

27/80  
1 ex

DEPARTEMENT ELECTRICITE  
FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES



CARACTERISATION  
DES  
CELLULES SOLAIRES



PROPOSE PAR:  
MR. M. HADDADI

ETUDIE PAR:  
A. REMITA  
M. HENINI





DEPARTEMENT ELECTRICITE  
FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

---

# PROJET DE FIN D'ETUDES

---

CARACTERISATION  
DES  
CELLULES SOLAIRES

PROPOSE PAR:

MR. M. HADDADI

ETUDIE PAR:

A. REMITA

M. HENINI





REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Centre des Sciences et de la Technologie Nucléaire (C.S.N.T.), dans le Laboratoire "Cristaux et Couches Minces", sous la direction de Monsieur HADDADI Mourad, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, qu'il veuille bien trouver ici le témoignage de gratitude et de nos sincères remerciements, pour son aide précieuse et ses bons conseils.

Nous tenons à exprimer nos très vifs remerciements à :

- Monsieur DERDOURI, Chercheur au S.C.T.N. pour s'être intéressé à notre travail et pour son aide précieuse.
- Monsieur BENMALEK, Maître de conférence à l'U.S.T.H.B. et Responsable du Laboratoire C.C.M., pour nous avoir accueillis dans son service.
- Monsieur A. ADANE, Docteur-Ingénieur, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger - pour ses bons conseils.

Nous remercions également tout le personnel du service C.C.M. pour leur accueil chaleureux.

Nous remercions vivement tout ceux qui, directement ou indirectement ont collaboré dans notre formation.

-:-:-:-:-:-:-:-

# S O M M A I R E

- I	INTRODUCTION.	1
- I	CHAPITRE I.	2
1/	Généralités sur le rayonnement solaire.	2
2/	Principe de l'effet photovoltaïque.	4
3/	Jonction P.N. à l'équilibre.	4
4/	Jonction P.N. polarisée dans l'obscurité.	6
5/	Jonction P.N. éclairée.	6
6/	Collection des charges minoritaires créées.	6
7/	Densité maximale du courant photovoltaïque.	7
8/	Principale caractéristique d'une Jonction P.N. idéale.	7
	8.1. - A l'obscurité.	7
	8.2. - Sous éclairement.	7
9/	Constitution d'une cellule solaire.	8
10/	Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.	8
	10.1. - A l'obscurité.	8
	10.2. - Sous éclairement.	10
	10.3. - Définition des différents paramètres.	10
11/	Rendement de Conversion.	10
	11.1. - Rendement de conversion théorique en négligeant les pertes.	10
	11.2. - Rendement de conversion théorique en tenant compte des pertes.	11
- I	CHAPITRE II.	
1/	Ordre de grandeur de certains paramètres.	14
2/	Simplification et formules appliquées.	14
	2.1. - A l'obscurité.	14
	2.2. - Sous éclairement.	14
3/	Détermination des différents paramètres.	15
	3.1. - A l'obscurité.	15
	3.2. - Sous éclairement.	15
4/	Calcul d'erreur.	16
5/	Effet de la température sur les différents paramètres.	16
	5.1. - Mobilité des électrons et des trous.	16
	5.2. - Gap d'énergie.	16
	5.3. - Densité d'états.	17
	5.4. - Coefficient de diffusion.	17
	5.5. - Courant de saturation.	17



5.6. - Résistance série.	18
5.7. - Effet de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ .	18
5.7.1. - A l'obscurité.	18
5.7.2. - Sous éclairement.	19

## ⌈ CHAPITRE III.

### ETUDE EXPERIMENTALE.

1/ - Manipulation.	23
2/ - Cellule utilisée.	23
3/ - Résultats et interprétation.	25
3.1. - Caractérisation des cellules à l'ambiante.	25
3.2. - Etude à différents éclairements et température constante.	30
3.3. - Effet de l'éclairement sur les différents paramètres.	35
3.4. - Etude à différentes températures et éclairement constant.	42
3.5. - Effet de la température sur les différents paramètres.	42
3.6. - Effet de la température sur l'association des cellules solaires.	45
3.7. - Influence de la dispersion des caractéristiques sur l'association des cellules.	46

## ⌈ CONCLUSION.

ANNEXE 1. - Détermination des paramètres.	65
ANNEXE 2. - Calcul d'erreur.	70
ANNEXE 3. - Alimentation stabilisée.	72

--:--:--:--:--:--:--

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

Devant la demande de petites centrales électriques autonome, l'utilisation des cellules solaires se développe de plus en plus. Cependant le prix de l'énergie photovoltaïque reste très élevé si bien qu'il importe d'utiliser ces générateurs au voisinage de leurs caractéristiques optimales.

Il importe donc de connaître le plus précisément possible leurs caractéristiques ainsi que la variation de ces caractéristiques sous l'influence de différents facteurs. En effet l'éclairement et la température sont les facteurs que nous considérons.

Notre travail effectué au laboratoire C.C.M. du C.S.T.N., consiste à étudier l'influence de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques courant (I), tension (V) de photopiles seules ou associées par deux (série, parallèle).

Dans un premier chapitre nous rappellerons brièvement la théorie des photopiles au silicium à jonction P N. Nous analyserons ensuite les divers facteurs de perte qui limitent le rendement de conversion énergétique.

Dans le deuxième nous exposerons une méthode d'analyse dans laquelle nous donnerons les formules de détermination des différents paramètres ainsi que la variation de ces paramètres en fonction de la température.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation des résultats expérimentaux et leur analyse.



## 1 / - GENERALITES SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE.

Du point de vue énergétique, l'essentiel du rayonnement solaire hors de l'atmosphère se trouve dans l'intervalle  $0,2 - 4,0 \mu m$ , la puissance ( $3,805 \cdot 10^{25} W$ ) et la composition spectrale du rayonnement émis par le soleil sont remarquablement constantes, au moins à l'échelle des temps qui concernent les activités de l'homme. Il semble aujourd'hui que les variations de la puissance rayonnée dans la direction de la terre n'excède pas 4 % dans les périodes les plus perturbées. A la distance moyenne de la terre par rapport au soleil. ( $149,598$  million de km =  $1,49598 \cdot 10^{11}$  m). L'éclairement produit par le soleil sur un plan de front est de l'ordre de  $1,35$  à  $1,40$  kw/m<sup>2</sup>.

Donc il est nécessaire de connaître les réponses relatives du spectre de différents rayonnement lumineux, en particulier celui du soleil pour plusieurs raisons tels que : le dimensionnement des installations comportant une association collecteur - convertisseur - accumulateur, la fabrication des cellules solaires à courbes spectrale plus avantageuses.

Avant d'entamer les paragraphes suivants on va définir ce qu'est un flux et <sup>UN</sup>éclairement.

Lorsque la lumière est uniformément répartie dans un plan, le nombre total de photons reçus par unité de temps est appelé flux F, dans le sens photométrique du terme. Par contre un éclairement E est définie comme le nombre de photons reçus par unité d'aire et de temps.

### 1.1 - Sensibilité spectrale d'une cellule solaire au silicium.

A la fig. (1) nous donnons la courbe de sensibilité spectrale (courbe) comparée à la bande de visibilité humaine (rectangle). En ordonnées le pourcentage et en abscisse, la longueur d'onde en nanomètre ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-3} \mu\text{m}$ ). On peut voir que la cellule au silicium donne le maximum de puissance vers les 810 nm, mais elle est sensible à des rayons de longueur d'onde comprise entre 400 et 1 200 nm, la vision humaine se limite à la bande 400 à 700 nm.

### 1.2 - Sensibilité spectrale de la lumière solaire.

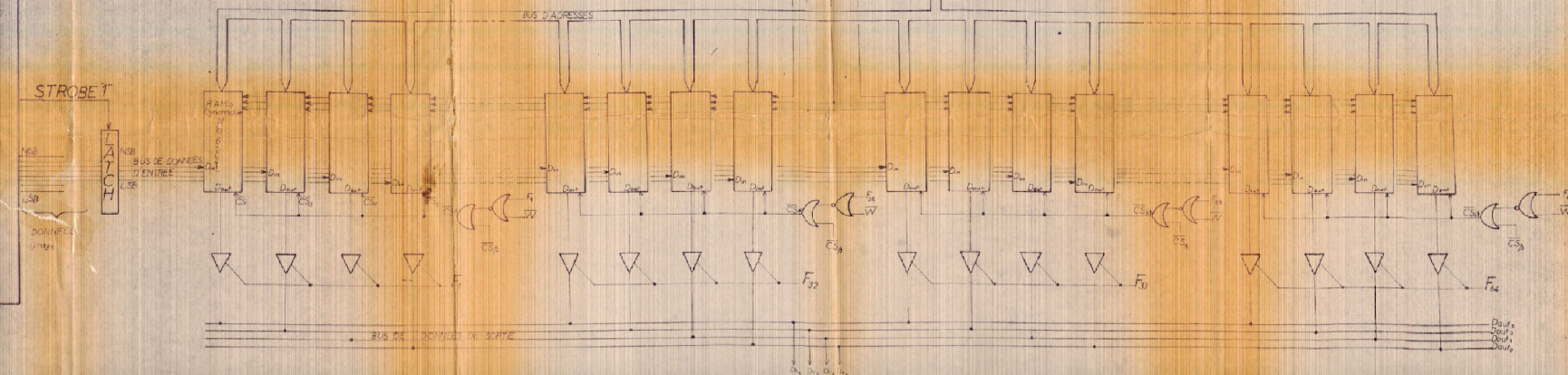
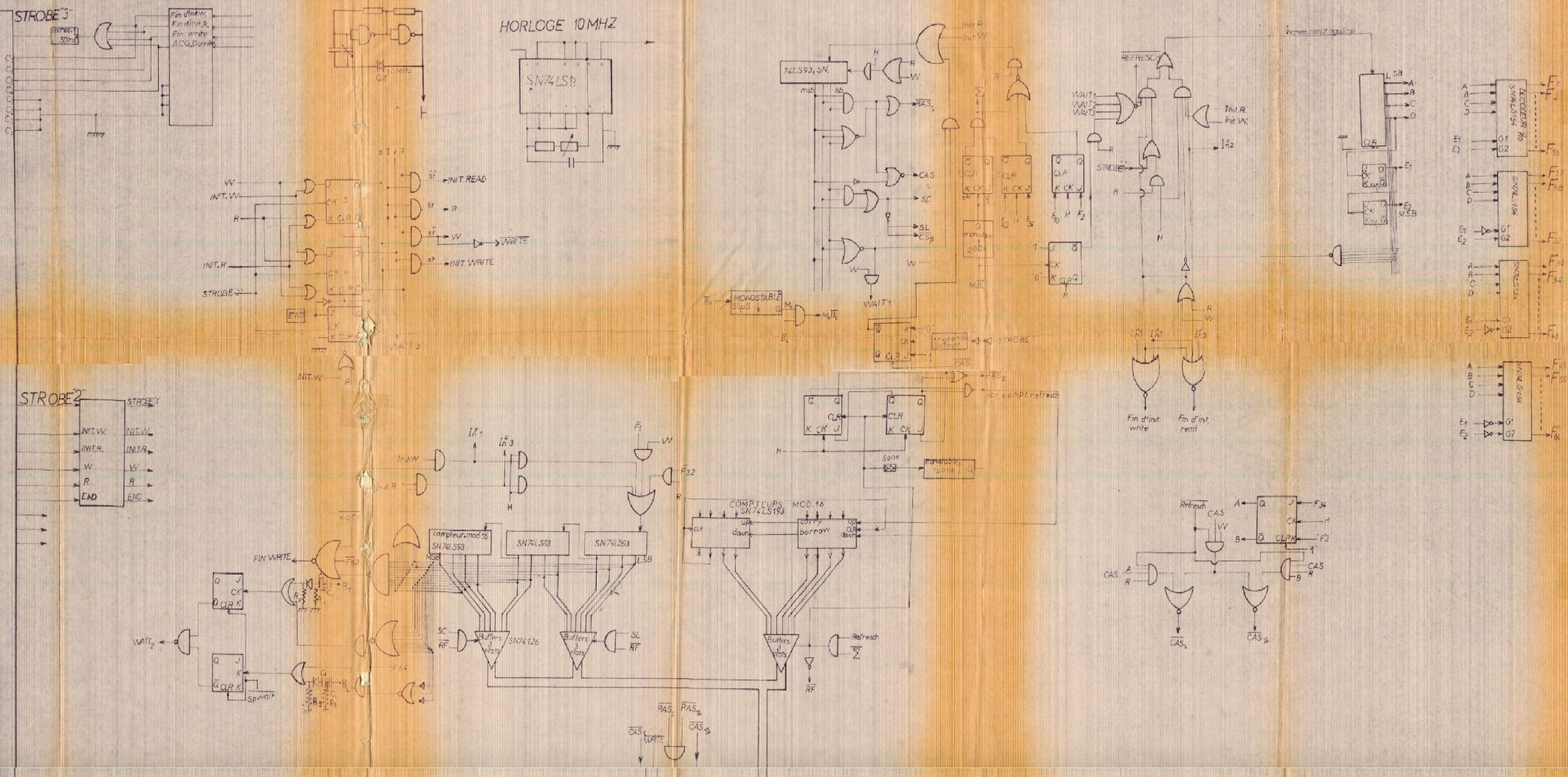
Sur la fig. (2), nous donnons les mêmes courbes, mais aussi celle du rayonnement solaire qui s'étend jusqu'à 1 200nm et plus, le maximum d'énergie solaire correspond à 420 nm environ et se trouve dans la zone favorable de la vision humaine.

La cellule peut capter dans les meilleurs conditions de rendement les rayonnements de 500 à 900 nanomètres. On peut voir sur la figure qu'une certaine compensation s'établit entre les deux courbes lorsque la puissance de la cellule varie dans un sens, celle fournit par le soleil augmente.

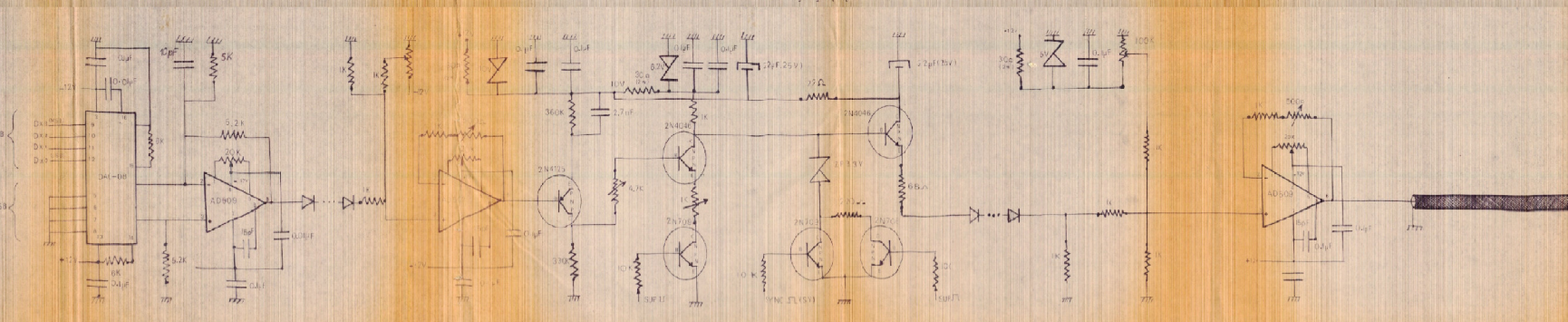
### 1.3 - Sensibilité spectrale d'une lampe à incandescence.

A la fig. (3) nous donnons la réponse spectrale d'une lampe à incan-





"RESTITUTION  
D'UNE IMAGE NUMERISEE  
SUR UNITE VIDEO"



"Restitution d'une image numérisée sur unité vidéo"

PROMOTEUR: TELJINI  
ETUDE ET REALISATION FAITES  
AU CSTN PAR LES ETUDIANTS:  
SAYOUD LYES  
et OUSSEDIK AZEDJINE  
session Juin 1981



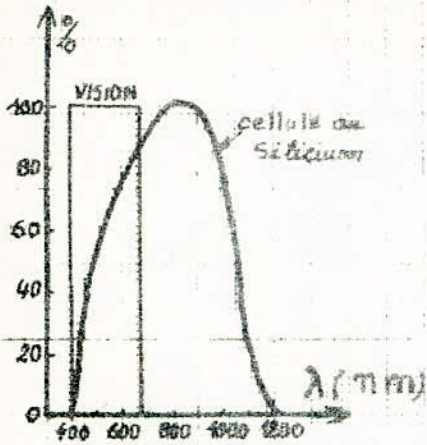


Fig ①

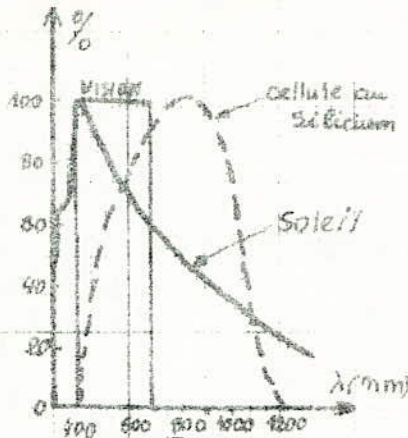


Fig ②

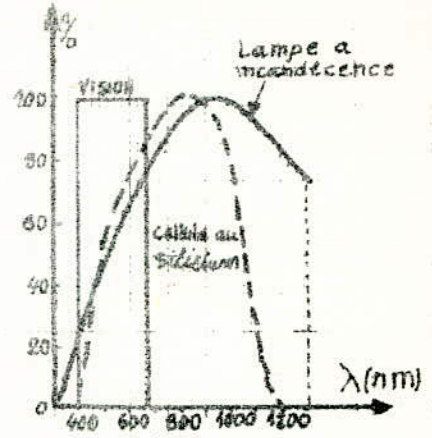


Fig ③

courbe de sensibilité spectrale de cellules au silicium comparée à :

- ① bandes de visibilité humaine.
- ② courbe de sensibilité spectrale du soleil
- ③ courbe de sensibilité spectrale d'une lampe à incandescence

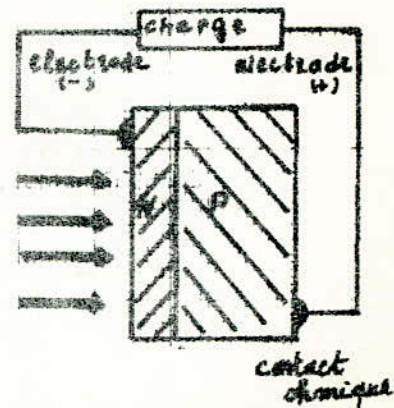


Fig 4: schéma d'une cellule solaire.

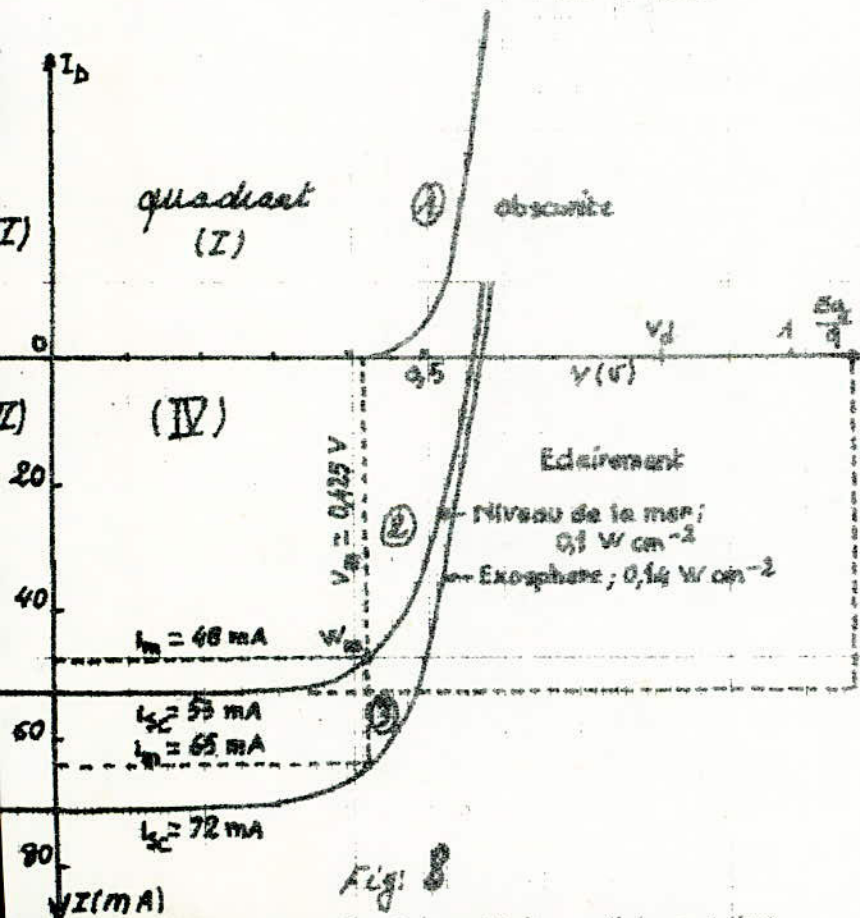


Fig 5

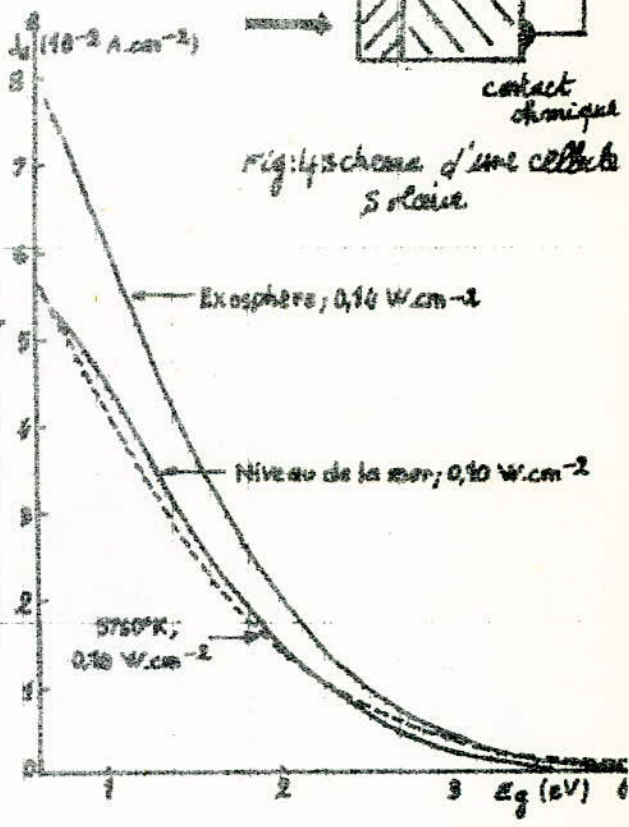


Fig 6

Caractéristique courant (I) - tension (V) d'une cellule solaire au silicium de 16 mm de diamètre à la température de 35°C.  $I_0$  correspond au courant d'obscurité, l'indice  $sc$  indique que la cellule est éclairée.

Densité minimale de courant photoélectrique dans les cellules solaires, en fonction du gap d'énergie  $E_g$  du semi-conducteur.



descence, on remarque que le spectre d'une cellule solaire au silicium coïncide assez bien à celui de la lampe jusqu'à 800 nanomètres les pourcentages respectifs de sensibilité sont très proches, à partir de 900 nanomètres environ,

## 2 / - PRINCIPE DE L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE.

Il se définit généralement comme l'apparition d'une force électromotrice (f. e. m.) dans un matériau (hétérogène) éclairé, et plus particulièrement semi-conducteur. Il permet alors la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Pour mettre en évidence cet effet, nous branchons entre les bornes d'une jonction P.N. une résistance  $R_{CH}$  voir (fig. (4)) à la lumière, la résistance  $R_{CH}$  est traversée par un courant  $I$ . Il apparaît donc entre les bornes une d.d.p.v. L'existence du courant  $I$  s'explique de la façon suivante : l'absorption de photons par la jonction P.N. entraîne, lorsque leur énergie  $h\nu$  est supérieure à la largeur énergétique de la bande interdite  $E_g$ , la création de paires électron-trou. Or l'hétérogénéité de la jonction P.N. donne lieu à un champ local qui draine les charges ; d'où il en résulte un courant  $I$ .

Pour cela nous allons traiter brièvement la jonction P.N.

## 3 / - JONCTION P.N. A L' EQUILIBRE.

On dit qu'une jonction P.N. est à l'état, d'équilibre quand elle est placée dans l'obscurité, à température uniforme, et en l'absence de différence de potentiel appliquée. Dans ces conditions, il n'y a aucun courant qui circule entre les deux régions N et P, cependant, entre ces deux régions, les concentrations d'équilibre  $n_0$  des électrons, d'une part, et  $p_0$  des trous, d'autre part sont très différentes.

Dans le cas où les concentrations  $N_D$  des donneurs et  $N_A$  des accepteurs sont à la fois grandes devant la concentration intrinsèque  $N_i$  dans le même semi-conducteur et petite devant les concentrations  $N_C$  et  $N_V$  des états possibles pour des électrons les bandes de conduction et de valence, on a alors :

- Région N : (donneur)

$$n_0 \approx N_D \quad (\text{majoritaires}) \quad (1)$$

$$p_0 \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (\text{minoritaires}) \quad (2)$$

- Région P (accepteurs)

$$n_0 \approx \frac{n_i^2}{N_A} \quad (\text{minoritaires}) \quad (3)$$

$$p_0 \approx N_A \quad (\text{majoritaires}) \quad (4)$$

A l'équilibre une barrière de potentiel s'oppose au mouvement des charges majoritaires, et ne peuvent plus diffuser dans le milieu voisin.

$$V_N - V_P = V_d \quad (5) \quad (\text{voir fig. 5})$$



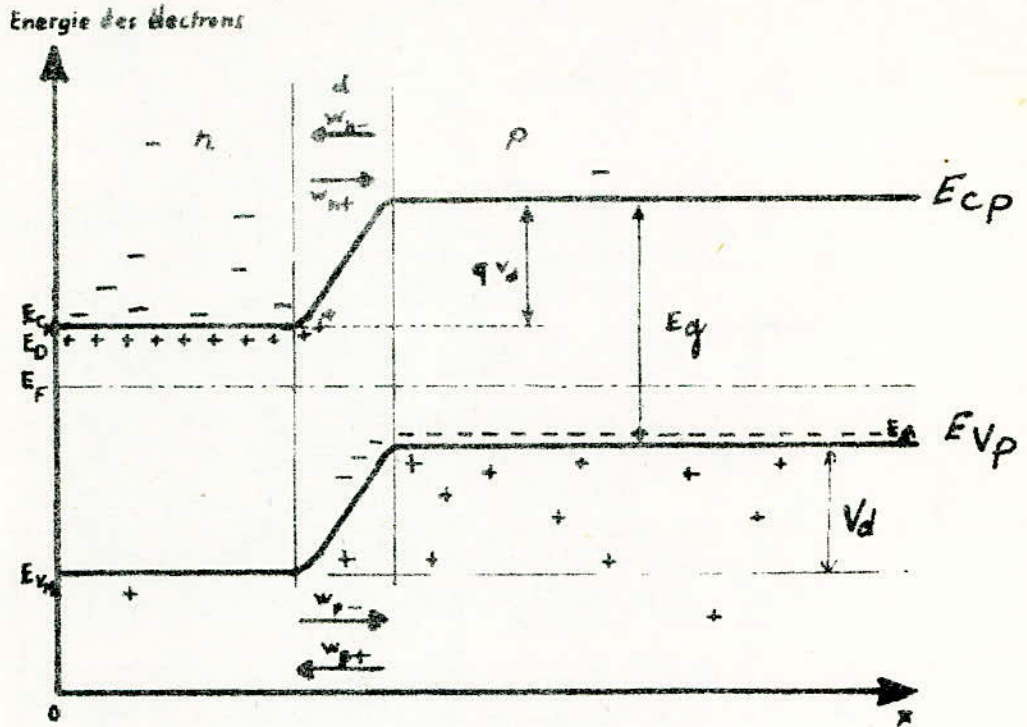


Fig: 5 Niveaux d'énergie dans une jonction à l'état d'équilibre.

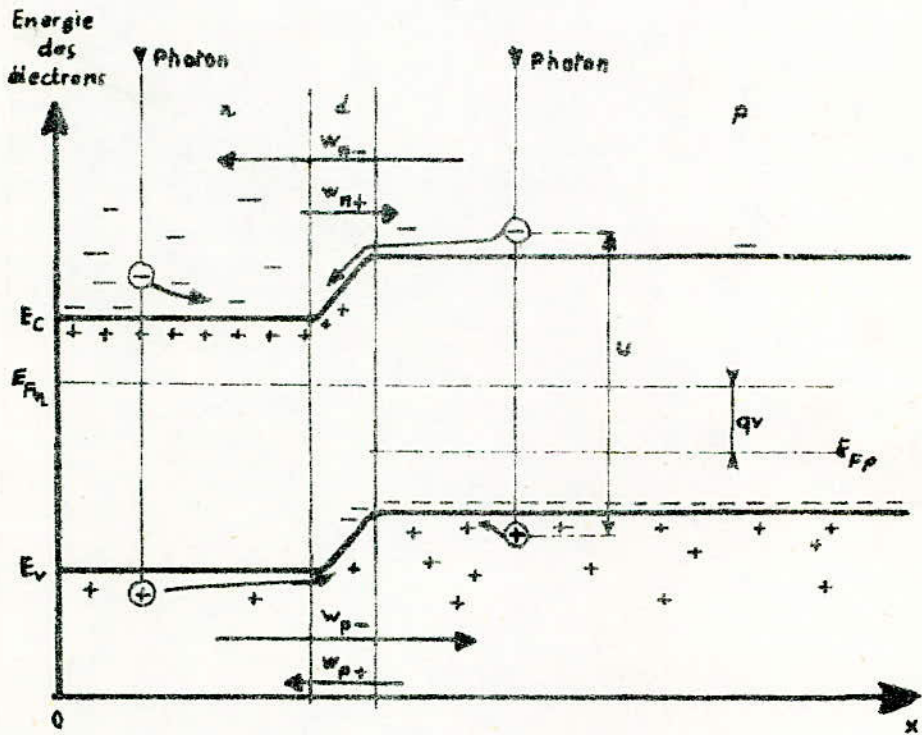


Fig 6 Niveaux d'énergie dans une cellule solaire éclairée et débitant dans une charge

La concentration intrinsèque  $n_i$  en fonction des concentrations effectives  $N_C$  et  $N_V$  des états possibles pour les électrons dans les bandes de conduction et de valence, et de  $E_g$  est donnée par la relation.

$$n_i^2 = n p = N_C N_V \exp\left(\frac{E_g}{KT}\right) \quad (6)$$

$$\text{avec } n = N_C \exp\left(\frac{E_c - E_F}{KT}\right) \quad (7)$$

$$\text{et } p = N_V \exp\left(\frac{E_F - E_v}{KT}\right) \quad (8)$$

A l'état d'équilibre, le flux  $W_{n-}$  des minoritaires qui vont de la région P à la région N compense juste le flux  $W_{n+}$  des majoritaires qui passent de n en P et, de même, les flux des trous  $W_{p-}$  et  $W_{p+}$  se compensent, si bien qu'aucun courant n'est perceptible dans le circuit extérieur.

#### 4 / - JONCTION P N POLARISEE DANS L'OBSCURITE.

Dans le cas où la cellule est placée dans l'obscurité ; elle est soumise à une polarisation électrique, insérée dans ce circuit. La tension de polarisation  $V$  s'ajoute en valeur algébrique à la tension de diffusion d'où on a :

$$V_N - V_p = V_d - V$$

Suivant le signe de la tension de polarisation, elle favorise ou défavorise les flux  $W_{n+}$  et  $W_{p+}$  par rapport aux flux  $W_{n-}$  et  $W_{p-}$  qui restent inchangés.

Dans le cas d'une polarisation directe, le courant  $I_D$  (courant d'obscurité) à l'intérieur de la jonction PN est dirigée de P vers N.

#### 5 / - JONCTION P N ECLAIREE (APPARITION D'UNE F. e. m.) .

Lorsqu'on soumet la jonction PN à la lumière, une paire électron-trou est formée, chaque fois qu'un photon d'énergie  $h\nu \geq E_g$  cède son énergie à un électron de valence, en le faisant passer dans la bande de conduction. Ce qui fait il y a apparition des porteurs minoritaires dans chaque région.

Les électrons dans la région P et les trous dans la région N voir fig. 6, peuvent atteindre par diffusion la zone de jonction ; ils subissent dans cette zone de transition l'influence du champ local et passent dans la région opposée donnant naissance à un courant dirigé de N vers P, à l'intérieur de la jonction, d'où il en résulte un courant opposé au courant  $I_D$  de la jonction P.N à l'obscurité.

#### 6 / - COLLECTION DES CHARGES MINORITAIRES CREES .

La distance de la particule minoritaire à la jonction se mesure par la longueur de diffusion  $L_D$ , qui représente la distance moyenne de parcours d'une particule minoritaire avant sa recombinaison avec une particule majoritaire. Quand la paire électron-trou est créée à une distance  $d$  de la jonction,



est inférieur à  $L_D$ , la probabilité de passage d'une charge positive de la région N à la région P, est grande.

La longueur de diffusion est une fonction de deux paramètres : la mobilité  $\mu$ , ou vitesse par unité de champ électrique, des porteurs de charges, et la durée de vie  $\tau$ , temps moyen pendant lequel le porteur participe à la conduction avant de se recombiner avec l'autre type de porteur on a :

$$L_D^2 = \frac{k T}{q} \mu \tau \quad (9)$$

où  $k$  est la constante de Boltzman,  $T$  la température absolue et  $q$  la charge élémentaire.

Généralement la durée de vie est dégradée par la présence d'impuretés (souvent métallique, Fe, Cu, Au ..... ) ce qui fait plus le matériau est pur il y aura de porteurs collectés.

#### 7 / - DENSITE MAXIMALE DE COURANT PHOTOELECTRIQUE.

Si on admet que les photons par réflexion et par transmission dans la cellule sont négligeables que tous les photons absorbés, dont l'énergie est supérieure à  $E_g$ , donnent une paire électron-trou, et que toutes les charges minoritaires contribuent au courant photoélectrique. Ce courant  $I_{sc}$  vaudra :

$$I_{sc} = q \int_{E_g}^{\infty} \frac{dF}{du} du \quad (10)$$

soit  $J_E = \frac{I_{sc}}{S}$  = représente la densité du courant photoélectrique.

La figure (7) représente la variation de la densité maximale du courant photoélectrique, ainsi calculé. Où l'on peut constater une diminution de  $J_E$  en fonction de  $E_g$ .

#### 8 / - PRINCIPALE CARACTERISTIQUE D'UNE JONCTION PN IDEALE.

##### 8.1 - A l'obscurité.

Le courant  $I_D$  est lié à la tension  $V$  par l'équation :

$$I_D = I_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (11)$$

où  $I_0$  est le courant de saturation,  $q$ ,  $k$ ,  $T$ , sont définis précédemment. La fig. (8) courbe (1) montre une courbe  $I = f(V)$  typique de diode.

##### 8.2 - Sous éclairage.

On constate que la forme générale de la caractéristique  $I = F(V)$  est conservée mais la courbe est décalée par rapport à celle obtenue précédemment ; un courant inverse apparaît d'autant plus important que l'éclairage est intense comme l'indique les 2 courbes (2) et (3) fig. 8.

En appliquant le principe de superposition des états on obtient l'expression du courant qui peut se mettre sous la forme :



$$I = I_D - I_F \quad (12)$$

où  $I_F$  est le courant provoqué par l'effet photovoltaïque, appelé photocourant.

On voit que, dans le quatrième quadrant, où  $V$  est positif et  $I$  négatif, la jonction PN se comporte comme un générateur d'énergie. Pour des raisons de commodité nous avons pris dans le 4ème quadrant  $I$  positif et  $V$  positive, dans ce cas la relation devient  $I = I_F - I_D$ .

La mesure du photocourant maximal s'effectue en court-circuit les bornes de la jonction PN d'où le nom de courant de court-circuit noté par  $I_{sc}$ . La courbe  $I = F(V)$  fait apparaître le régime de circuit ouvert ( $I = 0$ ) caractérisé par la tension à vide  $V_{OC}$ , physiquement ce régime correspond à la compensation au sein de la jonction entre les deux courants  $I_{sc}$  et  $I_D$ .

Entre ces deux régimes, il peut apparaître un autre correspondant à la puissance maximale délivré par la jonction PN et ceci se passe, pour une résistance de charge <sup>égale</sup> à l'impédance interne de la jonction PN.

$$P_m = V_m I_m$$

Cette puissance est reliée à  $I_{sc}$  et  $V_{oc}$  par l'équation.

$$P_m = (F F) \cdot I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (13)$$

où  $F \cdot F$  étant défini comme le facteur de forme. Une photopile est d'autant performante que  $F \cdot F$  s'approche de l'unité.

## 9 / - CONSTITUTION D'UNE CELLULE SOLAIRE.

Généralement on procède à une diffusion sur un substrat  $p$  de faible résistivité 1 à 2  $\Omega \cdot \text{cm}$

La profondeur de la jonction  $N$  est inférieure à 1  $\mu\text{m}$ .

Le contact ohmique est déposé par évaporation thermique sous vide, sous forme d'une couche entière sur la face arrière et d'un "peigne" sur la face avant afin de laisser passer le maximum de lumière. Enfin, pour pallier, à la perte du rayonnement réfléchi (80 %), on dépose une couche anti-reflet ( $\text{TiO}_2$ ).

La structure d'une telle cellule est représentée à la fig. (9).

## 10 / - SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE REELLE.

D'une manière générale, pour rendre compte du fonctionnement des diodes à l'obscurité et ~~pour~~ éclaircissement, nous devons prendre en considération les différents phénomènes physiques qui limitent leurs performances.

### 10.1 - Cellule solaire à l'obscurité.

A la fig. (10) nous avons représenté le schéma équivalent d'une cellule solaire à l'obscurité ; qui tient compte des deux résistances  $R_s$

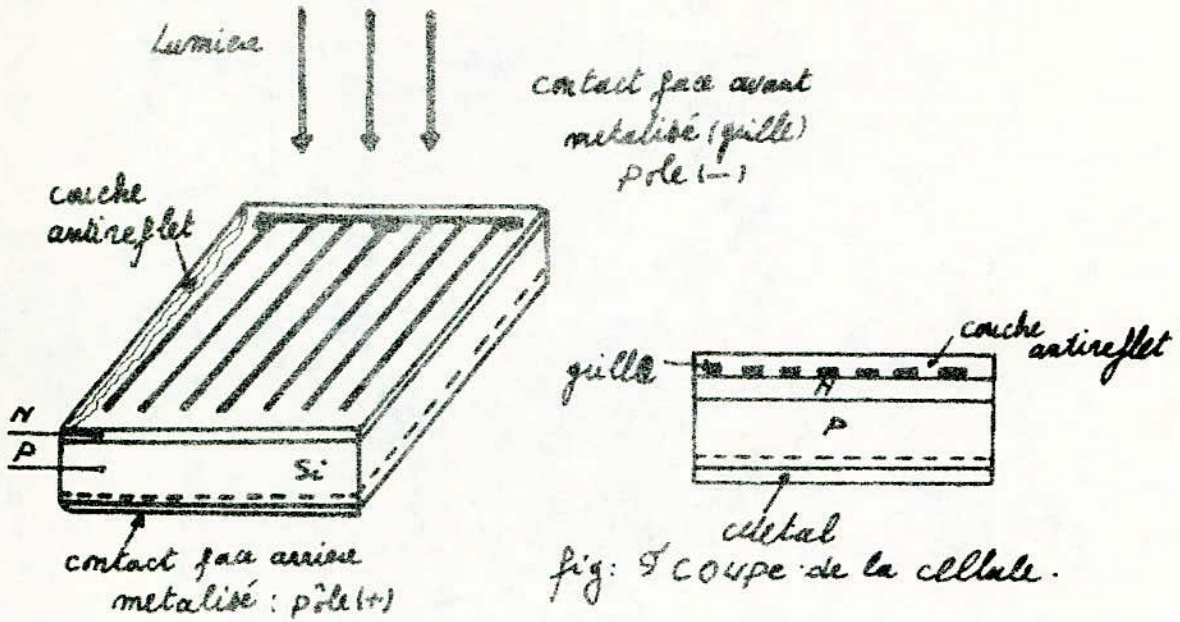


Fig: 9 schéma de la structure d'une cellule solaire au silicium

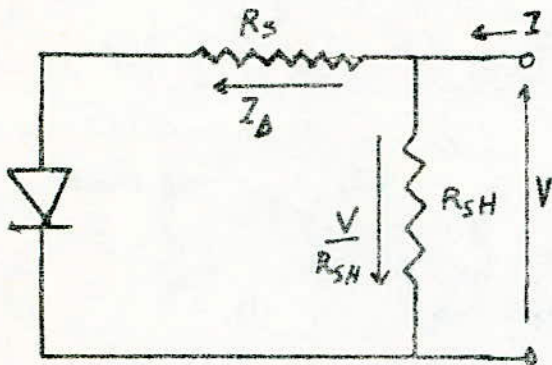


Fig: 10 Schéma équivalent d'une cellule solaire à l'obscurité

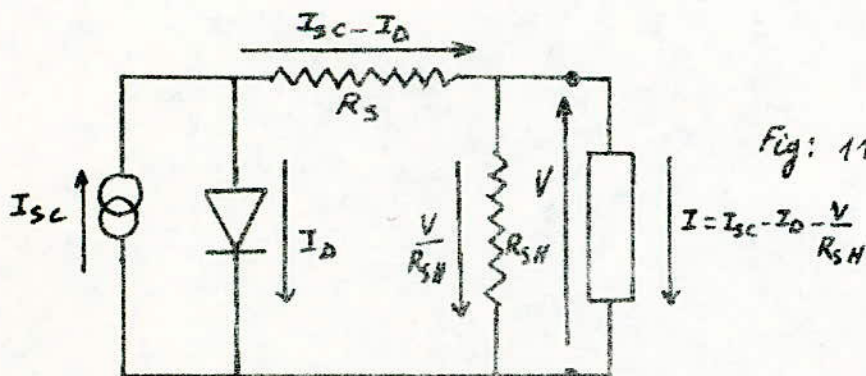


Fig: 11 Schéma équivalent d'une solaire sous éclaircissement



et  $R_{SH}$ . Dans ces conditions, la caractéristique de la cellule réelle peut être décrite par la relation.

$$I = I_0 \exp \left( q \left( \frac{V - R_S I}{n K T} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_{SH}} \quad (14)$$

$n$  est le facteur d'idéalité que nous allons définir par la suite.

