

<sup>ex</sup>  
UNIVERSITÉ D'ALGER

21/79

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

ETUDE DU GROUPEMENT DE  
PHOTOPILES EN PANNEAUX  
SOLAIRES

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية

— المكتبة —

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

PROPOSE PAR

A. Adane  
D.E. Ingénieur

ETUDIE PAR

Mokhtar Zirouni

PROMOTION JANVIER

— 1979 —

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

ETUDE DU GROUPEMENT DE  
PHOTOPILES EN PANNEAUX  
SOLAIRES

PROPOSE PAR

A. Adane

D<sup>E</sup>.Ingenieur

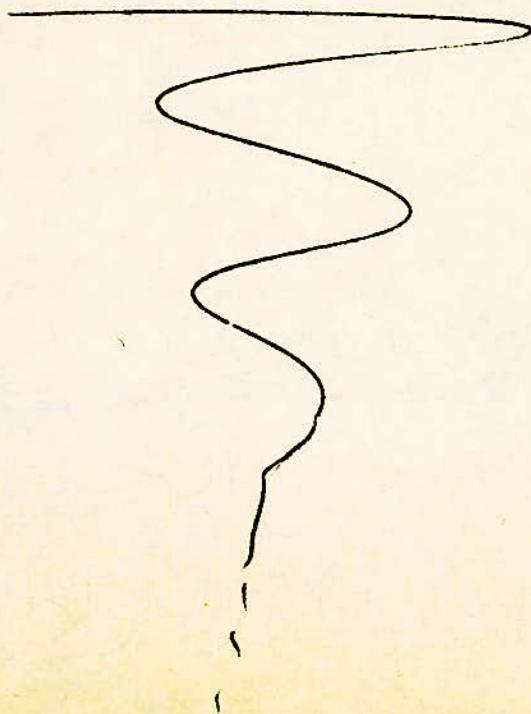
ETUDIE PAR

Mokhtar Zitouni

PROMOTION JANVIER

—1979—

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ وَالصَّلَاةُ  
وَالسَّلَامُ عَلَى رَسُولِ اللَّهِ  
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ



للإهداء:

إلى زكريا الخوي  
الشهداء، الذين ضموا  
أرواحهم في سبيل الله

مختار

## R E M E R C I E M E N T S

Que tous les enseignants ayant contribué  
à ma formation trouvent ici mon extrême  
fortitude.

Mes remerciements en particulier à Monsieur  
A. Adane Docteur Ingénieur pour ses conseils  
très utiles.

A mon père et à ma mère qui ont éveillé en  
moi, alors dans le berceau, le germe de la  
foi.

A mes frères étudiants à la mosquée. ....

M. ZITOUNI/

.../...

# S O M M A I R E

	<u>PAGES</u>
<u>CHAPITRE 1</u> : Introduction .....	1
<u>CHAPITRE 2</u> : Les panneaux solaires .....	3
2.1. Définition et principe .....	3 <sub>4</sub>
2.2. Les photopiles .....	4
2.2.1. Généralités .....	4
2.2.2. Définition et principe de fonction- nement .....	4
2.2.3. Conversion d'énergie dans une jonc- tion P.N.....	4
2.2.4. Caractéristiques électriques .....	9
2.2.5. Schéma équivalent .....	25
2.3. Technologie des panneaux solaires .....	28
<u>CHAPITRE 3</u> : Etude théorique des associations série ou parallèle de 36 photopiles .....	36
3.1. Introduction .....	36
3.2. Cas des groupements en série .....	37
3.2.1. Analyse qualitative .....	37
3.2.1. Formulation du problème .....	43
3.2.2.1. Calcul du courant par-courant un circuit de 48 cellules en série, l'ensemble étant en court-circuit .....	43
3.2.2.2. Cas de deux cellules de carac- téristiques différentes .....	47
3.3. Cas de groupements en parallèles .....	57
3.3.1. Analyse qualitative .....	58
3.3.2. Formulation du problème .....	59
3.3.2.1. Calcul de la tension en circuit	

ouvert d'un ensemble de $n$ cellules en parallèles ....	59
3.3.2.2. Cas de deux cellules de caractéristiques différentes .....	60
<u>CHAPITRE 4</u> : Etude du groupement de 48 photopiles	
BPX 41 A .....	63
4.1. Mesure du courant de court-circuit $I_{cc}$ et de la tension à vide $V_0$ .....	63
4.2. Histogrammes .....	67
4.3. Tableaux de mesures .....	64
4.3.1. Détermination des groupements délivrant la puissance maximale .....	75
4.3.2. Programmation .....	77
<u>CHAPITRE 5</u> : Mise au point d'un panneau solaire à conversion photovoltaïque délivrant 10 mW.	78
5.1. Détermination des groupements délivrant la puissance maximale .....	79
5.2. Mesure des caractéristiques dans un régime de rayonnement direct .....	81
5.3. Mesure des caractéristiques dans un régime concentré .....	82
<u>CHAPITRE 6</u> : Conclusion .....	85
<u>ANNEXES</u> .....	87
LA résistance série .....	Annexe 1
La jonction P-N .....	Annexe 2
Schéma équivalent d'une photopile ..	Annexe 3

CHAPITRE I  
oooooooooooo

INTRODUCTION :

L'objet de ce travail est l'étude des branchements, qu'il est possible de faire entre certains nombre de photopiles; en vue de réaliser un panneau solaire.

Selon les caractéristiques des récepteurs de l'utilisation, on est amené à relier les cellules solaires entre elles, soit en séries, soit en parallèle, ou bien adopter un montage serie-parallèle.

Les caractéristiques courant-tension des cellules solaires diffèrent entre elles si celles-ci sont issues d'une même série de fabrication.

Le problème est aussi de déterminer le type de branchement qui donne la puissance la plus élevée, qui respecte les critères de normalisations des récepteurs d'utilisation, et qui garantit une certaine sécurité de fonctionnement de l'ensemble des cellules même si l'une d'elles vient de se détériorer.

En particulier, dans un panneau solaire, une photopile pourrait se mettre en court-circuit ou se couper.

IL est aussi intéressant de voir l'influence de ces défaillances sur les caractéristiques du reste des éléments, et d'une façon générale, sur le fonctionnement de ce panneau. Pour mener à bien cette tâche, nous avons manipulé sur 48 PHOTODIODES (BPX 41 A), qui ont été employées comme photopiles. Puis, nous avons abordé le problème théorique du branchement optimal des photopiles.

Enfin, nous avons monté un petit module solaire composé de la mise en parallèle de deux groupes formés de 16 cellules BPX 41 A en série.

Chapitre 2:

LES PANNEAUX SOLAIRES.

2.1 Définition et principe d'un panneau solaire :

Un panneau solaire à conversion photovoltaïque est un appareil , comprenant un nombre assez élevé de photopiles , branchées soit en serie , soit en parallèles , ou associées en serie-parallèles.

Il est destiné à convertir par effet photoélectrique le rayonnement solaire en énergie électrique .

L'effet photoélectrique:

L'effet photoélectrique apparaît lorsqu'un corps éclairé par des radiations lumineuses de longueur d'ondes assez courtes émet des électrons (Annexe 2).

Remarque:

Il existe une fréquence seuil , au dessus de laquelle il n'y a pas d'émission, quelque soit l'intensité de la lumière incidente .

L'assemblage de photopiles doit être encapsulé dans un

boîtier de protection contre les agents atmosphériques

d'une part et d'autre part de refroidissement suffisant (chap 2.3).

## 2.2 Les photopiles au Silicium :

### 2.21 Généralités :

Les photopiles ou cellules solaires sont des diodes à jonction de grande surface, dont on utilise l'effet photovoltaïque pour la conversion directe d'énergie lumineuse en énergie électrique.

### 2.22- Définition et principe de fonctionnement d'une photopile à jonction P-N :

Une photopile à jonction P-N se compose d'une plaquette de Silicium P, recouverte d'une très mince couche (quelques microns) de Silicium obtenu par diffusion. Lorsque la surface de cette couche est soumise à un rayonnement E, des paires électrons-trous peuvent être libérées par absorption de photons dans la zone N et P (Annexe 2).

Les porteurs minoritaires ainsi créés traversent la barrière de potentiel de la jonction PN, d'où apparition d'une force électromotrice, le Silicium P constituant le pôle positif (fig. 1).

Leur fonctionnement est essentiellement lié aux propriétés semi-conductrices du matériau qui les constitue.

### 2.23- Conversion d'énergie dans une jonction P-N

Dans une telle jonction, il existe une zone de haut champ électrique dû à l'existence de la barrière de potentiel: c'est la région B entourée de deux régions A et C sans champ électrique. (fig. 2).

La fig. 2 représente schématiquement une jonction P-N en court-circuit.

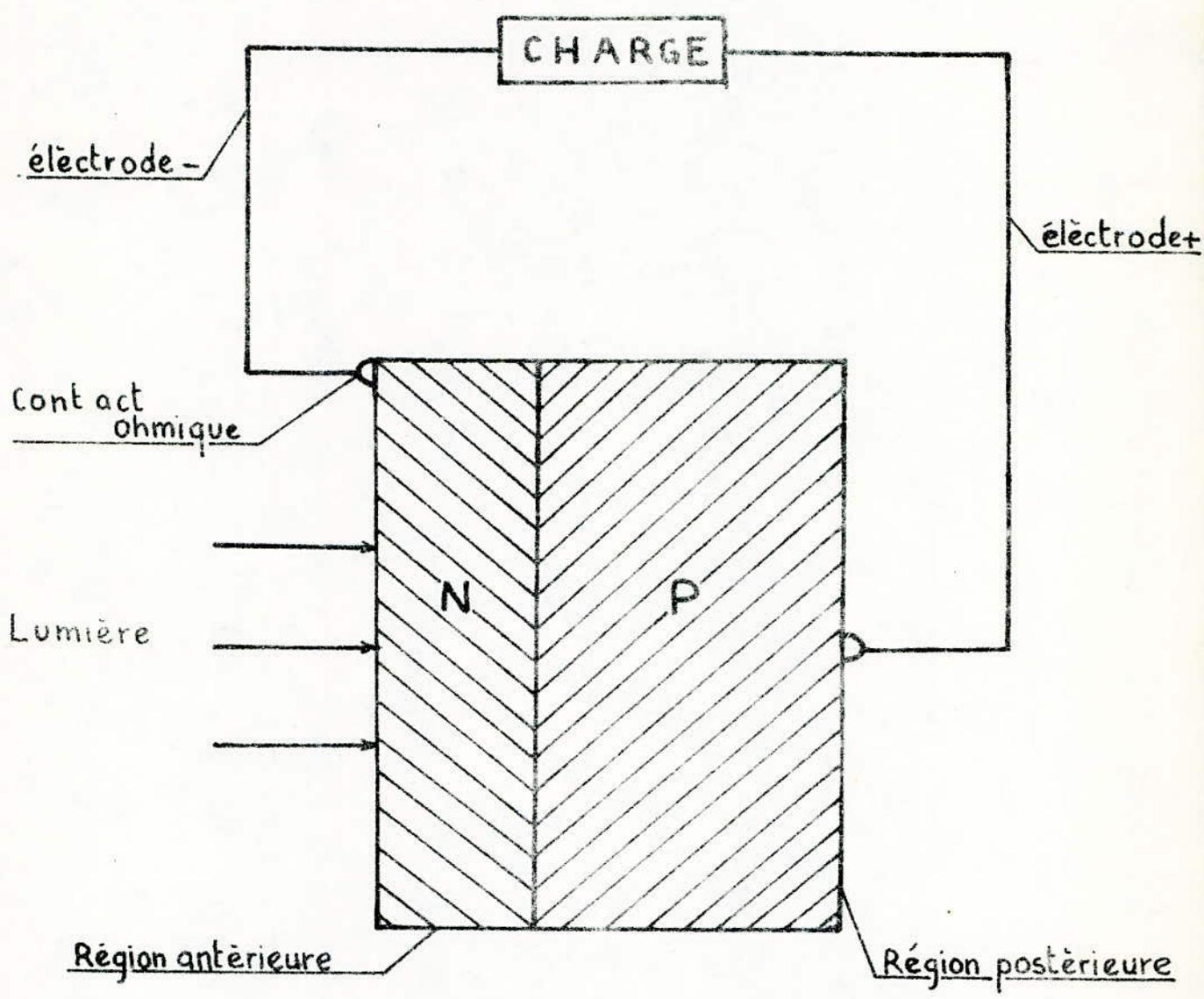
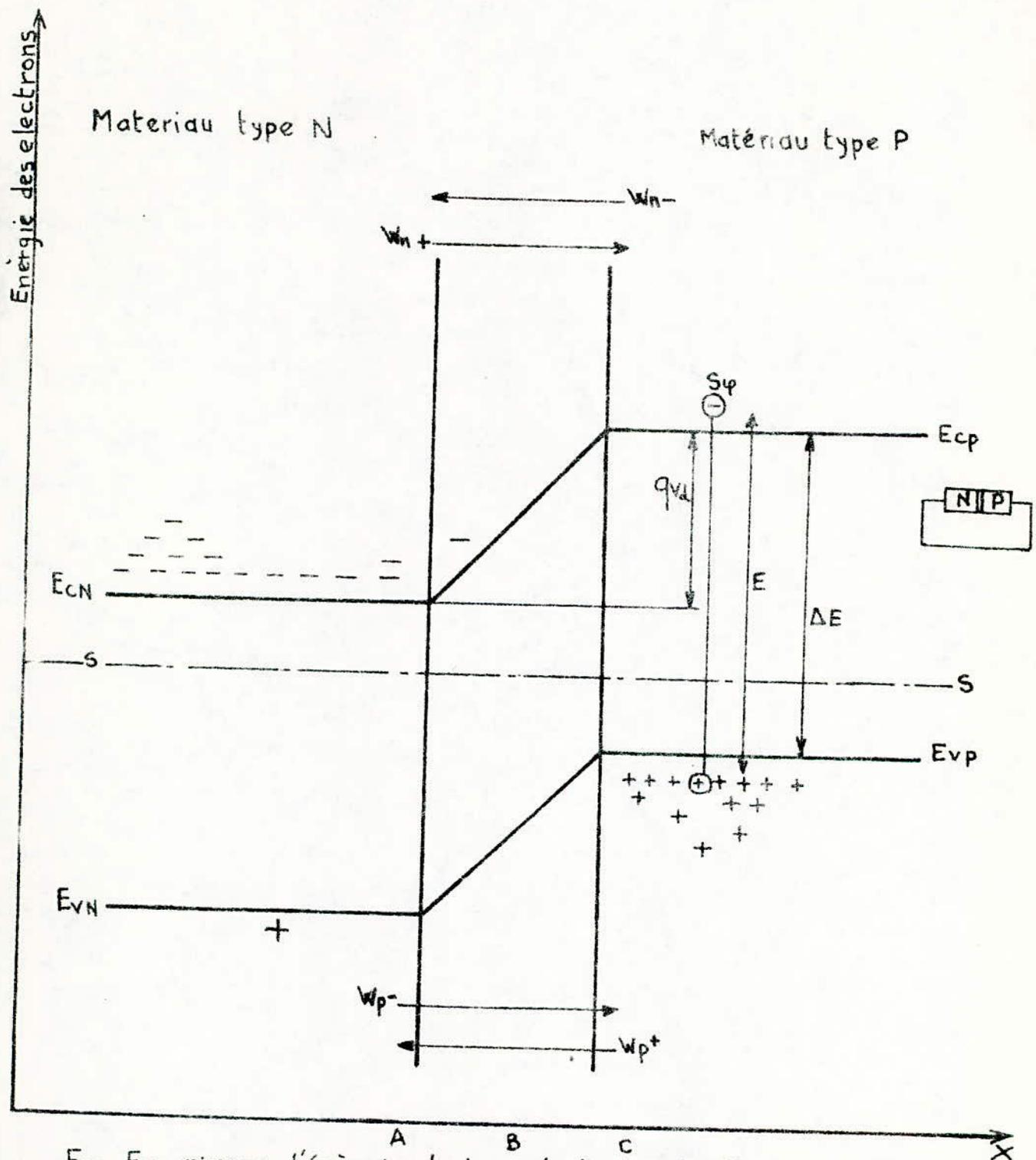


Fig 1: Structure d'une cellule photovoltaïque



$E_{cN}, E_{cP}$ : niveau d'énergie du bas de la bande de conduction.  
 $E_{vN}, E_{vP}$ : niveau d'énergie du haut de la bande de valence.

Fig 2

En l'absence de lumière, les sources des flux d'électrons et de trous qui passent d'une région à l'autre sont nulles.

$$W_n = W_n^+ + W_n^-$$

$$W_p = W_p^+ + W_p^-$$

Parmi les photons qui arrivent dans le dispositif, ceux d'énergie supérieure à l'énergie  $\Delta E$  nécessaire pour faire franchir aux électrons la bande interdite peuvent libérer une paire électrons-trous. Si la création de paires a lieu dans la zone B, chaque porteur est soumis au champ électrique interne et contribue au courant dans le circuit extérieur.

Si la création a lieu dans la zone A ou C, les porteurs minoritaires ne peuvent contribuer au courant électrique s'ils atteignent la limite de la zone de charge d'espace B. Là, ils sont happés par le champ électrique qui règne dans cette zone et pénètrent dans la région où les porteurs de même signe sont majoritaires : ils participent alors au courant électrique.

Ainsi quelque soit la région où le photon est absorbé et les porteurs de charges libérés, l'effet photo-électrique donne naissance à un courant circulant de la région A matériau de type N vers la région C matériau de type P (fig. 1). Lorsqu'une charge connectée à la photopile, le courant s'écoule à travers la charge à l'extérieur de la borne P à la borne N.

On peut donc considérer que la conversion d'énergie électro-

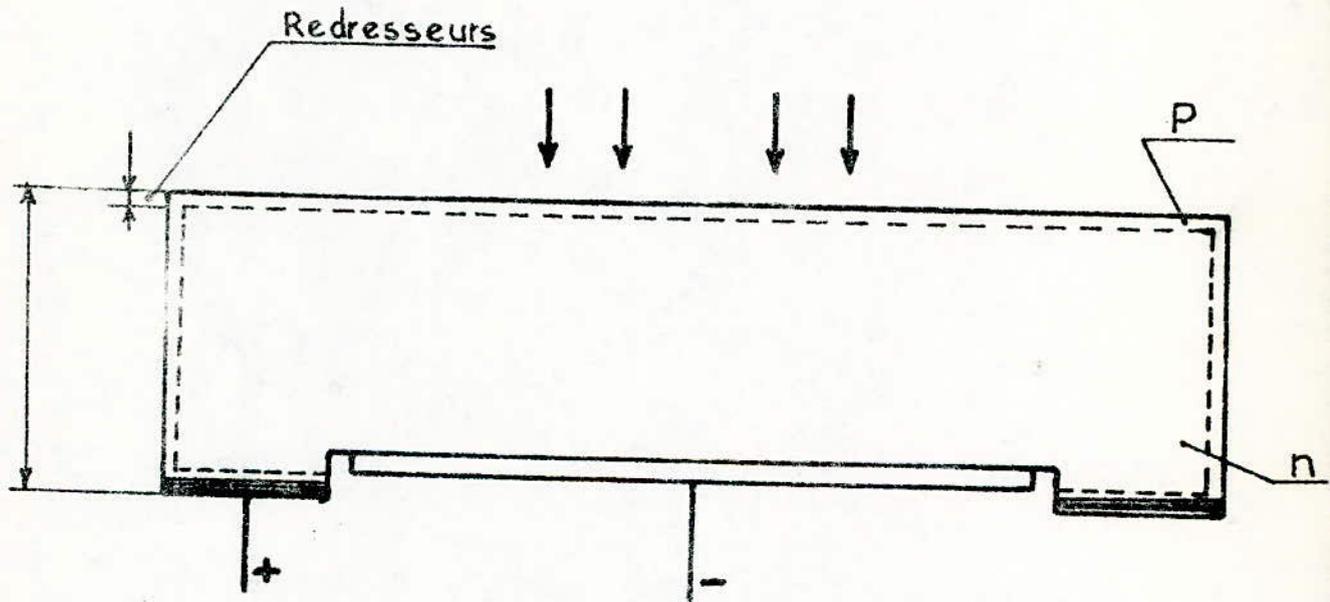


Fig 3: Schéma d'une photopile au silicium.

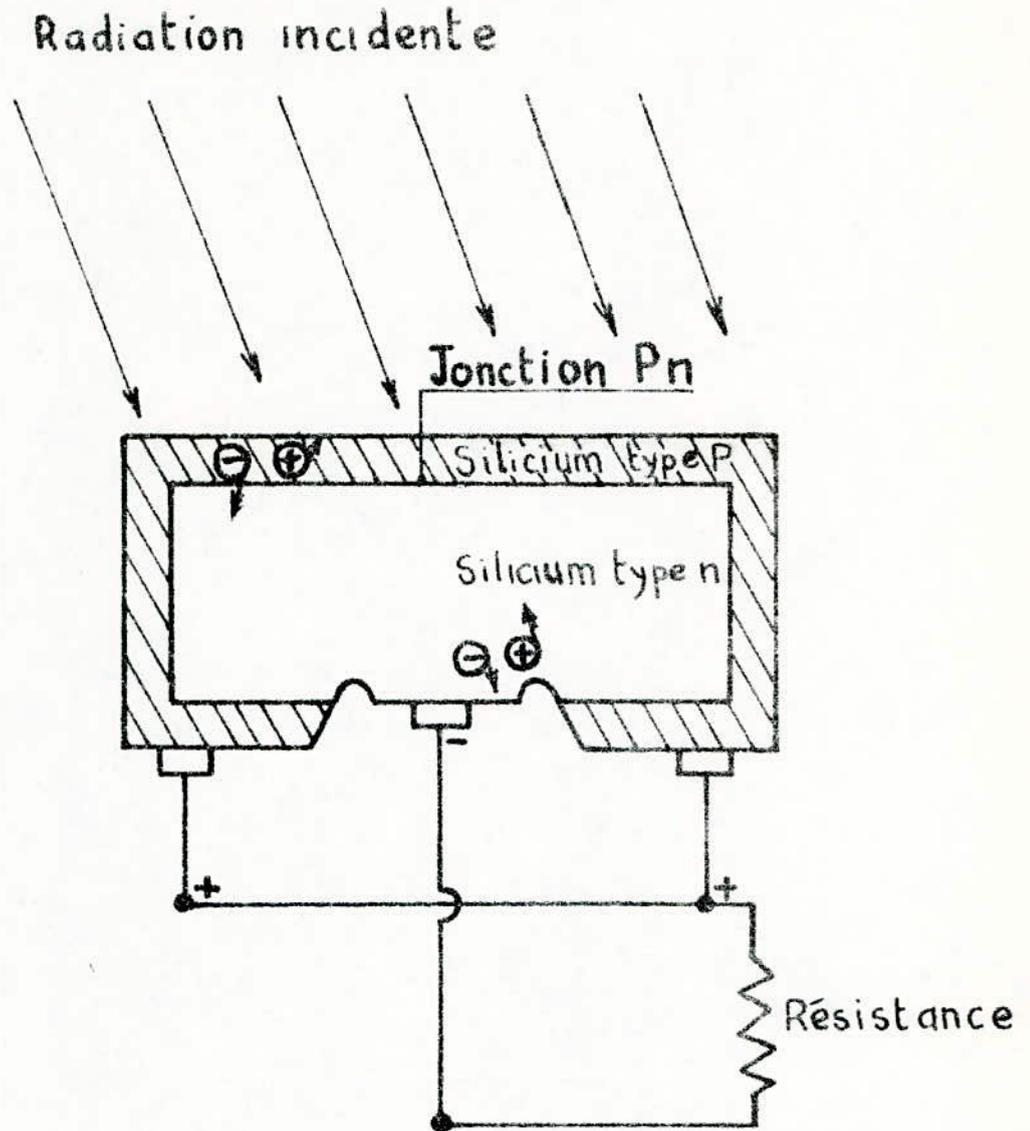


FIG3bis: Coupe d'une cellule au silicium avec jonction P.n montrant la création de paires "électrons-trous" sous l'influence des photons.

s'effectue en trois phases :

- Formation de paires electron-trou par absorption des photons.

- Diffusion de charges minoritaires libérées par effet photoélectrique jusqu'aux frontières de la couche de charge d'espace.

- Transfert de l'énergie des porteurs collectés par la jonction au circuit de charge extérieure.

#### 2.2.4 Caractéristique électrique d'une photopile au Silicium

Une photopile au Silicium est constituée par une plaquette de Silicium de type n de résistivité  $\approx 1 \Omega \text{ cm}$ , sur laquelle a été formée, par diffusion gazeuse de bore, à haute température, une couche de Silicium de type p, de résistivité  $\approx 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ , d'épaisseur  $\approx 2 \mu$ . La surface de la pile est limitée par la difficulté de préparation de monocristaux de Silicium de très grande dimension, elle peut cependant atteindre plusieurs centimètres carrés. Il s'agit là de jonction de surface beaucoup plus grande que dans les redresseurs.

L'équation de la caractéristique d'une jonction non éclairée est de la forme suivante :

$$I = I_0 \left\{ \exp \frac{qV}{KT} - 1 \right\} \quad (1)$$

(T : température absolue ;  $I_0$  : courant de saturation)

La différence de potentiel V aux bornes d'une photopile éclairée est liée à la densité du courant I débité dans le circuit extérieur par la formule :

$$I = I_0 (\exp qv/KT - 1) - I_{cc} \quad (2)$$

I : densité de courant photoélectrique.

$I_0$  : courant de saturation (densité de courant d'obscurité).

q : charge de l'électron.

K : constante de Boltzmann.

T : température absolue.

On remarque certaines valeurs de courants et tensions particulières :

- Courant de court-circuit  $I_{cc}$  valeur pour laquelle  $V=0$ .

- La tension à vide  $V_0$  : pour laquelle  $i=0$   
et le point auquel la puissance débitée est optimal soit :

$$P_m = U_m I_m$$

Le maximum de puissance débitée est obtenue en raccordant la courbe  $I = f(V)$  à son hyperbole de dissipation.

Quels que soient les types, les photopiles sont caractérisées de la façon suivante :

$I_{cc}$  : courant de court-circuit pour un éclatement donné.

$V_0$  : tension à vide pour un éclatement et une température déterminée.

$I_m$  : courant débité par la photopile au point de fonctionnement optimal.

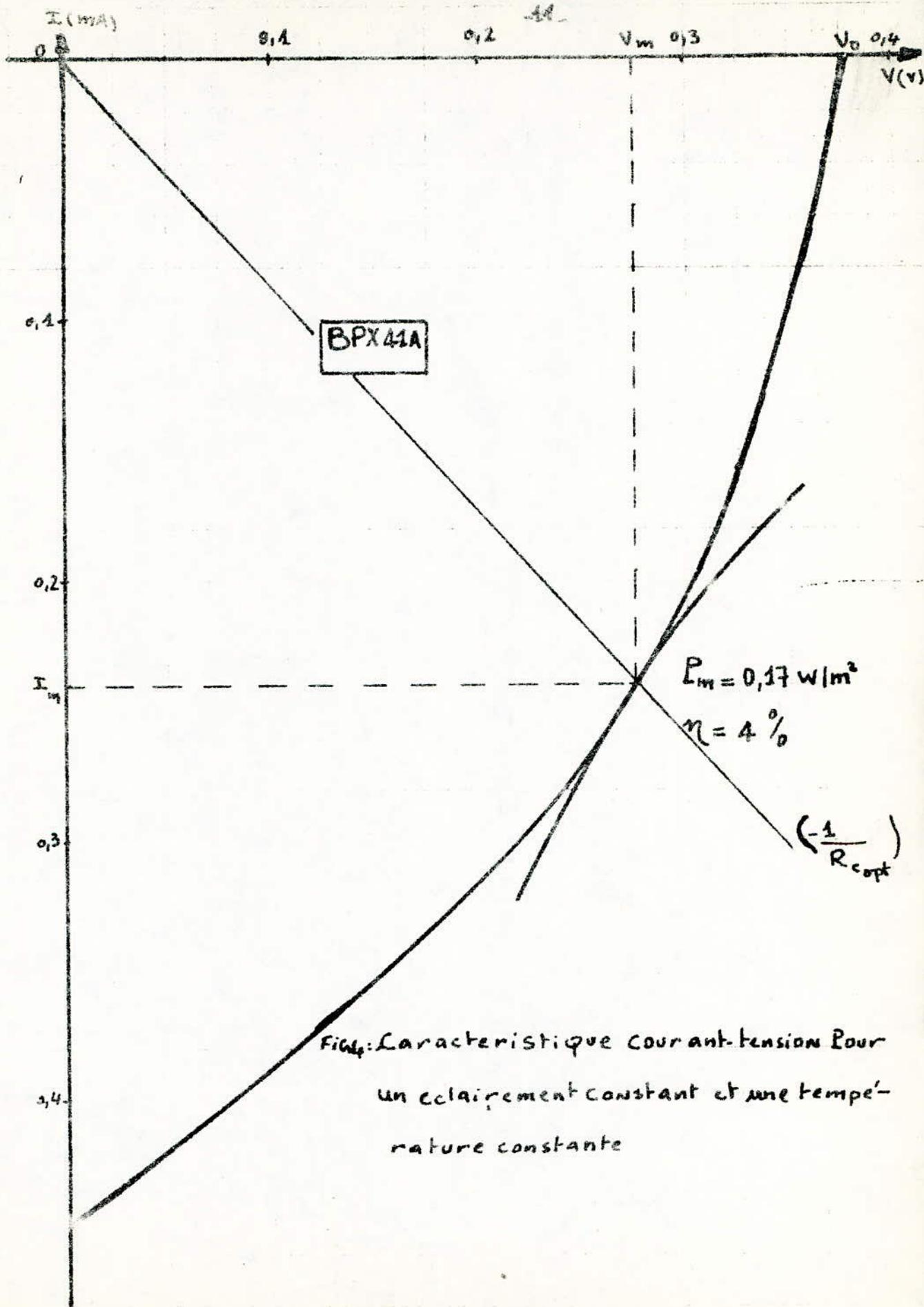
$V_m$  : tension au point de fonctionnement optimal.

$\eta$  : rendement quantique de la photopile.

$\alpha$  : coefficient

Le rendement quantique est défini par le rapport du courant photoélectrique

à un photon incident sur le nombre de photons incidents.



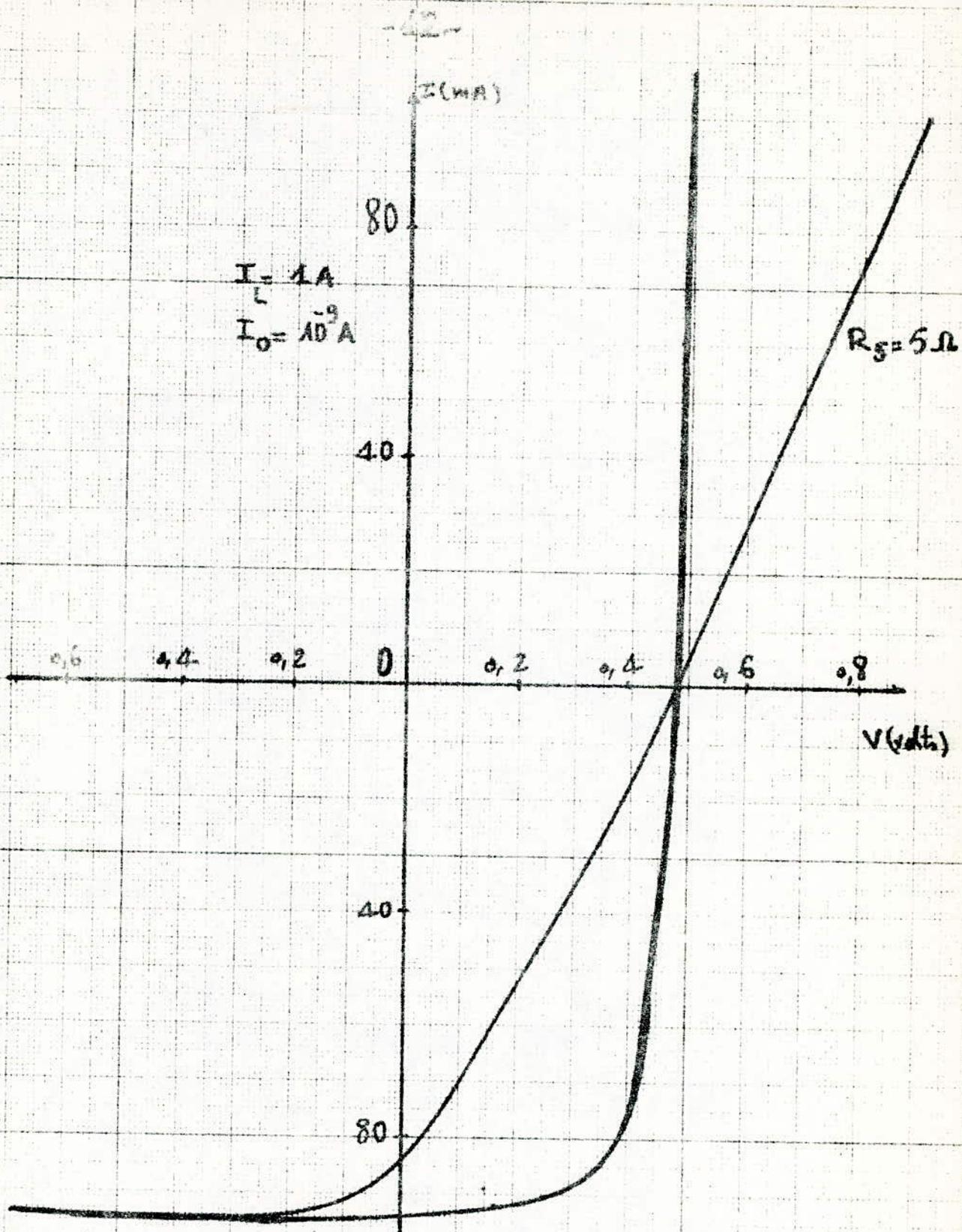


fig 5

Influence de la Résistance, Série sur la Caractéristique  $I = F(V)$   
 (M.B Prince)

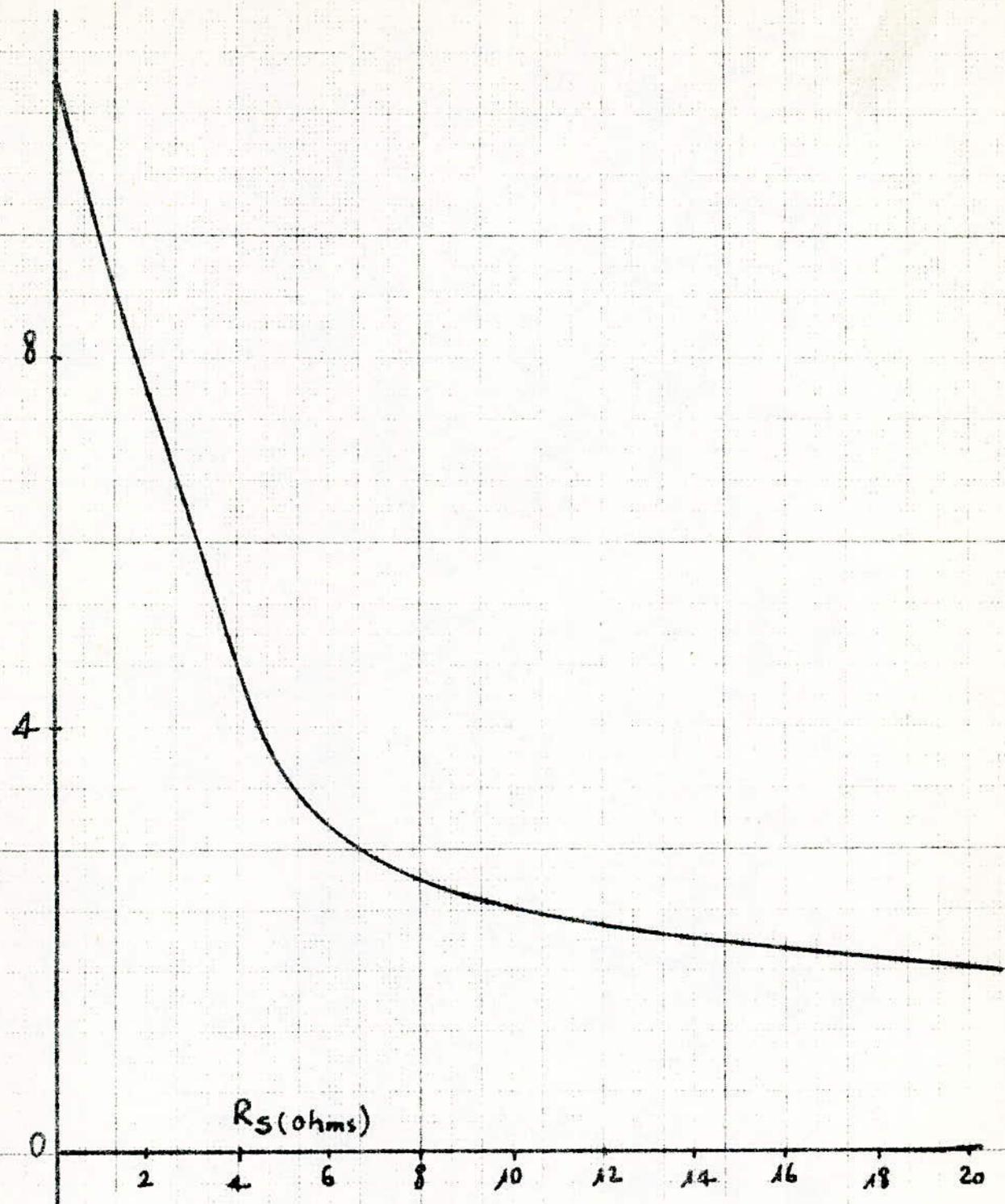


fig 6  
Influence de la Résistance, Série sur le Rendement d'une  
Photopile au Silicium (M. B. Prince)

T : température limite de fonctionnement.

