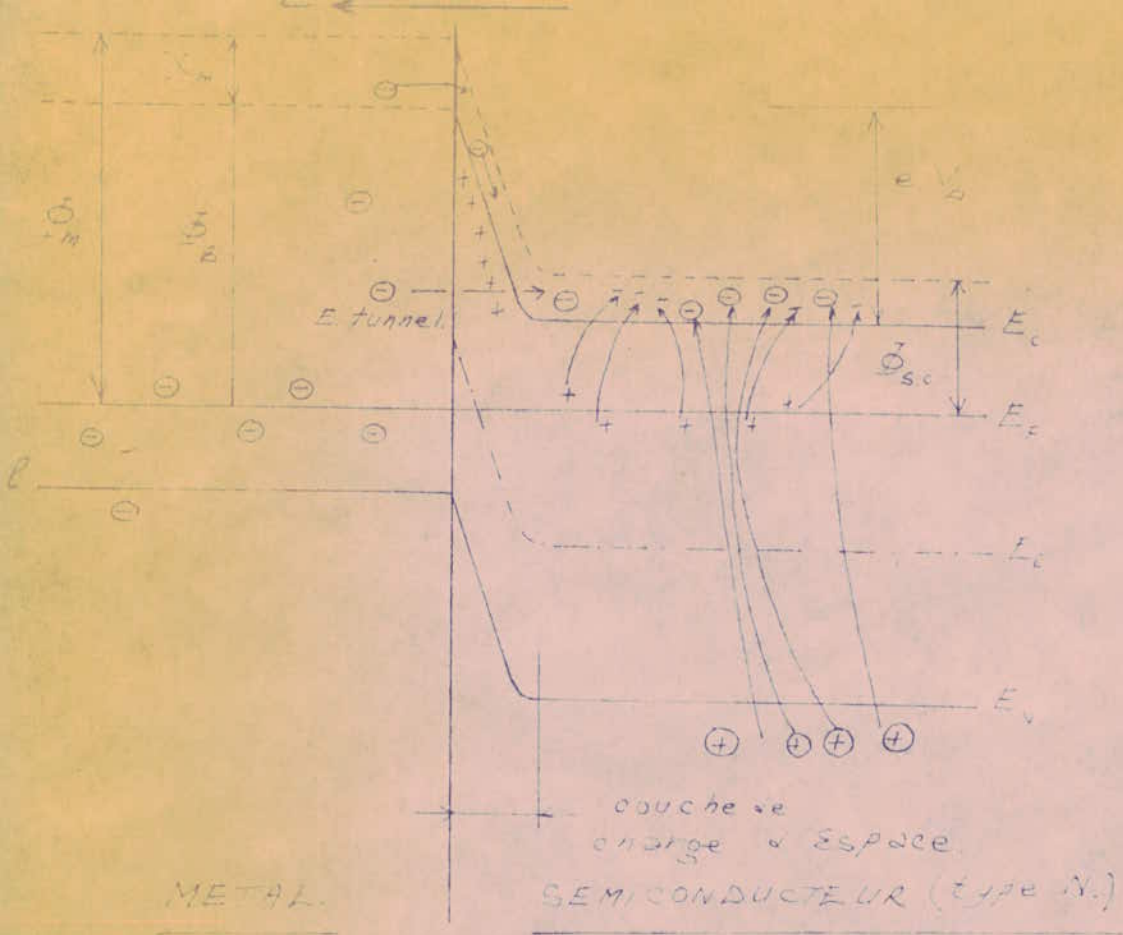
$\Phi_m$  étant le travail de sortie du métal.

Ces électrons auront un potentiel  $(\frac{\Phi_m - X_m}{e})$  et seront animés de la vitesse  $v$  telle que:

$$\frac{1}{2}mv^2 \ll (h.f - \Phi_m) \quad (13)$$

Cette vitesse est liée à une quantité de mouvement, donc à une énergie cinétique diminuant avec le temps au dépend des vibrations de phonons. En outre, il existera des électrons qui passeront, avec une certaine probabilité, du métal au semi-conducteur, sans apport d'énergie suffisante. La cause de ce passage s'explique par l'effet tunnel. ( ... )

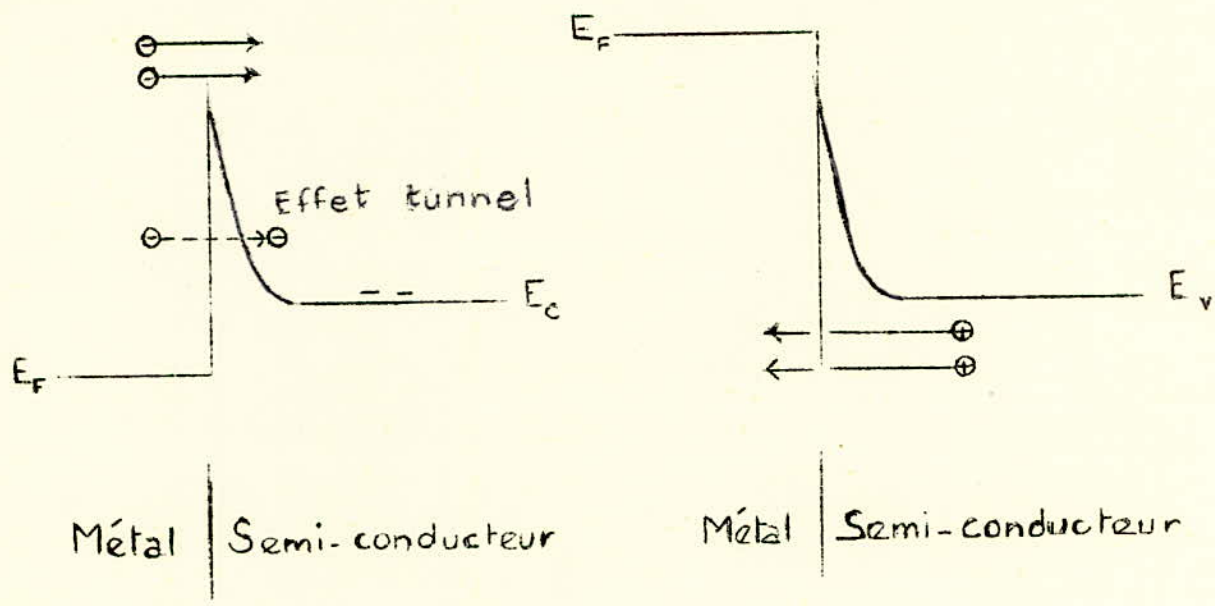




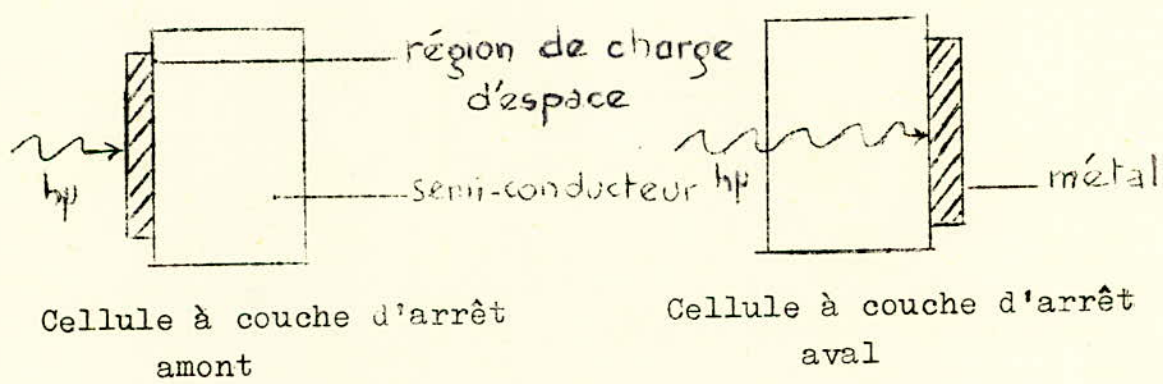
(a)

(b)

fig.(38) Effet photoélectrique pour la couche limite d'appauvrissement et d'enrichissement.



On distingue deux types de jonction éclairée; celle où le métal est exposé au flux de photons, et celle où le semi-conducteur reçoit ce rayonnement.



Cette représentation permet-moyennant les deux possibilités d'absorption-d'expliquer la prépondérance de l'une ou de l'autre des conduction ( par électrons ou par trous )

- Excitations bande à bande, liée à la valeur de l'énergie  $h\nu_{sc}$  supérieure à  $E_g$ , du photon.
- Photoémission du métal, déterminée par l'énergie  $h\nu$ , supérieure à  $e\phi_b$ .

La figure(3,9) illustre les deux cas de conduction en fonction des longueurs d'ondes (13).

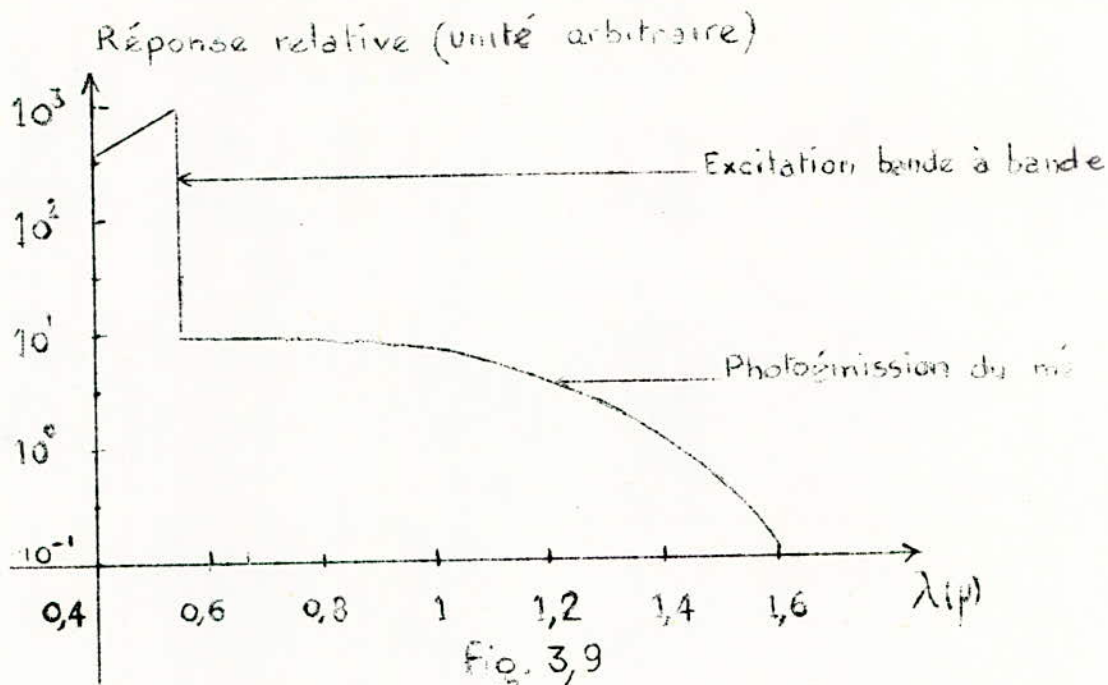


Fig. 3,9

3-3-2-2 Cas d'une couche limite d'enrichissement:

Si le semi-conducteur est dopé P, on obtiendra une plus grande concentration en électrons à l'interface:

$$n_s > n_v$$

Le métal contenant plus d'électrons libres que le semi-conducteur P, la diffusion aura donc lieu vers le semi-conducteur. A l'interface, il y a création d'une charge d'espace liée à un "puits" de potentiel dans la région du semi-conducteur.

Si un photon incident possède une énergie supérieure au gap ( $E_c - E_v$ ), il est alors capable d'extraire une "électron-trou". Les électrons avoisinants l'interface, seront accélérés par le champ électrique dans la direction du métal. Dans ce type de jonction, seule la conduction par électron est possible (figure 3,8b). On remarque par ailleurs que dans les types de couches limites, à appauvrissement et à enrichissement, la migration des porteurs provenant du semi-conducteur est assurée par des minoritaires. Le phénomène est tout à fait semblable à l'autopolarisation d'une jonction P-N.

3-3-4 Caractéristiques de la jonction métal-semi-conducteur.

aux bornes de la jonction métal-semi-conducteur, donc de la photopile, on recueille un courant  $J$  de la forme

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right) - J_{cc}$$

où  $V$  est la tension aux bornes,  $J_{cc}$  le courant de court-circuit et avec :

$$J_0 = S.A.T^2 \exp\left(-\frac{V_b}{kT}\right)$$

$S$ : c'est la région active photovoltaïque en  $\text{cm}^2$

$A$ : c'est la constante de Richardson.

Pour un métal (Au) joint au silicium (type P),  
 $A = 32 \text{ amp./}^\circ\text{K}^2 \text{ cm}^2$  (( 9 ))

On sait par ailleurs que tout solide est oxydé (ou recouvert d'éléments étrangers) en surface, oxydation due à un contact avec l'air.

La jonction métal-semi-conducteur, a reçue une oxydation à l'interface, lors de son traitement. Si la largeur de cette oxydation est assez épaisse, on obtient la structure M.O.S.

Afin de déterminer globalement ces imperfections dues aux limites des performances de fabrication - en surface et à l'interface, on introduit un coefficient empirique, le facteur  $n$ . Pour la jonction (Au-Si); par exemple, il vaut 1,05 ( ). La tension  $V_0$  est obtenue à partir de l'expression de  $J$ . A vide, on a la formule suivante:

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV_0}{nkT} - 1\right) - J_{cc} = 0$$

ce qui donne:

$$\frac{J_{cc}}{J_0} = \exp\left(\frac{qV_0}{nkT} - 1\right)$$

On tire alors:

$$V_0 = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{J_{cc}}{S.A.T^2} + 1\right) + n \cdot \frac{V_b}{q}$$

Avec la considération :  $\left(\frac{J_{cc}}{J_0}\right) \ll 1$ .

D'autre part, l'écart  $(h\nu - V_b)$  est supérieure à quelques  $(kT)$ . A charge nulle, donc en court-circuit, le courant  $J_{cc}$  est proportionnel à  $(h\nu - V_b)^2$  (22).

Pour un éclairement donné, on obtient la caractéristique  $(I-V)$ . La caractéristique  $(I-V)$  dans l'obscurité, présente un point anguleux  $V_{os}$  qui diffère du type de la jonction (figure 3,10).

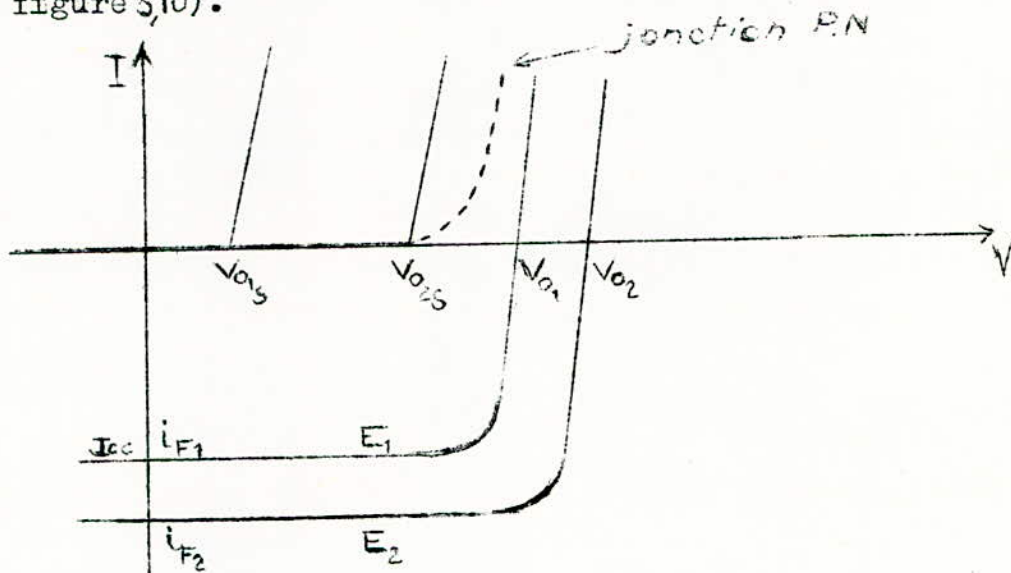


fig. 3,10

On remarque, en outre, que le rendement de collection (quantique) dont l'expression a été auparavant explicitée est beaucoup plus élevé dans le cas des cellules à couches d'arrêt amont que dans les photopiles à couche d'arrêt aval. L'épaisseur du semi-conducteur dans ce dernier cas étant beaucoup plus grande que celle du métal, les photons vont exciter des électrons inefficaces en volume, inefficacité causée par l'absorption difficile à travers le cristal. La formation d'excitons, ou paires neutres d'électrons-trous explique ce phénomène. Comparées aux cellules photovoltaïques à jonction P-N, celles à couches d'arrêt présentent une différence dans l'importance de certains facteurs intervenant dans les expressions du courant débité et de la f.e.m. à vide.

Les coefficients  $m$ ,  $S$  et  $A$  sont déterminants. Quant à l'effet de la température, il est ici beaucoup plus sensible que dans le cas des photopiles P N .

### 3\_4 - Aperçu sur les cellules photovoltaïques particulières

#### 3-4-1 Photopiles à hétérojonctions :

Afin d'optimiser le phénomène de collection des porteurs, donc de réduire au maximum le taux de recombinaison dans les cristaux constituant les photocellules, on utilise un amalgame de matériaux judicieusement choisis pour en faire une des hétérojonctions. Celles-ci seront le siège de bandes interdites variables. Tel est le cas des cellules (CdSe - ZnTe), et (CdTe - CdS). (24).

Les cellules (CdTe - ZnSe) et (Cu<sub>2</sub>S - CdS) ayant un gap non uniforme, possèdent une discontinuité à l'interface ("Spike"), dont l'effet sur les porteurs de charges est peu favorable (Fig. 3,11).

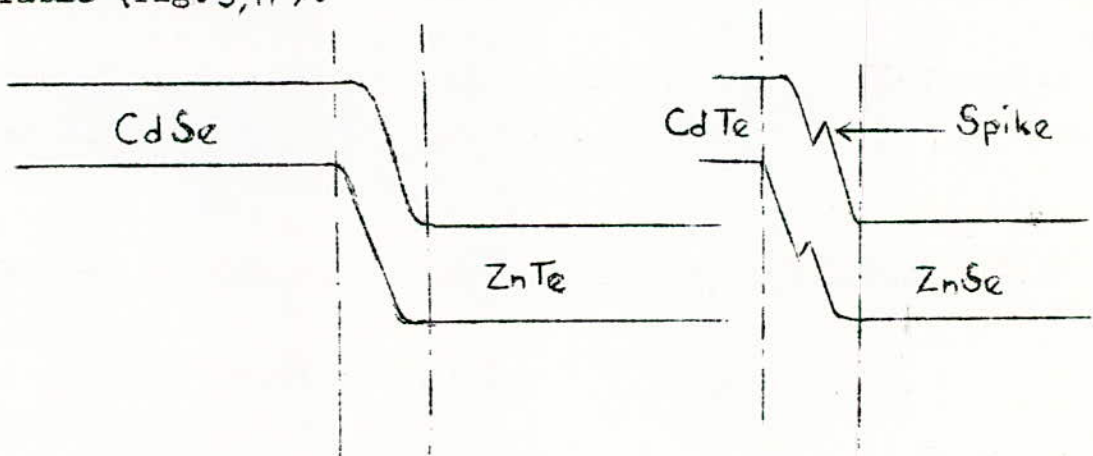


Fig 3,11

Chaque matériau ayant une fonction propre, on est limité par le rendement de transfert des électrons aux interfaces.

Dans certaines autres photopiles à hétérojonctions on dose le matériau de façon à obtenir un indice stoechiométrique bien déterminé ; C'est le cas de l'hétérojonction suivante  $AsGa_{(1-x)}Al_x$  -  $AsGa$ , où  $(1-x)$  et  $x$  sont à définir avant la fabrication.

Les cellules faites à partir d'une jonction de verre semi-conducteur  $Im_2O_3$  ou  $SnO_2$ , avec du silicium par exemple, possèdent un rendement acceptable. Celui de la photopile  $Im_2O_3$  (type N) / Si (type P) vaut 6%.

### 3.4-2 Cellules organiques :

Le procédé naturel d'exploitation de l'énergie solaire par la flore, lors de la photosynthèse, a fait penser à la conception des photopiles constituées de matériaux organiques. La phtalocyanine, ayant une structure se rapprochant des porphyrines - dont un membre est la chlorophylle - est utilisée dans cette voie ( ). Mélangée aux impuretés (Mg/Au), elle demeure "conducteur de type P"; la durée de vie de ces porteurs est de  $10^{-9}$  s, et son coefficient d'absorption est élevé ( $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-1}$  pour 690 nm.).

Malgré ces qualités, la cellule de jonction Al -phtalocyanine au (Mg/Au) possède un très faible rendement (0,01%). Cet aspect négatif est dû au caractère isolant du matériau organique et à la haute densité des pièges ( $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ).

### 3.4-3 Photocellules à concentration.

Les cellules dites "multijonctions verticales", sont des jonctions (P-N) au silicium, distribuées en volume.

A.P. Lindman et Strebskov, expliquent leur fonctionnement ( ). La cellule étant éclairée parallèlement aux jonctions, les photoporteurs sont créés au voisinage immédiat des barrières de potentiels, ce qui permet leur collection rapide. On a réalisé ainsi, une minimisation des pertes par la recombinaison et une diminution de l'effet de la résistance série  $R_s$ .

(4-1 Photopiles à jonction P.N., cas particulier du silicium.

Le procédé de fabrication doit suivre certains critères de qualité des cellules, tels que leur épaisseur très réduite, l'imposition du taux d'impuretés, leur épaisseur uniforme, la fabrication en série (...). Et ce, afin d'assurer un rendement acceptable.

L'obtention du silicium comme matériau de base, n'est pas suffisante. Sa purification ainsi que sa transformation en forme monocristalline est le plus souvent nécessaire.

4-1-1 Extraction et purification du silicium

La Silice réduite, fournit un corps impur que l'on doit attaquer par l'acide chlorhydrique, on obtient de la trichlorosilane ( $\text{SiHCl}_3$ ) que l'on purifie par distillation.

A  $1000^\circ \text{C}$  environ,  $\text{H}_2$  réduit ( $\text{SiHCl}_3$ ) le trichlorosilane pur, pour donner du silicium dont la résistivité serait de quelques centaines d'ohms.cm, et faiblement dopé N.

On pratique la purification du silicium jusqu'à un taux de  $10^{-9}$  en se basant sur la méthode de "la zone fondue": On fond le silicium à  $1420^\circ \text{C}$  qui contient déjà des impuretés.

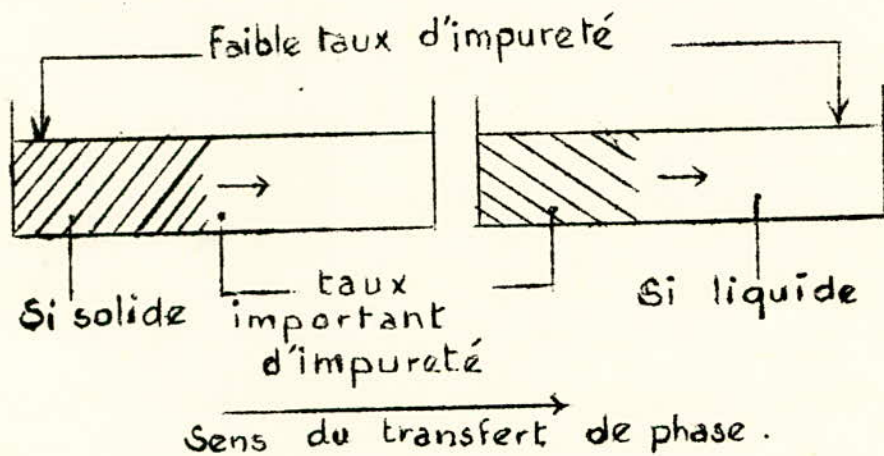
Si le liquide, placé dans un creuset, est soumis à une solidification progressive à partir de l'extrémité de la cuve, il présentera généralement une concentration d'impuretés plus appréciable dans la phase liquide que solide.

Cette propriété est dictée par la valeur du coefficient de ségrégation  $k$ .



S'il est inférieur à l'unité, le solide rejette l'impureté. S'il en est supérieur, l'impureté se retrouve en amont du sens de transfert de phase (fig. 4.1).

Dans le premier cas, la solidification une fois achevée, on coupe l'extrémité impure que l'on rejette. L'opération doit être répétée cinq à six fois afin d'arriver à une purification valable (fig. 4.2).



$$k < 1$$

$$k > 1$$

fig. 4.1.