### 10.2 - Cellule solaire sous éclaircissement.

La fig. (11) montre un schéma équivalent d'une cellule solaire sous éclaircissement, qui tient compte des deux résistances  $R_S$  et  $R_{SH}$ .

Dans ces conditions, le courant circulant dans la résistance de charge  $R_{cH}$  est donné par

$$I = I_{sc} - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V + R_S I)}{n K T} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_{SH}} \quad (15)$$

### 10.3 - Définition des différents paramètres.

#### 10.3.1 - Résistance série ( $R_S$ ).

Elle est due aux contacts des électrodes avec le semi-conducteur et à la résistance interne homogène de celui-ci. La puissance optimale est conditionnée par cette résistance série qui modifie donc la caractéristique  $I(V)$ .

#### 10.3.2 - Résistance Schunt ( $R_{SH}$ ).

Elle est due aux effets de surface de la cellule. En effet, si la surface du matériau utilisé n'est pas parfaite (existence de fissure), elle devient alors 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 cellule fonctionne sous rayonnement.

#### 10.3.3 - Facteur d'idéalité. Pour que l'expression

$$I_D = I_0 \left( \exp \left( q \left( \frac{V - R_S I}{K T} \right) \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_{SH}}$$

correspond bien au courant qui traverse une diode au silicium, on doit introduire un terme correctif, appelé facteur d'idéalité noté par  $n$  le courant  $I_D$  devient :  $I_D = I_0 \left( \exp \left( q \left( \frac{V - R_S I}{n K T} \right) \right) - 1 \right) + V/R_{SH}$ . Ce facteur d'idéalité dépend des interfaces et des propriétés physiques et technologiques de la cellule.

## 11/ - RENDEMENT DE CONVERSION.

### 11.1 - Rendement de conversion théorique en négligeant les pertes.

Le rendement de conversion est donné par le rapport entre la puissance recueillie sous forme de paire électron-trou à la puissance totale des photons incidents

$$R = \frac{E_g \int_{E_g}^{\infty} \left( \frac{dE}{du} \right) \cdot du}{\int_0^{\infty} u \cdot \left( \frac{dE}{du} \right) \cdot du} \quad (16)$$



Puisque le transfert de l'énergie lumineuse en énergie électrique, est lié fortement à la bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur, à la fig. (12 a) qui donne le rendement  $R$  en fonction du gap d'énergie  $E_g$  pour une lumière conventionnelle, qui est celle d'un corps noir à la température de 5 760° K. Car cette lumière elle est assimilable au spectre solaire au niveau de la mer mais dans la réalité ; le rendement est limité par différentes pertes d'énergie, thermodynamiques et électrique que nous décrirons par la suite.

## 11.2 - Rendement de conversion théorique en tenant compte des pertes.

Les principaux facteurs responsables des pertes mentionnées précédemment, sont étudiés par M.I WOLF et sont rappelés ici :

- 11.2.1 - Absorption incomplète des photons,
- 11.2.2 - Excès d'énergie ( $h\nu - E_g$ ),
- 11.2.3 - Réflexion à la surface,
- 11.2.4 - Collectage des porteurs,
- 11.2.5 - Facteur de tension,
- 11.2.6 - Facteur de forme,
- 11.2.7 - Résistance - série.

Les facteurs (11.2.1) et (11.2.2.) sont fonction uniquement de la largeur de bande interdite ; les autres dépendent non seulement de  $E_g$  mais aussi des paramètres physiques et technologique tels que la mobilité, durée de vie, dopage ; profondeur de jonction ; états de surface etc...

### 11.2.1 - Absorption incomplète des photons.

Tous les photons dont l'énergie  $h\nu$  inférieur à  $E_g$  ne participent pas à la création d'une paire électron - trou, et sont considérés comme une perte pour l'effet photovoltaïque.

### 11.2.2 - Energie perdue ( $h\nu - E_g$ ) :

Tous les photons possédant une énergie  $h\nu$  supplémentaire à l'énergie d'activation  $E_g$ , nécessaire à la création d'une paire électron - trou, cèdent leur énergie excédentaire sous forme d'énergie cinétique aux électrons qu'ils perdent rapidement par collisions avec les atomes du réseau, élevant ainsi la température du matériau semi-conducteur.

### 11.2.3 - Réflexion à la surface.

Une grande partie des photons incidents ne sont pas transmis à la cellule et sont réfléchis au niveau de sa surface. C'est ainsi qu'on définit un coefficient de transmission égal au rapport du flux transmis au flux incident. Donc ce coefficient de transmission sera le premier facteur qui limitera le photocourant.

Il dépend de l'état de la surface du semi-conducteur.

### 11.2.4 - Collectage des porteurs.

Puisqu'il y a un photocourant même en absence de polarisation de la cellule, il y a lieu tout de suite d'évaluer le rendement de collectage.



Il se définit comme le rapport du nombre de porteurs collectés (N) au nombre de porteurs créés  $\Phi_0$   
 soit 
$$Q = \frac{N}{\Phi_0} \quad (17)$$

Le rendement de conversion est, d'autant plus performant que Q, s'approchant de l'unité : soit encore  $\Phi_0$  s'approchant de N. Q dépend de plusieurs facteurs tels que la longueur d'onde du rayonnement, la longueur de diffusion, la durée de vie, la vitesse de recombinaison en surface, le coefficient d'absorption etc...

#### 11.2.5 - Facteur de tension.

Le facteur de tension est défini comme le rapport de la tension en circuit ouvert à la valeur maximale de  $E_g / q$

$$F. V. = \frac{V O C}{E_g / q} \quad (18)$$

Plus F.V. est important, et plus le rendement de conversion est meilleur, pour cela on est obligé d'augmenter VOC et diminuer  $E_g$ .

#### 11.2.6 - Facteur de forme.

Il a été défini précédemment, plus le facteur de forme s'approche de l'unité, plus le rendement de conversion est bon.

#### 11.2.7 - Résistance série.

Nous avons donné sa définition et son influence sur la puissance optimale précédemment.

Le rendement de conversion qui tient compte de toute ces pertes est schématisé à la fig (12 b).

### D i s c u s s i o n :

La considération de tous les facteurs de pertes entraîne, bien sûr, une chute de la valeur du rendement par rapport à la courbe (a) ; mais aussi un déplacement de l'énergie d'activation optimale, c'est-à-dire de celle pour laquelle le rendement est maximum:

d'après M. WOLF (5) ; P. RAPPAPORT ; J.J. LOFERSKI, cette énergie est de 1,5 eV à la température de 300 ° K.

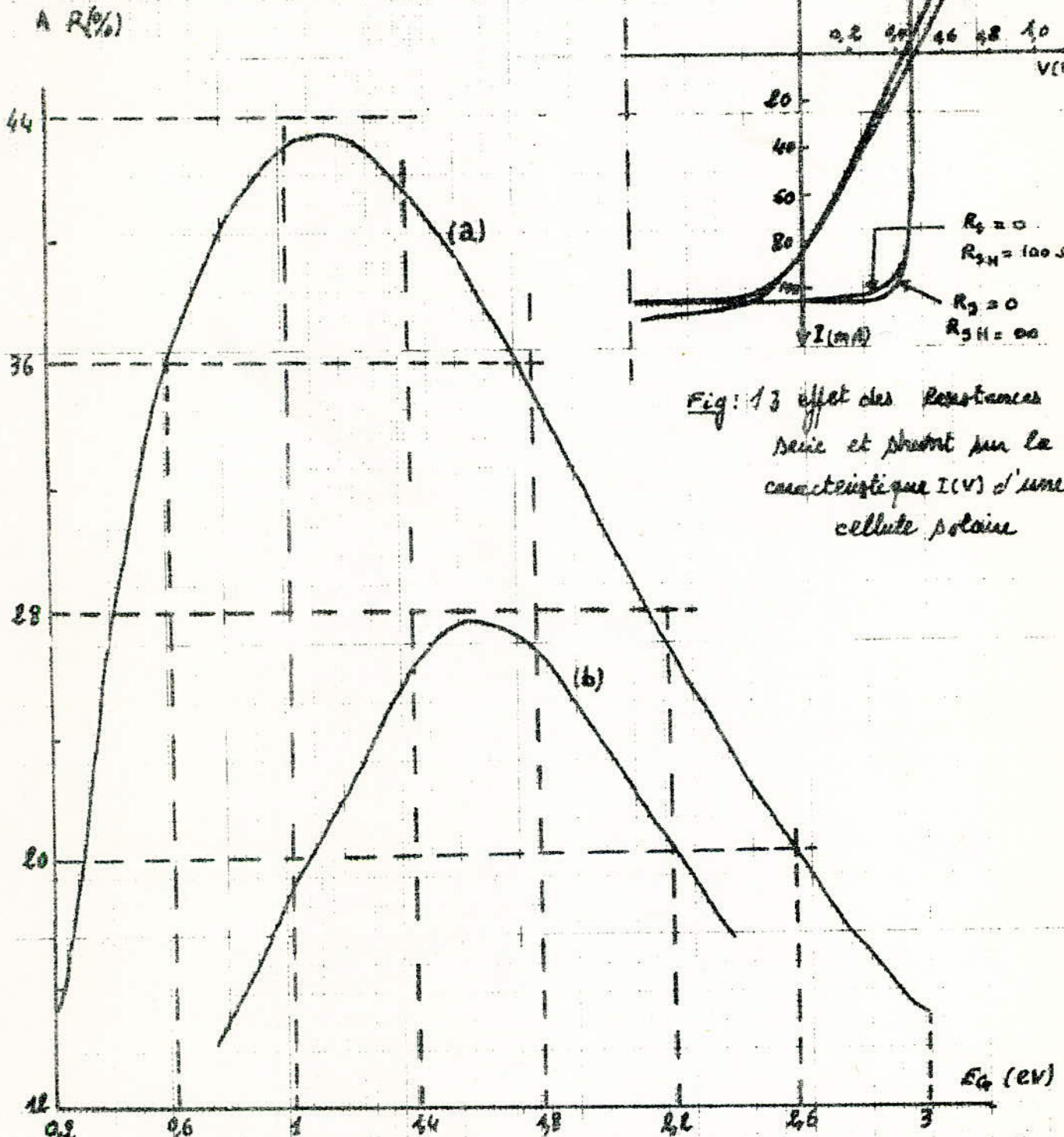


Fig: 13 effet des resistances serie et shunt sur la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire

Fig: 12 Rendement  $\eta$  en fonction du gap d'énergie  $E_g$

(a) Rendement limite  
 (b) Rendement théorique cas d'une jonction P-N





METHODE D'ANALYSE.

Après avoir présenté les généralités théoriques sur le rayonnement et son effet sur les cellules solaires, dans ce chapitre, nous étudierons l'ordre de grandeur de certains paramètres afin de pouvoir simplifier les relations (14) et (15) du chapitre (I). Aussi nous déterminons les différents paramètres, soit par calcul soit par méthode graphique.

Enfin, nous étudions l'influence de l'éclairement et la température <sup>de</sup> sur les caractéristiques des cellules.

I / - ORDRE DE GRANDEUR DE CERTAINS PARAMETRES.

- Résistance série et résistance schunt :  
 sur la fig. (13) :

On voit que lorsque la résistance schunt croît de la valeur 100 Ω jusqu'à l'infini, la caractéristique courant (I) tension (V) reste inchangée ; en revanche, lorsque la résistance série croît de 0 à 5 Ω, la caractéristique I (V) change complètement.

De là on tire l'importance de l'effet de la résistance série sur la caractéristique I (V). Sa valeur est de l'ordre de quelques centaines de milliohms, la valeur de la résistance schunt est de l'ordre de quelques dizaines de Mégaohms.

- Densité du courant de saturation ( $I_{0/S}$ ) : sa valeur varie pour chaque échantillon, il est en moyenne de quelques dizaines de nanoampère par cm<sup>2</sup> à la température ambiante.

- Facteur d'idéalité :

Dans le cas d'une jonction PN au silicium, il vaut 1 pour les faibles débits de courant et 2 pour les forts débits de courants.

2/ - SIMPLIFICATION ET FORMULE APPLIQUEE.

Comme la résistance schunt est très grande, le terme  $V/R_{SH}$  qui se trouve dans les relations (15) et (16) est négligeable ; et elles deviennent :

2.1 - A l'obscurité.

$$I_D = I_0 \left( \exp \left( q \frac{V - R_S I_D}{n K T} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

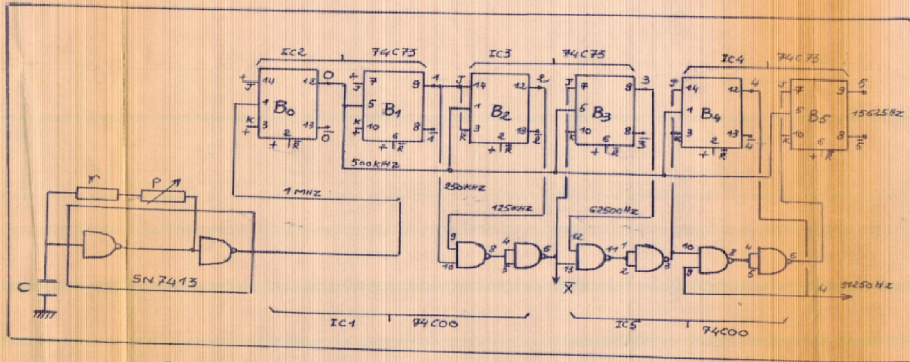
2.2 - Sous éclaircissement.

$$I = I_{SC} - I_0 \left( \exp q \left( \frac{V + R_S I}{n K T} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

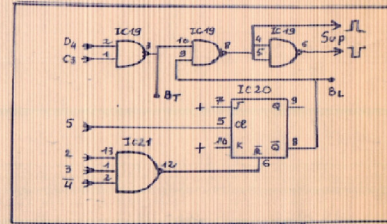
Ces deux relations (1) et (2) seront appliquées pour déterminer les différents paramètres et étudier l'influence de la température sur cer-



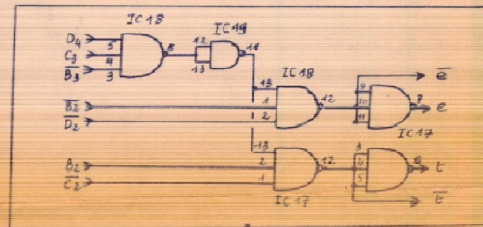
# GENERATEUR DE SIGNAUX DE SYNCHRONISATION



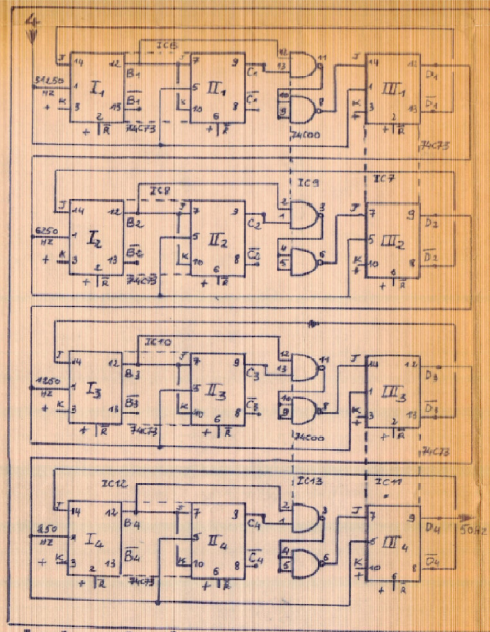
chaîne de diviseurs par 2



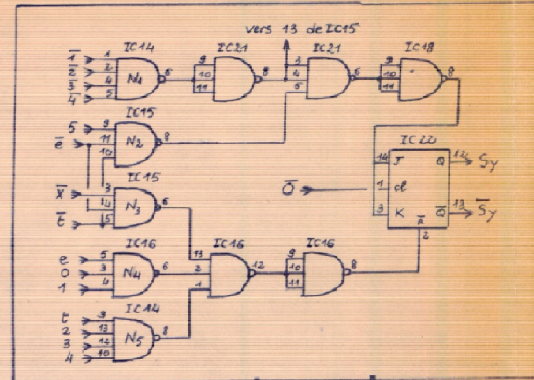
signaux de blanking



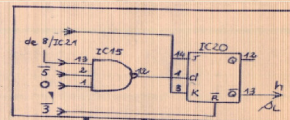
realisation de 'e' et 't'



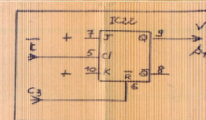
chaîne de diviseurs par 5



signaux de synchro



synchro ligne



synchro frame

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
البيروت  
Ecole Nationale Polytechnique  
BIBLIOTHEQUE

PROJET  
JUN 80  
DIV : 5  
CSTN

Restitution d'une image numérisée  
sur unité vidéo



tains paramètres comme la dérive en température  $n$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  etc....

### 3 / - DETERMINATION DES DIFFERENTS PARAMETRES.

#### 3.1 - A l'obscurité.

A l'obscurité et à température donnée, les plus importants paramètres des cellules solaires auxquelles on s'intéresse sont  $I_0$ ,  $n$ , et  $R_s$ .

Néanmoins il est très important de connaître la variation de la tension en fonction de la température, pour pouvoir utiliser une cellule comme thermomètre.

Les trois premiers paramètres peuvent être déterminés soit par le calcul à partir de la relation (1), soit de manière graphique en traçant  $\text{Log } I = f(v)$ .

Ces deux méthodes sont données en détail en annexe (1).

\* La méthode graphique nous donne :

$$n = \frac{\Delta V}{\frac{KT}{q} D (\text{Log } I)} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (4)$$

$I_0$  est déterminé directement sur le graphe (voir fig. 14)

\* La méthode de calcul nous donne :

$$n = \frac{V_2 - R_s I_2}{\frac{KT}{q} \text{Log} \left( \frac{I_2}{I_0} + 1 \right)} \quad (5)$$

$$R_s = \frac{\text{Log} \left( \frac{I_2}{I_0} + 1 \right) V_3 - \text{Log} \left( \frac{I_3}{I_0} + 1 \right) V_2}{\text{Log} \left( \frac{I_2}{I_0} + 1 \right) I_3 - \text{Log} \left( \frac{I_3}{I_0} + 1 \right) I_2} \quad (6)$$

$$\text{Log } I_0 = \frac{\alpha \text{Log } I_2 + \beta \text{Log } I_3 - \gamma \text{Log } I}{\alpha + \beta - \gamma} \quad (7)$$

$$\text{où : } \alpha = V_1 I_3 - V_3 I_1$$

$$\beta = V_2 I_1 - V_1 I_2$$

$$\gamma = V_2 I_3 - V_3 I_2$$

Par contre, la dérive en température est donné par l'expérience (voir chap. 3) ; théoriquement cette dérive est de l'ordre de  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{K}$

#### 3.2 - Sous éclaircissement.

A éclaircissement et température donnés, les importants paramètres des cellules solaires sont :

$$I_{sc}, V_{oc}, P_m, FF, R, n, R_s, I_0.$$



La plupart de ces paramètres peuvent être relevés directement sur des caractéristiques  $I(V)$  expérimentales.

Tel n'est pas le cas pour les trois derniers paramètres qui doivent alors être déduits par une méthode d'identification à partir de la formule (2). Ici nous donnons rien que les résultats, pour le calcul détaillé voir Annexe (1).

$$n = \frac{B_1 - B_2}{D_1 - D_2 + \text{Log}(A_1/A_2)} \quad (8)$$

$$\text{avec : } B_1 = \frac{V_1 + C I_1}{K T / q} \quad \text{et} \quad B_2 = \frac{V_2 + C I_2}{K T / q}$$

$$A_1 = I_{sc} - I_1 \quad \text{et} \quad A_2 = I_{sc} - I_2$$

$$D_1 = I_1 / I_{sc} \quad \text{et} \quad D_2 = \frac{I_2}{I_{sc}}$$

$$R_s = C - \frac{n K T / q}{I_{sc}} \quad (9)$$

$$I_0 = I_{sc} \exp \left( - \frac{V_{oc}}{n K T / q} \right) \quad (10)$$

#### 4 / - CALCUL D'ERREUR .

Le calcul d'erreur pour différents paramètres est donné en Annexe (2). L'ordre de grandeur sera donné dans le chapitre d'expérimentation.

#### 5 / - EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LES DIFFERENTS PARAMETRES.

Du point de vue théorique, l'effet de la température sur la caractéristique des cellules solaires est difficile à prévoir car de nombreux facteurs sont sensibles aux variations de température comme :

- bande interdite  $E_g$ , coefficient d'absorption, mobilité  $\mu_n$  et  $\mu_p$ , durée de vie  $\tau_n$  et  $\tau_p$  (où l'indice  $n$  et  $p$  sont relatif aux électrons et aux trous). La variations de certains paramètres tels que : les durées de vie  $\tau_n$  et  $\tau_p$  et surtout la vitesse de recombinaison restent encore difficile à déterminer. Nous avons donc considéré, pour notre étude, les variations des paramètres suivants :

##### 5.1 - Les mobilités varient suivant la loi [5]

$$\mu_n = \mu_{n0} \left( \frac{T}{300} \right)^{-2,5} \quad (11)$$

$$\mu_p = \mu_{p0} \left( \frac{T}{300} \right)^{-2,7} \quad (12).$$

D'après ces deux relations on voit que, lorsque la température augmente  $\mu_n$  et  $\mu_p$  diminuent à peu près de la même façon.

5.2 - g a p d'énergie du silicium en fonction de la température est : [5] .

$$E_g = (1,205 - 2,8 \cdot 10^{-4} T) \quad (13).$$

Cette relation montre que  $E_g$  décroît, lorsque la température augmente et la valeur à  $300^\circ \text{K}$  est :  $1,12 \text{ eV}$ .

5.3 - Densité d'états dans la bande de conduction et de valence en fonction de la température est : [7].

$$N_C = 2,720 \cdot 10^{19} T^{3/2} \quad (14)$$

$$N_{re} = 1,215 \cdot 10^{19} T^{3/2} \quad (15)$$

Lorsque  $T$  augmente,  $N_C$  et  $N_V$  augmentent également.

5.4 - Coefficient de diffusion des électrons et des trous.

$$D_n = \mu_n \left( \frac{KT}{q} \right) \quad (16)$$

$$D_p = \mu_p \left( \frac{KT}{q} \right) \quad (17)$$

Voyons ce qui se passe lorsque la température varie ; pour cela nous remplaçons  $\mu_n$  et  $\mu_p$  par leurs expressions.

$$D_n = \mu_{n0} \left( \frac{T}{300} \right)^{-5/2} \left( \frac{KT}{q} \right) = \mu_{n0} \left( \frac{K}{q} \right) (300)^{5/2} T^{-3/2}$$

de même on a :

$$D_p = \mu_{p0} \left( \frac{T}{300} \right)^{-2,7} \left( \frac{KT}{q} \right) = \mu_{p0} \left( \frac{K}{q} \right) (300)^{2,7} T^{-1,7}$$

et lorsque la température augmente,  $D_p$  et  $D_n$  diminuent.

Nous avons gardé les autres paramètres constants en fonction de la température ; leurs valeurs étant celles à  $300^\circ \text{K}$ .

Dans ces conditions en tenant compte de ces résultats on conclue que :

D'après la relation (9)  $L_n$  et  $L_p$  varient dans le même sens que  $D_n$  et  $D_p$ .

Et lorsque la température augmente  $L_n$  et  $L_p$  diminuent ce qui entraîne une diminution du rendement de collectage (d'après ref( [5] ), liée à une diminution du rendement de conversion.

5.5. - Courant de saturation  $I_0$ .

Nous pouvons déduire la variation de  $I_0$  en fonction de la température à travers les paramètres précédents ; par la relation suivante :

$$I_0 = q n_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (18)$$

tenant compte de la variation de  $n_i$  :  $D_n$ ,  $D_p$ ,  $L_n$  et  $L_p$  en fonction de la température, cette dernière relation devient :

$$I_0 = q C_1 \cdot \exp(-E_g/KT) \left\{ \frac{C_2}{N_A} + \frac{C_3}{N_D} \left( \frac{300}{T} \right) (0.1) \right\} \quad (28)$$

$$\text{avec } C_1 = 3,3 \cdot 10^{38}$$

$$C_2 = (\mu_{n0})^{1/2} (K/2)^{1/4} (1/300)^{-5/4} (1/\tau_n)^{1/2}$$

$$C_3 = (\mu_{p0})^{1/2} (K/2)^{1/4} (1/300)^{-5/4} \cdot (1/\tau_p)^{1/2}$$



$N_A$  et  $N_D$  sont considérées en première approximation comme des constantes.

Supposons maintenant que la température diminue ; alors la décroissance du terme  $\exp(-E_g/KT)$  est plus rapide que la croissance du terme  $\frac{1}{T(1/10)}$ . De la même manière, lorsque  $T$  augmente, le terme  $\exp(-E_g/KT)$  croît plus vite que le terme  $(1/T)^{1/10}$ . ne décroît.

On déduit que  $I_0$  varie dans le même sens que la température.

### 5.6. - Résistance série.

$$\text{Nous savons que } R_s = \frac{\rho \left[ \frac{l}{S} \right]}{S \text{ (cm}^2\text{)}} \quad (19)$$

$\rho$  = étant la résistivité

$l$  = longueur du matériau

$S$  = section

Voyons maintenant la variation de  $R_s$  en fonction de la température, pour cela étudions la variation de la résistivité en fonction de la température d'après la relation.

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

où  $\sigma$  représente la conductivité du semi-conducteur et sa loi de variation en fonction des paramètres physiques de la jonction P.-N est :

$$\sigma = q \left[ n \mu_n + p \mu_p \right] \quad (20)$$

Tenant compte de la variation de  $n$ ,  $\mu_n$ ,  $p$ ,  $\mu_p$  en fonction de la température la relation de  $\sigma$  prend la forme

$$\sigma = q \left\{ \left[ \frac{B_1}{T} \right] \exp \left( -\frac{E_C - E_F}{KT} \right) + \left[ \frac{B_2}{T^{(6/5)}} \right] \exp \left( -\frac{E_F - E_V}{KT} \right) \right\}$$

$$\text{avec } B_1 = \frac{2,720 \cdot 10^{19} \mu_{n0}}{(300)^{-5/2}} \quad \text{et } B_2 = \frac{1,215 \cdot 10^{19} \mu_{p0}}{(300)^{(2,7)}}$$

on constate que lorsque la température  $T$  se rapproche de zéro, alors  $\exp \left( -\frac{E_C - E_F}{KT} \right)$  tend vers zéro plus vite que  $\frac{1}{T}$  tendant vers l'infini de même  $\exp \left( -\frac{E_F - E_V}{KT} \right)$  tend vers zéro plus vite que  $\frac{1}{T^{(6/5)}}$  tendant vers l'infini. Donc on déduit, lorsque  $T$  tend vers zéro,  $\sigma$  s'annule par contre  $R_s$  devient infini.

Lorsque la température croît nous constatons qu'il y a un même effet pour la conductivité et un effet inverse pour  $R_s$ .

La connaissance de l'influence de la température sur ces paramètres primordiaux, nous facilite l'étude de l'effet de la température sur les caractéristiques de la cellule solaire.

### 5.7. - Effet de la température sur la caractéristique I (V) :

#### 5.7.1. - A l'obscurité.

##### 5.7.1.1. - Variation de la tension $V$ en fonction de la température.

A travers l'étude qui a été faite sur la variation de  $I_0$  et  $R_s$  en fonction de la température, nous pouvons en déduire d'après la relation (1) la variation de  $V$  en fonction de la température.

Pour cela, nous prendrons en considération  $I_D$  et  $n$  comme étant des variables indépendantes de la température. D'après (1) on a :

$$V = \frac{n K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_D + 1}{I_0} \right) + R_s I_D \quad (21)$$

Dans le deuxième membre de la relation (21),  $I_0$  est le facteur prédominant, en effet lorsque la température augmente,  $I_0$  augmente d'une façon exponentielle, par suite le rapport  $\frac{I_D}{I_0}$  chute brusquement, d'où  $\text{Log} \left( \frac{I_D + 1}{I_0} \right)$  diminue plus rapidement que  $\frac{n K T}{q}$  n'augmente ; et comme  $R_s$  baisse ; il en résulte que lorsque la température augmente,  $V$  diminue.

#### 5.7.1.2 - Variation du facteur d'idéalité en fonction de la température.

Prenons  $I_D$  comme variable indépendante de la température, de la relation (1) on a :

$$n = q \left( \frac{V - R_s I_D}{K T} \right) \cdot \frac{1}{\text{Log} \left( \frac{I_D + 1}{I_0} \right)} \quad (22)$$

Lorsque la température augmente, le même raisonnement que précédemment conduit à :  $\frac{1}{\text{Log} \left( \frac{I_D + 1}{I_0} \right)}$  croît plus rapidement que  $q \frac{(V - R_s I_0)}{K T}$

ne diminue ; ce qui fait que  $n$  augmente dans le même sens que la température.

#### 5.7.2. - Sous éclaircissement.

La cellule fonctionne comme un générateur ; et lorsqu'elle est en court-circuit, elle nous fournit un courant maximal  $I_{SC}$ , et quand elle est en circuit ouvert, elle nous donne une tension maximale  $VOC$ . Donc la connaissance du comportement de  $VOC$  et  $I_{SC}$  en fonction des paramètres éclaircissement et température, est importante.

##### 5.7.2.1. - Influence de la température sur $I_{SC}$ .

Le courant  $I_{SC}$  est fortement lié au nombre de photons incidents. Seuls les photons dont l'énergie  $h \nu / E_g$  participeront à la création d'une paire électron - trou.

$$U_r, \text{ on sait que : } \nu = \frac{c}{\lambda} \implies h \frac{c}{\lambda} \gg E_g$$

$$\text{soit encore : } \lambda \leq \frac{h c}{E_g} = \lambda_0 \quad (23)$$

En vertu de la relation (13),  $E_g$  est une fonction dépendante de la température. Il suffira de faire varier cette dernière pour avoir un  $\lambda_0$  variable, qui permet de faire varier le seuil de longueur d'onde  $\lambda_0$ .

Supposons que la température croît, alors  $E_g$  décroît et il en résulte que  $\lambda_0$  croît ; donc la courbe spectrale se déplacera vers l'infra-



rouge lointain, dans ces conditions tous les photons, dont la longueur d'onde  $\lambda$  est inférieur à  $\lambda_0$  participeront à la création d'une paire électron-trou et comme  $\lambda_0$  a augmenté, le nombre de photons qui participeront à ce travail augmentera. D'où une augmentation du courant  $I_{SC}$ .

5.7.2.2. - Influence de la température sur la tension en circuit ouvert V<sub>OC</sub>.

d'après l'équation (2) on a :

$$V = \frac{n k T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_{sc} + I_0 + I}{I_0} \right) - R_s I$$

en circuit ouvert on a :

$$I = 0 \implies V_{OC} = \frac{n K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_{sc} + I_0}{I_0} \right)$$

$$\text{et comme } \frac{I_{sc}}{I_0} \gg 1 \implies V_{OC} \approx \frac{n k T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (24)$$

puisque  $I_0$  augmente en exponentielle pour une température croissante, donc le rapport  $(I_{sc}/I_0)$  décroît fortement, ce qui entraîne une diminution du  $\text{Log} (I_{sc}/I_0)$  plus rapide qu'une augmentation de  $\frac{n K T}{q}$ . D'où une décroissance de  $V_{OC}$  pour une croissance de température.

5.7.2.3. - Influence de la température sur facteur d'idéalité.

d'après l'équation (24) on a :

$$n = \frac{V_{OC}}{\frac{k T}{q} \log \left( \frac{I_{sc}}{I_0} \right)}$$

comme toujours ; le facteur prédominant est  $I_0$  : donc le même raisonnement que précédemment conduit au résultat suivant :  
n varie dans le même sens que la température ; que ce soit à l'obscurité ou sous éclaircissement.

5.7.2.4. - Influence de la température sur la puissance maximale.

$$\begin{aligned} P_{max} &= V_m I_m \\ P_{max} &= V_m \left( I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_m - R_s I_m}{n K T / q} \right) - 1 \right] \right) \\ &= V_m (I_{sc} + I_0) - V_m I_0 \exp \left( \frac{V_m - R_s I_m}{n K T / q} \right) \end{aligned}$$

en circuit ouvert on a :

$$I_{sc} + I_0 = I_0 \exp \left( \frac{V_{oc}}{n K T / q} \right) \implies P_{max} = V_m I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{oc}}{n K T / q} \right) - \exp \left( \frac{V_m - R_s I_m}{n K T / q} \right) \right]$$

Lorsque la température croît, on voit bien que les 2 termes en exponentielle décroissent plus vite et l'emportent sur le produit  $V_m I_0$ , par suite  $P_{max}$  diminue.

5.7.2.5. - Influence de la température sur facteur de forme (F.F).

$$F.F = \left( \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \right)$$

soit  $F.F = \frac{V_m I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$  à une température  $T$ .

On sait que lorsque la température augmente, la tension diminue et le courant augmente.

Si on considère une température  $T + \Delta T$ , les tensions  $V_m$  et  $V_{oc}$  deviennent respectivement  $V_m - \Delta V_m$  et  $V_{oc} - \Delta V_{oc}$ , et les courants  $I_m$  et  $I_{sc}$  deviennent respectivement  $I_m + \Delta I_m$  et  $I_{sc} + \Delta I_{sc}$ .

$\Rightarrow$  le facteur de forme sera :

$$(F.F)' = \frac{(V_m - \Delta V_m) (I_m + \Delta I_m)}{(V_{oc} - \Delta V_{oc}) (I_{sc} + \Delta I_{sc})}$$

$$\text{posons : } V_{oc} = \xi_1 V_m \Rightarrow \Delta V_{oc} = \xi_1 \Delta V_m, \quad \xi_1 > 1$$

$$I_{sc} = \xi_2 I_m \Rightarrow \Delta I_{sc} = \xi_2 \Delta I_m, \quad \xi_2 > 1$$

$$(F.F) = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \left( \begin{array}{l} 1 - \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ 1 - \frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} 1 + \frac{\Delta I_m}{I_m} \\ 1 + \frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} \end{array} \right)$$

puisque  $\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} \ll 1$  et  $\frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} \ll 1$

$$\Rightarrow (F.F)' = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \left\{ \left( 1 - \frac{\Delta V_m}{V_m} \right) \left( 1 + \frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} \right) \left( 1 + \frac{\Delta I_m}{I_m} \right) \left( 1 - \frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} \right) \right\}$$

$$(F.F)' = F.F \left\{ \left( 1 - \frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} \right) \left( 1 + \frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} \right) \left( 1 + \frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} \right) \left( 1 - \frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} \right) \right\}$$

posons  $\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}} = \alpha_1 \ll 1$  et  $\frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}} = \alpha_2 \ll 1$

Il vient :

$$(F.F)' = (F.F) \left\{ (1 - \alpha_1) (1 + \alpha_1) (1 + \alpha_2) (1 - \alpha_2) \right\}$$

$$= (F.F) \left\{ (1 - \alpha_1^2) (1 - \alpha_2^2) \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1 - \alpha_1^2 < 1 \\ 1 - \alpha_2^2 < 1 \end{array} \right\} \Rightarrow (1 - \alpha_1^2) (1 - \alpha_2^2) < 1$$

$$\text{d'où } (F.F)' = F.F (1 - \alpha_1^2) (1 - \alpha_2^2) < F.F$$

$$\Rightarrow \boxed{(F.F)' < F.F}$$

donc le facteur de forme à une température  $T + \Delta T$  est inférieur au facteur de forme à une température  $T$ .

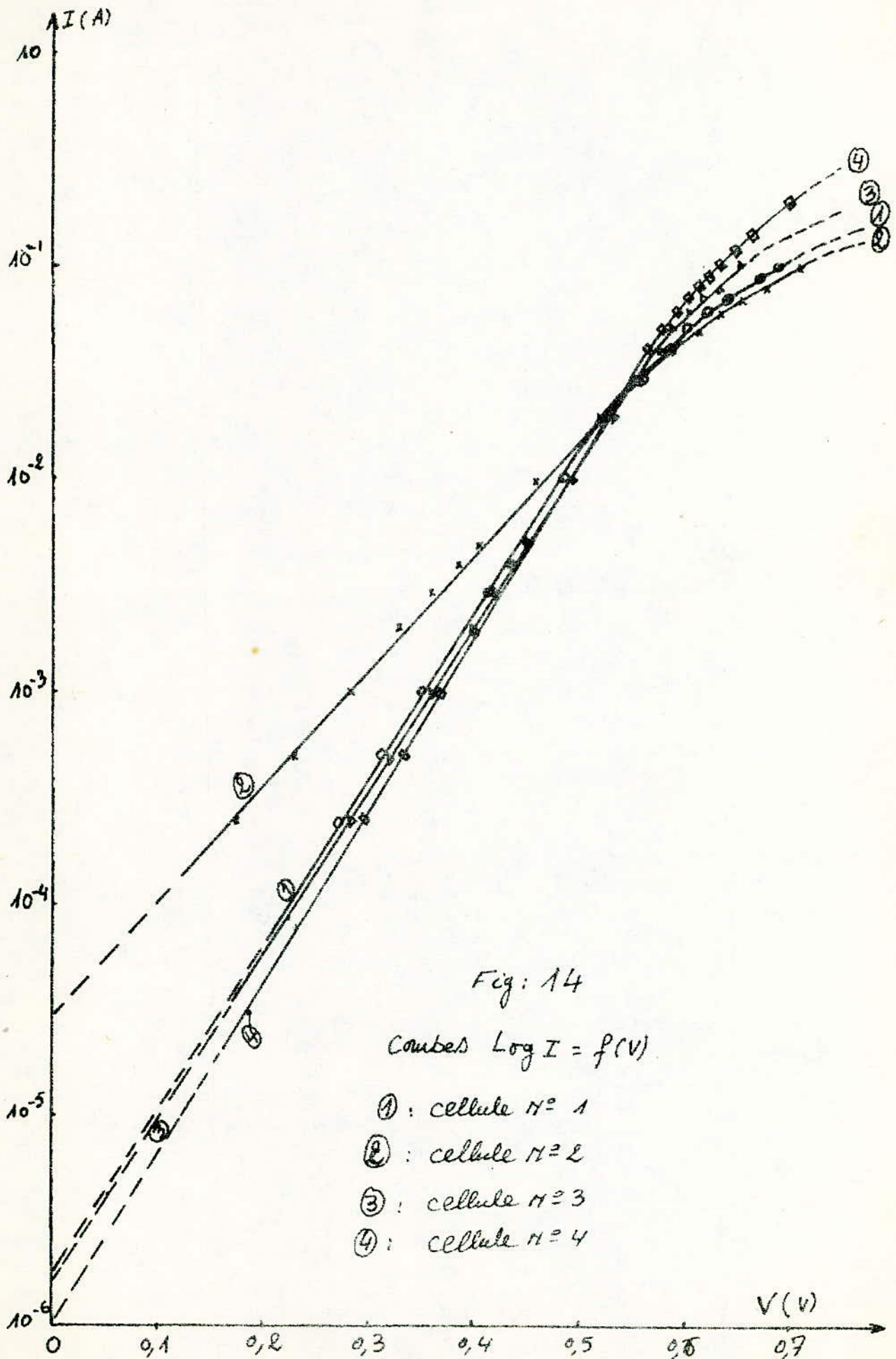
#### 5.7.2.6. - Influence de la température sur le Rendement $R$ .