$\eta$ . Rendement.

Le rendement est le rapport entre l'énergie électrique fournie et l'énergie lumineuse reçue.

Et la tension de circuit ouvert sera :

$$V_{co} = (KT/q) \ln (1 + I_{cc}/I_s) \quad (3)$$

La tension de circuit ouvert est donc contrôlée par la valeur du courant de saturation  $I_s$ , qui dépend des propriétés du Silicium du type n employé pour la photopile :

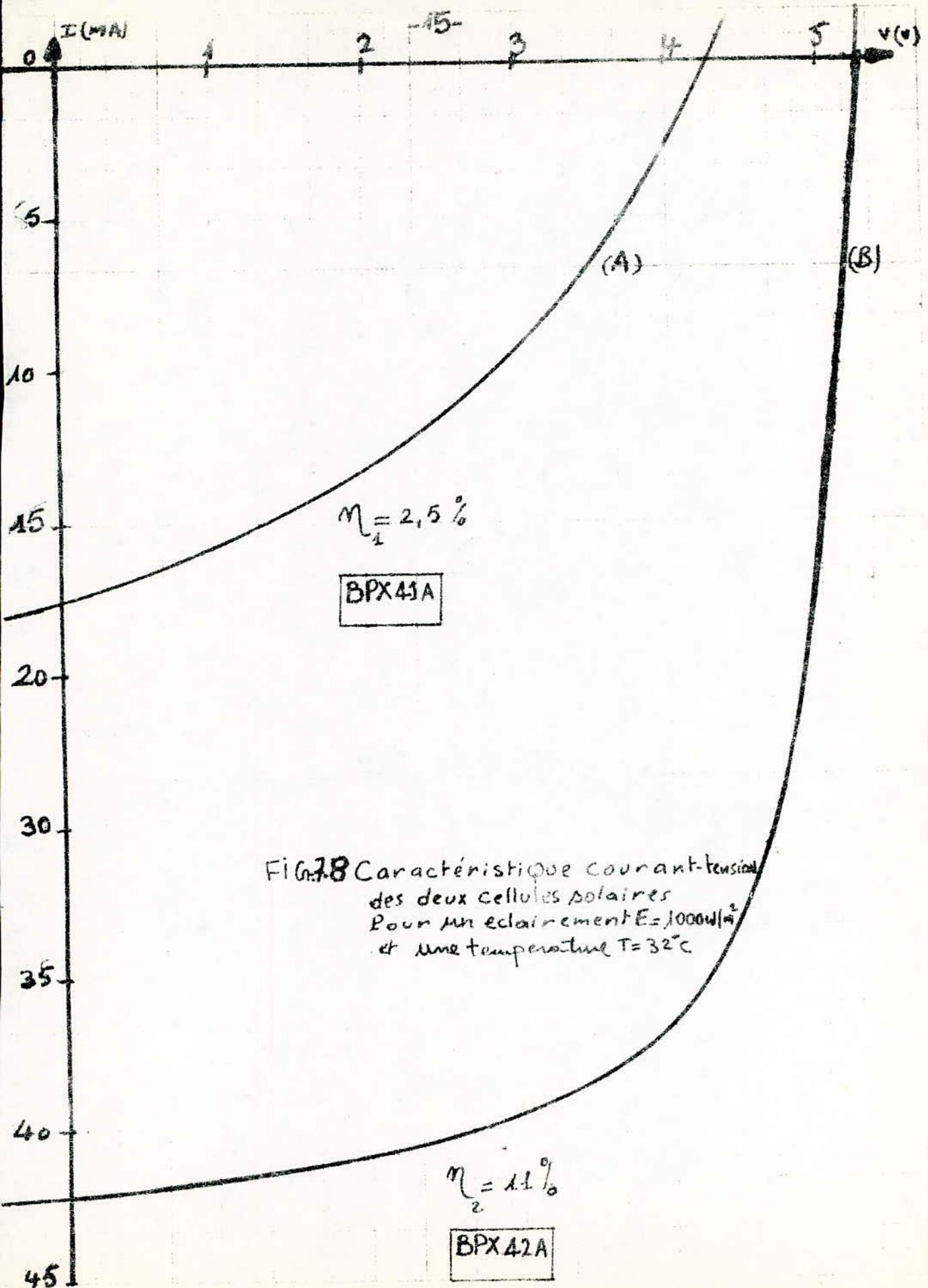
$$I_s \sim 1/n (D_p/\tau_p)^{1/2} \quad (4)$$

Ici, n est le nombre d'électrons libres,  $D_p$  la vitesse de diffusion et  $\tau_p$  la durée de vie des trous dans le Silicium de type n.

$D_p$  est une constante égale à 13 cm<sup>2</sup>/sec. et l'on voit que  $I_s$  sera d'autant plus faible que n et  $\tau_p$  seront grands. On peut admettre que  $I_s$  est de l'ordre de 10<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup>, et par conséquent  $V_{co}$  est de l'ordre de 0,5 volt pour une illumination de 100 mw/cm<sup>2</sup>.

Les résistances en série ont pour effet de diminuer le courant du court-circuit et d'aplatir la courbe caractéristique comme l'indique la figure 5 ; le rendement s'en trouve réduit notablement comme l'indique la figure (6).

L'origine de ces résistances en série est double d'une



part la couche superficielle de type P a une résistance importante, d'autant plus grande que  $e$  est faible, d'autre part nous constatons sur les zones n et p sont jamais parfaits. Le choix de  $e$  résulte d'un compromis entre les pertes par recombinaisons, ces dernières croissant de façon très rapide si elles dépassent la longueur de diffusion  $L_n$  des électrons dans la zone P.

Quant aux contacts électriques de faible résistance, leur obtention est l'un des problèmes difficiles dans la technologie des cellules solaires .

La figure 78 représente la caractéristique courant-tension de 2 cellules solaires au silicium à la température de  $32^{\circ}\text{C}$ .

(a) représente une cellule solaire BPX41A de rendement 2,5%

(B) représente une cellule solaire BPX42A de rendement 11%.

Les photopiles au silicium ont un rendement qui croît quand on abaisse la température et qui décroît quand on l'élève.

C'est la tension du circuit ouvert qui varie avec la température selon une loi exponentielle.

Plus importante pour l'utilisateur est la loi de variation du rendement avec l'éclairement et la température.

Quant l'intensité de lumière incidente croît,  $I_{co}$  croît linéairement et  $V^{co}$  croît logarithmiquement fig(9).

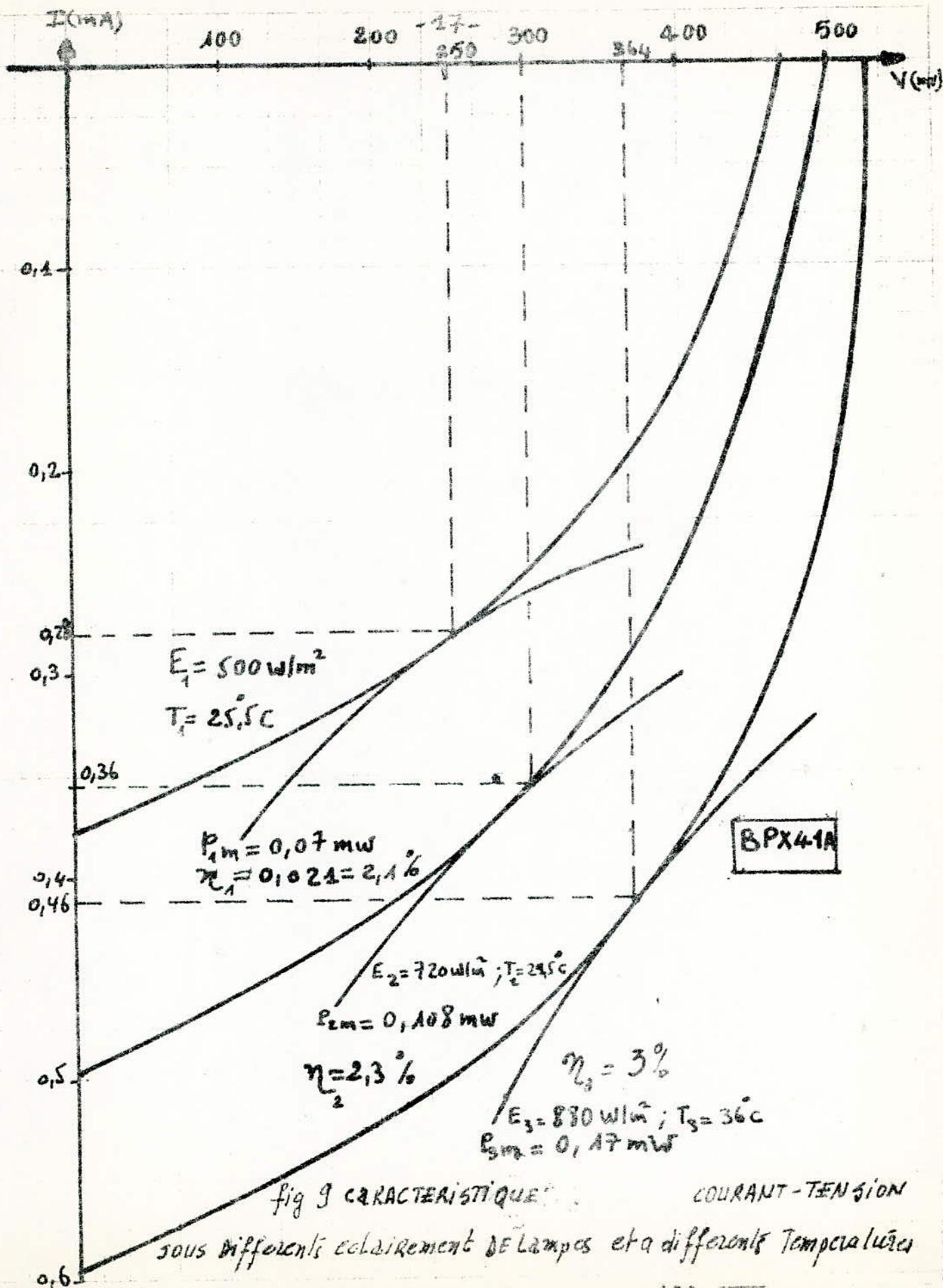


fig 9 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION  
 sous différents éclairements de Lampes et a différents Tempéralures

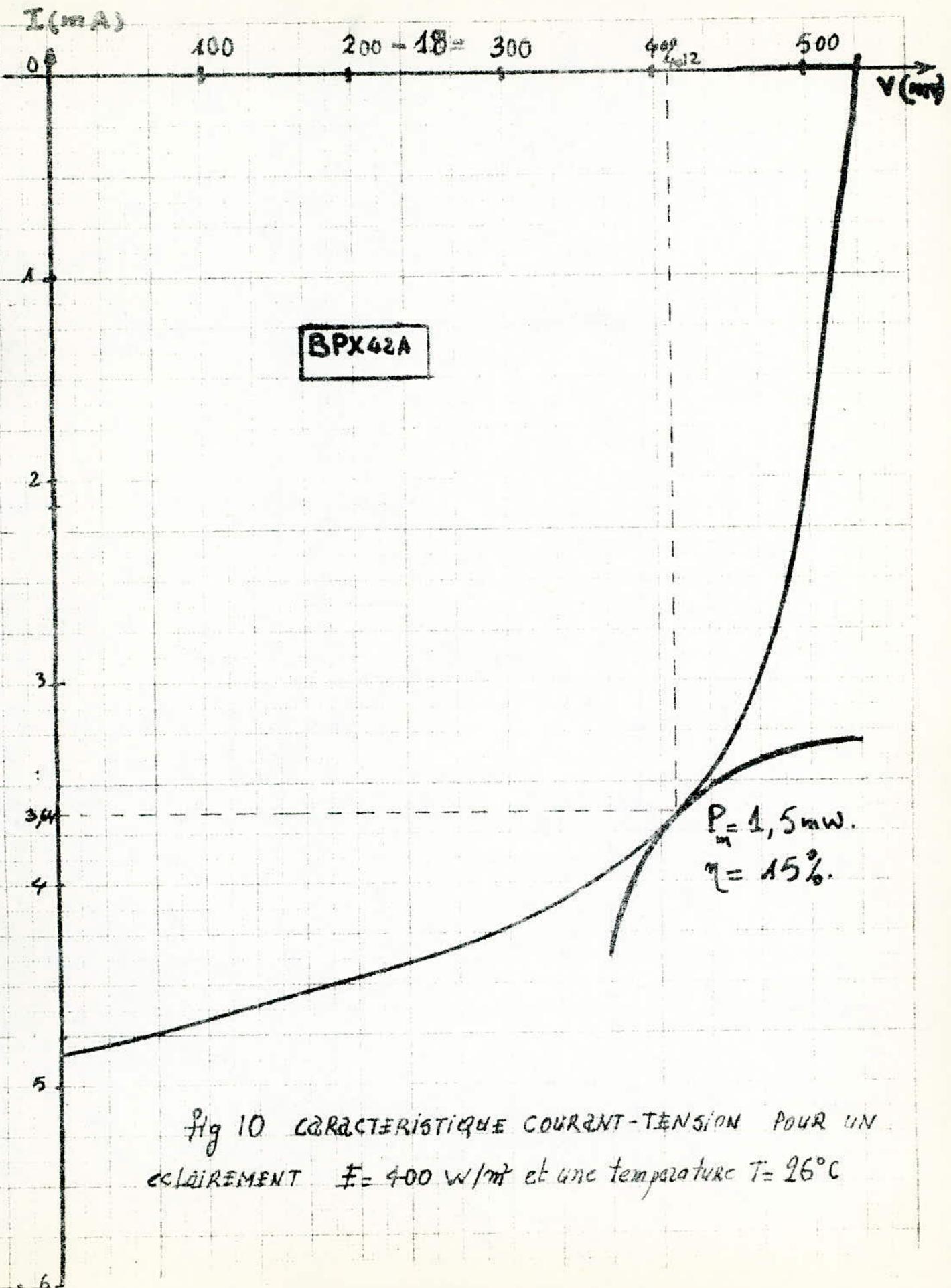


Fig 10 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR UN  
 ECLAIREMENT  $E = 400 \text{ W/m}^2$  et une température  $T = 26^\circ\text{C}$

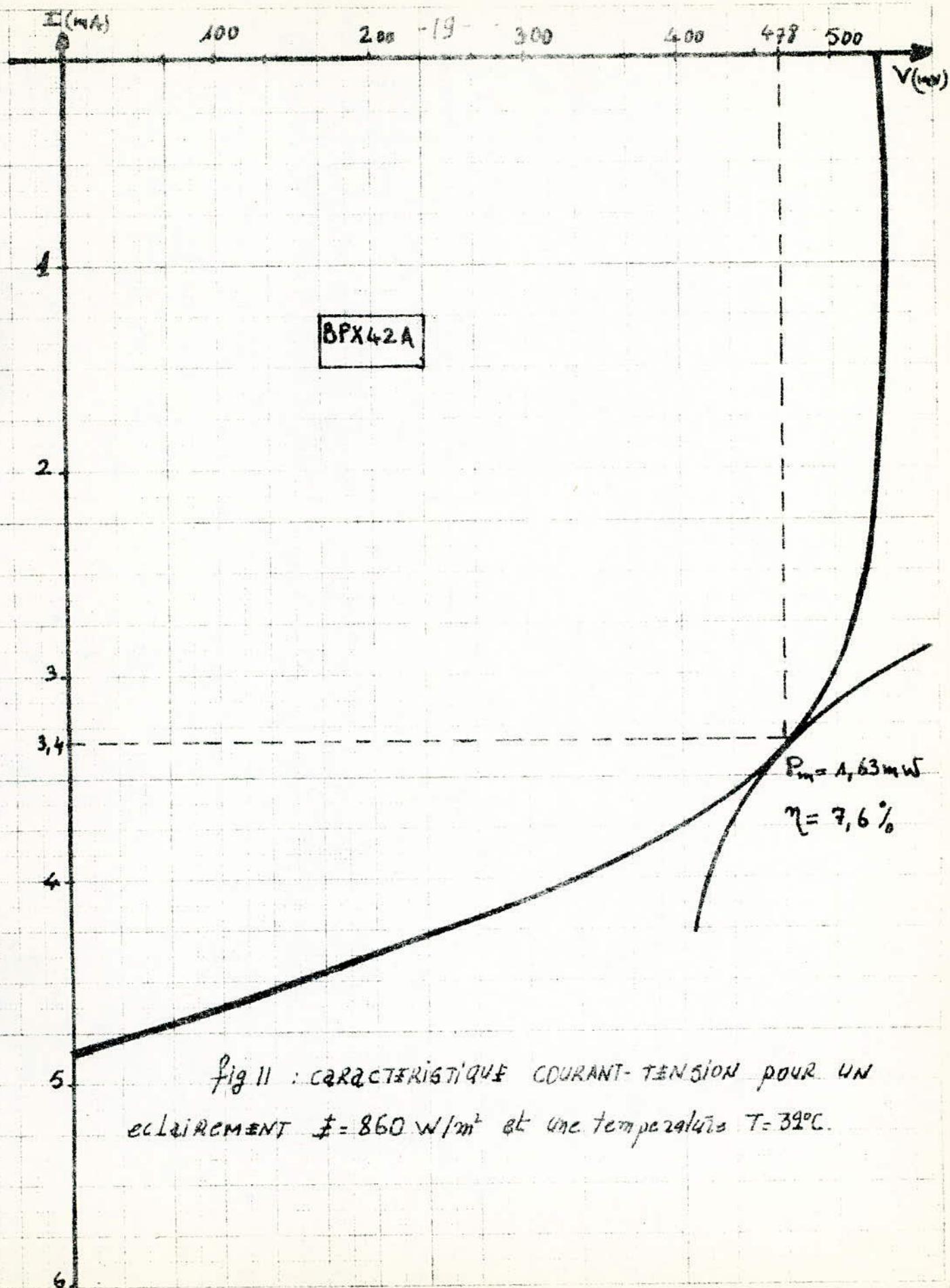


Fig II : CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR UN  
 ECLAIREMENT  $\Phi = 860 \text{ W/m}^2$  et une température  $T = 39^\circ\text{C}$ .

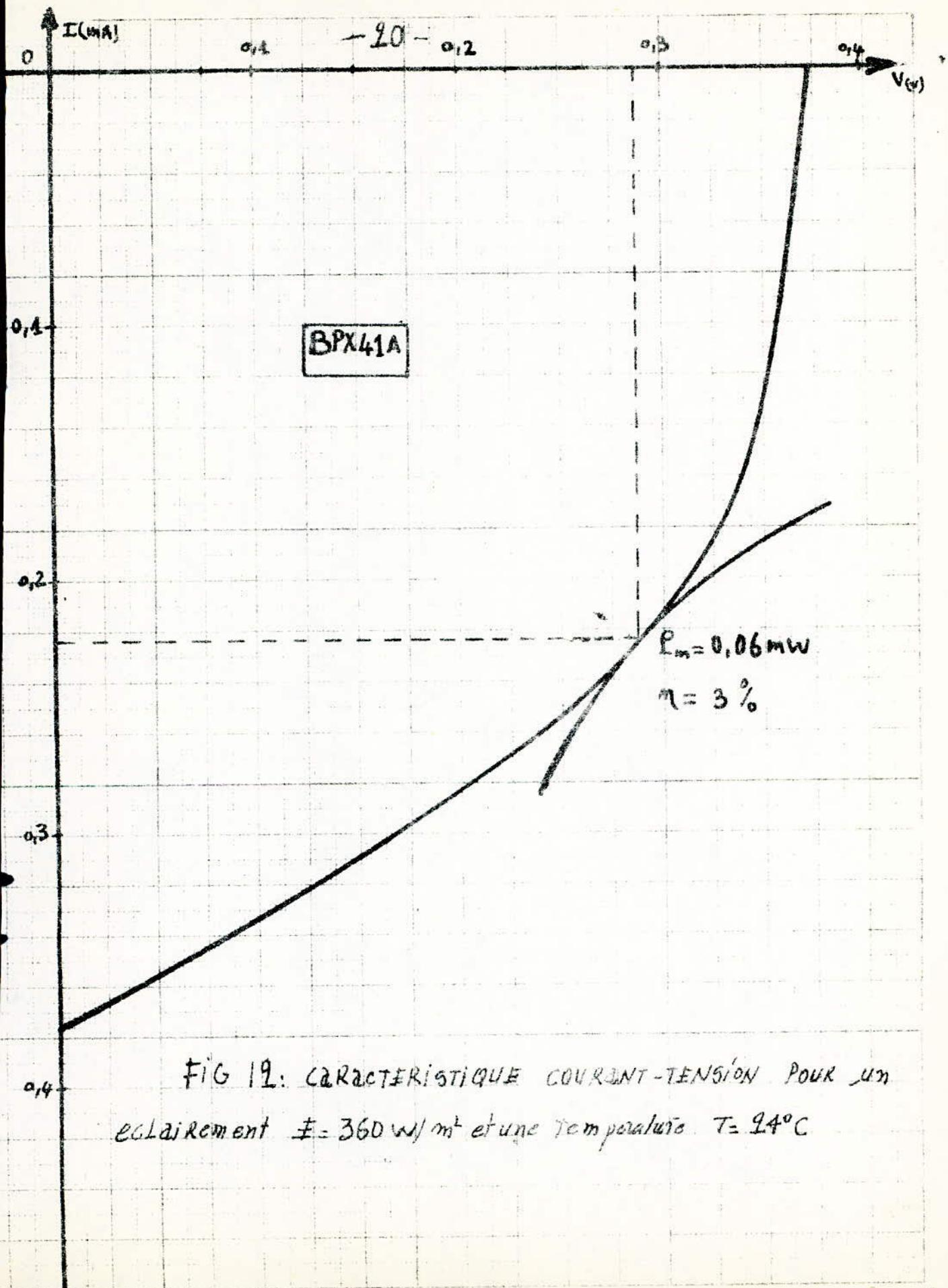


FIG 19: CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR un  
 eclairement  $\Phi = 360 \text{ W/m}^2$  et une temperature  $T = 94^\circ\text{C}$

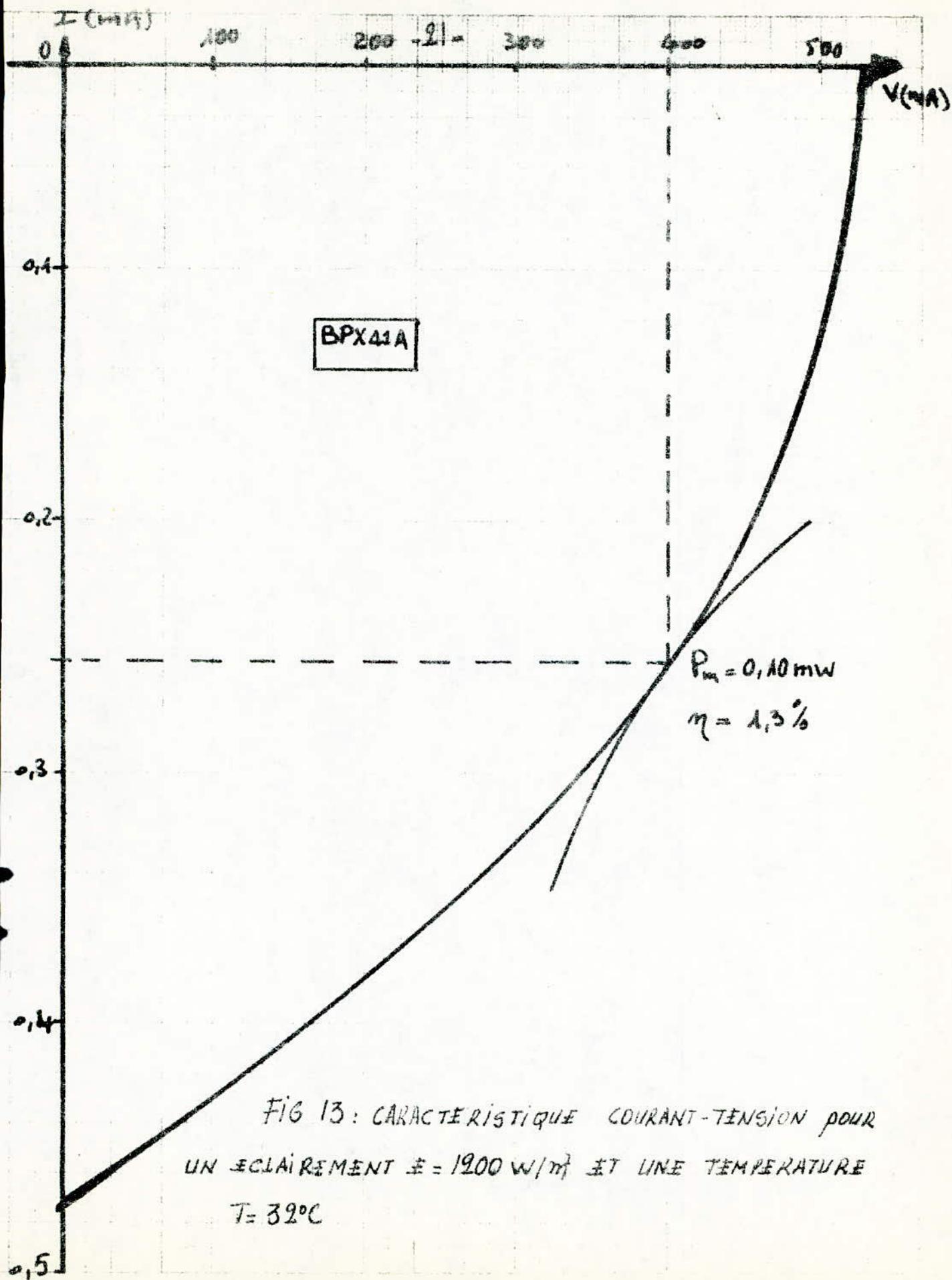
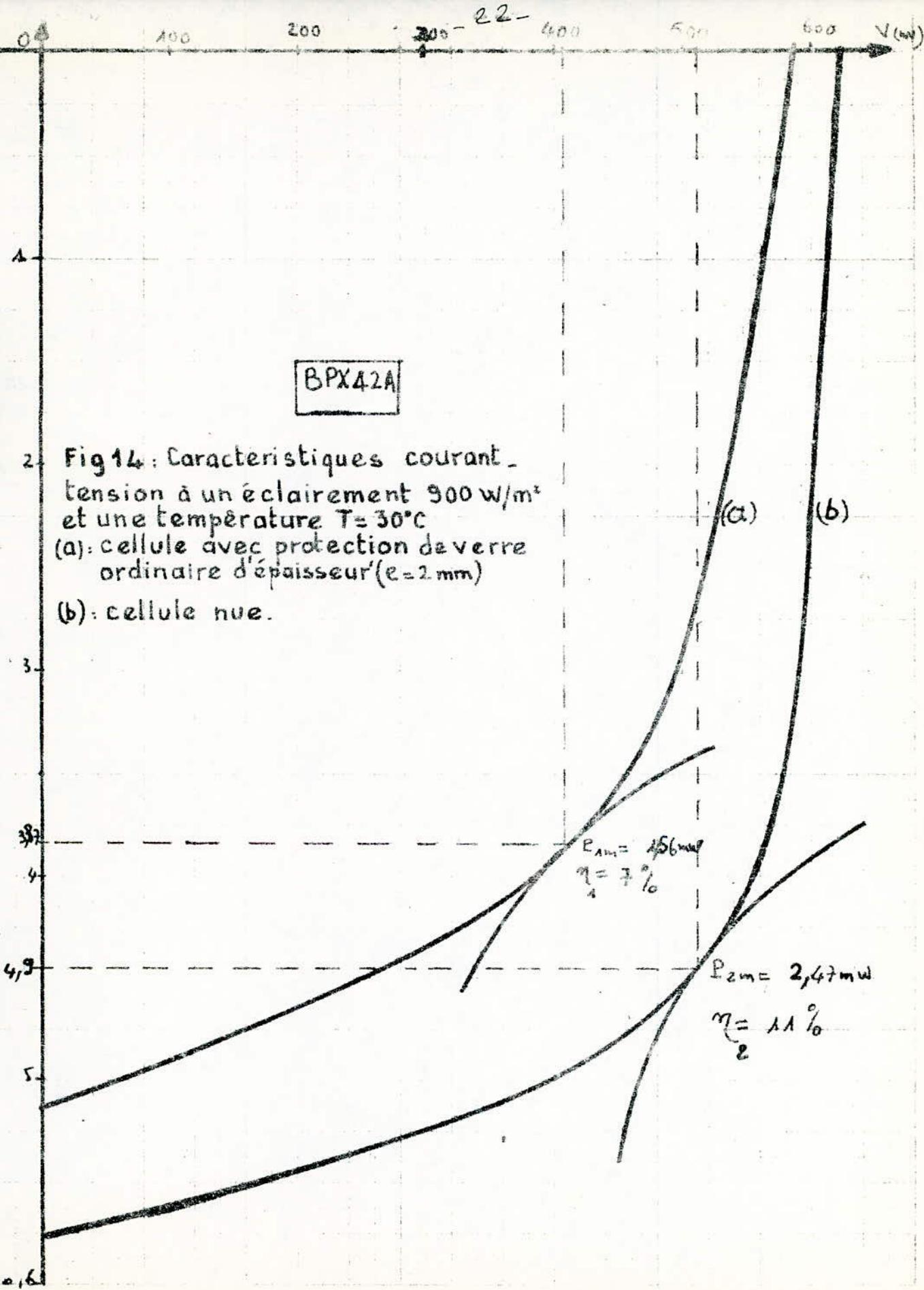


FIG 13: CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION POUR UN ECLAIREMENT  $E = 1900 \text{ W/m}^2$  ET UNE TEMPERATURE  $T = 32^\circ\text{C}$



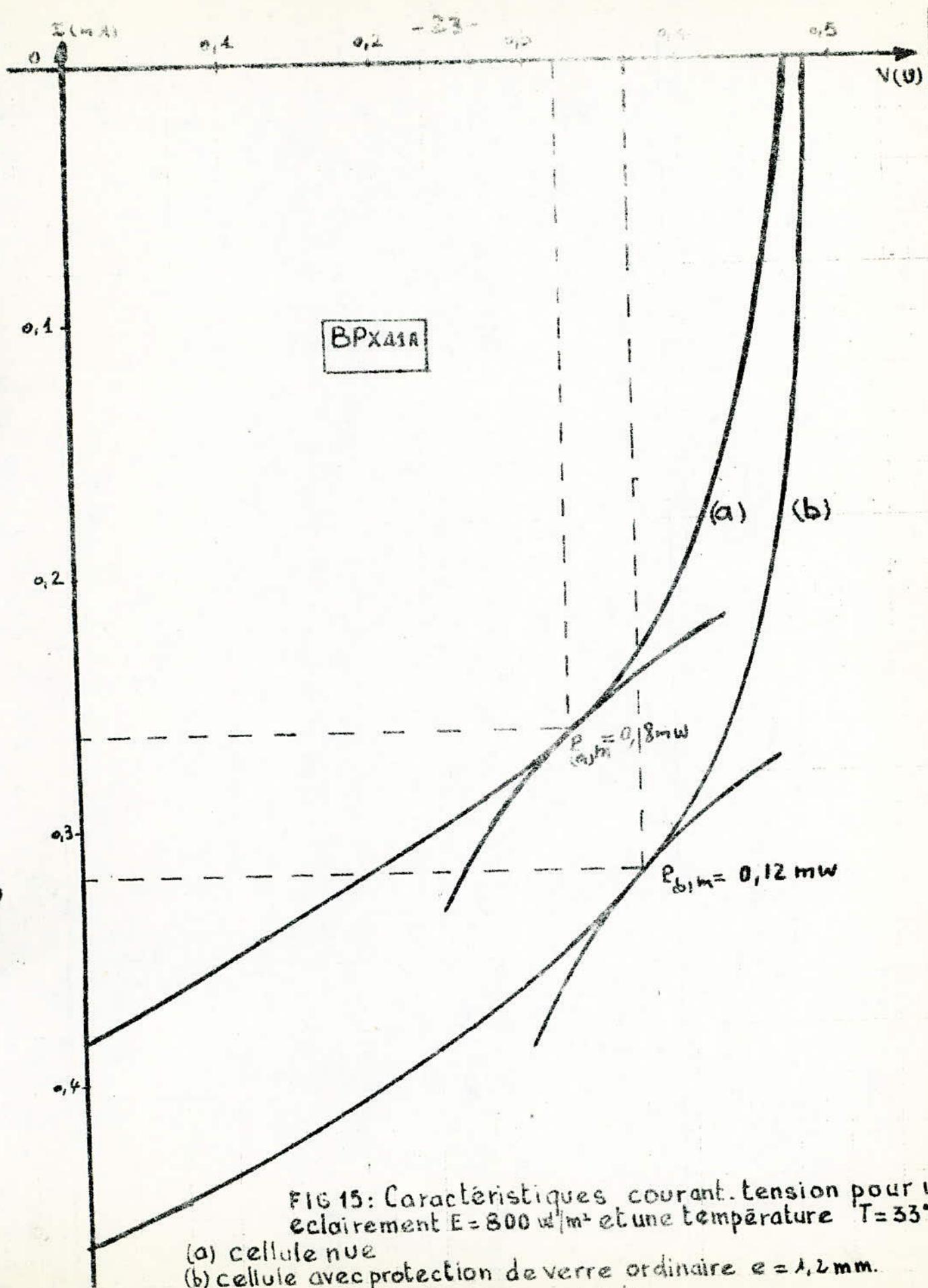


FIG 15: Caractéristiques courant-tension pour un éclairement  $E = 800 \text{ W/m}^2$  et une température  $T = 33^\circ\text{C}$   
 (a) cellule nue  
 (b) cellule avec protection de verre ordinaire  $e = 1,2 \text{ mm}$ .  
 PLEIN SOLEIL

On étudiera préalablement les caractéristiques de cellules solaires protégées d'une lame de verre et ce afin de pouvoir étudier un panneau utilisant des cellules solaires du type photodiodes (BPX41A).