La meilleure purification est celle obtenue pour un coefficient  $k$  faible. Dans le cas d'une présence de bore dans le silicium, ( $k > 1$ ), la purification totale est difficile et même irréalisable.

#### Procédé de fusion de zone (9)

La purification répétée du silicium est obtenue en disposant d'un lingot de silicium, que l'on fixe verticalement et que l'on entoure par des spires, parcourues par un courant H.F. (discontinuellement). Ce dernier va créer des zones flottantes (fondues) locales qui se maintiennent par capillarité; on déplace le lingot vers le haut, celui-ci sera le siège de liquéfactions répétées, et la purification est obtenue.

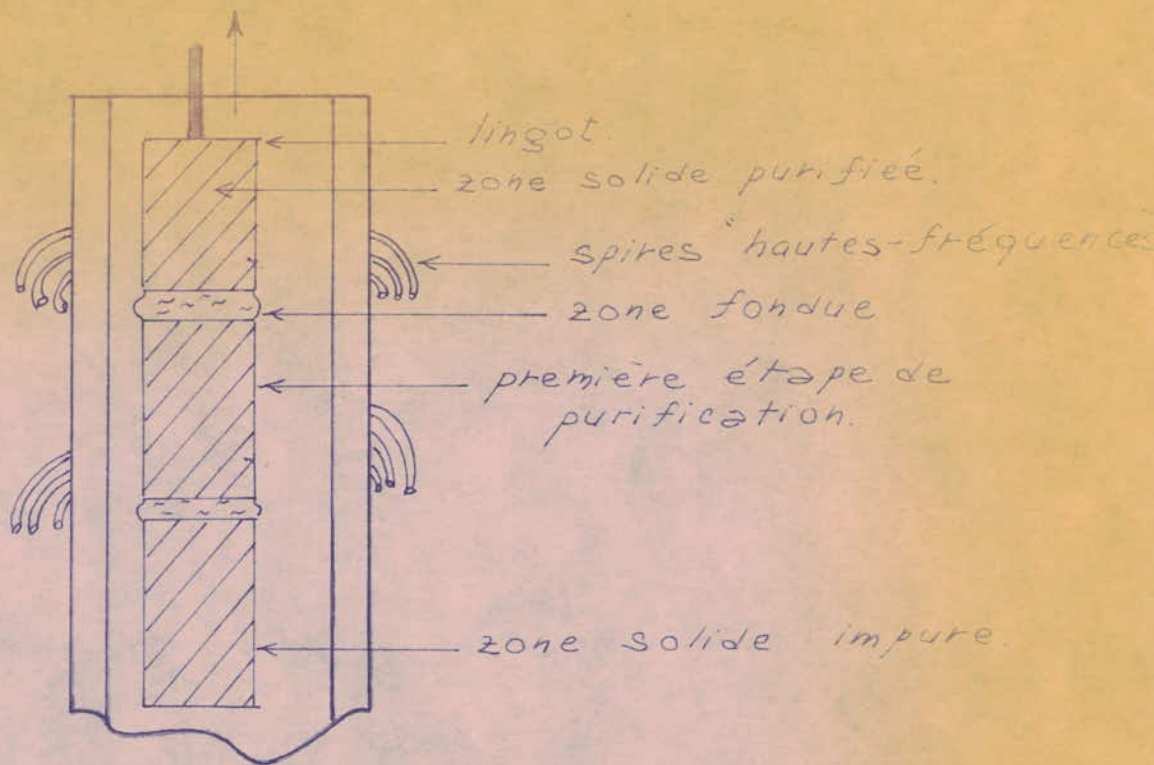


fig. 4,2

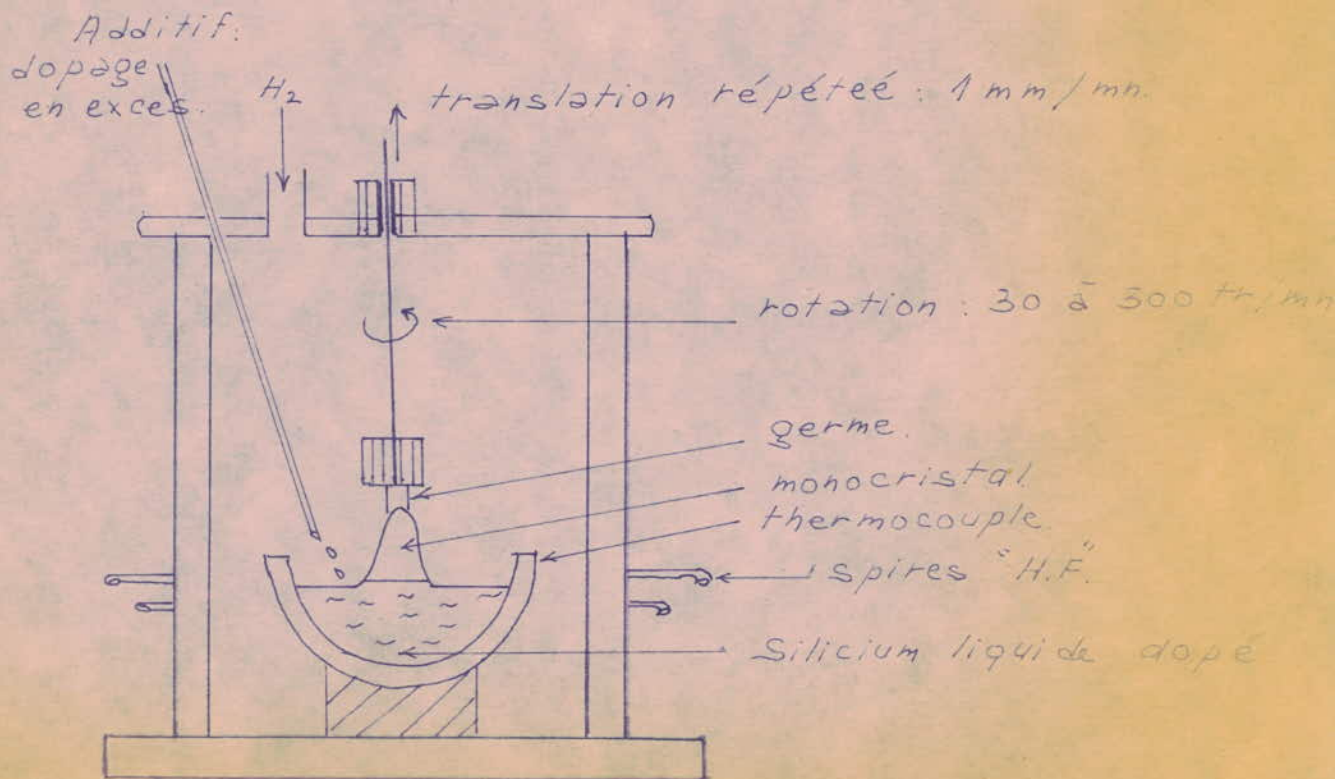


fig. 4,3

#### 4-1-2 Tirage de monocristaux (9)

Il a été montré que les cellules solaires à jonction (P.N) au silicium monocristallin avaient meilleur rendement que celles dont la forme cristalline est autre.

Dans ce but, on dispose des barreaux  $S_1$  que l'on tire par la méthode de Czochralski en  $S_1$  monocristallin de résistivité  $0,1 \Omega \cdot \text{cm}$ . : on place le silicium dans un tube en silice sous atmosphère neutre, le solide fondu est amené au contact d'un germe orienté, ce dernier, sous l'effet d'une rotation et d'une translation, va tirer le liquide contacté par capillarité, on obtient ainsi, un solide moins dopé et monocristallin (pour un coefficient de ségrégation  $< 1$ ), le dopage se pratique par addition d'impuretés en excès, dans la zone fondue ( pour  $k < 1$  ). (fig.4,3)

#### 4-1-3 Le silicium polycristallin :

L'étape sus-décrite de la fabrication relative au tirage du  $S_1$  monocristallin et parfois non nécessaire; l'utilisation de la structure polycristalline est dans bien des cas intéressante pour la fabrication de certaines photopiles à jonction au graphite. Les mérites de ce type de cellules sont dictés par leur aspect moins coûteux, et par la fabrication par film (épitaxie) qu'offre la technologie actuelle et aboutissant à des rendements de 6%. Le modèle de fabrication de ces jonctions est schématisé par la figure(4,4) , où le ruban de graphite se déplace en se recouvrant de  $S_1$  polycristallin par capillarité. Plus l'angle  $\alpha$  est faible et plus cette méthode est réussie. L'un des défauts principal de ces cellules à silicium polycristallin est la variation décroissante rapide de leur rendement. (32)

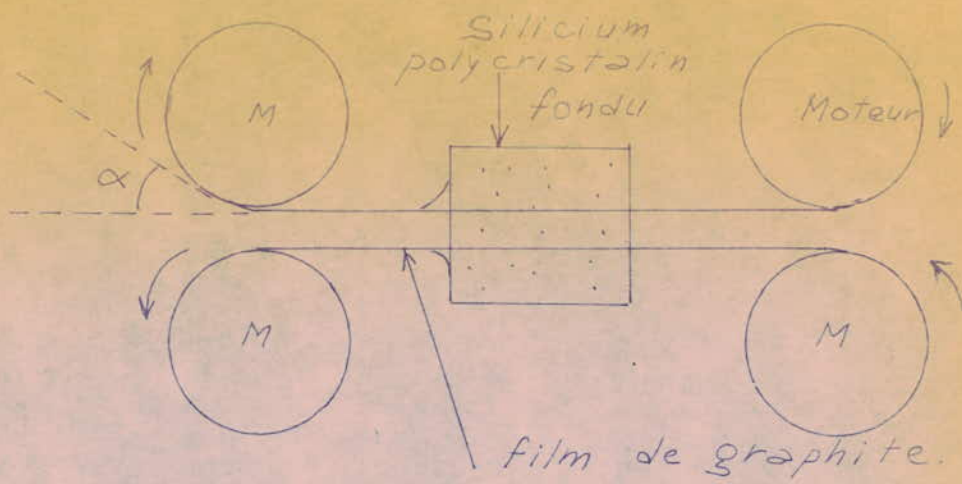


fig. 4,4.

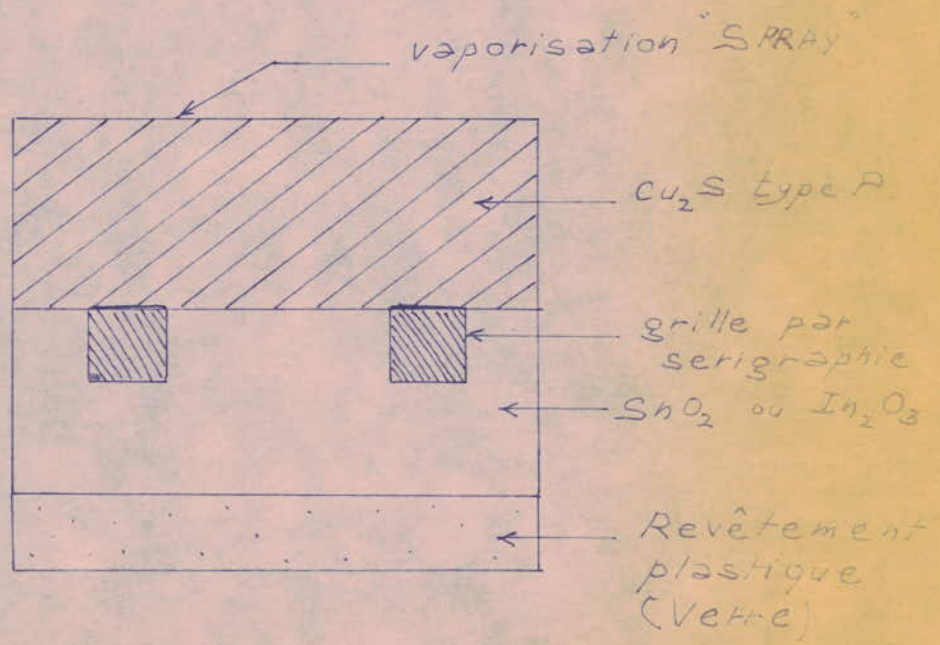
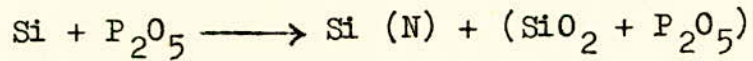


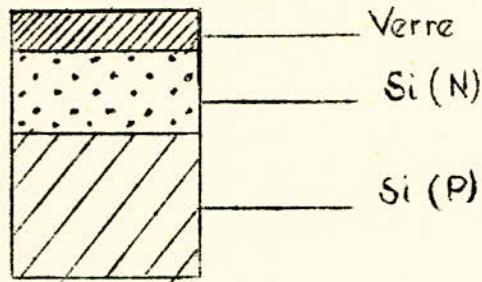
fig. 4,7.

4-1-4      Obtention de la jonction et des contacts dans le  
cas du silicium monocristallin:

On dispose de barreaux cylindriques de Si (P) qu'on découpe en disques monocristallins. On place ces disques, qu'on dégraisse et décape, dans un four à haute température, parcouru par du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (purifié), qui va attaquer le Si par diffusion; Le phosphore, ainsi transporté par l'oxyde, fournira la couche N, selon l'équation:



Où SiO<sub>2</sub>+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est le film de verre qui se forme en surface.



Cellule au silicium protégée par la silice formée  
lors de la fabrication .

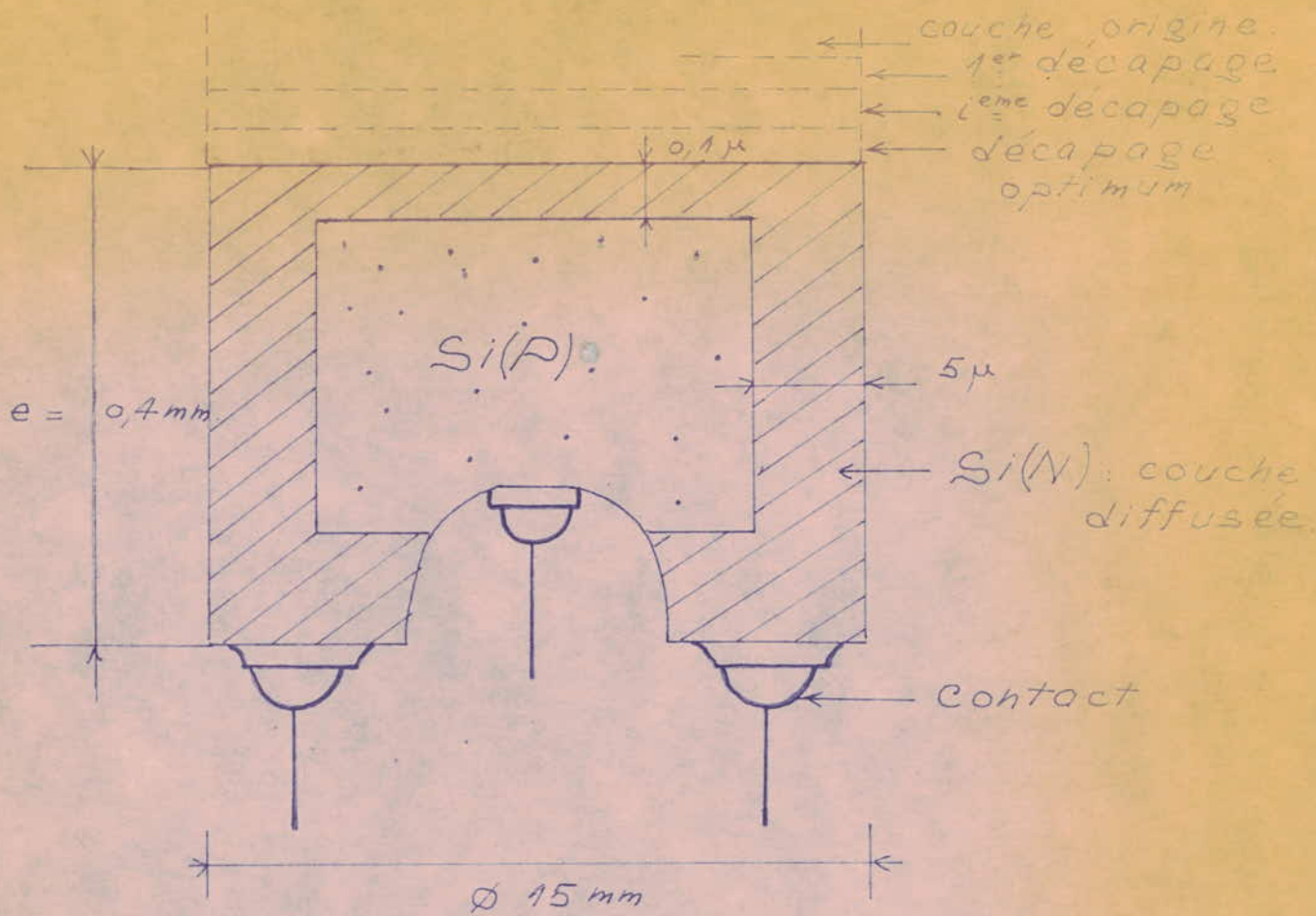
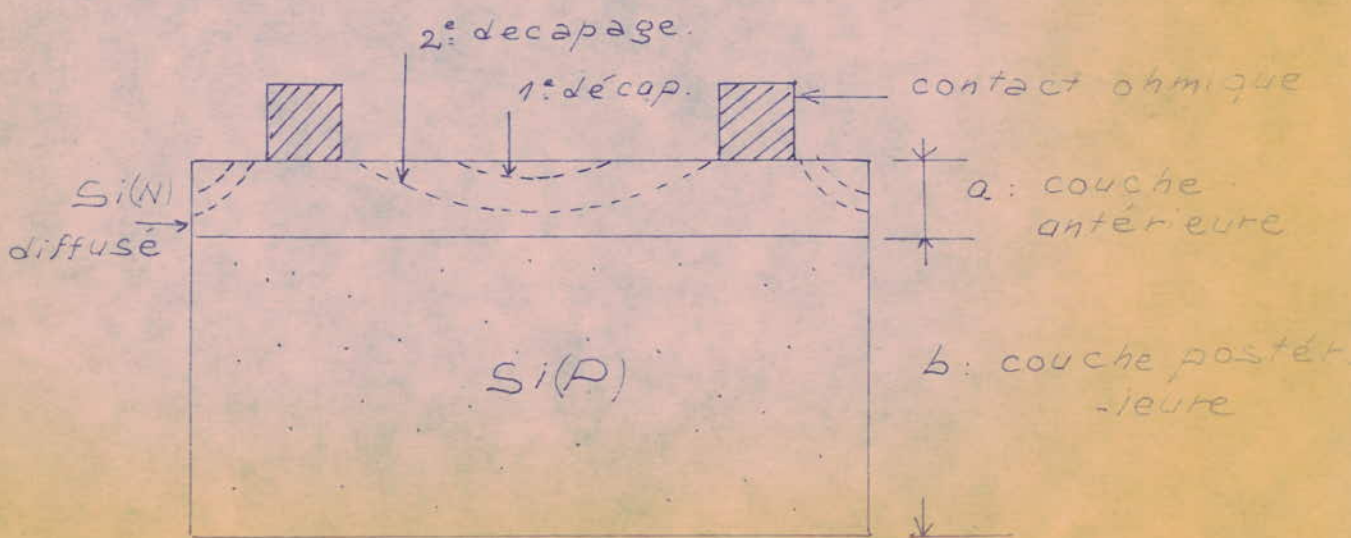


fig. 4,5



A partir de cette étape, surgit un problème, celui de procéder à un contact sur la couche attaquée N mince. Le contact doit se soumettre à certains critères impératifs: Il doit être ohmique, mécaniquement robuste, de résistance faible afin de ne pas être l'origine d'une charge d'espace nuisible. Deux méthodes sont alors utilisées (16):

Première méthode :

On doit avoir une couche N assez épaisse, ( $4\mu$  environ) pour procéder au contact. Celui-ci étant assuré sur les deux régions N et P, on masque cette dernière.

Obtention d'un bon rendement: La couche N attaquée par diffusion qui sera soumise à l'incidence du flux photonique (lumineux), doit avoir une épaisseur  $a$  optimale.

-Si  $a$  est grande (devant  $L_p$ ), le trou minoritaire créé par le photon se recombinera rapidement en surface ou en volume, et le rendement sera faible.

-Maintenant si  $a$  est très mince, la résistance de la cellule relative à la région antérieure sera importante, puisque, les impuretés (facteur déterminant de la conductivité) se trouvant en majorité en surface, leur taux sera réduit par un décapage permettant la réduction de  $a$ . Ce compromis du choix de l'épaisseur nous amène à la recherche du point optimal par décapage chimique successif. (cf. fig. 4,5). D'après le schéma de la figure 4,5, on procède à un décapage répété de la couche antérieure. Pour chaque étape, on trace la caractéristique correspondante (I,V), jusqu'à obtenir la courbe désirée: Elle indiquera l'épaisseur  $a$  optimale. De cette manière l'épaisseur de la région <sup>de contact</sup> n'est pas atteinte. La variation du rendement maximal et du courant photoélectrique  $i_p$ , en fonction de la durée de décapage est décrite par (figure 4,6).

caractéristique (I, V).

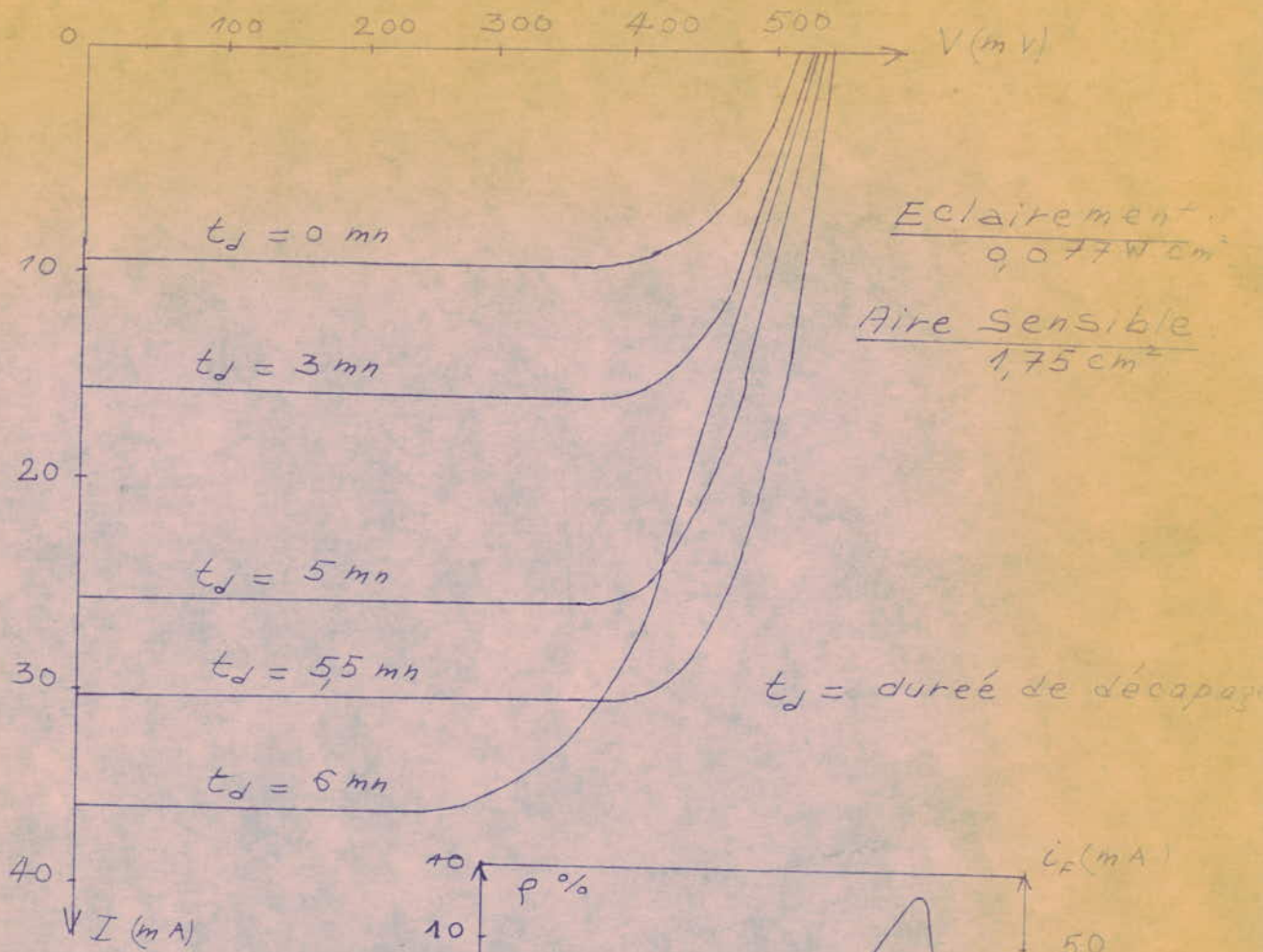
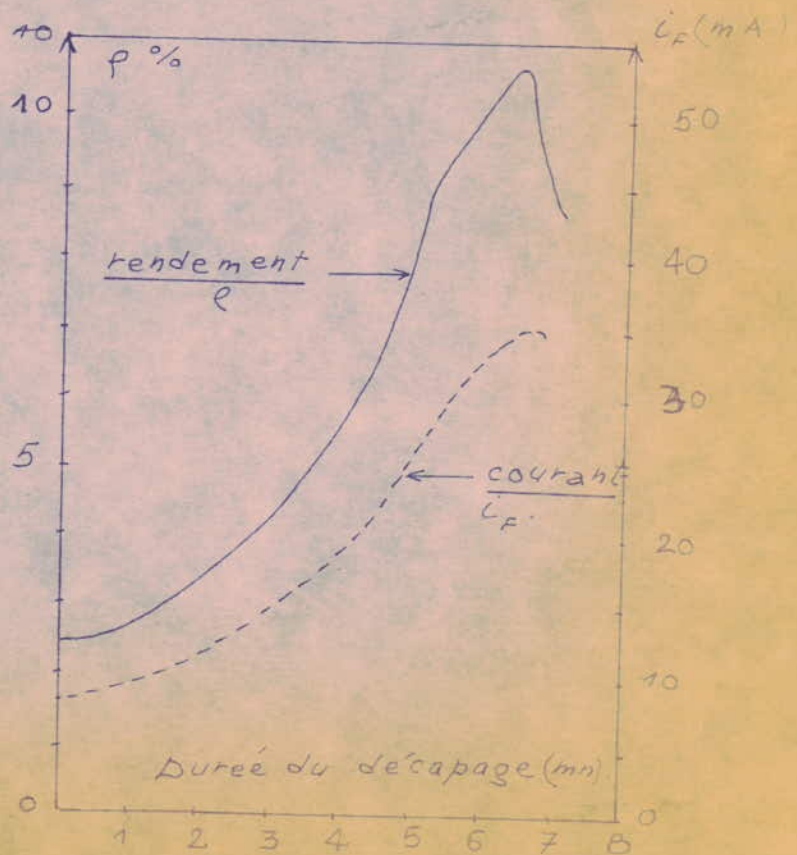


fig. 4, 6.