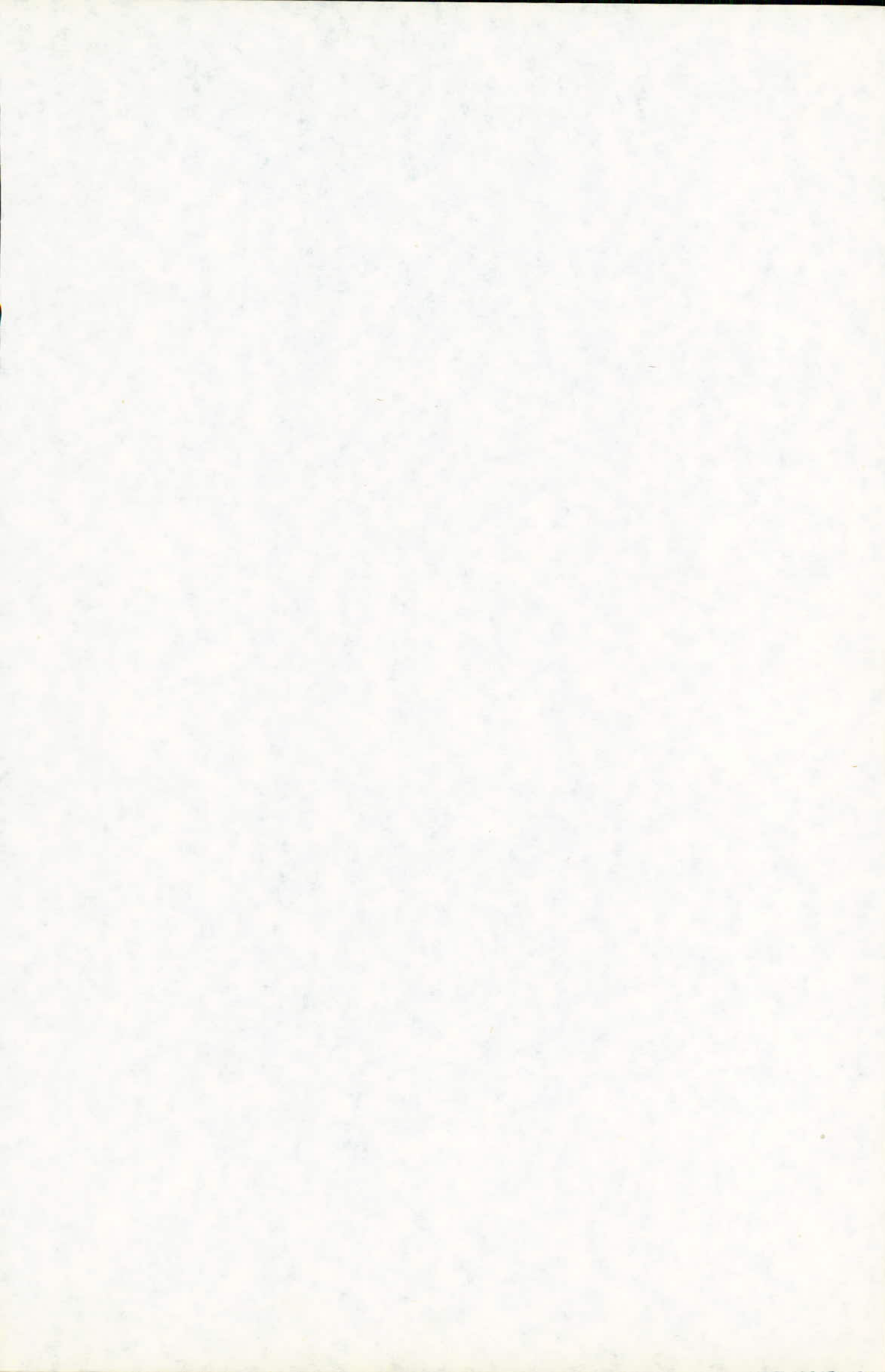
Le Rendement  $R$  d'une cellule est donné par la relation

$$R = \frac{P_{\max}}{P_{\text{incidente}}}$$

Comme on vient de le voir la puissance  $P_{\max}$  diminue avec la température, la puissance Incidente restant constante ce qui implique que le rendement diminue avec la température.









E T U D E    E X P E R I M E N T A L E

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats expérimentaux et leurs interprétations.

1/ - MANIPULATION.

Le but de la manipulation est de tracer les caractéristiques courant (I) - tension (V), afin de déterminer l'influence de l'éclairement et de la température sur les différents paramètres caractérisant les cellules solaires tels que :  $n$  ,  $R_s$  ,  $I_o$  ,  $I_{sc}$  ,  $V_{oc}$  .

1.1. - Description de la manipulation.

La première partie de la manipulation, consiste à faire varier l'éclairement de la cellule en maintenant sa température constante. En deuxième partie on maintient un éclairement constant et on fait varier la température de la cellule.

Le montage utilisé dans nos expériences est schématisé par la fig. (15).

La cellule est placée sur le thermochuck, à température contrôlée du type (TP 36). La détermination de la température de la cellule se fait par un thermocouple chromel-Alumel et un millivoltmètre du type AOIP.

L'éclairement de la cellule est fait par une lampe de 300 W. L'intensité d'éclairement est mesurée par une photodiode du type PIN - 10 DF dont la réponse spectrale est donnée à la figure (16).

L'utilisation d'un rhéostat nous permet d'avoir un éclairement de niveau réglable.

Le tracé de la caractéristique courant-tension à l'obscurité et sous éclairement, est fait par une table traçante du type (I F E L E C, M 100). Il nécessite de plus l'utilisation d'une double alimentation stabilisée réglable ; celle-ci est construite par nos soins, dont les schémas sont donnés en annexe 3.

2/ - CELLULES UTILISEES.

Les cellules utilisées dans nos manipulations sont des cellules au silicium de forme carrée de surface 400 mm<sup>2</sup>.

Généralement le contact ohmique sur la face arrière est obtenu sans aucune difficulté, cependant le contact avant appelé grille est difficile à réaliser. En effet cette grille est formée de 7 doigts disposés parallèlement et séparés entre eux par une distance de 3 mm.

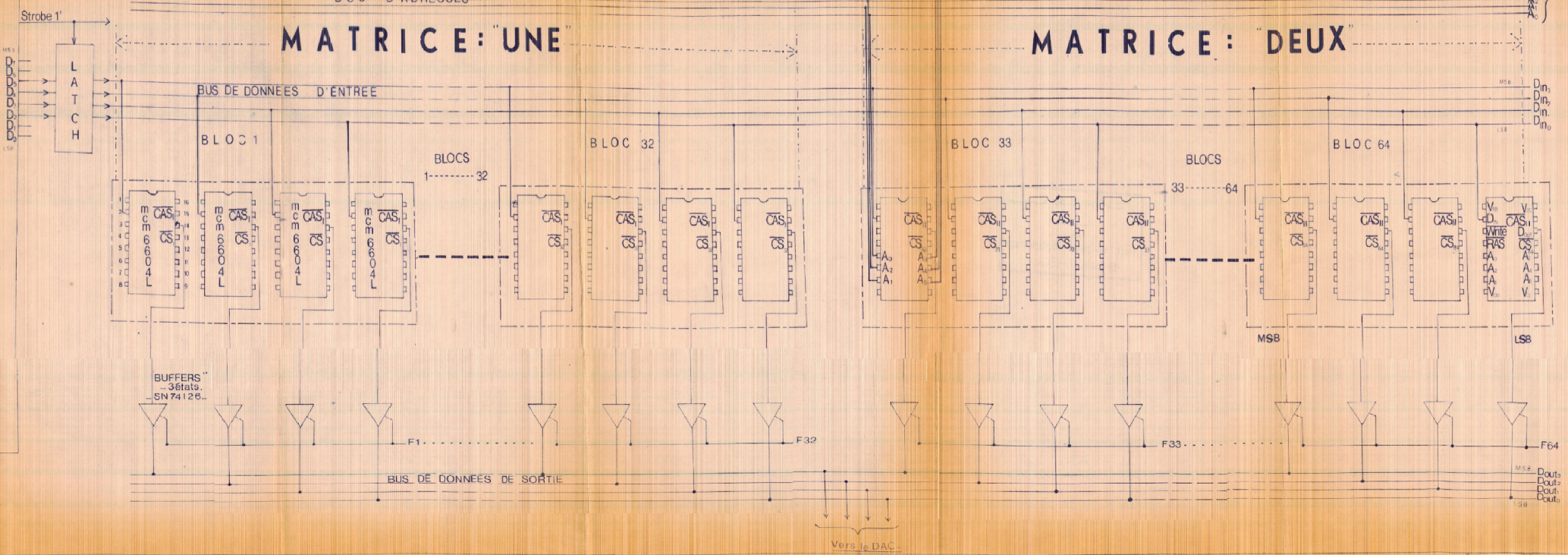
La surface de chacun est de l'ordre de 3 mm<sup>2</sup> à 4 mm<sup>2</sup>. Alors la grille n'oculte que 5 à 10 % de la surface active de la photopile ; afin qu'elle



# CARTE MEMOIRE

(capacité : 256 kmots de 4bits chacun).

ORDINATEUR





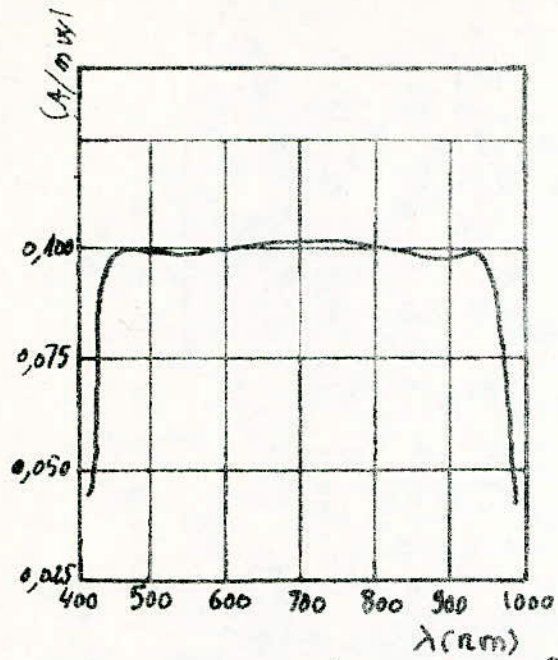


Fig: 16 Réponse spectrale de la photodiode  
PIH-100F

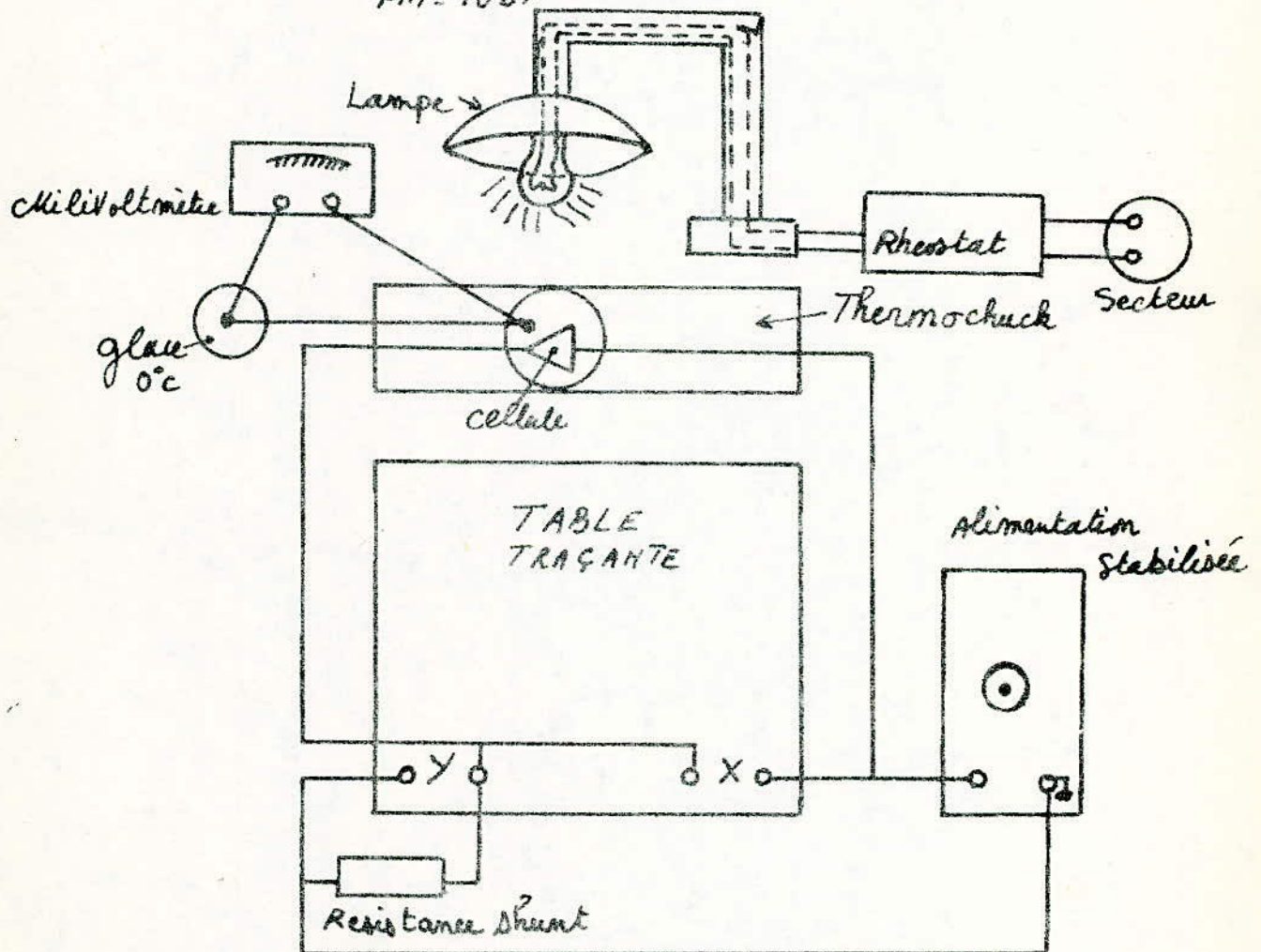


Fig: 15 Schema du montage utilisé

laisse passer un maximum de lumière en même temps qu'elle collecte le maximum de charges, d'où il en résulte une bonne conduction dans le matériau semi-conducteur. Pour la constitution d'une telle cellule (voir chapitre 1).

### 3/ - RESULTATS ET INTERPRETATIONS.

Généralement les propriétés des cellules solaires sont mesurées à une température voisine de l'ambiante.

Pendant leurs utilisations, elles sont exposées au rayonnement solaire dont 73 % de l'énergie est transformée en chaleur soit dans la cellule elle-même, soit dans son boîtier, une fraction de 12 % environ est réfléchie, une autre voisine de 15 % est transformée en énergie électrique. La partie transformée en chaleur chauffe la cellule. Il en résulte une augmentation de température provoquant une variation de la caractéristique  $I = f(V)$ .

#### 3.1. - Caractérisation des cellules solaires à la température ambiante.

Tout d'abord nous déterminons les différentes valeurs des paramètres à l'obscurité et sous éclaircissement. Ensuite, à partir des caractéristiques  $I = f(V)$  nous ferons un tri de cellules solaires. L'expérience faite sur 4 cellules nous donne les résultats suivants.

##### 3.1.1. - A l'obscurité.

A partir de la courbe  $I = f(V)$  tracée à 30 ° C nous avons déterminé par les deux méthodes (calcul et graphique) exposées en annexe (1) les différents paramètres  $n$ ,  $R_s$  et  $I_0$  dont les valeurs sont résumées au tableau (1). Nous remarquons que les valeurs de  $I_0$  et  $n$  obtenues par la méthode graphique sont voisines des résultats trouvés par la méthode de calcul. Cependant ; les valeurs de  $R_s$  diffèrent, car la mesure de  $R_s$  n'est pas faite à un courant relativement fort pour que celle-ci soit la seule composante prédominante. Notons également qu'une faible variation de  $R_s$  entraîne un décalage remarquable de la caractéristique  $I=f(V)$  comme le montrent les figures 17, 18, 19 et 20.

Les différents résultats comparés entre eux, montrent que les cellules n° 4 et 3 sont presque identiques et, plus performantes que les cellules n° 1 et 2. Ceci est observé à l'obscurité, nous allons examiner si ces résultats restent valables sous éclaircissement.

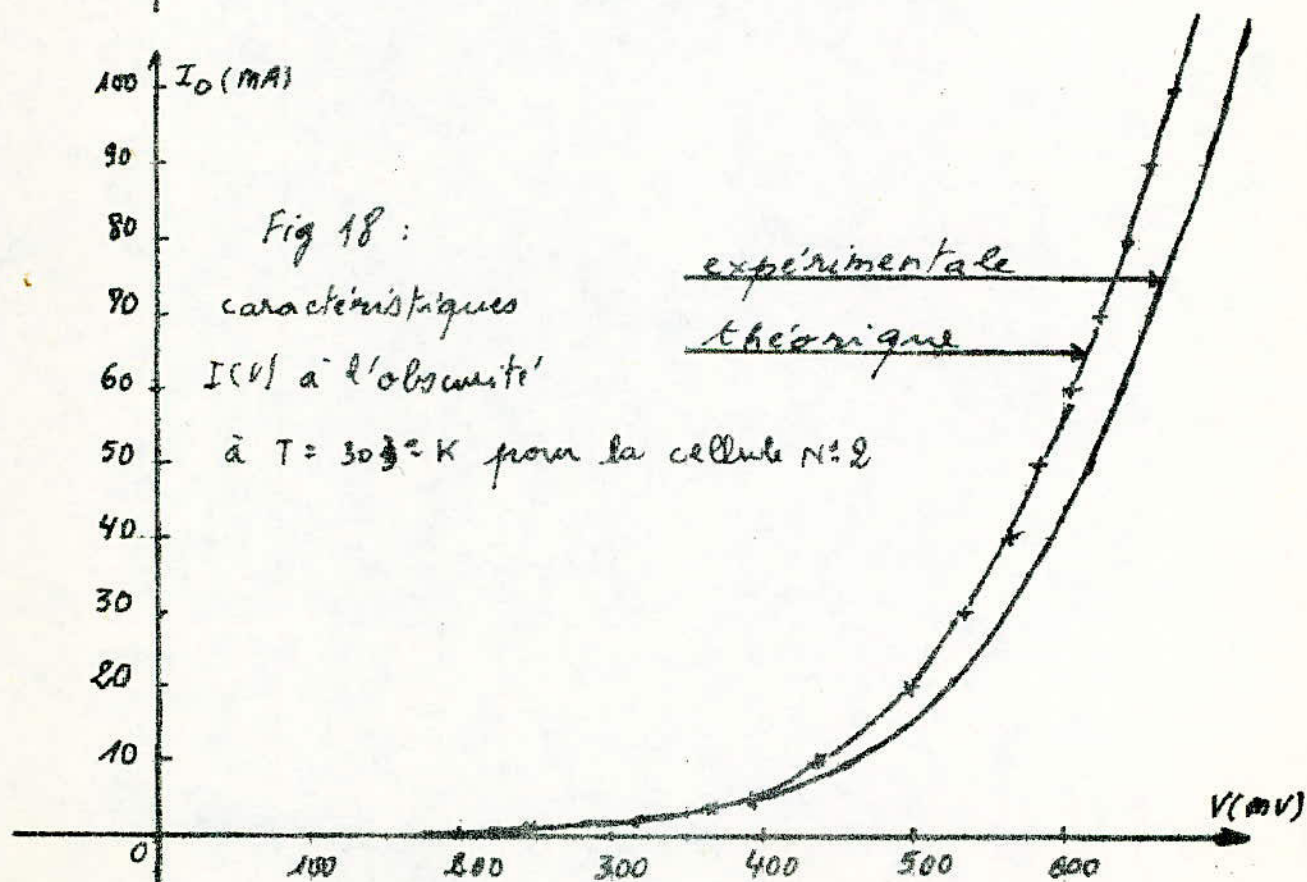
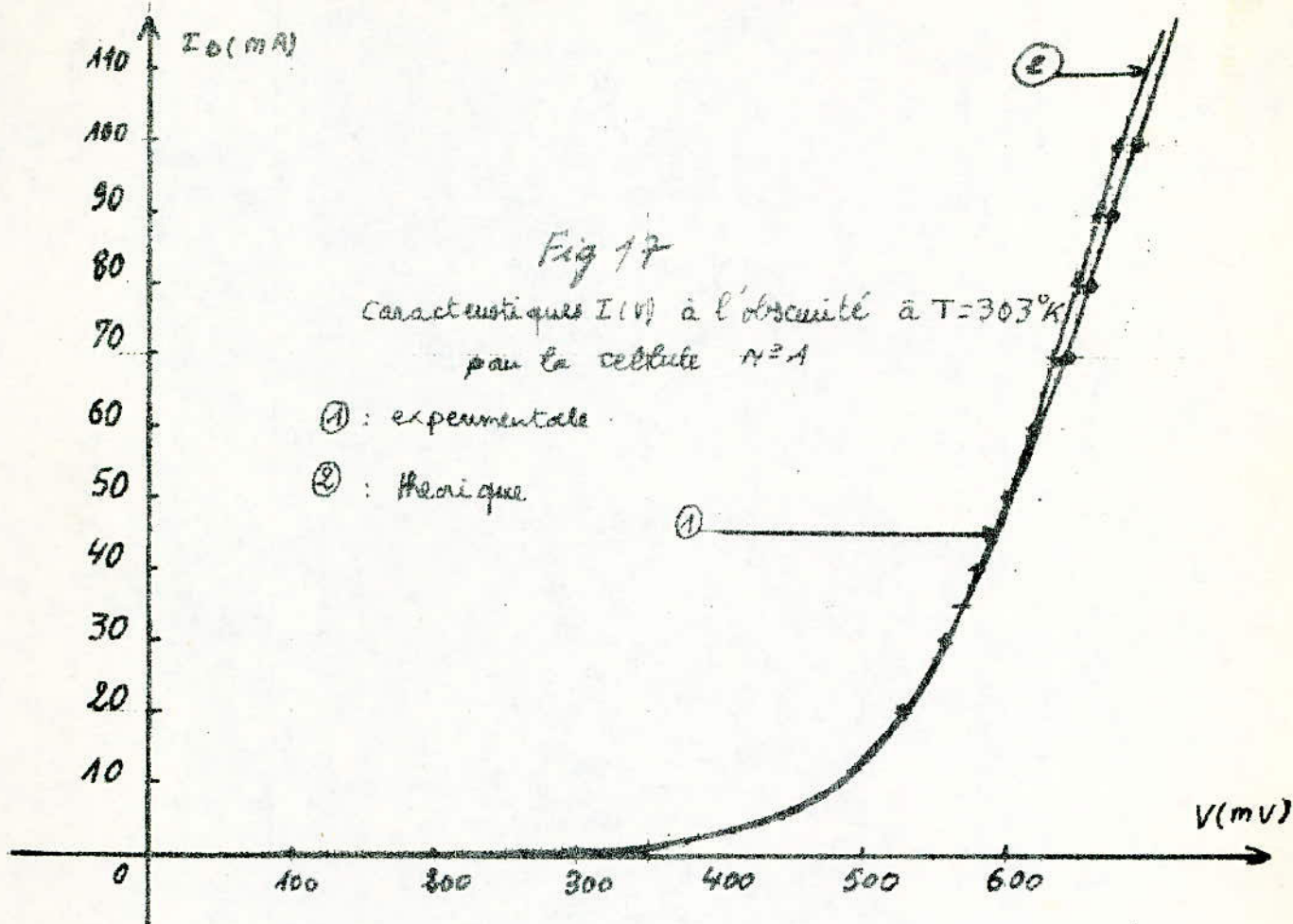
##### 3.1.2. - Sous-éclaircissement.

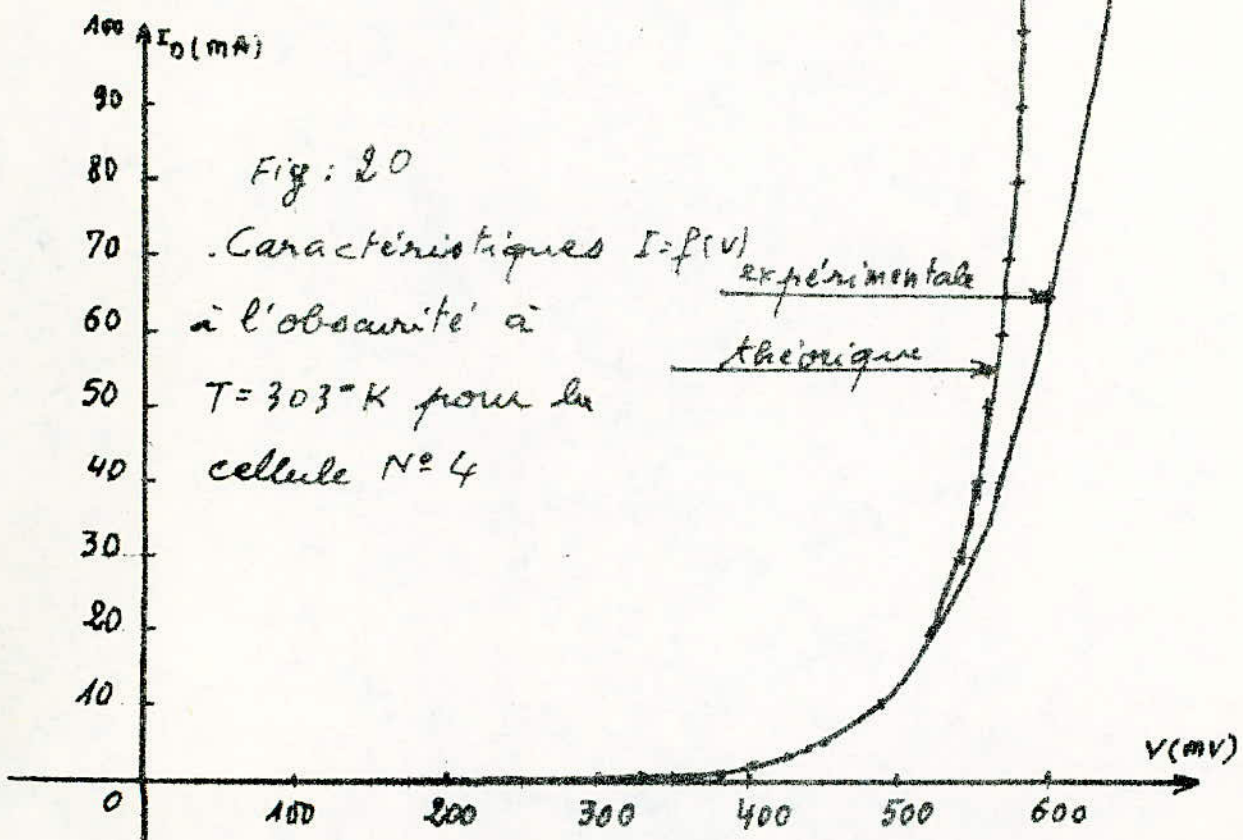
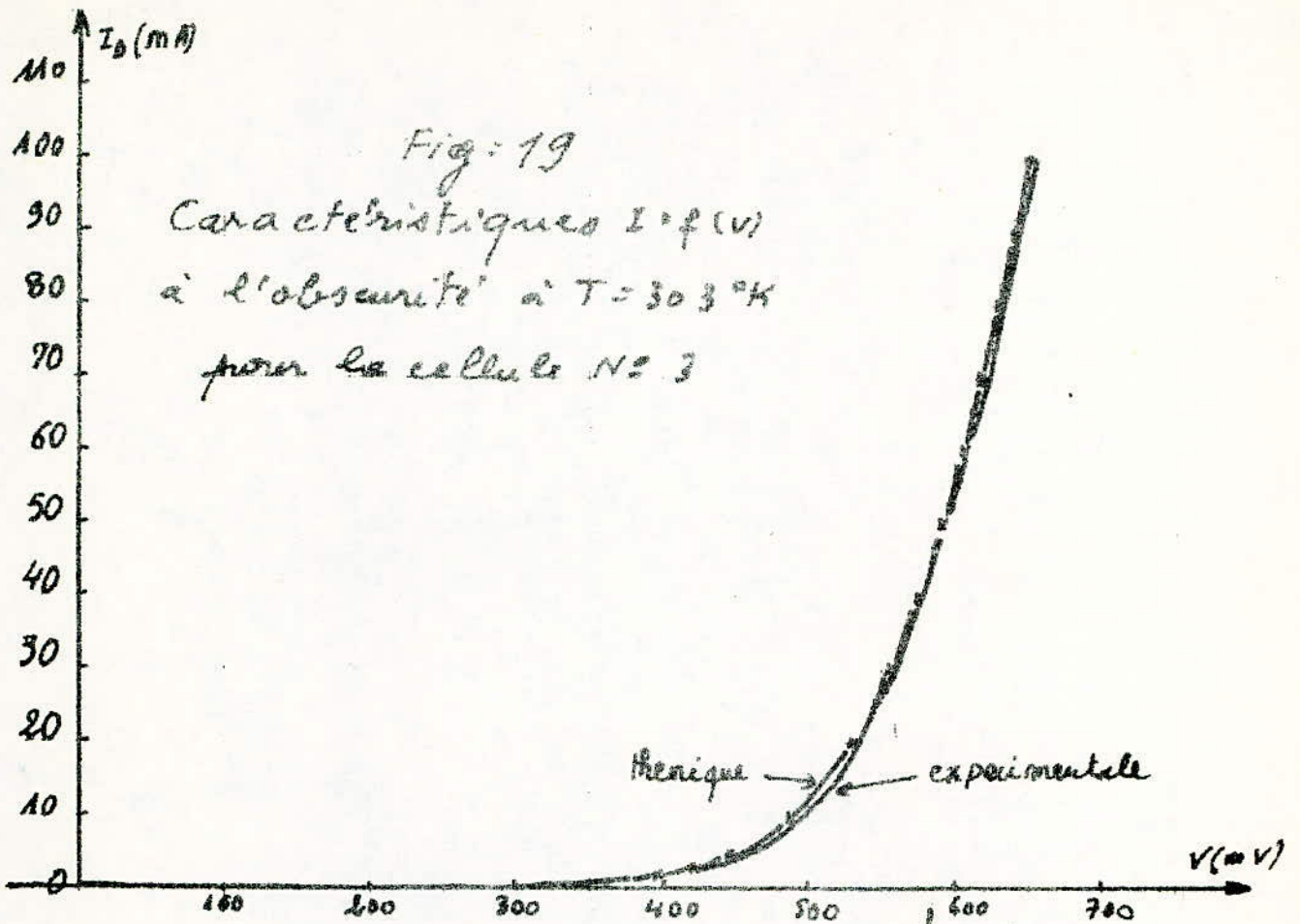
Les valeurs obtenues des différents paramètres sont consignées aux tableaux 4, 5, 6 et 7 relatifs aux cellules 1, 2, 3 et 4. Ces valeurs comparées à celles de l'obscurité montrent qu'il y a un grand décalage entre elles.

En effet, nous remarquons que sous éclaircissement  $I_0$  a augmenté d'une façon très remarquable, le facteur d'idéalité a progressé légèrement et  $R_s$  a diminué.

Ceci s'explique par le fait que sous éclaircissement, il y a un grand nombre d'électrons et de trous qui sont <sup>générés</sup> ~~générés~~, par conséquent il en résulte









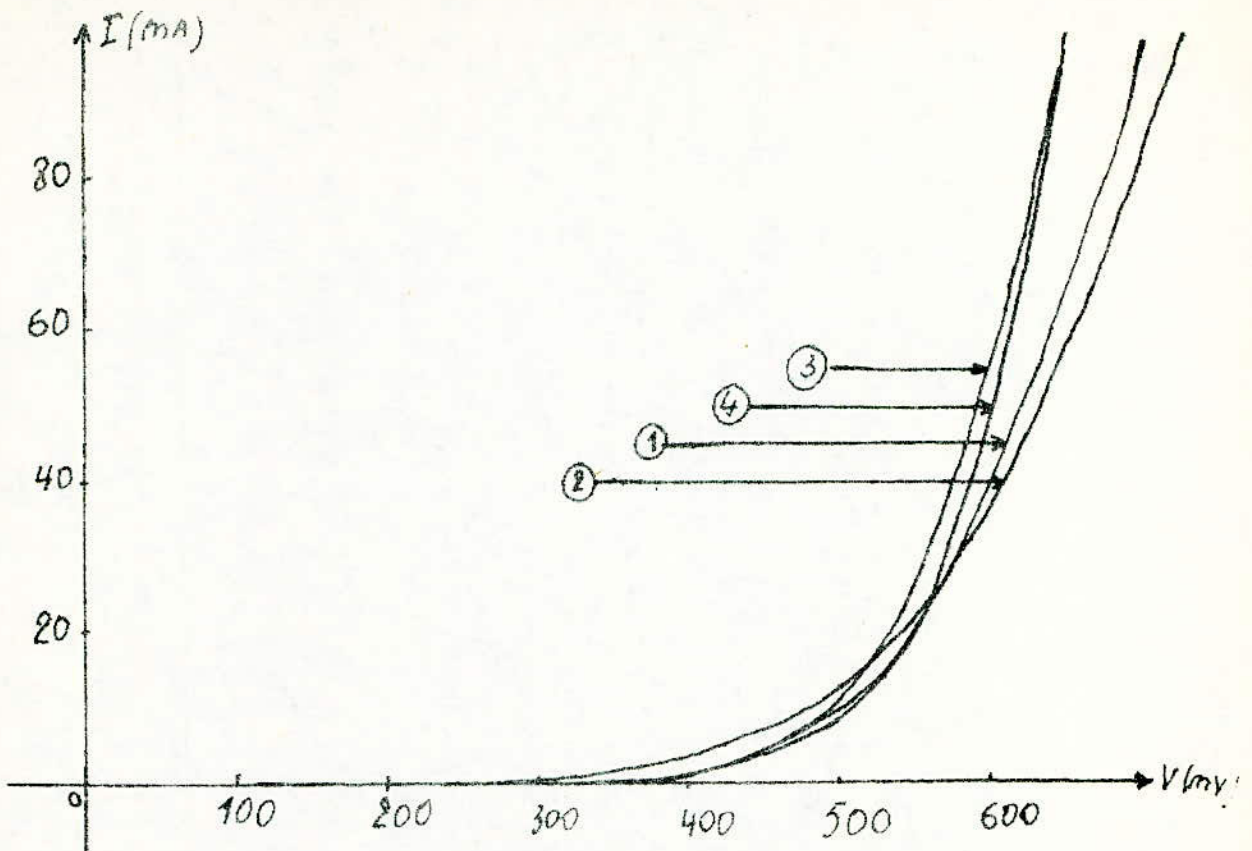
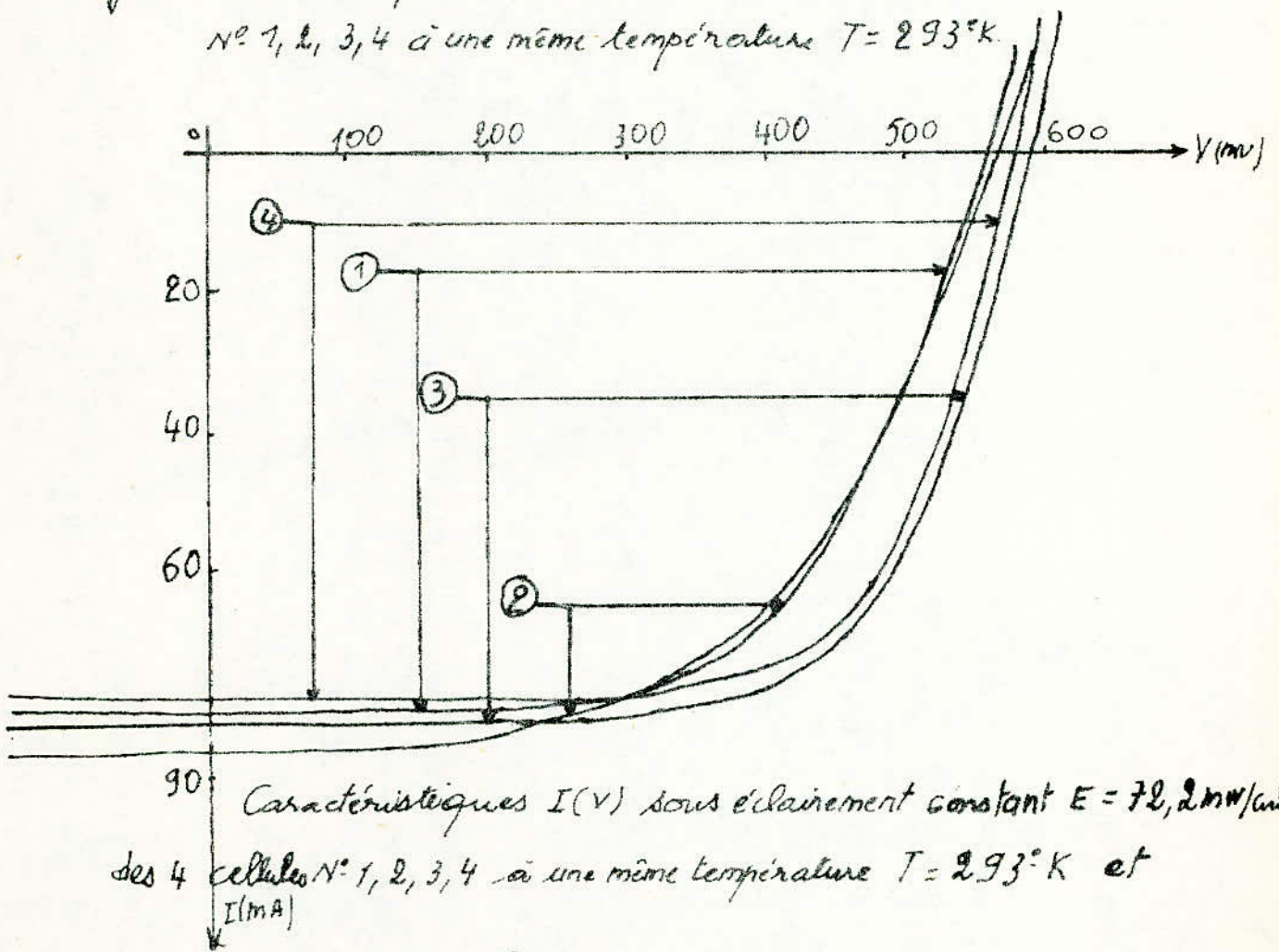


Fig 21 Caractéristiques  $I(V)$  à l'obscurité des 4 cellules N° 1, 2, 3, 4 à une même température  $T = 293^\circ\text{K}$ .



90  
Caractéristiques  $I(V)$  sous éclairement constant  $E = 72, 2 \text{ mW/cm}^2$  des 4 cellules N° 1, 2, 3, 4 à une même température  $T = 293^\circ\text{K}$  et

Fig 22

	cellule n=1		cellule n=2		cellule n=3		cellule n=4	
	valeur graphique	calculée	graphique	calculée	graphique	calculée	graphique	calculée
$\eta$	2,09	2	2,76	2,93	2,09	2,05	2,04	1,98
$R_s(\Omega)$	0,8	0,97	0,95	0,84	0,4	0,49	0,26	0,34
$I_0(\mu A)$	1,7	1,2	2,4	28,28	1,4	1,2	1	0,93

TABLEAU : 1

$E(\text{volts})$	9	20	35	55	80	100	120	140	168
$I_{sc}(\text{mA})$	10 $\pm 0,4$	22 $\pm 0,4$	39 $\pm 0,4$	60 $\pm 0,4$	85 $\pm 0,4$	115 $\pm 0,4$	146 $\pm 0,4$	185 $\pm 0,4$	220 $\pm 0,4$
$V_{oc}(\text{mV})$	430 $\pm 1$	485 $\pm 1$	510 $\pm 1$	525 $\pm 1$	535 $\pm 1$	540 $\pm 1$	545 $\pm 1$	552 $\pm 1$	560 $\pm 1$
$\eta$				1,94 $\pm 0,24$	1,63 $\pm 0,31$	1,5 $\pm 0,46$	1,41 $\pm 0,4$	1,28 $\pm 0,3$	1,18 $\pm 0,2$
$R_s(\Omega)$				1,26 $\pm 0,13$	1,32 $\pm 0,12$	1,34 $\pm 0,13$	1,36 $\pm 0,10$	1,41 $\pm 0,09$	1,45 $\pm 0,08$
$I_0(\mu A)$				1,9	0,36	0,15	0,07	0,016	0,004
$P_M(\text{mW})$	2,40 $\pm 0,13$	5,97 $\pm 0,5$	10,44 $\pm 0,7$	16,74 $\pm 0,9$	24,82 $\pm 0,21$	31,5 $\pm 0,22$	37,29 $\pm 0,24$	43,15 $\pm 0,26$	47,12 $\pm 0,27$
$R(\%)$	6,66 $\pm 0,36$	7,21 $\pm 0,19$	7,46 $\pm 0,12$	7,60 $\pm 0,09$	7,75 $\pm 0,07$	7,87 $\pm 0,06$	7,76 $\pm 0,05$	7,70 $\pm 0,05$	7,0 $\pm 0,04$
F.F				0,54	0,54	0,54	0,47	0,42	0,38

cellule n=1

TABLEAU : 2

$E(\text{volts})$	9	20	35	55	80	100	120	140	168
$I_{sc}(\text{mA})$	11 $\pm 0,4$	22 $\pm 0,4$	38 $\pm 0,4$	59 $\pm 0,4$	84 $\pm 0,4$	114 $\pm 0,4$	143,5 $\pm 0,4$	177 $\pm 0,4$	215 $\pm 0,4$
$V_{oc}(\text{mV})$	430 $\pm 1$	485 $\pm 1$	510 $\pm 1$	525 $\pm 1$	535 $\pm 1$	540 $\pm 1$	550 $\pm 1$	555 $\pm 1$	555 $\pm 1$
$\eta$				1,97 $\pm 0,22$	1,84 $\pm 0,47$	1,65 $\pm 0,54$	1,43 $\pm 0,38$	1,3 $\pm 0,3$	1,15 $\pm 0,2$
$R_s(\Omega)$				1,25 $\pm 0,12$	1,33 $\pm 0,17$	1,35 $\pm 0,15$	1,39 $\pm 0,09$	1,42 $\pm 0,08$	1,45 $\pm 0,12$
$I_0(\mu A)$				2,58	1,33	0,45	0,074	0,018	0,003
$P_M(\text{mW})$	2,55 $\pm 0,13$	5,95 $\pm 0,6$	10,67 $\pm 0,7$	17,05 $\pm 0,9$	25,0 $\pm 0,22$	31,6 $\pm 0,23$	37,4 $\pm 0,24$	43,22 $\pm 0,26$	46,05 $\pm 0,27$
$R(\%)$	7,08 $\pm 0,36$	7,43 $\pm 0,2$	7,62 $\pm 0,12$	7,73 $\pm 0,09$	7,81 $\pm 0,07$	7,9 $\pm 0,06$	7,8 $\pm 0,05$	7,72 $\pm 0,05$	6,85 $\pm 0,04$
F.F				0,55	0,55	0,55	0,47	0,44	0,38

cellule n=2

TABLEAU : 3



un courant de saturation plus grand que celui de l'obscurité, lié à une augmentation de facteur d'idéalité ; donc à une diminution de  $R_s$ .