Le panneau qu'on a construit est constitué des cellules encapsulées entre de plaques de protection transparentes. Ces plaques doivent avoir la propriété de réflexion des infra-rouges, pour éviter l'échauffement des cellules; laisser passer la lumière et amener une protection contre les agents mécaniques et les agents atmosphériques.

Le matériau qui puisse réaliser toutes ces propriétés c'est:

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

nous avons utilisé dans nos expériences le verre ordinaire d'épaisseur ( $e=1,2\text{mm}$ )?

les mesures ont été faites sous l'éclairement de lampes aux tungstène et sous l'éclairement de soleil. les photodiodes (BPX42A) et (BPX41A), sont recouvertes par le verre ordinaire. Les figures (14) et (15) montrent les caractéristiques I-V sous un éclairement et température différents

( On a préféré le verre ordinaire car il influe moins le courant de court-circuit).

La tension pour le rendement maximum varie également, passant par exemple de 250mv à 150 mv quand l'éclairement est divisé par 10.

Atitre d'exemple les figures 10 et 11 donnent les caractéristiques  $I=F(V)$ , pour de la cellule (BPX41A°); pour différentes températures et pour différents éclairements en plein soleil.

ET enfin les figures 12 et 13 donnent les caractéristiques de la cellule (BPX41A). Pour différentes températures  $T_j$  et pour différents éclairements E.

#### 2.2.5 Schéma équivalent d'une photopile:

Le schéma électrique électrique d'une photopile est un problème de modélisation qui n'est pas bien résolu jusqu'à présent.

La courbe  $I=F(V)$  pour un éclairement E constant fig(17), nous permet de représenter, en première approximation, la photopile par une source de courant  $J_1$  en parallèle avec une diode D l'ensemble étant en série avec une résistance  $R_s$ . figure(16).

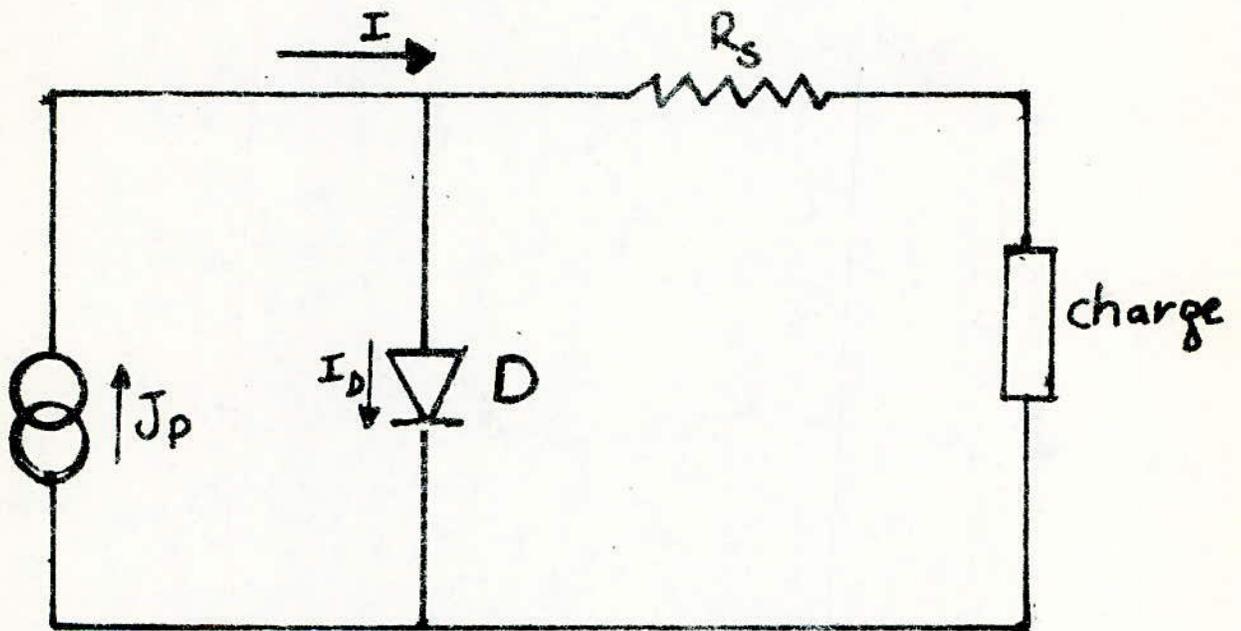
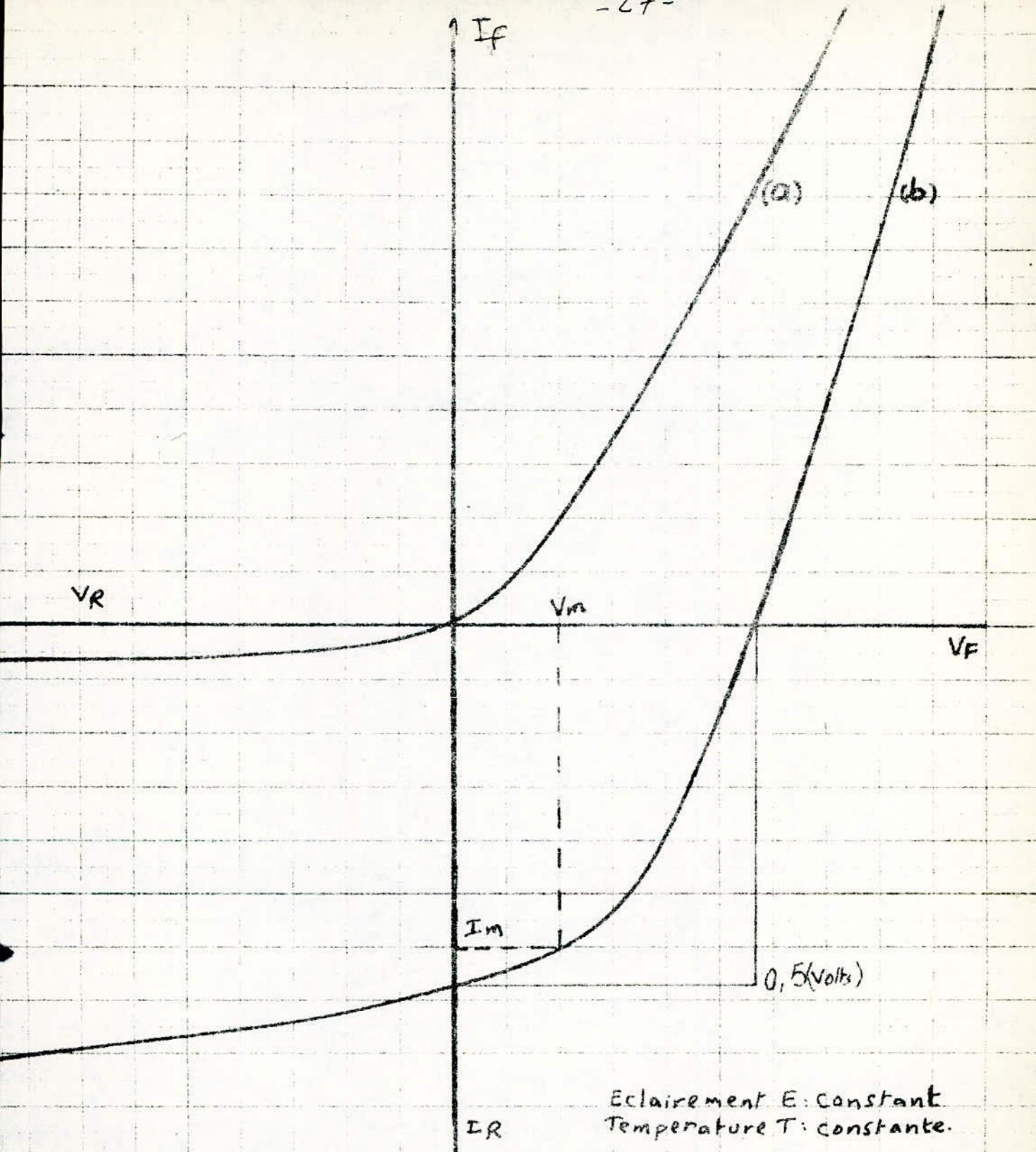


fig 16: schéma équivalent d'une photodiode.



Eclairement E: constant  
Temperature T: constante.

FIG. 17: Courbe caractéristique d'une cellule solaire.  
(a): Caractéristique d'une diode normale.  
(b): Caractéristique d'une photopile.

### 2.3: TECHNOLOGIE DES PANNEAUX SOLAIRES

Un panneau solaire est constitué par des cellules encapsulées entre deux plaques de protection transparentes, ces plaques doivent avoir la propriété de réfléchir les infrarouges, pour éviter l'échauffement des cellules, laisser passer la lumière, et assurer une protection contre les agents atmosphériques, tel que l'humidité, la poussière, etc...

Le montage des cellules sur un support, leurs interconnexions et leurs protection sont réalisés de façon à former un module solaire. Le soucis du constructeur sera donc de standardiser les éléments. Ainsi, à titre d'exemple, la société R.T.C. a fabriqué un module solaire désigné par BPX47A. Celui-ci contient 34 photopiles circulaires, au silicium, maintenues entre elle ainsi que leurs fils de connexion, par une résine (matière qui est une très mauvaise conductrice de l'électricité et de la chaleur). Un tel module pèse 2,4 Kg et mesure 365 x 468 mm.

La tension de sortie est comprise entre 15 et 17 v

Sa puissance maximale est d'environ 11 W.

Un autre exemple est celui du module solaire fabriqué par MOTOROLA; il comprend 48 cellules rondes de 7,5 cm de diamètre et fourni une puissance totale d'environ 20 W. Sa tension de sortie est de l'ordre de 10 v.

La surface des photopiles, est texturée pour former une multitude de pyramides microscopiques qui interceptent la plupart des rayons réfléchis pour améliorer le rendement.

D'autres facteurs technologiques sont aussi efficaces, par exemple: la surface du disque de silicium métallisé se forme d'une série d'anneaux concentriques très fins. La technologie des cellules constituant le module MOTOROLA est la même que

celle utilisée dans la fabrication des semi-conducteurs. Toutefois il est noté que les cellules sont recouvertes d'une couche anti-reflet, afin de réduire les pertes par réflexion, cette couche doit être transparente au rayonnement visible et réfléchir le rayonnement infra-rouges afin de réduire l'échauffement des cellules. Les connexions entre les cellules sont effectuées en général par soudure à l'étain. Les courbes courant-tension à éclairement et température donnés expriment les caractéristiques d'une cellule ou d'un panneau (Fig 18, 19, 20, 21).

Sur la figure (22), on constate que quand la température augmente, le rendement diminue et la caractéristique  $I=f(V)$  subit une translation vers des valeurs de tension plus faibles (la diminution est d'environ 60 mV/°C).

La figure 18 montre plusieurs cellules dans un module interconnectés en série - parallèle à l'aide de bandes de cuivre. Toute sorte de association des cellules est réalisable grâce à ce procédé de branchement (fig 19).

Connection Parallèle avec Panneau suivant

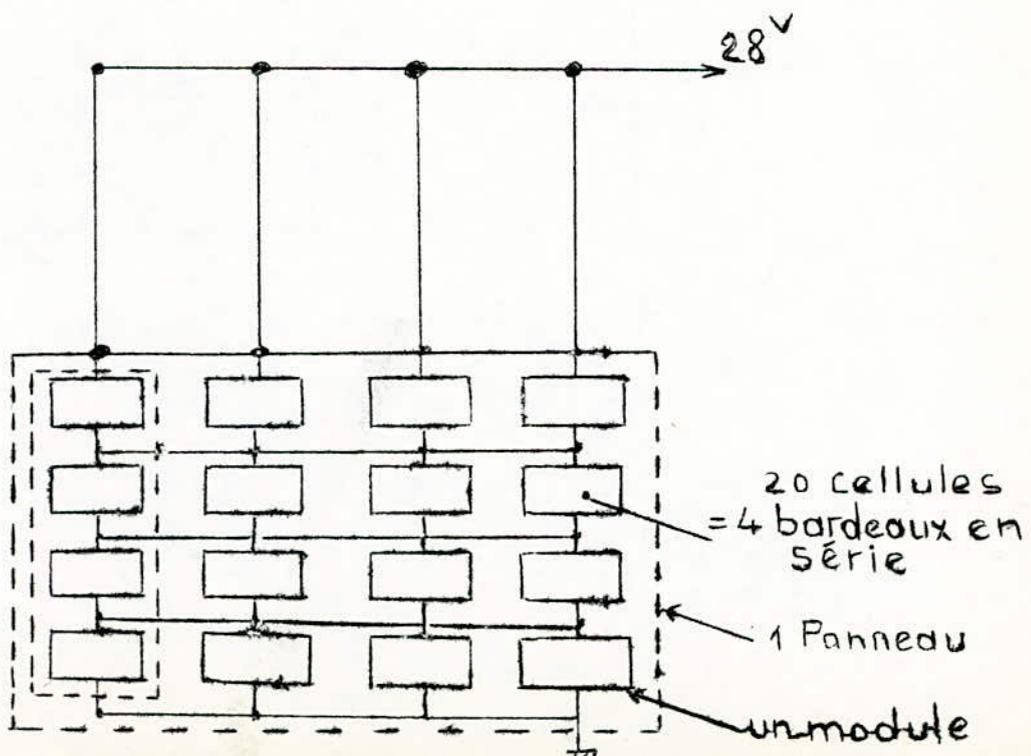


FIG 19: Connexion des éléments dans un Panneau.

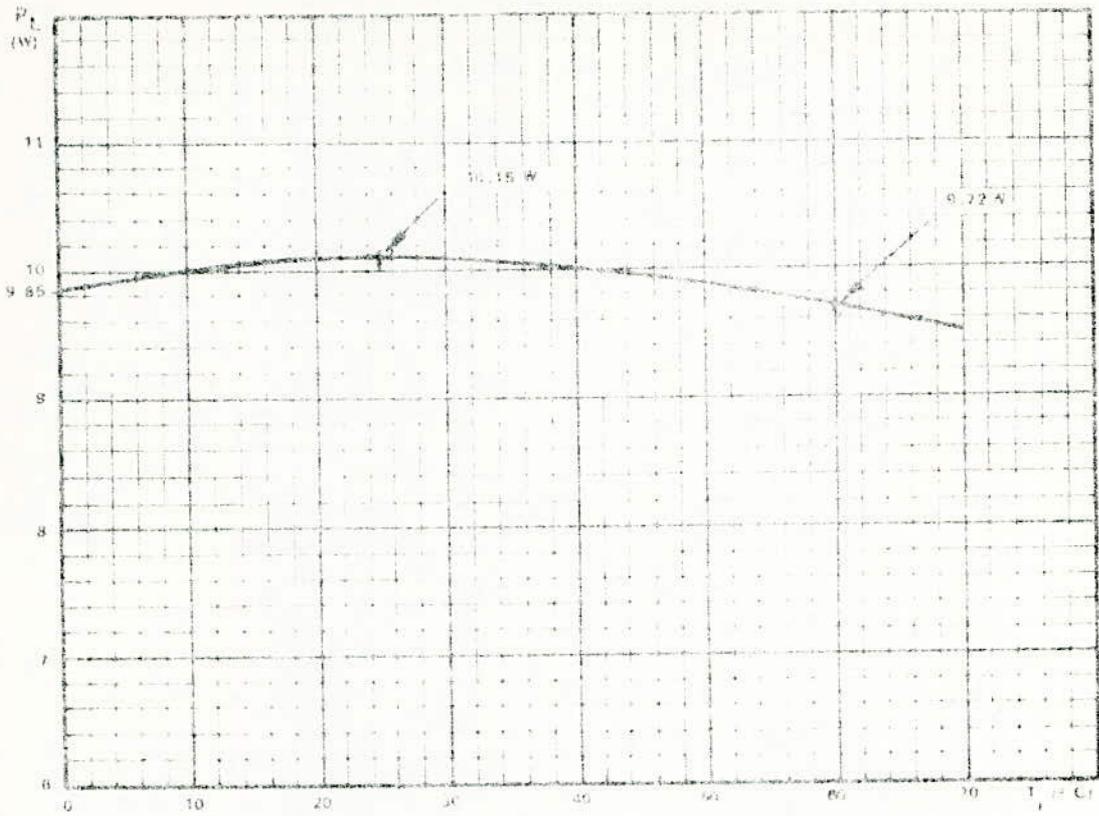
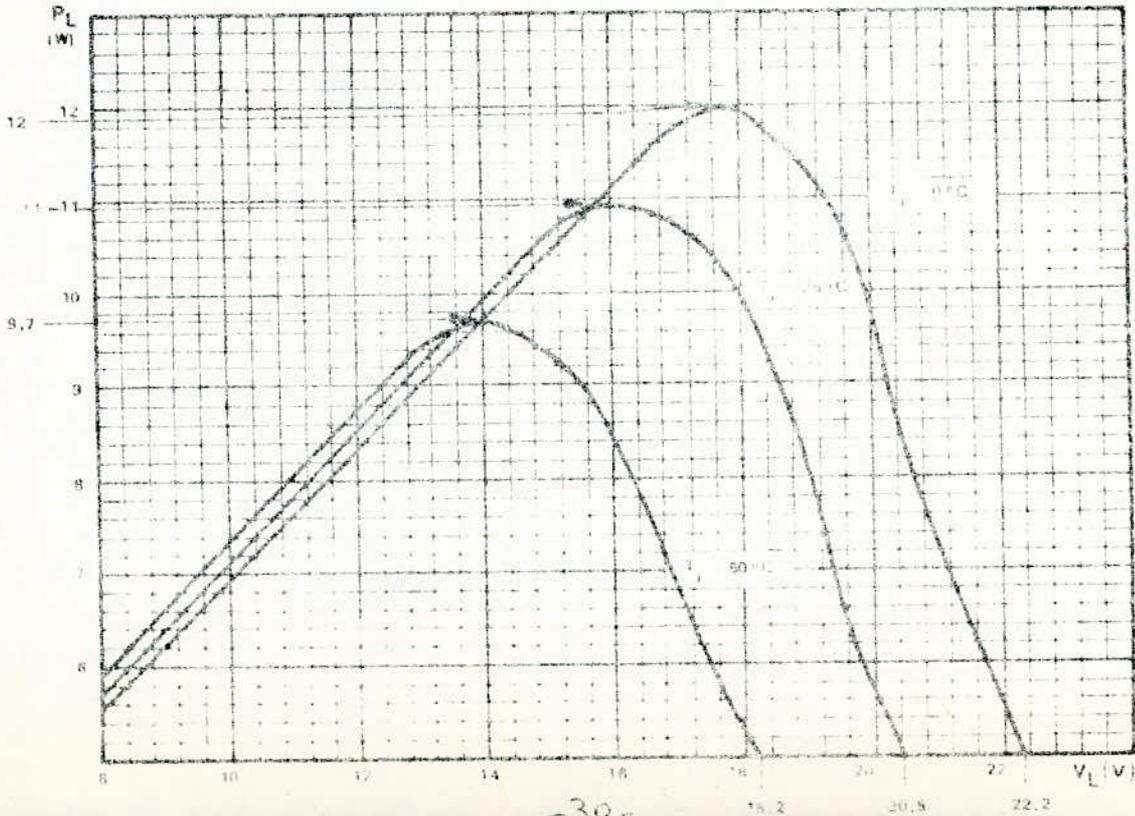


Figure 11:  $M_{100} = 143\%$



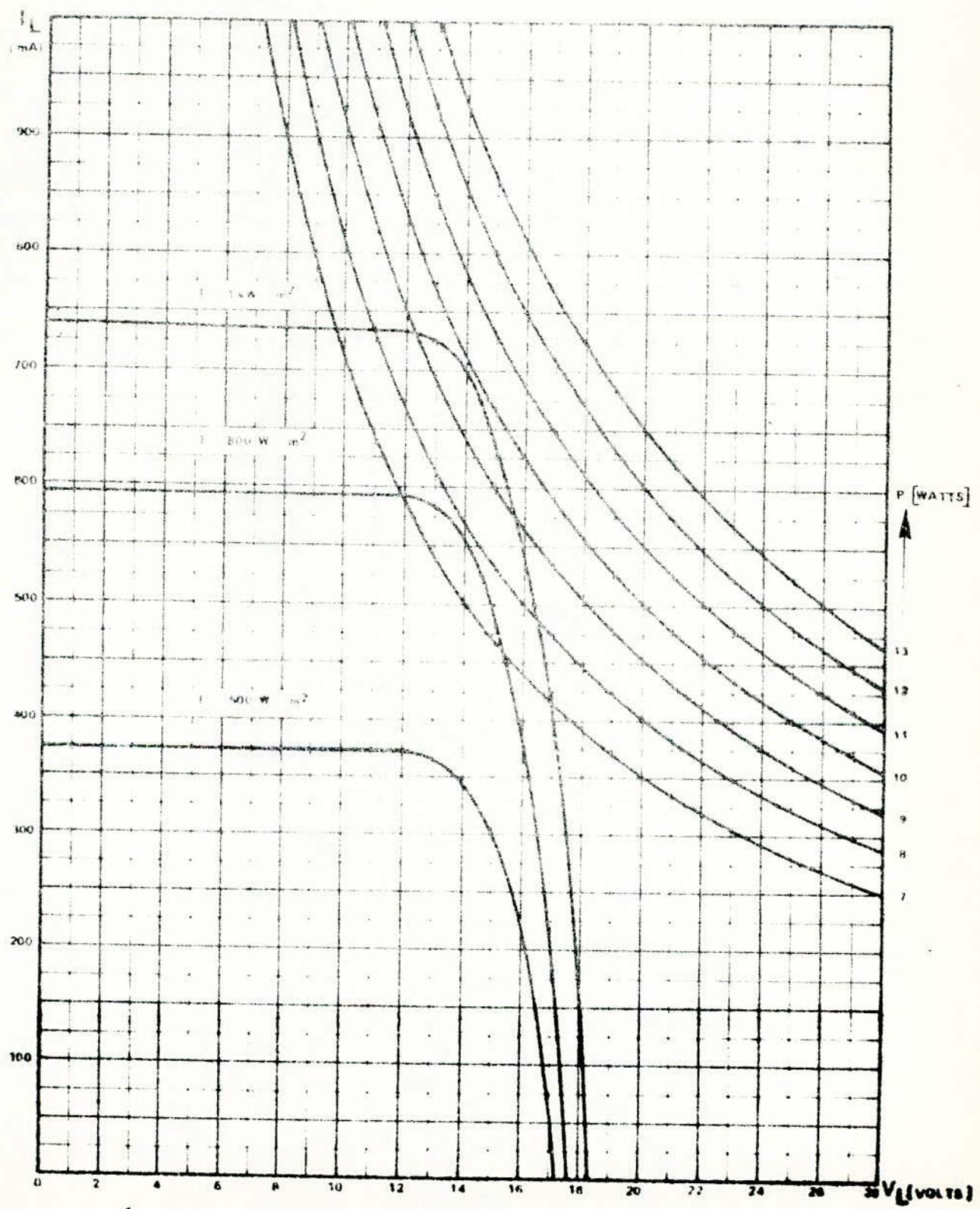


fig 23  $I_L = f(V_L)$  à différents éclairements,  $E$  pour  $T_j = 60^\circ\text{C}$

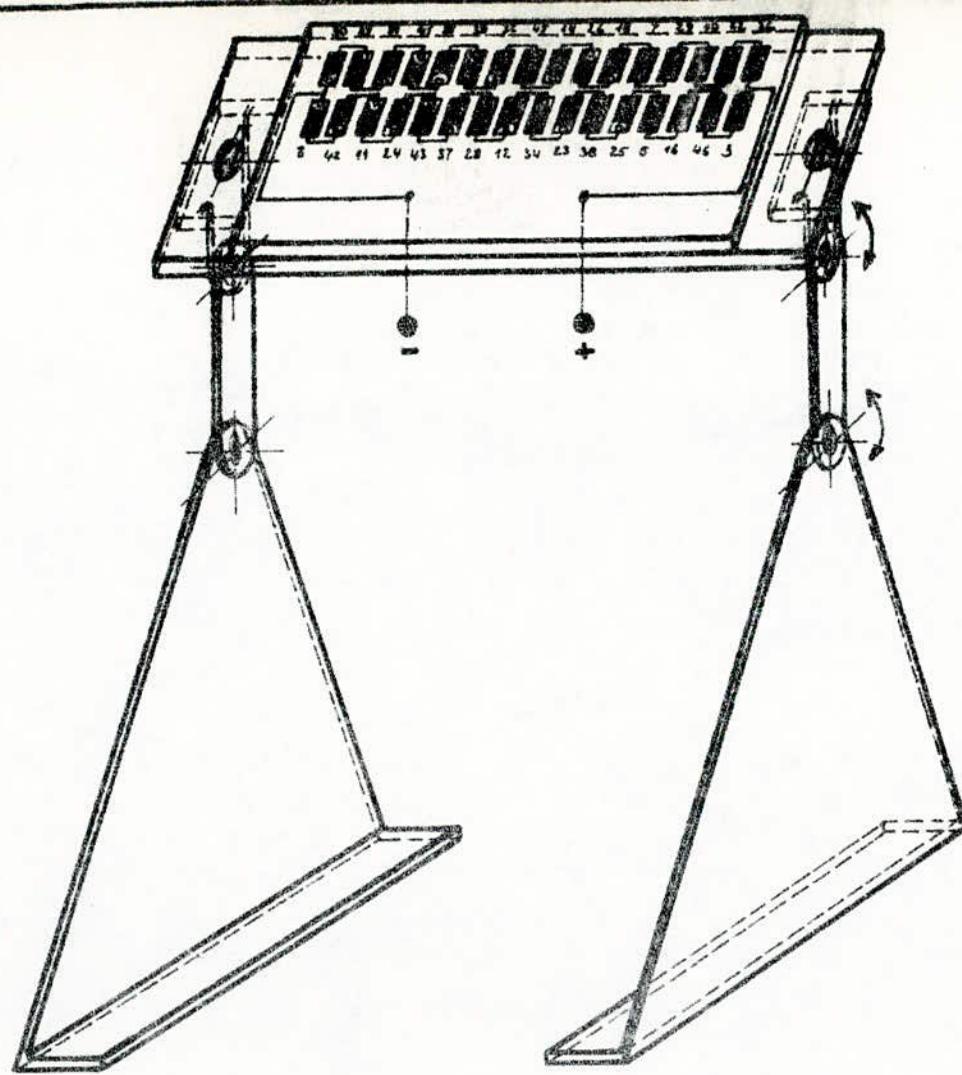
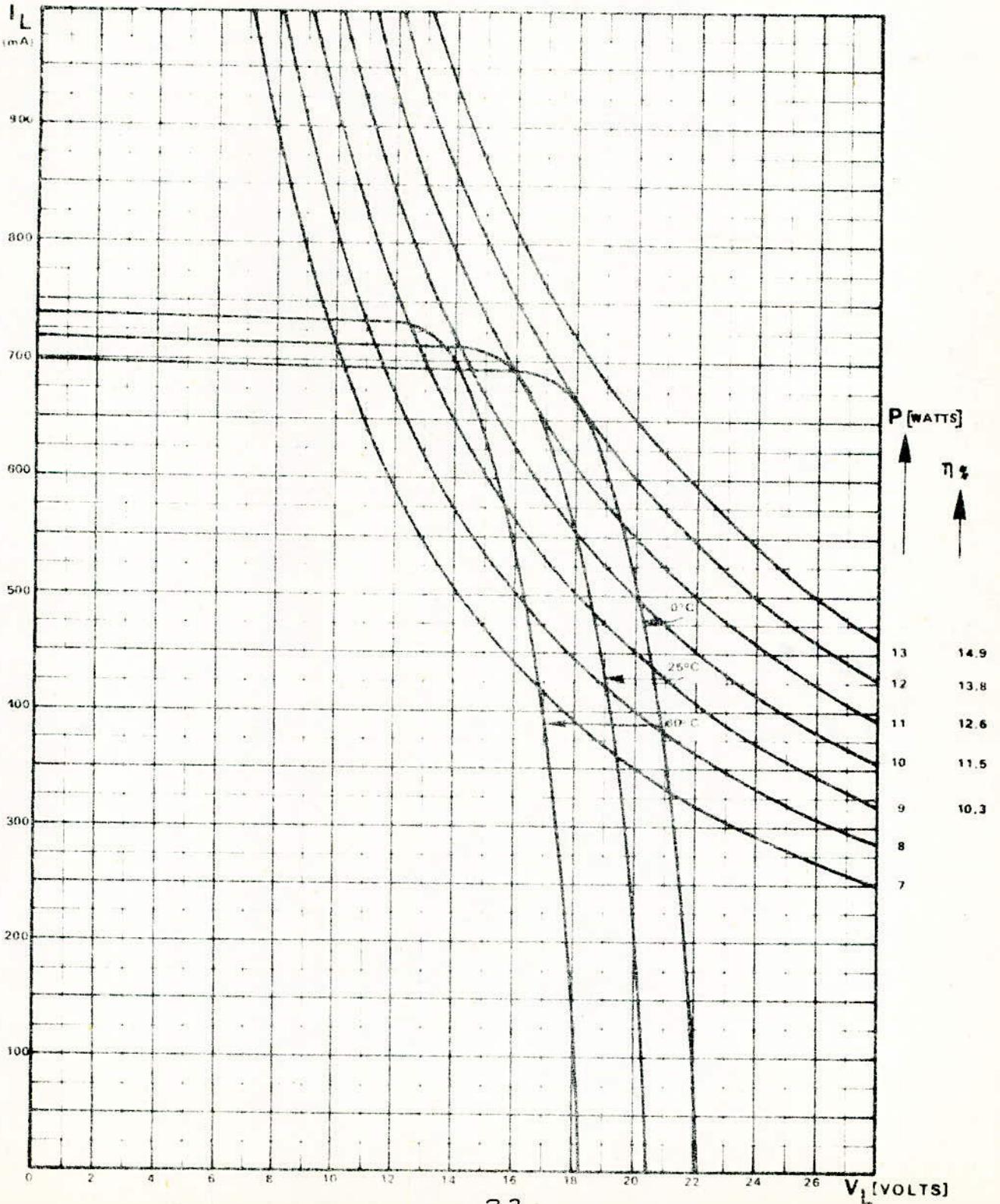


fig 21.

ZITOUNI MOKHTAR E.N.P.A.	PANNEAU SOLAIRE ETUDE DES ASSOCIATIONS SERIE OU PARALLELE
--------------------------------	--



# Caractéristiques dimensionnelles

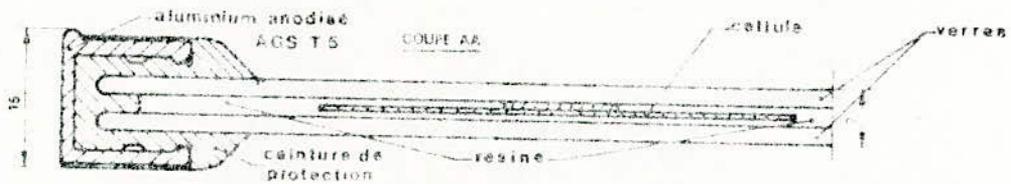
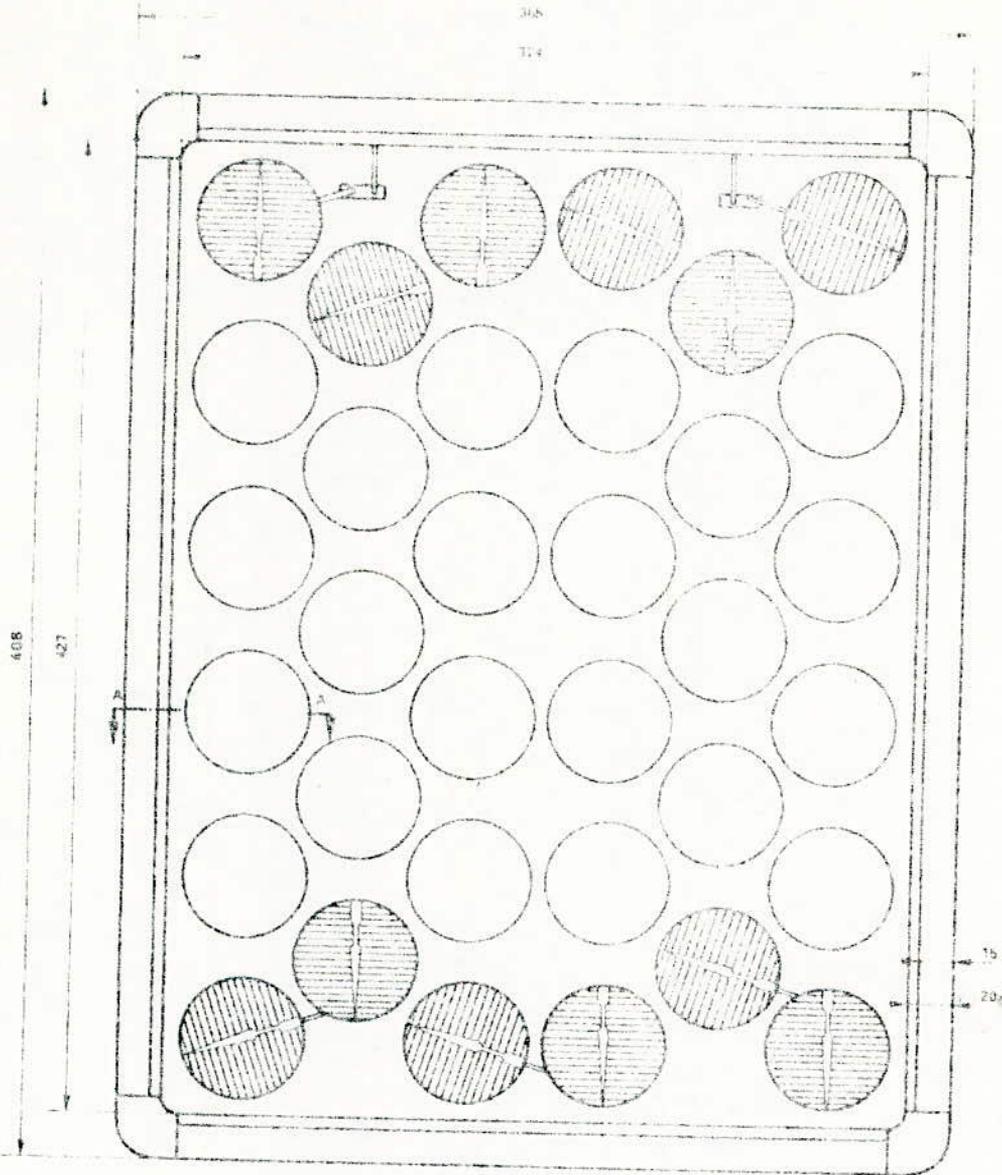
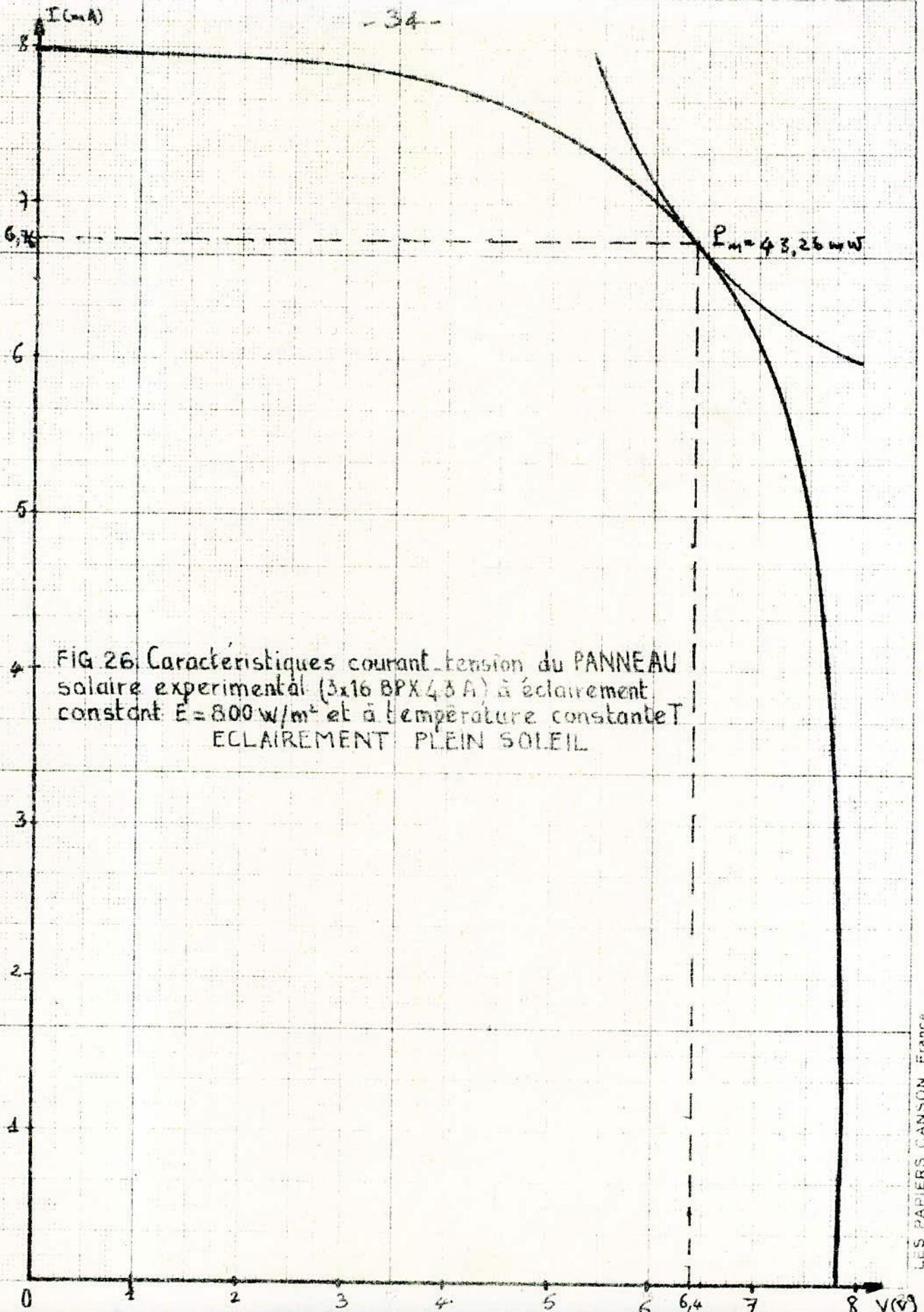


fig 18

## Sortie électrique

- par câble bifilaire
- longueur 1 m
- ext. du câble 5.5 mm
- ext. des fils 2 x 1.8 mm
- polarité noir =