## Deuxième méthode :

On dispose d'une cellule de couche diffusée N assez épaisse 5 à 6  $\mu\text{m}$  (température 1100° C) pendant deux heures par exemple). On pratique le contact et l'on couvre cette face par une laque qui la protégera des réactions ultérieures. On attaque ensuite par jet la région non couverte, afin de supprimer complètement la couche diffusée; on procède alors, à une nouvelle diffusion légère (10 mn pour une température de 950° C), pour l'obtention de la couche antérieure utile optimale (0,1  $\mu\text{m}$  environ).

-Apparemment, la seconde méthode est nettement plus avantageuse que la première. Elle a l'intérêt de donner naissance à une couche protectrice de verre ( $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{SiO}_2$ ) sur la couche éclairée. En outre elle est moins coûteuse, puisqu'elle ne nécessite pas de contrôle de décapage. L'adoption d'une fabrication particulière est directement liée au rendement, donc au facteur coût.

Voici établi, pour illustrer, un tableau représentant le coût relatif à chaque étape de fabrication d'une photopile au silicium (16) dont le rendement approche 11%.

Fabrication	coût en \$ / kg
$\text{Si}$ métallurgique	0,50
Chlorosilane (tri)	10
Polycristallin pour semi-conducteur	80 - 100
Monocristal (par Czochralski)	220 - 250
Czochralski	( $10^{-4}$ \$ / watt)
Rondelles pour cellules (300 $\mu\text{m}$ )	550-650

## 4-2-PLAQUES PHOTOVOLTAIQUES AU SULFURE DE CADMIUM

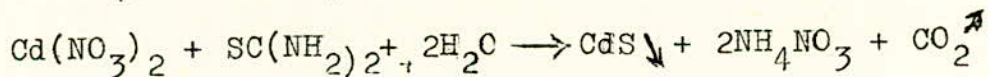
Utilisées dans l'alimentation des engins à usage spatial, ce type de cellules se voit progresser dans la voie des applications terrestres (17). Etant l'une des rares catégories de cellules susceptibles de concurrencer actuellement celles au silicium, vu l'attrait qu'elles présentent quand au coût et au rendement, on a senti ici l'intérêt que porte ses méthodes de fabrication. Les photopiles au CdS, sont des cellules à couches minces d'environ 20  $\mu$ m d'épaisseur et sont conçues sous forme de film continu. L'hétérojonction est assurée par les deux semi-conducteurs CdS et Cu<sub>2</sub>S s'apparentant respectivement aux types N et P.

### 4-2-1- Dépôt de l'élément C d S

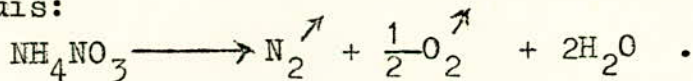
Celui-ci peut être déposé sur le substrat (Cu<sub>2</sub>S) par évaporation sous vide. Cette méthode étant coûteuse vu le caractère non contrôlé de l'épaisseur CdS obtenue, on a fait appel à une technique plus adaptée, régie par un transfert du cadmium et du soufre sur le substrat, accompagné d'une recombinaison sur celui-ci. Cette méthode, dite vaporisation "Spray" (17) se pratique en phase liquide, avec une réaction contrôlée des éléments.

#### La vaporisation de Spray

Elle permet de préparer le semi-conducteur N, par vaporisation d'une solution ionique de soufre et de Cadmium et par réaction de cette solution sur le support chauffé à 200° C (~~à 200° C~~), on aura alors l'équation:



Puis:



Dans cette méthode, on assure le contrôle du débit d'air, du liquide, et la régulation de température et de pression.

#### 4-2-2- Protection, contact et cellule finie:

Le substrat sus-cité est du verre recouvert d'une électrode répartie, en  $\text{Sn O}_2$  ou  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Sur cette couche on place par électrolyse (après photogravure) la grille par sérigraphie, qui va renforcer la couche électrode par continuité. On pratique ensuite le dépôt du  $\text{Cu}_2\text{S}$  type P. Celui-ci est recouvert alors, par la méthode "Spray", par du CdS (N) sur lequel on étale une seconde électrode en métal. Cette dernière sera protégée par du Kaptan sur lequel reposera la cellule (figure 8).

La structure polycristalline du CdS que l'on doit conserver au cours des différentes opérations et le taux d'impuretés de 1000 p.p.m du  $\text{Cu}_2\text{S}$ , montre le caractère peu exigeant de telles photopiles, comparées à celles au  $\text{S}_i$  qui demandent un important degré de pureté (quelques p.p.m).

#### 4-2-3- Caractéristiques et coût des photoéléments à CdS

On sait que la caractéristique (I,V), pour un éclairement donnée, est décrite par les trois paramètres,  $V_0$ ,  $I_{cc}$  et  $P_m = V_m \cdot I_m$ , au moyen desquel on déduit le facteur de forme (de remplissage)

$$C = \left( \frac{P_m}{V_0 I_{cc}} \right)$$

Pour les deux types de photopiles au CdS, la AMO et la AM1, ont été données les valeurs suivantes afin de décrire les performances de telles jonctions (17)

Il est à noter que seul le facteur rendement, n'évalue pas l'état de concurrence d'un type de cellule par rapport à un autre. Le facteur coût intervient.

Les valeurs sont données dans le tableau ci-dessous:

: Eclaircement	: AMO	: AM1
:	: 140 mW/cm <sup>2</sup>	: 100 mW/cm <sup>2</sup>
: V <sub>oc</sub>	: 455 mV	: 450 mV
: I <sub>cc</sub>	: 695 mA	: 615 mA
: P <sub>m</sub>	: 220 mW	: 195 mW
: C	: 70 %	: 71 %
: Rendement	: 6 %	: 7,2 %

Afin d'illustrer, on donne ici le coût de trois étapes de fabrication du CdS (cf. ci-dessous).

On choisit une unité de prix, le \$/Watt. celui-ci reflète plus explicitement le coût que le \$/kg qui est lié, lui, beaucoup plus à la matière première qu'à la cellule finie. Une légère concurrence planifiée, se fait actuellement entre les cellules au silicium et celles au CdS; On se fixe un prix "but" pour la fabrication de photoéléments CdS, prix qu'on évalue en corrélation avec celui des cellules au Si<sub>1</sub> actuelles. L'évolution se fait par la réduction du prix d'une étape de fabrication.

Les valeurs du coût sont données dans le tableau ci-après, pour un prix but de 1 \$/Watt.

étape de fabrication.....	Prix estimé en \$/Watt
matière première.....	0,25
Sérigraphie, Métallisation.....	0,25
Opération "Spray".....	0,5 (à imposer)

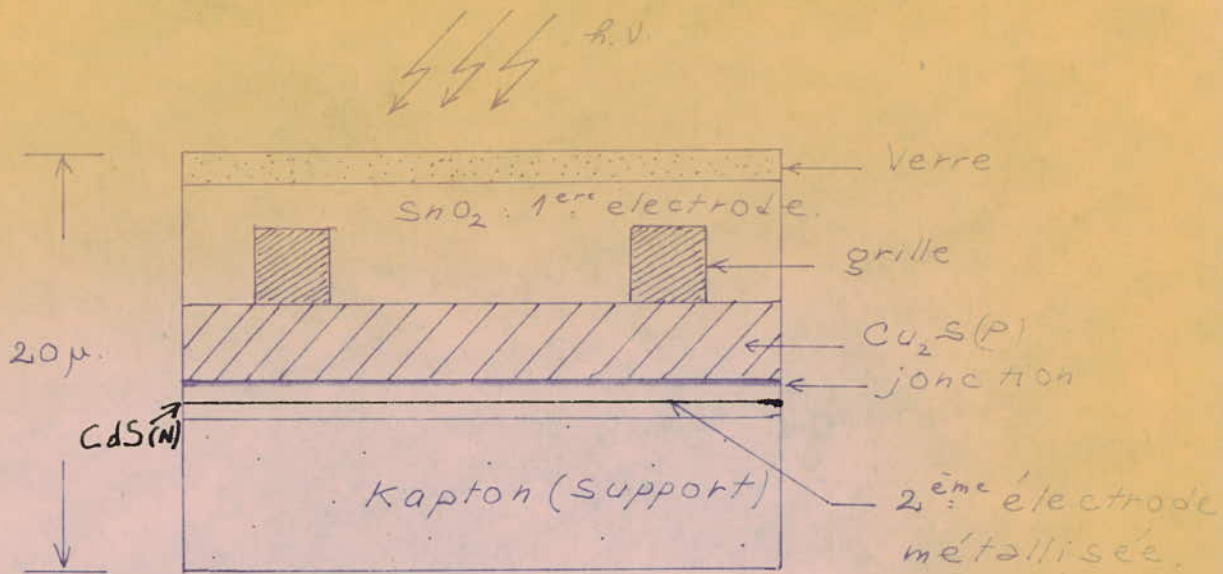
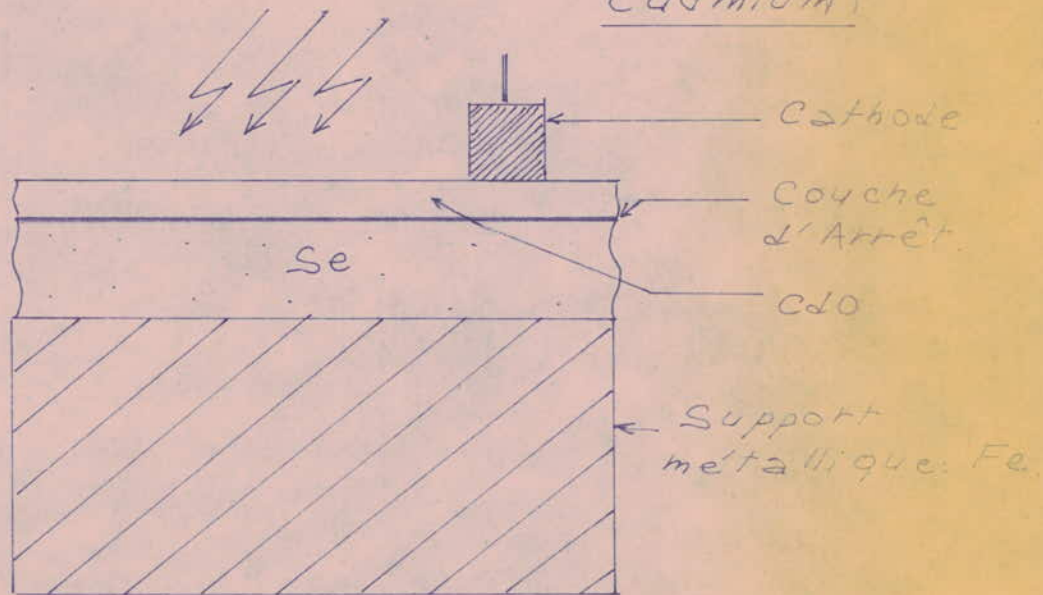


fig. 48.

Structure d'une cellule photovoltaïque au Sulfure de Cadmium



Cellule à couche d'Arrêt au Selenium

fig. 4,9

## 4-3 Photopiles à jonction métal semi-conducteur

### Fabrication des cellules au Sélénium

Un autre type de photoéléments, ne reposant plus sur l'effet d'une barrière de potentielle classique, existe; Celui au sélénium est ici cité. En effet, l'apparition d'une couche d'arrêt (barrière de Schottky) est due à la jonction métal semi-conducteur.

Le Sélénium, étant un élément dont l'électronégativité est d'ordre deux, il sera par nature, un semi-conducteur du type P.

A l'état pur et hexagonal, il possède une forte résistivité -  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  - on aura intérêt donc, à lui ajouter des impuretés afin d'améliorer sa conductivité (environ 2% de thorium, d'argent, de chlore ou d'iode ...) (19)

#### 4-3-1 -Préparation du sélénium utile et support.

A l'état initial, le sélénium a une structure amorphe. Une meilleure forme, la structure hexagonale, lui est imposée. La couche de sélénium mince, doit reposer sur un support robuste métallique, et dont on prévoit les propriétés. Le dépôt se fait soit par évaporation sous vide, soit par fusion à  $175^\circ \text{C}$  environ, sur un métal tel que le fer. La forme hexagonale est obtenue après ce dépôt, par chauffage du support entre  $120^\circ \text{C}$  et  $180^\circ \text{C}$ . Enfin, le dopage du Se est régi par la durée du traitement thermique (quelques heures pour  $200^\circ \text{C}$ ). Celui-ci faisant intervenir l'introduction d'impureté d'argent, par attaque de  $\text{NO}_3 \text{Ag}$  sur le Se.

#### 4-3-2 -Formation de la couche d'arrêt.

En surface, se forme, au contact de l'air, du  $\text{Se O}_2$ . Se étant du type P, on doit lui diffuser par épithaxie, un corps du type N. La barrière de Schottky formée

par  $\text{Se-O}_2$ , verra son importance accentuée lors de la diffusion de l'élément N, le Cadmium, qui interviendra soit sous forme de  $\text{CdO}$ , ou sous forme  $\text{CdSe}$ .

Par ailleurs, si l'on désire que notre jonction soit sensible à un spectre lumineux donné, il suffira d'intervenir au niveau du mélange avec Cd, le Bismuth, le Tellure, ou le plomb. Afin d'assurer le passage du courant, on couvre la surface à éclairer par une contre électrode mince de quelques centièmes de microns, conductrice et très transparente à la lumière, en métal ou en semi-conducteur (  $\text{CdO}$ , Ag, Au ). Ce dépôt se pratique sous vide par évaporation.

#### 4-3-3 -Le contact

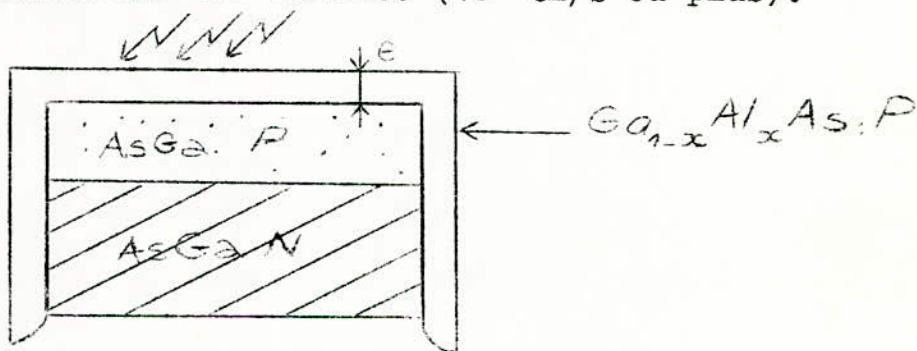
La cathode doit être renforcée, doit être située en périphérie, et ne doit pas être le lieu de recombinaison. Actuellement, on utilise l'Eutectique Bi-Etain-Cd, dont le point de fusion est de  $103^\circ \text{C}$ . Enfin, la pastille peut être placée dans un boîtier préalablement étudié. Les photoéléments à Se, sont des cellules à effet avant. Ceux à oxyde cuivreux par exemple, possèdent une couche d'arrêt antérieure ou postérieure, selon la fabrication. (fig. 4,9).

4-4 Technique de production de photocellules d'AsGa, utilisant des substrats de qualité médiocre.

4-4-1- Différentes méthodes :

De telles types de cellules sont des hétérojonctions de AsGa couvert de  $(Ga_{1-x}Al_xAs)$ . On utilise soit la combinaison :  $(Ga_{1-x}Al_xAs)$  type P- (AsGa type N) soit  $(Ga_{1-x}Al_xAs)$  type P-(AsGa) type N- (AsGa) type P.

De pareilles hétérojonctions sont susceptibles de fournir un rendement supérieur à 18 % malgré l'élévation de la vitesse de recombinaison en surface ( $10^6$  cm/s ou plus).



Afin d'atteindre cette valeur de rendement, la couche de  $(Ga_{1-x}Al_xAs)$  doit avoir une épaisseur  $e < 3000 \text{ \AA}$  et ce, afin de réduire les pertes par réflexions optiques. En outre, la longueur de diffusion des minoritaires doit dépasser  $2 \mu$ , afin d'augmenter l'efficacité de collection. La longueur de diffusion des électrons dans la couche d'AsGa dopé, peut être supérieure à  $2 \mu$  pour un degré d'impuretés de  $10^{19}/\text{cm}^3$ . Par contre, il est difficile d'obtenir des substrats -N, ayant une longueur de diffusion  $L_{\text{trou}}$  effective  $> 1 \mu$ . Une variation de  $L_{\text{trou}}$  allant de  $0,5 \mu$  à  $2,5 \mu$  a été observé, pour  $10^{17}/\text{cm}^3$  d'impuretés, mais la valeur de  $1 \mu$  est la plus fréquente. La recombinaison en surface n'étant pas un grand problème vu l'épaisseur réduite de la couche éclairée, le substrat de médiocre qualité demeure le souci majeur pour les performances en rendement. Le procédé limitant  $L_{\text{trou}}$ , conduit aussi à une réduction de  $L_{\text{électron}}$  de la région P diffusée dans le substrat, ce qui cause une faible sensibilité pour tout le spectre.



Trois méthodes ont été suggérées pour résoudre les problèmes des substrats de qualité médiocre ( ) ;

Première méthode: On donne naissance, ici, à une couche épitaxiale -N, (dans l'AsGa), couche susceptible de fournir une bonne longueur de diffusion dans le substrat.

Deuxième méthode: Appelée "Leaching", elle consiste à tremper le substrat dans du Ga Al fondu, avant de pratiquer la diffusion, de façon discontinue et répétée.

Troisième méthode: On obtient une couche d'AsGa (type P) épaisse ( profondeur de jonction ) de façon à ce que toute la lumière soit virtuellement absorbée.

#### 4-4-2 Amélioration apportée :

La couche P est obtenue soit par diffusion, utilisant un substrat médiocre, soit par épitaxie (double) donnant un rendement plus élevé.

Plusieurs échantillons d'AsGa type N de petite  $L_{\text{trou}}$  ont été soumis au traitement par "Leaching", dans lequel la pastille est trempée dans du As-saturé.-Ga Al.

Après plusieurs de traitement, l'amélioration des valeurs de  $L_{\text{trou}}$  n'était pas appréciable de façon à induire un rendement tel qu'il est fourni par le modèle conventionnel (par profondeur de jonction de 0,3 à 0,6  $\mu$ )

Par contre, l'effet de "Leaching" se fait beaucoup plus sentir sur la  $L_{\text{électron}}$  dans l'AsGa type P.

On utilise le cuivre diffusé sur l'AsGa type P (contact avec le gallium liquide) en proportion  $4 \cdot 10^{-3}$ . C'est le cuivre ou une impureté similaire, <sup>sera</sup> responsable de la faible longueur de diffusion dans le matériau initial.

Le rendement quantique, mesuré sur les photons de basses énergies, impose une longueur de diffusion d'électrons supérieure à  $4 \mu$  dans l'AsGa type P diffusé, bien que la longueur de diffusion des trous peut être de  $0,6 \mu$  dans le matériau initial, il ne faudrait pas négliger l'effet de l'interface dans le degré d'impureté est plus élevé qu'au bord de la jonction. Tant que de bonnes  $L_e$ , dans l'AsGa type P, sont obtenues pour un substrat médiocre, il est possible de fabriquer de bonnes photopiles en utilisant une combinaison du procédé de diffusion profonde et du procédé de "Leaching", de façon simultanée.

5- Effets de la température dans les cellules solaires au silicium, et à barrière de Schottky..

Une cellule solaire peut être exposée à un rayonnement concentré, ou pas. Dans le premier cas, il apparaît une augmentation de la température (sensible) qui affecte de façon variable, suivant la catégorie des matériaux de ces photopiles, certains paramètres déterminants, dont le rendement, le courant de court circuit, la tension à vide, etc...

Ainsi les qualités de la cellule au silicium se voient réduites de façon appréciable. A 400° K, le rendement de transfert est maximum pour les matériaux de gap 1,48 eV. A 500°K, il l'est pour ceux dont le gap vaut 1,80 eV. Dans de pareilles conditions, le rendement de transfert du silicium est pratiquement nul.

L'AsGa, dont le gap vaut 1,45 eV, est par contre utilisé en rayonnement concentré. Afin de prouver la valeur des cellules à barrière de Schottky aux températures élevées, une étude expérimentale a été menée ( ) sur une cellule constituée d'un barreau semi-transparent de Cu/Cr métallique "déposé" sur du silicium type P, et ce, pour une variation de 25° C à 125° C. L'éclairement fourni par une lampe en tungstène de température de couleur ( ) de 2800 ° K, valant 20 mw/cm<sup>2</sup>, sur une cellule du type SBSC 96, a conduit aux résultats ci-dessous:

Paramètres	Cu/Cr--Si(P)
V <sub>0</sub>	2,3 mV/°C
C	0,11%/°C
Q (rendement)	8 %

Le courant de court-circuit augmente légèrement, alors que le coefficient n diminue (n est le facteur fonction de la qualité du matériau).

## 6 - ANALYSE COMPARATIVE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Le domaine spatial a vu l'usage des photopiles au Si de plus en plus grandissant. Les différentes techniques et améliorations, ayant évolué dans l'optique d'une utilisation non terrestres, ne peuvent être transférées de la façon la plus adéquate au domaine à usage courant sans subir de modifications. Ainsi la cellule au Si, possédant un atout favorable, a le mérite d'être la plus courante, tenant compte de son rendement élevé allant jusqu'à 17 %, pour une fabrication relativement peu coûteuse. Deux autres types de photoéléments la concurrencent actuellement, l'hétérojonction (CdS-Cu<sub>2</sub>S) et la cellule en Arseniure de Gallium.

La première a des qualités de coût, vu son poids (couches minces) faible et la fabrication en série, plutôt que de rendement.

Quant aux photovoltaïques à AsGa, elles sont l'objet d'études très poussées, et ont vu leur rendement atteindre 18% mais pour des techniques très chères, d'autant plus que le Gallium est un matériau rare.

Par ailleurs, dans la catégorie des photopiles à jonction métal semi-conducteur, celles à couche d'arrêt amont (appauvrissement) sont pratiquement les seules à être utilisées.

Parmi elles, on porte peu d'intérêt à celles au Se, car bien que le matériau soit peu cher, le rendement de la jonction (Se - CdO) reste faible (2 à 3 %).

Par ailleurs, on peut citer un cas de cellule à hétérojonction, celle à oxyde d'Indium In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si (type N), dont le rendement atteint 10 % (22). Sa technique de fabrication revenant trop chère, sa production n'a guère la possibilité d'entrer en compétition industrielle.