Les valeurs de  $n$ ,  $R_s$  et  $I_0$  des 4 cellules considérées sous éclairage, montrent encore que les photopiles 3 et 4 sont les meilleures par rapport aux photopiles 1 et 2 comme le montrent les figures 21 et 22. Mais on ne peut pas conclure que les cellules n° 4 et 3 sont identiques entre elles, il en est de même pour les cellules n° 1 et 2. Pour cela, nous améliorons la sélection du tri en introduisant d'autres paramètres intéressants comme  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF et R.

Nous constatons que les cellules 4 et 3 ont presque les mêmes valeurs de  $V_{oc}$ , FF et R d'une part, d'autre part elles ont des courants de court-circuit différents. D'où on déduit que les 2 cellules considérées ne sont pas identiques. Notons aussi ; que les mêmes constatations ont été faites sur les 2 autres photopiles 1 et 2, d'où on conclue que les 4 cellules sont différentes. Donc il se posera un problème d'assemblage des cellules. Pour cela nous allons étudier l'effet de l'éclairage et de la température sur les caractéristiques des cellules solaires et sur l'association de ces dernières.

### 3.2. - Etude à différents éclairagements et température constante.

Dans cette deuxième partie ; en première étape nous étudierons l'effet de l'éclairage sur une cellule partiellement éclairée et sur l'association de 2 cellules en série et en parallèle dont l'une est en partie cachée et l'autre totalement éclairée.

En seconde étape, nous étudierons l'effet de l'éclairage sur les différents paramètres.

#### 3.2.1. - Eclairage partiel.

- Cellule partiellement éclairée.

La cellule partiellement éclairée est équivalente à deux parties :

. Une active fonctionnant comme un générateur et l'autre passive fonctionnant comme un récepteur

La figure 23 représente les caractéristiques  $I = f(V)$  de la cellule n° 3.

La première courbe représente la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule à moitié éclairée.

La deuxième courbe représente la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule au 3/4 éclairée.

La troisième courbe représente la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule entièrement éclairée.

Sur les trois courbes, nous constatons que la tension de circuit ouvert est presque la même dans trois cas ; par contre le courant  $I_{sc}$  varie d'une manière très sensible. Le courant  $I_{sc}$  (= 85 mA) débité par la cellule entièrement éclairée est presque le double de celui de la cel-



lule à moitié éclairée ( $I_{sc} = 46 \text{ mA}$ ). De ceci, on peut conclure que le courant  $I_{sc}$  est proportionnel à la surface de la cellule éclairée, la tension en circuit ouvert est indépendante de la surface de la cellule. A noter également que  $R_s$  a augmenté, par ailleurs le rendement a diminué, lorsque la cellule est partiellement éclairée.

### 3.2.2. - Association en série de deux cellules dont l'une est partiellement cachée.

Les caractéristiques  $I = f(V)$  d'une telles association sont indiquées par les figures 24 et 25. Sur ces courbes, nous constatons que le courant résultant est limité par le courant débité par la cellule partiellement cachée.

La différence existante entre les courants débités est dissipée par effet Joule dans la cellule débitant le plus faible courant, c'est-à-dire dans la cellule partiellement cachée, ce qui a pour effet de l'échauffer, élevant ainsi sa température d'où une diminution de la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ . Plus l'écart entre les courants débités est grand plus l'élévation de température est grande, plus la diminution de la tension  $V_{oc}$  est importante.

La dissipation sous forme de chaleur dans la cellule partiellement cachée, peut être mise en évidence en comparant les puissances maximums débitées par chaque cellule et la puissance maximale débitée par les cellules associées en série.

- 1er Cas : Une cellule aux 3/4 éclairée, l'autre entièrement éclairée

- $P_1 \text{ max.} = 20,52 \text{ mw}$
- $P_2 \text{ max.} = 25,46 \text{ mw}$

Théoriquement, la puissance max. totale débitée est donnée par la somme de puissances débitées par chaque cellule.

- $P \text{ théorique max.} = 45,98 \text{ mw}$

La puissance totale max. expérimentale est de  $= 42,75 \text{ mw}$ .

- 2ème Cas : Une cellule à moitié éclairée, l'autre entièrement éclairée.

- $P_1 \text{ max.} = 13,69 \text{ mw}$
- $P_2 \text{ max.} = 25,46 \text{ mw}$
- $P \text{ théorique max.} = 39,15 \text{ mw}$
- $P \text{ totale expérimentale} = 33,6 \text{ mw}$

On remarque, dans les deux cas, qu'il y a une différence entre la puissance max. théorique et la puissance max. expérimentale.

Cette différence est dissipée par effet Joule dans la cellule cachée.

Cette dissipation est de :

- 3,23 mw pour le 1er cas,
- 5,55 mw pour le 2ème cas.



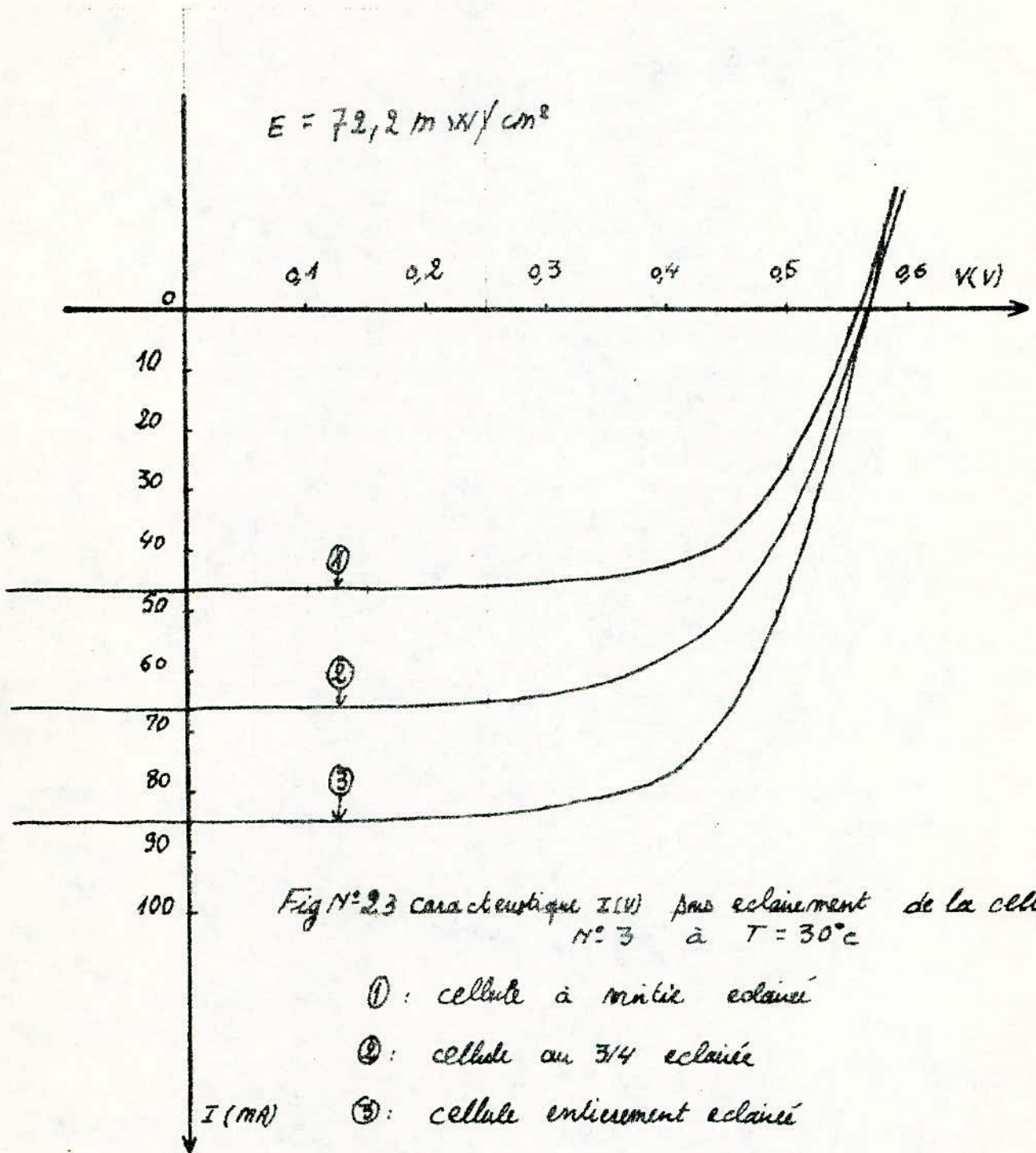
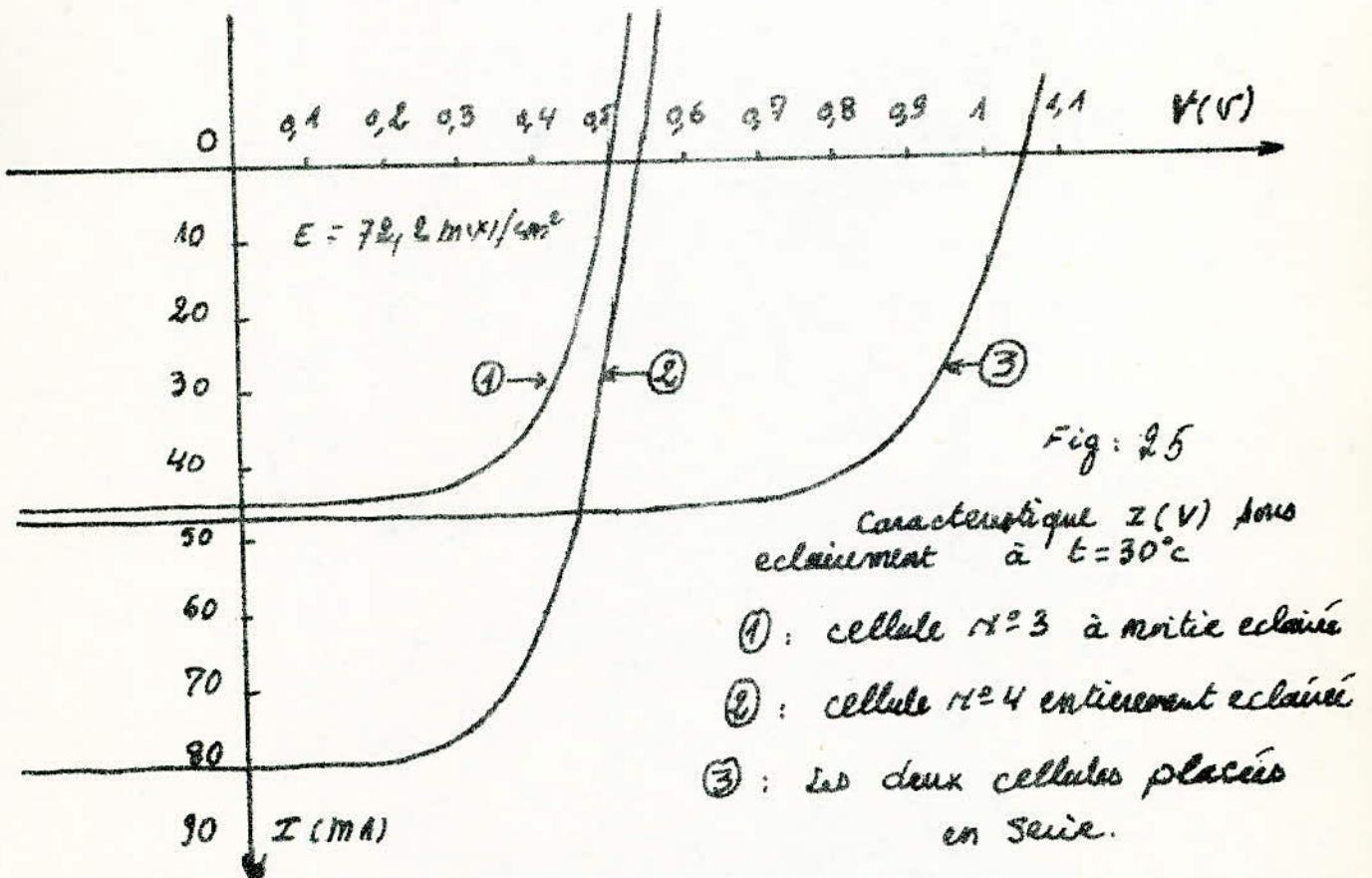
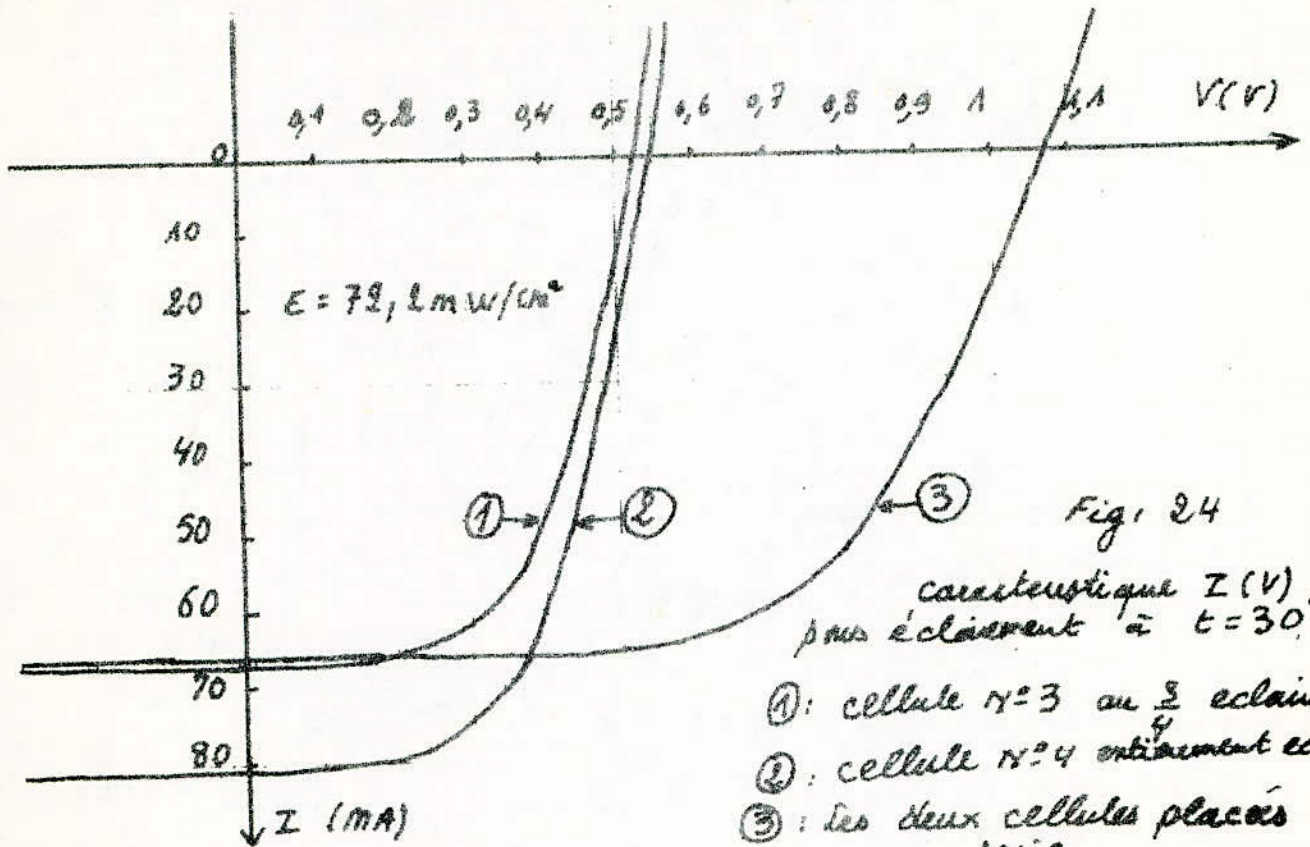
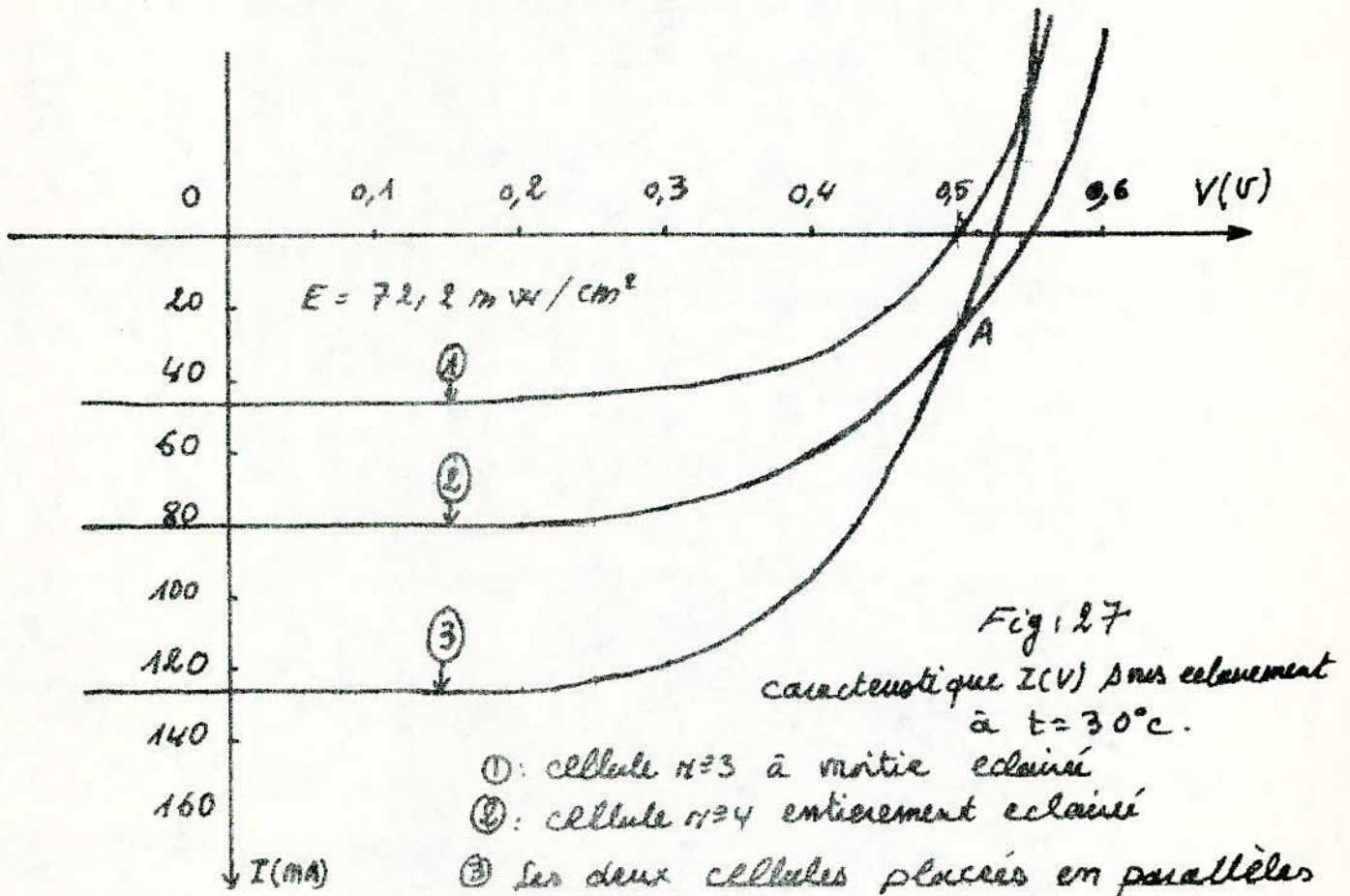
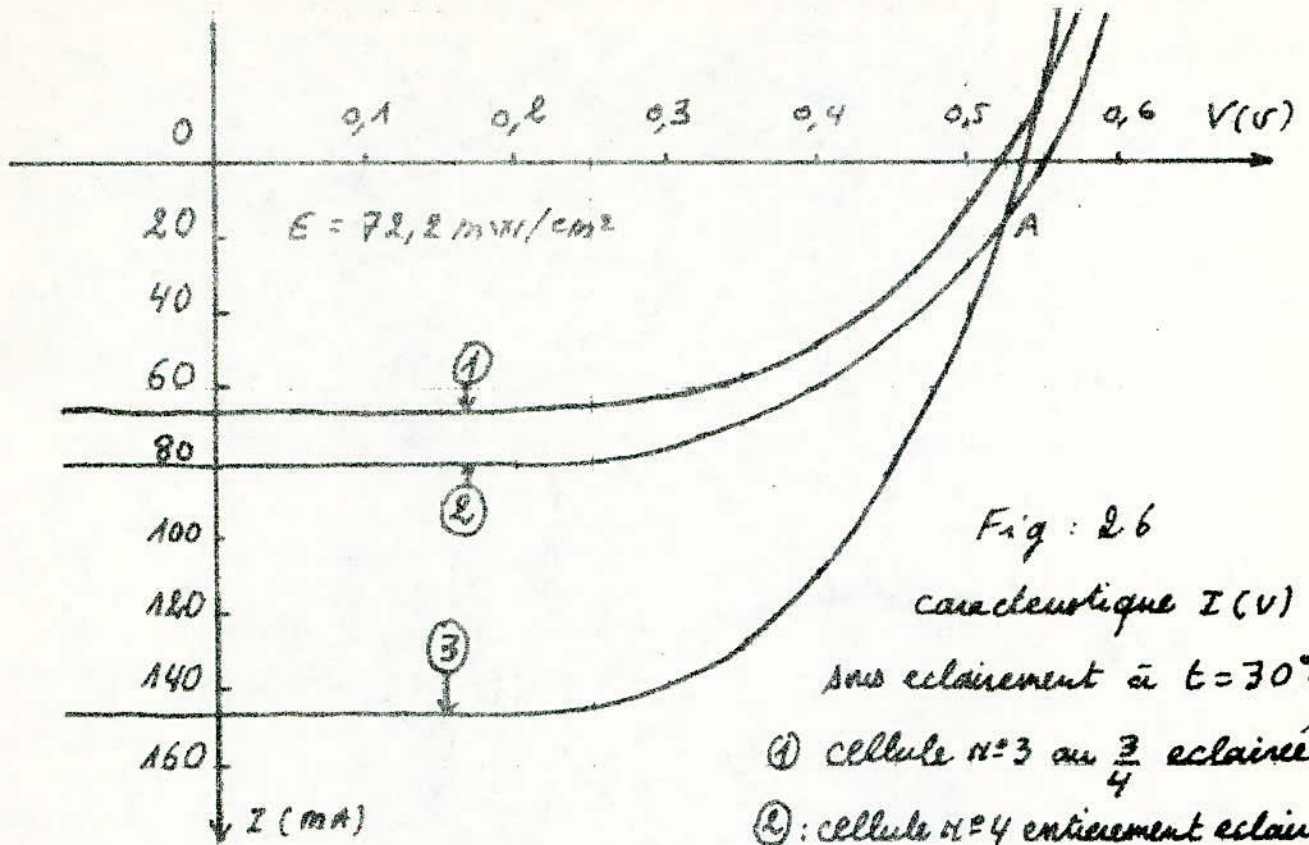


Fig N° 23 caractéristique I(V) sous éclairement de la cellule N° 3 à  $T = 30^\circ\text{C}$









On voit bien que la dissipation est plus grande quand la cellule est à moitié éclairée que dans le cas où elle est aux  $3/4$  éclairée.

### 3.2.3. - Association en parallèle de deux cellules dont l'une est partiellement cachée.

Les caractéristiques courant (I) - tension (V) d'une telle association sont données par les figures 26 et 27.

Sur ces caractéristiques, on constate qu'à partir du point "A" sur la caractéristique résultante, la cellule partiellement éclairée est réceptrice, par contre la cellule entièrement éclairée est génératrice ; de ce fait, cette dernière débite un courant inverse dans la première. Ce courant inverse a pour effet d'échauffer la cellule élevant ainsi sa température, qui provoque une diminution de la tension en circuit ouvert, qui à son tour provoque une augmentation du courant inverse traversant la cellule partiellement éclairée et ainsi de suite jusqu'à ce que le courant inverse sera proche de  $I_{sc}$  de la cellule éclairée. Par ailleurs, la cellule génératrice à un courant faible, la cellule réceptrice supporte ce courant qui n'a aucun effet néfaste sur la fiabilité de la cellule.

D'autre part, on constate que le courant inverse est plus grand dans le cas où la cellule est à moitié éclairée, que dans celui où elle est aux  $3/4$  éclairée. A cet effet, la puissance dissipée par effet Joule dans le premier cas est de l'ordre de 0,36 mw et dans le deuxième cas de l'ordre de 0,2 mw. Notons que dans les deux cas, la puissance dissipée dans la cellule partiellement éclairée est très inférieure par rapport à celle qui a été dissipée, lorsqu'elle était placée en série. D'où on conclue, qu'il est déconseillé de placer deux cellules en série lorsqu'elles ont un courant de court-circuit très différent, de même lorsqu'elles possèdent des tensions en circuit ouvert très différentes et on veut les mettre en parallèle.

### 3.3. - Effet de l'éclairement variable sur les différents paramètres.

Les caractéristiques courant (I) , tension (V) à différents éclairagements pour deux cellules sont schématisées aux figures 28 et 29. Les différents paramètres à éclairément variable sont résumé dans les tableaux 2 et 3 relatifs aux cellules (1) et (2).

La variation de  $I_{sc}$  en fonction de l'éclairement est schématisée à la figure 31. Nous observons que  $I_{sc}$  croit d'une façon très remarquable surtout pour les éclairagements intenses ; par exemple pour la cellule n° 1  $I_{sc}$  varie entre 10 et 220 mA pour un éclairément variable entre 9 mw/cm<sup>2</sup> et 168 mw/cm<sup>2</sup>. Cette augmentation est facile à expliquer, car plus l'éclairément augmente, plus le nombre de photons absorbés croît, lié à une augmentation de génération de porteurs, d'où il en résulte que  $I_{sc}$  augmente considérablement lié à une légère augmentation de  $V_{oc}$  comme le montre la fig. 30, ( $V_{oc} = 430$  mV pour  $E = 9$  mw/cm<sup>2</sup> et  $V_{oc} = 560$  mV pour  $E = 168$  mw/cm<sup>2</sup>). Il en résulte un parfait accord avec la théorie, car d'après



l'expression suivante :

$$V_{oc} = \frac{n K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$

On voit bien que pour  $n$  et  $I_0$  constants, lorsque  $I_{sc}$  devient très grand,  $V_{oc}$  tend vers une valeur stable.

Supposons maintenant que notre cellule soit éclairée par la lumière du soleil (qui correspond à un éclairement de  $100 \text{ mw/cm}^2$ ), alors la variation de  $V_{oc}$  est faible même pour une variation remarquable de l'éclairement.

Ainsi, pour une variation journalière de 30% de l'éclairement, ceci provoque une variation de 1,3 à 1,8 % de  $V_{oc}$  comme le montre la fig. 30, d'où la possibilité d'utilisation des photopiles comme thermomètre de précision. Cette idée sera détaillée dans les prochains paragraphes.

Nous remarquons aussi, que  $R_s$  croît dans le même sens que l'éclairement comme le montre la fig. 33. Aux éclairements intenses, cette résistance devient très grande (de l'ordre de  $1,45 \Omega$ ), ce qui est encore visible sur les caractéristiques  $I(V)$  des fig. 28 et 29. Car à forte concentration, la résistance de la grille de collectage devient très grande. Pour remédier à ce phénomène nuisible, on est obligé de prendre une grille plus épaisse. On remarque aussi, que le courant de saturation baisse comme le montre les tableaux 2 et 3, et cela lorsque l'éclairage augmente. Cette diminution de  $I_0$  est due à ce que la longueur de diffusion des électrons et des trous croît dans le même sens que l'éclairement.

Notons également, que le facteur d'idéalité décroît d'une façon hyperbolique quand l'éclairement augmente. En effet si on suppose que  $n$  décroît linéairement, alors il doit exister un éclairement pour lequel  $n$  est nul.

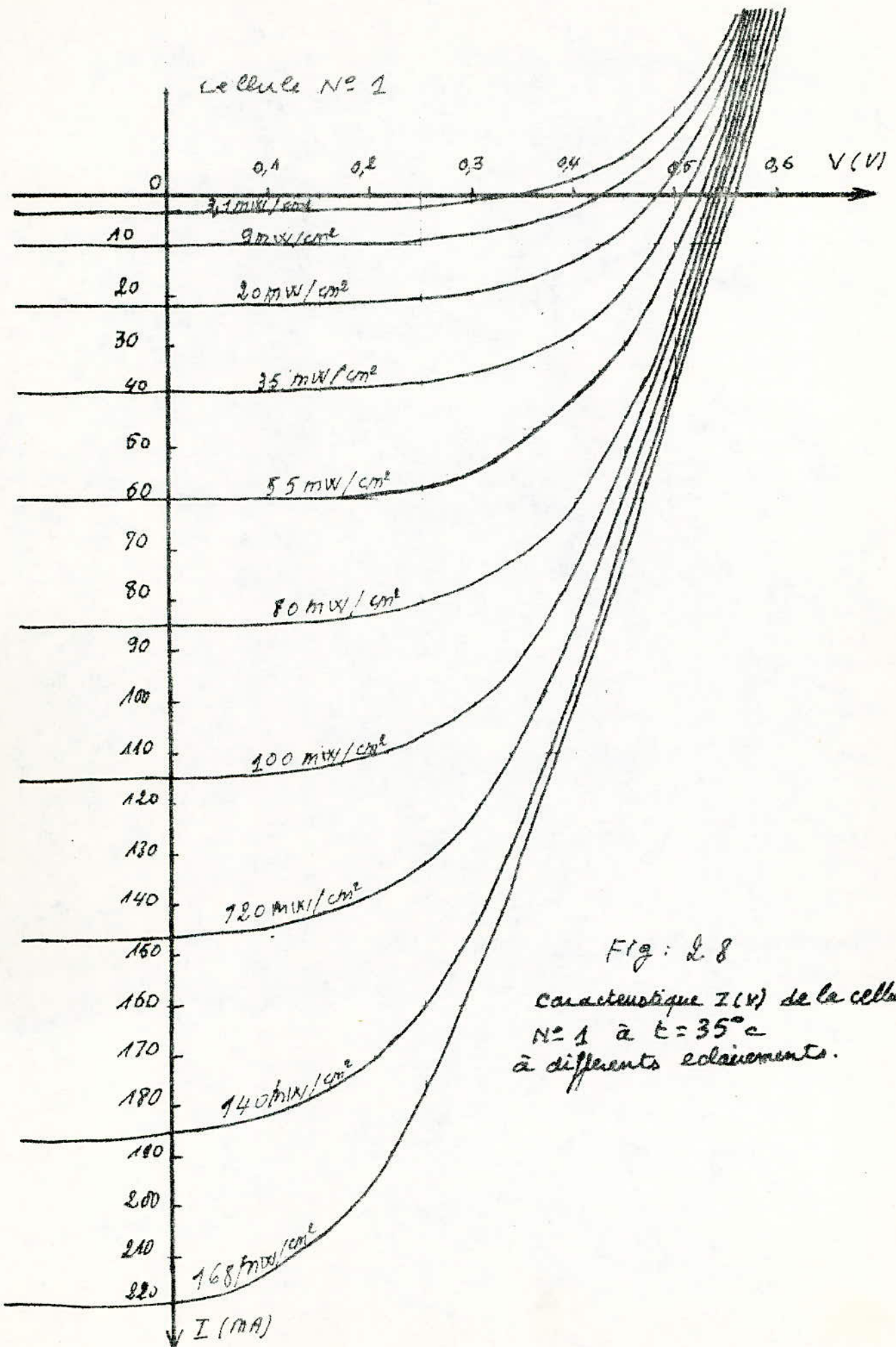
Comme  $n$  n'est jamais inférieur à 1 (dans le cas idéal il vaut 1), alors on a une contradiction, il en découle que, lorsque l'éclairement augmente  $n$  se rapproche du cas idéal, et les courbes prennent l'allure indiquée sur la fig. 32.

Enfin, nous remarquons un fait intéressant au niveau du rendement. Lorsque l'éclairement croît, la puissance maximale croît, comme le montre la fig. 34. Le rendement passe par un maximum pour un éclairement voisin de l'éclairement du soleil AM1, sa valeur pour la cellule n° 1 est de 7,87 %.

L'explication de cela est : lorsque l'éclairement augmente, le courant de saturation  $I_0$  diminue, d'où le rendement croît.

Mais lorsque l'éclairement dépasse la valeur  $100 \text{ mw/cm}^2$ , la résistance série devient prépondérante, d'où il en résulte une diminution du rendement  $R$ . (par exemple pour la cellule n° 1  $R = 7\%$  pour  $E = 168 \text{ mw/cm}^2$ ).

Si nous comparons les courbes de certains paramètres des deux cellules considérées, nous remarquons qu'il n'y a pas de décalage significatif entre eux, lorsque l'éclairement augmente. Cela est visible, surtout sur les





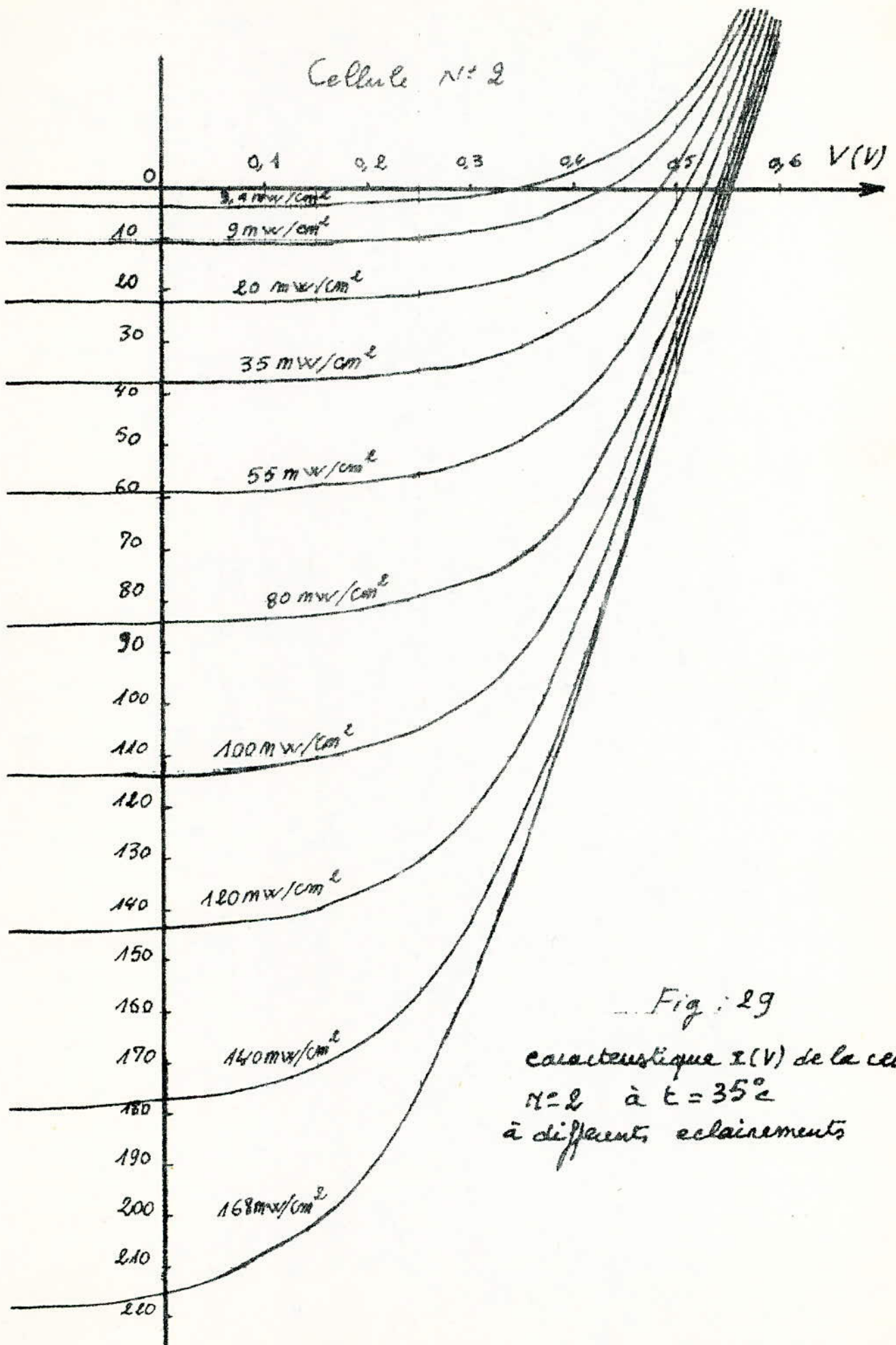


Fig: 29

caractéristique  $I(V)$  de la cellule  
N° 2 à  $t = 35^\circ\text{C}$   
à différents éclairagements