4 FIG 26. Caractéristiques courant-tension du PANNEAU solaire expérimental (3x16 BPX 43 A) à éclairement constant  $E = 800 \text{ w/m}^2$  et à température constante  $T$ .  
ECLAIREMENT PLEIN SOLEIL

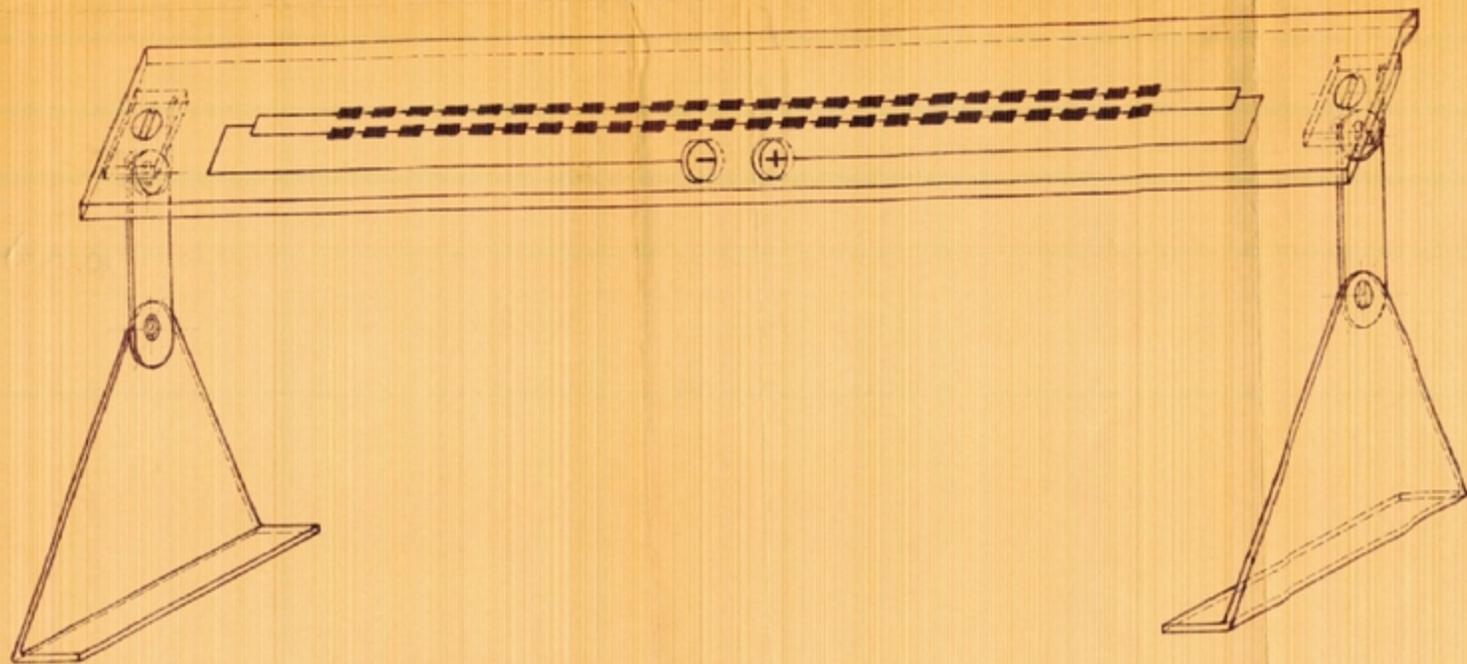


fig 20:

- 35 -

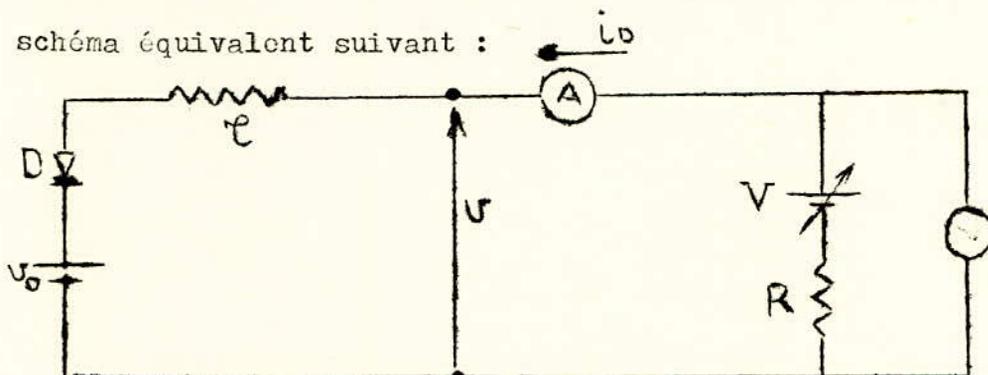
ZITOUNI MOKHTAR E.N.P.A.	PANNEAU SOLAIRE ETUDE DES ASSOCIATIONS SERIE OU PARALLELE
Echelle : 2	Projet de fin d'étude
	Janvier 1978

CHAPITRE 3:  
ETUDE THEORIQUE DES ASSOCIATIONS SERIE OU  
PARALLELE DES PHOTOPILES

3.1<sup>o</sup> Introduction:

Etude des défauts de circuits :

Sans restreindre la généralité, nous allons faire une théorie simplifiée. Pour cela, nous supposons qu'une photopile est représentée par le schéma équivalent suivant :



A partir de schéma en résulte l'analyse des courbes  $i = f(V)$  à un éclairement  $E = \text{constant}$  et une température  $T = \text{constante}$ .

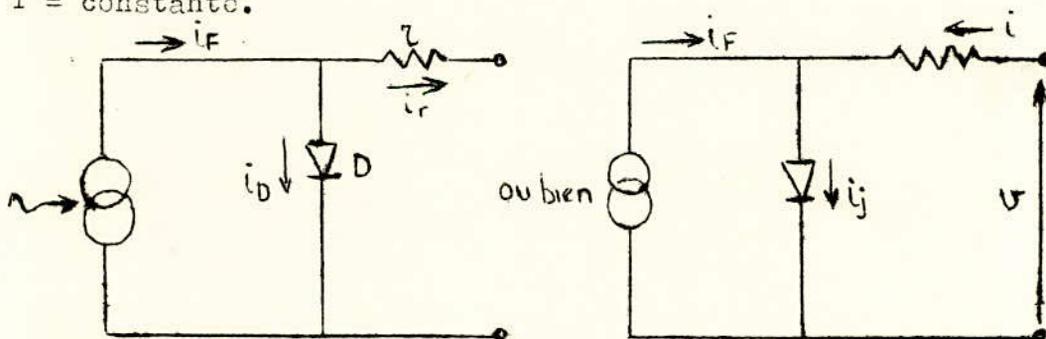


FIG 1

Grouperment des cellules solaires :

Le choix du type de grouperment imposé par le souci de satisfaire aux normes d'utilisation et d'éviter les risques de détérioration dû à un mauvais assemblage des cellules est important.

Donc il faut étudier les différentes associations des cellules en tenant compte des différents facteurs qui entrent en jeu. Il existe plusieurs manières d'associer les cellules. Les associations utilisées en général sont :  
Groupement en séries, groupements en parallèle, groupement en séries-parallèles;

### 3.1- CAS DES GROUPEMENTS EN SERIES :

Considérons  $n$  photopiles branchées en séries (soit  $n=32$  photodiodes BPX 41 A).  
Le problème est d'analyser les risques de claquage du circuit.

#### 3.1.1 : Analyse qualitative :

Si on suppose que les  $n$  cellules sont identiques (c'est à dire ont presque les mêmes courants de court-circuit, même tension à vide, même durée de vie, même dimensionnement, même conditions de fabrication, etc ...).

Si on suppose que l'une d'elles, par exemple la 32<sup>e</sup> est à l'obscurité, alors que les autres sont éclairées, dans ce cas on le schéma simplifié comme l'indique la fig. N° 2. Ce schéma montre que la cellule qui se trouve à l'obscurité est polarisée en inverse par la somme des forces électromotrices photovoltaïques résultant de l'éclairement des autres cellules.

Puisque ce genre de groupement permet d'augmenter  $V_0$  la tension aux bornes du module.

Donc dans ce genre d'associations on a risque ces groupe-

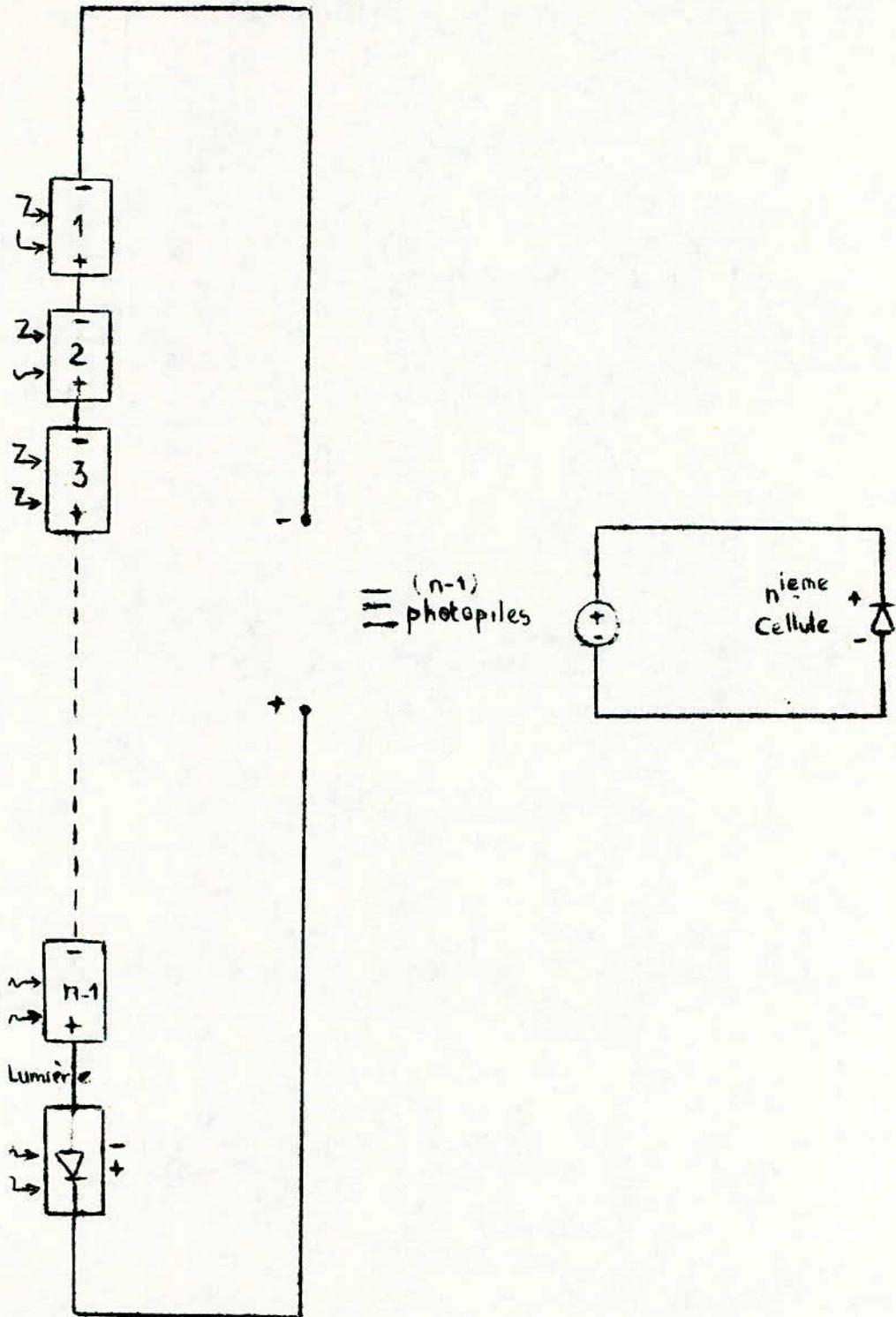


FIG 2

ments (associés en séries) ont des courants de court-circuit différents d'une photopile à une autre.

Si l'ensemble est mis en court-circuit, alors la photopile ayant le plus faible des courants de court-circuit sera soumise à une tension inverse.

Si cette force électromotrice résultante atteint la tension de Zener (tension de claquage) (Annexe 2.)

la même photopile dans ce cas, il y aura destruction de cette dernière.

Caractéristique dans l'obscurité d'une photopile:

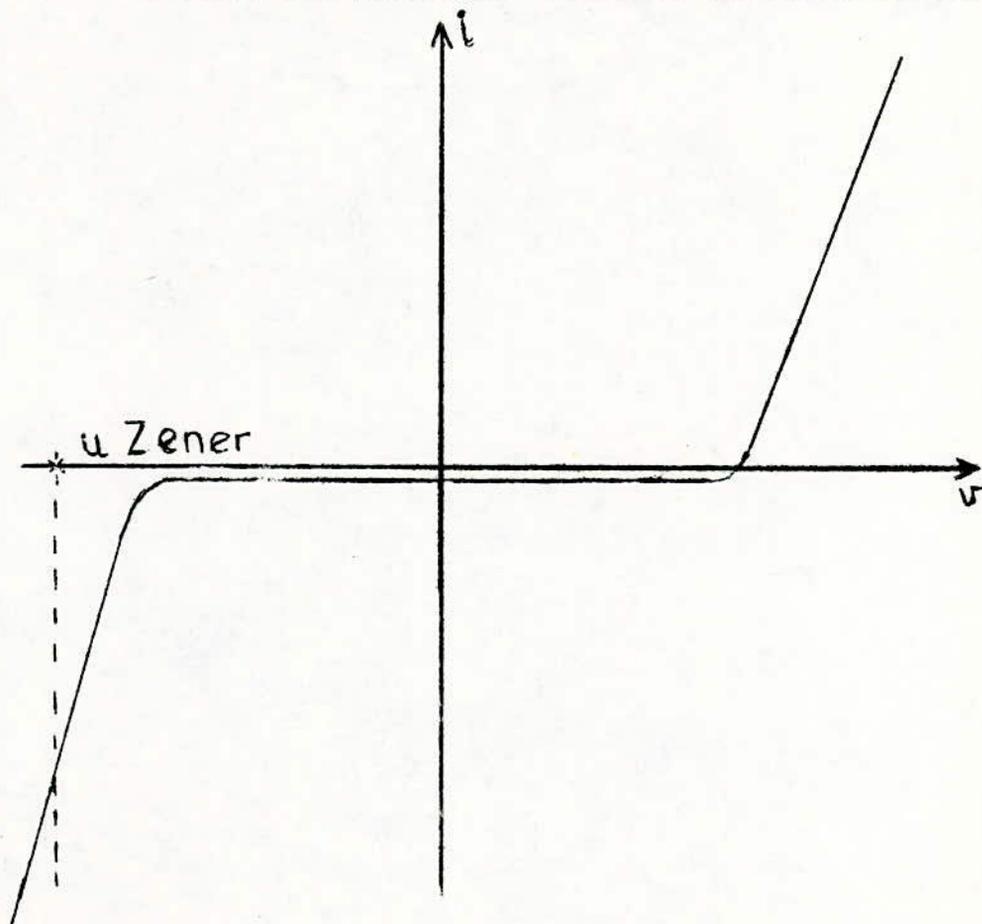


FIG 3

On constate que cette caractéristique de la photopile à l'obscurité est presque la même que celle d'une diode Zeller. (Car les photopiles ou cellules solaires sont des diodes à jonction de grande surface, dont on utilise l'effet photovoltaïque pour la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique).

Maintenant si on considère l'ensemble de deux cellules en séries, la caractéristique résultante  $I=f(V)$  à un éclairement constant et à une température  $T=\text{constante}$  sera obtenue en ajoutant point par point les caractéristiques de chacune des photopiles, c'est à dire en additionnant les abscisses des points ayant même ordonnée (les cellules sont parcourues par le même courant).

D'où :

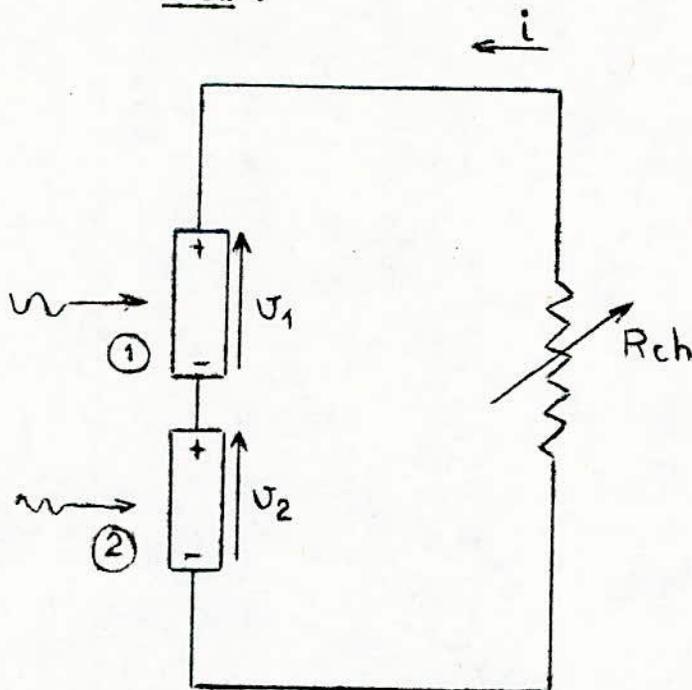
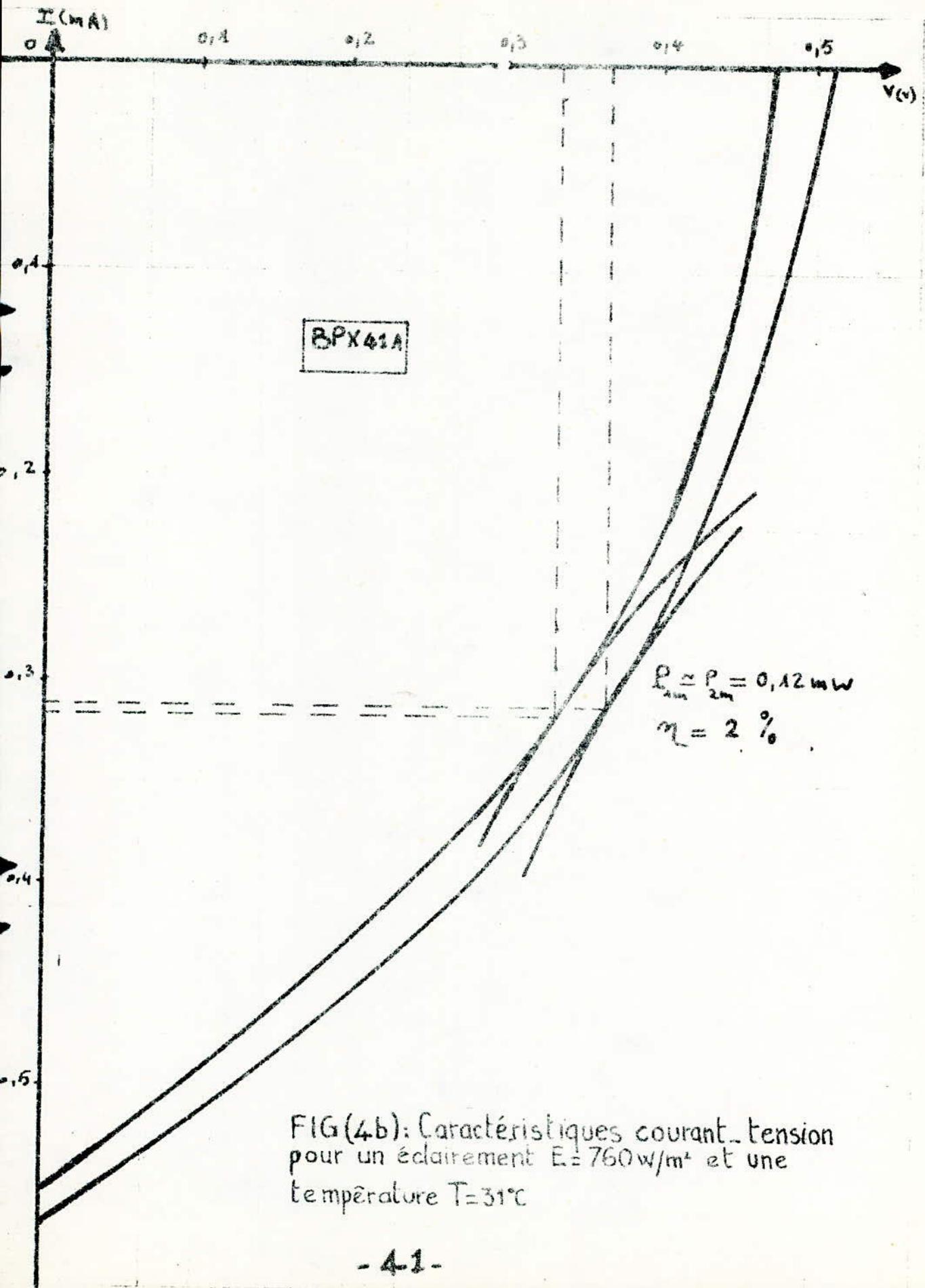
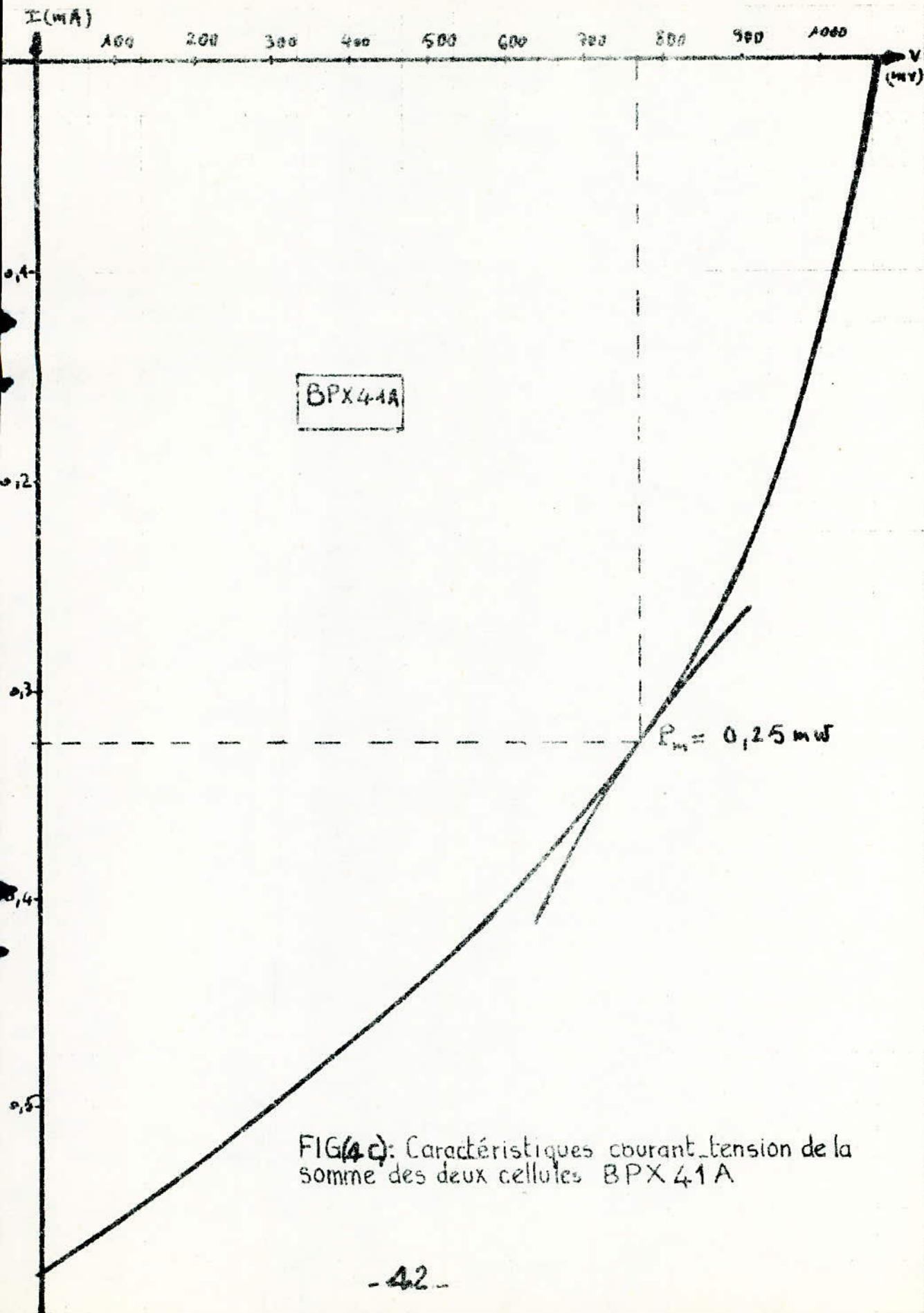


FIG 4



FIG(4b): Caractéristiques courant-tension pour un éclairage  $E = 760 \text{ w/m}^2$  et une température  $T = 31^\circ\text{C}$



FIG(4c): Caractéristiques courant\_tension de la somme des deux cellules BPX 41A

On constate que la photopile (2) a limité le courant de la photopile (1).

Donc  $I_2 - I_1$  circule dans le circuit, le reste va être dissipé dans la  $R_s$  (résistance série de la photopile) (Voir Annexo).

A ce moment, une chute de potentiel de régime opposée se crée donc on aura une force électromotrice indirecte : c'est la tension inverse de la photopile (2) a sa diode qui est polarisée en inverse.

Si on généralise l'étude on voit que si le nombre de photopile augmente, la tension est importante.

**3.2.2 Formulation du problème :**

**3.2.2.1 Calcul du courant parcourant un circuit de 48 cellules en séries (l'ensemble étant en court-circuit) :**

Le schéma en principe est le suivant :

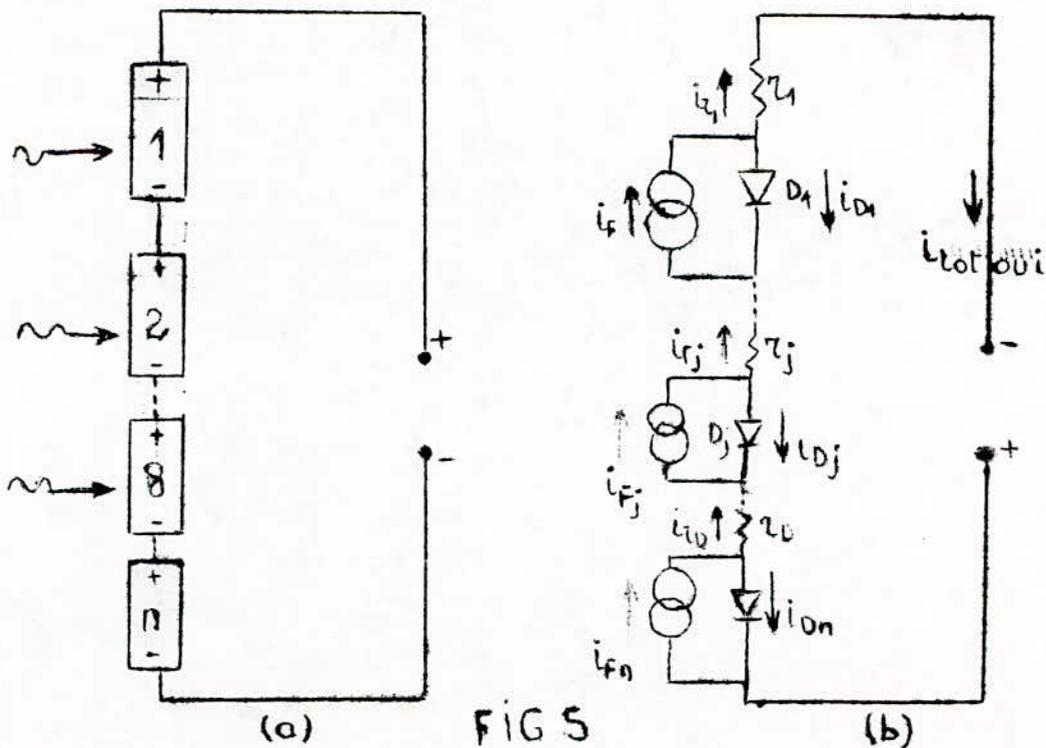


FIG 5

On en déduit que :

$$i_{tot} = i_{r1} = i_{F1} - i_{D1} = \dots = i_{rj} = i_{Fj} - i_{Dj} = \dots = i_{rn} = i_{Fn} - i_{Dn} \quad (1)$$

La tension aux bornes de la jème cellule est :

$$v_j = U_{Dj} - r_j i_{rj} \quad (2)$$

Avec  $i_{Dj} = f(U_{Dj})$  (La fonction  $i_D = f(U_D)$

définit, d'une façon générale, la caractéristique de la diode D ou, d'une manière équivalente, de la photopile à l'obscurité).

La condition de court-circuit de l'ensemble des n cellules en séries est :

$$\sum_{j=1}^n v_j = \sum U_D - r_j i_{rj} = 0 \quad \text{et} \quad i_{tot} = \frac{\sum U_{Dj}}{\sum r_j} \quad (3)$$

On remarque que :

$$-\sum_{i=1}^{n-1} v_0^{(i)} \leq V_n \leq +v_0^{(n)} \quad (4)$$

$V_0$  étant la tension à vide d'une photopile

En effet, si la n<sup>ième</sup> photopile est plongée dans l'obscurité les (n-1) cellules restantes polariseront dans le sens inverse la diode  $D_j$ , celle-ci représentera une impédance très élevée, et la tension à ses bornes sera pratiquement la somme des f.e.m. photovoltaïques des (n-1) cellules, soit

$V = v_0^{(i)}$  de même si ces (n-1) photopiles ne sont pas éclairées, elles sont polarisées dans le sens inverse de la j<sup>ème</sup> photopile et elles présentent une impédance très élevée, par suite, la tension aux bornes de la n<sup>ième</sup> photopile sera sensiblement sa f.e.m. à vide, soit  $V_n \simeq +V_0^{(n)}$

Lorsque toutes les cellules sont soumises à un rayonnement, le point de fonctionnement de la n<sup>ième</sup> cellule se trouve à

l'intérieur du domaine défini par l'inégalité (4), c.à.d; que que  $v_j$  prend une valeur comprise entre  $V_0 \sum_{i=1}^{n-1} V_0^{(i)}$  et  $+ V_0(n)$ . Lorsque ce point de repos est tel que  $v > 0$ , les courbes de la figure (4b) montrent qu'on peut utiliser l'approximation quasi linéaire .

A l'obscurité, on a :

$$i_D \approx I_0 \left[ \exp \frac{e}{K_B T} (v - r i_D - V_0) - 1 \right]$$

$$\approx I_0 \left[ \exp \frac{e}{K_B T} (v - V_0) - 1 \right]$$

$i$  est de l'ordre de quelques micro Ampères et  $r$  de l'ordre de 0,1 à 1 ohm

On peut donc écrire , au voisinage de l'origine ( $v$  quelques mV)

$$i_D \approx I_0 \exp - \frac{eV_0}{K_B T} \dots \exp \frac{ev}{K_B T} - I_0$$

$$\approx I_0 \exp - \frac{eV_0}{K_B T} - I_0 + I_0 \exp - \frac{eV_0}{K_B T} \times \frac{ev}{K_B T} + \dots$$

$$v_0 \approx 0,5 \text{ volts} \approx \frac{eV_0}{K_B T} \quad 20 \quad \text{et} \quad \exp(-20) \approx 2 \cdot 10^{-9}$$

$$\text{D'où : } i_D \approx \frac{eI_0}{K_B T} \cdot \exp - \frac{eV_0}{K_B T} \cdot v - I_0 = \frac{v}{R_D} - I_0 \quad (5)$$

$$\text{Avec } R_D \approx \frac{K_B T}{eI_0} \exp \frac{eV_0}{K_B T} = \frac{5 \cdot 10^8}{40 \times 10^{-5}} = 10^{12} \text{ ohms}$$

(en prenant  $I_0 = 10 \text{ u A}$  )

$R_D$  étant la résistance inverse de la diode D

Sous éclaircissement, la caractéristique  $i(f(v))$ , dans la région où  $v < 0$ , peut s'écrire approximativement :

$$i \approx \frac{v}{R} - I_0 - I_F \quad (6)$$

et, le schéma équivalent d'une photopile devient

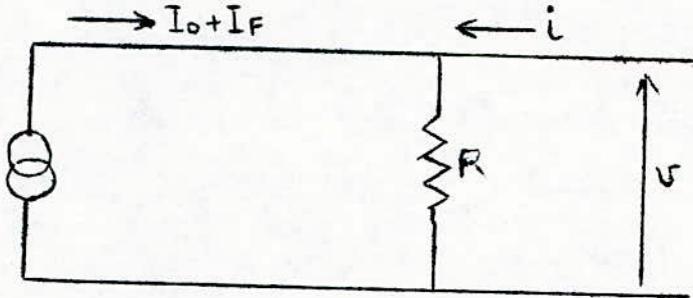


FIG 6

D'où:

$$i_D \approx \frac{eI_0}{K_B T} \exp - \frac{eV_0}{K_B T} \cdot v - I_0 = \frac{v}{R} - I_0 \quad (5)$$

avec  $R \approx \frac{K_B T}{eI_0} \exp \frac{eV_0}{K_B T} \approx \frac{5 \cdot 10^8}{440 \cdot 10^{-5}} \approx 10^{12} \text{ Ohms (en prenant$

$$I_0 \approx 10 \mu\text{A})$$

$R_D$  étant la résistance inverse de la diode D.