Photopiles type	Si (P.N.)	Ge (P.N.)	AsGa (hetero-junct. P.N.)	CdS (Cu <sub>2</sub> S) (hetero-junct. P.N.)	AsGa-AsGa (hetero-junct. P.N.)	Se (M.S.)	AsGa-CdS (hetero-junction)	CdS-CdTe (hetero-junction)	CdTe-Cu <sub>2</sub> Te (hetero-junct.)	CdS-InP (hetero-junct.)	CdS-CuInSe <sub>2</sub> (hetero-junction)
type	homo P.N.	homo-junct. P.N.	hetero-junct. P.N.	hetero-junct. P.N.	hetero-junct. P.N.	M.S.	hetero-junction	hetero-junction	hetero-junction	hetero-junct.	hetero-junction
Rendement. $\eta$	16% (17%)	5%	10%	8% (1970)	12% (1973)	2% à 3%	12% (1973)	4%	7% (1963)	12,5% (1975)	11%
Gap à 300°K (ev)	1,11	0,75	1,43	2,4 (Cu <sub>2</sub> S: 1,21)	1,8	2,2	1,43 et 2,4	CdS: 2,42 CdTe: 1,44	~1,45	InP: 1,27	CuInSe <sub>2</sub> : 2
C (facteur de forme non concentré)	80%		81%	70%	$k = \text{coefficient de concentration}$						
C (concentré)	-	-	85%	-							
C (très concentré)	-	-	60%	-							

Valeurs Optimales des épaisseurs de films amorphes	film SiO <sub>2</sub>	
	perdes par reflexion	1012 787
	Epaisseur Optimale	800 700
	perdes par reflexion	1507 950
	film SiO <sub>2</sub>	
Epaisseur Optimale	1050 1050	
perdes par reflexion sans aucun film	3565 355	

Valeurs Caractéristiques de photopiles

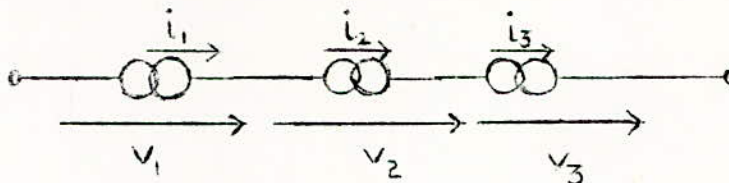
## 7 -- LES PANNEAUX SOLAIRES

Afin d'obtenir une énergie suffisante, on groupe judicieusement les photopiles de manière à constituer un panneau solaire. Les cellules sont d'abord connectées en modules, puis une association adéquate formera le panneau.

### 7-1-Association des cellules

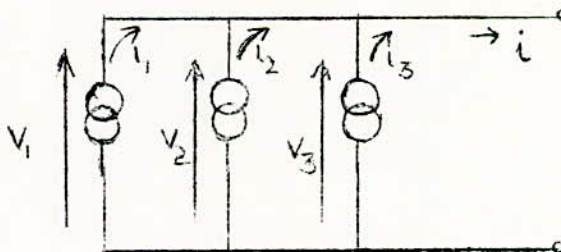
Il existe diverses combinaisons de groupements. La connexion en série permet d'avoir une tension maximale tandis qu'en parallèle, on récupère un courant maximal, l'association série-parallèle fournit une bonne puissance d'utilisation.

-Les photopiles<sup>sont</sup> branchées en série quand elles délivrent toutes le même courant sous un même éclairement.



$$i_1 = i_2 = i_3 \quad , \quad V = V_1 + V_2 + V_3$$

-Elles sont branchées en parallèle quand elles fournissent une même tension sous un même éclairement.



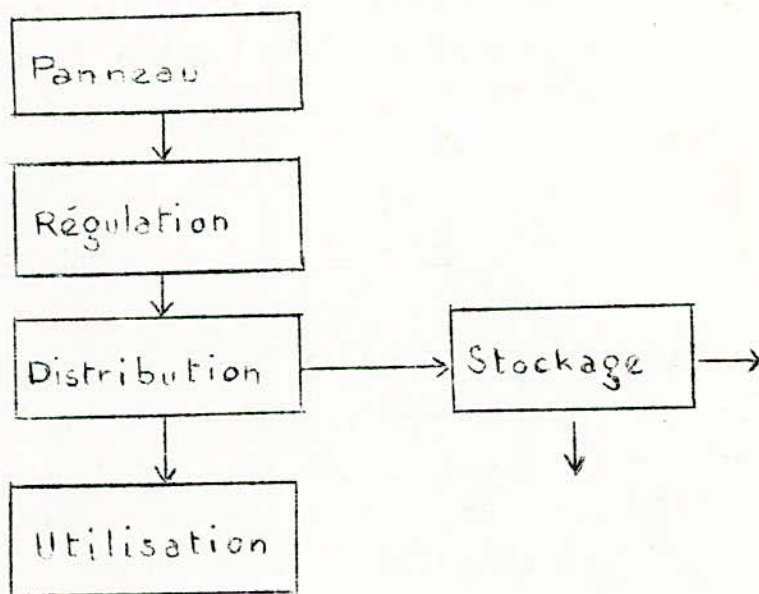
$$V_1 = V_2 = V_3$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

Pour connaître approximativement le nombre de cellules dans un panneau; considérons que toute la surface soit active et que les photopiles aient un rendement de 10 %. Pour 1m<sup>2</sup> recevant environ un éclairage énergétique de 1 kW, le panneau comporterait 500 cellules si la dimension de la cellule est d'environ 20 cm<sup>2</sup>. Les panneaux fournissent une tension de 6, 12, 24, 36...Volts, selon le nombre de photopiles associées.

### 7-2-Utilisation des panneaux

Toute installation éloignée des réseaux de distribution devant consommer peu de puissance mais durant des années peut être alimentée économiquement par des panneaux. Il est clair que le panneau ne fonctionne pas sans éclairage ( la nuit par exemple ); On voit alors la nécessité de stocker une partie de l'énergie fournie, alors que l'autre partie est utilisée directement. Un système de régulation permettra le couplage correct des batteries (la batterie ne devra pas débiter sur la cellule), de même qu'il faudrait adapter les cellules aux batteries.



Le couplage panneau-batterie est déterminé suivant l'utilisation. La connaissance de la durée de fonctionnement de la batterie est nécessaire pour son choix. Pour les appareils de T.V consommant une trentaine de watts, la batterie a une capacité de l'ordre de 20 à 30 A.h; l'investissement varie donc d'une utilisation à une autre .

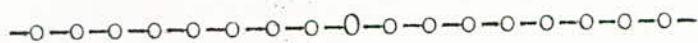
### 7-3- Facteurs limitant la performance du panneau

La photopile s'abîme aux hautes températures (voir 3254)  
Le rendement diminue et par conséquent la puissance fournie par le panneau diminue. Cette augmentation de température peut avoir comme origine, l'effet de serre. Une solution serait de protéger le panneau avec une matière qui éviterait cet effet. Il existe des pertes d'énergie lors de la charge de la batterie. La récupération de l'énergie stockée se fait à 85 % environ (rendement de la batterie).

Le rendement optimal varie avec l'éclairement; la charge étant fixe, il est à l'optimum pour un éclairement donné. Une solution serait une adaptation automatique tout au long du fonctionnement.



MESURES SUR LES PHOTOPILES



Diverses mesures ayant attrait à la photopile sont relativement possibles.

Les unes, sortant du cadre de l'utilisation pratique des cellules photovoltaïques, sont plutôt des mesures physiques théoriques, tenant compte de quantifications plus détaillées, touchent l'aspect subjectif du phénomène.

D'autres, sont liés à l'amélioration directe des performances des cellules, schématisent globalement et selon le besoin, le phénomène, mais d'une façon beaucoup plus objective: Elles doivent enchaîner l'étape de fabrication.

Enfin, restent les "mesures" nommées de terrain," liées à la fiabilité et éventuellement au contrôle lors de l'utilisation.

-----

# 1- PRESENTATION DES DIFFERENTES MESURES SUR LES PHOTOPILES

## 1-1 LES MESURES PHYSIQUES:

### La mobilité:

A l'étape primaire de fabrication et de conception, un élément déterminant pour l'obtention d'un rendement acceptable est le choix de la forme du cristal. On sait par exemple que le Se à l'état amorphe, n'est guère utilisé ici, et doit être transformé en structure cristalline hexagonale adéquate, qui sera sa forme optimale.

Par ailleurs, on sait que le degré d'impureté lors du dopage, est assez précis (substrat, couche épitaxiale relative, ...). On est donc amené à faire une étude de physique du solide et de cristallographie, liée intrinséquement au comportement du semi-conducteur de nos cellules.

### Application de l'effet Hall ( 9 ) :

Il apparaît un champ électrique transversal donc, une d.d.p. dans un métal ou un semi-conducteur qu'on introduit dans un champ magnétique perpendiculaire à la direction d'un courant traversant le matériau. Les électrons animés de la vitesse  $v$ , sont déviés par l'action de la force de Lorentz :  
$$\vec{f} = (q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}).$$

On utilise ce phénomène pour étudier la mobilité - du semi-conducteur tel que le CdS par exemple - liée à la structure cristalline et au dopage.

### La Résistivité:

Celle-ci, pour le matériau du type N ou P de la photocellule est mesurée par la méthode des quatre pointes (cf. Annexe : 4).

### Épaisseur de la jonction :

Plus la zone de charge d'espace est large, et moins l'effet photoélectrique est affecté. D'où l'intérêt de la mesure de cette épaisseur. Dans ce but, on dispose en premier lieu d'une cellule photovoltaïque finie. On la scinde transversalement en deux, suivant un angle  $\alpha$  quelconque. La cellule est ensuite soumise à un produit chimique spécial qui aura la propriété de se déposer beaucoup plus sur la zone N que P, du semi-conducteur. On détermine alors, à l'aide d'un microscope électronique l'épaisseur de la jonction, connaissant la valeur  $\alpha$ . Ceci nous oblige de procéder par destruction.

### Mesure des paramètres $\tau$ , $L$ , $s$ :

La recherche de la durée de recombinaison  $\tau$ , et le coefficient  $L$  (longueur de diffusion), a attiré à des mesures "théoriques", qui n'auront aucun intérêt dans la performance. Quand à la mesure de la vitesse de recombinaison en surface  $s$  des porteurs, elle offre beaucoup de difficultés.

### 1-2- LES MESURES DE FABRICATION :

#### Coefficient de forme $C$ :

Le facteur<sup>le</sup> plus important sur lequel on soulève les discussions quand à l'utilisation d'une photopile fabriquée, est le rendement. Celui-ci est imposé par la résistance série (cf. 2-3-7-1-), et par l'éclairement  $E$ .

La charge optimale est la valeur :  $R_{opt} = V_m / I_m$   
le facteur de forme s'écrira :

$$C = \left( \frac{V_m \cdot I_m}{I_L \cdot V_0} \right)$$

Où  $I_L$  est le courant lumière,  $V_0$  est la tension à vide aux bornes de la photocellule.

En mesurant par une méthode appropriée C, on en déduit les qualités de notre photopile pour des valeurs de celui-ci se rapprochant de l'unité. C étant lié à  $R_s$ , est fourni par la puissance maximale :  $P_{opt} = V_m \cdot I_m$ .

#### Le coefficient d'absorption :

L'importance de la mesure du coefficient de réflexion  $\gamma$ , n'est pas négligeable surtout pour des photoéléments à couches non minces. Plus l'absorption est grande et plus le rendement photonique (quantique) croît ( ). Seulement, ce type de mesure sort du cadre de notre travail, s'intégrant dans le domaine des expériences d'optique.

#### Etalonnage et fiabilité :

Afin d'obtenir des puissances d'utilisation valables (100 watts pour  $1m^2$  de surface), on superpose des photocellules identiques dans des panneaux solaires. On envisage alors, la fabrication en série. Chaque cellule doit subir un test de sélection. On est amené à concevoir dans ce but, une cellule étalon qui servira de référence lors du contrôle.

#### L' Etalon :

La fabrication d'une telle cellule dépendra du type de matériau qui la compose. La photopile "étalon" au CdS n'est pas très stable, alors que celle au Si au contraire a peu de dérive. Ce type de dérive propre est dû essentiellement à la température. La cellule référence au Si, présente des fluctuations en début de fonctionnement, demeure stable pendant une douzaine d'années, puis reprend la dérive. On est donc obligé de procéder à un contrôle, sous température constante régulée.

#### 1-3 Le fonctionnement sur le terrain :

Dans cette situation, la cellule photovoltaïque exposée au soleil, est soumise à diverses sources de fluctuations plus ou moins prévisibles.

L'éclairement étant variable, module la puissance débitée au cours d'une journée, d'une année (solstices, équinoxes) on mesure ici la charge optimale, la tension et le courant fourni, le rendement "macroscopique", de tout un panneau solaire sous ces conditions de fonctionnement. Ce type de mesures relative de la météorologie, des données climatiques (brume, humidité, température) (4), et d'une analyse de fiabilité déduite des réponses des cellules sur un axe des temps assez étendu.

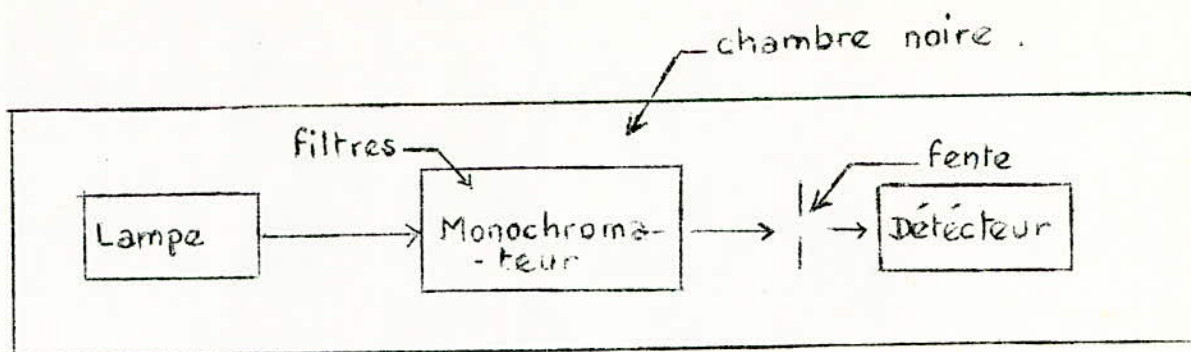
## 2 - CHOIX D'ETUDE D'UNE MESURE PARTICULIERE :

Ce choix a été fixé sur la mesure de la puissance optimale, de la f.e.m. à vide et du courant de lumière que débitent plusieurs photocellules. Ces trois facteurs fournissent le coefficient de forme et détermine la caractéristique (I,V) pour un éclairage donné.

La raison de ce choix est due à l'aspect industriel de ce type de mesures, et au temps réduit que demande l'expérience correspondante, moyennant une méthode automatique. L'obtention du courant  $I_L$  présentant des difficultés, on l'approximera à  $I_{cc}$  pour un fonctionnement en court-circuit, pour des éclairages pas trop élevés. Ceci nous permettra de classer les éléments photovoltaïques ayant les mêmes paramètres,  $P_{opt}$ ,  $V_0$ , et  $I_{cc}$  en série, pour une fabrication de bons panneaux.

### 2-1 LABORATOIRE DE MESURES :

Le but de ce laboratoire consiste à faire des mesures sur la photopile, sous un éclairage dont le spectre lumineux est similaire à celui du soleil. Dans une première étape, on étalonnera une lampe grâce à un monochromateur et un détecteur. L'étalonnage consistera à corriger le spectre de la lampe de manière à ce qu'il soit assimilable à celui du soleil. Dans l'autre étape, le système automatique conçu pourra nous informer sur la performance de la photopile et cela, en mesurant son facteur de forme C. La figure ci-dessous montre le principe global de l'étalonnage.



### 2-1-1- Etalonnage de la lampe:

La caractéristique (I-V) de toute photopile est fournie pour un éclairement E constant. On cherche à trouver alors une source lumineuse de puissance judicieusement choisie, dont le spectre suivrait celui du soleil. La source doit être placée de façon à ce que l'effet thermique ne modifie pas les propriétés de la cellule éclairée.

#### Choix de la lampe:

La simulation de la lumière solaire se fait par l'élaboration d'une source artificielle, ayant une température de couleur appropriée (cf. annexe 1). Toute lampe est caractérisée par son spectre défini par la variation de la brillance ou de l'énergie en fonction de la longueur d'onde.

Il existe deux types de sources lumineuses :

- Les sources cohérentes : Qui sont les plus puissantes parcequ'elles sont directives (exemple : le Laser).
- Les sources incohérentes : qui sont isotropes ; on peut les réaliser de quatre manières . (26) .

-En portant des corps à l'incandescence.

-En créant un arc électrique dans un gaz.

-Au moyen de la fluorescence dans les solides .

-En provoquant une décharge oscillatoire (relaxation) ou une étincelle entre deux électrodes.

Les trois premières sont les plus courantes:

### -Lampes à arc carbone.

En première approximation, la lampe à arc carbone a son spectre proche de celui du soleil. De plus, ce sont des sources faciles à obtenir; Leur inconvénient est l'instabilité qui est dû à l'existence des zones chaudes et froides .

### -Lampes à filament incandescent:

Elles sont le plus souvent l'objet d'expériences et d'utilisations. Leur spectre est centré dans l'infrarouge. Les lampes ordinaires couvrent le proche infrarouge ( $0,7\mu$  à  $3\mu$  ).

Soit une lampe de tungstène dont la température de couleur est de  $2850^\circ$  K, et la puissance de 1 kW. Son rayonnement sera isotrope. Ce caractère sera obtenu pour une géométrie du filament chauffé bien définie. Dans cette optique, l'étude d'un creuset de carbone chauffé par un courant haute fréquence est à envisager. (25)

### 2-1-2- Monochromateur :

A la lampe décrite ci-dessus, on associera un élément de correction qui servira à sélectionner une largeur assez fine du spectre. Il est constitué d'un prisme, de miroirs et d'atténuateurs. Il permet donc de fournir une radiation monochromatique laquelle traversera une fente de l'ordre du millimètre. Avec des filtres appropriées, on arrive à un spectre de la lampe proche de celui du soleil.

### 2-1-3- Détecteur:

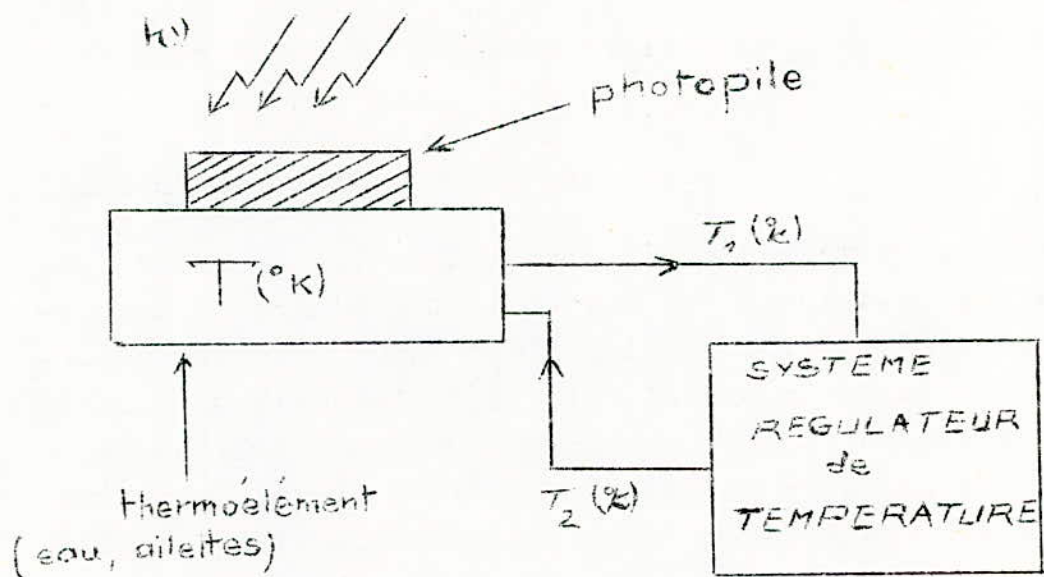
Pour la détection de rayonnements très faibles, ou très rapidement variables, la cellule peut rester insensible. En effet, le bruit peut être plus grand que le signal; Il est donc avantageux dans ce cas de moduler la lumière à détecter. L'ordre de fréquence de modulation doit correspondre à un optimum du rapport (signal/bruit) de la cellule. A la sortie, on amplifie la tension avec un amplificateur sélectif accordé sur



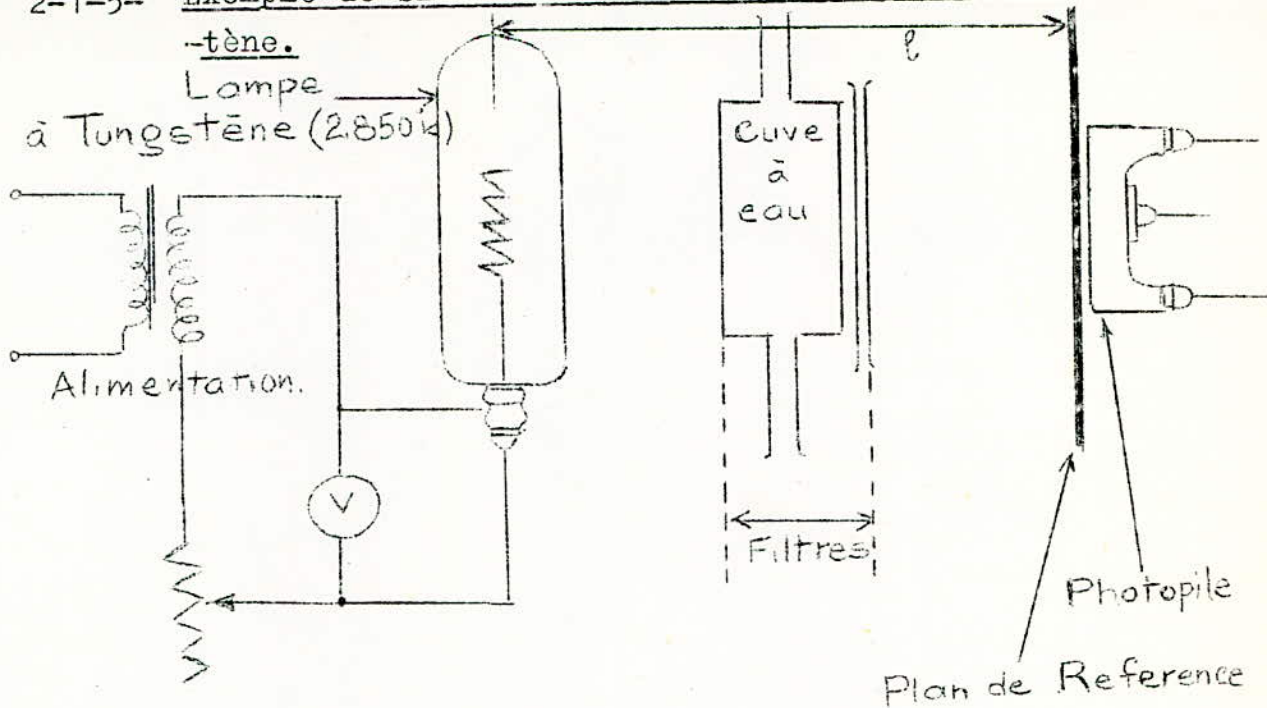
la fréquence de modulation de la lumière. Les détecteur les plus utilisés sont les cellules au PbS, car elles sont les plus sensibles entre 1,2 et  $3\mu$ , de même, elles ont une large bande. Les piles thermoélectriques et les bolomètres sont moins sensibles dans ces zones (25 !)

#### 2-1-4- Evacuation de la chaleur.

L'effet de la température étant néfaste pour les photopiles sur lesquelles on effectue les mesures, on doit, par conséquent remédier à cet inconvénient. Lors de la mesure, la cellule sera exposée à un flux lumineux, à une distance relativement faible de la source, de façon à ce que la puissance lumineuse fournie par la lampe de tungstène ne chute que légèrement. Pour que cette dernière ne soit pas une source chauffante, on prévoit une chambre noire qui contiendra tout le système de mesures et dont les propriétés (géométrie, coefficients d'absorptions, d'émission...) permettent l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur. En second lieu, on prévoit aussi une source froide supportant la photopile. L'utilisation de l'eau ou d'ailettes (radiateur) liées à un système de régulation est décrite par la figure ci-après.



2-1-5-- Exemple de simulation solaire par une lampe au tungstène.