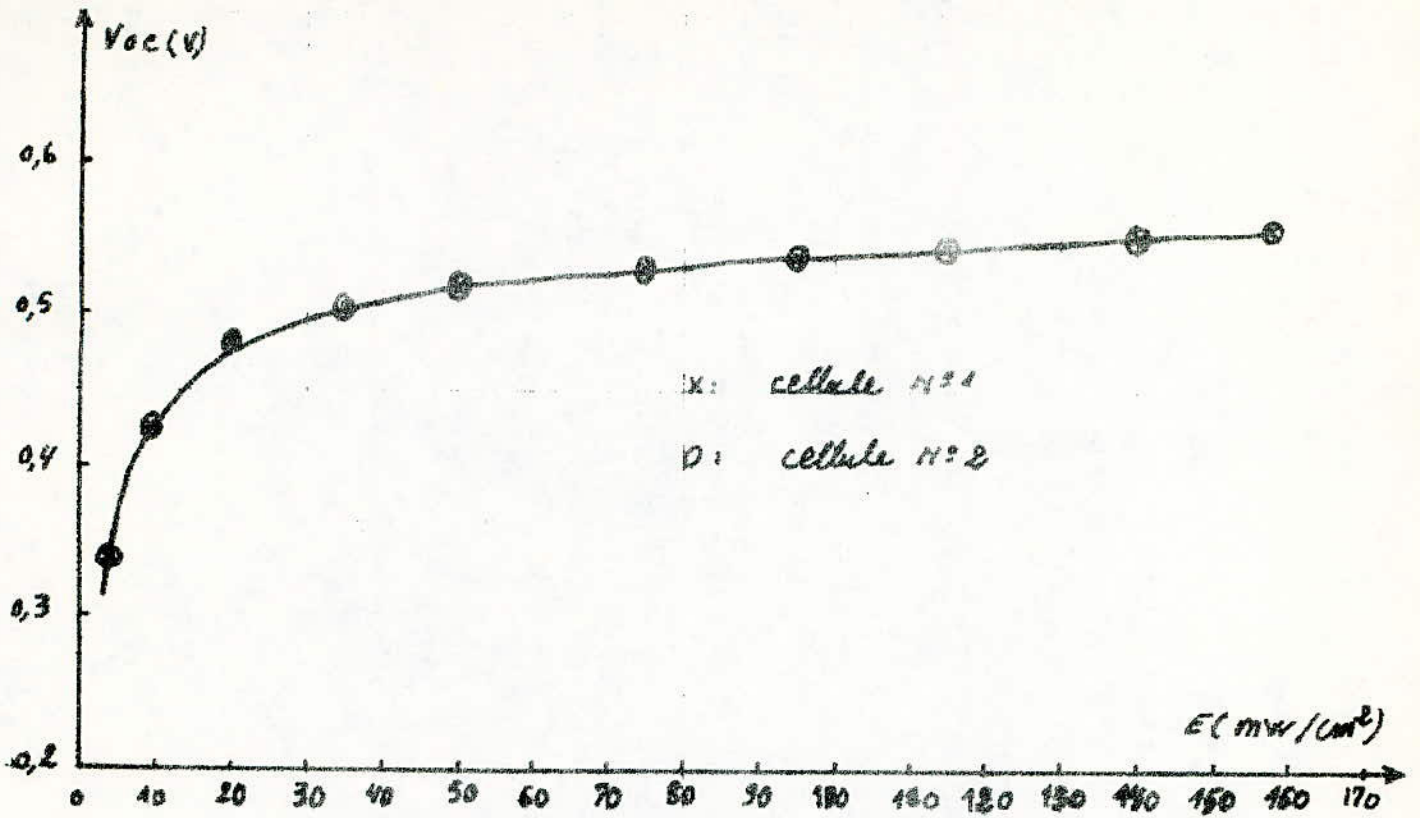


Fig: 30 variation de  $V_{oc}$  en fonction de l'éclairement à  $t = 35^\circ C$

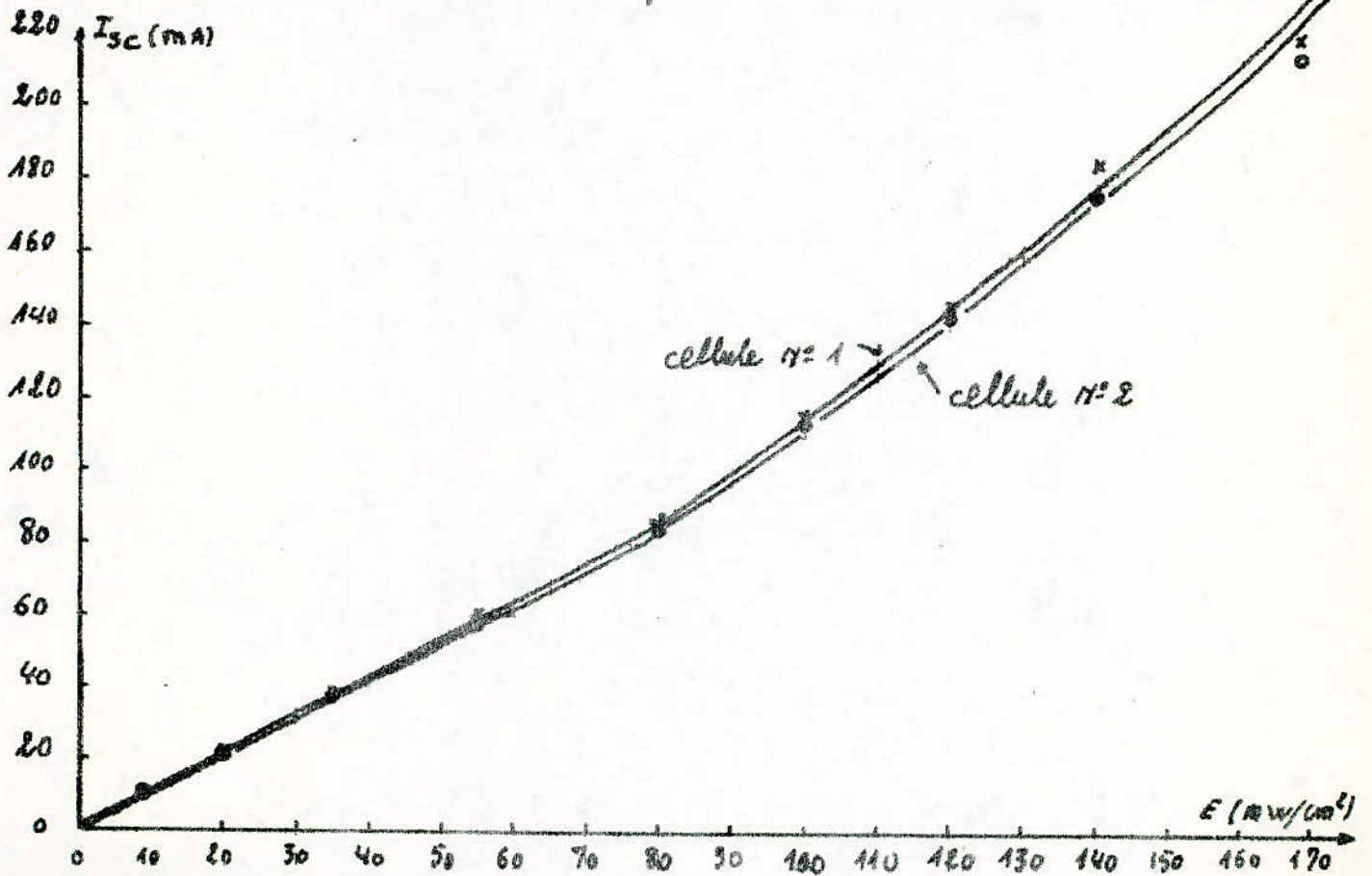
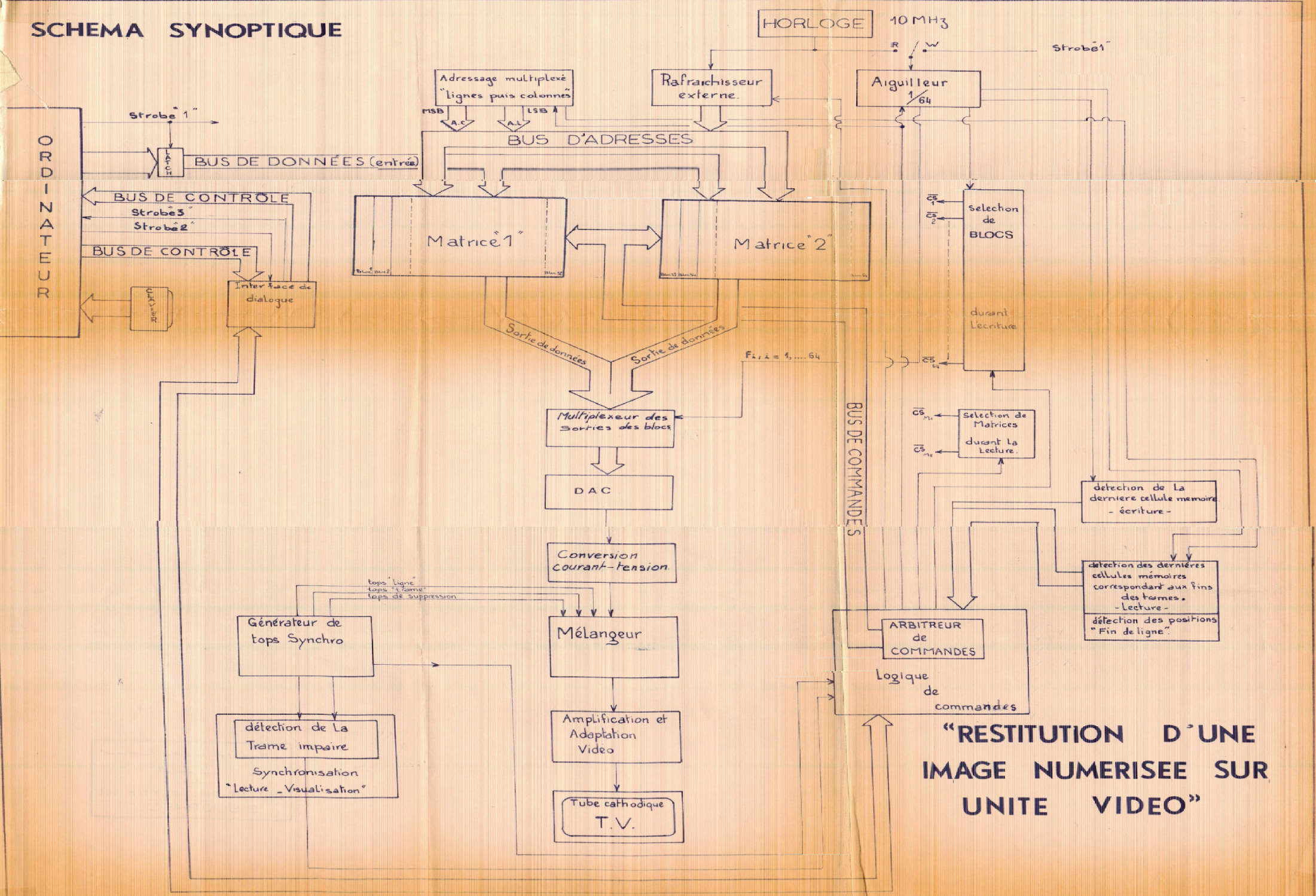


Fig: 31 variation du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement à  $t = 35^\circ C$



# SCHEMA SYNOPTIQUE



**"RESTITUTION D'UNE  
IMAGE NUMERISEE SUR  
UNITE VIDEO"**



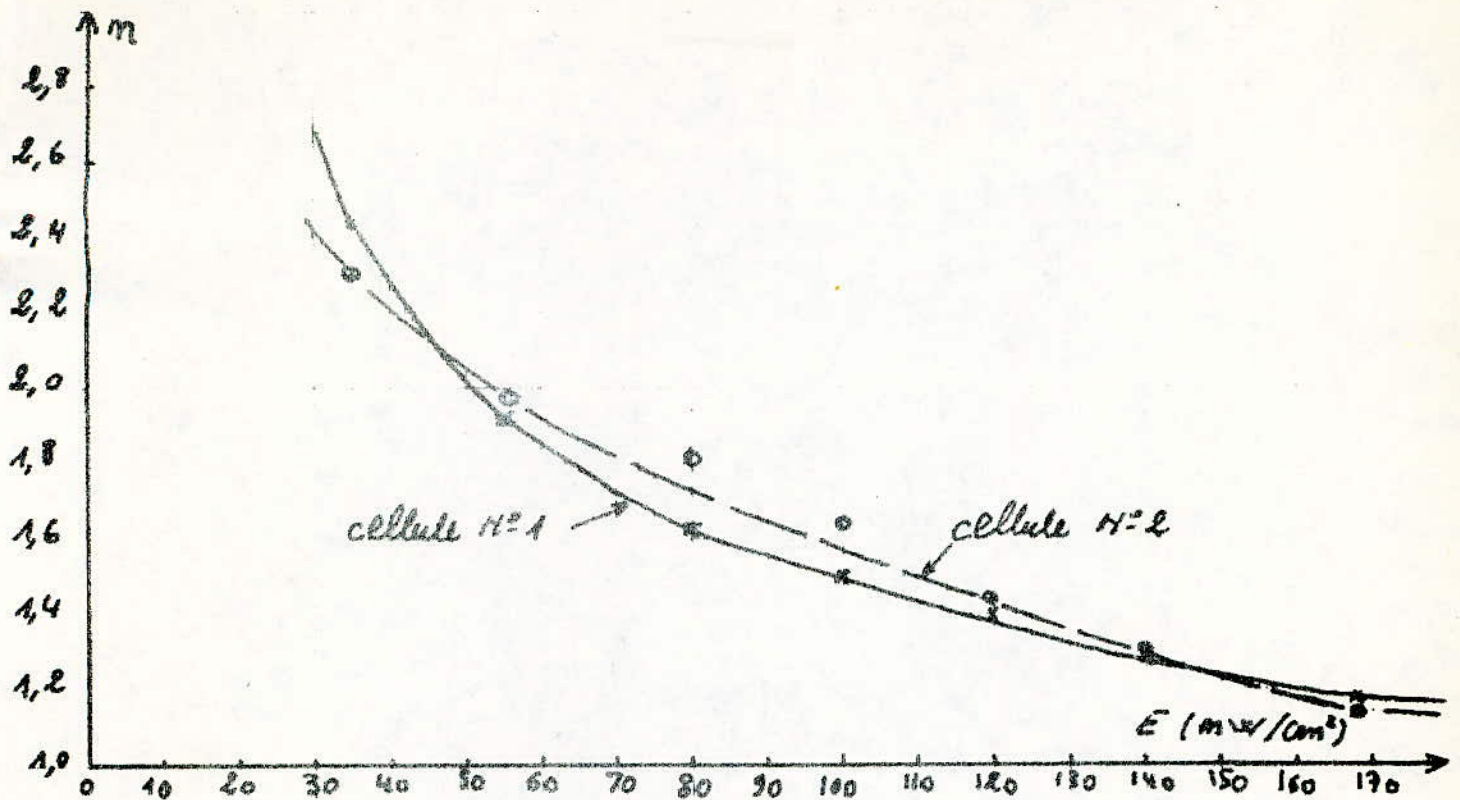


Fig: 32 Variation du facteur d'idéalité  $m$  en fonction de l'éclairement à  $t = 35^\circ\text{C}$

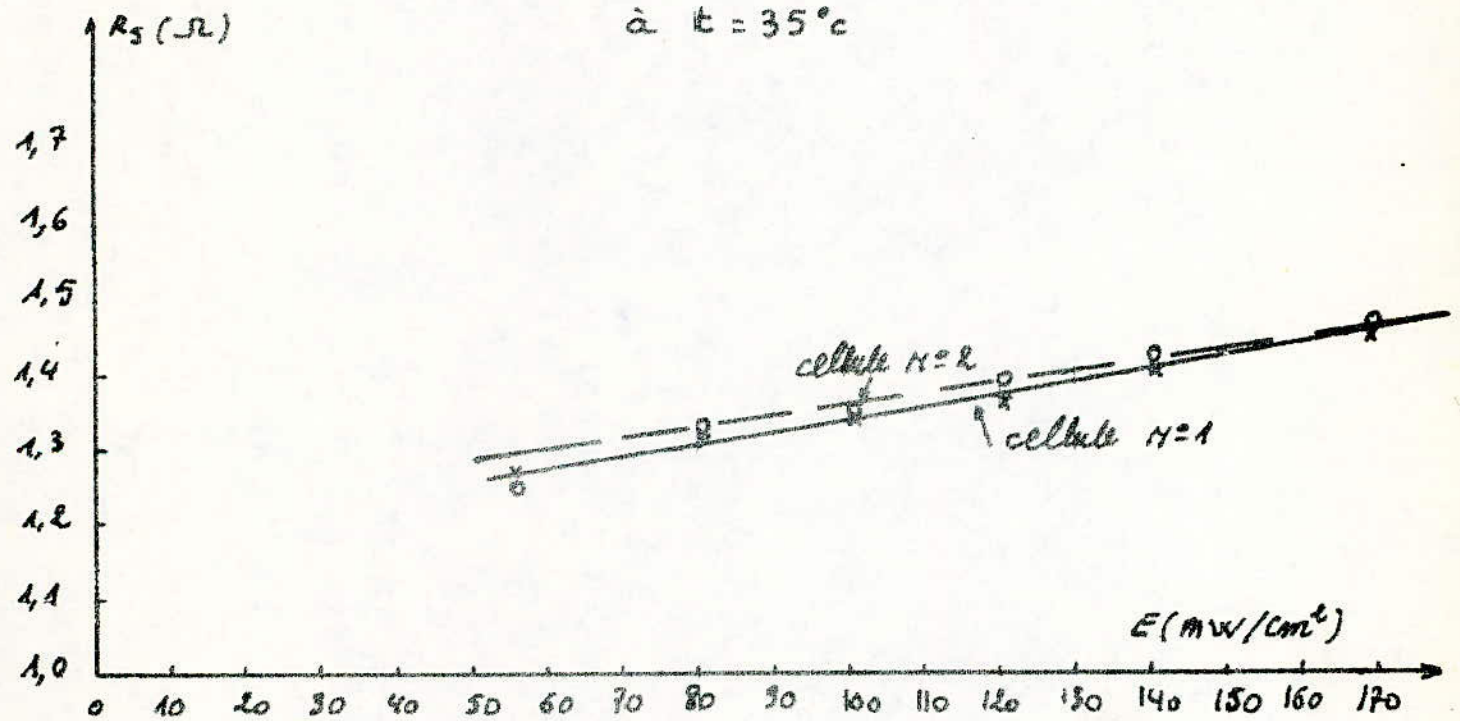


Fig: 33 Variation de la résistance série en fonction de l'éclairement à  $t = 35^\circ\text{C}$



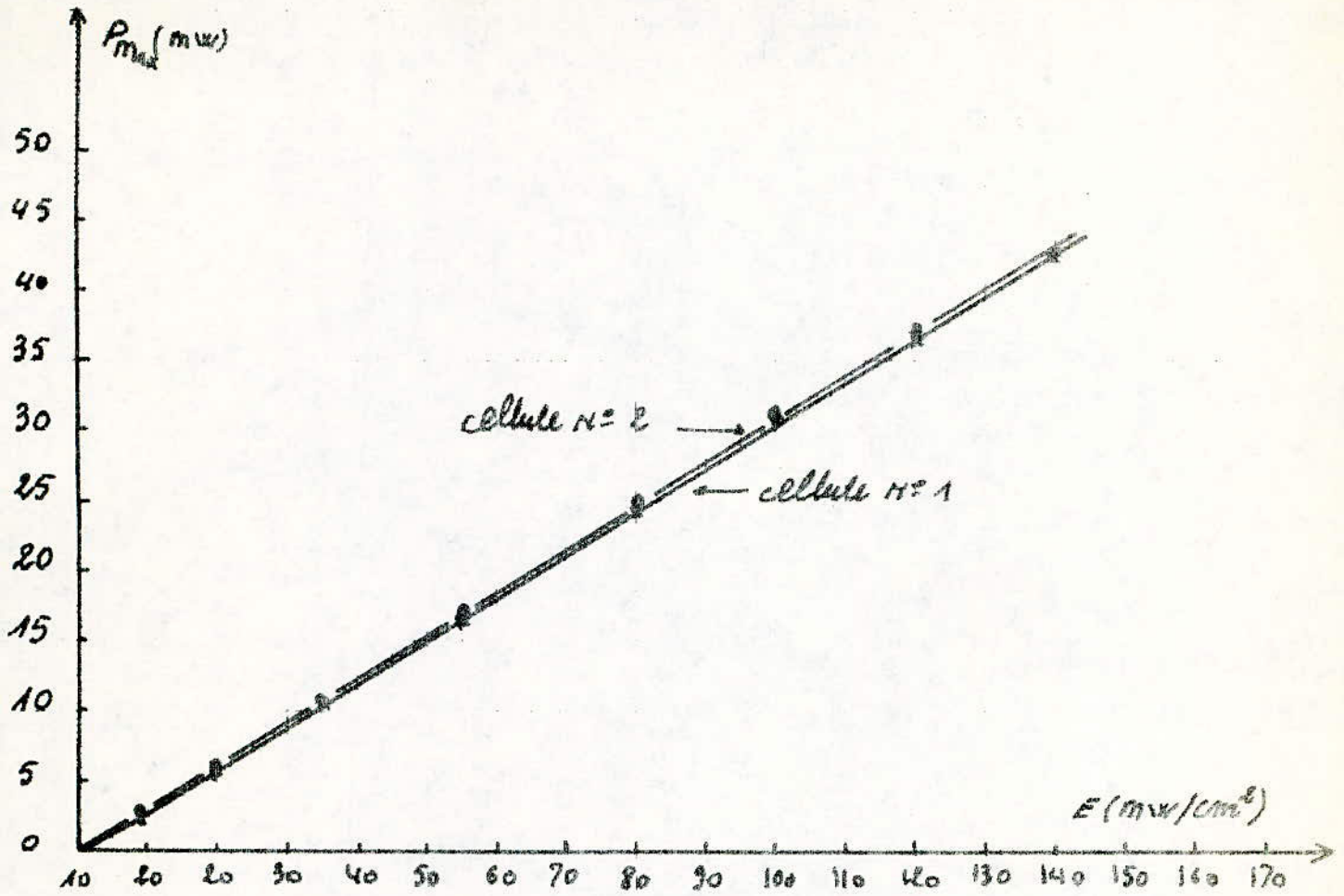


Fig: 34 Variation de la puissance Max en fonction de l'éclairement.  
à  $t = 35^\circ C$

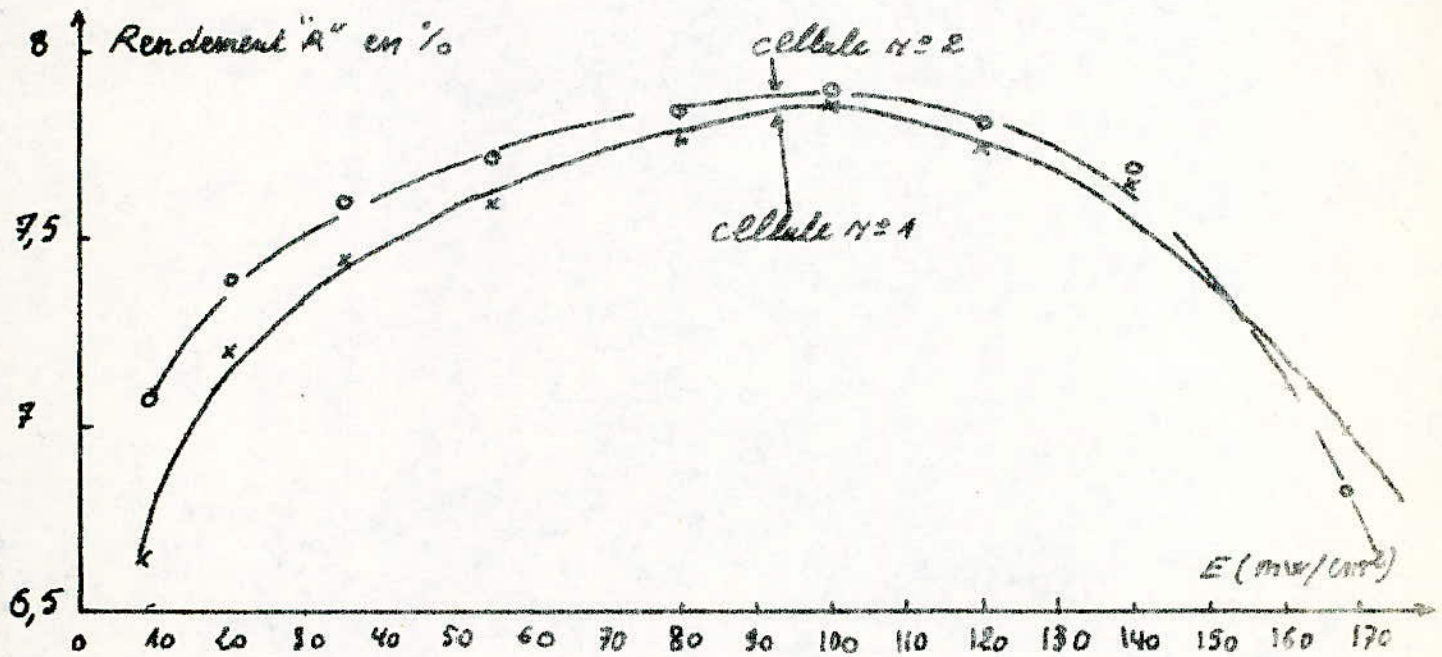


Fig: 35 Variation du Rendement en fonction de l'éclairement à  $t = 35^\circ C$

courbes de  $V_{oc}$ , par ailleurs il y a un certain décalage entre les courbes de  $I_{sc}$ , surtout aux éclairissements intenses. On déduit alors d'après ce qui a été dit précédemment qu'il est préférable d'associer ces deux cellules en parallèle, lorsqu'on a une température constante et un éclairissement variable.

### 3.4. - Etude à différentes températures et éclairissement constant.

Dans ce paragraphe, nous allons étudier brièvement l'effet de la température sur les différents paramètres à l'obscurité et sous éclairissement. Afin de faire encore un tri plus sélectif que précédemment, et d'apporter une solution au problème d'assemblage en série et en parallèle.

### 3.5. - Effet de la température sur les différents paramètres.

#### 3.5.1. - A l'obscurité.

Les caractéristiques  $I = f(V)$  obtenues à l'obscurité ont la forme d'une diode normale comme le montre les fig. 36, 38, 40, 42 (correspondant respectivement aux cellules 1, 2, 3 et 4). Lorsque la température augmente d'après ce qui a été dit au chapitre II, la tension de seuil diminue, ce qui entraîne un déplacement des caractéristiques  $I = f(V)$  vers la gauche. D'où la possibilité d'utiliser des cellules solaires comme un thermomètre.

Les figures 44 et 45 montrent un exemple typique d'étalonnage des cellules solaires 1, 2, 3 et 4 en thermomètre.

Nous remarquons que pour un courant faible les pentes, des courbes  $V = f(T)$  à  $I = 40 \text{ mA}$  sont légèrement différentes relatives à la cellule 1 et 2.

Il s'ensuit que les deux courbes se coupent à faibles températures. Il en est de même pour les courbes (3) et (4).

Mais, lorsqu'on se place à un niveau de courant plus important, les courbes précédentes s'écartent entre elles et sont presque parallèles comme le montrent les courbes (1'), (2'), (1''), (2''), (3'), (4'), (3'') et (4'') où les chiffres 1, 2, 3 et 4 sont relatifs aux cellules 1, 2, 3 et 4. Les primes et les secondes sont relatifs aux courants  $I = 70 \text{ mA}$  et  $I = 100 \text{ mA}$ . D'où l'on déduit pour un courant moyen ; les photopiles considérées varient de la même façon en fonction de la température.

La dérive en température est en moyenne de l'ordre de  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{K}$ .

Les photopiles précédentes peuvent aussi être utilisées comme un thermomètre sous éclairissement dont l'étude sera détaillée au prochain paragraphe.

#### 3.5.2. - Sous éclairissement.

Nous supposons que la température croît ~~par~~ pas de  $10^\circ \text{ C}$  dans l'intervalle  $0^\circ \text{ C}$  à  $60^\circ \text{ C}$ , dans ces conditions on observe une légère augmentation de  $I_{sc}$ , en même temps une diminution importante de  $V_{oc}$ , comme le montre les figures 37, 39, 41 et 43 relatives aux cellules 1, 2,



3 et 4, par exemple pour la cellule n° 1  $I_{sc}$  croît de 78 mA à 85 mA et  $V_{oc}$  décroît de 600 mV à 485 mV. La variation des autres paramètres en fonction de la température, est déduite à partir de ces caractéristiques, par la méthode exposée en Annexe (2).

L'étude de ces différents paramètres en fonction de la température a donné les résultats suivants : le courant  $I_{sc}$  pour les 4 cellules n'est pas identique, de plus les pentes des droites qui décrivent  $I_{sc}$  en fonction de la température sont très différentes pour certaines cellules, c'est le cas des photopiles (1), (2) et (3), comme le montre la fig. 46. Par ailleurs, les cellules (2) et (4) ont des pentes presque égales, comme le montre le tableau 8. Il en résulte que la variation de  $I_{sc}$  en fonction de la température est de 0,17 mA/°C pour les cellules 2 et 4.

Les courbes des cellules 1 et 4 montrent qu'il est possible de les monter en série à partir de la température 30° C jusqu'à 60° C, car à ce niveau, les variations de  $I_{sc}$  sont presque identiques pour les deux cellules. Mais il y a un inconvénient, c'est que la tension délivrée par les deux cellules chute d'au moins 25 mV, quand la température croît de 30° à 60° C.

En revanche, la variation de  $V_{oc}$  en fonction de la température est presque identique pour les quatre cellules. En effet elles ont presque la même pente autour de -2 mV/°K, comme les montrent le tableau 8 et la fig. 47. Là encore il y a un certain décalage entre les tensions  $V_{oc}$ , qui est de l'ordre 15 mV pour les cellules 1 et 2, et de 20 mV pour les cellules 3 et 4. Si elles sont placées en parallèle, il y aura une qui débite dans l'autre, ceci se passe lorsque l'ensemble est mis en circuit ouvert.

Puisque les cellules ont même pente il sera possible de les utiliser comme thermomètre, mais il se pose un problème : la température indiquée par une photopile n'est pas précise, car à tout instant et quelque soit le milieu considéré, il existe une variation dans l'éclairement. Pour cela, nous allons évaluer l'erreur qu'on peut commettre lors d'une mesure de la température.

Ainsi, sur la fig. 48, nous avons donné les courbes représentatives de la variation  $V_{oc}$  à différentes températures pour différents éclairagements. D'après ces trois courbes, nous déduisons pour une variation de 30 % de l'éclairement, une variation dans la température en moyenne de 1,4 %.

$$\begin{array}{c} : \\ : \\ ; \end{array} \quad \begin{array}{c} T_{\text{exacte}} = T_{\text{mesurée}} \pm 1,4 \% T_{\text{mesurée}} \\ : \\ : \end{array}$$

Alors si l'on suppose qu'on a cette même variation au cours de la journée, pour un panneau judicieusement orienté, on peut déterminer la température avec une précision relativement bonne.

Le facteur d'idéalité varie dans le même sens que la température et il diffère en passant d'une cellule à une autre comme le montre la fig. 49.



Notons que plus ce facteur d'idéalité est proche de 2, plus la tension délivrée par la cellule est grande ce qui est visible à faible température sur les courbes de la figure 49. Nous remarquons aussi que les cellules n° 2 et 3 ont un facteur d'idéalité voisin de 3 et les cellules n° 1 et 4 proche de 2.

Nous constatons également que les pentes des droites qui décrivent  $n$  en fonction de la température sont très voisines sauf pour la cellule 4 qui a une pente plus faible. Il en résulte que la photopile 4 se montre la meilleure par rapport aux autres, celà du point de vue du facteur d'idéalité.

Parmi les pertes mentionnées au chapitre (1) nous allons étudier celles qui se dissipent par effet Joule dans la cellule en fonction de la température. Ce qui revient à étudier l'effet de la température  $\frac{Sur}{R_s}$ .

$R_s$  décroît lorsque la température croît comme le montre la fig. 50. D'une part, il est bon d'avoir  $R_s$  faible, mais d'autre part la cellule s'échauffe et risque de se détruire. Nous remarquons également que les cellules (1) et (2) ont des résistances voisines et très grandes ( $R_s = 0,8 \Omega$  à la température ambiante) ; par contre les deux autres ont des résistances voisines et faibles ( $R_s = 0,2 \Omega$  à la température ambiante). Cette grande différence nous permet de comparer les rendements des 4 cellules.

Ainsi la fig. 53 montre que plus la résistance série est grande, plus le rendement est faible. Ce rendement décroît lorsque la température croît. Normalement il devrait augmenter en fonction de la température, puisque  $R_s$  diminue. Or ce n'est pas le cas, parce que la tension  $V$  est très sensible aux variations de la température et lorsque la température croît ;  $V$  décroît fortement. Ce qui entraîne une décroissance de la puissance maximale et du rendement comme le montrent les figures 52 et 53. Notons également que les pentes des deux droites, des cellules 1 et 2, qui décrivent  $P_{max}$  en fonction de la température sont égales. L'écart existant entre les deux droites n'est pas remarquable, il est de l'ordre de 1 mW. Donc les puissances délivrées par chacune d'elles sont presque identiques. Les mêmes constatations ont été faites pour les deux autres cellules.

Mais si on veut avoir une puissance importante, utilisable à nos besoins, il est nécessaire d'associer les cellules en série ou en parallèle ou une combinaison des deux assemblages.

Dans notre cas il est possible d'associer les cellules 3 et 4 en parallèle, tout en évitant d'avoir un circuit ouvert, il en est de même pour les deux autres photopiles. Il est également possible d'associer la une et la quatre en série mais, on évitera d'avoir un court-circuit.

Le facteur de forme nous renseigne sur la qualité de la cellule. Par ailleurs, comme nous l'avons remarqué, les cellules 4 et 3 sont plus performantes que les deux autres n° 1 et 2 comme le montre la figure 54. De cette étude résulte que les cellules sont identiques du point de vue géométrique, mais non du point de vue physique.



Enfin, pour confirmer l'exactitude des résultats des différents paramètres déterminés par la méthode exposée en annexe (1). Nous avons pris les valeurs de  $n$ ,  $R_s$  et  $I_o$  de la cellule n° 4 ; puis nous avons reporté ces valeurs dans la relation (2) du chapitre II. Ensuite nous avons imposé  $I$  pour calculer  $V$ . Les valeurs de  $I$  et  $V$  trouvées sont reportées sur un graphe.

Les courbes obtenues comparée à celles de l'expérience montrent qu'il y a un léger décalage au niveau du coude, comme l'indique la figure 55.

Ce décalage est dû aux erreurs faites sur  $n$ ,  $I_o$  et  $R_s$ . On en déduit alors que la méthode utilisée pour déterminer les différents paramètres est bonne.

Un calcul d'erreurs a été fait pour tous les paramètres, afin d'encadrer les résultats exacts.

Et quelques ordres de grandeur sont rappelés ci-dessous, pour fixer les idées nous avons pris le cas de la cellule n° 1 à  $T = 31^\circ \text{C}$  et  $E = 72,2 \text{ mW/cm}^2$

Le tableau suivant illustre cela :

$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (mV)	$n$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$I_o$ ( $\mu\text{A}$ )	$P_M$ (mW)	$R$ %
$81 \pm 0,4$	$540 \pm 1$	$2,39 \pm 0,38$	$0,76 \pm 0,17$	$14,23 \pm 138\% I_o$	$25,84 \pm 0,22$	$8,98 \pm 0,08$

La mauvaise précision sur  $I_o$  n'est pas étonnante, car  $I_o$  varie en exponentielle, par contre les précisions obtenues sur  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $P_M$  et  $R$  sont assez bonnes.

### 3.6. - Effet de la température sur l'association des cellules solaires.

#### 3.6.1. - Association en parallèle de deux cellules.

Nous avons tracé 2 courbes  $I = f(V)$  d'une même cellule à 2 températures différentes ( $31^\circ \text{C}$  et  $42^\circ \text{C}$ ) et sous un même éclairement ( $E = 72,2 \text{ mW/cm}^2$ ).

Ces deux caractéristiques  $I = f(V)$  peuvent correspondre à 2 cellules différentes dont l'une est placée à  $31^\circ \text{C}$  et l'autre à  $42^\circ \text{C}$ . Le tracé point par point des 2 cellules placées en parallèle a donné une troisième caractéristique  $I = f(V)$  notée par (3) comme l'indique la fig. 56.

Les courbes (1) et (2) sont relatives aux cellules (1) et (2) considérées.

Sur cette figure nous constatons qu'à partir du point "A" sur la caractéristique résultante, la deuxième cellule est réceptrice par contre la première cellule est génératrice, ce qui implique que celle-ci débite



dans la deuxième.

Le courant inverse traversant la deuxième cellule l'échauffe ; échauffement qui provoque une légère augmentation de  $I_{sc}$  ; et une diminution de  $V_{oc}$  ce qui entraîne un déplacement du point  $\Delta$  vers la gauche ; provoquant une augmentation du courant inverse traversant la deuxième cellule, laquelle provoque à son tour une augmentation de la température, laquelle, à son tour intensifie ce courant et ainsi de suite jusqu'à ce que la première cellule débite complètement dans la deuxième.

Donc l'influence de la température sur l'association de cellules solaires est importante.

### 3.6.2. - Association en série de 2 cellules.

Les 2 cellules sont placées sous le même éclairement à des températures différentes voir figure 57.

- 1ère cellule à  $T_1 = 30^\circ \text{C}$

- 2ème cellule à  $T_2 = 45^\circ \text{C}$

Le courant résultant, étant limité par le courant de la cellule placée à  $T_1$  (1ère cellule). La différence de courant existant entre les 2 cellules est dissipée par effet Joule dans la 1ère cellule, d'où un échauffement de celle-ci provoquant une augmentation de température, laquelle à son tour cause une augmentation de  $I_{sc}$  jusqu'à ce que le  $I_{sc}$  de la première cellule soit égal à celui de la deuxième cellule.

Supposons maintenant que les deux cellules considérées soient placées en court-circuit, d'où on a :

$$V_1 + V_2 = 0$$

$$V_1 = -V_2$$

Il en découle que la première cellule se trouve polarisée par une tension inverse ( $-V_2$ ), et comme cette tension inverse est de l'ordre de 50 mV, on peut dire alors que l'influence de la température est faible.

### 3.7. - Influence de la dispersion des caractéristiques sur l'association des cellules solaires.

Différentes études ont souligné le caractère "catastrophique" des performances électriques, que pourrait présenter l'association électrique des cellules dont les caractéristiques seraient trop dispersées. Comme l'éclairement et la température sont les deux premiers facteurs qui accentuent la dispersion alors nous allons voir l'effet de la dispersion des caractéristiques sur l'association des cellules solaires en série et en parallèle.

L'expérience faite sur les cellules n° 2 et 4 à la température  $T = 31^\circ \text{C}$  et à 1 éclairement  $E = 72,2 \text{ mw}$  a donné les résultats suivants :

#### 3.7.1. - Effet de la dispersion sur l'association en parallèle de deux cellules.



Sur la figure 58 nous remarquons qu'au point "B" de la résultante la cellule n° 2 est réceptrice par ailleurs la cellule 4 est toujours génératrice les mêmes effets qui ont été observé précédemment, pour deux cellules en parallèle à deux températures différentes se produisent dans ce cas.

### 3.7.2. - Effet sur l'association en série de deux cellules.

Sur la figure 59 on constate que le courant résultant est limité par le courant de la cellule n° 2. La différence existant entre les courants est dissipée par effet Joule dans cette dernière.

L'effet de la dispersion des caractéristiques sur les cellules placées en série peut être identifié à celui provoqué par une différence d'éclairement ou de température étudiée précédemment.

La dissipation devient importante et risque de détruire la cellule, lorsque la température et l'éclairement varie dans le même sens. Car ces deux facteurs agissent sur  $I_{sc}$  de la même manière.

Le problème restera toujours posé même à une température constante et un éclairement variable, car ce dernier facteur l'emporte sur le premier.

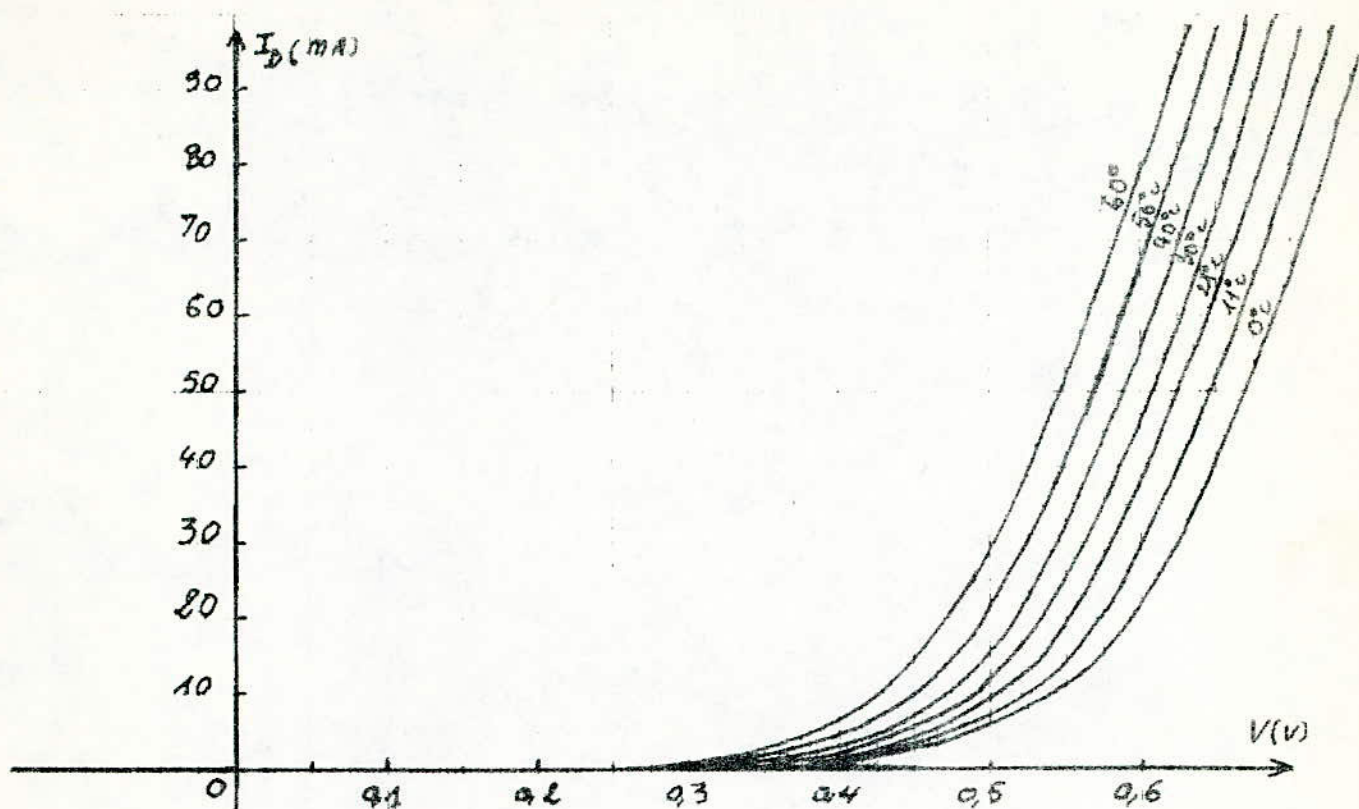


Fig: 36 caractéristique  $I(V)$  à l'obscurité de la cellule N° 1 à différentes Températures

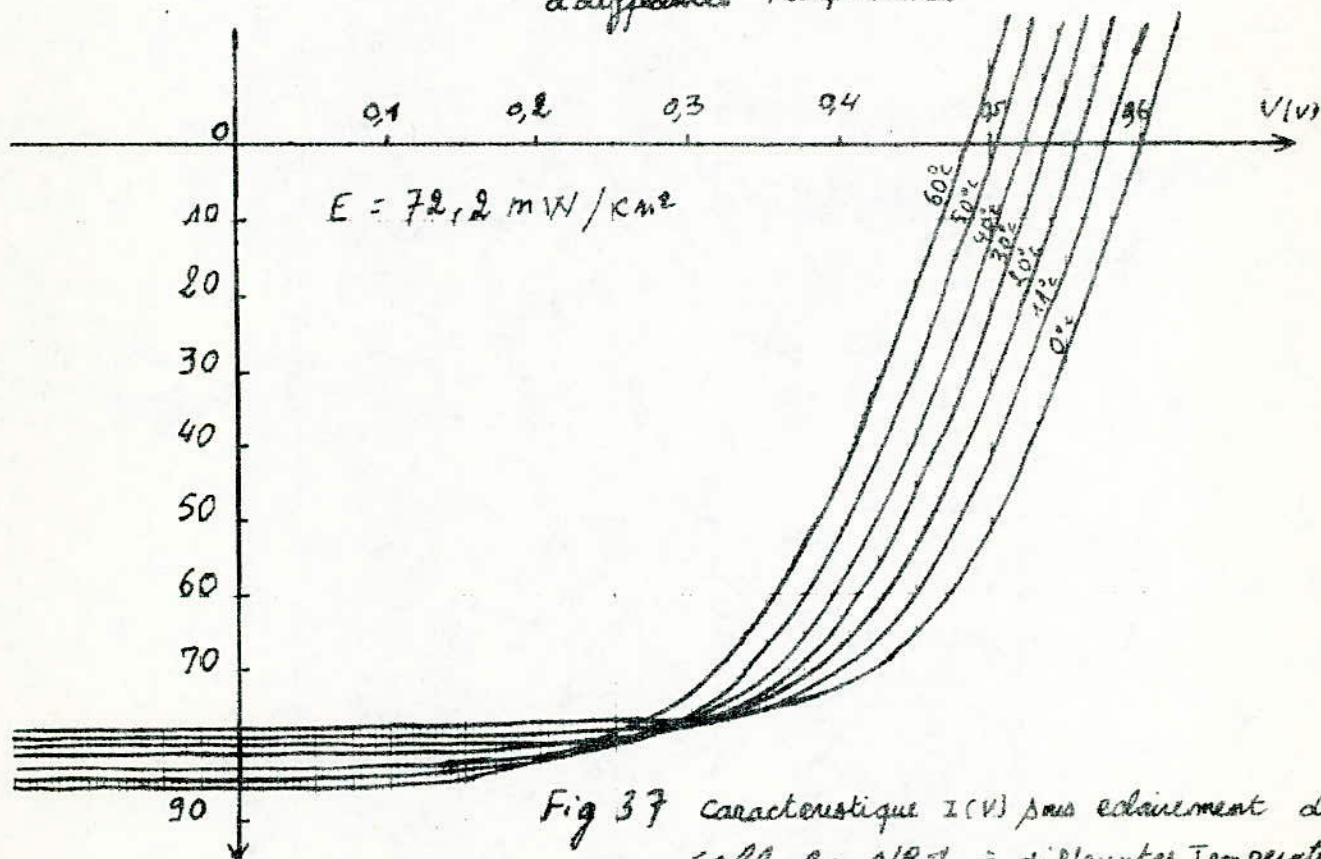


Fig 37 caractéristique  $I(V)$  sous éclaircissement de cellule N°1 à différentes Températures