Sous éclaircissement, la caractéristique  $i = f(v)$ , dans la région où  $v < 0$ ; peut s'écrire approximativement

$$i \approx \frac{v}{R} - I_0 - I_F \quad (6)$$

et, le schéma équivalent d'une photopile devient:

3-2-2-2 Cas de deux cellules de caractéristiques différentes  
 C'est le cas représenté à la figure (4). Lorsque  $R_{ch} = 0$ ,  
 on a le schéma équivalent suivant :

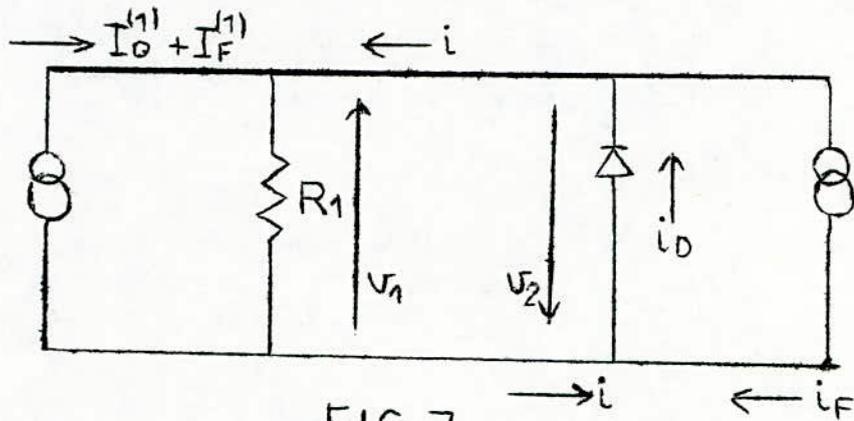


FIG 7

La cellule (1) ayant des valeurs de courant, pour  $v$  donné, plus faible que celle de la cellule (2).

On a la relation suivante :

$$v_1 = -v_2 = v < 0 \quad (7)$$

$$i = I_0^{(2)} \left( \exp \frac{e}{K_B T} (v_2 - r_2 \cdot i - V_0^{(2)}) - 1 \right) - I_F \quad (8)$$

$$i \approx \frac{v_1}{R_1} - I_0^{(1)} - I_F^{(1)} \quad (9)$$

$$\text{avec } R_1 \approx \frac{K_B T}{e I_0^{(1)}} \exp \frac{e V_0^{(1)}}{K_B T} = 10^{12} \text{ Ohms}$$

deux cas limites intéressants peuvent être considérés.

1 Les caractéristiques  $i = f(v)$  de chacune des deux cellules sont voisines l'une de l'autre .

Le point de fonctionnement de l'ensemble des deux photopiles est défini par  $(0, I_{cc})$ . Analytiquement, pour trouver ce point, on peut écrire l'expression (7) sous la forme:

$$i \approx \frac{v}{R_2} - I_0^{(2)} - I_F^{(2)} = \frac{v}{R_2} - I_0^{(2)} - I_F^{(2)}$$

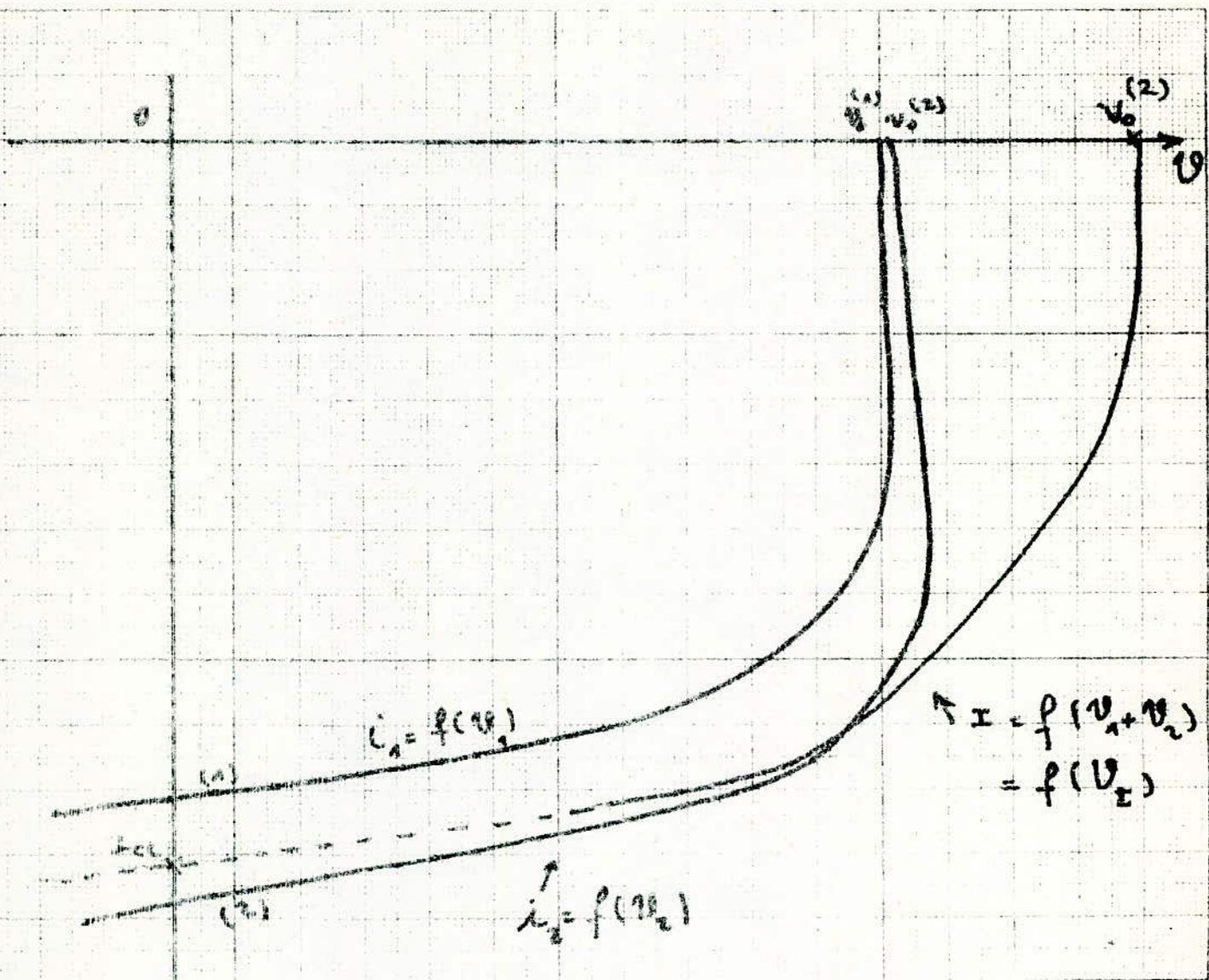


fig 8 : caractéristique théorique

$$\text{avec } R_2 \approx \frac{K_a T}{e I_0} \exp \frac{-4 q}{K_B T} \frac{e V_0^{(1)}}{K_B T}$$

( Les valeurs de  $v_2$  étant voisines de l'origine, on peut appliquer l'approximation quasilinéaire qui donne la relation 5'

Il vient:

$$-I_{cc}^{(1)} - \frac{v}{R_2} - I_0^{(2)} - I_F^{(2)} = \frac{v}{R_1} - I_0^{(1)} - I_F^{(1)} \quad (10)$$

$$v^{(1)} = v_1 + v_2 = v - v = 0 \quad (11)$$

De 10 on tire :

$$v \left( -\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = I_0^{(1)} + I_F^{(1)} - I_0^{(2)} - I_F^{(2)}$$

$$\text{où } v = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} ( I_0^{(1)} + I_F^{(1)} - I_0^{(2)} - I_F^{(2)} ) < 0 \quad (12)$$

En combinant (10) et (12) on obtient

$$-I_{cc}^{(1)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} ( I_0^{(1)} + I_F^{(1)} - I_0^{(2)} - I_F^{(2)} ) - I_0^{(1)} - I_F^{(1)} \quad (13)$$

et, après calcul, on peut écrire :

$$I_{cc}^{(1)} = \frac{R_1 ( I_0^{(1)} + I_F^{(1)} ) + R_2 ( I_0^{(2)} + I_F^{(2)} )}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

Remarque:

Pour une cellule solaire donnée, le courant de court-circuit s'obtient en faisant  $v=0$  dans l'expression générale de  $i$ , soit:

$$i = I_0 \left( \exp \frac{e}{K_B T} (v - \tau i - U_0) - 1 \right) - I_F \Rightarrow$$

$$-I_{cc} = I_0 \left( \exp \frac{e}{K_B T} (\tau I_{cc} - U_0) - 1 \right) - I_F \quad (14)$$

Si on suppose que  $rD \ll r \cdot I_{cc} \ll V_0$ , on aura:

$$I_{cc} \approx I_0 + I_F \quad (15)$$

et, le courant de court-circuit de deux cellules solaires en série sera:

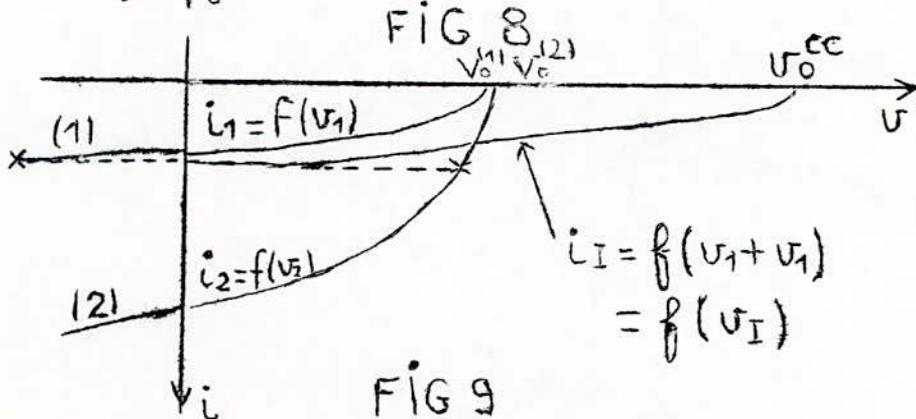
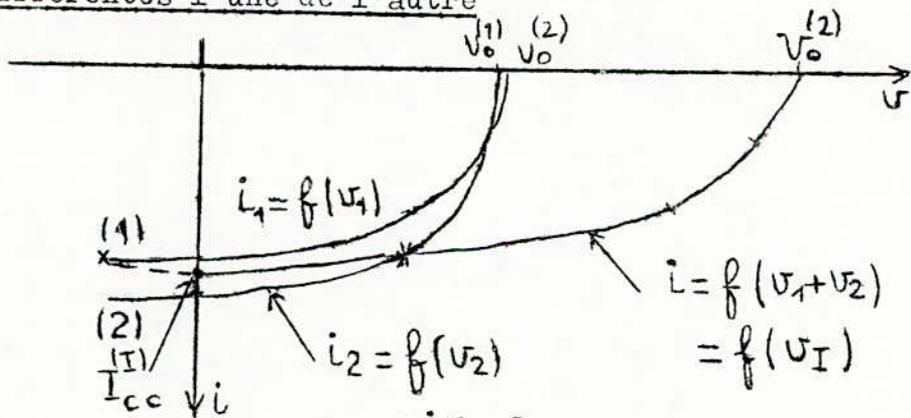
$$I_{cc}^{(I)} = + \frac{R_1 I_{cc}^{(1)} + R_2 I_{cc}^{(2)}}{R_1 + R_2} \quad (16) \quad (14)$$

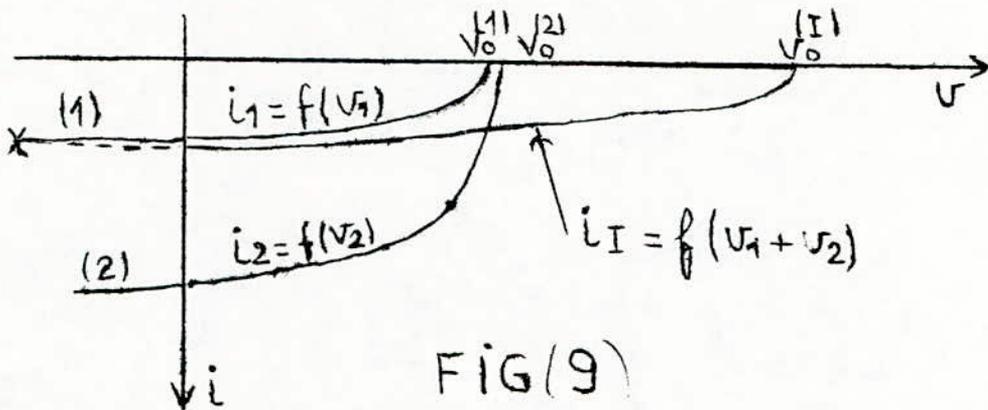
Graphiquement  $i=f(v)$  résultante des deux photopiles en série  
 Cette courbe a pour équation:

$$V_I = V_1 + V_2 = R_1 (I_I + I_{cc}^{(1)}) + R_2 (I_I + I_{cc}^{(2)}) \quad (15)$$

$$\text{OU } I_I = \frac{V}{R_1 + R_2} - \frac{R_1 I_{cc}^{(1)} + R_2 I_{cc}^{(2)}}{R_1 + R_2} \quad (17)$$

2. Les courbes  $i=f(v)$  de chacune des deux cellules sont différentes l'une de l'autre





FIG(9)

Dans ce cas, on peut aussi résoudre le problème en utilisant l'approximation quasi-linéaire.

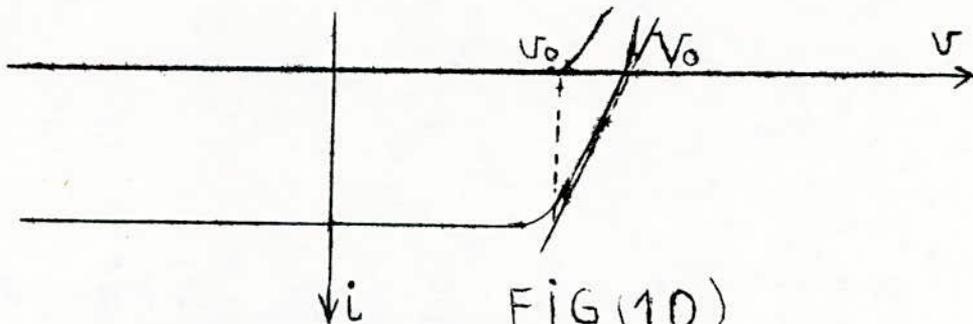
Pour la cellule (1) nous avons:

$$i \approx \frac{v_1}{R_1} - I_{cc}^{(1)} \quad (18)$$

avec  $v_1 = +v < 0$

$$\text{et } R_1 = \frac{k_B T}{e I_0^{(1)}} \exp \frac{e U_0}{k_B T}$$

Dans le cas de la cellule (2), l'équation qui donne  $i=f(v)$  dans l'approximation quasi-linéaire peut être déduite graphiquement



FIG(10)

Lorsque  $v = U_0$ , on a, de façon générale :

$$i = I_0 \exp \frac{e v}{k_B T} - I_0 - I_F \quad (19)$$

si  $|v| < \frac{k_B T}{e}$ , il viendra

$$i \approx -I_F \quad (20)$$

Dans le cas où  $V_0 < v < V_0$ , la courbe  $i = f(v)$  est peu différente de sa tangente au point  $(0, V_0)$ , et on peut écrire

$$\left(\frac{\partial i}{\partial v}\right)_{v=V_0} \approx \frac{e}{k_B T} I_0 \exp \frac{e}{k_B T} (V_0 - U_0) \approx \frac{v - V_0}{i} = \frac{1}{\tau_D} \quad (21)$$

$$\text{avec: } \tau_D = \frac{k_B T}{e I_0} \exp -\frac{e}{k_B T} (V_0 - U_0) \quad (21)$$

$$\text{d'où } i = \frac{v - V_0}{\tau_D} \quad (22)$$

Analytiquement on aura :

$$\begin{aligned} i &= I_0 \exp \frac{e}{k_B T} (v - \tau i - V_0) - I_0 - I_F \\ &\approx I_0 \exp \frac{e}{k_B T} (V_0 - U_0) \left[ 1 + \frac{e}{k_B T} (v - \tau i - V_0) + \dots \right] - I_0 - I_F \\ \text{et} \\ i &\approx \frac{I_0 \exp \frac{e}{k_B T} (V_0 - U_0) + I_0 \exp \frac{e}{k_B T} (V_0 - U_0) \times \frac{e}{k_B T} (v - V_0) - I_0 - I_F}{1 + \frac{e \tau}{k_B T} I_0 \exp (V_0 - U_0)} \quad (23) \end{aligned}$$

$$\text{si } i = 0; v = V_0 \text{ et } I_0 \exp \frac{e}{k_B T} (V_0 - U_0) = I_0 + I_F \quad (24)$$

on a donc :

$$\tau_D = \frac{k_B T}{e(I_0 + I_F)} \quad (25)$$

On aura donc :

$$i \approx \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\tau_D}} \times \frac{v - V_0}{\tau_D} \quad (26)$$

si on prend :  $\tau \approx 0,1 \Omega$  ;  $I_F \approx 10^{-1} \text{ A}$  et  $I_0 \approx 10^{-5} \text{ A}$

$$\text{on aura: } \tau_D = \frac{1}{40 \times 0,1} = 0,25 \Omega \text{ et } i \approx \frac{5}{7} \frac{(v - V_0)}{\tau_D} \quad (27)$$

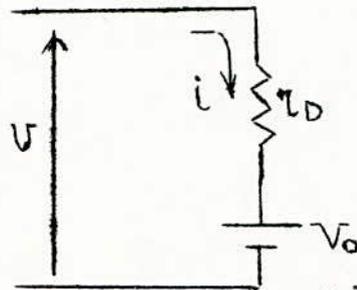
A la carection de la résistance série  $r$  près, on retrouve l'expression (17) obtenue graphiquement .

Dans la région où  $U_0 < v < V_0$ , une courbe  $i=f(v)$  d'une photopile s'écrira donc

$$i \approx \frac{v - V_0}{r_D} \quad (28)$$

$$\text{avec: } r_D \approx \frac{k_B T}{e I_0} \exp - \frac{e}{k_B T} (V_0 - U_0) = \frac{k_B T}{e(I_0 + I_F)} \approx \frac{k_B T}{e I_F}$$

et, une photopile pourra être représentée dans ce cas par le schéma équivalent suivant



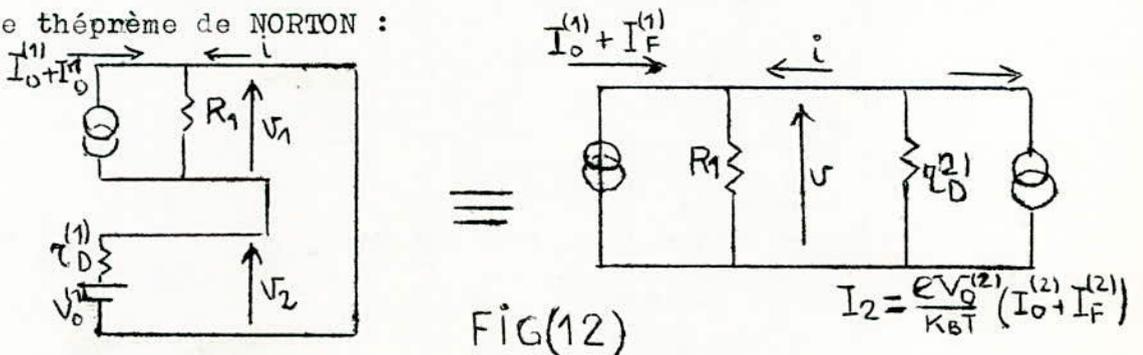
FIG(11)

Considérons, maintenant, deux cellules en série dont les caractéristiques soient très différentes l'une de l'autre.

La figure (9) montre que l'une des photopiles sera représentée par un schéma équivalent du type de celui de la figure (6), tandis que l'autre photopile sera équivalente au schéma de la figure (11).

Lorsqu'on court-circuite l'ensemble, on obtient, en employant

le théorème de NORTON :



FIG(12)

$$I_2 = \frac{e V_0^{(2)}}{k_B T} (I_0^{(2)} + I_F^{(2)})$$

Comme, dans le cas précédent, nous pouvons écrire les relations suivantes

$$V = +V_1 = -V_2 < 0 \quad (29)$$

$$i \approx \frac{V_1}{R_1} - I_0^{(1)} - I_F^{(1)} \quad (30)$$

avec  $R_1 \approx \frac{k_B T}{e I_0^{(1)}} \exp \frac{e V_0^{(1)}}{k_B T}$

$$i \approx \frac{V_2}{r_D^{(2)}} - I_2 \quad (31)$$

avec  $I_2 = \frac{e V_0^{(2)}}{k_B T} (I_0^{(2)} + I_F^{(2)})$

et  $r_D^{(2)} = \frac{k_B T}{e (I_0^{(2)} + I_F^{(2)})}$

$$V_1 + V_2 = 0 \quad (32)$$

on déduit de : (29), (30), (31)

$$i = \frac{V}{R_1} - (I_0 + I_F) = -\frac{V}{r_D^{(2)}} - \frac{e V_0^{(2)}}{k_B T} (I_0^{(2)} + I_F^{(2)})$$

$$V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_D^{(2)}} \right) = -\frac{e V_0^{(2)}}{k_B T} (I_0^{(2)} + I_F^{(2)}) + (I_0^{(1)} + I_F^{(1)}) \quad (33)$$

or  $r_D^{(2)} \sim 0,1 \text{ à } 1 \Omega$ ;  $R_1 \sim 10^{12} \Omega$ ;  $V_0^{(2)} \sim 0,5 \text{ V} \Rightarrow \frac{e V_0^{(2)}}{k_B T} \sim 40$

D'après les courbes de la figure (9);  $(I_0 + I_F)^{(1)} < (I_0 + I_F)^{(2)}$

et  $\frac{e V_0^{(2)}}{k_B T} (I_0^{(2)} + I_F^{(2)}) \ll (I_0 + I_F)^{(1)}$

Par suite (33) devient:

$$V \approx -\frac{r_D^{(2)} e V_0^{(2)}}{k_B T} (I_0 + I_F) = -V_0^{(2)} \quad (34)$$

En remplaçant dans (30), on trouve que;  $I_{cc}^{(1)} \approx 0$

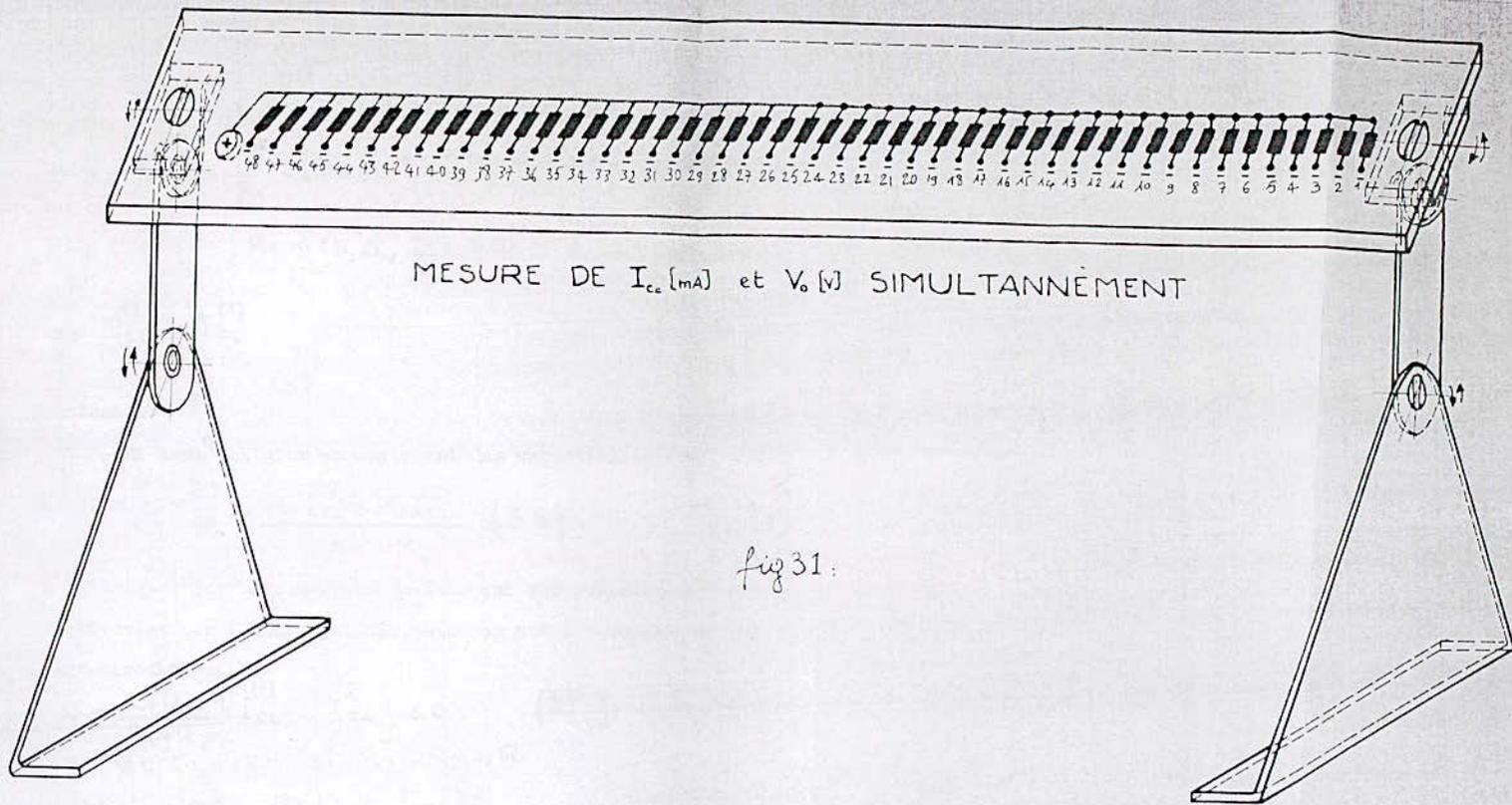


fig 31:

-55-

ZITOUNI  
MOKHTAR  
E.N.P.A.

PANNEAU SOLAIRE  
ETUDE DES ASSOCIATIONS SERIE OU PARALLÈLE

Echelle : 2

Projet de fin d'étude

Janvier 1979

Un bon ordre de grandeur du courant de court circuit est donné par l'expression (34) dans laquelle on fait:

$$i = -I_{cc} = -\frac{V_0^{(2)}}{R_1} - \{I_0^{(1)} + I_F^{(1)}\} \quad (35)$$

$$V_0^{(2)} \approx 0,5 \text{ V} ; R_1 \approx 10^{12} \Omega ; \frac{V_0^{(2)}}{R_1} \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ A} ; I_0 + I_F = I_{cc} \approx 10^{-1} \text{ A}$$

$$\Rightarrow I_{cc}^{(1)} \approx I_{cc}^{(1)}$$

Conclusion:

-Si deux cellules en série ont des caractéristiques

voisines

$$I_{cc}^{(1)} \approx \frac{R_1 I_{cc}^{(1)} + R_2 I_{cc}^{(2)}}{R_1 + R_2} \quad (36)$$

et la tension aux bornes de la cellule qui est polarisée négativement par l'autre cellule (quand on met l'ensemble en court-circuit) et:

$$V = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} [I_{cc}^{(1)} - I_{cc}^{(2)}] < 0 \quad (37)$$

en particulier; si  $R_1 \sim R_2 \sim R$

$$I_{cc}^{(1)} \approx \frac{I_{cc}^{(1)} + I_{cc}^{(2)}}{2} \quad (38)$$

$$\text{et } V \approx R \frac{I_{cc}^{(1)} - I_{cc}^{(2)}}{2} < 0 \quad (39)$$

En outre si  $I_{cc}^{(2)} \approx I_{cc}^{(1)} + \epsilon$  avec  $\epsilon > 0$  on aura  $V \rightarrow 0$

Si deux cellules en série ont des caractéristiques très différentes on aura:

$$I_{cc}^{(1)} \approx I_{cc}^{(1)} \quad (40)$$

$$\text{et } V \approx -V_0^{(2)} \quad (41)$$

Ces résultats peuvent être facilement généralisés au cas de  $n$  cellules .

Si les  $n$  cellules sont de caractéristiques voisines et une cellule  $\alpha$  de caractéristiques différentes.

$$a) I_{cc}^{(\alpha)} < I_{cc}^{(j)} \quad (j = 1, \dots, n-1)$$

$$\Rightarrow I_{cc}^{(N)} \sim I_{cc}^{(\alpha)}$$

$$\text{et } v \sim (n-1)V_0 \quad (\text{en supposant } V_0^{(1)} \sim \dots \sim V_0^{(n-1)})$$

Dans ce cas, si  $|v| > V_{Zener}$ , la photopile  $(\alpha)$  risque de se détériorer par claquage de la jonction (effet Zener)

$$b) I_{cc}^{(\alpha)} > I_{cc}^{(j)} \quad (j = 1, \dots, n-1)$$

$$\Rightarrow I_{cc}^{(N)} \sim \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} I_{cc}^{(j)}$$

et  $v \sim -V_0^{(\alpha)}$  et chacune des  $(n-1)$  cellules est polarisée en inverse par une tension  $V_0 = \frac{V_0}{n-1}$  (en supposant qu'on a affaire à un nombre  $(n-1)$  paires de cellules .

-Une question intéressante est de savoir à partir de quelle valeur de  $I_{cc}$  pouvons-nous dire que des cellules sont de caractéristiques différentes .

Etant donné que les approximations faites précédemment sont de l'ordre de l'unité, on peut admettre un écart maximum par rapport à la valeur moyenne

$$I_{cc}^{(N)} = \frac{1}{n} \sum I_{cc}^{(n)} \quad \text{qui soit de } 10\%$$

### 3.3 CAS DE GROUPEMENTS EN PARALLELES

Ce genre d'association augmente le courant du module et diminue sa résistance interne . Le problème posé par ce genre d'association est que les groupements mis en parallèle ont leur

tension à vide différentes d'un élément à l'autre et si l'ensemble est en circuit ouvert, la photopile dont la tension à vide est la plus faible, sera traversé; dans le sens direct par un courant dû aux photopiles précédentes si elle-ci atteint le courant de saturation la photopile considéré sera détruite.

3.3.1 ANALYSE QUALITATIVE :

Si on suppose que, parmi n cellules identiques, la n<sup>ième</sup> est à l'obscurité et les autres soumises au même éclairement, on aura le schéma équivalent suivant:

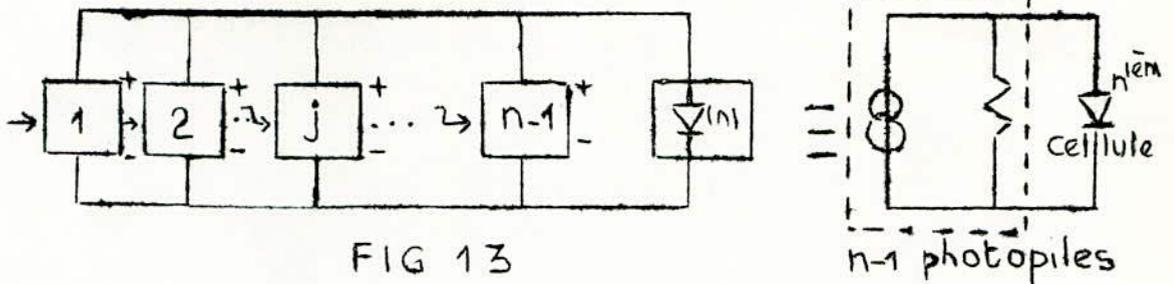


FIG 13

La cellule à l'obscurité est parcourue par la somme des courants courants issus des (n-1) autres cellules. Si le courant résultant atteint le courant de saturation de la n<sup>ième</sup> photopile cette dernière risque de se détériorer

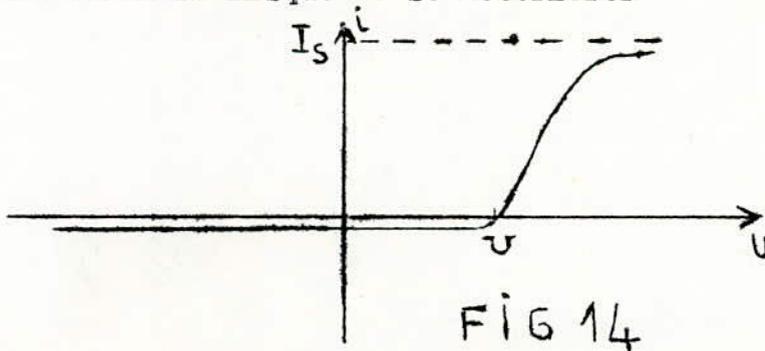
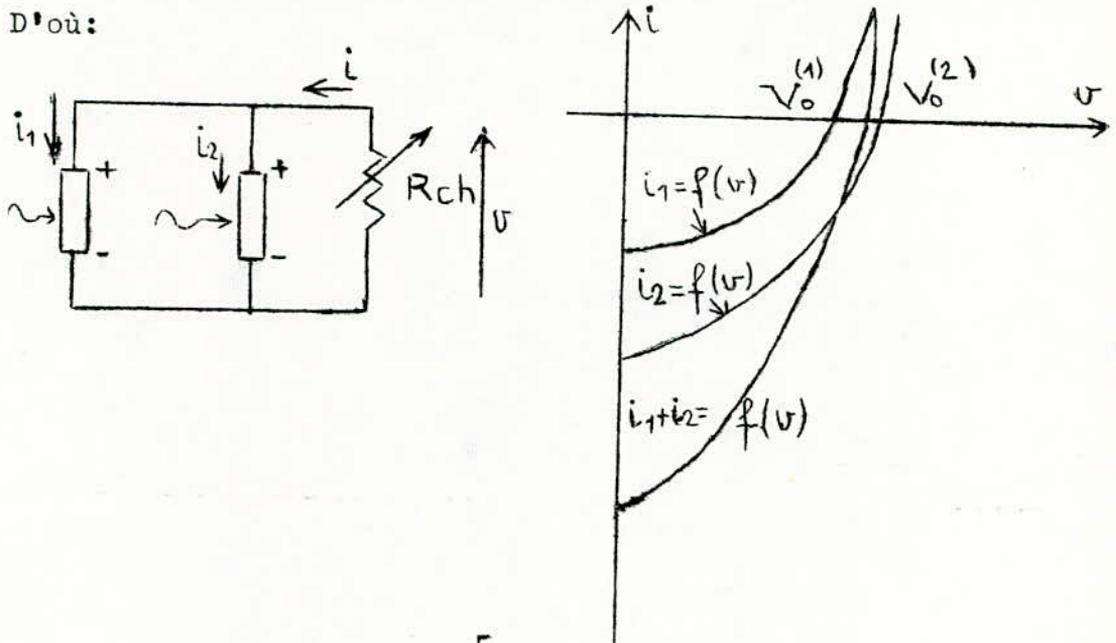


FIG 14

La caractéristique résultante  $I = f(v)$  de deux photopiles en parallèle est obtenue en ajoutant point par point, les points de chacune des courbes  $I = f(v)$  qui ont même abscisse. (la tension  $V$  aux bornes de chaque cellule est identique)

D'où:



5

### 3.3.2 Formulation du problème:

3.3.2.1 Calcul de la tension en circuit ouvert d'un ensemble

#### de n cellules en parallèle:

Le schéma de principe est le suivant:

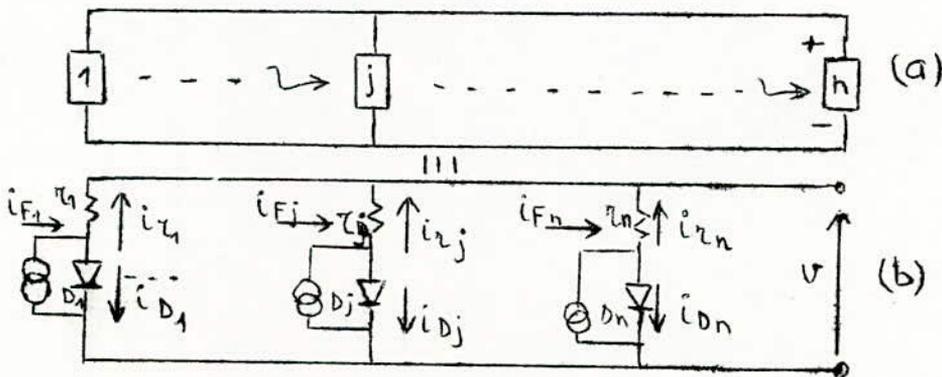


FIG 16

Le courant parcourant la  $j^{\text{ième}}$  cellule est

$$i_{rj} = i_{Fj} - i_{Dj} \quad (42); \quad i_{Dj} = \frac{v - U_{Dj}}{r_j} \quad \text{avec } i_{Dj} = f(U_{Dj}) \quad (43)$$

La tension à vide de l'ensemble des  $n$  cellules est obtenue en faisant:  $\sum i_{rj} = 0 \quad (44)$

avec  $i_{Dj} = f(U_{Dj}) \quad (43)$   
 d'où:  $v = \sum r_j \times \sum \frac{U_{Dj}}{r_j} \quad (45)$

Si la  $j^{\text{ième}}$  photopile est à l'obscurité alors que les autres photopiles sont éclairées, elle sera parcourue dans le sens direct par la somme des courants voisins des  $(n-1)$  photopiles. La  $n^{\text{ième}}$  photopile présente, donc une impédance, très faible et le courant résultant sera la somme des courants de court-circuit des autres photopiles, soit:

$$i_{rj} \approx \sum_{i=1}^{n-1} I_{cc}^{(i)}$$

De même si les  $(n-1)$  cellules ne sont pas éclairées et si la  $n^{\text{ième}}$  cellule est soumise à un rayonnement, le courant total sera pratiquement égal au courant de court-circuit de la  $n^{\text{ième}}$  photopile d'où

$$-I_{cc}^{(n)} \leq i_n \leq \sum_{i=1}^{n-1} I_{cc}^{(i)} \quad (46)$$

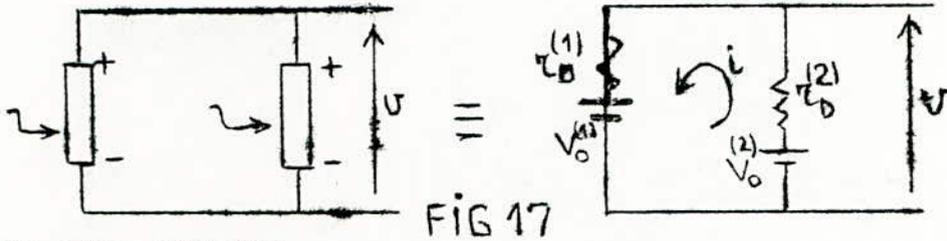
dans le cas où:

$$i_n = \sum_{i=1}^{n-1} I_{cc}^{(i)} > I_s \quad (47)$$

il y a destruction de la  $n^{\text{ième}}$  cellule.