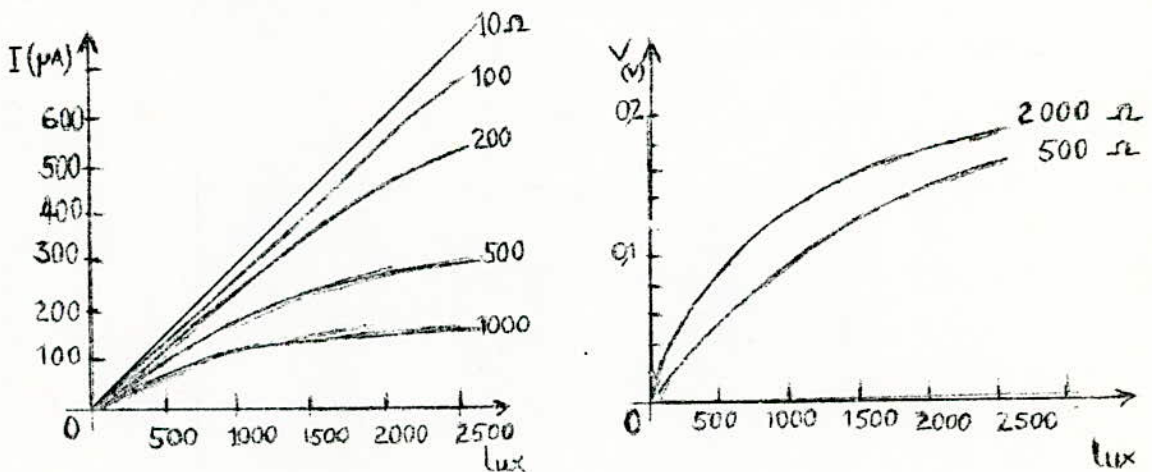


La source artificielle est constituée par une lampe à filament de tungstène et un ensemble de filtres colorés. ENTRE Entre la lampe à une température de couleur de  $2850^{\circ}\text{K}$  et la cellule à mesurer, sont interposés une cuve à eau et deux filtres à faces planes et parallèles (verres type OB8 et Sovirel type Katathermic). La cuve à eau absorbe les radiations de longueurs d'ondes supérieures à  $1,2 \mu$  et évite l'échauffement de la cellule. L'épaisseur de chaque filtre doit être calculée pour que la répartition spectrale de la lumière issue de la source suive celle du soleil dans l'intervalle ( $0,4 \text{ à } 1,15 \mu$ ). En faisant varier la distance "l", on fait varier l'éclairement de la lampe. Cette distance est réglée de façon telle qu'une cellule étalonnée au soleil débite un courant photoélectrique correspondant à un éclairement de  $0,1 \text{ W/cm}^2$ . L'éclairement solaire, lors de cet étalonnage, est mesuré à l'aide d'une thermopile de sensibilité connue (16) .

### 3- Mesures électriques :

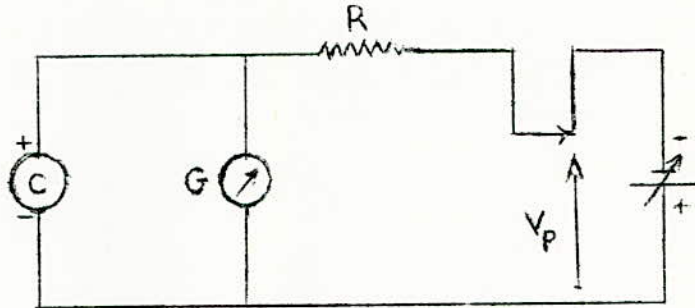
Le but de l'étude est de connaître le facteur de forme qui est égal à  $C = \frac{V_m I_m}{V_o I_{cc}} = \frac{P_m}{V_o I_{cc}}$ ,  $P_m$  sera donné directement par le montage régulateur. On devra donc mesurer  $V_o$  qui est la tension à vide et  $I_{cc}$  qui est le courant de court-circuit. Dans ces conditions, la caractéristique (I-V) est entièrement définie.

La structure interne de la photopile pose des problèmes pour la mesure. La résistance interne d'une photopile n'est pas élevée. Elle diminue avec l'éclairement. Si l'on branche un appareil de mesure dont l'impédance d'entrée est très élevée, le courant se referme à l'intérieur de la photopile. Même dans le cas où la résistance de charge est très faible, le courant n'est jamais rigoureusement proportionnel à l'éclairement (voir figure ci-dessous). On devrait avoir donc une résistance de charge nulle pour pouvoir mesurer le courant de court-circuit. En fait, comme on le voit sur la figure, aux éclairements faibles, on peut autoriser une résistance de charge plus élevée sans que la proportionnalité ne soit altérée, ce qui est avantageux car on a besoin, en ce moment, d'accroître la sensibilité du microampèremètre. De même, pour la mesure de la tension à vide, l'appareil devrait avoir une impédance d'entrée élevée aux forts éclairements (figure ci-dessous)



### 3-1- Mesure du courant de court-circuit

On doit pouvoir éliminer l'effet de la résistance externe. Pour cela, on utilisera une méthode d'opposition.



La résistance  $R$  est fixe, alors que la tension  $V_p$  est variable grâce à un potentiomètre. A l'équilibre (zéro du galvanomètre) on a :

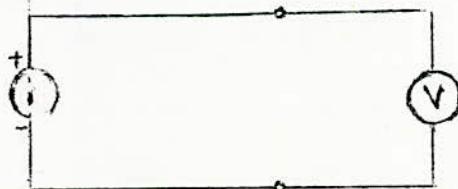
$$V_p = R \cdot I_{cc} \text{ alors } I_{cc} = \frac{V_p}{R}$$

On peut augmenter la sensibilité en élevant la résistance du galvanomètre, car ce dernier n'est pas en circuit avec la photopile. Si  $R$  est en mégohms, la valeur de la tension  $V_p$  sera de l'ordre du volt et celle du courant en microampères. L'erreur relative commise sur  $I_{cc}$  est :

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta R}{R} \quad (27)$$

### 3-2- Mesure de la tension à vide $V_0$ .

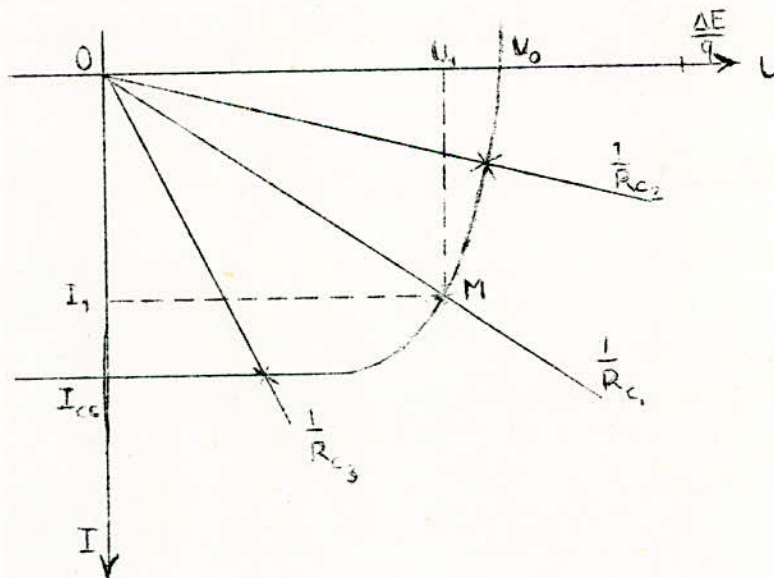
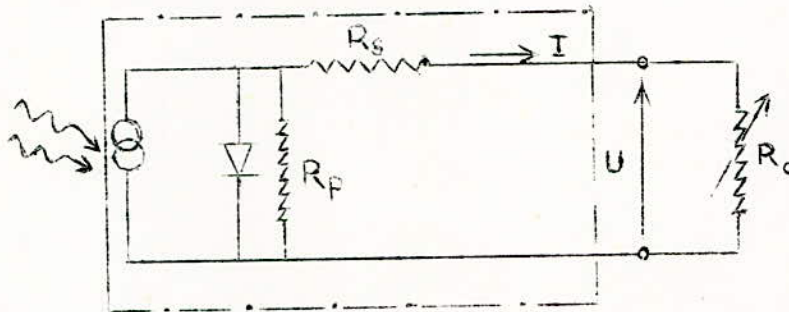
On branche aux bornes de la photopile un voltmètre digital et on lit la tension  $V_0$ . La sensibilité est celle du voltmètre.



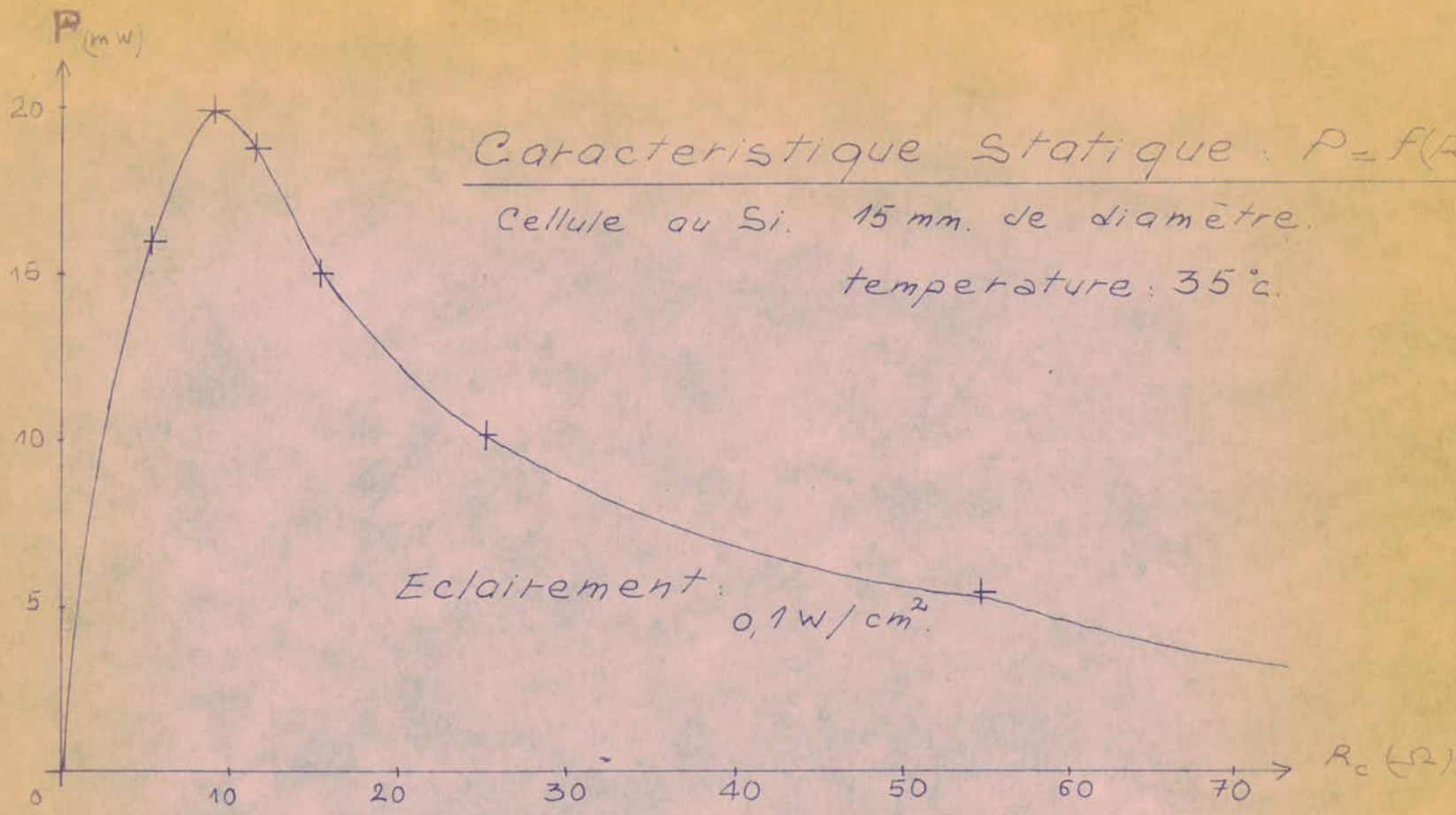
4- MESURE D'UN SIGNAL PROPORTIONNEL A LA VALEUR  
MAXIMALE DE LA PUISSANCE -

4-1- Recherche manuelle du maximum de puissance

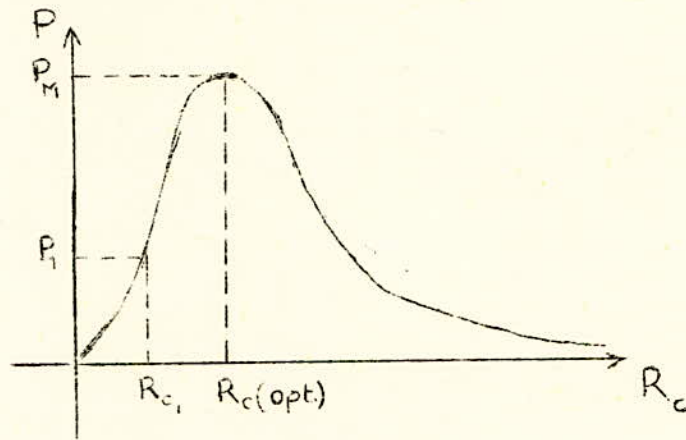
A chaque charge placée aux bornes de la photopile, correspond une puissance telle que :  $P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_c}$ . La caractéristique (U,I) de cette cellule, coupe la droite de charge  $U = R_c \cdot I$ , au point M correspondant à une puissance  $P_1 = U_1 \cdot I_1$ . Si on utilise un potentiomètre en charge, on aura pour différentes valeurs de  $R_c$ , des points puissance (de fonctionnement) différents.



Il existera alors une résistance de charge optimale  $R_{c(opt)}$  qui permettra l'obtention de la plus grande puissance et telle que :  $P_M = \frac{U^2}{R_{c(opt)}}$ .



Il est possible de rechercher le point  $P_M$  en utilisant un millivoltmètre aux bornes de la photopile pour la mesure de  $U$  et ce, pour différentes valeurs connues de  $R_c$ . Seulement, cette méthode simple présente d'énormes inconvénients. Elle est lente et peu précise.

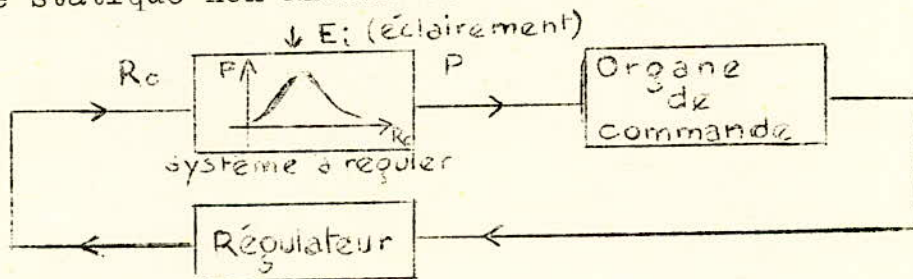


#### 4-2- La mesure automatique

Le facteur précision, ainsi que celui de la rapidité dans la manipulation nous ont amené à rechercher une méthode automatique de mesure, plus adaptée à l'utilisation en série de photoéléments et liée à la conception des panneaux solaires.

##### 4-2-1- La régulation extrême

Comme système asservi de mesure, la technique appelée "régulation extrême" sera le moyen impératif pour l'obtention du point  $P_M$ . Il est ici nécessaire de simuler la charge  $R_c$  alimentée par la photopile éclairée, à un système dont la sortie serait la puissance et dont l'entrée serait la valeur instantanée du potentiomètre, qui aura ainsi une caractéristique statique non linéaire.



La commande de la sortie P, ou la régulation de l'en-  
 -tré  $R_c$  dépend de l'éclairement  $E_1$ , considéré comme élément  
 perturbateur et caractérisant les conditions de fonctionnement.  
 Ce système asservi non linéaire a pour rôle de maintenir la  
 puissance à sa valeur maximale. Toute variation de celle-ci  
 sera testée par l'organe de commande qui enverra des signaux  
 actionnant le régulateur. Il est possible, dans le but de con-  
 -cevoir de pareils systèmes auto-adaptatifs, de procéder de  
 différentes manières (28):

-Par étude du signe des dérivées:

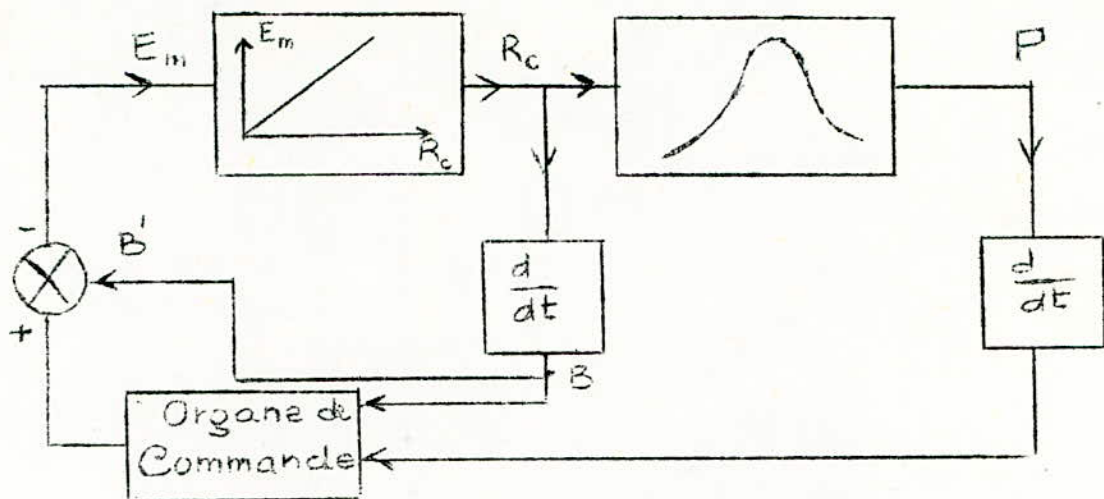
Cette méthode consiste à contrôler le maximum de pui-  
 -ssance de la cellule photovoltaïque, par l'étude du signe  
 des dérivées  $\frac{dP}{dt}$  et  $\frac{dR_c}{dt}$ . Le régulateur devra, pour une va-  
 -riation de  $P_M$ , agir sur un organe d'exécution tel qu'  
 qu'un moteur réversible.

Les quatre états  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , et  $P_4$  du tableau ci-  
 -dessous peuvent se présenter.

	$P_1$	$P_3$	$P_{3,4}$	$P_2$
$\frac{dP}{dt}$	+	+	-	-
$\frac{dR_c}{dt}$	+	-	-	+

Un tel système aura pour schéma synoptique celui re-  
 -présenté par la figure ci-dessous, avec  $E_m$  comme tension d'al-  
 -imentation du moteur-valeur, considérée ici comme fonction  
 linéaire de la charge  $R_c$ .





La boucle BB' servira à stabiliser le système dans le cas d'utilisation de relais introduisant une hystérésis.

-Par l'utilisation de mémoire maintenant l'extrémum:

Parmi les régulateurs de maximum, ceux à mémoire se baseront sur l'étude de l'accroissement fini  $P = P(t) - P(t - \Delta t)$  avec mémorisation de l'information  $P_M$  à l'instant  $(t - \Delta t)$ .

4-2-1 - Régulateur à mémoire à maintient de l'extrémum:

Soit un sens arbitraire de la rotation du moteur lié aux variations du potentiomètre (figure. 1)

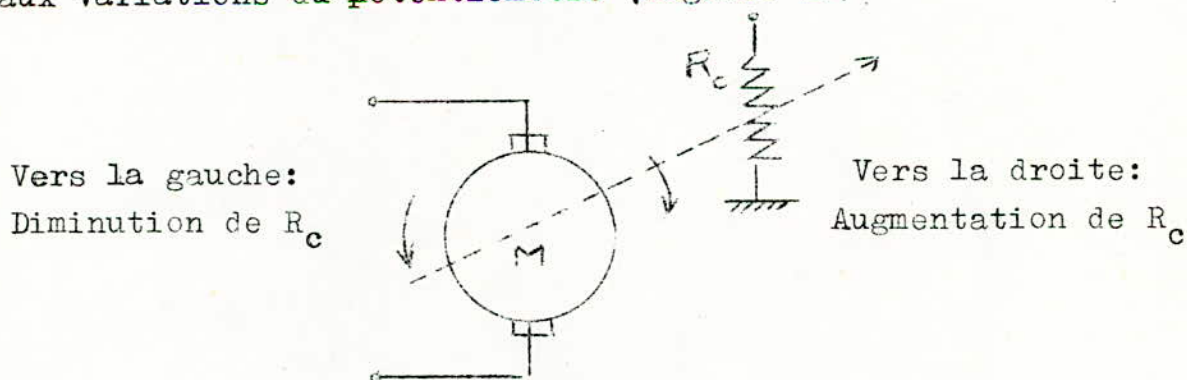


fig. 1

En analysant la courbe  $P=f(R_c)$  on remarque que dans le cas  $P_{1,2}$  et  $P_{3,4}$ , le régulateur doit suivre les variations de  $R_c$ , alors que dans les situations  $P_{2,1}$  et  $P_{4,3}$ , il doit s'y opposer.

X Le programme de fonctionnement est décrit par le tableau ci-dessous, et la figure 4-2.

Cas	Signe de $\frac{dR_c}{dt}$	Signe de $P(t)-P(t-\Delta t)$	Rotation correspondante du moteur	Rotation à imposer au moteur
$P_1$	+	+	Vers la droite	Vers la droite
$P_2$	+	-	Vers la droite	Vers la gauche
$P_3$	-	+	Vers la gauche	Vers la droite
$P_4$	-	-	Vers la gauche	Vers la gauche

Le sens de rotation du moteur étant défini par son alimentation  $E_m$ , on aura :

$$\text{Signe } (E_m) = \text{sign}\left(-\frac{dR_c}{dt}\right) \cdot \text{sign}(P(t)-P(t-\Delta t)) .$$

Dans un but de précision, on a jugé utile d'adopter le système régulant le maximum en conservant l'information  $P_M$  désirée aux bornes d'un condensateur congruement isolé, jouant le rôle de mémoire. En effet, les variations de la puissance autour de la valeur  $P_M$  sont lentes. On aura à étudier le signe de l'écart  $P=P(t)-P(t-t)=(P_2-P_1)$ , et celui de  $\frac{dR_c}{dt}$ .

Le schéma fonctionnel d'un tel système est constitué des éléments suivants (-figure-2):

- Un système à régler.
- Un servomécanisme qui est présenté par les deux

éléments de comparaisons (I) et (II), la mémoire et une partie de l'élément logique.

- Un élément logique.
- Un élément d'inversion.