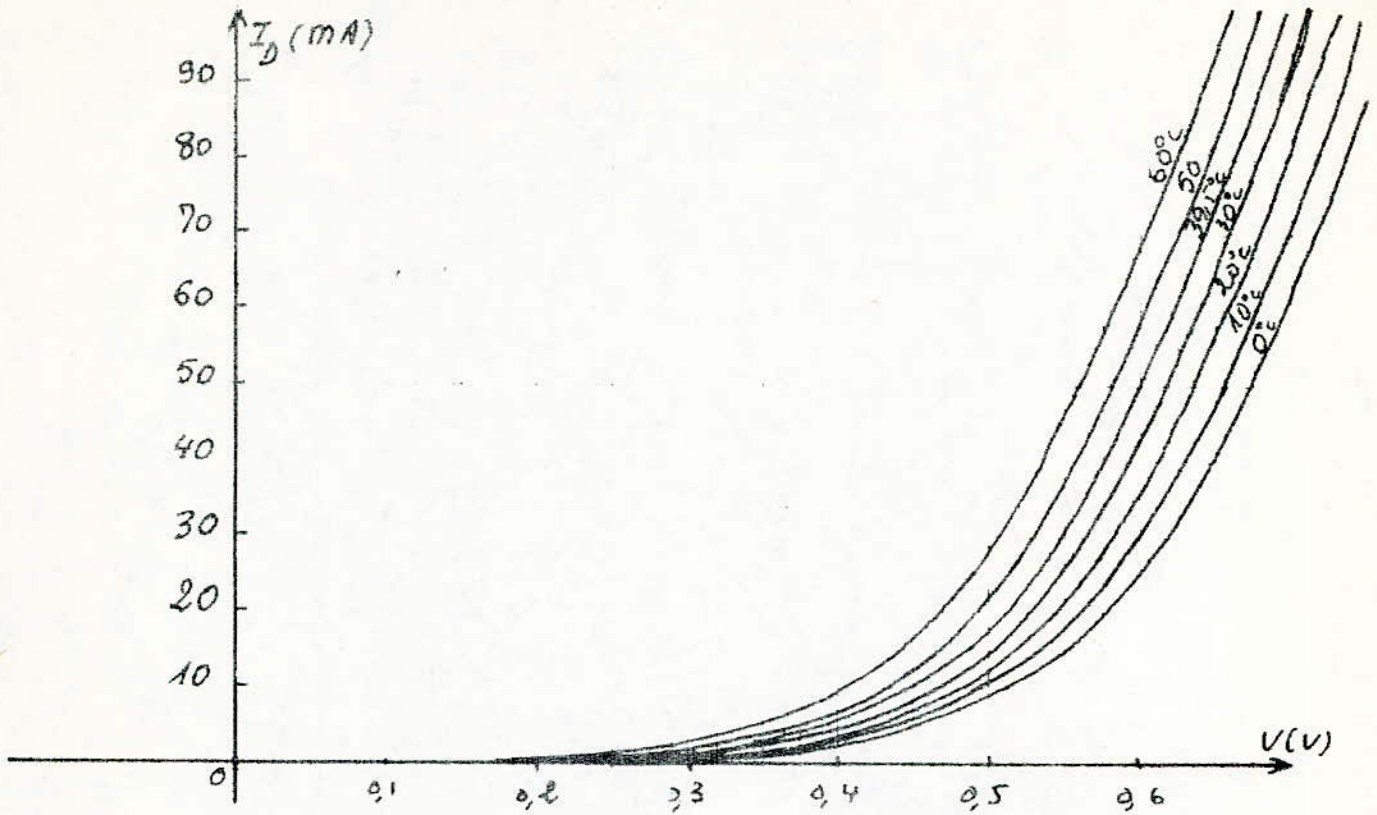


Fig:38 caractéristique  $I(V)$  à l'obscurité de la cellule n° 2 à différentes températures

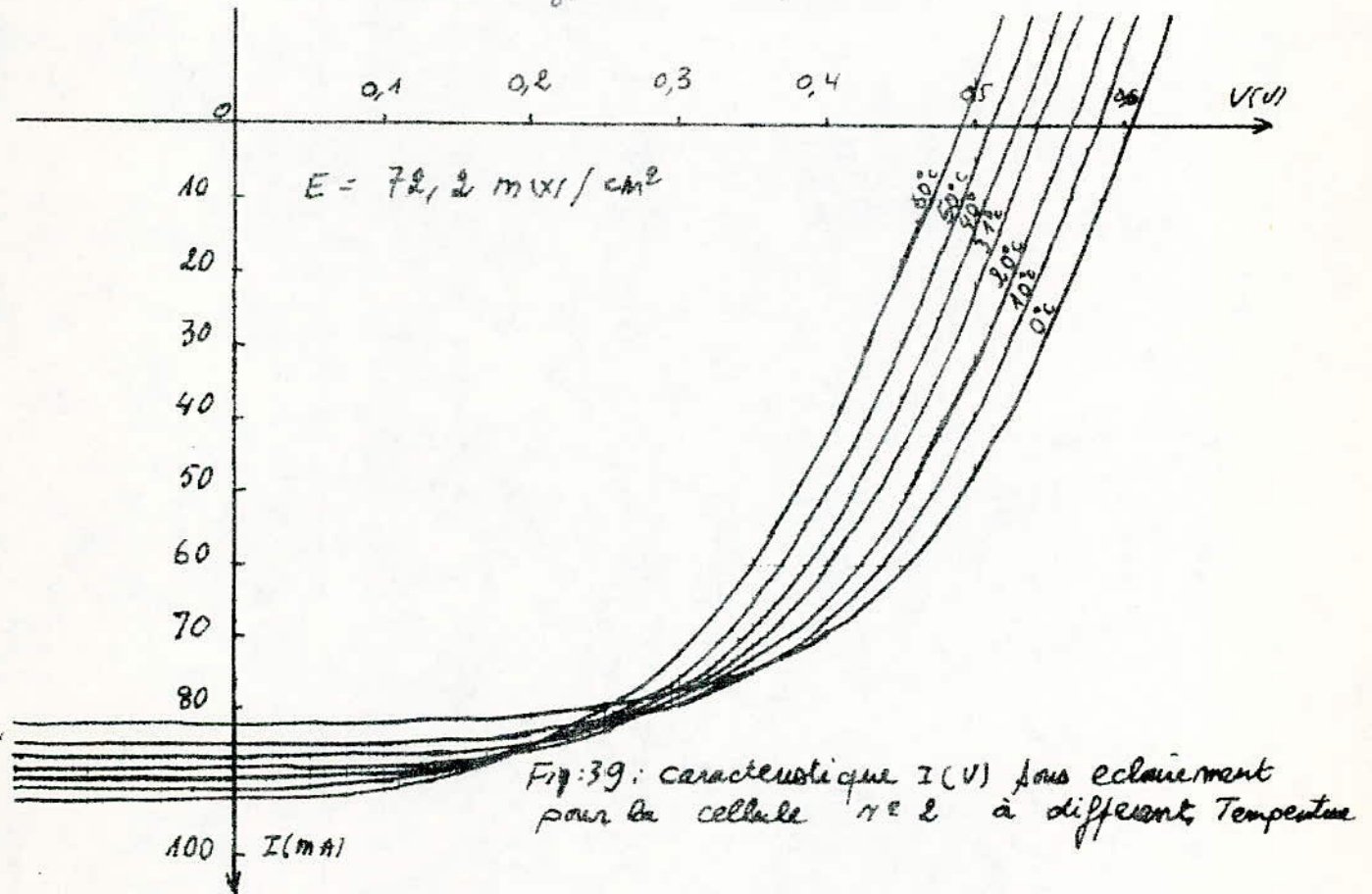


Fig:39: caractéristique  $I(V)$  sous éclaircissement pour la cellule n° 2 à différentes températures

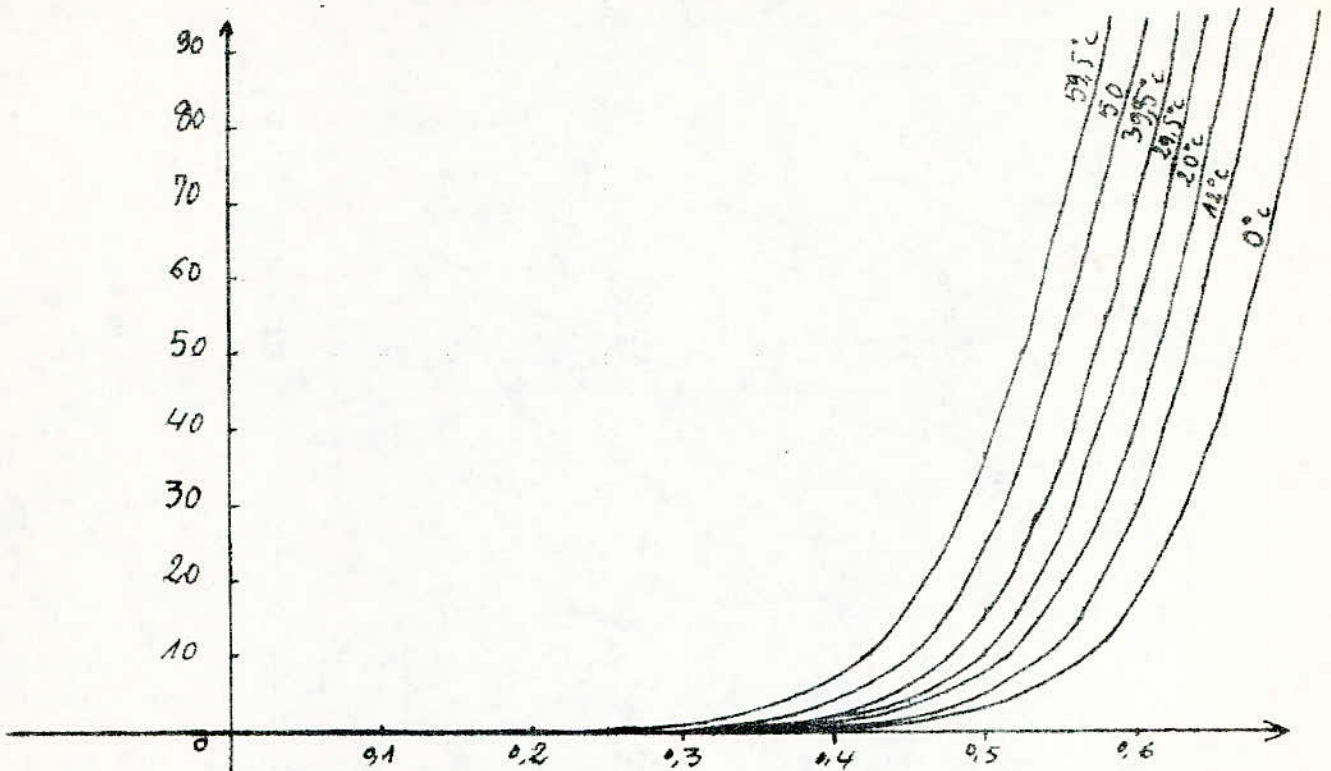


Fig N°: 40 caractéristique  $T(V)$  à l'obscurité de la cellule N°3  
à différentes températures

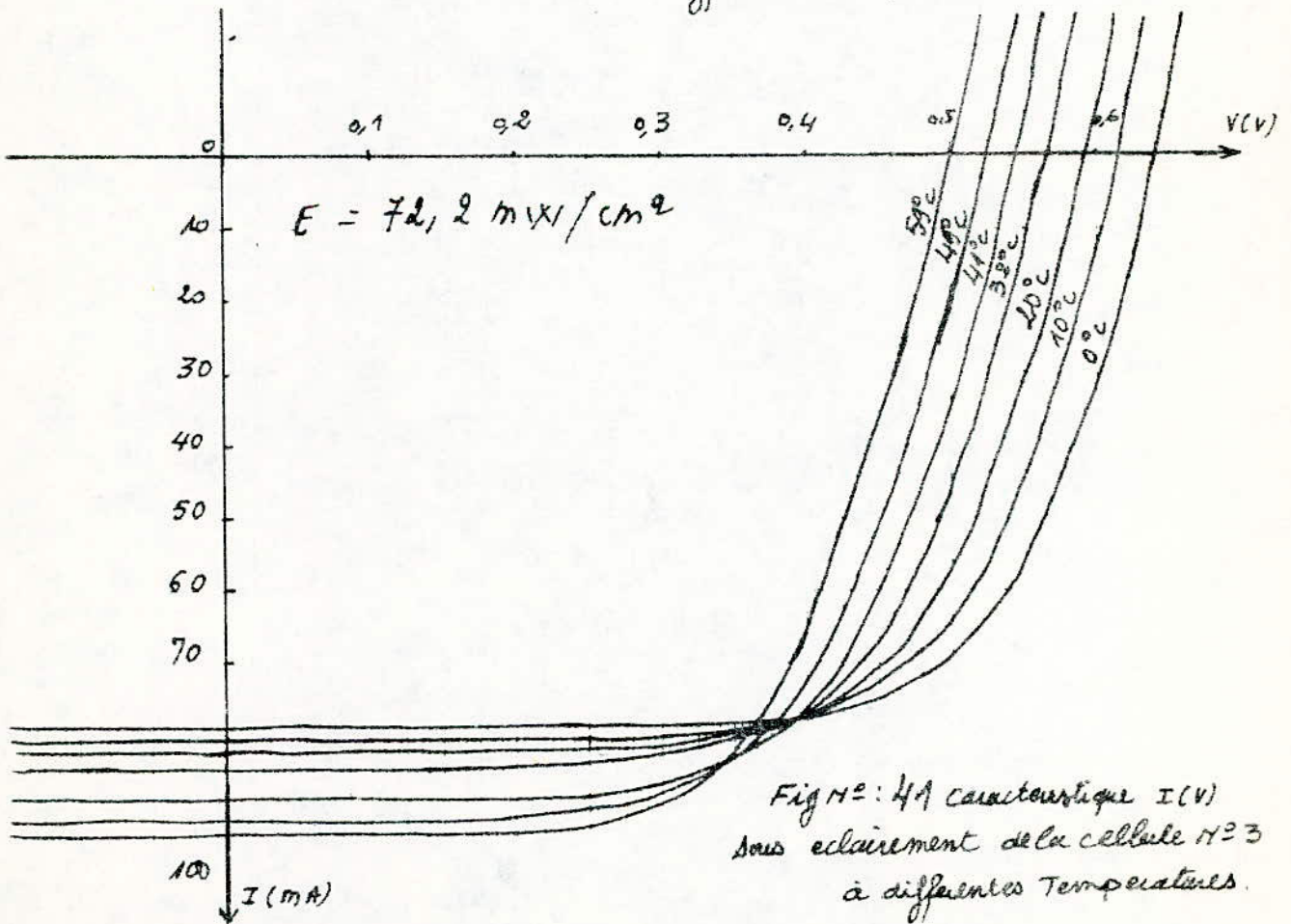


Fig N°: 41 caractéristique  $I(V)$   
sous éclaircissement de la cellule N°3  
à différentes températures.



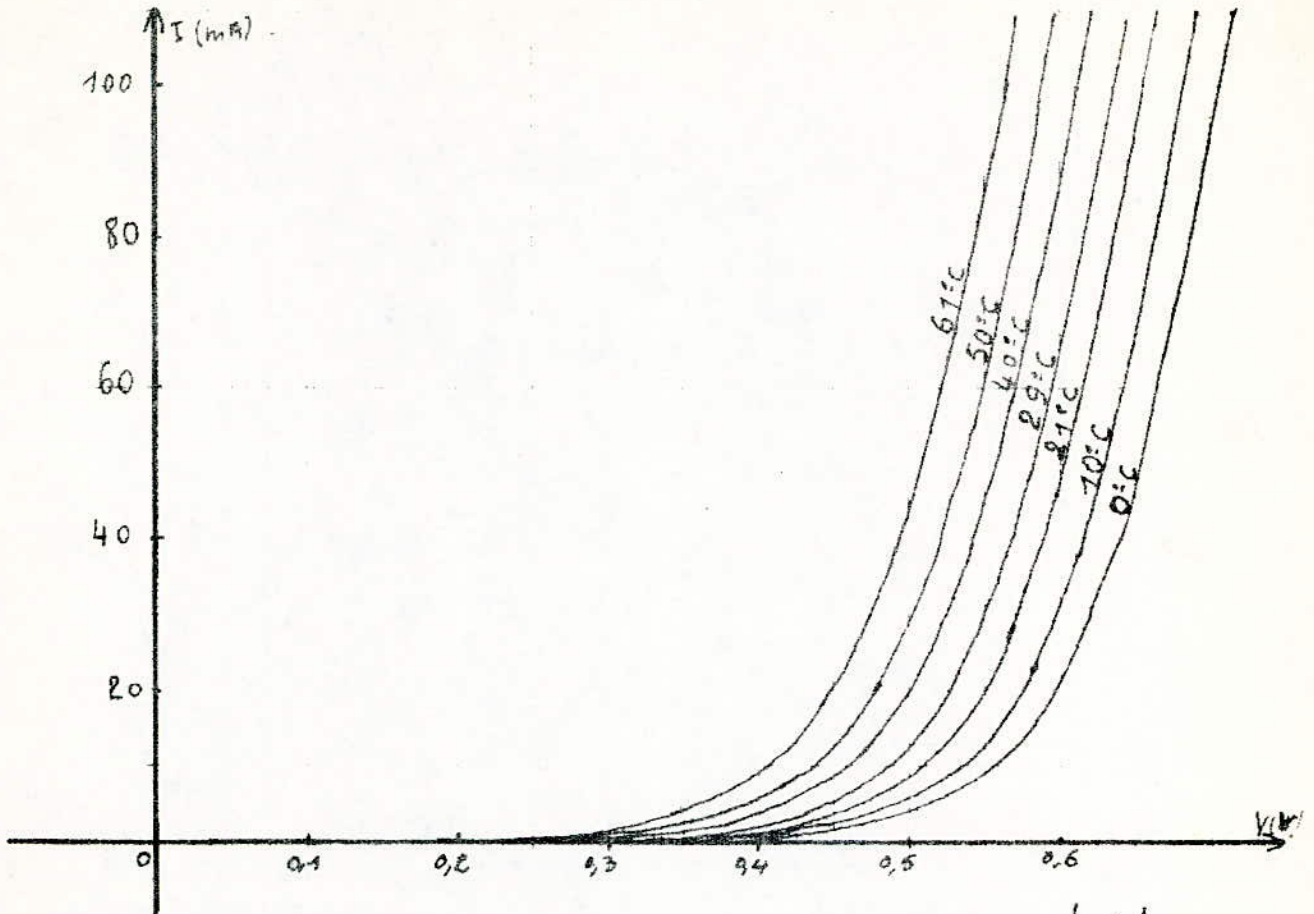


Fig: 42 Caractéristique  $I(V)$  à l'obscurité de la cellule  $n=4$  à différentes Températures

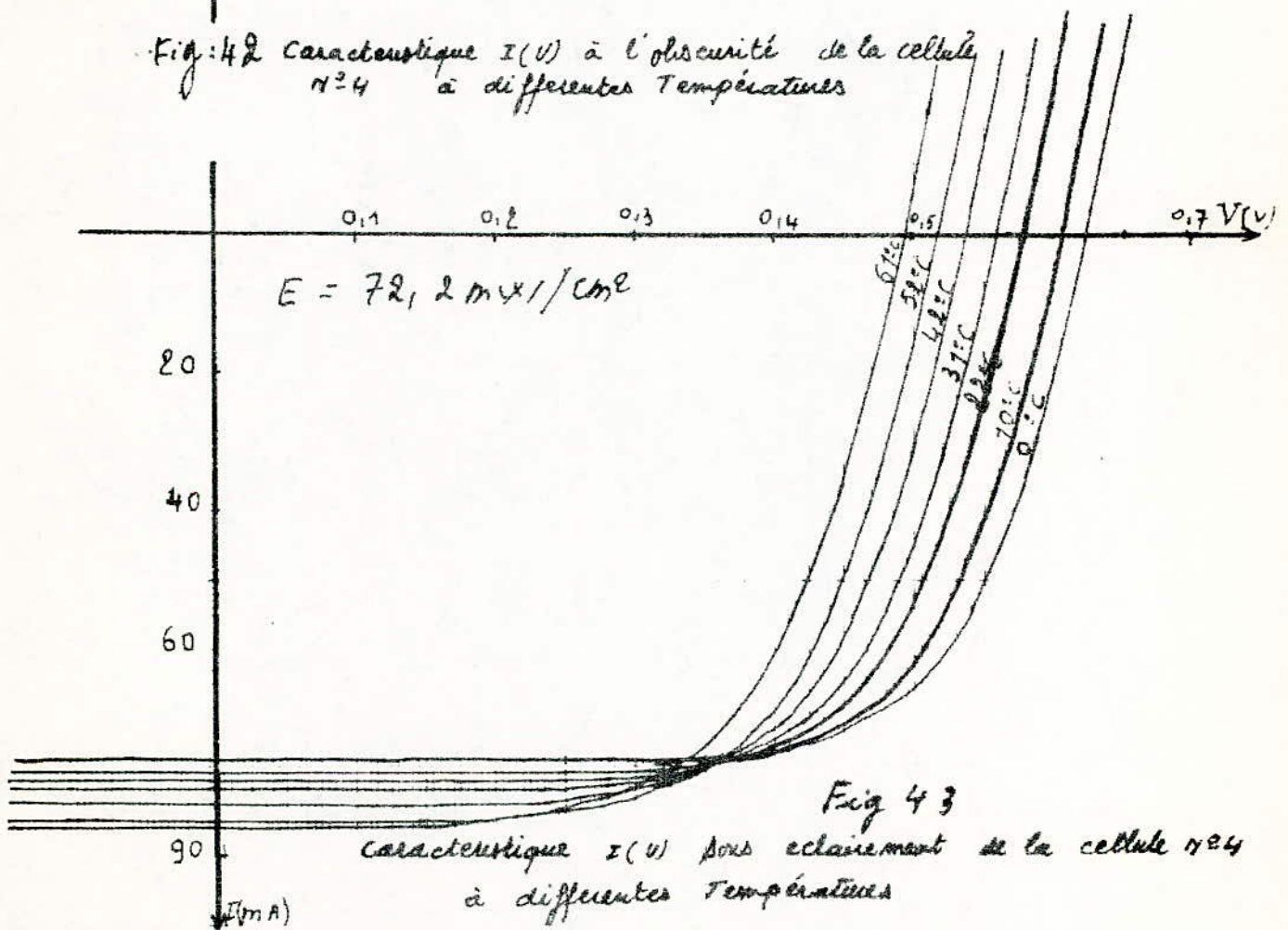


Fig 43

Caractéristique  $I(V)$  sous éclairage de la cellule  $n=4$  à différentes Températures

$\theta^\circ$	0°	11°	20°	30°	40°	50°	60°
$I_{sc}$ (mA)	78 $\pm 0,4$	79 $\pm 0,4$	80 $\pm 0,4$	81 $\pm 0,4$	83 $\pm 0,4$	84,5 $\pm 0,4$	85,5 $\pm 0,4$
$V_{oc}$ (mV)	600 $\pm 1$	575 $\pm 1$	555 $\pm 1$	540 $\pm 1$	523 $\pm 1$	505 $\pm 1$	485 $\pm 1$
$m$	2,09 $\pm 0,54$	2,23 $\pm 0,48$	2,31 $\pm 0,44$	2,39 $\pm 0,38$	2,53 $\pm 0,32$	2,66 $\pm 0,28$	2,76 $\pm 0,23$
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,97 $\pm 0,22$	0,87 $\pm 0,2$	0,82 $\pm 0,19$	0,76 $\pm 0,17$	0,69 $\pm 0,16$	0,61 $\pm 0,14$	0,54 $\pm 0,13$
$I_0$ ( $\mu A$ )	0,39 $\pm 32\% I_0$	2,03 $\pm 24\% I_0$	5,94 $\pm 17\% I_0$	14,23 $\pm 13\% I_0$	39,26 $\pm 10\% I_0$	92,96 $\pm 7\% I_0$	188,24 $\pm 5\% I_0$
$P_m$ (mW)	29,67 $\pm 0,24$	28,22 $\pm 0,23$	26,91 $\pm 0,23$	25,84 $\pm 0,22$	24,85 $\pm 0,21$	23,78 $\pm 0,21$	22,42 $\pm 0,20$
F.F	0,63	0,62	0,60	0,59	0,57	0,56	0,54
$R$ (%)	10,30 $\pm 0,08$	9,88 $\pm 0,08$	9,34 $\pm 0,08$	8,98 $\pm 0,08$	8,62 $\pm 0,07$	8,25 $\pm 0,07$	7,78 $\pm 0,07$

TABLEAU: 4 Résultats de la cellule N=1

$\theta^\circ$	0°	10°	20°	31°	40°	50°	60°
$I_{sc}$ (mA)	82 $\pm 0,4$	84,5 $\pm 0,4$	86,5 $\pm 0,4$	88 $\pm 0,4$	89,5 $\pm 0,4$	91 $\pm 0,4$	92 $\pm 0,4$
$V_{oc}$ (mV)	605 $\pm 1$	585 $\pm 1$	565 $\pm 1$	540 $\pm 1$	528 $\pm 1$	510 $\pm 1$	490 $\pm 1$
$m$	2,87 $\pm 0,56$	2,98 $\pm 0,50$	3,05 $\pm 0,55$	3,12 $\pm 0,45$	3,18 $\pm 0,33$	3,25 $\pm 0,23$	3,32 $\pm 0,10$
$R_s$ ( $\Omega$ )	1,0 $\pm 0,25$	0,95 $\pm 0,21$	0,90 $\pm 0,20$	0,83 $\pm 0,19$	0,78 $\pm 0,15$	0,71 $\pm 0,12$	0,65 $\pm 0,08$
$I_0$ ( $\mu A$ )	10,50 $\pm 18\% I_0$	27,08 $\pm 13\% I_0$	56,67 $\pm 11\% I_0$	119,60 $\pm 9\% I_0$	194,0 $\pm 6\% I_0$	325,70 $\pm 4\% I_0$	539,50 $\pm 1\% I_0$
$P_m$ (mW)	28,22 $\pm 0,23$	27,20 $\pm 0,23$	26,20 $\pm 0,22$	25,0 $\pm 0,21$	23,80 $\pm 0,21$	23,0 $\pm 0,20$	21,7 $\pm 0,19$
F.F	0,57	0,55	0,54	0,53	0,51	0,49	0,48
$R$ (%)	9,82 $\pm 0,08$	9,44 $\pm 0,08$	9,00 $\pm 0,08$	8,72 $\pm 0,07$	8,28 $\pm 0,07$	7,92 $\pm 0,07$	7,53 $\pm 0,06$

TABLEAU: 5 Résultats de la cellule N=2



$T^{\circ}\text{C}$ PARAM. TRES.	0°	10°	20°	32°	41°	49°	53°
$I_{sc}$ (mA)	79 ± 0,4	81 ± 0,4	82,5 ± 0,4	85 ± 0,4	89 ± 0,4	92 ± 0,4	94 ± 0,4
$V_{oc}$ (mV)	635 ± 1	613 ± 1	590 ± 1	565 ± 1	542 ± 1	520 ± 1	500 ± 1
$n$	2,64 ± 0,08	2,68 ± 0,08	2,76 ± 0,05	2,84 ± 0,03	2,92 ± 0,03	2,97 ± 0,05	3,04 ± 0,04
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,46 ± 0,13	0,48 ± 0,13	0,36 ± 0,12	0,39 ± 0,12	0,27 ± 0,12	0,24 ± 0,12	0,20 ± 0,12
$I_0$ ( $\mu\text{A}$ )	2,88 ± 45% $I_0$	7,12 ± 95% $I_0$	17,48 ± 78% $I_0$	44,08 ± 62% $I_0$	83,88 ± 59% $I_0$	168,13 ± 56% $I_0$	301,04 ± 45% $I_0$
$P_m$ (mW)	3,46 ± 0,27	33,4 ± 0,25	32,5 ± 0,24	32,0 ± 0,24	30,4 ± 0,23	29,6 ± 0,23	28,4 ± 0,22
F.F	0,69	0,67	0,66	0,65	0,63	0,62	0,61
$R(\%)$	12,00 ± 0,09	11,69 ± 0,09	11,28 ± 0,09	11,10 ± 0,08	10,55 ± 0,08	10,28 ± 0,08	9,86 ± 0,08

TABLEAU 6

Resultats  
de la  
cellule N°3

$T^{\circ}\text{C}$ PARAM. TRES.	0°	10°	22°	31°	42°	52°	61°
$I_{sc}$ (mA)	76 ± 0,4	78 ± 0,4	79 ± 0,4	80 ± 0,4	82,5 ± 0,4	85 ± 0,4	86 ± 0,4
$V_{oc}$ (mV)	623 ± 1	605 ± 1	575 ± 1	560 ± 1	537 ± 1	515 ± 1	495 ± 1
$n$	2,52 ± 0,16	2,54 ± 0,16	2,57 ± 0,13	2,59 ± 0,15	2,62 ± 0,19	2,65 ± 0,12	2,67 ± 0,11
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,32 ± 0,08	0,28 ± 0,08	0,23 ± 0,07	0,19 ± 0,06	0,16 ± 0,10	0,12 ± 0,08	0,09 ± 0,04
$I_0$ ( $\mu\text{A}$ )	21 ± 65% $I_0$	4,5 ± 65% $I_0$	12 ± 45% $I_0$	20,8 ± 33% $I_0$	43,8 ± 58% $I_0$	82,8 ± 34% $I_0$	150 ± 98% $I_0$
$P_m$ (mW)	33,0 ± 0,26	32,2 ± 0,26	30,7 ± 0,25	29,6 ± 0,24	28,7 ± 0,23	27,75 ± 0,22	26,3 ± 0,22
F.F	0,7	0,68	0,67	0,66	0,65	0,63	0,62
$R(\%)$	11,46 ± 0,09	11,22 ± 0,09	10,66 ± 0,09	10,28 ± 0,08	9,96 ± 0,08	9,63 ± 0,08	9,13 ± 0,08

TABLEAU 7

Resultats  
de la  
cellule N°4

$\frac{d}{dT}$ Cellule	$\frac{dV_{oc}}{dT}$ (mV/°C)	$\frac{dI_{sc}}{dT}$ (mA/°C)	$\frac{dn}{dT}$	$\frac{dR_s}{dT}$ ( $\Omega$ /°C)	$\frac{dP_m}{dT}$ (mW/°C)	$\frac{dF.F}{dT}$	$\frac{dR(\%)}{dT}$
N°1	-1,95	0,12	$1,1 \cdot 10^{-2}$	-7	-0,18	$-1,6 \cdot 10^{-3}$	-0,043
N°2	-1,9	0,17	$0,7 \cdot 10^{-2}$	-5	-0,10	$-1,6 \cdot 10^{-3}$	-0,040
N°3	-2,4	0,24	$0,65 \cdot 10^{-2}$	-4,5	-0,11	$-1,4 \cdot 10^{-3}$	-0,040
N°4	-2,1	0,18	$0,25 \cdot 10^{-2}$	-4	-0,11	$-1,3 \cdot 10^{-3}$	-0,040

TABLEAU 8

Gradient  
des differents  
parametres



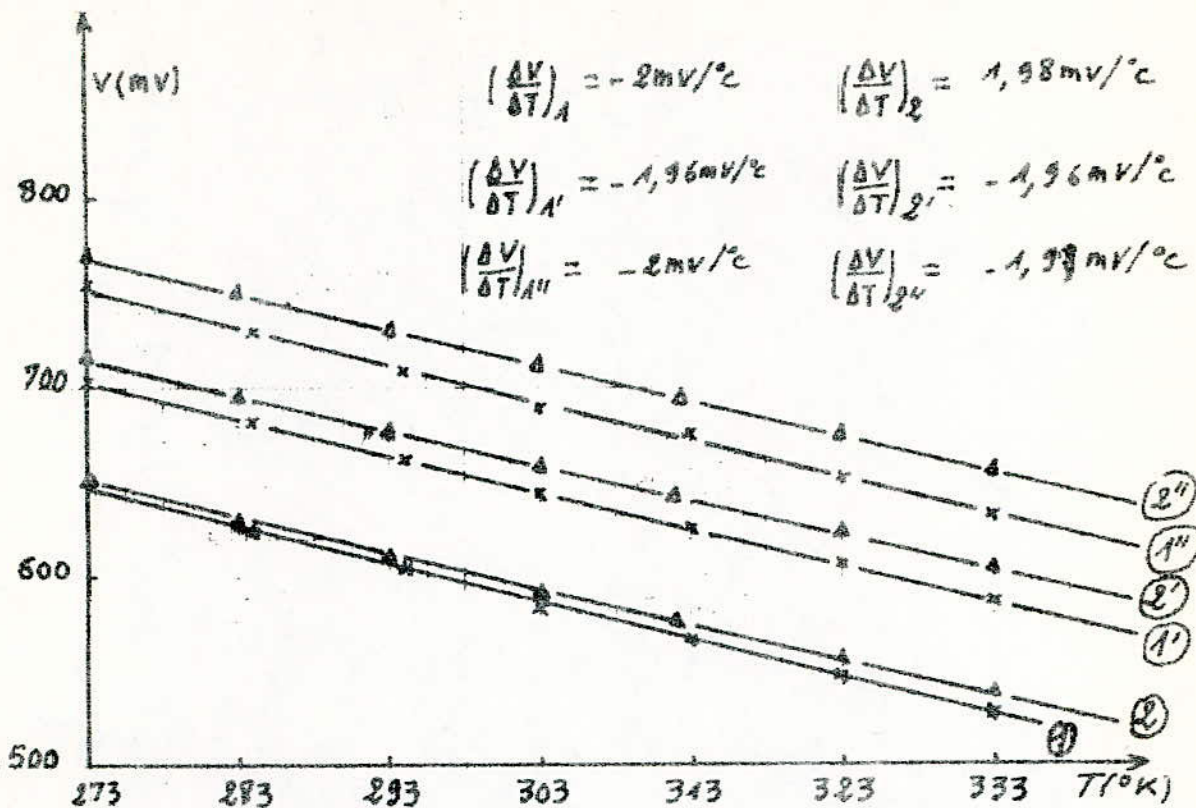


Fig: 44 ①, ①', ①'' courbes  $V=f(T)$  à l'obscurité de la cellule  $n=1$  respectivement pour  $I=40, 70, \text{ et } 100 \text{ mA}$   
 ②, ②', ②'' courbes  $V=f(T)$  à l'obscurité de la cellule  $n=2$  respectivement pour  $I=40, 70, \text{ et } 100 \text{ mA}$

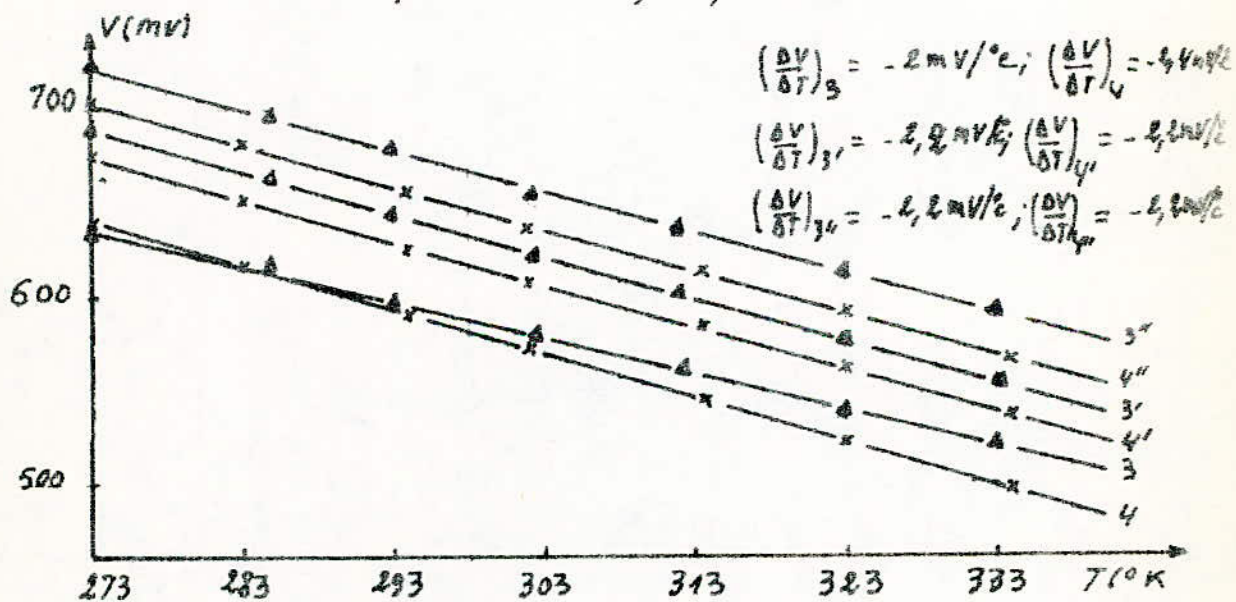


Fig: 45 ③, ③', ③'' courbes  $V=f(T)$  à l'obscurité de la cellule  $n=3$  respectivement pour  $I=40, 70, \text{ et } 100 \text{ mA}$   
 ④, ④', ④'' courbes  $V=f(T)$  à l'obscurité de la cellule  $n=4$  respectivement pour  $I=40, 70, \text{ et } 100 \text{ mA}$



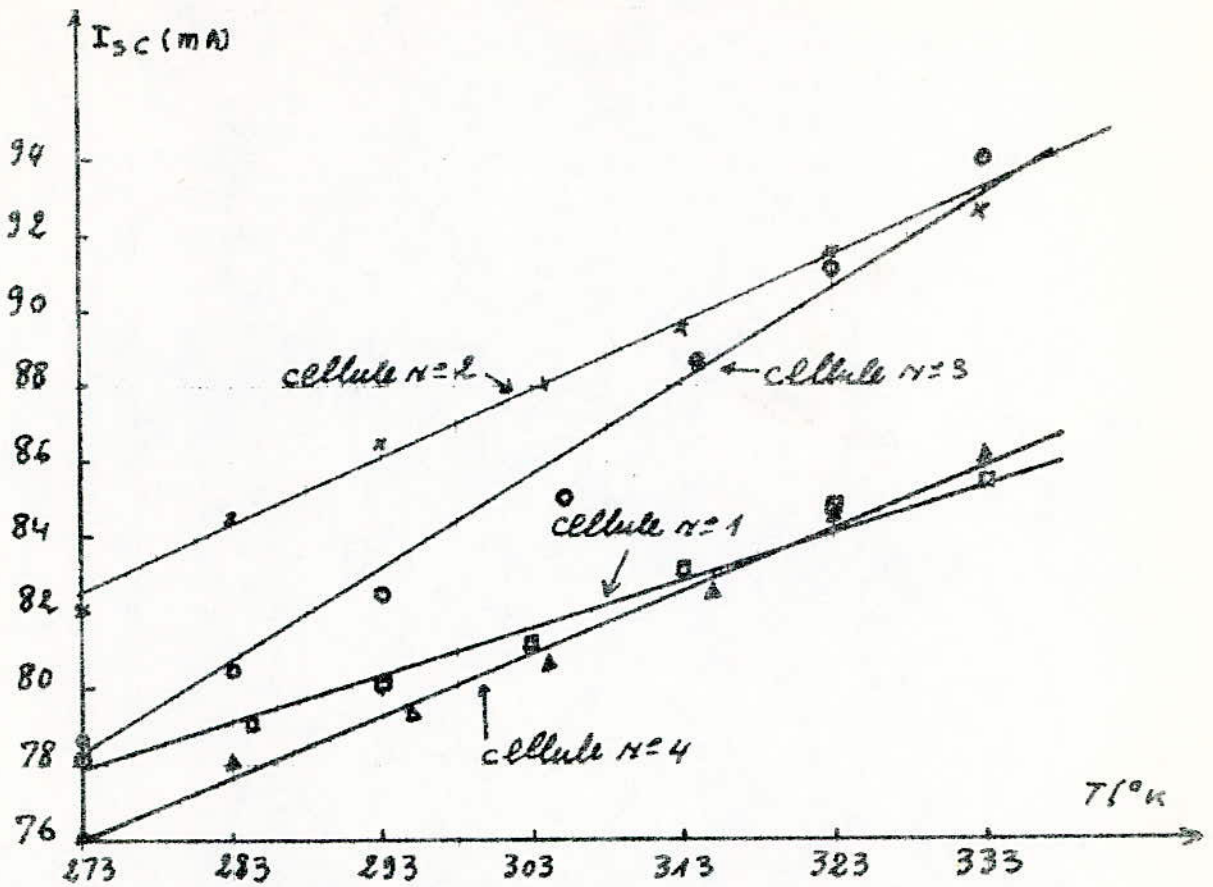


Fig N: 46 Influence de la température sur le courant de court-circuit pour  $E = 72,2 \text{ mW/cm}^2$