### 3.3.2.2 Cas de deux cellules de caractéristiques différentes.

Si nous prenons l'exemple de la figure (15) on voit que  $U_0 < v < V_0$  et, dans l'approximation quasi-linéaire, le schéma équivalent pour  $R_{ch} \rightarrow \infty$  sera:



On aura, presque

$$V_0^{(2)} > V_0^{(1)} ; \quad i = \frac{V_0^{(2)} - V_0^{(1)}}{\tau_D^{(1)} + \tau_D^{(2)}}$$

$$\text{et } V = -\frac{\tau_D^{(2)}(V_0^{(2)} - V_0^{(1)})}{\tau_D^{(1)} + \tau_D^{(2)}} + V_0^{(2)} = \frac{\tau_D^{(1)} V_0^{(2)} + \tau_D^{(2)} V_0^{(1)}}{\tau_D^{(1)} + \tau_D^{(2)}} \quad (48)$$

$$\text{ou puisque: } \tau_D \approx \frac{e}{k_B T} (I_0 + I_F) \approx \frac{e}{k_B T} I_{cc}$$

$$V = \frac{I_{cc}^{(1)} V_0^{(2)} + I_{cc}^{(2)} V_0^{(1)}}{I_{cc}^{(1)} + I_{cc}^{(2)}} \quad (49)$$

$$\text{et } i = \frac{V_0^{(2)} - V_0^{(1)}}{\tau_D^{(1)} + \tau_D^{(2)}} \approx \frac{k_B T}{e} \frac{V_0^{(2)} - V_0^{(1)}}{I_{cc}^{(1)} + I_{cc}^{(2)}} \quad (50)$$

si la cellule (2) est soumise à un éclairage, sa tension à vide sera  $V_0^{(2)}$ . Mais si la cellule (1) est à l'obscurité, sa tension à vide,  $V_0^{(1)}$  prend une valeur minimale égale à la tension de jonction  $U_0^{(1)}$

$$i' = \frac{k_B T}{e} \frac{V_0^{(2)} - V_0^{(1)}}{I_0^{(1)} + I_{cc}^{(2)}} \approx \frac{k_B T}{e} \frac{V_0^{(2)} - V_0^{(1)}}{I_{cc}^{(2)}} \quad (51)$$

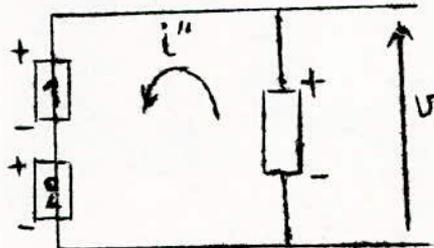
par suite, on aura:  $i' \gg i$   
 mais si:  $V_0^{(2)} \approx V_0^{(1)}$  même si  $I_{cc}^{(1)} \neq I_{cc}^{(2)}$ ; on a:

$$V \approx V_0^{(1)} \approx V_0^{(2)} \quad (52)$$

et  $i \approx 0$

Remarque

Si on fait débiter un ensemble de deux cellules en série, sur une photopile, la différence  $V_0^{(2+1)} - V_0^{(3)}$  augmente notablement tandis que le discriminateur sera inchangé.



$$\text{et } i'' = \frac{k_B T}{e} \frac{V_0^{(2+1)} - V_0^{(3)}}{I_{cc}^{(3)} + I_c^{(2+1)}} \gg \frac{k_B T (V_0^{(2)} - V_0^{(1)})}{e (I_{cc}^{(1)} + I_{cc}^{(2)})} = i$$

En effet, si on suppose les trois photopiles identiques, on

aura :  $V_0^{(2+1)} = 1V$

$$V_0^{(2)} = V_0^{(1)} = V_0^{(3)} = 0,5V$$

$$I_{cc}^{(1)} = I_{cc}^{(2)} = I_{cc}^{(3)} = I_{cc}^{(2+1)} = 0,1A$$

d'où :  $i'' \approx 2i$

En généralisant, à n photopiles, on obtient,

$$i^{(n)} \approx n \cdot i$$

Si  $i^{(n)} > i_s$ , la photopile en parallèle claque.

CHAPITRE IV  
ETUDE DU GROUPEMENT DE 48 PHOTOPILESBPX41A

---

4.1 Mesure du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension à vide  $V_0$

Des expériences réalisées en plein soleil sur 48 photo-diodes considérées comme cellules solaire (fig 31), ont donné les résultats rassemblés au tableau (1). De ce tableau on a tiré les groupements indiqués sur les tableaux 2 et 3

En se basant sur ces dernières on a tracé les histogrammes de la tension à vide  $V_0$  (v) et  $I_{cc}$  (mA)

4.2 Histogrammes des mesures de  $I_{cc}$  et  $V_0$

Afin de sélectionner les cellules photovoltaïques ayant les mêmes caractéristiques, les résultats de mesure ont été rassemblés; à l'aide de la méthode de travail pour tracer l'historgramme sous forme d'historgramme dont l'échelle est fixée par la précision de mesure .

Méthode de travail pour tracer l'historgramme:

Les résultats de mesure sont indiqués aux tableaux (1) et (4) pour 48 cellules et 32 cellules respectivement, ycelles-ci comprennent deux colonnes , l'une repérant les n cellules et l'autre les grandeurs m électriques mesurées  $I_{cc}$  et  $V_0$ .

De ces tableaux on déduit les histogrammes qui donnent la répartition statistique de la population des cellules en fonction de  $I_{cc}$  ou  $V_0$ .

L'échelle des valeurs de  $I_{cc}$  ou de  $V_0$  a été choisie de manière à consilier la comodité de l'emploie et la précision de la représentation

Soit 0,01mA pour  $I_{cc}$  et 0,02 pour  $V_0$ .

Mesure sur 48 cellules solaires pour  $I_{cc}$  (mA) et  $V_o$  (V)

N°	$I_{cc}$ (mA)	$V_o$ (V)
1	0,530	0,530
2	0,535	0,530
3	0,545	0,525
4	0,520	0,520
5	0,530	0,525
6	0,530	0,520
7	0,550	0,525
8	0,535	0,530
9	0,550	0,540
10	0,545	0,535
11	0,550	0,525
12	0,540	0,510
13	0,550	0,530
14	0,540	0,520
15	0,540	0,515
16	0,535	0,540
17	0,510	0,520
18	0,555	0,541
19	0,545	0,525
20	0,510	0,520
21	0,540	0,530
22	0,540	0,530
23	0,520	0,535
24	0,535	0,535

N°	$I_{cc}$ (mA)	$V_o$ (V)
25	0,575	0,530
26	0,530	0,530
27	0,560	0,530
28	0,540	0,530
29	0,580	0,540
30	0,575	0,540
31	0,525	0,525
32	0,540	0,530
33	0,560	0,530
34	0,535	0,535
35	0,540	0,510
36	0,540	0,530
37	0,560	0,525
38	0,535	0,530
39	0,560	0,530
40	0,545	0,530
41	0,550	0,525
42	0,535	0,525
43	0,500	0,520
44	0,505	0,530
45	0,540	0,520
46	0,540	0,525
47	0,540	0,525
48	0,550	0,525

La population des 48 cellules est partagée en classe représentée chacune par un rectangle.

La hauteur d'un rectangle correspond à l'effectif des photopiles, dont le courant de court-circuit est compris entre deux limites.

La différence entre la valeur maximale et minimale étant égale à la bande du rectangle.

Le même raisonnement peut être considéré au cours de la tension à vide.

Mesure du courant de court-circuit  $I_{cc}$  (mA) pour 48 cellules solaires

N° de l'intervalle	Intervalle des $I_{cc}$ (mA)	Fréquence	N° des cellules correspond	Nombre de Cellules
1	0.4975 - 0.5025	0.02	43	1
2	0.5025 - 0.5075	0.02	44	1
3	0.5075 - 0.5125	0.04	17, 20	2
4	0.5125 - 0.5175	0	-	0
5	0.5175 - 0.5225	0.04	4, 23	2
6	0.5225 - 0.5275	0.02	31	1
7	0.5275 - 0.5325	0.08	1, 5, 6, 26,	4
8	0.5325 - 0.5375	0.15	2, 8, 16, 24, 34, 38, 42,	7
9	0.5375 - 0.5425	0.25	12, 14, 15, 21, 22, 28, 32, 35, 36, 45, 46, 47	12
10	0.5425 - 0.5475	0.08	3, 10, 19, 40	4
11	0.5475 - 0.5525	0.13	7, 9, 11, 13, 41, 48,	6
12	0.5525 - 0.5575	0.02	18	1
13	0.5575 - 0.5625	0.08	27, 33, 37, 39	4
14	0.5625 - 0.5675	0	-	0
15	0.5675 - 0.5725	0	-	0
16	0.5725 - 0.5775	0.04	25, 30	2
17	0.5775 - 0.5825	0.02	29	1

Tableau 2

$\delta$ : nombre de cellules BPX 41A

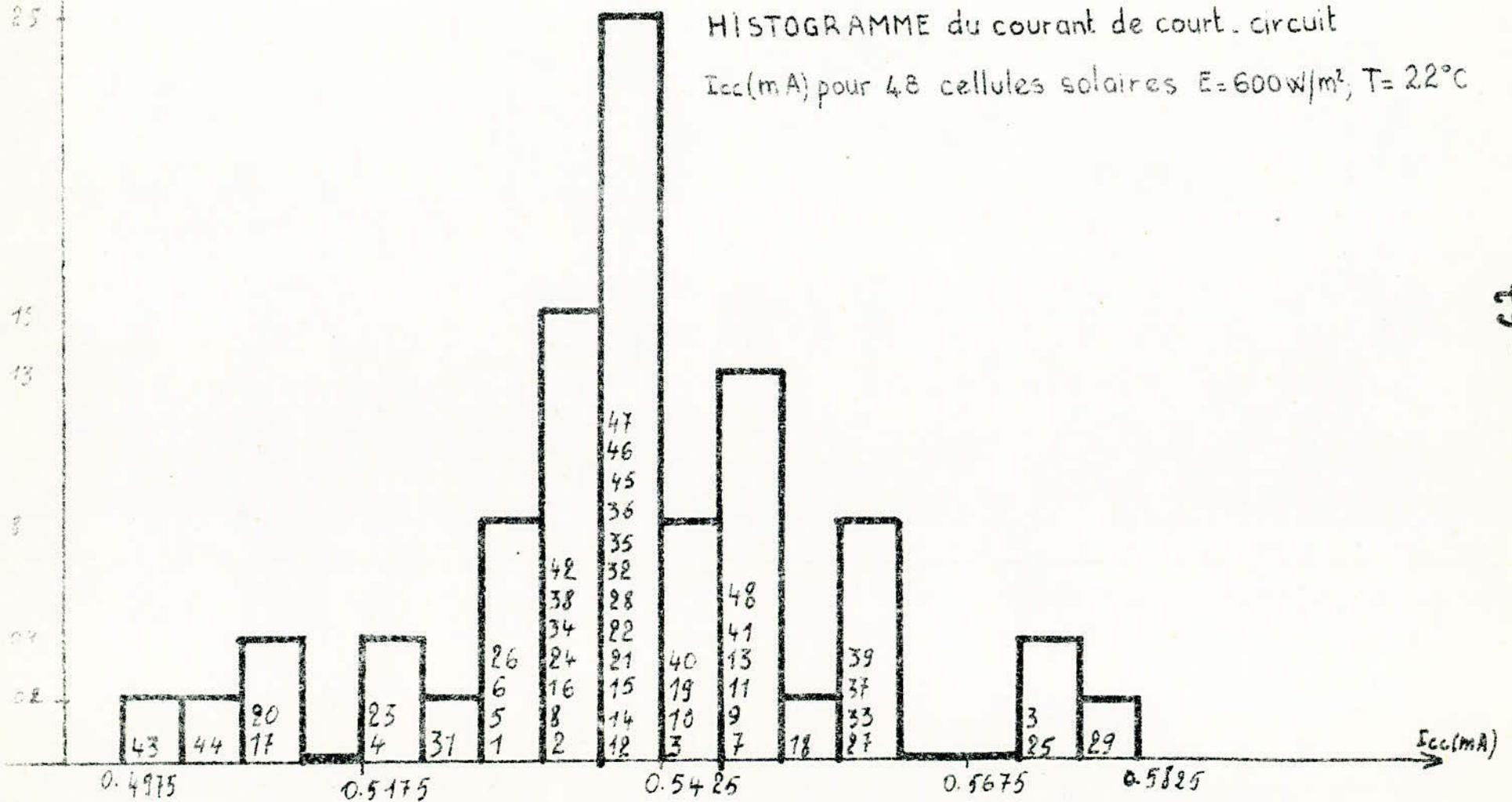


FIG A

Mesure de la tension à vide  $V_0(V)$  pour 48 cellules solaires

N° de l'intervalle	Intervalle de $V_0(V)$	Fréquence	N° des Cellules correspondantes	Nombre de cellules
1	0.5075 - 0.5125	0.04	12, 35	2
2	0.5125 - 0.5175	0.02	15	1
3	0.5175 - 0.5225	0.15	4, 6, 14, 17, 20, 43, 45	7
4	0.5225 - 0.5275	0.25	3, 5, 7, 11, 19, 31, 37, 41, 42, 46, 47, 48,	12
5	0.5275 - 0.5325	0,035	1, 2, 8, 13, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 32, 33, 36, 38, 39, 40, 44	17
6	0.5325 - 0.5375	0.08	10, 23, 24, 34	4
7	0.5375 - 0.5425	0.104	9, 16, 18, 29, 30	5

Tableau 3

$\delta$ : nombre de cellules BPX 41A

HISTOGRAMME de la tension à vide  $V_0(V)$   
 pour 48 cellules solaires  $E=600W/m^2$ ;  $T=22^\circ C$

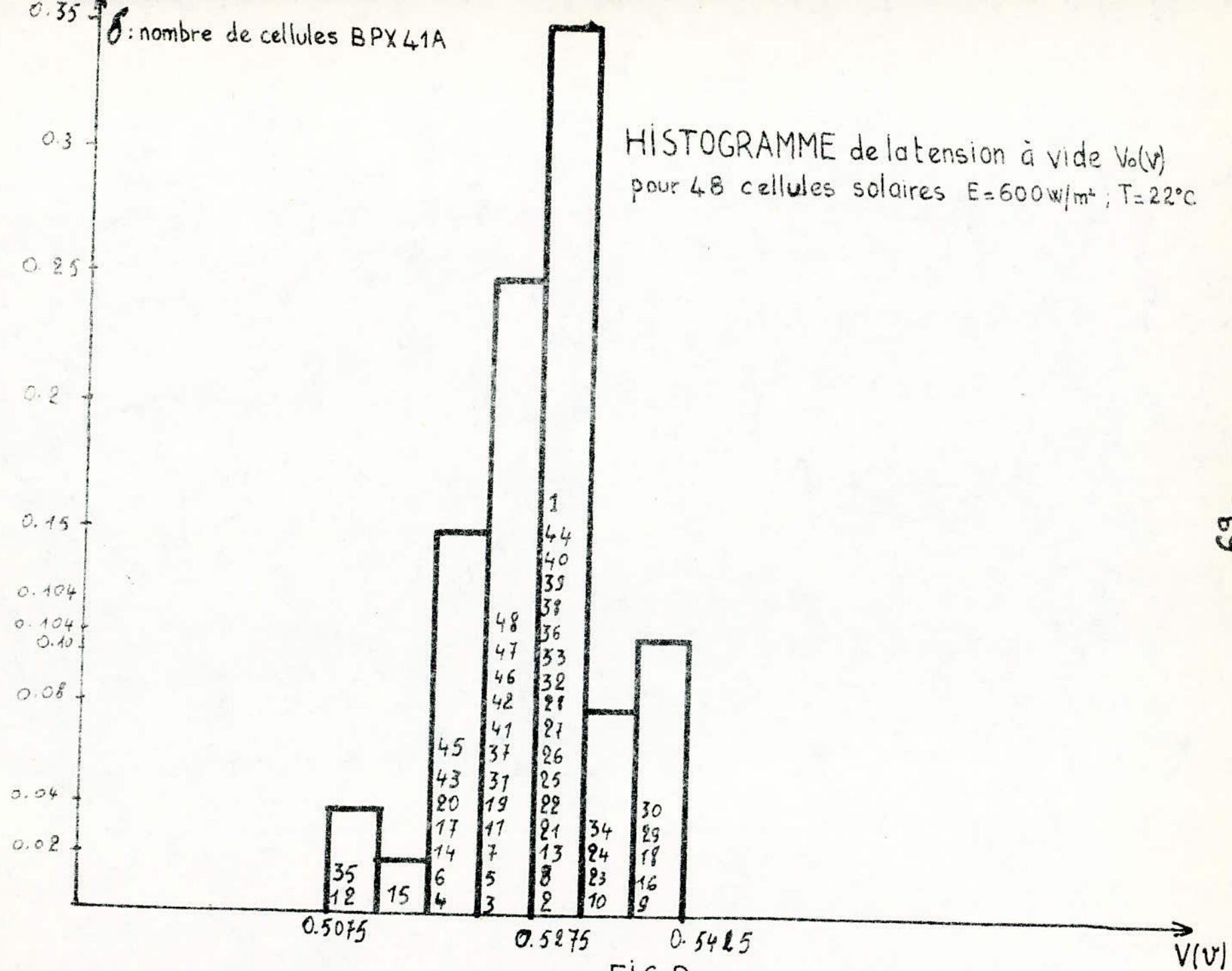


FIG B

Mesures sur 32 cellules solaires pour le courant de court-circuit  $I_{cc}$  (mA) et pour la tension à vide  $V_0$  (V)

N°	$I_{cc}$ (mA)	$V_0$ (V)
3	0,545	0,525
5	0,530	0,525
7	0,550	0,525
8	0,535	0,530
11	0,550	0,525
12	0,540	0,510
14	0,540	0,520
16	0,535	0,540
18	0,555	0,541
22	0,540	0,530
23	0,520	0,535
24	0,535	0,535
25	0,575	0,530
26	0,530	0,530
27	0,560	0,530
28	0,540	0,530

N°	$I_{cc}$ (mA)	$V_0$ (V)
29	0,580	0,540
30	0,575	0,540
34	0,525	0,525
32	0,540	0,530
34	0,535	0,535
35	0,540	0,510
36	0,540	0,530
37	0,560	0,525
38	0,535	0,530
39	0,560	0,530
40	0,545	0,530
41	0,550	0,525
42	0,535	0,525
43	0,500	0,520
45	0,540	0,520
46	0,540	0,525

Tableau 4

en conservant l'ancienne numérotation des cellules solaires.

Mesure du courant de court-circuit  $I_{cc}$  (mA) pour 32 cellules solaires.

N° de l'intervalle	Intervalle des $I_{cc}$ (mA)	Fréquence relative	N° des cellules correspondant aux intervalles	Nbre de cellules
1	0.4975 — 0.5025	0.03125	43	1
2	0.5025 — 0.5075	0	-	0
3	0.5075 — 0.5125	0	-	0
4	0.5125 — 0.5175	0	-	0
5	0.5175 — 0.5225	0.03125	23	1
6	0.5225 — 0.5275	0.03125	31	1
7	0.5275 — 0.5325	0.0625	5, 26	2
8	0.5325 — 0.5375	0.1875	8, 16, 24, 34, 38, 42	6
9	0.5375 — 0.5425	0.28125	12, 14, 22, 28, 32, 35, 36 45, 46	9
10	0.5425 — 0.5475	0.0625	3, 40	2
11	0.5475 — 0.5525	0.09375	7, 11, 41	3
12	0.5525 — 0.5575	0.03125	18	1
13	0.5575 — 0.5625	0.09375	27, 37, 39	3
14	0.5625 — 0.5675	0	-	0
15	0.5675 — 0.5725	0	-	0
16	0.5725 — 0.5775	0.0625	25, 30	2
17	0.5775 — 0.5825	0.03125	29	1

TABLEAU 5

σ. nombre de cellules BPX41A

0.28125

0.15

0.09375

0.0625

0.03125

Histogramme du courant court-circuit  $I_{cc}(mA)$

Pour 32 cellules solaires

$E = 600 W/m^2$   $T = 22^{\circ}C$

19

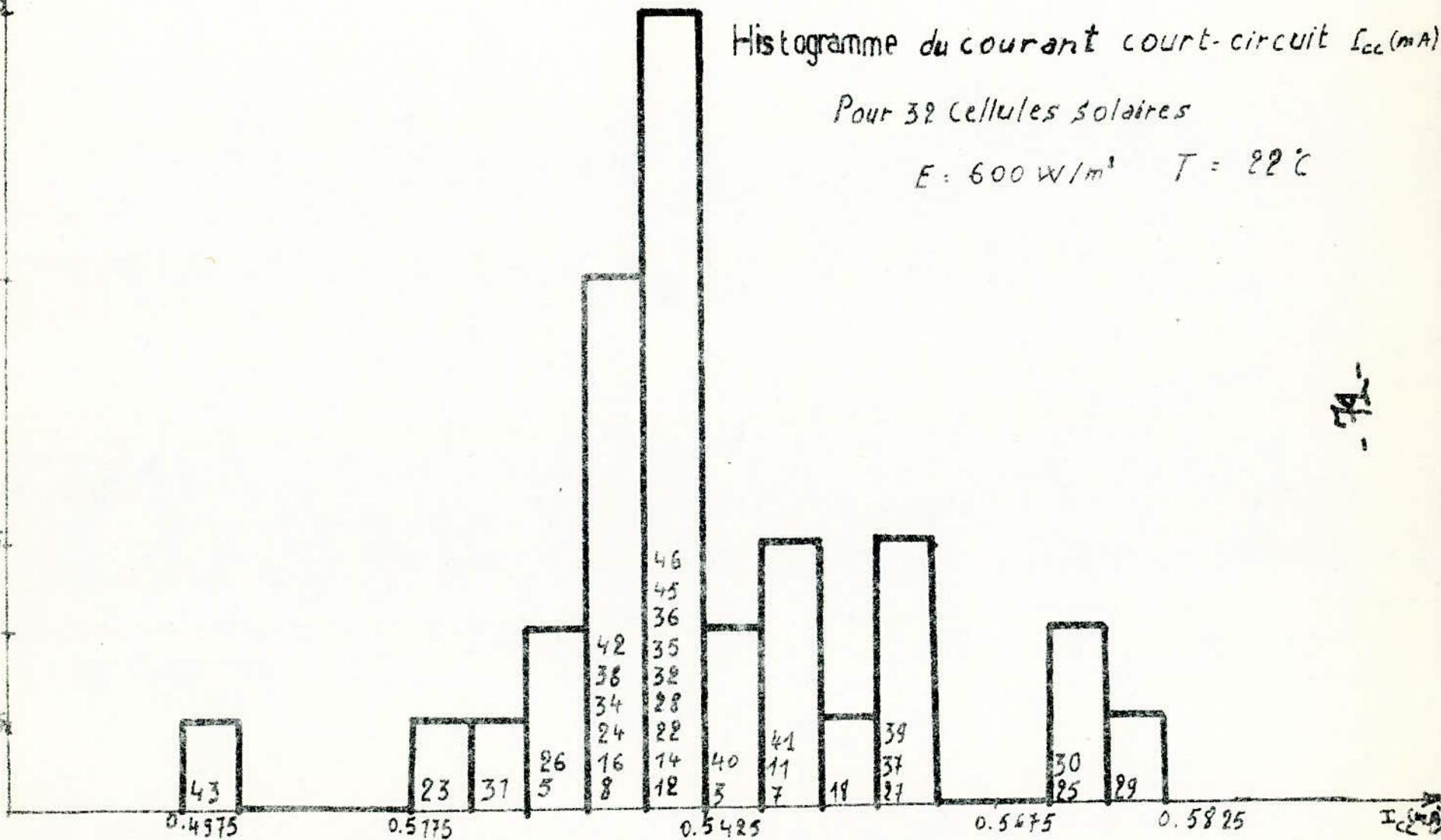


Fig C

$I_{cc}(mA)$

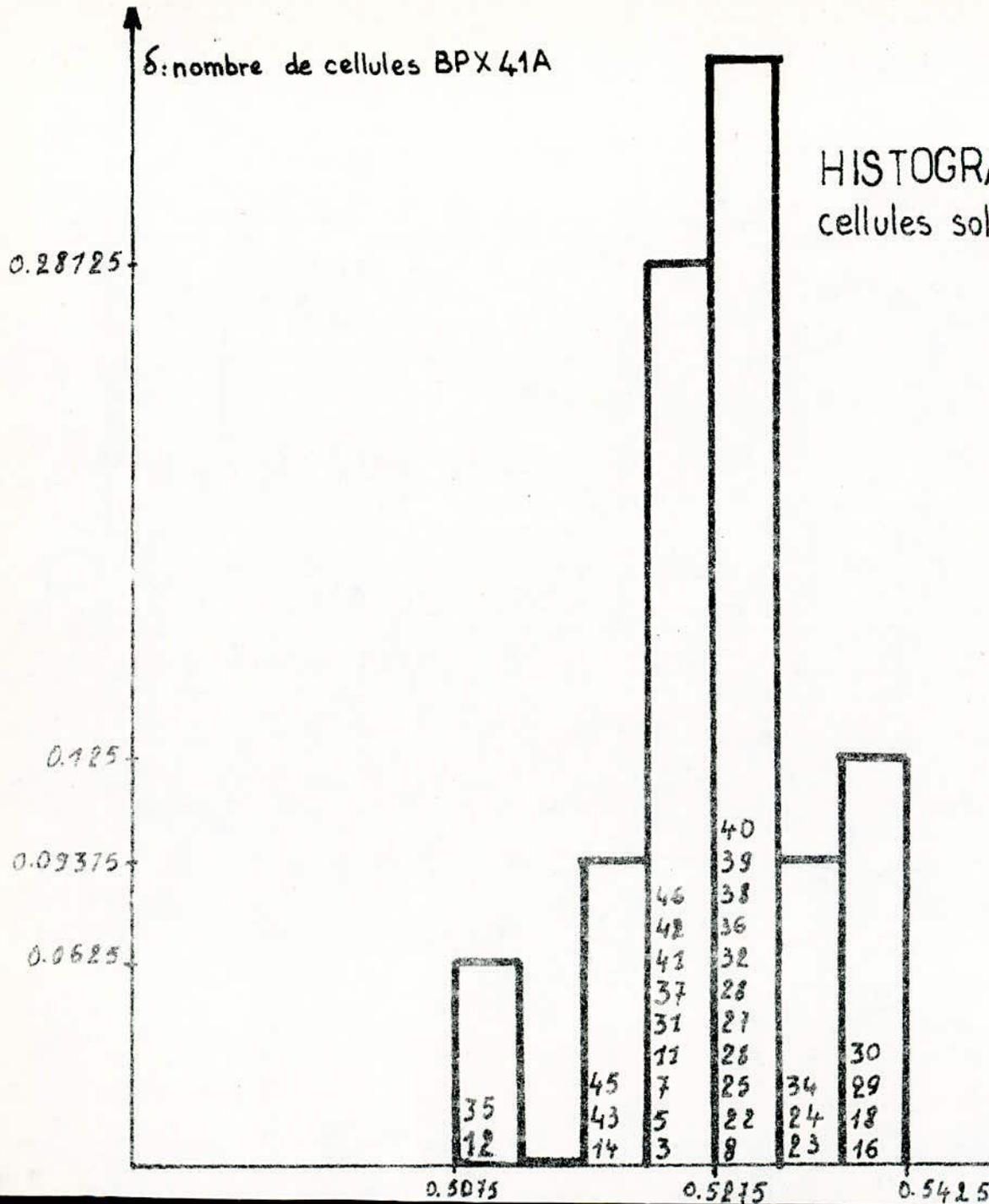
Mesure sur 32 cellules solaires  
32 mesures de la tension à vide  $V_0(V)$

no de l'intervalle	Intervalle de $V_0 (V)$	Fréquence	N <sup>o</sup> des Cellules - correspond	nombre de cellules
1	0.5075 - 0.5125	0.0625	12, 35	2
2	0.5125 - 0.5175	0	-	0
3	0.5175 - 0.5225	0.09375	14, 43, 45	3
4	0.5225 - 0.5275	0.28125	3, 5, 7, 11, 19, 31, 37, 41, 42, 46, 47, 48	12
5	0.5275 - 0.5325	0.34375	8, 22, 25, 26, 27, 28, 32, 36, 38, 39, 40	11
6	0.5325 - 0.5375	0.09375	23, 24, 34	3
7	0.5375 - 0.5425	0.125	16, 18, 29, 30	4

Tableau 6

$\delta$ : nombre de cellules BPX 41A

HISTOGRAMME de la tension à vide pour 32 cellules solaires; pour  $E = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 22^\circ\text{C}$



4.3.1 Détermination des groupement délivrant la puissance maximale :

Afin de déterminer<sup>la</sup> meilleure association des cellules solaires, on compare les courants, les tensions, les puissance ainsi que les rendements de chaque groupement.

Du triage des cellules on aboutit aux mêmes résultats que précédemment ; et d'après le tableau, pour chaque groupement on connaît : courant et la tension correspondante.

Pour des raisons de sécurité, on prendra pour chaque groupement la faible tension du circuit ouvert correspondante à un courant déterminé. Le produit de de ces deux dernières grandeurs nous permet d'obtenir la puissance.

Exemple :

$1 + 1,08 = 2,08A$  est le courant total traversant les deux groupements donc la puissance optimale sera :

$$2,08 \times 11,065 = 23,0152 \text{ mW}$$

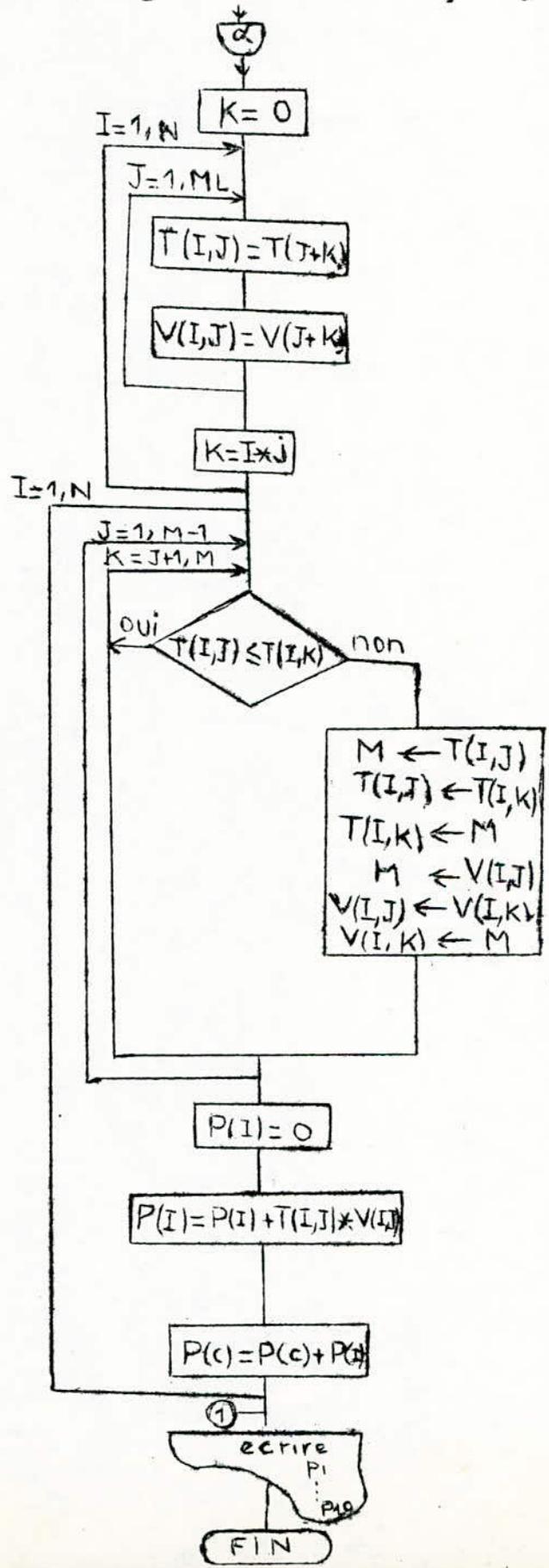
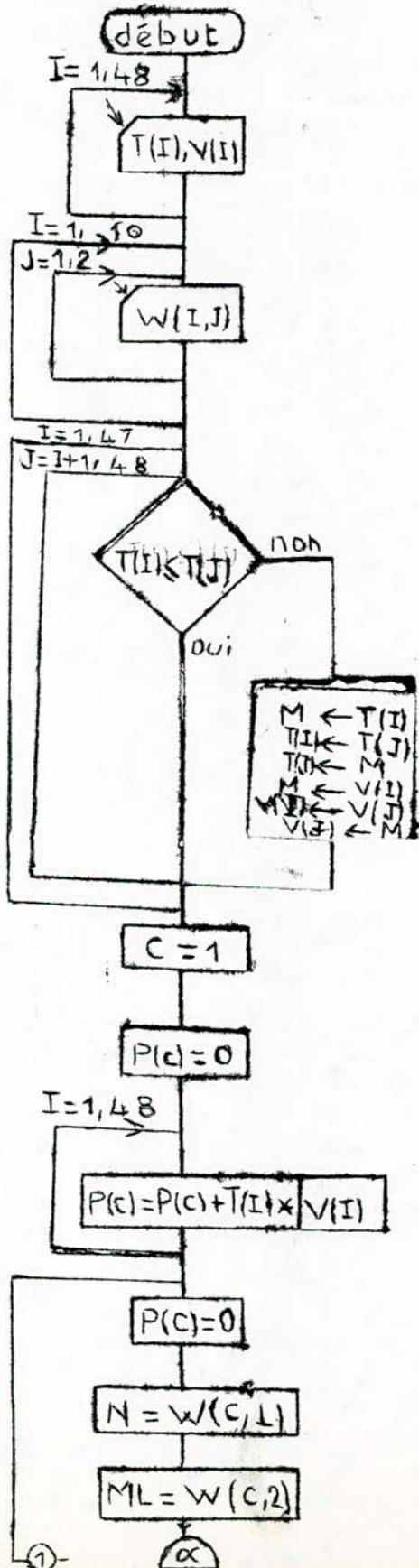
D'après le tableau, on constate que le meilleur groupement est : 3x15. En effet, il donne une tension importante par rapport aux autres modules et aussi un courant relativement important.