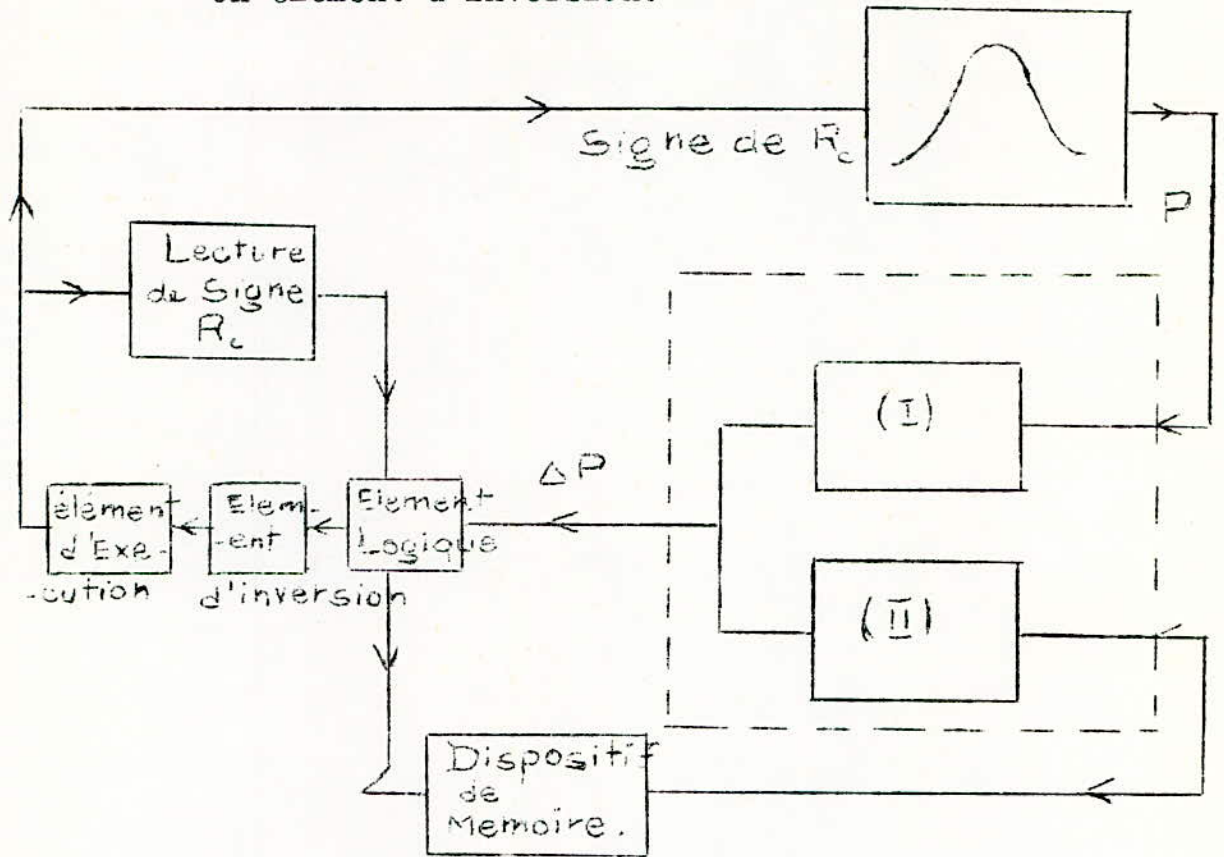
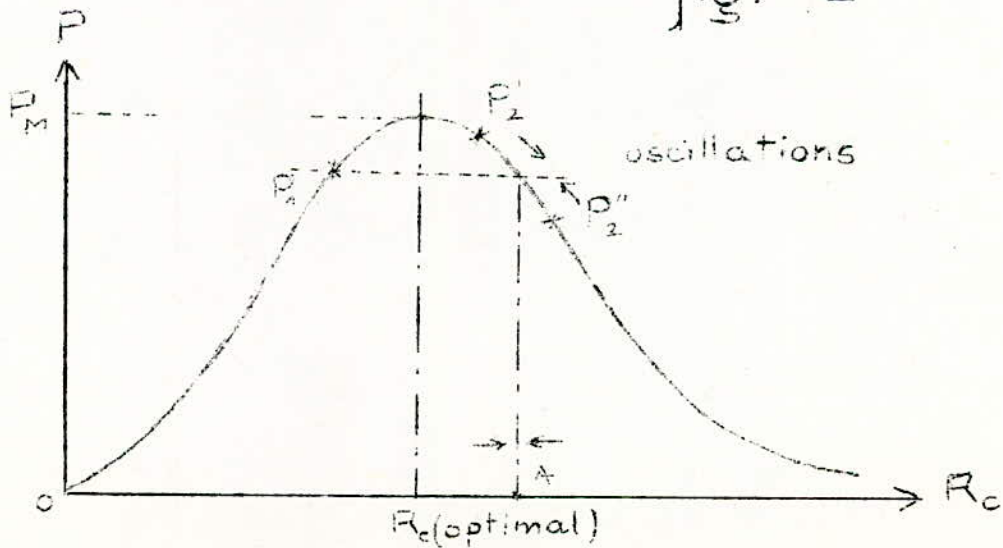


fig. 12



Le système évoluant à partir d'une charge nulle, la valeur de la puissance atteint son maximum, puis commence à baisser au temps  $t$ . On garde alors la valeur  $P_1$  reproduite à l'instant  $(t-\Delta t)$  avant ce maximum, jusqu'à ce que l'écart  $(P_2 - P_1)$  entre la valeur réelle et celle reproduite soit suffisante pour agir sur le système d'une façon à ce qu'il reprenne son état maximal. Le servomécanisme ne fonctionne que pendant l'approche de  $P_M$ . Quand l'accroissement  $P = (P_2 - P_1)$  est positif, l'élément logique tend à annuler l'erreur. Dans le cas où il est négatif, le servomécanisme est mis hors circuit, et l'on maintient dans une mémoire la valeur la plus proche du maximum pour une courte durée. Simultanément, le signal régulant est inversé et l'information mémorisée se décharge illico, jusqu'au temps où l'écart  $(P_2 - P_1)$  redevient positif.

## 5—PROPOSITION D'UN SYSTEME ELECTRONIQUE A REGULATION

### EXTREMALE -

Le système auto-adaptatif décrit peut être réalisé à l'aide d'un moteur réversible, de différentiateurs, d'une mémoire à capacité et d'un nombre assez important de relais. L'utilisation de ces derniers conduit à l'élaboration d'un banc de mesure relativement volumineux, coûteux et peu performants quant à la précision liée aux temps de réponse. Seuls les composants électroniques intégrés, répondent ici aux besoins. Ceci nous a orienté dans la recherche du régulateur maximal à mémoire, schématisé par la figure 3.

#### 5-1- Obtention d'un signal proportionnel à la puissance P à réguler:

On place aux bornes d'une photopile, -au silicium par exemple- une charge constituée d'un potentiomètre  $R_c$  en série avec une résistance  $r$  fixé beaucoup plus faible. La tension  $U'$  prise aux bornes de  $r$  représentera la valeur du courant débité par la cellule éclairée à l'aide d'une source étalonnée.

Cette tension sera multipliée par celle fournie par la photo-  
-pile U, grâce à l'amplificateur opérationnel A (x). Le signal  
de sortie étant faible; On doit procéder à son amplification  
(voir schéma)

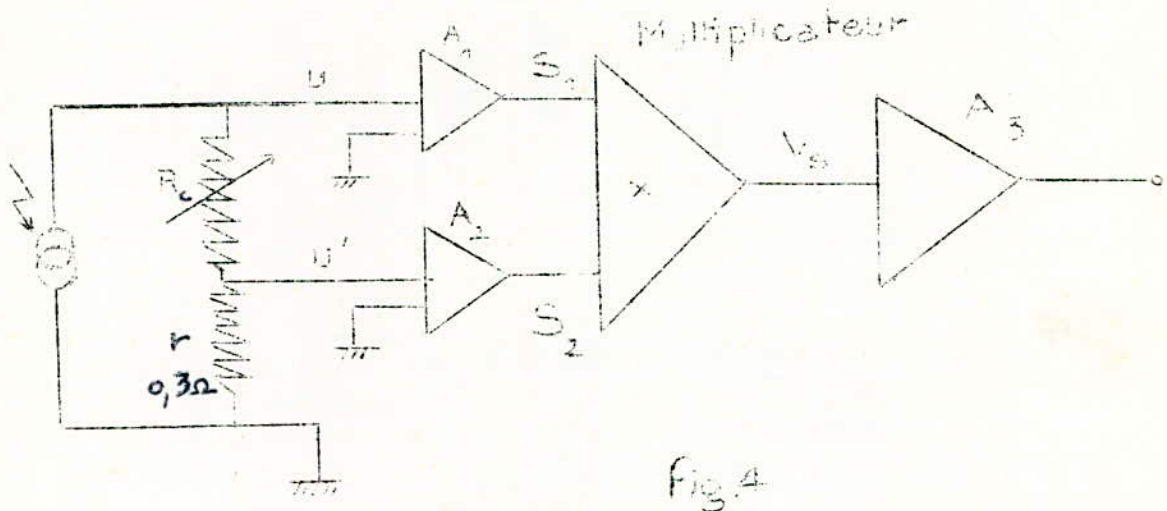


Fig. 4

### 5-2- Fonctionnement du système régulateur

Le schéma de la figure 3 est basé sur la connaissance du signe de l'accroissement ( $U_2 \cdot U_1$ ) et de  $\frac{dR_c}{dt}$ , où  $U_1$  est le signal lié à la puissance, considéré comme valeur initiale et servant à la comparaison. L'organe de commande est un moteur réversible dont le sens de rotation est imposé par une différence de potentiel excitant l'inducteur, commandée par les sorties d'un bistable.

L'analyse du fonctionnement se fait par la distinction de différents cas résumés par le tableau qui suit et ce, lors de l'évolution de la puissance dans la caractéristique statique  $P = f(R_c)$ . L'action d'augmentation ou de diminution de  $R_c$  est assurée par le changement d'état des sorties du bistable, déterminé par les impulsions d'entrée.

Le circuit logique commandant l'inversion du sens du moteur est décrit par le schéma qui suit.

	Etat du Système	Action de la régulation	Signal envoyé à l'en- trée du Bistable	Etat de la Mémoire (capacité)
P <sub>1</sub>	$(U_2 - U_1) > 0$ $\frac{dR_c}{dt} > 0$	Augmenta- tion de $R_c$	Aucun	Charge
P <sub>2</sub>	$(U_2 - U_1) < 0$ $\frac{dR_c}{dt} > 0$	Diminution de $R_c$	Impulsion	Mémorisation
P <sub>3</sub>	$(U_2 - U_1) > 0$ $\frac{dR_c}{dt} < 0$	Augmenta- tion de $R_c$	Impulsion	Mémorisation
P <sub>4</sub>	$(U_2 - U_1) < 0$ $\frac{dR_c}{dt} < 0$	Diminution de $R_c$	Aucun	Mémorisation

### Etats de fonctionnement du Régulateur

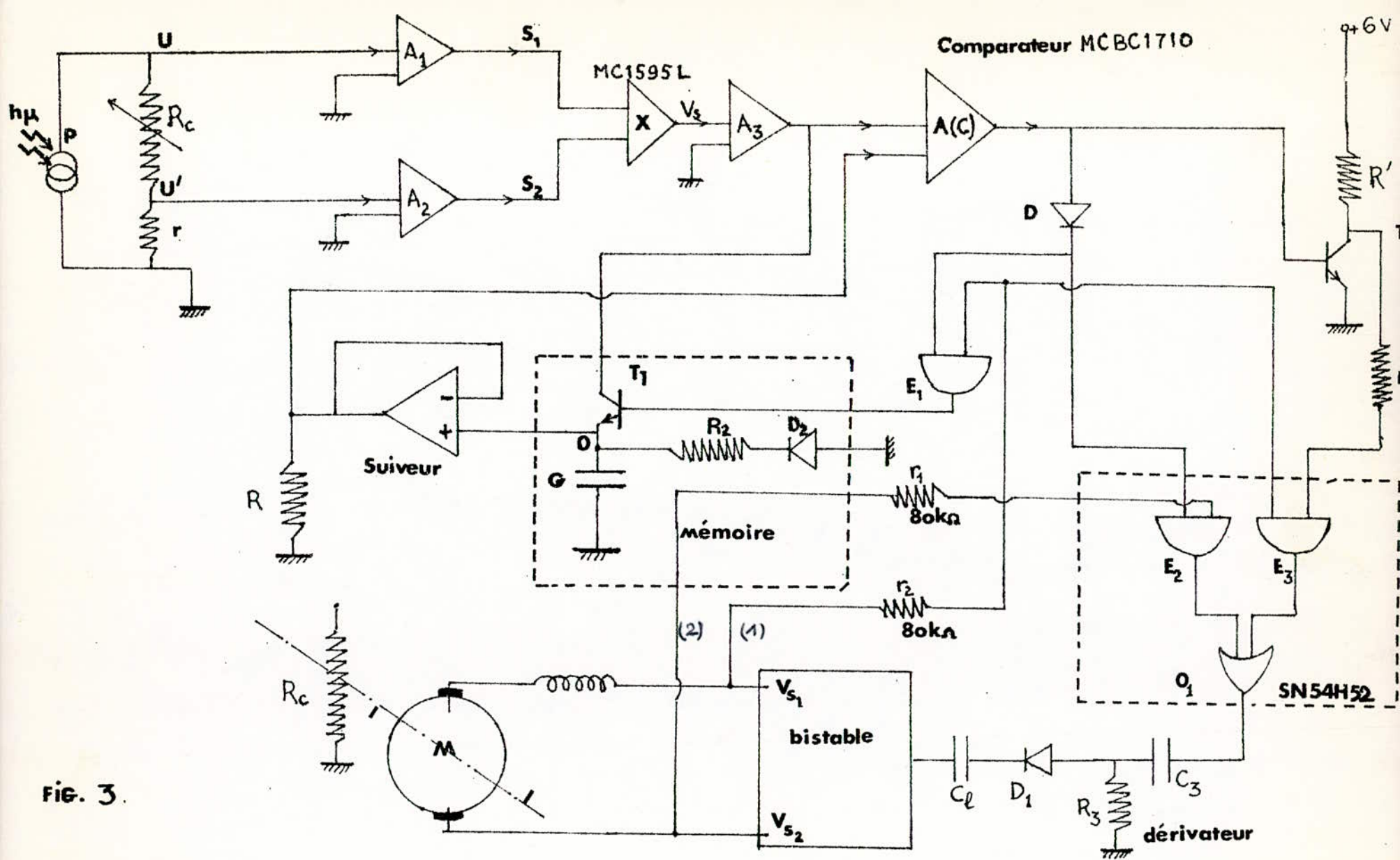
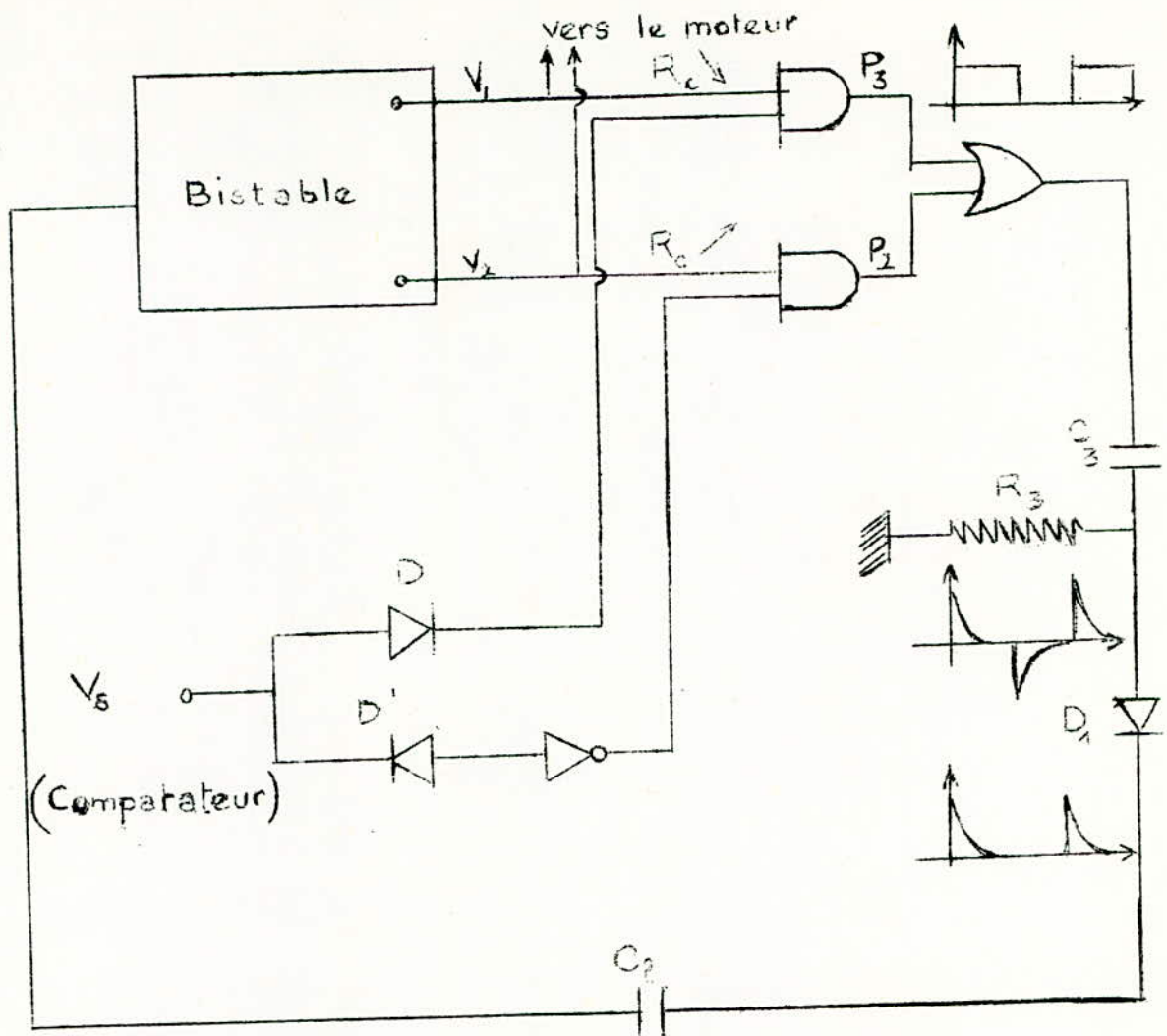


FIG. 3.



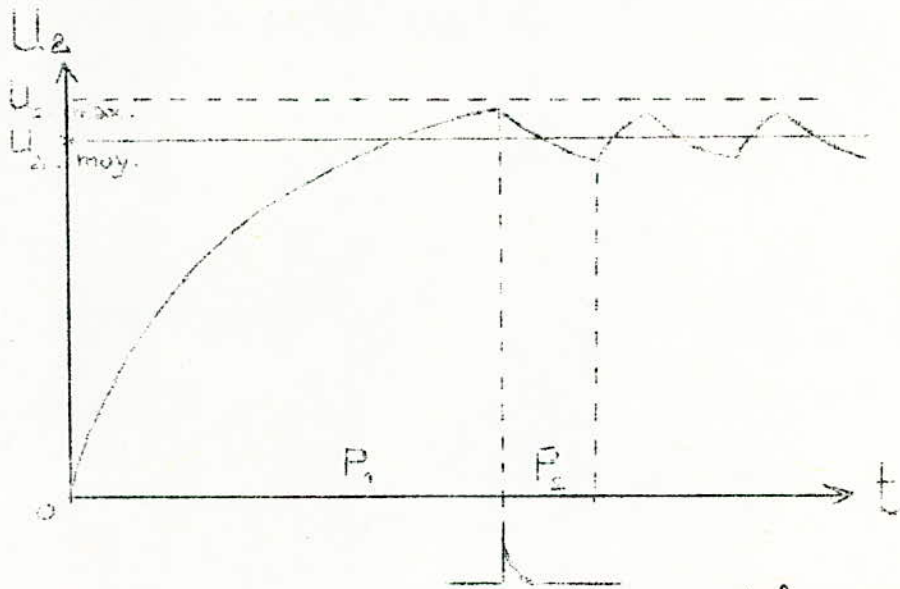
Le signal  $U_2$ , issu de l'amplificateur opérationnel est comparé à  $U_1$ . Si  $U_2 - U_1$  est positif, la sortie du comparateur A(C) est à une tension  $V_S$  positive. Dans le cas contraire,  $V_S$  est négative.

Lorsque le système se trouve dans la situation  $P_1$ , le moteur continu à tourner dans le même sens, alors que le transistor  $T_1$  conduit; Ce qui permet de charger le condensateur  $C$  à travers la faible résistance de  $T_1$ , saturé par la tension  $U_2$  variable. Celle-ci se trouvant au point 0 de la figure 3 se substituera à  $U_1$  grâce à un amplificateur opérationnel monté en suiveur. On remarquera que  $C$  ne peut se décharger à travers  $R_2$  de grande valeur, car la diode  $D$  fon-



-ctionne à l'état bloqué. Le transistor  $T_1$  est bloqué dans les cas de fonctionnement  $P_2, P_3, P_4$ , ce qui mène à dire que la valeur de  $U_2$  est méprisée dans la capacité  $C$ . Celle-ci commence à se décharger à travers  $R_2$  et la résistance inverse de la diode  $D$ .

Le début de cette décharge faisant chuter la d.d.p. aux bornes du condensateur  $C$ , aidera à positionner le système dans la situation  $P_1$ , et  $C_1$  se chargera une nouvelle fois.



Il est enfin possible, de mesurer la <sup>valeur</sup> fonction moyenne  $U_{2.moy.}$  au point  $O$ , liée à la puissance de la photopile maintenue maximale. Cette valeur oscille autour du maximum. Cette mesure se fait après un temps  $t$  déterminé par la vitesse du moteur, par la valeur et la durée de charge et de la stabilité du système.

## 5-3- Etude du schéma proposé

### 5-3-1- Choix des éléments du bloc de comparaison

#### - La charge:

La charge optimale recherchée étant de l'ordre de ~~10~~ 10 ohms pour une photopile au silicium, on utilise un potentiomètre de précision dont le contact ne doit pas introduire de résistance parasite. Le modèle 800 (Ellettronica) bobiné 10 tours de valeur maximale 50 ohms donne une sensibilité de 0,014 ohms/tour avec un courant maximal de 400 mA . La résistance  $r$  a pour valeur 0,3 ohm .

#### - Amplificateur et Multiplicateur:

Les gains des amplificateurs  $A_1$  ,  $A_2$  et  $A_3$  auront respectivement pour valeurs 10 , 100 , 25 (fig. 4). La tension maximale donnée par la photopile est:

$$U = 0,4 \text{ V} \quad \text{d'où} \quad U' = 12 \text{ mV}$$

Après amplification, on a:

$$S_1 = 4 \text{ V} \quad \text{et} \quad S_2 = 1,2 \text{ V}$$

Sa valeur minimale serait:

$$U = 30 \text{ mV} \quad \text{d'où} \quad U' = 30 \text{ mV}$$

Après amplification par  $A_{2,1}$  on a:

$$S_1 = 0,13 \text{ V} \quad \text{et} \quad S_2 = 3 \text{ V}$$

Le produit de ces tensions est opéré par le multiplicateur MC 1595 L. Sa sortie  $V_S$  sera pour les deux cas cités, de 0,48 V et de 0,09 V ( $V_S = U.U'/k$  avec  $k = 10$ ).  $V_S$  elle-même est amplifiée par  $A_3$  de gain 25 .

#### - Le Comparateur:

Le MCBC 1710 fournit les tensions de sortie + 3,2 V et - 0,5 V .

### 5-3-2-Elements logiques :

Le circuit intégré SN 54 H 52 (comportant les portes  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $O_1$ ) a les caractéristiques suivantes:

$$\begin{aligned}V_{in} &= 2 \text{ V} \\V_{out} &= 2,4 \text{ V} \\I_{in} &= 50 \mu\text{A} \\V_{cc} &= 5 \text{ V}\end{aligned}$$

Sa sortie attaquera le dérivateur  $R_3$ ,  $C_3$ . La porte  $E_1$ , servant à commuter le transistor  $T_1$  est du type SN 54 H 11. Les caractéristiques sont:

$$\begin{aligned}V_{in} &= 2 \text{ V} \\V_{out} &= 2,4 \text{ V} \\I_{in} &= 50 \mu\text{A} \\V_{cc} &= 5 \text{ V}\end{aligned}$$

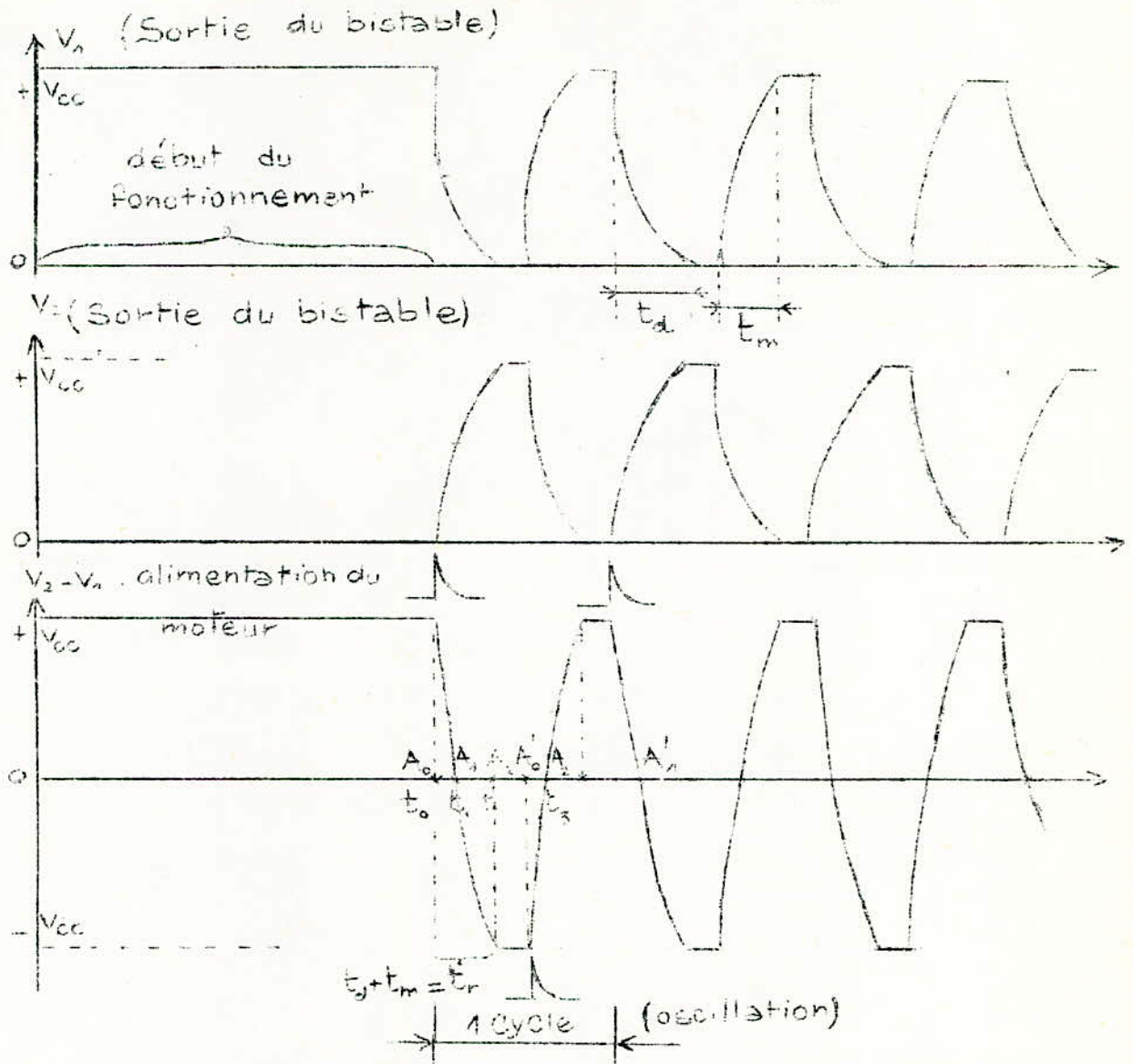
### 5-3-3-Organe d'exécution:

#### Le bistable:

Son basculement est assuré par les impulsions issues du dérivateur  $R_3$ ,  $C_3$ . Les tensions maximales de sortie seront de 6 V et alimenteront le moteur.