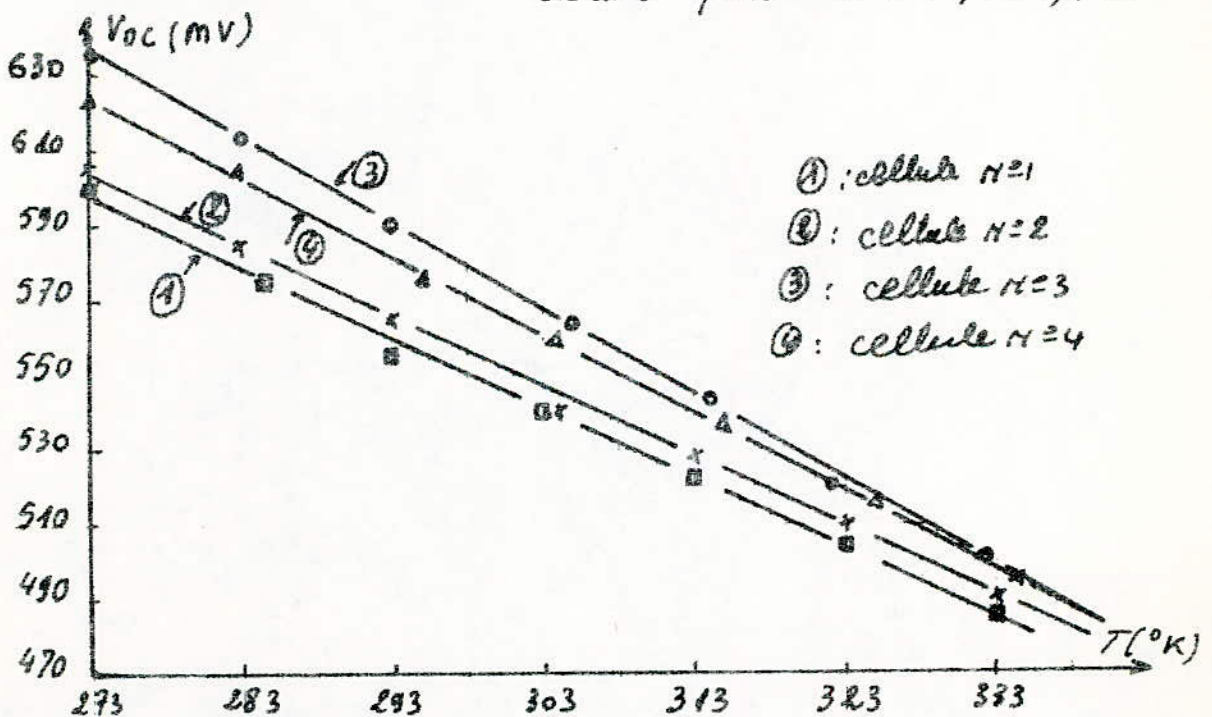


Fig: 47 effet de la température sur la tension de circuit ouvert pour  $E = 72,2 \text{ mW/cm}^2$

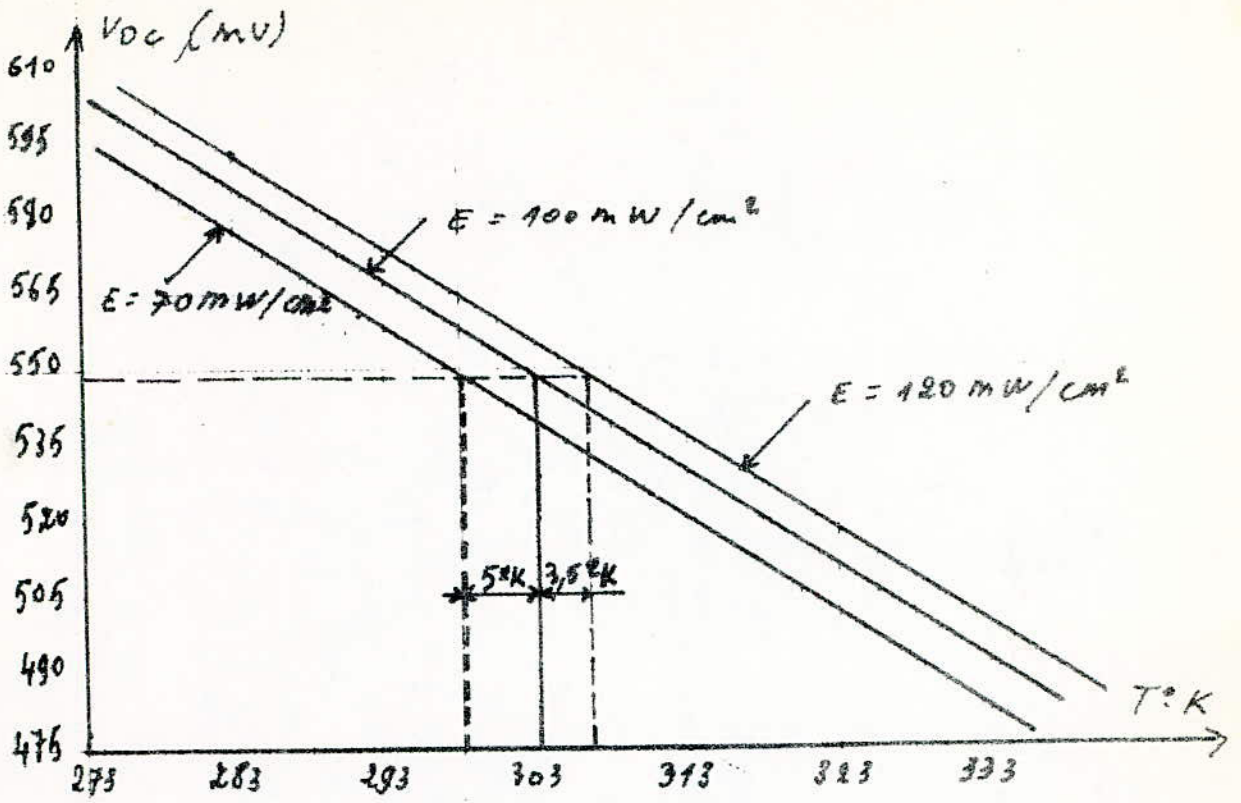


Fig 48 effet de la température et de l'éclairement sur la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ )

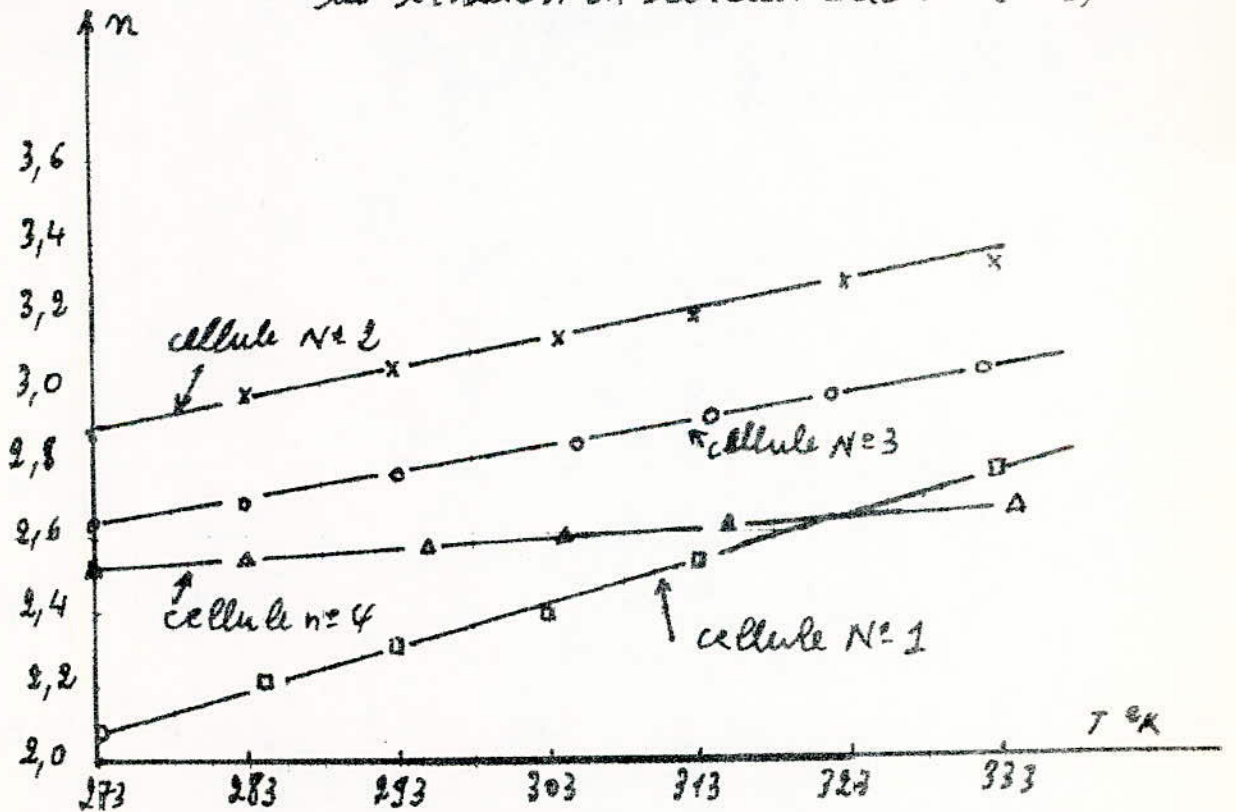


Fig:49 effet de la température sur le facteur d'idéalité  $n$  pour  $E = 72,2 \text{ mW/cm}^2$



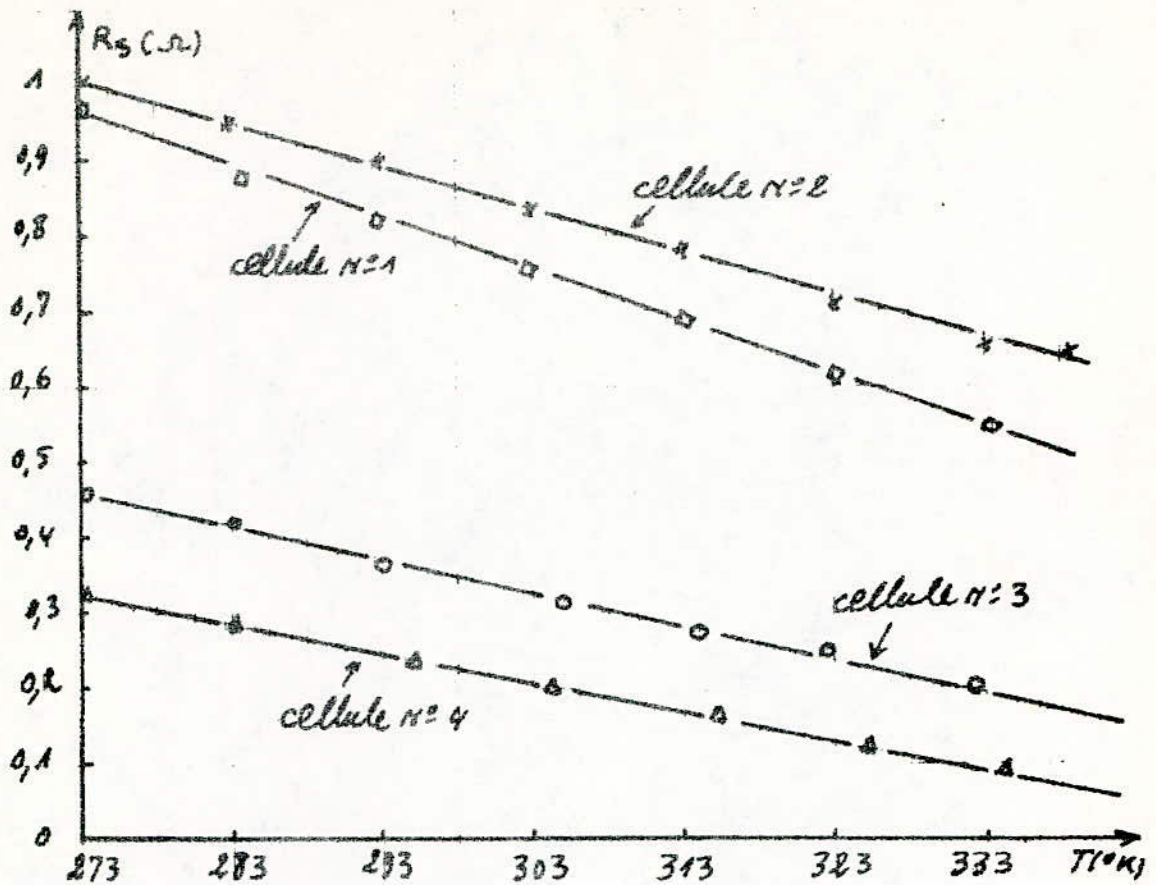


Fig: 50 Influence de la température sur la résistance Série  $R_s$

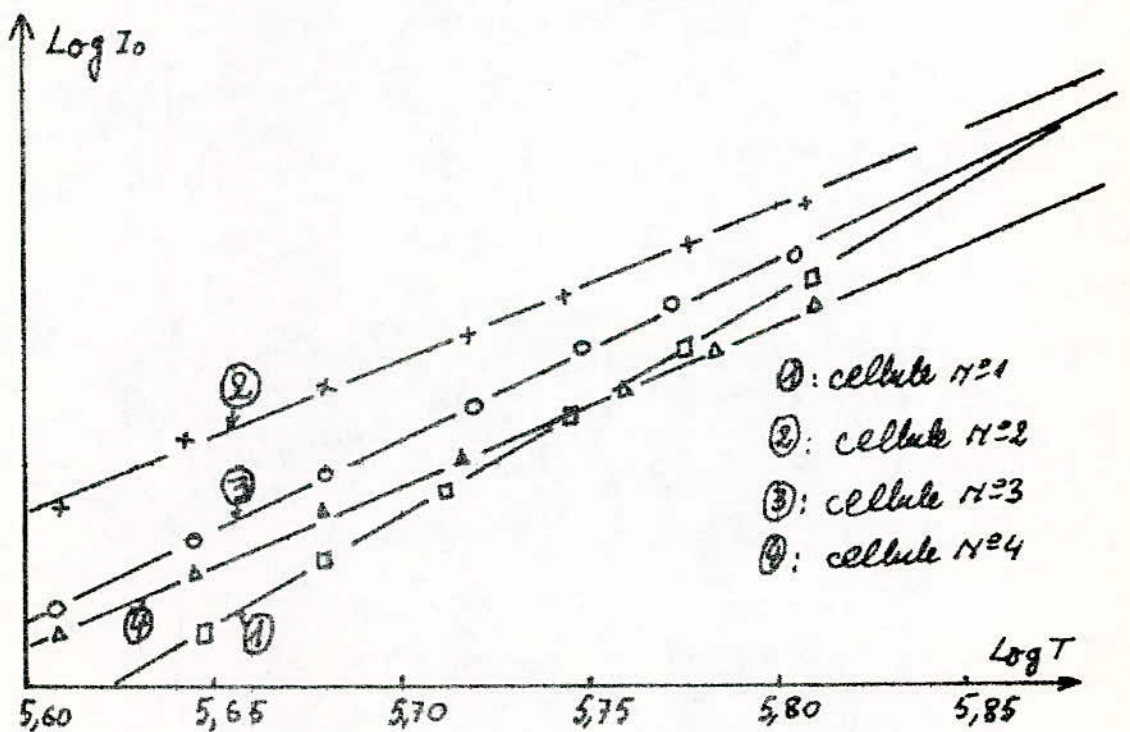


Fig: 51 Influence de la température sur le courant de Saturation  $I_0$

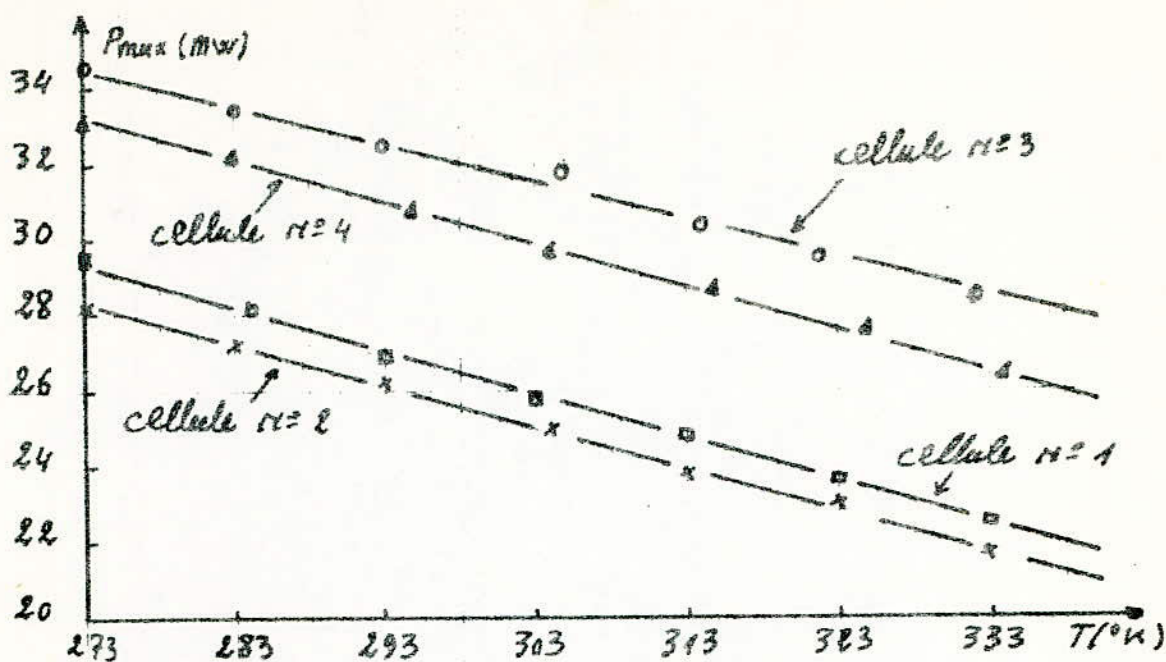


Fig: 52 Influence de la température sur la puissance max

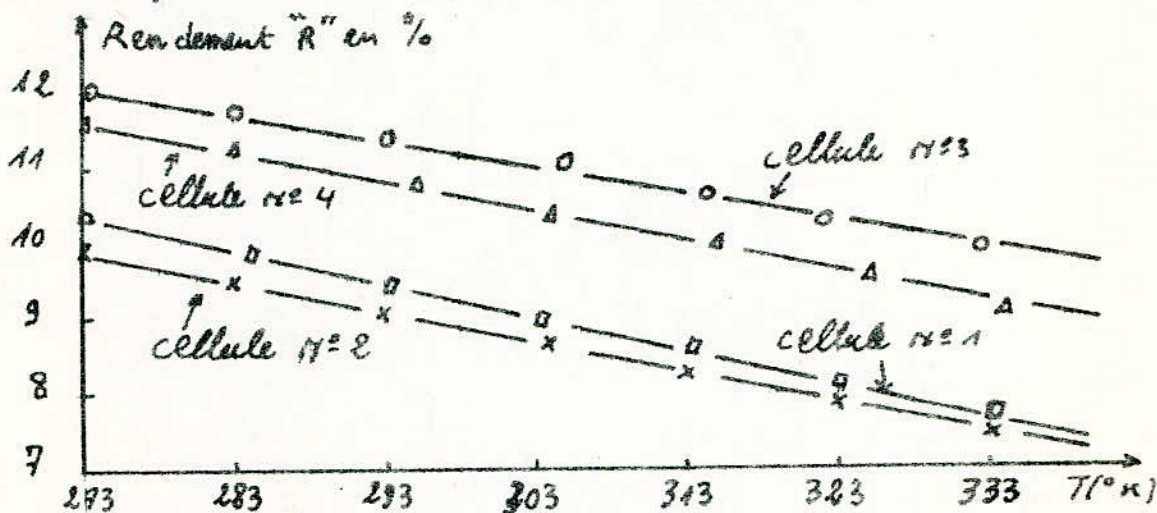


Fig: 53 Influence de la température sur le rendement "R"

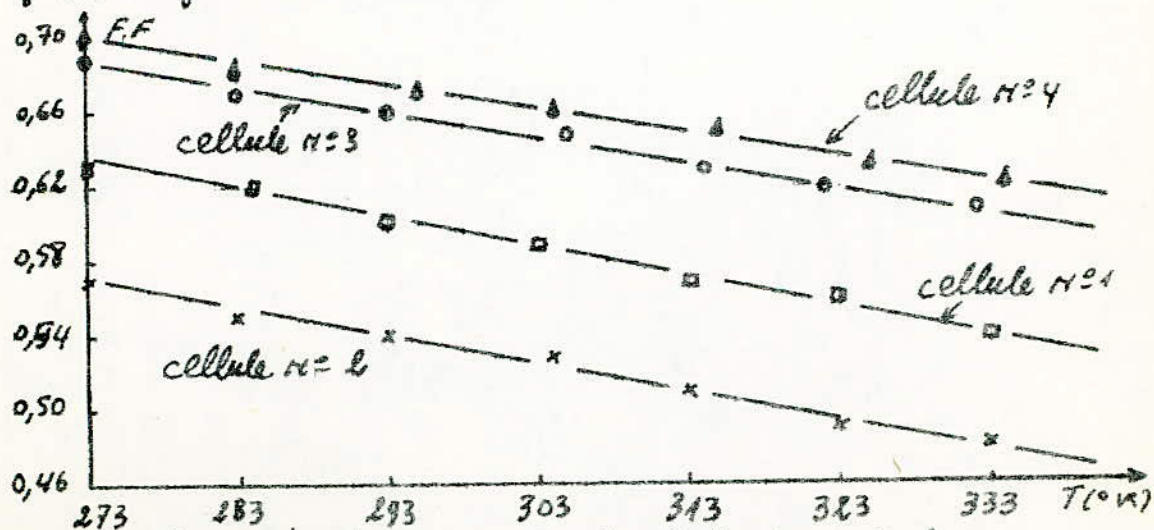


Fig: 54 Influence de la température sur le facteur de forme.



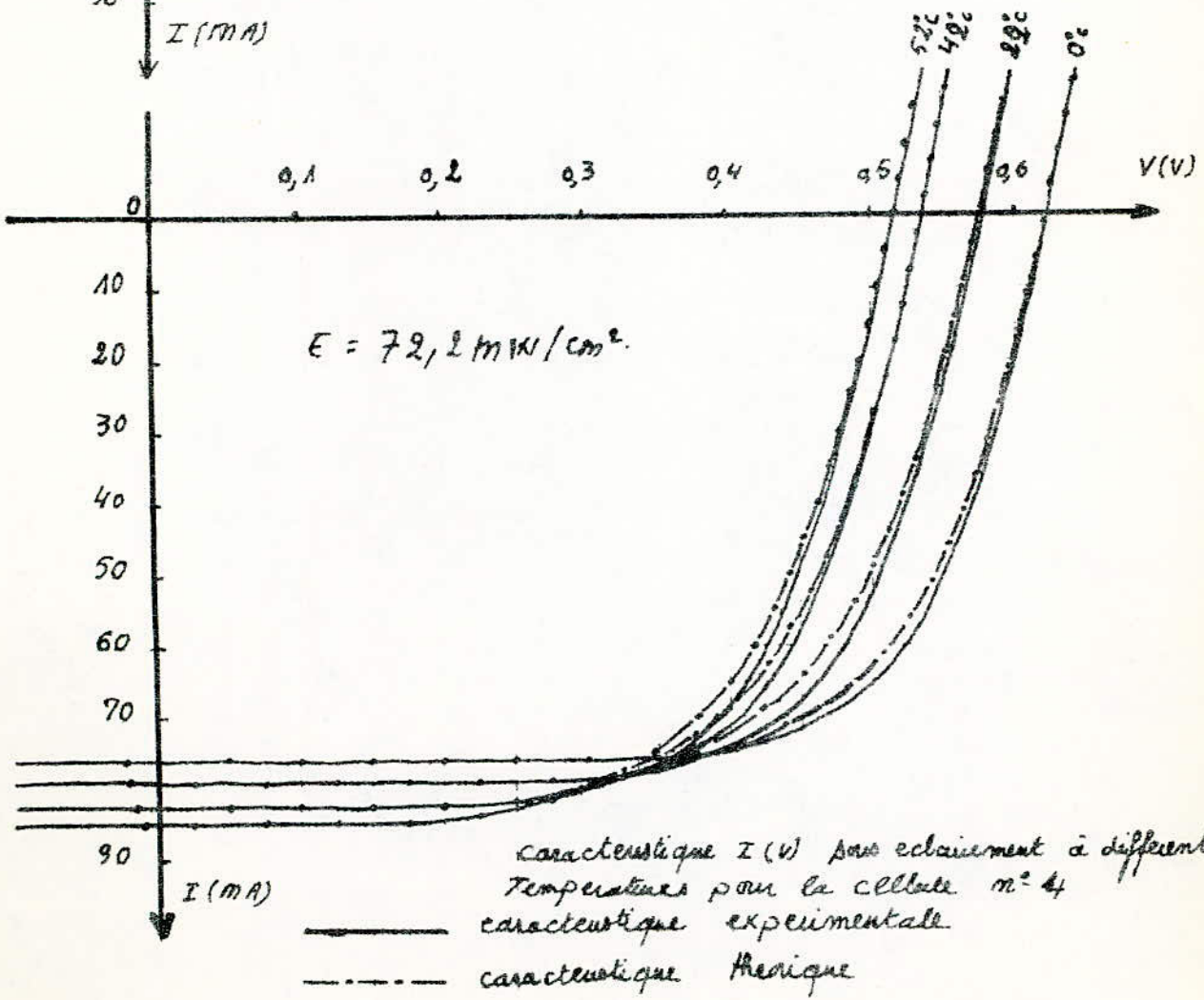
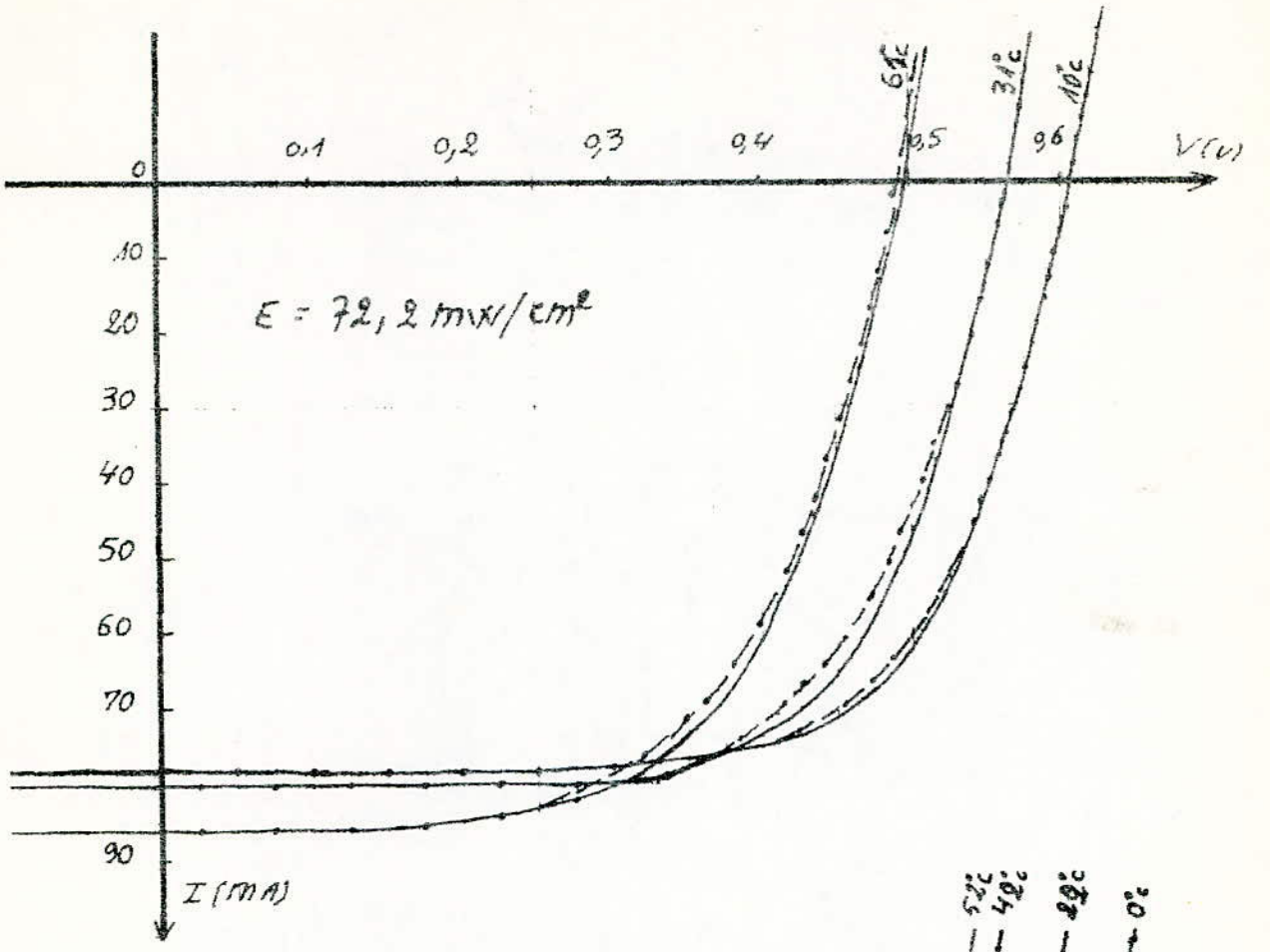


fig: 55

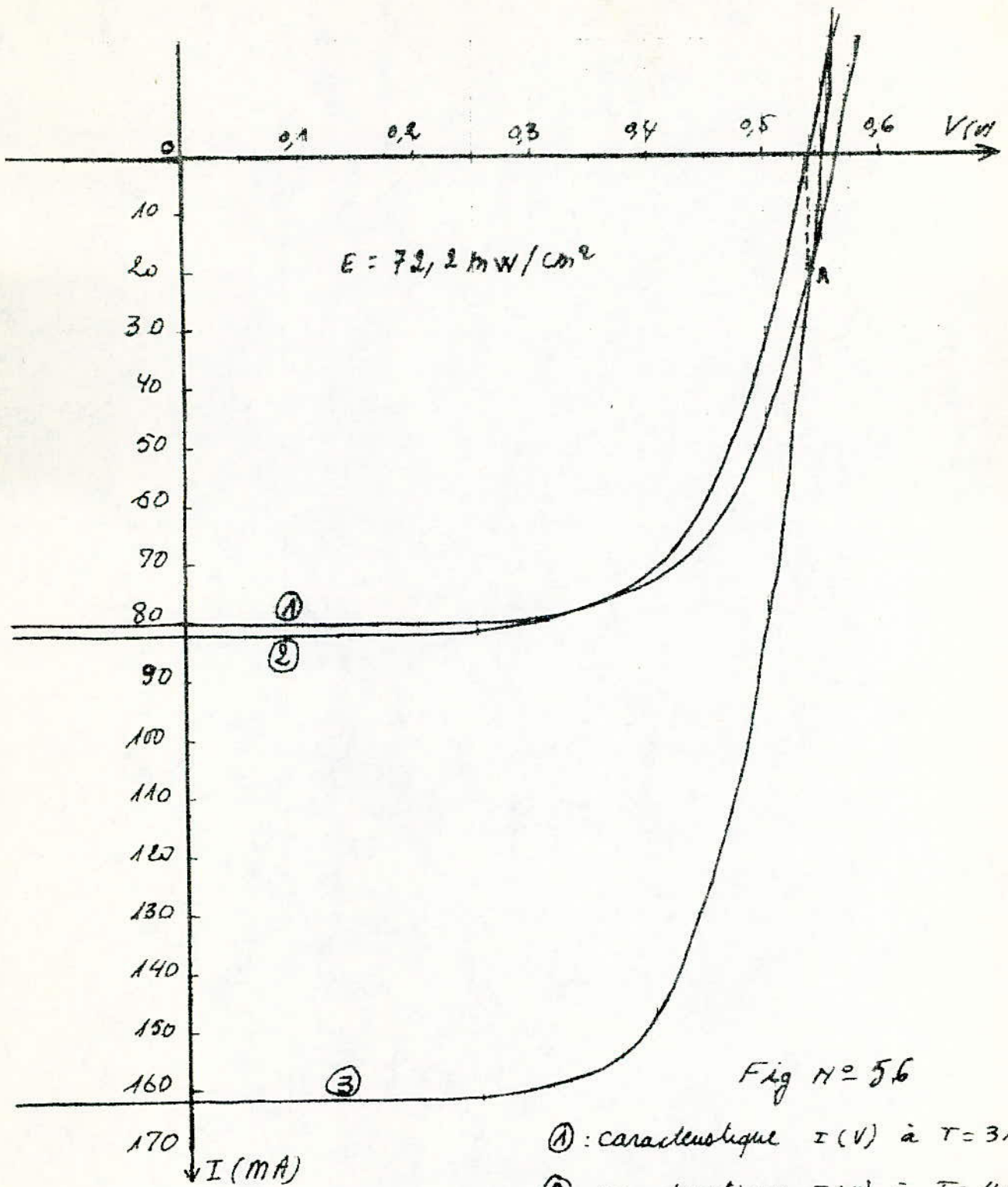
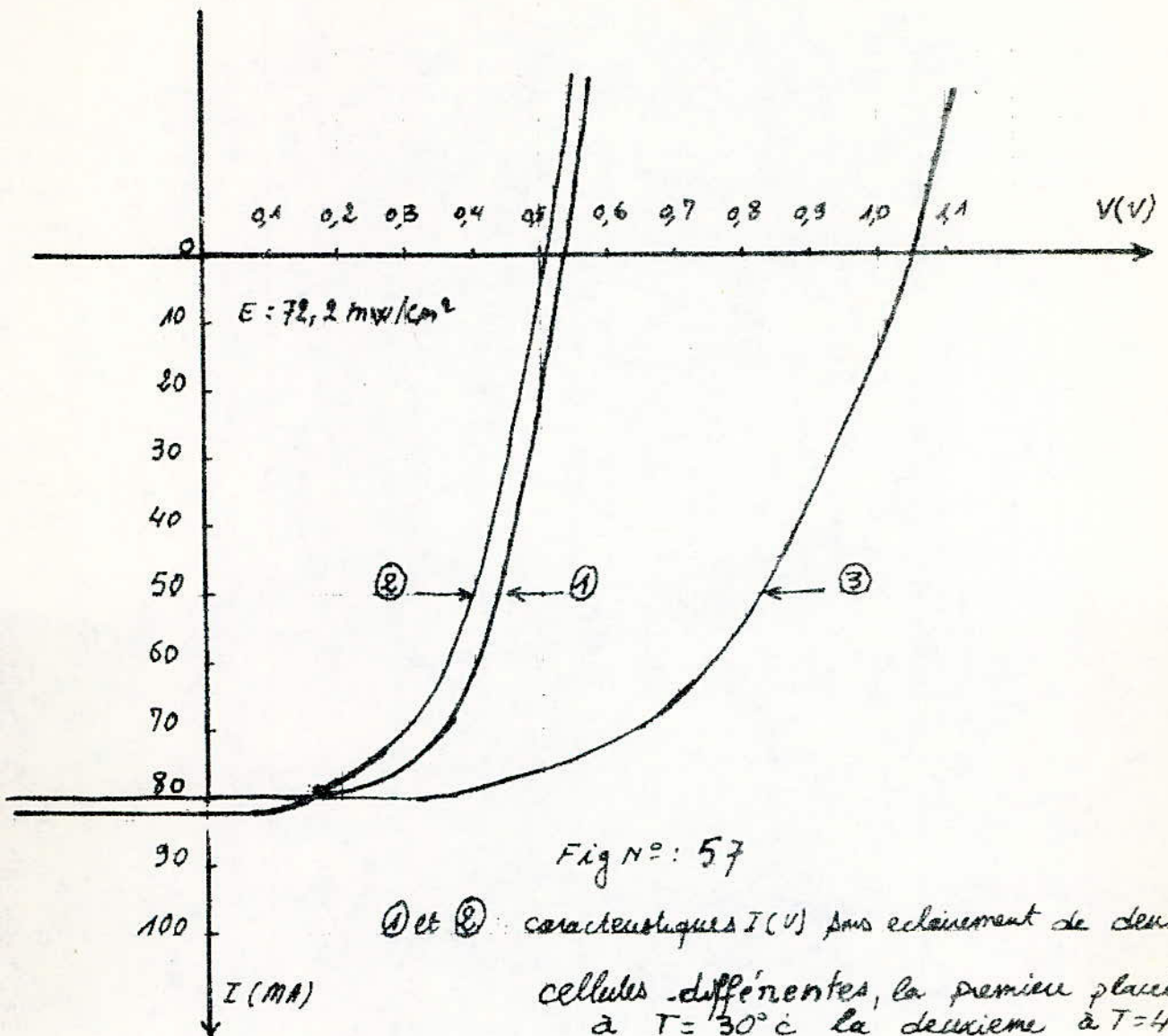


Fig N° 56

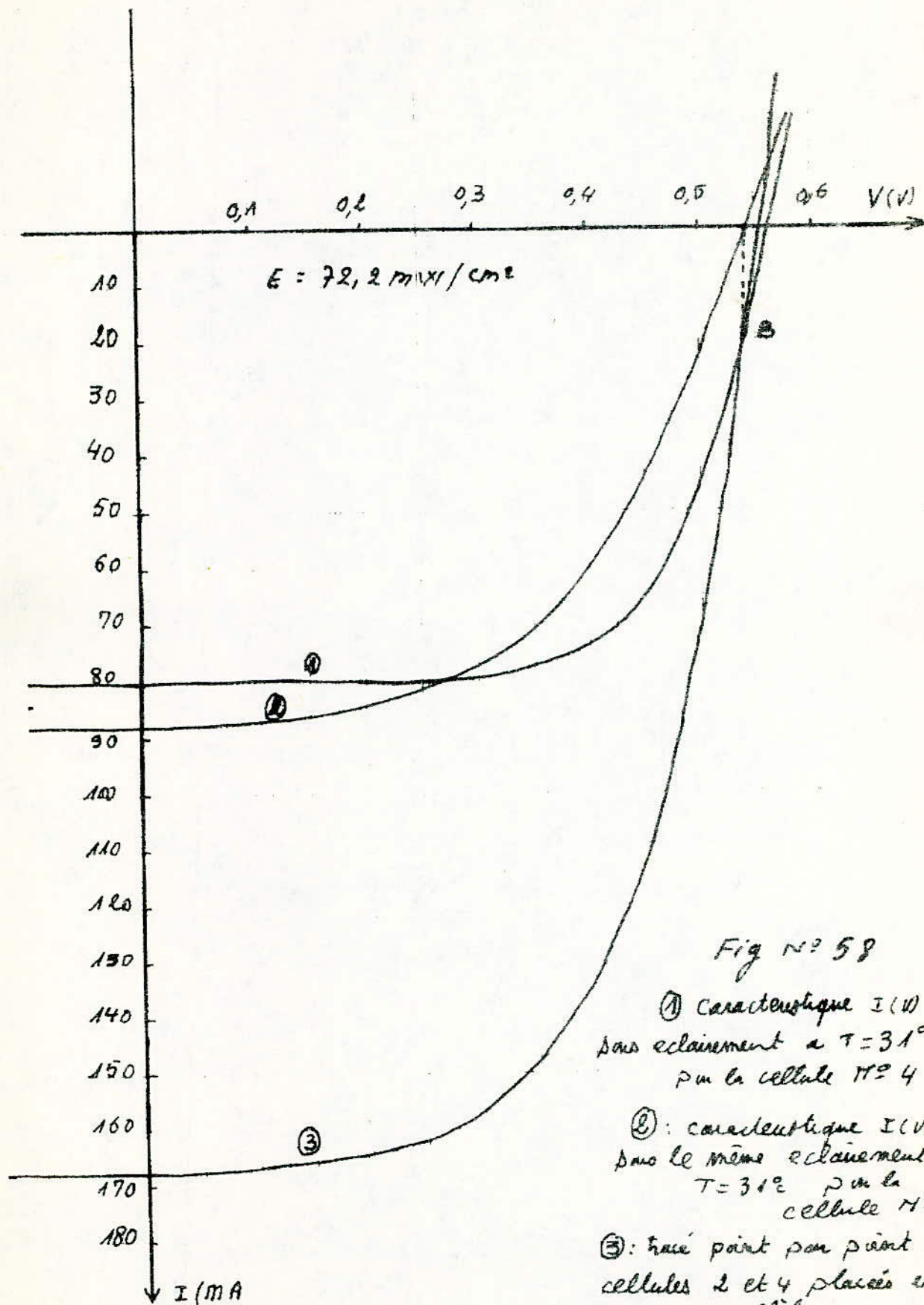
- ① : caractéristique  $I(V)$  à  $T = 31^\circ\text{C}$
- ② : caractéristique  $I(V)$  à  $T = 48^\circ\text{C}$
- ③ : caractéristique  $I(V)$  des 2

Cellules placées en  
parallèle  
(tracé point par point)





- ① et ② : caractéristiques  $I(V)$  sous éclairement de deux cellules différentes, la première placée à  $T = 30^\circ\text{C}$  la deuxième à  $T = 40^\circ\text{C}$
- ③ : caractéristique  $I(V)$  sous éclairement des 2 cellules associées en série.