Les différents groupements possibles par rapport à 48 cellules solaires.

Nombre de cellules	Courant $I_{cc} > I$ (mA)	Tension $V_0$ (Volts)	$P_{tot} = V_0 \cdot I_{cc}$ (mW)
46	1	24,266	24,266
2x23	$\begin{array}{r} 1 \\ + 1,08 \\ \hline = 2,08 \end{array}$	$\begin{array}{r} 12,105 \\ 12,167 \end{array}$	25,178
2x22	$\begin{array}{r} 1 \\ + 1,08 \\ \hline = 2,08 \end{array}$	$\begin{array}{r} 11,065 \\ 11,611 \end{array}$	23,015
3x15	$\begin{array}{r} 1 \\ + 1,07 \\ + 1,09 \\ \hline = 3,16 \end{array}$	$\begin{array}{r} 7,915 \\ 7,860 \\ 7,957 \end{array}$	24,838
4x11	$\begin{array}{r} 1 \\ + 1,07 \\ + 1,08 \\ + 1,10 \\ \hline = 4,25 \end{array}$	$\begin{array}{r} 5,780 \\ 5,775 \\ 5,831 \\ 5,800 \end{array}$	24,544
5x9	$\begin{array}{r} 1 \\ + 1,06 \\ + 1,08 \\ + 1,08 \\ + 1,10 \\ \hline = 5,32 \end{array}$	$\begin{array}{r} 4,715 \\ 4,755 \\ 4,200 \\ 4,760 \\ 4,776 \end{array}$	22,344

Tableau 7

### 4.3.2: Méthode de programmation: organigramme



Mise au point d'un panneau solaire à conversion photovoltaïque , délivrant 10 ( mw )

Le theme developpé , ici , est relatif à la construction des panneaux solaires à conversion photovoltaïque et leur utilisation comme source d'énergie électrique . Les mesures sont faites sur des groupements de photodiodes (BPX 41 A) qui sont portés comme photopiles . En suite , sur panneau de faible puissance a été monté avec 32 photodiodes au silicium (BPX41) . Celles-ci presentent une surface photosensible de  $6 \text{ mm}^2$  . Le courant de court-circuit et la tension à vide  $V_0$  ont été mesurés pour chaque photodiode . Ces deux parametres et le point pour laquelle la puissance debitée est optimale sont les valeurs les plus significatives des caracteristiques I-V d'une photopile . En moyenne , chaque cellule presente un rendement de l'ordre 3 à 7 % . Afin de selectionner les cellules photovoltaïques ayant les mêmes caracteristiques , les resultats ont été rassemblés sous forme d'hystogrammes ( chap. 4 ) . Une analyse empirique de ces hystogrammes montre que la meilleur façon d'associer les cellules entre elle est de mettre en parallele deux groupements comportant chacun 16 photopiles en serie .

Le choix de ce type de branchement a été imposé par le souci de satisfaire aux normes d'utilisation et d'éviter les risques de détérioration due à un mauvais assemblage des cellules . Les prochaines figures donnent les courbes I-V qui ont été tracés , dans les mêmes conditions experimentales pour chaque groupement en serie .

Soit en régime concentré (c'est-à-dire) , utiliser un systeme optique permettant de concentrer l'énergie solaire correspondant à une surface  $S'$  c'est le procedé d'un reflecteur de lumiere ; soit dans un régime direct .

Les 32 cellules ont été collés sur un support en pléxiglas . En suite , les deux groupements étaient enfermés dans un boitié transparent qui protege les photopiles contre les agents atmosphériques et mécaniques .



Pour réaliser le module solaire à 32 cellules nous avons fait le même travail que pour le cas de 48 cellules.

En tenant compte de l'ancienne numérotation on a deux groupements choisis comme l'indique le tableau suivant

$I_{cc} = 0,530 \text{ (mA)}$		$I_{cc} = 0,560 \text{ (mA)}$	
3	525 (mv)	29	540 (mv)
5	525 "	30	540 "
7	525 "	31	525 "
8	530 "	32	530 "
11	525 "	34	535 "
12	510 "	35	510 "
14	520 "	36	530 "
16	540 "	37	525 "
18	541 "	38	530 "
22	530 "	39	530 "
23	535 "	40	530 "
24	535 "	41	525 "
25	530 "	42	525 "
26	530 "	43	520 "
27	530 "	45	520 "
28	530 "	46	525 "

Tableau 9

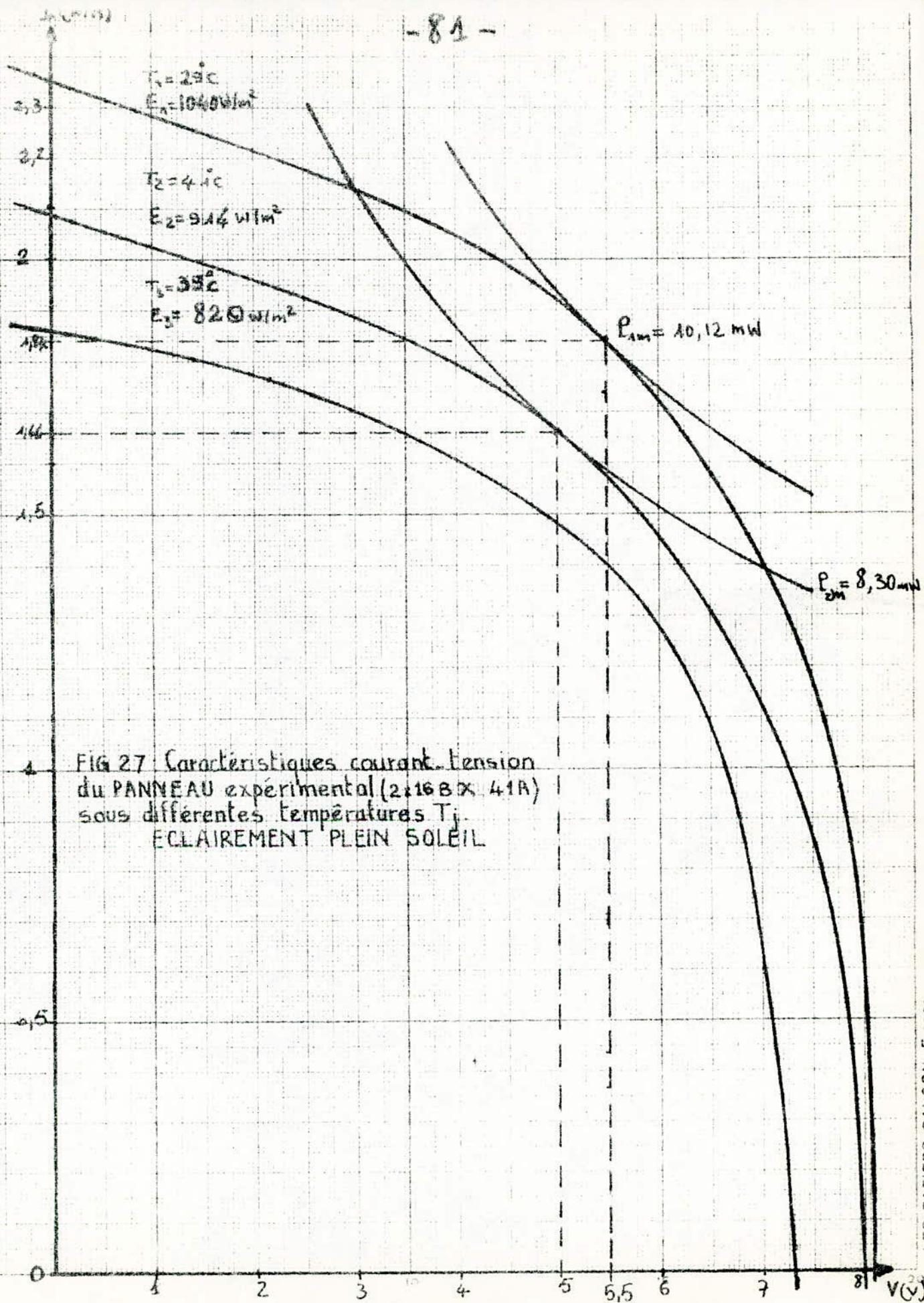
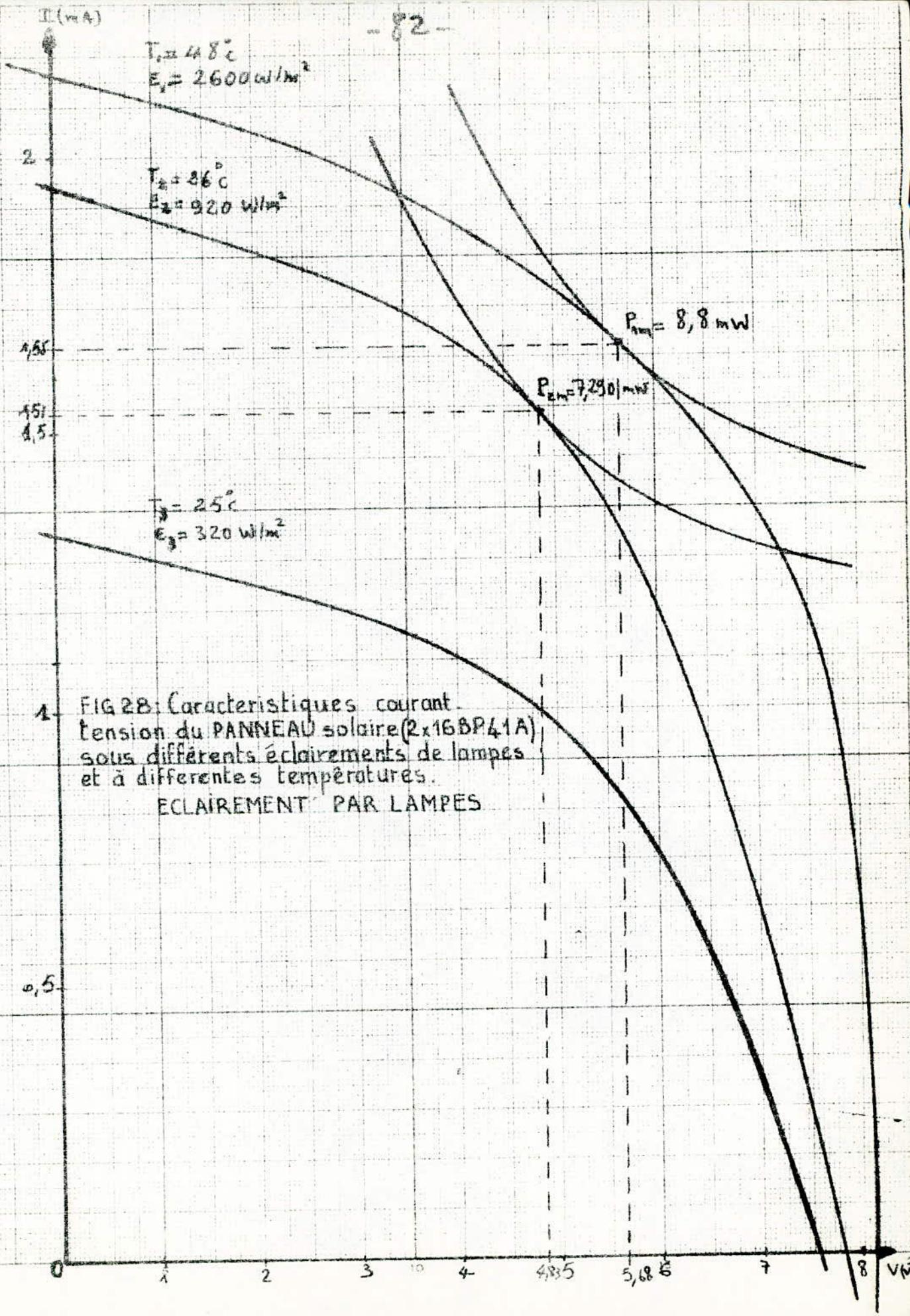


FIG 27 Caractéristiques courant-tension du PANNEAU expérimental (2,16 B X 4,1 A) sous différentes températures  $T_j$ . ECLAIREMENT PLEIN SOLEIL



1 FIG 28: Caracteristiques courant-tension du PANNEAU solaire (2x16BP41A) sous différents éclairagements de lampes et à différentes températures.  
ECLAIREMENT PAR LAMPES

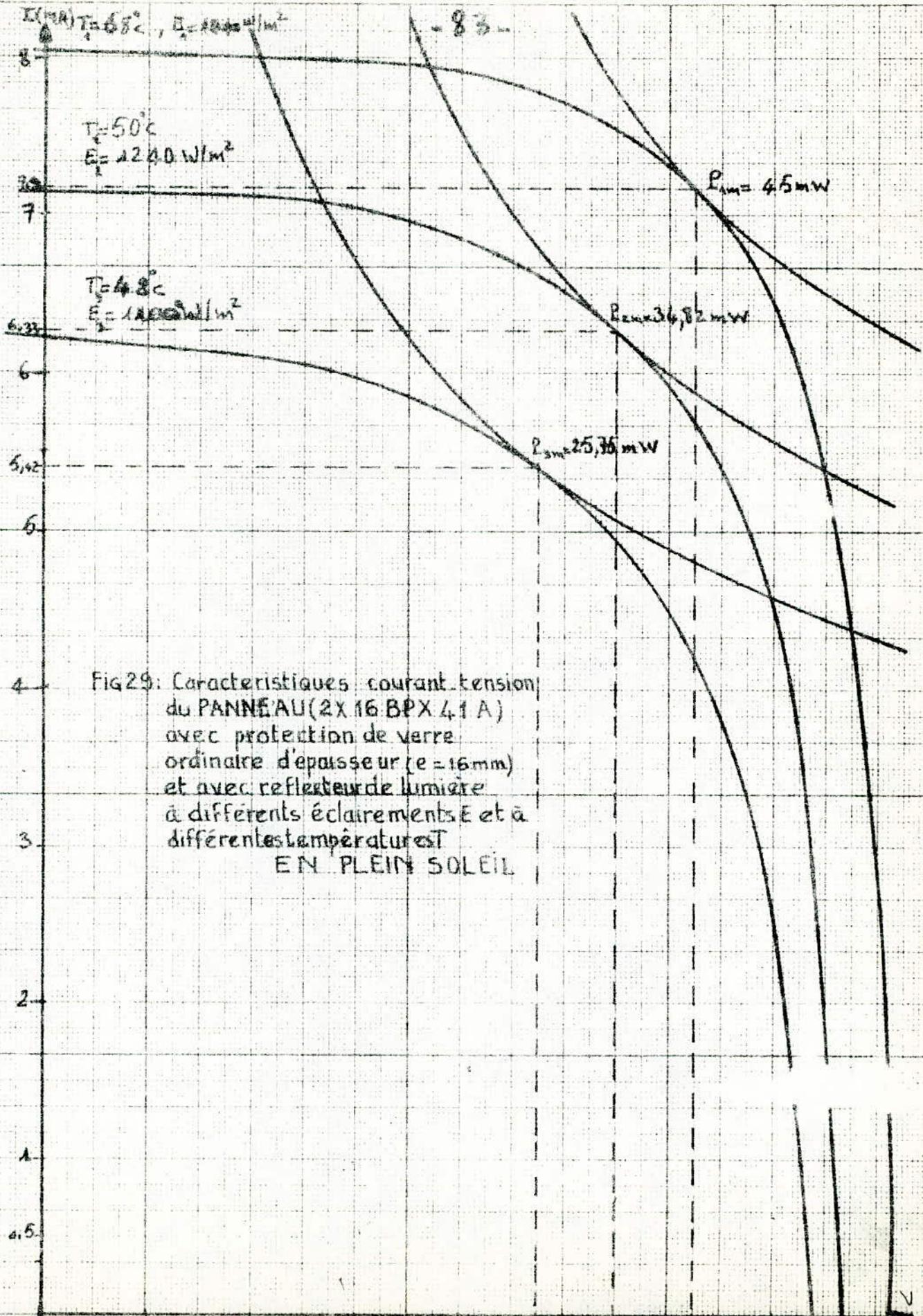
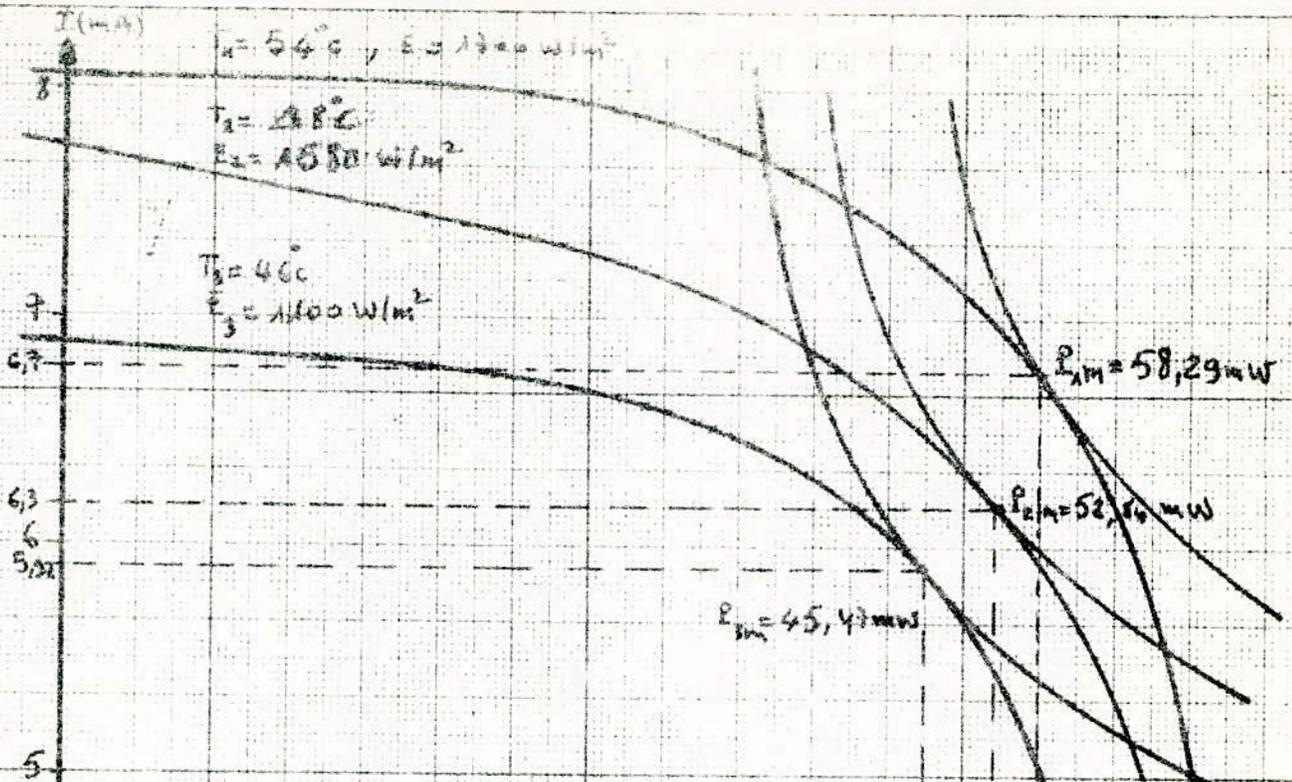


Fig 29: Caracteristiques courant tension  
 du PANNEAU (2X 16 BPX 41 A)  
 avec protection de verre  
 ordinaire d'epaisseur (e = 16 mm)  
 et avec reflecteur de lumiere  
 à differents eclairements E et à  
 differentes temperatures T  
 EN PLEIN SOLEIL



4 FIG. 30: Caractéristiques courant-tension du  
 PANNEAU solaire (2X16 BPX41A) sous  
 différents éclairagements de lampes et différentes  
 températures et avec une lame de verre ordinaire  
 protectrice d'épaisseur ( $e = 1,2 \text{ mm}$ ) et avec un  
 réflecteur de lumière.  
 3 ÉCLAIREMENT PAR LAMPES

## CHAPITRE SIX

### CONCLUSION

Nous avons examiné au cours de cette étude et réalisation, les problèmes qu'il faut résoudre lorsqu'on veut construire un panneau solaire .

Ensuite, nous avons étudié les associations série-parallèle des photopiles .

Les photopiles au silicium sont couramment utilisées sous forme de panneaux solaires à conversion photovoltaïque car la chute de leur rendement avec l'augmentation de la température , n'autorise pas l'emploi de ces cellules solaires sous un rayonnement concentré.

Sachant qu'avec les photopiles actuelles on ne peut pas espérer récupérer mieux que  $200 \text{ Watt/M}^2$ ; à moins d'améliorer leur rendement.

On peut donc dire que pour obtenir des puissances importantes il faudrait disposer d'énormes surfaces de captation .

L'exploitation de l'énergie solaire dans le cas d'une

structure électrique conventionnelle nécessiterait, évidemment, des installations très onéreuses.

Mais, une telle opération présente un avantage certain lorsqu'il s'agit d'électrifier des régions difficiles à atteindre.

Actuellement, les microcentrales électrosolaires sont utilisées pour alimenter en électricité les sondes spatiales artificielles et les relais hertziens.

Les équipements portatifs etc....

L'exploitation de l'énergie solaire sous la forme électrique ne sera réellement possible que si on arrive à diminuer sérieusement le coût des équipements.

Dans le cas des photopiles, les recherches actuelles ont tendance à être orientées vers la fabrication de cellules solaires d'un faible prix de revient et d'un bon rendement de conversion énergétique.

A titre d'exemple on a constaté que pour avoir 1 Watt continu 24 heures sur 24 heures à partir d'un panneau fixe débitant sur un stockage d'énergie 85 pour cent de rendement, il faut 5 à 6 watts crête dans une région très ensoleillée comme le Sud de l'Algérie par exemple.

On remarque finalement que la situation économique actuelle limite sévèrement les applications terrestres, sachant qu'on a un grand espoir qu'une telle réalisation serait rendue possible dans l'avenir, grâce à la récente découverte des photopiles de qualité médiocre, mais pouvant atteindre de bonnes performances.

A N N E X E S

ANNEXE I;  
LA RESISTANCE SERIE

Aperçu sur le rôle et les causes de la résistance serie

La résistance équivalente a la charge optimale, égale au rapport  $V_m/i_m$ , est de l'ordre de grandeur de dix Ohms pour une surface de cellule de  $1 \text{ cm}^2$ .

Cette résistance est inversement proportionnelle à l'aire de la cellule. On voit donc qu'il est nécessaire que la résistance série  $R_s$  du circuit équivalent de la cellule solaire soit très inférieure au rapport  $V_m/i_m$  si l'on veut pas que cette résistance vienne pas réduire le rendement dans une proportion appréciable.

La résistance série peut être attribuée à deux causes principales:

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

-la résistance du matériaux semiconducteur répartie dans le volume des régions n et p.

Alors que le premier terme correspond à des résistances bien localisées dans le circuit, le second fait intervenir une résistance répartie au sein du générateur photoélectrique. La figure 1, qui représente la structure réelle d'une cellule solaire circulaire au silicium, montre la distribution des lignes de courant dans la cellule et, par là, l'extrême complexité du problème que représenterait le traitement mathématique de ce cas encore relativement simple. Une représentation plus correcte du circuit équivalent est donnée dans ce cas par la figure 2 où, pour des ensembles générateurs photoélectriques-diodes tous iden-

-tiques, les résistances intercalaires seraient différentes; leurs valeurs sont choisies en rapport avec la structure géométrique de la cellule.

Résistances dues aux contact (résistance localisée )

Considérons d'abord le cas de la résistance de contact localisée , correspondant au schéma équivalent représenté par la figure . Si l'on appelle maintenant  $v'$  la différence de potentiel aux électrodes, la caractéristique courant tension, jusqu'ici représentable par une équation de la forme:

$$i = i_0 \exp\left(\frac{v}{V}\right) - i_F \quad (1)$$

$$\text{devient : } i = i_0 \exp\left(\frac{vv' + i \cdot R_s}{V}\right) - i_F \quad (2)$$

La puissance  $v'i'$  fournie par la cellule est alors maximale pour les valeurs  $v'_m$  et  $i'_m$  différentes de  $v_m$  et  $i_m$  choisis calculées précédemment

Le passage des résultats de l'équation (1) à ceux de l'équation (2) est facile à faire par voie graphique en utilisant les coordonnées obliques. Un raisonnement simple montre que , tant que  $R_s$  est petit devant  $V_m/i_m$ , la perte relative de rendement , dans les conditions optimales d'adaptation, est

$$\frac{dR}{R} = - \frac{R_s i_m}{V_m} \quad (3)$$

Résistance due au matériau (résistance répartie)

Considérons maintenant le cas de la résistance du matériau semiconducteur.

L'aire des cellules solaires étant en général relativement grande, on peut admettre qu'il est toujours possible de réaliser

un courant contact très étendu sur la région postérieure, c'est à dire un contact tel que la plus grande partie du courant traverse cette couche dans le sens de son épaisseur (fig 1). Ce matériau étant assez fortement dopé (résistivité inférieure à 1 OHM.cm) et utilisé en lamme mince (épaisseur inférieure à 0,5mm), la chute de potentiel correspondant à la densité maximale  $J_E$  du courant qui peut le traverser en utilisation normale est inférieure à 2 mV, donc négligeable.

Par contre, à moins qu'on ne trouve un procédé permettant de un contact transparent et à faible résistance sur l'ensemble de la couche antérieure, cette dernière devra être traversée par le courant parallèlement à ses faces. On a vu à propos de la collection des charges minoritaires, qu'il était nécessaire que cette couche soit très mince pour que l'efficacité de collection soit grande; la résistivité de ce matériau ne pouvant pas être très petite, la résistance qu'il opposera au passage du courant risque d'être relativement importante.

Supposons tout d'abord que la densité du courant  $j$  qui traverse la barrière de potentiel soit la même partout, c'est à dire indépendante de la différence de potentiel; on trouve alors

pour une cellule circulaire à contact annulaire, la différence de potentiel dans la couche entre le contact et le centre vaut:

$$\Delta V = \frac{j \sigma^2}{4 \sigma a} \quad (4)$$

où:  $\sigma$  est la conductivité de la couche,  $\sigma$  le rayon de la cellule et  $a$  l'épaisseur de la couche;

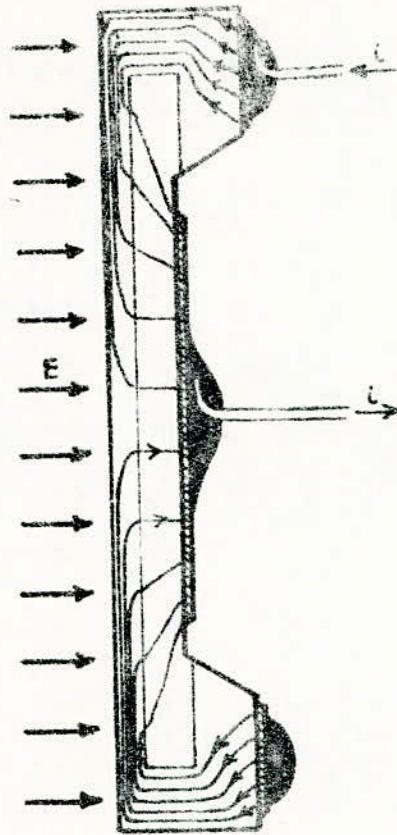


FIG1: Structure réelle d'une cellule solaire

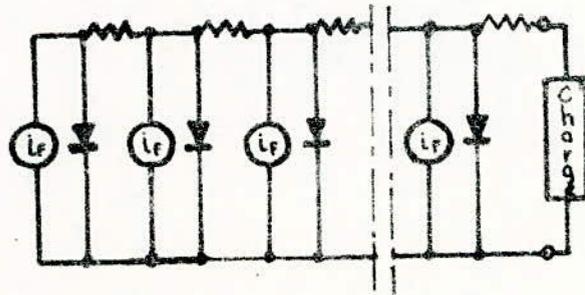


FIG2: Circuit équivalent à la cellule solaire, tenant compte de la résistance serie due au matériau semiconducteur.

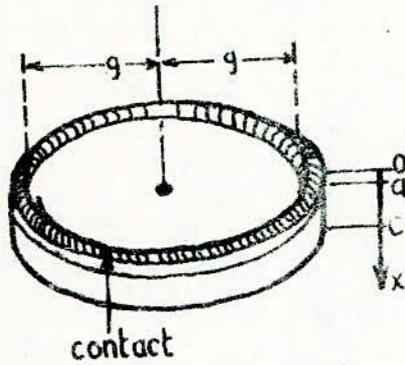


FIG 3: CELLULE CIRCULAIRE

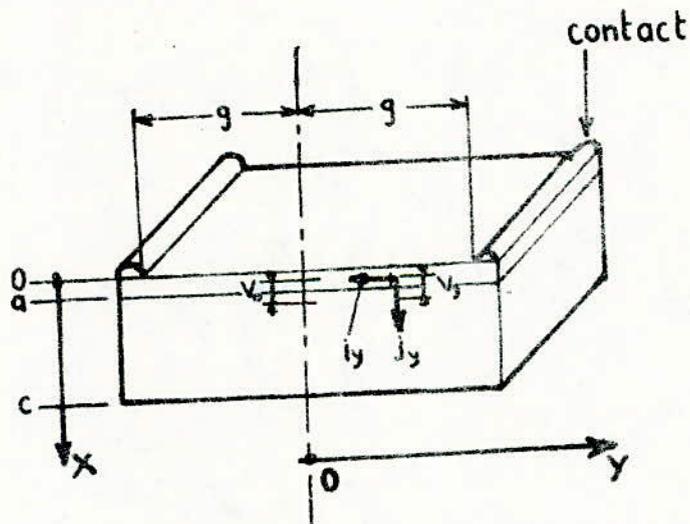


FIG 4: CELLULE RECTANGULAIRE

où:  $\sigma$  est la conductivité de la couche,  $g$  le rayon de la cellule et  $a$  l'épaisseur

-pour une cellule rectangulaire munie de deux contacts situés sur les deux côtés distants de  $2g$  (fig 4)

Pour une cellule solaire au silicium à couches diffuses  $n$  de  $0,5 \mu$  d'épaisseur, le rapport  $\frac{I}{j_{\text{max}} \cdot a}$ , connu également sous le nom de résistance spécifique  $r$  de la couche(I) est de l'ordre de 30 OHMS. Si l'on prend  $j = 33 \text{ mAcm}^{-2}$ , on voit alors que  $\Delta V = 62,5 \text{ mV}$  pour une cellule rectangulaire de 1cm de large.

Le problème peut être traité d'une manière rigoureuse dans le cas d'une géométrie rectangulaire, si l'on admet aussi que la caractéristique densité de courant tension peut être mise sous la forme :

$$j = j_0 \exp\left(\frac{V}{V_0}\right) - j_E \quad (6)$$

On montre facilement que si  $y$  est la distance du point considéré sur la cellule au plan de symétrie équidistant des deux contacts (fig 4), et si  $V$  est la différence de potentiel du circuit ouvert:

$$V_0 = V_0 \ln \frac{j_E}{j_0} \quad (7)$$

l'équation de continuité dans l'espace s'écrit:

$$\frac{d^2V}{dy^2} = r \cdot j_E \left[ \exp\left(\frac{V-V_0}{V_0}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

Pour les calculs, il est commode d'effectuer trois changements de variables conduisant à des variables sans dimension:

$$V'_y = \frac{V_y - V_\infty}{\sqrt{\dots}} \quad \text{ou} \quad V_y = \sqrt{V_y'^2 + V_\infty^2} \quad (9)$$

$$j'_y = j_y / j_E \quad \text{ou} \quad j_y = j'_y j_E \quad (10)$$

$$y' = \frac{y}{\sqrt{\frac{r j_E}{\dots}}} \quad \text{ou} \quad y = y' \sqrt{\frac{r j_E}{\dots}} \quad (11)$$

La forme simplifiée de (8) obtenue au moyen des variables (9,10,11) se prête à une première intégration mathématique, puis à une seconde intégration particulièrement graphique.

Les conditions aux limites sont tout d'abord  $dv/dy = 0$  pour  $y = 0$  puis le choix de la valeur  $V_0$  pour  $y = 0$  qui était jusqu'alors un paramètre arbitraire: le calcul conduit à la détermination des variations de  $V$  et de  $j$ , ou plutôt de leurs formes réduites  $V'$  et  $j'$  en fonction de  $y'$ , ces formes réduites étant indépendantes des paramètres  $V_\infty, j_E, \sqrt{\dots}$  et  $r$ .

La figure (6) représente la distribution de  $V'$  et la densité de courant moyenne

$$\frac{i}{y} = \frac{1}{Y} \int_0^{y'} j' dy'$$

en fonction de  $y'$  pour une valeur donnée de

$$V'_0 = \frac{V_0 - V_\infty}{\sqrt{\dots}}$$

Cette figure montre bien que, lorsque  $V'$  n'est pas très grand devant l'unité,  $i'/y'$  est loin d'être constant, contrairement à ce qu'avait supposé le premier calcul sur la chute de potentiel  $\Delta V$  (relations 4 et 5)

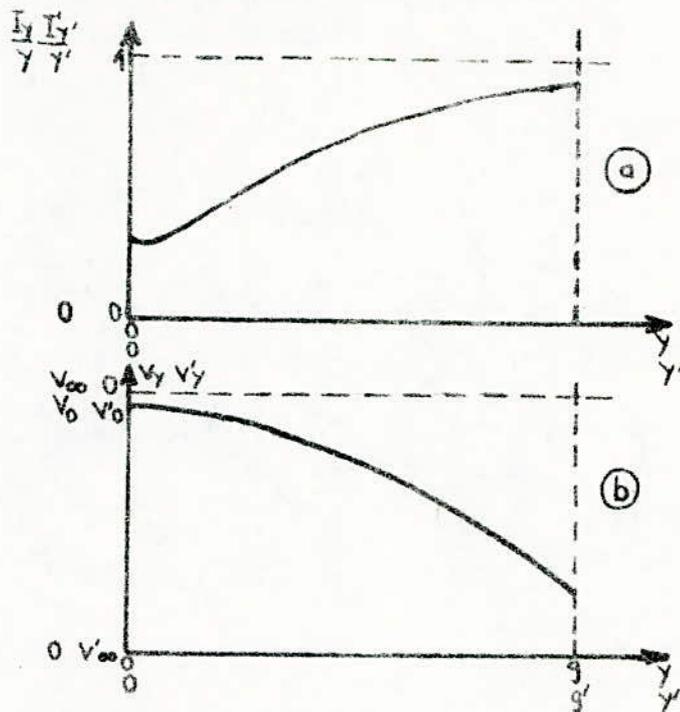


FIG 6: Distribution des potentiels  $v$  de la densité de courant  $j$  dans la couche antérieure d'une cellule rectangulaire en fonction de la distance  $y$  au plan de symétrie.