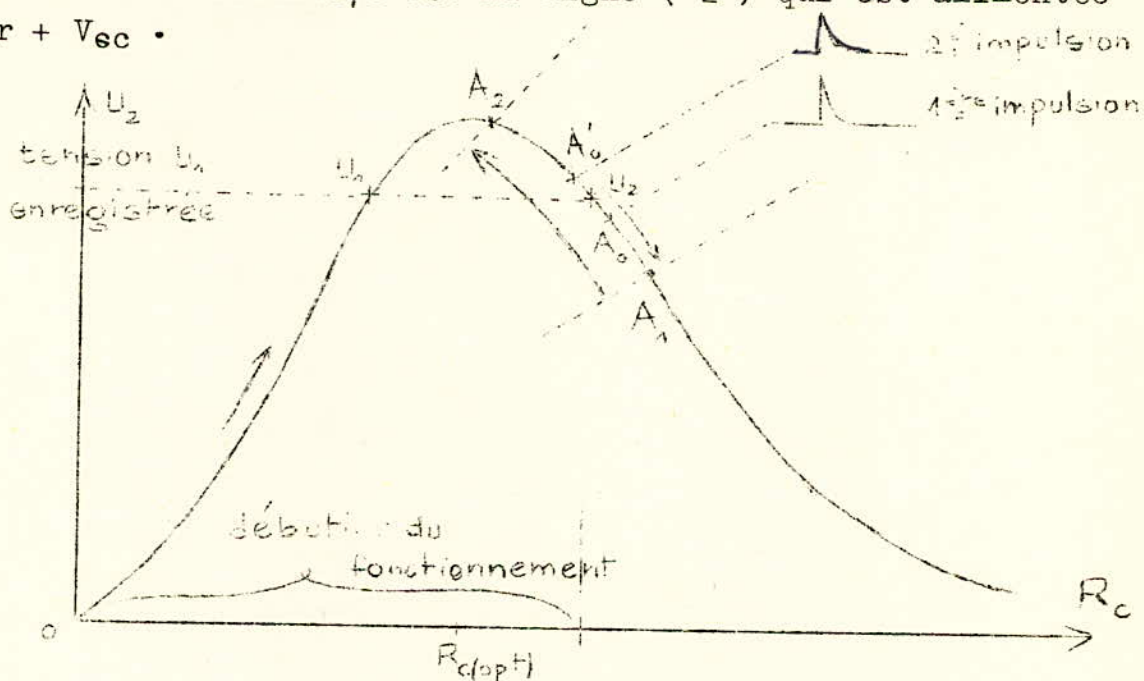
#### Le moteur:

Il est du type " excitation série" car pour un faible courant on a un fort couple de démarrage. Afin d'éviter les surtensions, les sorties du bistable seront à front de montée assez lent. Le diagramme des tensions d'attaque du moteur est représenté par la figure ci-dessous:



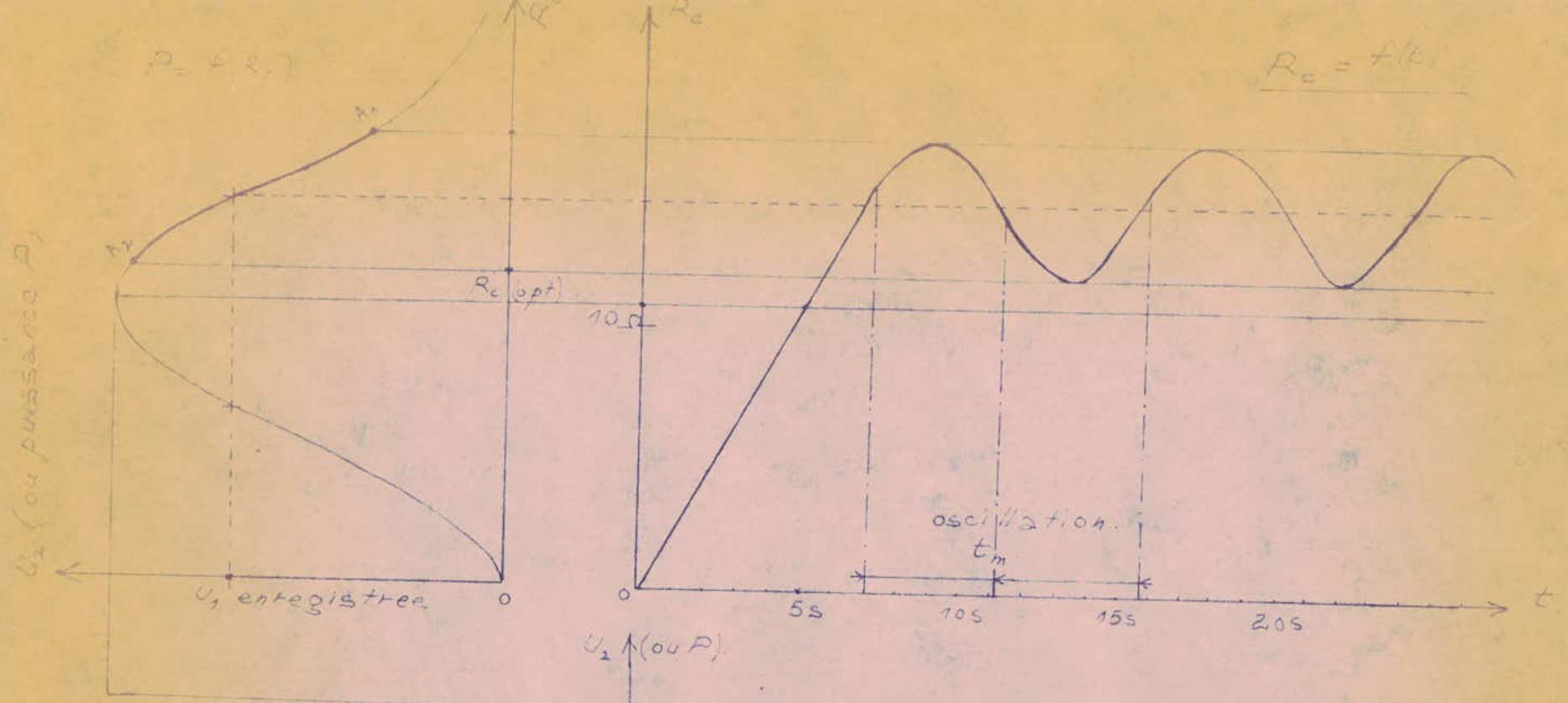
Au moment où  $(U_2 - U_1)$  est négatif et la charge augmente, une impulsion délivrée par le dérivateur, bascule le bistable qui commande l'inversion de rotation du moteur à l'instant  $t_0$  (point  $A_0$ ). Celui-ci ne répondra pas instantanément; son alimentation diminue - alors qu'il tourne toujours dans le même sens - s'annule (point  $A_1$ ) à l'instant  $t_1$ , puis s'inverse progressivement jusqu'à  $-V_{cc}$ . A l'instant  $t_2$  (point  $A_2$ ),  $U_2 - U_1$  est positif alors que la charge diminue; une impulsion est envoyée le bistable bascule et l'alimentation du moteur décroît, s'annule à l'instant  $t_3$  (point  $A_3$ ) puis augmente jusqu'à  $+V_{cc}$ ; ce qui

fait changer le sens de la rotation. Le cycle se reproduit après trois impulsions consécutives. Le temps  $t_1 - t_0$  correspondant au ralentissement du moteur doit être assez faible pour que, pendant la diminution de la charge,  $(U_2 - U_1)$  ne soit pas négatif (le point  $A_2$  ne doit pas aller au delà de  $A$ ), de plus cela permet d'avoir une meilleure précision sur la mesure de la puissance. Le temps  $t_1 \ll T_0$  ne doit pas, en revanche, être très faible pour éviter les surtensions qui risquent de se produire sur les enroulements du moteur. Quand celui-ci fait augmenter la charge, la ligne (1) est alimentée par  $+V_{cc}$ ; dans le cas contraire, c'est la ligne (2) qui est alimentée par  $+V_{cc}$ .

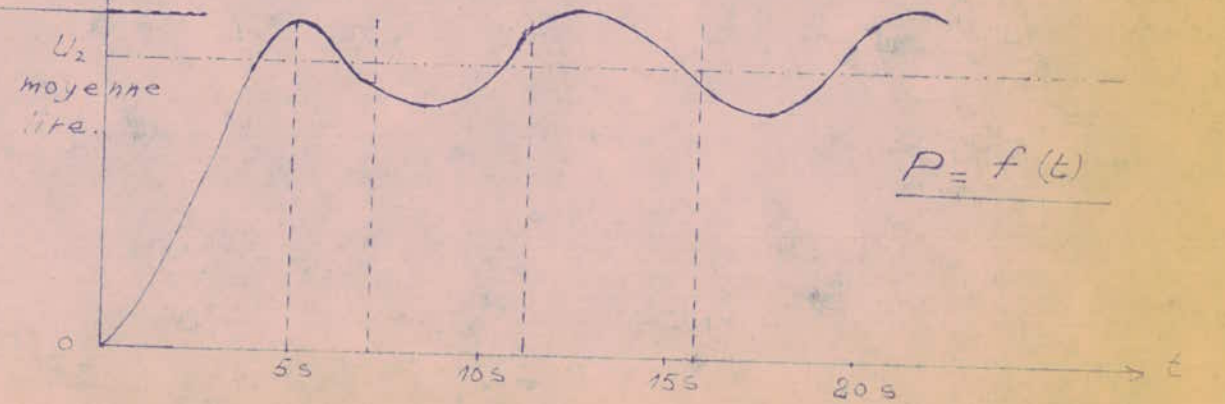


-Durée entre deux impulsions de commande .

La vitesse du moteur peut être évaluée à 0,4 tours par seconde. La charge optimale est ainsi atteinte après un temps de 5 secondes. D'après la figure et , l'écart entre deux impulsions est pratiquement égal à la durée du passage de la tension de  $-V_{cc}$  à  $+V_{cc}$ . Ce temps  $t_r$  d'oscillation autour du maximum est évalué à 2 secondes ( $t_r = t_m + t_d$ ). Cette oscillation correspond à trois impulsions du dérivateur. L'intervalle de temps entre deux impulsions est de 1 seconde ce qui peut donner une constante de temps  $R_3.C_3$  de 50 ms.



Variations oscillatoires  
des paramètres régulés  
 $P$ ,  $U_2$  et  $R_c$ .



On a alors  $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$  et  $C_3 = 500 \text{ nF}$ .

#### 5-3-4- Organe de mémoire.

Dans le cas où  $(U_2 - U_1)$  est positive et  $R_c$  augmente, le signal de sortie de la porte  $E_1$  sature le transistor  $T_1$ . La charge se fait alors à travers la faible résistance de ce transistor saturé (de l'ordre de 2 ohms pour  $V_{ce(sat)}$  de 0,4 V et  $I_{c(max)}$  de 200 mA. On choisit une résistance  $R_2$  élevée et une diode  $D_2$  bloquée de façon à éviter la décharge de la capacité à cet instant.

L'amplificateur opérationnel utilisé comme suiveur  $A_s$  (de gain unité) permet la récupération totale de la tension mémorisée, à l'entrée du comparateur. Son impédance d'entrée étant très grande, il s'opposera à une décharge de  $C$  qui sera choisie, de faible fuite (Mylar ou au polycarbonate).

-Constante de temps de la charge: La résistance collecteur-émetteur du transistor saturé est égale à 2 ohms et la capacité  $C$  est évaluée à 100 nF; ce qui donne une constante de temps de 200 ns.

-Constante de temps de décharge: (mémorisation)

La résistance  $R_2$  est évaluée à 100 k $\Omega$  et la résistance inverse de la diode est égale à  $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ ; ce qui donne une constante de temps de 1s.

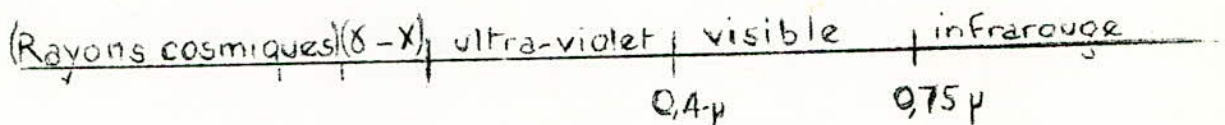
L'analyse du système présenté permet de voir l'importance de la précision déterminée surtout par la qualité du moteur et la connaissance exacte des caractéristiques des composants utilisés (temps de réponse, sensibilité...).

Le système proposé pourrait être entièrement automatisé par l'intégration d'enregistreurs numériques; ce qui permettrait un contrôle industriel moins fastidieux et plus précis. Nous considérerons ainsi notre étude comme le début d'un Travail dont une continuité serait souhaitable.

1- RAYONNEMENT SOLAIRE

Le rayonnement solaire provient du soleil qui apparaît comme une énorme sphère incandescente de plasma de température d'émission voisine de 5750° K. Distante de huit minutes lumière, la terre est plongée dans ce flux de rayonnement qu'elle intercepte par une section diamétrale. A son rayon moyen de 6400 km, correspond une surface d'interception de plus de  $10^8 \text{ km}^2$  et donc une puissance incidente de  $2.10^{17}$  Watts environ.

Le rayonnement solaire est de nature électromagnétique dont le spectre s'étale des longueurs d'ondes très faibles (rayons X) jusqu'aux longueurs d'ondes de l'infrarouge.



L'énergie transportée par ce rayonnement est quantifiée d'après le caractère corpusculaire de la lumière. Chaque radiation de fréquence "f" est caractérisée par une énergie de photons  $w = h.f$ .

A la distance moyenne de la terre, le flux énergétique provenant du soleil est réduit à  $1400 \text{ W/m}^2$ , ce qui correspond à une émittance solaire de  $6600 \text{ W/m}^2$ , densité superficielle d'énergie énorme et résultant du célèbre cycle de BETHE qui explique en grande partie le mécanisme de transformation "matière-énergie" quasi inépuisable de ces rayonnements.

-Effets de la pellicule atmosphérique.

Abordant l'atmosphère aux très hautes altitudes par la rencontre d'atomes épars d'hélium ou d'hydrogène puis par celle d'atomes ionisés multiples et de molécules de plus en plus nombreuses le rayonnement solaire atteint la stratosphère, en n'ayant traversé qu'un dixième de la masse atmosphérique gazeuse totale vers 15km d'altitude. Il pénètre ensuite dans la troposphère et, après avoir été diffusé, diffracté, absorbé, réfracté.



La masse gazeuse ainsi traversée vaut approximativement 8km d'atmosphère, longueur qui pourrait être représentée par des parcours respectifs:

- 6200 m d'azote
- 1700 m d'oxygène
- 74 m d'argon
- 2,4 m de gaz carbonique
- 140 mm de néon
- 40 mm d'hélium

-Plusieurs millimètres de krypton, de méthane et d'oxygène d'azote, mais aussi 1 à 4 mm d'ozone et quelques cm (0,5 à 6) d'eau liquide et de vapeur d'eau. L'atmosphère comporte également des particules en suspension: grains de sable, poussières, micro-gouttelettes, cristaux, débris de météorites, qui diffusent les rayons interceptés.

## 2- Rayonnement énergétique.

Environ 80 % de la puissance rayonnée est transportée par l'infrarouge. Le soleil dont la température superficielle est de 6000° K, est un puissant radiateur d'infrarouge.

Le soleil étant considéré comme une source ponctuelle puisque sa distance à la terre (= 149.600.000 Km) est beaucoup plus grande que ses propres dimensions (son rayon étant de 695.000 Km), il fournira une intensité lumineuse ( ) qui chutera avec la propagation, en traversant les différentes couches atmosphériques (absorption).

La mécanique quantique explique la discontinuité énergétique du rayonnement électromagnétique c'est à dire que l'émission d'énergie par un corps matériel se fait de façon discrète et non continue; il y a quantification des fréquences du rayonnement. En effet, à chaque radiation de fréquence donnée, il correspond des photons (corpuscules d'énergies) dont l'énergie transportée est  $w = h\nu$ , c'est le caractère corpusculaire de la lumière. De ce fait, on peut conclure que le rayonnement ultraviolet est plus énergétique que le rayonnement infrarouge. La lumière ultraviolette est celle qui produit le plus aisément l'effet photoélectrique, c'est à dire qui peut facilement arracher les électrons de valence d'un métal.

3- LE CORPS NOIR

3- 1 - Spectre et rayonnement:

Une cavité, dans un corps porté à une température  $T^{\circ}$  constante, est le siège de rayonnements produits par des électrons accélérés sous l'effet de l'agitation thermique régnant dans les parois ( ) .

Toute charge animée d'un mouvement accéléré émet des photons. Ceux-ci seront dans la cavité, émis et absorbés par la paroi, continuellement.

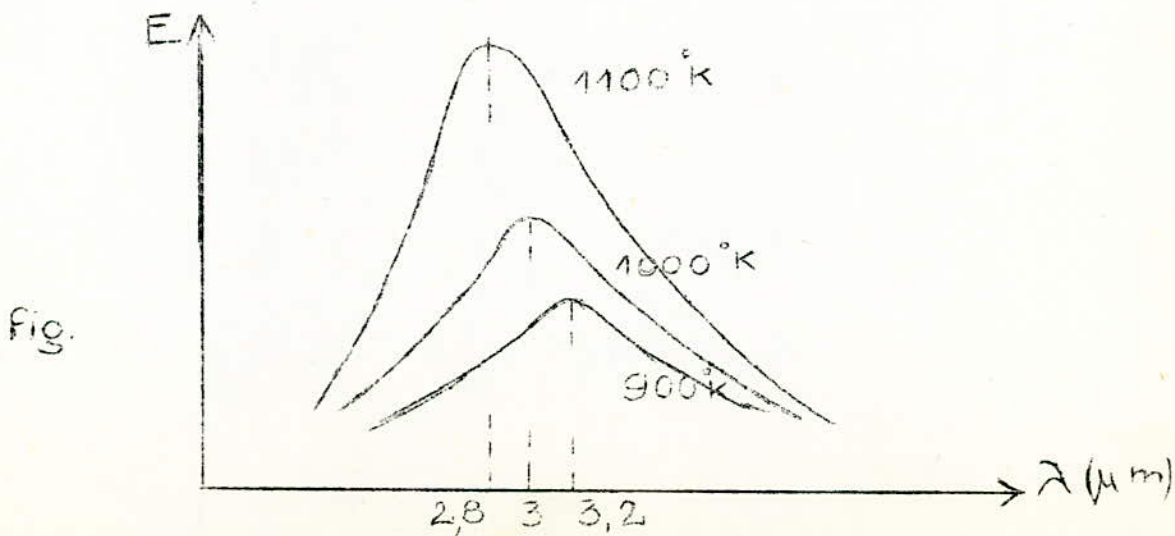
Le système ainsi décrit, donne le principe du corps Noir, dont le pouvoir émissif ne dépend que de la température, suivant la loi de Stéphan-Boltzmann ( 30 ) :

$$E = \sigma \cdot T^4, \quad \text{où :}$$

$\sigma$  est la constante de Stéphan valant,  $4,88 \cdot 10^{-8}$  k cal / ( m<sup>2</sup>.h (°k)<sup>4</sup> ).

La distribution spectrale de ce rayonnement croît avec la température et possède un maximum pour une radiation  $\lambda_m$  telle que la loi "de déplacement de Wien" :

$\lambda_m \cdot T = \text{constante}$ , soit vérifiée (fig. ) .



Si l'on considère des variations de longueurs d'ondes, l'on a :

$$\lambda_m \cdot T = 0,2898 \text{ cm}^\circ\text{K.}$$

Pour une représentation de E fonction de la fréquence on a :  $\lambda_m \cdot T = 0,411 \text{ cm}^\circ\text{K.}$

Le pouvoir émissif relatif aux grandes longueurs d'ondes est donné par la relation :

$$E(\lambda) = \frac{e \pi k T}{\lambda^4}$$

où k est la constante de Boltzmann.

Chaque corps, aura pour une certaine surface, une valeur correspondante du facteur d'émission le caractérisant. Pour un corps en Tungstène (filament), porté à la température de 3300°K par exemple, il vaut 0,39 (25).

### 3 6 2 - La température de couleur:

La simulation du soleil, considéré comme corps Noir à 5960° C, oblige à étudier les températures auxquelles sont portées les lampes émettrices .

-La température de brillance  $T_b$  est celle pour laquelle, l'émetteur à étudier, rayonne la même intensité spectrale, qu'un corps Noir, à la même température. Elle est liée à la température vraie  $T_v$ , par la relation :

$$\left( \frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_b} \right) = \frac{\lambda}{C_2} \cdot \text{Log } E(\lambda)$$

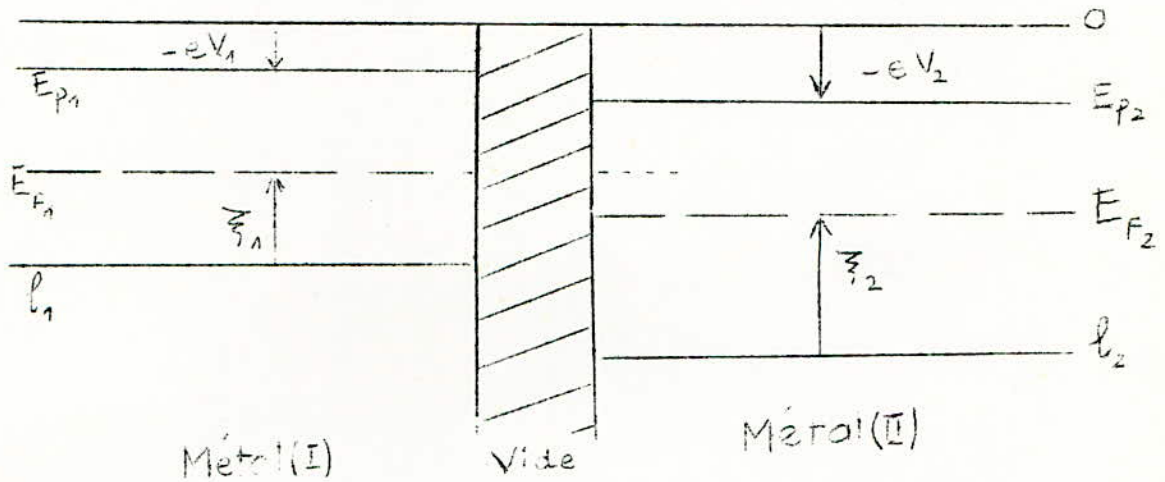
où  $E(\lambda)$  est l'émissivité du corps Noir  
 $C_2$ , est une constante donnée par Planck  
( ).