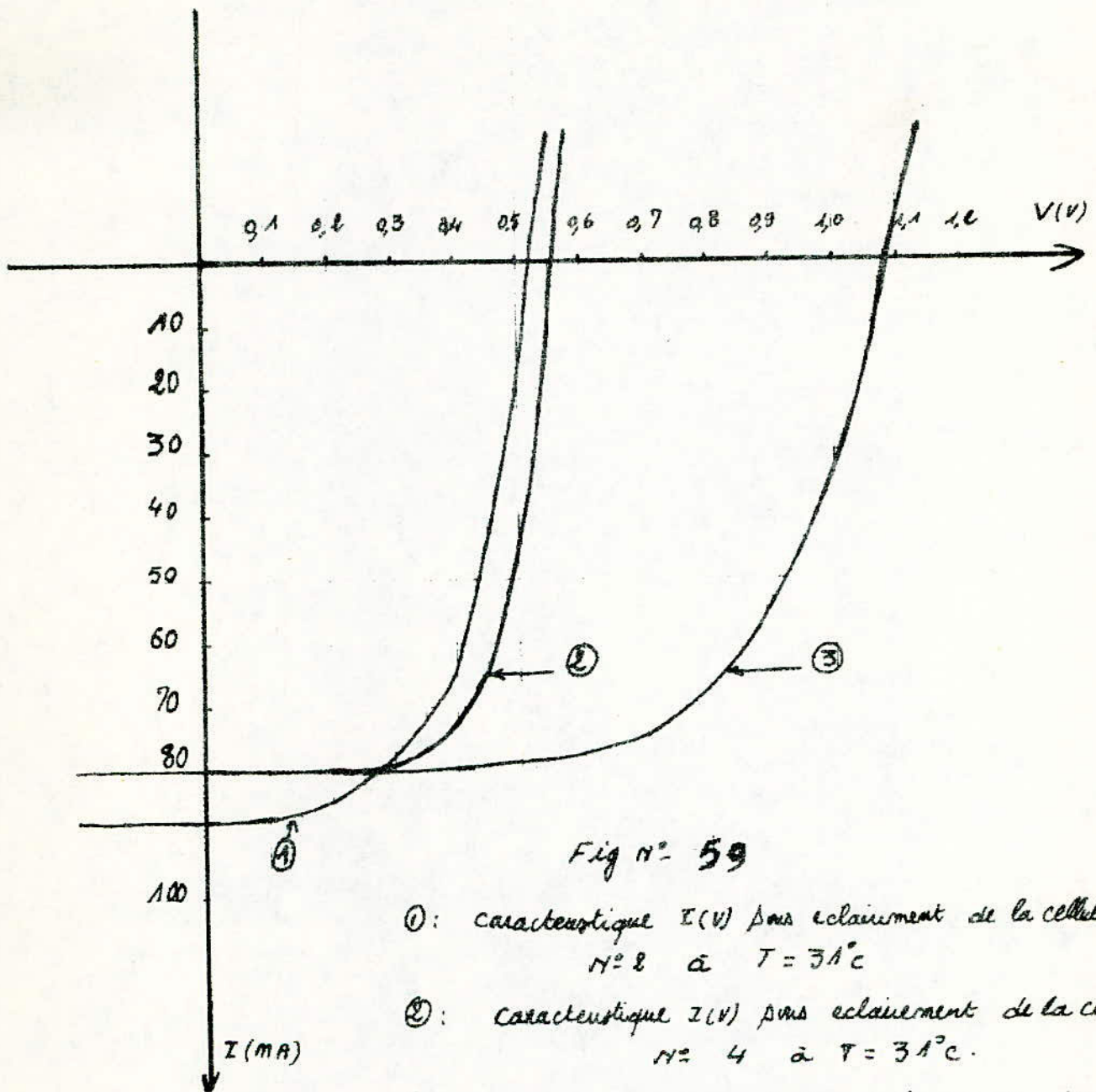


Fig n° 59

- ①: caractéristique  $I(V)$  pour éclairnement de la cellule  
N° 8 à  $T = 31^\circ\text{C}$
- ②: caractéristique  $I(V)$  pour éclairnement de la cellule  
N° 4 à  $T = 31^\circ\text{C}$ .
- ③: caractéristique  $I(V)$  pour éclairnement des  
cellules 2 et 4 placées en série à  $T = 31^\circ\text{C}$

C O N C L U S I O N

L'étude que nous avons effectuée sur quelques cellules au silicium, nous a permis de voir l'influence de l'éclairement et de la température sur leurs caractéristiques courant - tension, ainsi que sur différents paramètres caractérisant les cellules.

Bien que cette étude ne concernait que quatre échantillons, nous avons obtenu des résultats comparables à ceux trouvés par plusieurs auteurs [5].

L'éclairement et la température sont imposés par les conditions du lieu de travail. Ainsi pour avoir un meilleur rendement, il est nécessaire d'utiliser un éclairage intense, mais lorsque ce dernier augmente la température croît. Il en résulte une baisse dans le rendement, par ailleurs la valeur obtenue est toujours acceptable. Cependant, le problème devient important quand on associe plusieurs cellules solaires.

- Au chapitre (3) nous avons vu que la variation de l'éclairement et la température accentuent la dispersion respectivement du courant  $I_{sc}$  et de la tension  $V_{oc}$ . Cette dispersion favorise le vieillissement sinon la destruction des cellules, lorsqu'elles sont associées en série ou en parallèle.

Ainsi, la structure modulaire du générateur photovoltaïque impose certaines précautions lors de l'assemblage, précautions liées au fait qu'il existe inévitablement une dispersion dans les caractéristiques ; et que la garantie du fonctionnement optimal d'un module repose sur l'homogénéité des cellules qui le composent.

- Il importe donc que le constructeur de panneaux solaires devra faire un tri autant sélectif que possible, avant de faire l'assemblage des cellules. Pour cela il devra connaître les écarts existants entre les  $I_{sc}$  et les  $V_{oc}$  des différents échantillons ; ainsi que leurs variations en fonction de l'éclairement et de la température.

Nous pouvons dire que dans la mise en série (obtention d'une haute tension), on devra associer les cellules ayant le même comportement en courant et dans le cas de la mise en parallèle, on devra associer les cellules ayant le même comportement en tension.



DETERMINATION DES DIFFERENTS PARAMETRES /

1 / - A L' OBSCURITE.

1.1. - Détermination de n et R<sub>s</sub> par la méthode graphique.

A une température donnée, ils sont déterminés expérimentalement à partir du tracé :  $\text{Log } I = f(V)$ . En effet à partir de la relation (1) du chapitre on tire :  $\text{Log } I = f(V)$

$$\Rightarrow \text{Log } I \neq \text{Log } I_0 + \frac{(V - R_s I)}{n K T / q} = F(I, V) \quad (1)$$

On voit sur cette expression que le facteur d'idéalité est obtenu en dérivant la fonction  $F(I, V)$  par rapport à  $V$  d'où l'on a :

$$n = \frac{\Delta V}{\frac{K T}{q} \Delta (\text{Log } I)} \quad (2)$$

Le terme  $\frac{\Delta (\text{Log } I)}{\Delta V}$  représente la pente de la partie la plus linéaire du graphe  $\text{Log } I = f(V)$ .

Aux forts courants la droite  $\text{Log } I = f(V)$  s'incline, et tend vers une valeur constante. Cette inclinaison est due à la résistance série, car la chute de tension dans celle-ci est grande d'où  $R_s$  est évaluée comme étant le rapport de la chute de tension à la valeur du courant, où la variation du  $\text{Log } I = f(V)$  est presque négligeable.

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (3)$$

1.2. - Détermination de I<sub>0</sub> par la méthode graphique.

Pour les faibles valeurs de  $I$  et  $V$ , l'influence de  $R_s$  et  $n$  sur la caractéristique  $I(V)$  n'est pas importante donc c'est  $I_0$  qui intervient. D'où en extrapolant la partie la plus linéaire du graphe  $\text{Log } I = f(V)$ , on obtiendra  $I_0$  qui correspond à l'intersection de la droite prolongée et l'axe  $\text{Log } I$  (voir fig. 14)

1.3. - Détermination de R<sub>s</sub>, n, I<sub>0</sub> par le calcul.

A partir de la caractéristique courant - tension on prélève trois points essentiels de la manière suivante :

En chaque point, un seul des trois paramètres domine,

- Le point  $P_1 (I_1, V_1)$  où  $I_0$  est le facteur influent par rapport à  $n$  et  $R_s$  -
- Le point  $P_2 (I_2, V_2)$  où  $n$  est le facteur influent par rapport à  $I_0$  et  $R_s$  -
- Le point  $P_3 (I_3, V_3)$  où  $R_s$  est le facteur influent par rapport à  $n$  et  $I_0$  -

Puisque  $P_1 (I_1, V_1)$  appartient à  $I(V)$  donc il doit obéir à la loi suivante :

$$I_1 = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{V_1 - R_s I_1}{n K T} \right) - 1 \right\} \quad (a)$$

De même pour  $P_2$  on a :

$$I_2 = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{V_2 - R_s I_2}{\frac{n K T}{q}} \right) - 1 \right\} \quad (b)$$

De même pour  $P_3$  on a :

$$I_3 = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{V_3 - R_s I_3}{\frac{n K T}{q}} \right) - 1 \right\} \quad (c)$$

Les "quations (a), (b), (c) peuvent s'écrire la manière suivante :

$$\frac{n K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_1}{I_0} + 1 \right) = V_1 - R_s I_1 \quad (a)$$

$$\frac{n K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_2}{I_0} + 1 \right) = V_2 - R_s I_1 \quad (b)$$

$$\frac{n K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_3}{I_0} + 1 \right) = V_3 - R_s I_1 \quad (c)$$

Posons  $M_1 = \frac{K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_1}{I_0} + 1 \right)$  ;  $M_2 = \frac{K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_2}{I_0} + 1 \right)$  ;  $M_3 = \frac{K T}{q} \text{Log} \left( \frac{I_3}{I_0} + 1 \right)$

$$\Rightarrow \text{on a } \begin{cases} n M_1 = V_1 - R_s I_1 & (a) \\ n M_2 = V_2 - R_s I_2 & (b) \\ n M_3 = V_3 - R_s I_3 & (c) \end{cases}$$

$$\boxed{n = \frac{V_2 - R_s I_2}{M_2}} \quad (b)' \quad (4)$$

L'équation (c) donne :  $V_3 - R_s I_3 = \frac{M_3}{M_2} (V_2 - R_s I_2)$

$$\boxed{R_s = \frac{M_2 V_3 - M_3 V_2}{M_2 I_3 - M_3 I_2}} \quad (5)$$

$$(a) \quad V_1 - \left( \frac{M_2 V_3 - M_3 V_2}{M_2 I_3 - M_3 I_2} \right) I_1 = M_1 \left( \frac{V_2 - I_2 \left( \frac{M_2 V_3 - M_3 V_2}{M_2 I_3 - M_3 I_2} \right)}{M_2} \right)$$

Soit  $N = \frac{M_3}{M_2}$  et  $L = \frac{M_1}{M_2}$

L'équation (a) devient :

$$(V_1 I_3 - V_3 I_1) + N (V_2 I_1 - V_1 I_2) = L (V_2 I_3 - V_3 I_2) \quad (a)'$$

Posons :  $\alpha = V_1 I_3 - V_3 I_1$  et  $X_1 = \frac{I_1}{I_0} + 1$

$\beta = V_2 I_1 - V_1 I_2$  et  $X_2 = \frac{I_2}{I_0} + 1$

$\gamma = V_2 I_3 - V_3 I_2$  et  $X_3 = \frac{I_3}{I_0} + 1$

D'où l'équation (a)' devient :

$$\alpha + \beta \cdot \frac{M_3}{M_2} = \gamma \cdot \frac{M_1}{M_2} \Rightarrow M_2 \alpha + \beta M_3 = \gamma M_1$$



En remplaçant  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  par leur expression on aura :

$$\alpha \text{ Log } X_2 + \beta \text{ Log } X_3 = \gamma \text{ Log } X_1$$

$$\text{Log } X_2^\alpha + \text{Log } X_3^\beta = \text{Log } X_1^\gamma \Rightarrow \text{Log } (X_2^\alpha \cdot X_3^\beta) = \text{Log } X_1^\gamma$$

$$X_2^\alpha \cdot X_3^\beta = X_1^\gamma$$

$$\Rightarrow \left( \frac{I_2}{I_0} + 1 \right)^\alpha \cdot \left( \frac{I_3}{I_0} + 1 \right)^\beta = \left( \frac{I_1}{I_0} + 1 \right)^\gamma \quad \text{car } \frac{I_2}{I_0} \gg 1$$

$$\text{et } \frac{I_3}{I_0} \gg 1$$

$$\text{et } \frac{I_1}{I_0} \gg 1$$

$$I_2^\alpha \cdot I_3^\beta \cdot I_1^{-\gamma} = I_0^{\alpha + \beta - \gamma}$$

$$\begin{array}{l} \vdots \\ \vdots \text{ Log } I_0 = \alpha \text{ Log } I_2 + \beta \text{ Log } I_3 - \gamma \text{ Log } I_1 \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \alpha + \beta - \gamma \\ \vdots \end{array} \quad (6)$$

## 2 / - SOUS - ECLAIREMENT.

### 2.1. - Détermination de $R_s$ .

En dérivant l'équation (2) du chapitre II par rapport à la tension

V, il vient :

$$\frac{dI}{dV} = I_0 \cdot \left\{ \frac{1}{\frac{nKT}{q}} \exp\left(\frac{V + R_s I}{nKT/q}\right) + \frac{R_s/I}{\frac{nKT}{q}} \right\} + \frac{R_s}{\frac{nKT}{q}} \cdot \frac{dI}{dV} \exp\left(\frac{V + R_s I}{\frac{nKT}{q}}\right)$$

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I_0}{\frac{nKT}{q}} \left\{ 1 + R_s \cdot \frac{dI}{dV} \right\} \exp\left(\frac{V + R_s I}{\frac{nKT}{q}}\right)$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{(I - I_{sc} - I_0)}{\frac{nKT}{q}} \cdot \left\{ 1 + R_s \frac{dI}{dV} \right\}$$

$$\text{d'où } \begin{array}{l} \vdots \\ \vdots R_s = \frac{nKT/q}{I - I_{sc} - I_0} - \frac{dV}{dI} \\ \vdots \end{array}$$

Cette formulation est également valable en circuit ouvert, où on peut relever la valeur de la pente  $\frac{dV}{dI}$ , de plus on a :

$$I = 0 \text{ et } I_0 \ll I_{sc} \text{ d'où l'expression}$$

$$\begin{array}{l} \vdots \\ \vdots R_s = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{Voc} - \frac{nKT/q}{I_{sc}} \\ \vdots \end{array} \quad (7)$$

### 2.2. - Détermination du facteur d'idéalité.

Soit deux points de la caractéristiques  $I(V)$  situés entre le coude et le circuit ouvert. Ces 2 points sont définis par la valeur du





Le rendement de conversion de la cellule solaire est donné par la relation :

$$R = \frac{\text{Puissance maximale}}{\text{Puissance incidente}}$$

$$R = \frac{I_{mp} V_{mp} \text{ (W/ m}^2 \text{ )}}{P_i \text{ ( W / m}^2 \text{ )}} \quad (10)$$

3 / - CALCUL D'ERREUR.3.1. - Calcul d'incertitude des paramètres des cellules à l'obscurité.3.1.1. - Calcul d'incertitude sur n.

On suppose qu'il y a une incertitude qui se fait sur I et V.

- dûe à la lecture des courants et des tensions sur le graphe.

- Soient  $\Delta V$  et  $\Delta I$  respectivement les incertitudes absolues totales sur la tension et le courant.

$$n = \frac{V_1 - V_2}{(\log I_1 - \log I_2) (K T / q)}$$

$$\Delta n = \frac{\Delta (V_1 - V_2) [\log I_1 - \log I_2] + (V_1 - V_2) \Delta (\log I_1 - \log I_2)}{2,3 (\log I_1 - \log I_2)^2 K T / q} \quad (1)$$

$$\Delta n = \frac{V_1 - V_2}{2,3 (\log I_1 - \log I_2) K T / q} \left\{ \frac{2 \Delta V}{V_1 - V_2} + \frac{\Delta I \left( \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} \right)}{\log I_1 - \log I_2} \right\}$$

3.1.2. - Calcul d'incertitude sur  $R_s$ .

$$\frac{\Delta R_s}{R_s} = \left| \frac{\Delta (\Delta V)}{\Delta V} \right| - \left| \frac{\Delta (\Delta I)}{\Delta I} \right| \quad (2)$$

3.2. - Calcul d'incertitude des cellules sous éclairagements.3.2.1. - Calcul d'incertitude sur n.

D'après la relation (8) de l'annexe (1) on a :

$$n = \frac{B_1 - B_2}{\log \left( \frac{A_1}{A_2} \right) + D_1 - D_2}$$

$$\text{Posons : } B_1 - B_2 = N = \frac{V_1 - V_2 + C (I_1 - I_2)}{K T / q}$$

$$\text{et } D_1 - D_2 + \log \left( \frac{A_1}{A_2} \right) = M = \frac{I_1 - I_2}{I_{sc}} + \log \left( \frac{I_{sc} - I_1}{I_{sc} - I_2} \right)$$

L'incertitude sur n peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\frac{\Delta n}{n} = \left| \frac{\Delta N}{N} \right| - \left| \frac{\Delta M}{M} \right| \quad (3)$$

Soit  $\Delta I$  l'erreur sur I dûe à la lecture du courant sur le tracé, et à la table traçante.

Soit  $\Delta V$  l'erreur sur V dûe à la lecture de la tension sur le tracé.

Soit  $\frac{\Delta C}{C}$  l'incertitude relative sur la valeur de C.



Nous avons donc :  $\Delta N = \frac{1}{KT/q} \left( 2 \Delta V + 2 C \Delta I + C (I_1 - I_2) \frac{\Delta C}{C} \right)$

$$\Delta M = \frac{\Delta I}{I_{sc}} (D_1 - D_2 + 2) + 2 \Delta I \left( \frac{A_1 + A_2}{A_1 \cdot A_2} \right)$$

3.2.2. - Calcul d'incertitude sur  $R_s$

$$R_s = C \frac{n K T / q}{I_{sc}}$$

$$\Delta R_s = C \frac{\Delta C}{C} + K T / q \left[ \frac{\Delta n \cdot I_{sc} + n \Delta I}{(I_{sc})^2} \right]$$

$$\Delta R_s = C \frac{\Delta C}{C} + \frac{n K T / q}{I_{sc}} \left[ \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta I}{I_{sc}} \right] \quad (4)$$

3.2.3. - Calcul d'incertitude sur  $I_o$

On sait que :  $I_o = I_{sc} \exp \left( - \frac{V_{oc}}{n K T / q} \right)$

$$\Rightarrow \log I_o = \log I_{sc} + \left( - \frac{V_{oc}}{n K T / q} \right)$$

$$\frac{\Delta I_o}{I_o} = \frac{\Delta I}{I_{sc}} + \frac{\Delta V \cdot n K T / q + \Delta n \cdot V_{oc} K T / q}{(n K T / q)^2}$$

$$\frac{\Delta I_o}{I_o} = \frac{\Delta I}{I_{sc}} + \frac{V_{oc}}{n K T / q} \left[ \frac{\Delta V}{V_{oc}} + \frac{\Delta n}{n} \right] \quad (5)$$

3.2.4. - Calcul d'incertitude sur la puissance maximale.

$$P_M = I_M \cdot V_M$$

$$\Delta P_M = V_M \Delta I + I_M \Delta V = P_M \left( \frac{\Delta I}{I_M} + \frac{\Delta V}{V_M} \right) \quad (6)$$

3.2.5. - Calcul d'incertitude sur F.F.

$$F.F = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

$$\Delta(F.F) = \left( \frac{\Delta P_M}{P_M} + \frac{\Delta (V_{oc} \cdot I_{sc})}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \right) \cdot \frac{P_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

$$= \left( \frac{\Delta I}{I_M} + \frac{\Delta V}{V_M} + \frac{\Delta I}{I_{sc}} + \frac{\Delta V}{V_{oc}} \right) \cdot \frac{P_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

$$\Rightarrow \Delta(F.F) = F.F \left\{ \Delta I \left( \frac{1}{I_M} + \frac{1}{I_{sc}} \right) + \Delta V \left( \frac{1}{V_{oc}} + \frac{1}{V_M} \right) \right\} \quad (7)$$

REALISATION D'UNE ALIMENTATION STABILISEE REGLABLE.

Comme il a été dit au chapitre trois la caractérisation des cellules solaires nécessite l'utilisation d'une double alimentation stabilisée réglable, celle-ci a été construite par nos soins.

Notre alimentation se compose de deux modules dont les schémas sont donnés aux figures ( 60 à 65 ).

MODULE ALIMENTATION STABILISEE.

Pour ce module nous avons utilisé le schéma d'une alimentation stabilisée à circuit intégré, la présence d'un tel élément dans le schéma permet d'avoir une très bonne stabilité.

Les tensions délivrées sont de  $\pm 12$  volts.

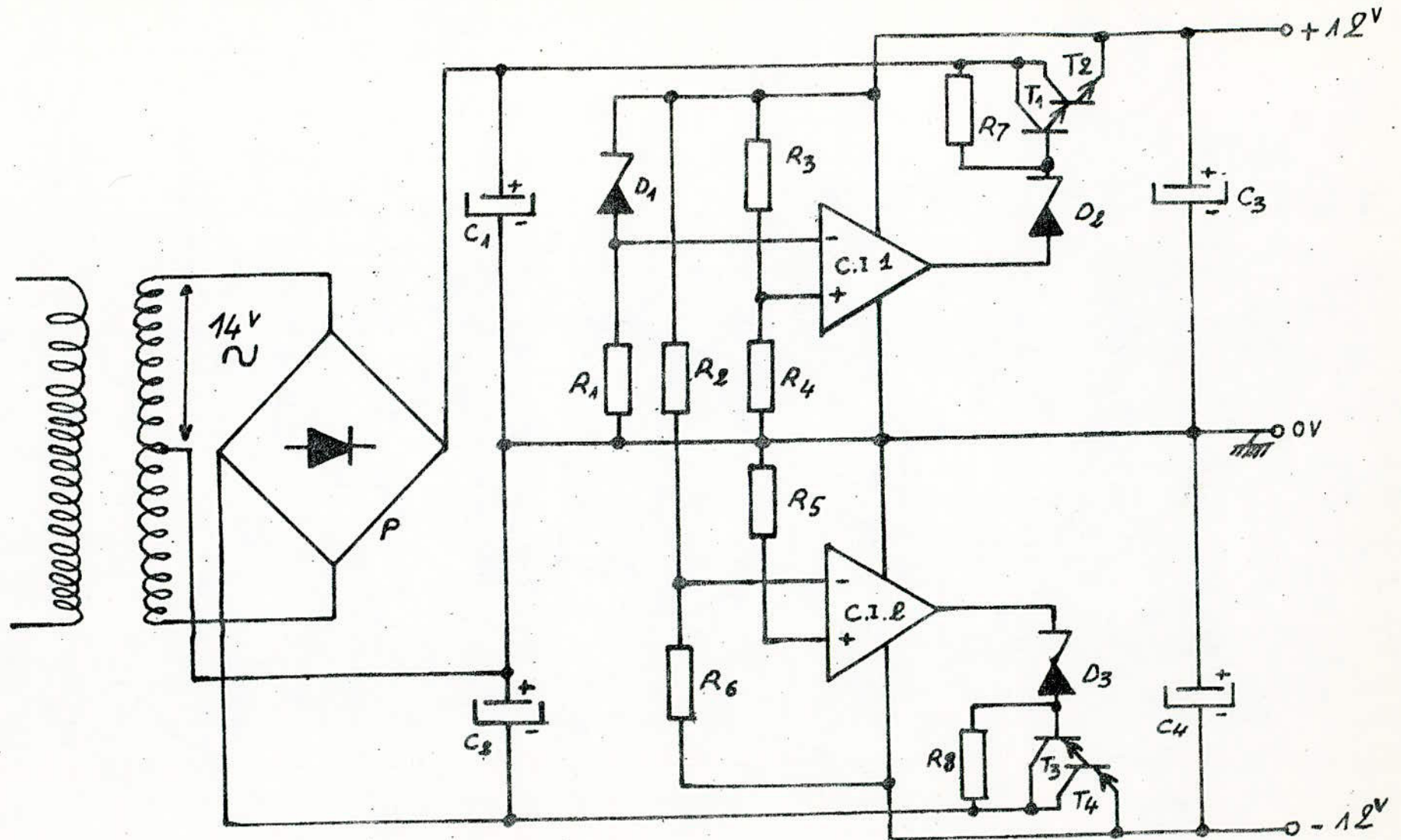
MODULE AMPLIFICATION.

Le schéma du module est donné à la fig. ( 63 ) il est attaqué par les tensions  $\pm 12$  volts.

Les Résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont des résistances butées, les diodes  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  et  $D_4$  sont des diodes de protections, les transistors  $T_1$  à  $T_4$  sont utilisés pour une amplification en courant.

Le potentiomètre P permet d'avoir à la sortie une tension réglable entre - 3,5 et + 3,5 volts. Tensions suffisantes pour la caractérisation de la plus part des cellules.

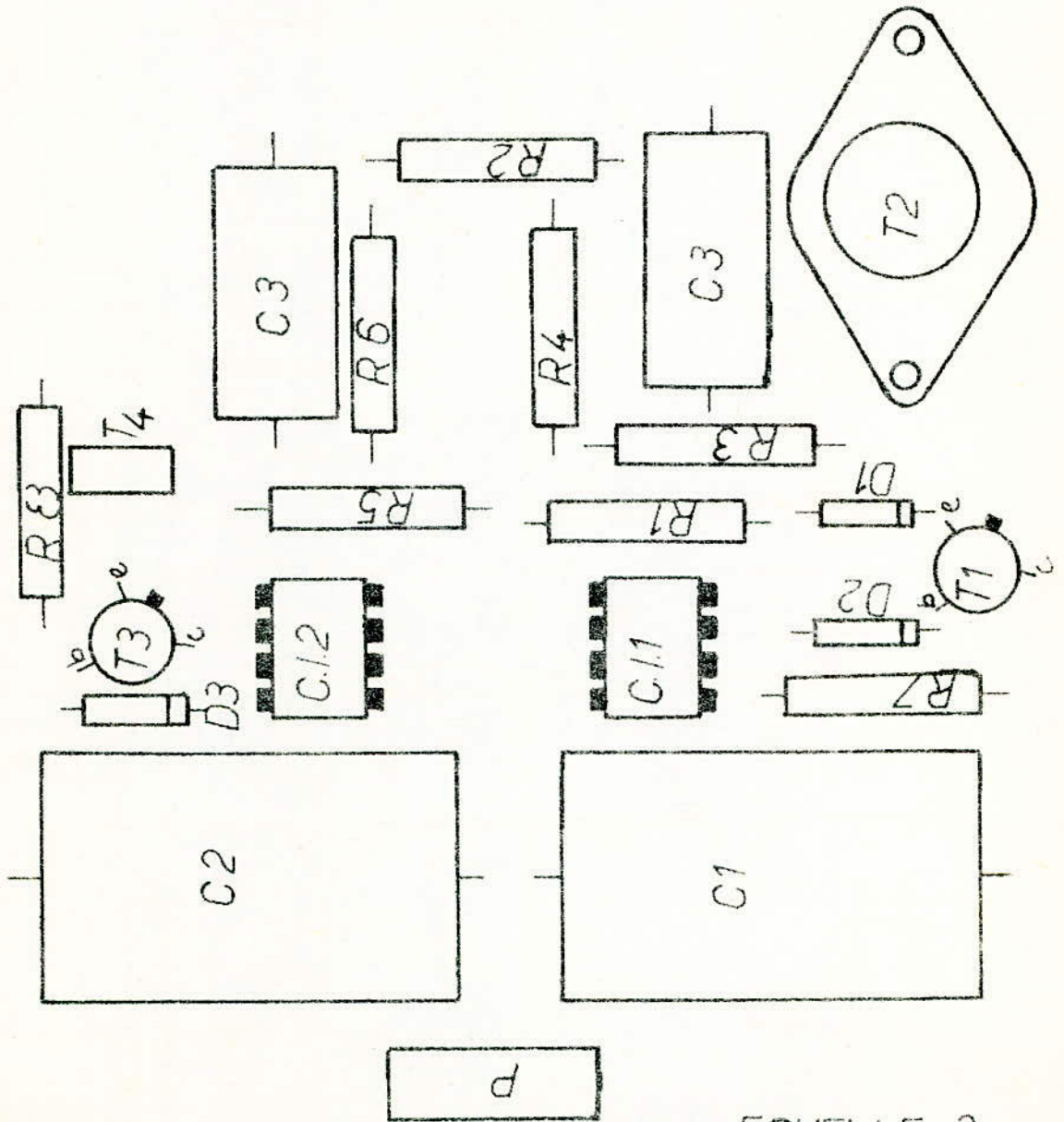




ALIMENTATION

ALIMENTATION

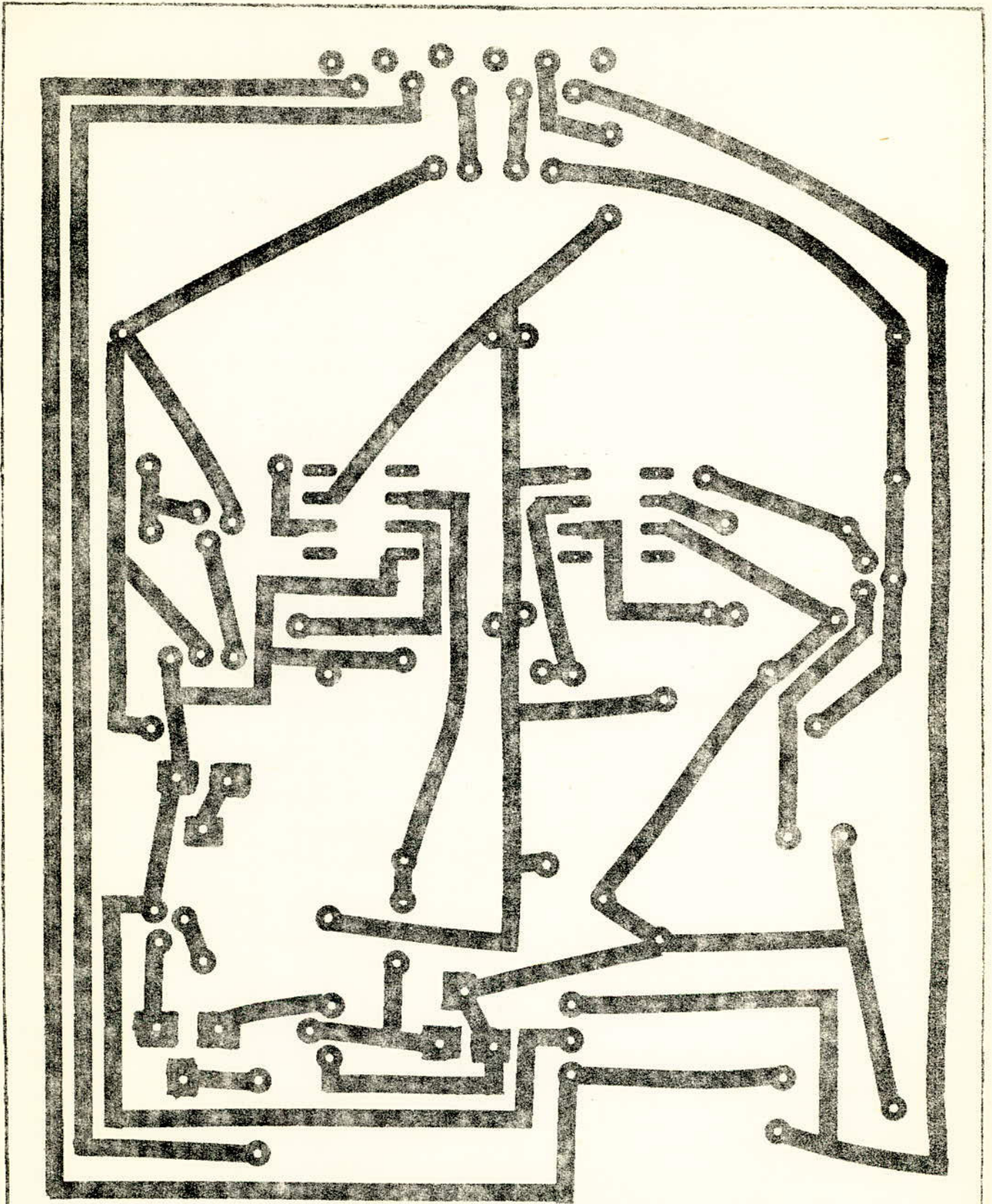
face éléments



ECHELLE : 2

Fig 61





LCCM

Alimentation

circuit imprimé

Fig 62

Echelle 2

# AMPLIFICATEUR

Face elements

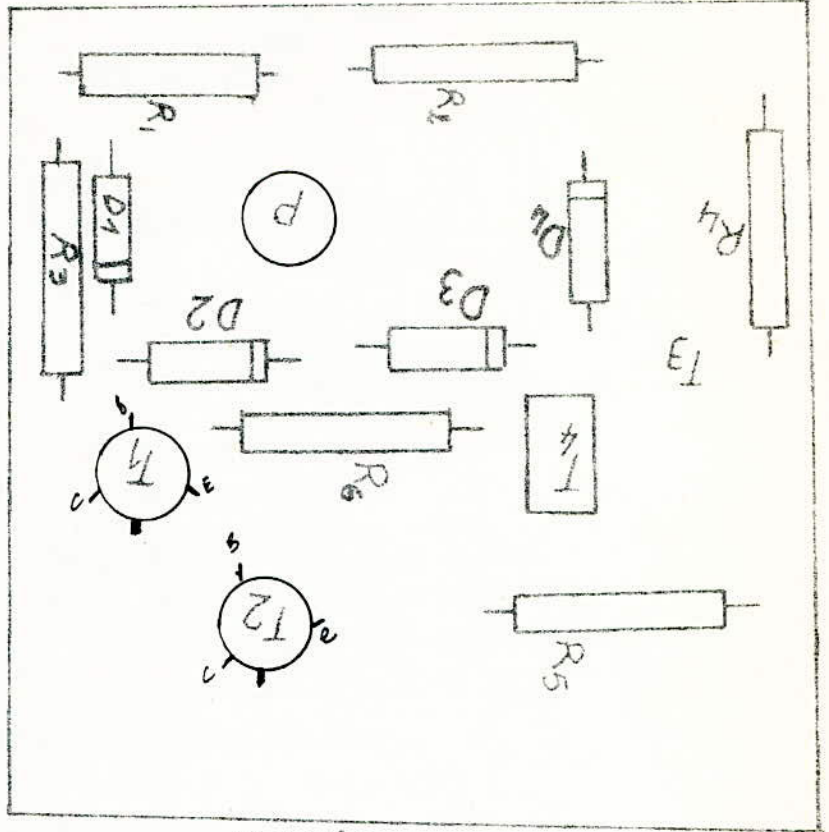
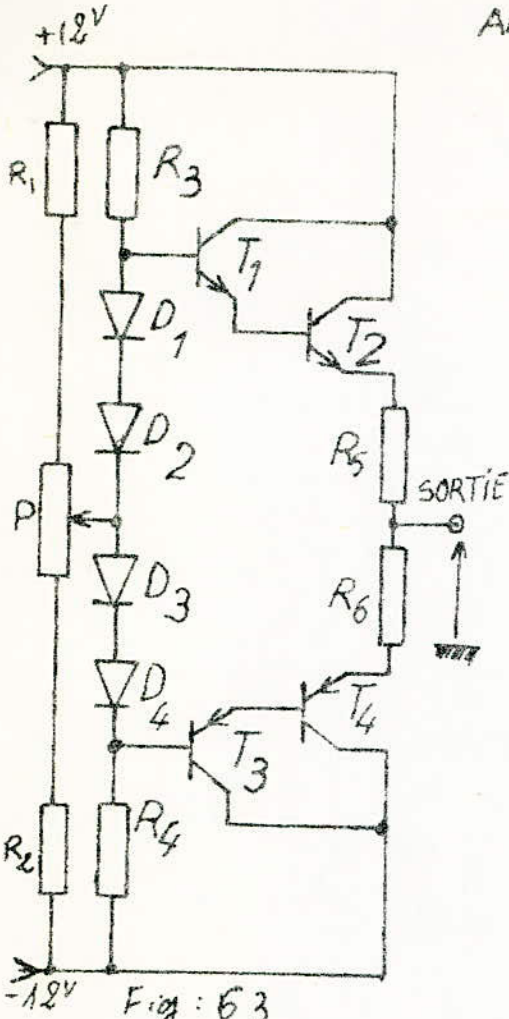
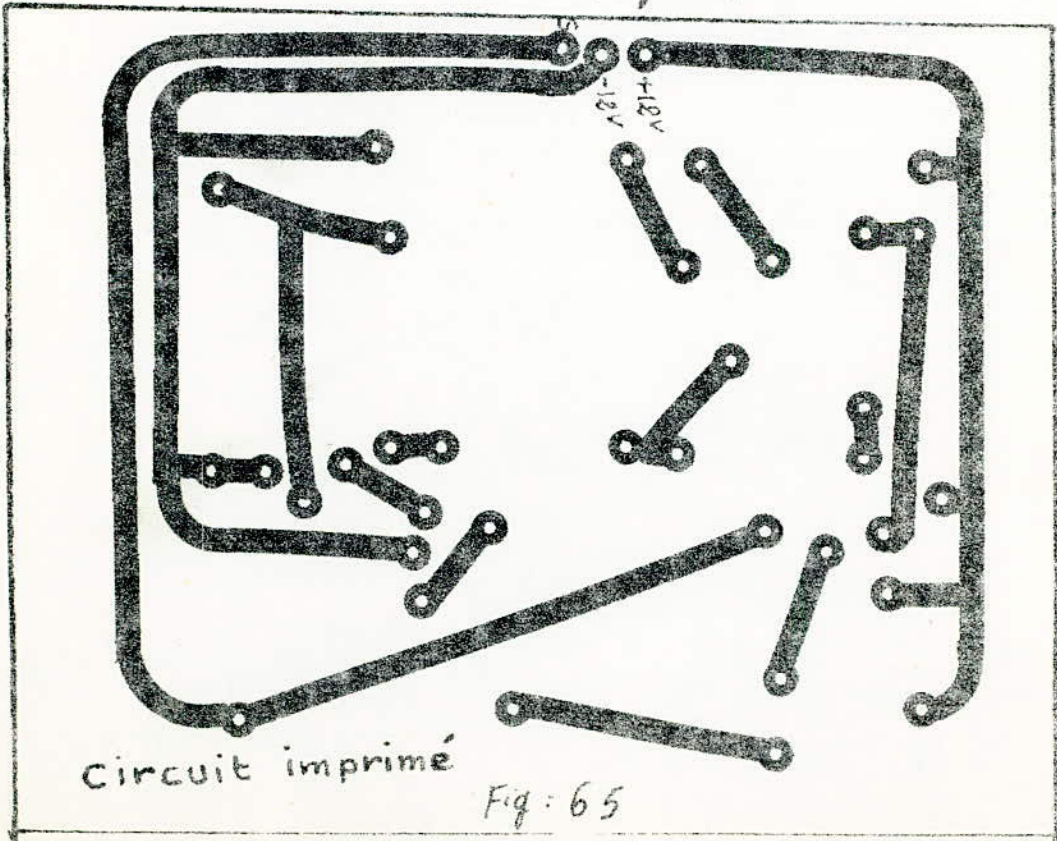


Fig: 64



circuit imprimé

Fig: 65



## Nomenclature des éléments module alimentation

Resistances	
$R_1$	: 1k $\Omega$
$R_2$	: 22k $\Omega$
$R_3$	: 15k $\Omega$
$R_4$	: 1k $\Omega$
$R_5$	: 18k $\Omega$
$R_6$	: 22k $\Omega$
$R_7$	: 2,2k $\Omega$
$R_8$	: 2,2k $\Omega$

Condensateurs	
$C_1$	: 1000 $\mu$ F
$C_2$	: 1000 $\mu$ F
$C_3$	: 100 $\mu$ F
$C_4$	: 100 $\mu$ F

Transistors	
$T_1$	: 2N 2221 A
$T_2$	: 2N 3054
$T_3$	: 2N 2904
$T_4$	: BD 438

Diodes	
P:	pont à diode MDA 200 BU 500
$D_1$	} BY 98
$D_2$	
$D_3$	
	CI 0

Circuits intégrés	
CI 1	} KA741
CI 2	

## module amplificateur

Resistances	
$R_1$	: 2,2k $\Omega$
$R_2$	: 2,2k $\Omega$
$R_3$	: 2,2k $\Omega$
$R_4$	: 2,2k $\Omega$
$R_5$	: 3,6k $\Omega$
$R_6$	: 3,6k $\Omega$

Diodes	
$D_1$	} BYX.10
$D_2$	
$D_3$	
$D_4$	

Transistors	
$T_1$	: 2N 1711
$T_2$	: 2N 3054
$T_3$	: 2N 2904
$T_4$	: BD 438

Potentioetre p, 25k $\Omega$



## I B L I O G R A P H I E

- 1°/ - FRANCIS DESVIGNES :
  - Le rayonnement solaire ; acta electronica, volume 18  
numéro 4 - Octobre 1975.
- 2°/ - MOHAMED DERDOURI :
  - Les photopiles solaires - Principes et exemples.
- 3°/ - FRANCIS DESVIGNES :
  - Généralité sur les jonctions P.N. - Acta electronica -  
Volume 5 n° 3 - Juillet 1961.
- 4°/ - D. FOELIA :
  - Caractéristiques expérimentales et association électrique  
des cellules solaires C.N.R.S. - Août 1978.
- 5°/ - JEAN-CLAUDE SUAU :
  - Modèle optoélectronique pour la conception des piles so-  
laires à semi-conducteurs - Thèse U.P.S. N° , Toulouse.
- 6°/ - HAUT PARLEUR :
  - "Cellules solaires de toutes formes"- pages 92 - 95 -  
N° 1647.
- 7°/ - A. VAPAILLE :
  - Physique des dispositifs du semi-conducteur - Tome 1.