-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 :

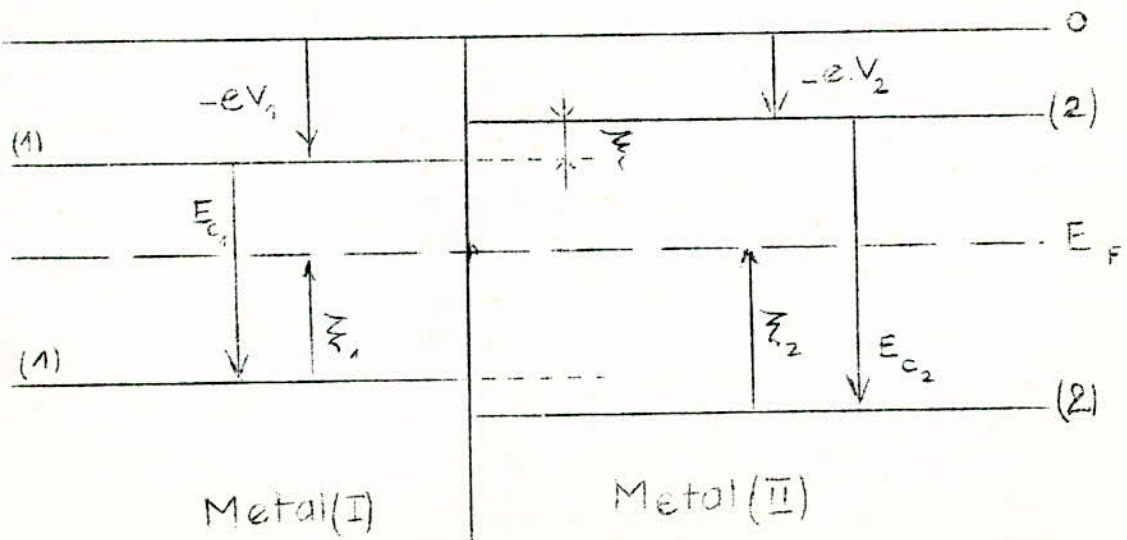
$$\left( \frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_c} \right) = \left[ \frac{\text{Log } (E(\lambda_1)/E(\lambda_2))}{C_2 \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \right]$$

JONCTION METAL-METAL -

Soient deux métaux différents (par leur type ou par leur température). Les niveaux d'énergies relatifs aux électrons sont des bandes telles que le niveau de Fermi soit situé dans la bande de conduction. Quand les deux métaux sont séparés, leurs niveaux de Fermi sont décalés.



S'ils sont en contact, l'équilibre (thermique) se fait illico, et les deux niveaux  $E_{F_1}$  et  $E_{F_2}$  se placent à la même hauteur.  $\bar{\xi}_1$  et  $\bar{\xi}_2$  sont les énergies déterminées par les concentrations électroniques de (I) et (II),  $n_1$  et  $n_2$ .

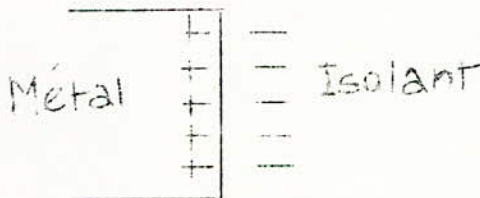


Ces charges positives et négatives créées de part et d'autre de l'isolant, donnent naissance à un champ électrique correspondant à une chute linéaire du potentiel dans cet isolant.

Couches dipolaires superficielles; Potentiel de Contact

A la surface du métal contactant l'isolant, existe une couche dipolaire expliquée par ce qui suit:

-Une partie des électrons dont l'énergie (qui a été éventuellement communiquée par un photon incident d'énergie faible) est insuffisante (inférieure au gap), ne passent pas à la conduction; Ils créent une couche pelliculaire chargée.



-Au contact, les atomes constituant le réseau cristallin, ne sont soumis que partiellement aux interactions vibratoires du cristal (côté métal). Les électrons qui y sont liés, et se trouvant à un niveau proche de la conduction, sont arrachés, sortent du métal, et constituent le dipole superficiel.

-La surface d'un métal, par défaut de fabrication, est couverte par des atomes étrangers au cristal (cf. travaux de Langmuir). A titre d'exemple, le tungstène est recouvert par du thorium.

Potentiel de Volta

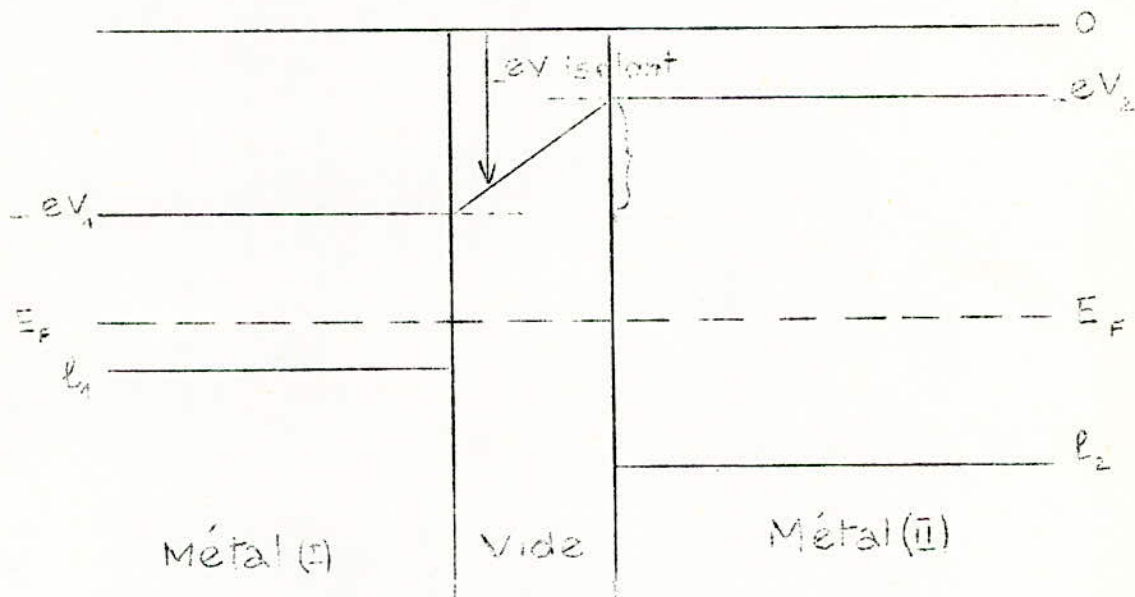
En fait, au contact du vide, et du métal, le potentiel est décalé, et la différence entre les potentiels superficiels n'est plus identique à celle des potentiels macroscopiques internes. Cet écart explique la d.d.p. de contact, appelée ("d.d.p. de Volta").

Lors du contact, des électrons passent de l'un à l'autre des métaux. L'une des surfaces de contact se charge positivement et l'autre négativement. La couche dipolaire formée, produit un saut entre les deux potentiels macroscopiques  $eV_1$  et  $eV_2$  et déplace les niveaux (1) et (2) l'un par rapport à l'autre. Ce processus se poursuit, jusqu'à l'obtention d'une d.d.p capable d'amener les deux niveaux de Fermi à la même hauteur, et l'équilibre thermique est ainsi atteint.

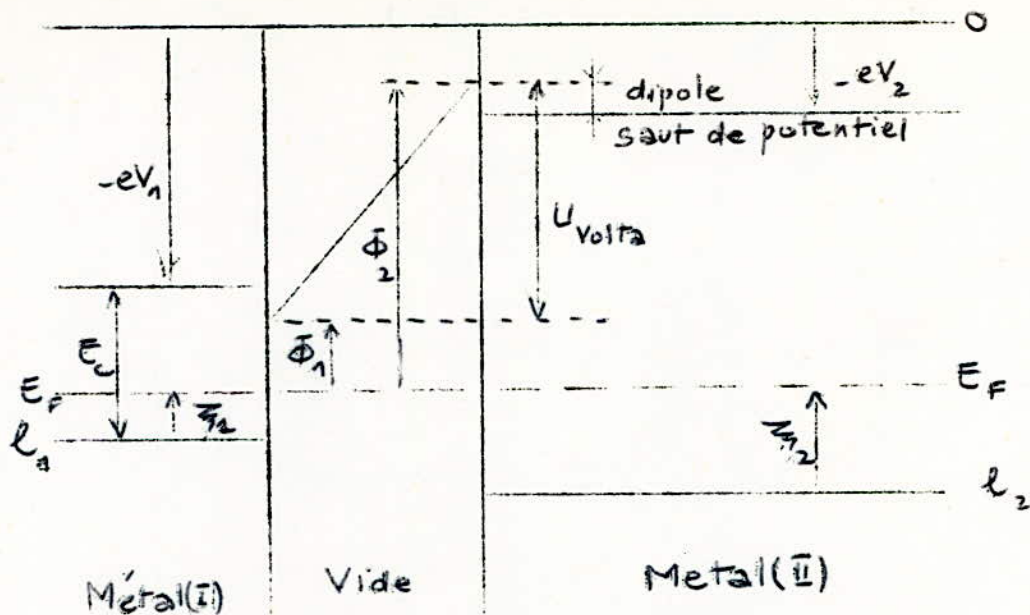
En énergie on aura:  $E_{totale} = E_c + E_p (totale) = E_c + (E_p - e \cdot V)$

$$= E_{crist.} - eV$$

La d.d.p. entre les macropotentiels internes  $-eV_1$  et  $-eV_2$ , est caractéristique des deux métaux, c'est la d.d.p. de GALVANI



Si les deux métaux (I) et (II) sont séparés par un isolant, ils émettent des électrons dans ce dernier. Cet échange de charges se fait selon un sens prioritaire, jusqu'à l'équilibre thermique.



Le processus de photoélectricité ne se produit de façon appréciable que dans la mesure où l'énergie apportée par un photon incident est suffisante pour élever un électron du niveau de Fermi au potentiel électrostatique de surface.  $\Phi$  étant le travail de sortie (du métal (I) au vide). Ceci fait appel à l'activation photoélectrique :

$$E_{\text{act. photo.}} = (E_f - E_{\text{pot. élé. de surface}}).$$



3-1- Calcul de la puissance optimale de la photopile:

La relation qui lie la tension au courant à la sortie de la photopile est :

$$J = J_{cc} - J_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

La tension à vide est obtenue en annulant le courant; on a alors

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left( 1 + \frac{J_{cc}}{J_0} \right)$$

Pour avoir les coordonnées du point optimal on fait le calcul suivant:

$$\frac{d(V \cdot J)}{dV} = J_{cc} + J_0 - J_0 \left( 1 + \frac{qV}{kT} \right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) = 0$$

Alors on tire; moyennant la valeur de  $V_0$  :

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

et:

$$J_m = J_{cc} \left( 1 + \frac{J_0}{J_{cc}} \right) \cdot \frac{qV_m}{kT + qV_m}$$

Finalement:

$$P_m = V_m \cdot J_m = J_{cc} \cdot V_m \left( 1 + \frac{J_0}{J_{cc}} \right) \cdot \frac{qV_m}{kT + qV_m}$$

$$\neq \frac{qJ_{cc}V_m}{kT + qV_m}$$

En fait, il faudrait tenir compte des recombinaisons dans la couche désertée et dans les zones non chargées, on a alors les coordonnées suivantes: ( $J_{vd}$  et  $J_{vnp}$ ). Dans le cas simple où  $N_d = N_a = N$ ; il vient:

$$J_{vd} = \frac{\pi kT}{q} \cdot \frac{n_i}{\tau} \cdot \frac{4q\epsilon_0\epsilon_r}{N} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) / (V_d - V)^{\frac{1}{2}}$$

Les paramètres  $\epsilon_0$  et  $\epsilon_r$  sont les constantes diélectriques du semi-conducteur.

Pour le cas de la recombinaison dans la zone non chargée et pour  $V \gg \frac{kT}{q}$  - on a:

$$J_{vnp} = 2 \cdot q \cdot \frac{n_i^2}{N} \left\{ \frac{D}{\tau} \right\} \frac{1}{2} \cdot B \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

où B est tel que:

$$B = \frac{1}{2} \left[ \frac{P_n \operatorname{ch}(a/L_n) + \operatorname{sh}(a/L_n)}{\operatorname{ch}(a/L_n) + P_n \cdot \operatorname{sh}(a/L_n)} + 1 \right]$$

On approxime les deux courants  $J_{vd}$  et  $J_{vnp}$  au courant

$$J_v = J_0 \cdot \exp\left(-\frac{V}{\mu}\right)$$

où  $J_0$  et  $\mu$  prennent des valeurs différentes suivant que les recombinaisons ont lieu dans la zone désertée ou dans les régions non chargées .

$$J = J_v - J_E ; \text{ alors } P = V( J_v - J_E )$$

$$P = V( J_0 \exp\left(\frac{V}{\mu}\right) - J_E )$$

$$\frac{dP}{dV} = J_0 \exp\left(\frac{V}{\mu}\right) \cdot \left( 1 + \frac{V}{\mu} \right) - J_E = 0$$

Alors:

$$\frac{J_E}{J_0} = \exp\left(\frac{V_m}{\mu}\right) \cdot \left( 1 + \frac{V_m}{\mu} \right)$$

MESURE DE RESISTIVITE PAR LA METHODE DES  
QUATRES POINTES

1 - La méthode des pointes:

La mesure habituelle de la tension et du courant d'un barreau de semi-conducteur pour la détermination de sa résistance n'est guère facile. En effet, les contacts entre les électrodes métalliques et le barreau ne sont pas des contacts ohmiques et révèlent des propriétés électriques différentes de celles du contact de deux métaux.

Dans le but de mesurer correctement la résistivité d'un semi-conducteur homogène, on procède à la réalisation de deux contacts métalliques aux deux extrémités du barreau, par simple pression par exemple. Ces contacts, sont souvent dissymétriques, peuvent être ohmiques, et permettent de donner naissance à un courant  $I$ , qui traversera le semi-conducteur. Sur une des faces latérales du barreau, on pose deux pointes métalliques (fig. 4), distantes de l'écart  $d$ . Que le contact entre les pointes et le semi-conducteur soit ohmique ou pas, la différence de potentiel  $V$  existant entre ces deux pointes est identique à celle qui s'est développée entre deux sections du barreau distantes de  $d$ , mais mesurée par la méthode du Zero la nature des pointes n'intervenant pas, on déduit la résistivité du semi-conducteur par la connaissance de sa géométrie, et des valeurs de  $I$  et  $V$ .

2 - Méthode des quatre points de Valdes.

Une méthode plus rapide et plus simple pour la recherche de la résistivité du semi-conducteur, et reposant sur le même principe que celui qui a été décrit ci-dessus utilise

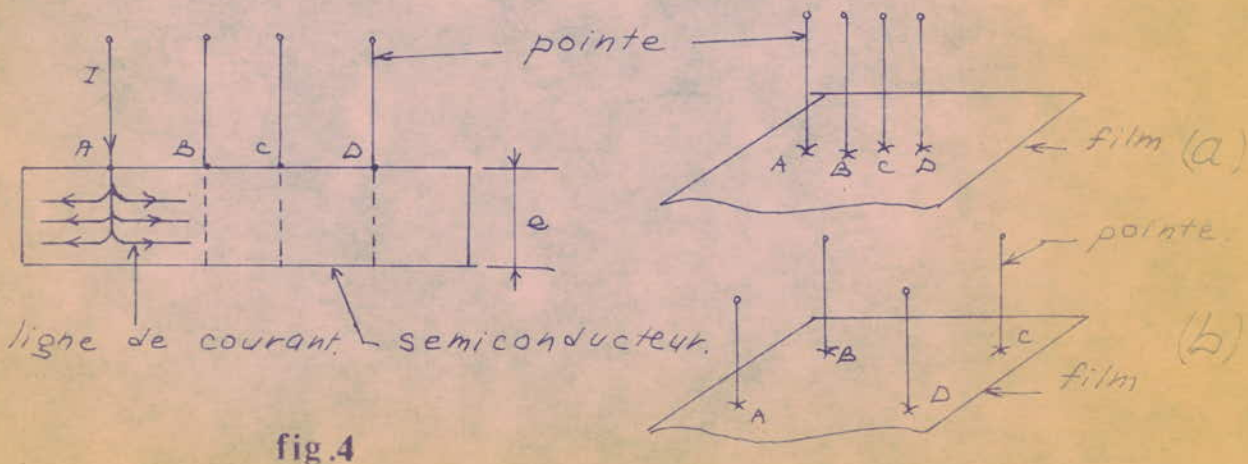
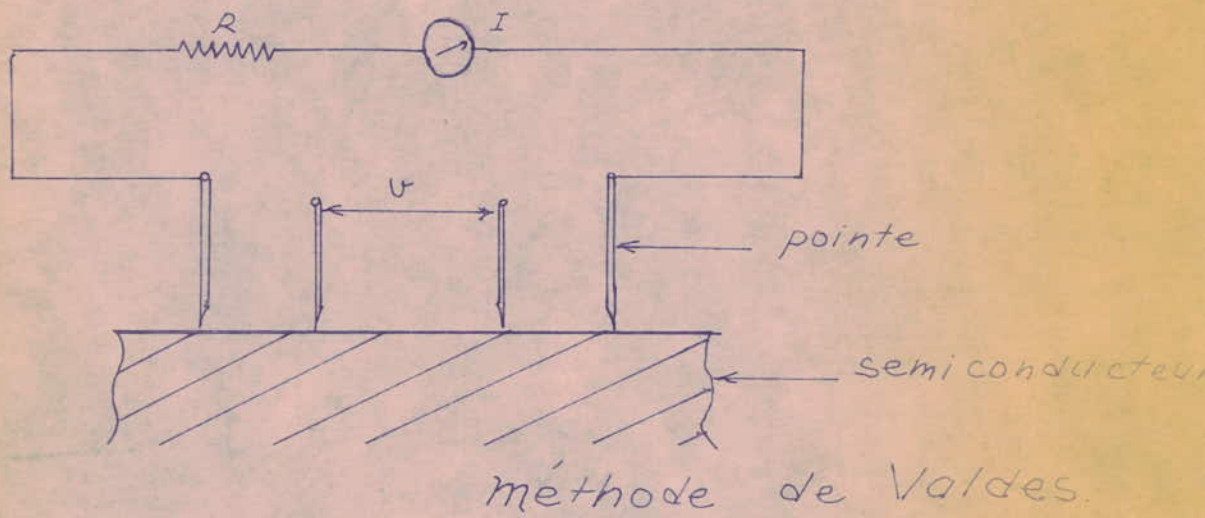
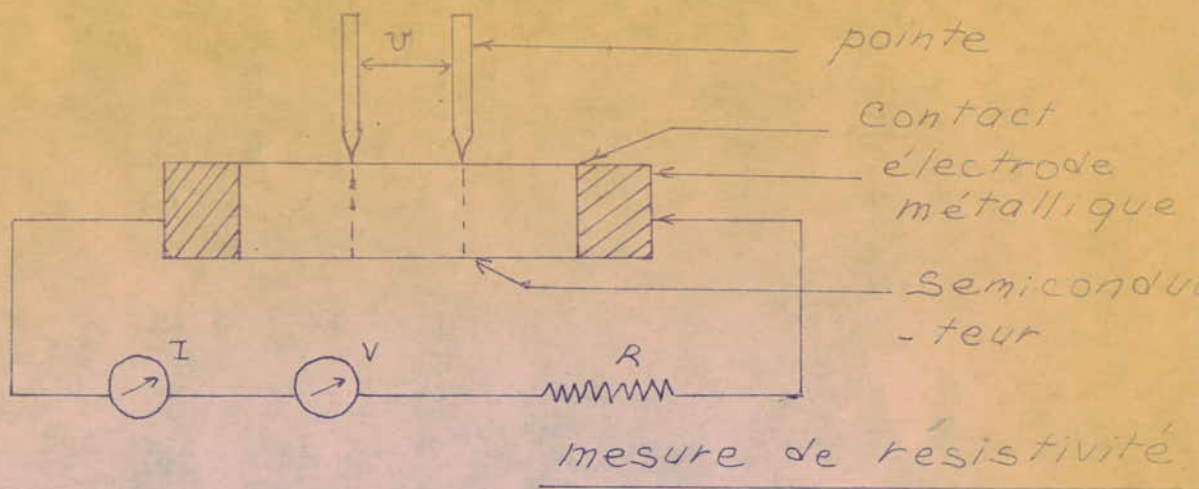


fig.4

quatre pointes fines, jouant le rôle d'électrodes et de contacts métalliques (fig. 4).

On affecte deux d'entre elles à la mesure du courant les deux autres à la tension.

On procède au contact par l'utilisation d'un système mécanique qui appuiera les quatres pointes, par pression réglable et reproductible sur la face du barreau de semi-conducteur. Celui-ci se présentant sous forme de pastilles minces, telles que les photopiles au Si, ou sous forme de couches très minces (5 à 20  $\mu$  d'épaisseur) telles que les cellules solaires au CdS.

### 3 - Calcul de la résistivité pour les plaques infiniment minces.

On considère un film de semi-conducteur dans l'épaisseur est très faible. Son contact avec une pointe (fig. ), donne naissance à un courant I.

Soient deux cylindres de rayons r et (r+dr), et d'épaisseur e. La résistance dR serait:

$$dR = \rho \cdot \left( \frac{dr}{2\pi \cdot r \cdot e} \right)$$

la d.d.p. correspondant est :  $dV = \rho \cdot I \cdot \left( \frac{dr}{2\pi \cdot r \cdot e} \right)$

la tension entre les pointes B et C est:

$$V_{Bc} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot e} \int_{AB}^{AC} \left( \frac{dr}{r} \right) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi e} \text{Log} \left( \frac{AC}{AB} \right)$$

Le courant issu de A, sortant par la pointe D, on aura une différence de potentiel entre B et C,  $V_{BC}$  telle que:

$$V_{BC} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot e} \cdot \text{Log} \left( \frac{AC \cdot BD}{AB \cdot DC} \right)$$

a) Si on aligne les pointes, on aura:

$$V_{BC} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot e} \cdot \text{Log} 4 = 4,53 \cdot e \cdot \frac{V}{I}$$

b) Si on les place en carré on aura:

$$V_{BC} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot e} \cdot \text{Log} 2 = 9,06 \cdot e \cdot \frac{V}{I}$$

- BIBLIOGRAPHIE 6

-----

- (1) - L'Énergie Solaire - Cahiers de l'A.F.E.D.E.S.
- (2) - Électronique et microélectronique Industrielle  
N° 198 (Janvier 75)
- (3) - La Houille d'Or - Collection "le bilan de la science"  
par M. PERROT
- (4) - Le Rayonnement solaire au sol et ses mesures  
cahier de l'A.F.E.D.E.S
- (5) - Applications thermiques de l'Énergie Solaire dans  
la Recherche et l'Industrie (Collège international  
sur l'Énergie Solaire-1958)
- (6) - Acta Electronica -Vol.3 n° 2 (avril 59)
- (7) - La Luminescence Cristalline . par G.E. Coates
- (8) - La Photoélectricité et ses Applications - par  
V.K. ZWORYKIN et E.G. RAMBERG
- (9) - Les Semi-conducteurs- par Roger LEGROS (Eyrolles)
- (10) - Physique et Technologie des dispositifs à Semi-  
conducteurs -par A.S GROVE (Dunod)
- (11) - Semi-conducteurs électroniques-par E. SPENKE (Dunod)
- (12) - Photoconductivity in the éléments-par  
Trevor SIMPSON (MOSS)
- (13) - Électronics-par Jacob MILLEMAN (Int.Student Edition)
- (14) - L'Électricien Industriel n° 2157 (Janvier 74)  
n° 2158 (Fevrier 75)
- (15) - La Cellule Photoélectrique (Edit. Que Sais-Je ?)
- (16) - Acta Electronica Vol.<sup>5</sup> n° 3 (Juillet 61)
- (17) - L'Onde Électrique -Vol.55 n° 2 (1975)
- (18) - Principes généraux des Convertisseurs directs d'E  
d'Énergie-par R.BONNEFILLE et J.ROBERT (Dunod)
- (19) - Photopiles au Sélénium-par G. BLET
- (20) - Solid States Electronics-Vol.18 n° 18 (Decembre 75)
- (21) - Applied Physical Letters-Vol.26 n° 229 (1975 )  
par S. WAGNER-  
- Applied Physical Letters-Vol.27 n° 89 (1975 )  
par KASPER
- (22) - Applied Physical Letters-Vol.29 n° 8 (1976 )
- (23) - Journal of Applied Physics-Vol.7 n° 9 (Sept. 76)

- (24) - Hétérojonction and Métal-Semiconducteur Junctions  
par A.G MILNES et D.L FENCHT (Academic Press)
- (25) - Technique Générale du Laboratoire de Physique (CNRS)  
par J. SURUGUE
- (26) - Physique et Énergie-par R. STEVENSON et R.B MOORE
- (27) - Photometry-par John W.T. WALSH
- (28) - Les Bases de l'Automatique Industrielle  
par S. WĘGRZYN (Dunod).
- (29) - Les Systèmes Auto-Adaptatifs-par P.I. TCHINAEV
- (30) - Transmission de la Chaleur - par W.H.MC.ADAMS(Dunod)
- (31) - Solid State Electronics - Volume 10 ( 1967 ) .
- (32) - Inter Electronique- n° 223 .
- (33) - Acta Eléctronica - Vol. 18 n° 4 (Oct. 1975 ) .