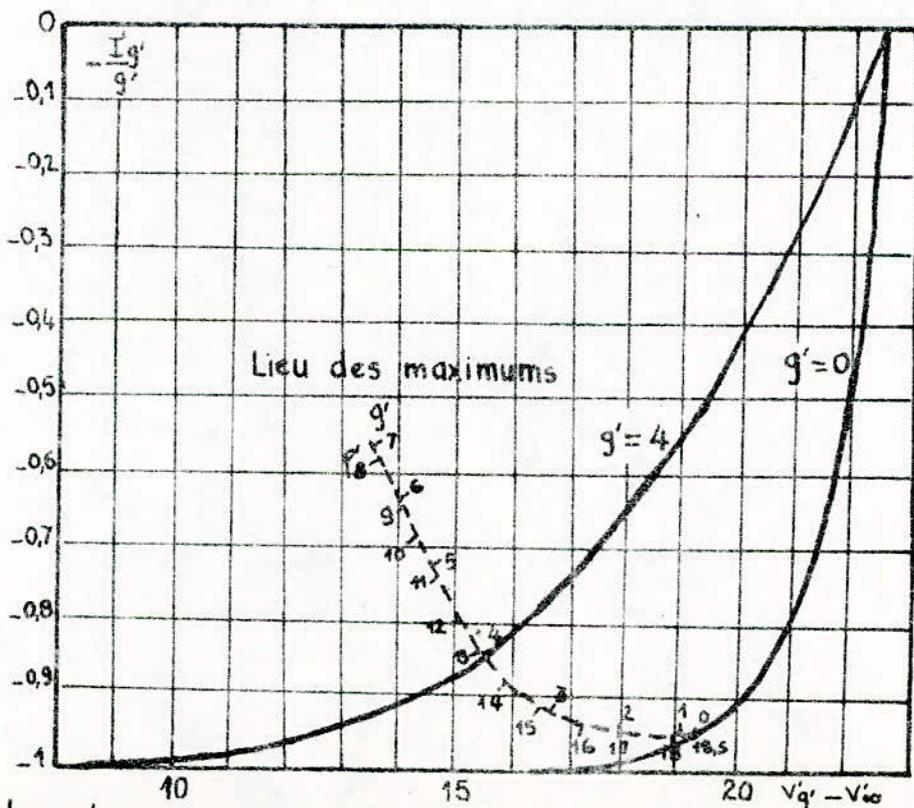


FIG 7: Caractéristiques courant moyen-tension tenant compte de la résistance série due à la couche antérieure.

Pour une cellule donnée de largeur  $2g$  (fig 4) et de paramètres  $r, \lambda$ , et  $j_0$ , placée dans des conditions d'éclairement données,  $j_E$  donc  $V_\infty$  sont connus, et les valeurs prises par  $V_g$  et  $i_g$  ne dépendent plus que du paramètre  $V_0$  jusqu'ici choisi arbitrairement

En faisant varier ce paramètre on fait varier simultanément  $V_g$  et  $i_g$ , ce qui permet d'en déduire la forme théorique de la caractéristique courant-tension de la cellule définie ci-dessus, dans les conditions d'éclairement précitées. La figure (7) montre un exemple de résultat ainsi obtenu pour

$$V_0' = V_\infty \sqrt{\lambda} = 22,5$$

L'une des courbes se rapporte au cas idéal où  $r$  est nul ( $g' = 0$ ) l'autre à un cas tel que :

$$g' = \frac{g}{\sqrt{\frac{V_\infty}{r j_E}}} \quad (12)$$

est égal à 4

la variation du paramètre  $V_0$  permet donc également de chercher la variation valeur de  $V_0$  qui rend maximal le produit  $\frac{V_g i_g}{g}$

c'est à dire le rendement. En effet le rendement réel de la cellule vaut:

$$\rho = (V_g' - V_0') \frac{i_g'}{g'} \frac{\lambda j_E}{E} \quad (13)$$

la figure (7) donne également le lieu des maximums de rendement. avec en paramètre, la valeur de  $g'$  et celle du rendement réduit:

$$\rho' = (V_g' = V_\infty) \frac{i_g'}{g'} \quad (4) \quad (14)$$

L'ensemble de ces résultats a reçu une bonne vérification expérimentale.

Ra Reprenons l'exemple d'une cellule rectangulaire de 1 cm de large ( $g = 0,5\text{cm}$ ), dont la couche antérieure aurait une résistance spécifique de 30 OHMS.

Avec  $\gamma = 26\text{ mV}$ ,  $V_{\infty}^A = 22,5$ , c'est à dire une différence de potentiel de circuit ouvert égale à 0,58 V, et  $j_E = 33\text{mA/cm}^2$   
On trouve, d'après la relation (12)  $\epsilon' = 3,1$

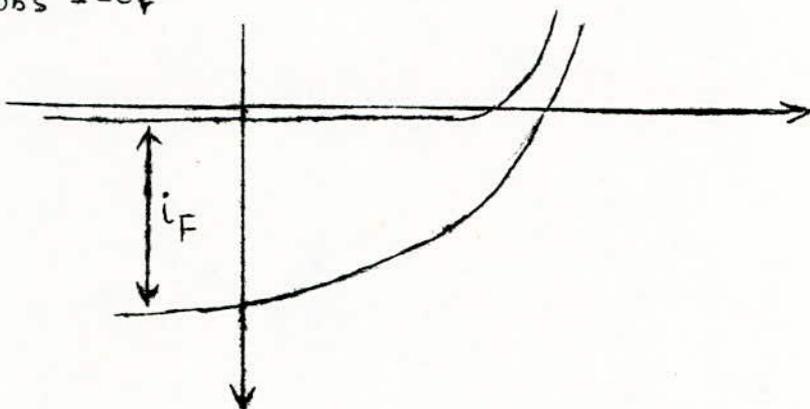
ce qui permet de situer totalement la position du point de fonctionnement optimal sur la figure (7) et, d'après cette figure de voir que le rendement de cette cellule n'est que les 81/100 (15/18,5) de ce qu'il serait si la résistance spécifique  $r$  de la couche était nulle.

Méthode d'évaluation de la résistance série

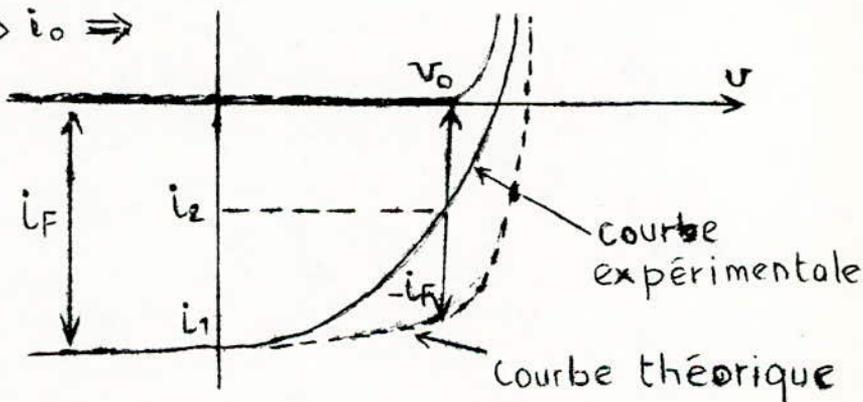
$$i_{\text{act}} = I_0 \exp\left[\frac{e}{k_B T} (v + r|i_{\text{act}}| - U_0) - 1\right] - I_F$$

$$i_{\text{obs}} = I_0 \exp\left[\frac{e}{k_B T} (v + r|i_{\text{obs}}| - U_0) - 1\right]$$

$$i_{\text{act}} \approx i_{\text{obs}} = -i_F$$



Cas où  $i_F \gg i_0 \Rightarrow$



Courbe théorique:  $r = 0$

$$i_1 = I_0 \exp\left[\frac{e}{k_B T} (v_1 - U_0) - 1\right] - I_F$$

$$v = U_0 \Rightarrow i_1 = -I_F$$

Courbe expérimentale:

$$i_2 = I_0 \exp\left[\frac{e}{k_B T} (v + r|i_2| - U_0) - 1\right] - I_F$$

$$v = U_0$$

$$i_2 = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e}{k_B T} r|i_2| - 1\right) - I_F \right]$$

$$i_2 \approx I_0 \frac{e}{k_B T} r |i_2| - i_1$$

$$|i_2| = -i_2$$

$$i_2 \approx -I_0 \frac{e}{k_B T} r i_2 + i_1 \text{ ou } i_2 \left(1 + \frac{e}{k_B T} r I_0\right) = i_1$$

$$\frac{i_1}{i_2} = 1 + \frac{e}{k_B T} r I_0 \text{ ou } \frac{e}{k_B T} r I_0 = \frac{i_1 - i_2}{i_2}$$

$$r = \frac{|i_1 - i_2|}{|i_2|} \times \frac{k_B T}{e I_0}$$

$$\frac{e}{k_B T} \approx 40 ; I_0 \approx 10 \mu\text{A} = 10^{-5} \text{A} ; |i_2| \approx 48 \text{mA}$$

$$|i_1 - i_2| \approx 4 \text{mA}$$

$$\text{d'où : } r \approx \frac{4}{48} \times \frac{1}{40 \cdot 10^{-5}} = \frac{10^5}{960} \approx 100 \Omega$$

### Cellule BPX 33

$$I_0 \approx 10 \mu\text{A} ; |i_2| \approx 100 \text{mA}$$

$$|i_1 - i_2| \rightarrow 0 \Rightarrow r \rightarrow 0$$

### Heter jonction

$$r \approx 0,1 \Omega \text{ à } 1 \Omega$$

La partie de la courbe  $i = f(v)$  correspond à la photopile travaillant comme générateur est celle pour laquelle  $i < 0$  et  $v > 0$ ; dans ce cas, on a:

$$i = I_0 \left[ \exp \frac{e(v + r|i_1 - i_2| - v_0)}{k_B T} - 1 \right] - I_F$$

si on branche aux bornes de la photopile une résistance  $R$ , on aura:  $v = -Ri$  avec  $i < 0$  (la courbe sous éclairément montre que  $|i_1| < |i_2| \Rightarrow i = i_0 - I_F < 0$ ) d'où  $v > 0$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} ; k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$$

$$T = 300 \text{K} \text{ (température ambiante } \sim 27^\circ\text{C)}$$

$$\frac{e}{k_B T} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \times 3 \times 10^2} \approx 40$$

JONCTION PN

5

Les cellules photovoltaïques mettent en oeuvre les conséquences de l'effet photoélectrique interne lorsque se produit dans un matériau semi conducteur dans lequel la concentration des impuretés électroniquement actives n'est pas uniforme.

STRUCTURE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Considérons la structure la plus habituelle d'une cellule photovoltaïque.

La partie semi conductrice d'une telle cellule (fig 1) comporte deux régions disposées en couches parallèles, l'une dite antérieure qui reçoit la lumière, est dopée par des atomes d'impuretés, donateurs d'électrons (région n); l'autre dite postérieure est dopée par des atomes d'impuretés accepteurs d'électrons (type p).

L'ensemble des deux régions (p) et (n) au sein d'un même échantillon semi conducteur est appelé "jonction". Chaque de ces deux régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact atomique c.à.d. un contact aux bornes duquel la différence de potentiel est proportionnelle à la densité de courant et possède une valeur faible de préférence

ETAT D'EQUILIBRE D'UNE CELLULE

A l'état d'équilibre c.à.d. à température uniforme, dans l'obscurité et en l'absence de différence de potentiel appliquée il ne circule aucun courant observable 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. Si les concentrations  $N_D$  des donateurs

et  $N_A$  des accepteurs sont à la fois grandes devant la concentration intrinsèque  $n_i$  des électrons et des trous dans le même semi-conducteur pur, et petites devant les concentrations  $N_C$  et  $N_V$  des états possibles pour les électrons dans les bandes de conduction et de valence on a:

-pour la région n (contenant des donneurs) (1)

$$n_{on} = N_D \quad (\text{majoritaire})$$

$$p_{on} = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (\text{minoritaire}) \quad (2)$$

-pour la région p (contenant des accepteurs)

$$n_{op} = \frac{n_i^2}{N_A} \quad P_{op} \quad (\text{minoritaire}) \quad (3)$$

$$P_{op} = N_A \quad (\text{majoritaire})$$

Pour les charges majoritaires ne tendent pas à aller par diffusion dans le milieu voisin, où elles sont minoritaires, il est nécessaire qu'il existe entre les deux régions netp une différence de potentiel de diffusion (fig2)

la relation  $n_i^2 = N_C N_V e^{-E/kT}$  (6) donne 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 valence et de largeur  $E$  de la bande interdite compte tenu de cette relation on trouve, dans le domaine de validité des formules (1) et (4)

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = \frac{E}{q} - \frac{kT}{q} \ln \frac{N_C N_V}{N_A N_D} \quad (7)$$

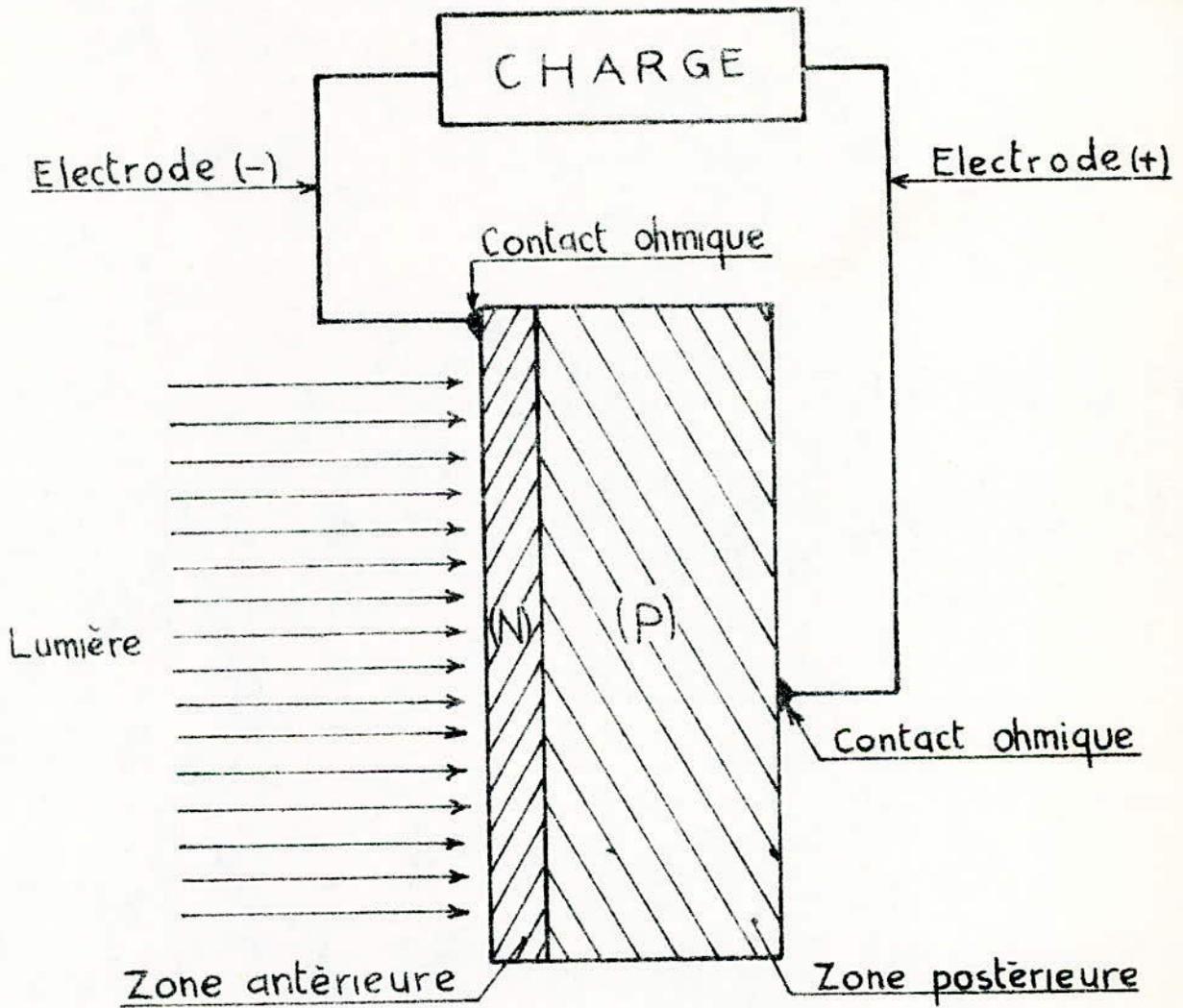


FIG1: SCHÉMA D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE

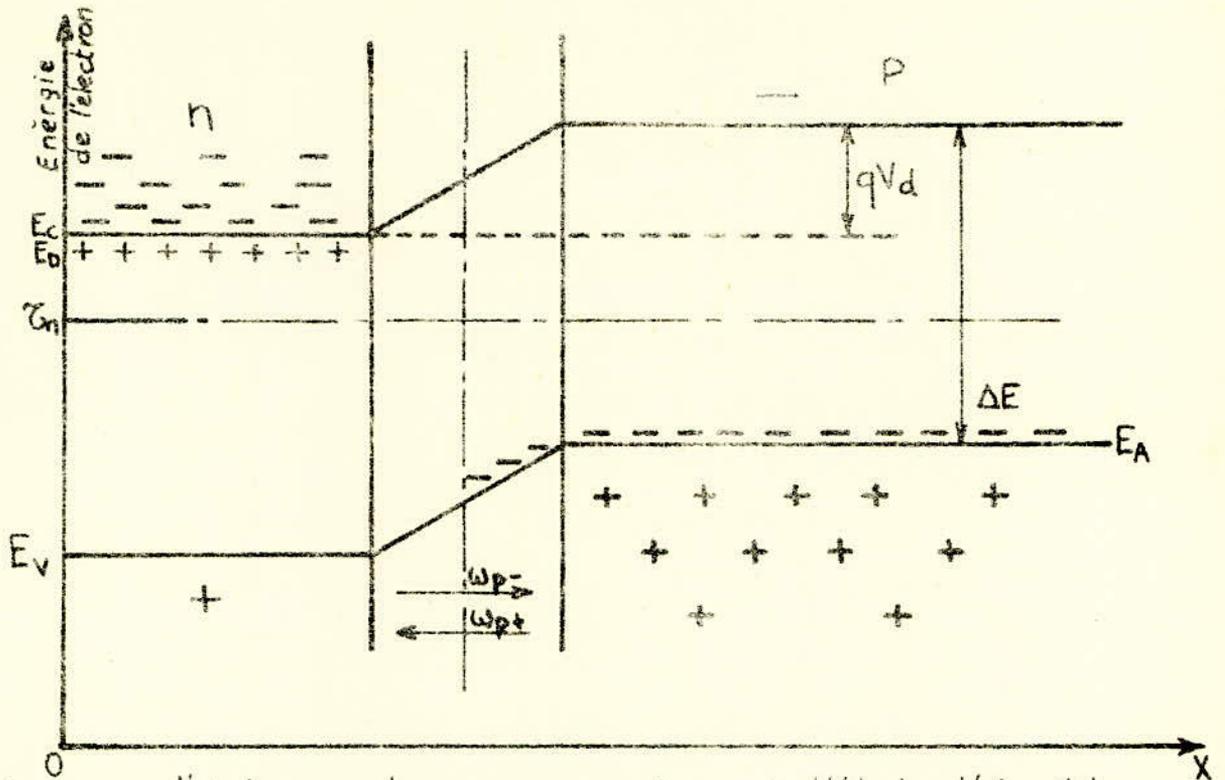


FIG2. Niveaux d'énergie dans une jonction à l'état d'équilibre

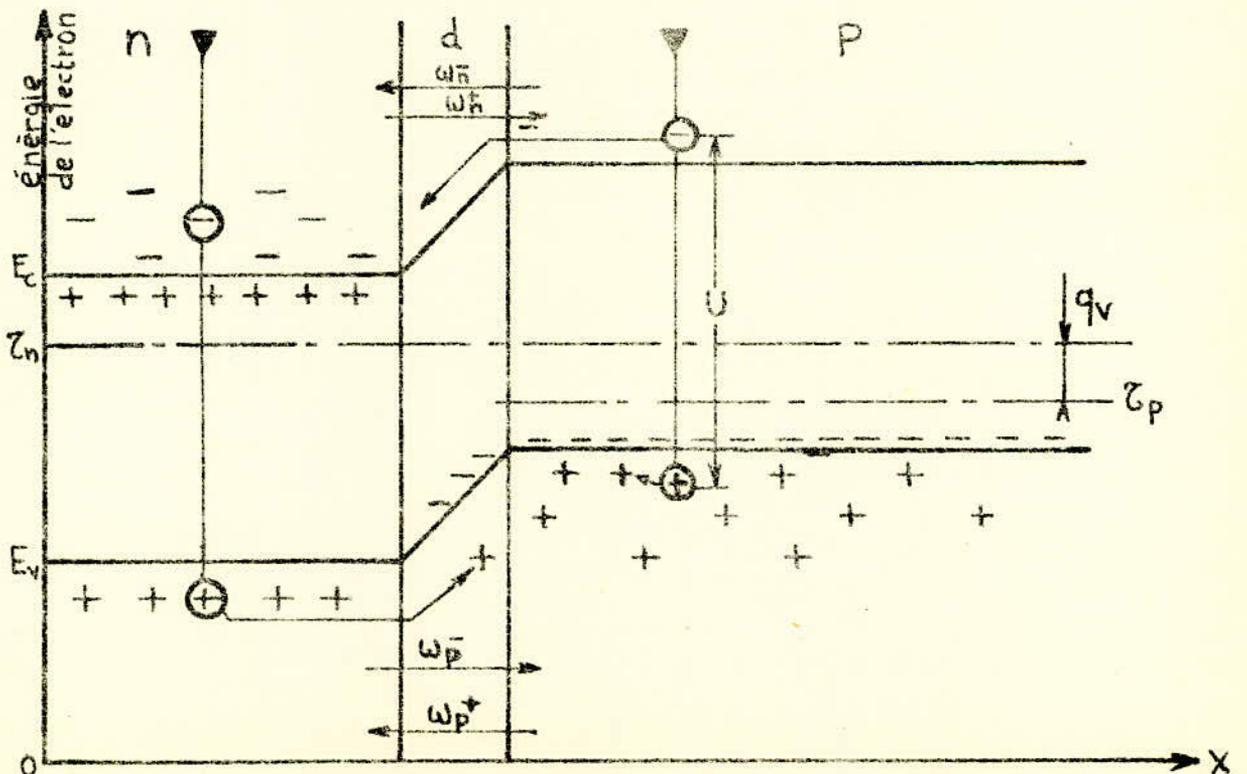


FIG3. Niveaux d'énergie dans une cellule solaire éclairée et débitant dans une charge.

$N_c$  et  $N_v$  étant toujours sensiblement supérieures à  $N_D$  et  $N_A$  et cependant relativement peu de la température, la dernière dernière forme de la relation (7) montre que  $V_d$  est un peu inférieure à  $\frac{E}{q}$  et varie peu avec  $T$

A l'état d'équilibre le débit  $W_n$  des électrons qui vont de la région p à la région n compense juste le débit  $W_{n+}$  des électrons qui passent de n en p et de même les débits de trous  $W_{p-}$  et  $W_{p+}$  se compensent si bien qu'aucun courant n'est perceptible dans le circuit extérieur

#### CELLULES ECLAIREES EN COURT CIRCUIT

Supposons qu'on éclaire (fig 3) la cellule avec la lumière contenant des photons dont l'énergie  $U$  est supérieure à la largeur de la bande interdite, l'absorption de chaque photon par un électron de valence donnera naissance à une paire électron-trou.

Si la charge minoritaire parvient, par diffusion, à atteindre la barrière de potentiel, elle sera dopée par le champ électrique et passera dans la région où ces congénaires sont majoritaires.

Si la cellule est en court-circuit, les différences de débits  $W_{n-}$  et  $W_{p-}$  sont augmentées de la contribution photoélectrique

alors que les débits  $W_{n+}$  et  $W_{p+}$  restent inchangés.

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

$$I'_{cc} = -q.F$$

En pratique compte tenu des phénomènes de réflexion, transmission, absorption, parasites, la formule devient :

$$I_{cc} = -q.K.F \quad K=1$$

### CELLULES POLARISEES DANS L'OBSCURITE

Supposons maintenant que la cellule, placée dans l'obscurité, soit soumise à une polarisation au moyen d'une source insérée dans le circuit.

La différence de potentiel observable modifie alors la hauteur de la barrière de potentiel.

Suivant que  $V$  est positif ou négatif (fig 3) les débits  $W_{n^+}$  et  $W_{p^+}$  sont favorisés ou défavorisés par rapport aux débits négatifs.

Le courant qui traverse la jonction varie avec la différence de potentiel  $V$  suivant une loi non linéaire dont la forme générale est donnée sur la figure 4) (4)

Sous-éclairage, le courant  $-i_{cc}$  qui est pratiquement indépendant (de la différence des flux) s'ajoute toujours au courant d'obscurité, si bien que la caractéristique courant-tension de la jonction éclairée peut être déduite de la somme des deux termes

$$i = i_v - i_{cc}$$

La courbe niveau de la mer (fig 4), représente une telle caractéristique.

ON constate que dans le quatrième quadrant où  $V$  est positif et  $i$  négatif, la cellule se comporte comme un générateur d'énergie

On voit qu'au point de puissance maximum  $w_m$ , le courant débité  $i_m$  est inférieur à  $i_{cc}$  et la différence de potentiel  $W_m$

est inférieure à la

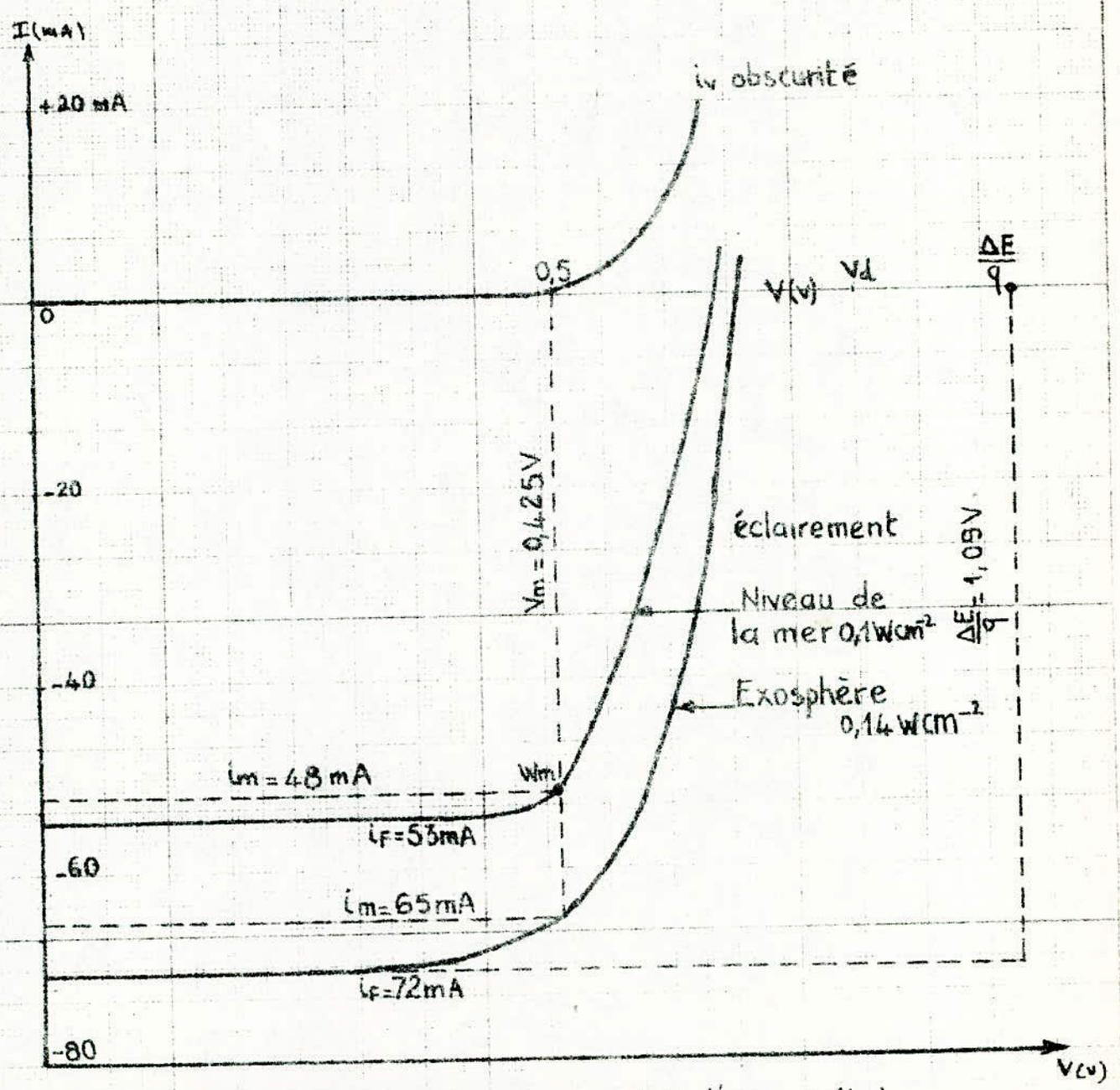


FIG 4: Caractéristiques courant (i), tension (v) d'une cellule Photovoltaïque

à la différence de potentiel de circuit ouvert ( $i=0$ ) qui est elle même plus petite que le rapport entre le saut d'énergie et la charge d'électron .

#### CONVERSION DE L'ENERGIE LUMINEUSE EN ENERGIE ELECTRIQUE

D'après ce que nous venons de voir ,l'étude du transfert de l'énergie des photons à la charge placée dans le circuit extérieur peut être décomposer en trois phases distinctes:

- formation de paires d'électrons-trous par absorption des photons
- diffusion des porteurs minoritaires libérés, jusqu'aux frontières de la couche de charge d'espace.
- transfert de l'énergie des minoritaires (collectés par la barrière de potentiel) à la charge électrique placée dans le circuit extérieur aux pertes mentionnées dans les trois paragraphes précédents ,ne devant ajouter celles qui proviennent:
  - de la réflexion à la surface de la cellule.
  - des résistances intérieures à la cellule.

#### FORMATION DE PAIRES ELECTRONS-TROUS

Une paire "électron-trou" est formée chaque fois qu'un photon cède son énergie à un électron de valence en le faisant passer dans la bande de conduction ; cela implique donc que l'énergie du photon est supérieure à la largeur de la bande interdite.

#### DISTRIBUTION SPECTRALE DES PHOTONS DANS LA LUMIERE SOLAIRE

E étant la mesure de l'éclairement

U l'énergie

La figure (5) représente la distribution spectrale de l'éclai-

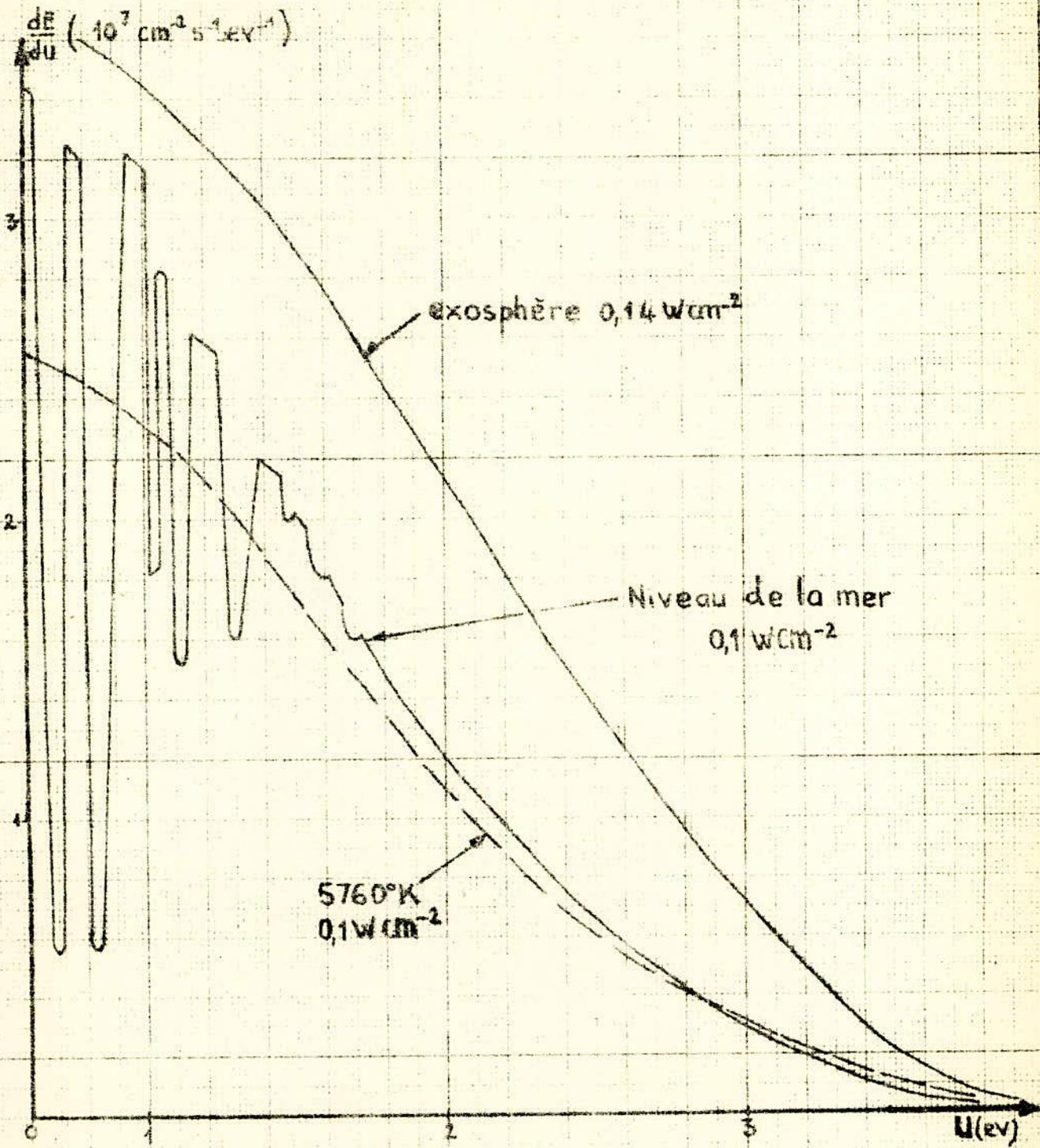


FIG 5: Distribution spectrale des photons dans:  
 - la lumière **solaire** au niveau de la mer.  
 - la lumière **solaire** dans l'exosphère  
 - une lumière conventionnelle à la température de couleur 576°K.

FRANCE  
 P. CANSON  
 LES PAYS-BAS

DE l'éclairement obtenu:

- au soleil , sur un plan de front , dans l'exosphère
- au soleil, sur un plan de front, dans l'atmosphère
- au soleil, sur un plan de front, au niveau de la mer
- avec la lumière d'un corps noir 5760° K

Le spectre de la lumière du corps noir correspond approximativement à la distribution spectrale relative de la lumière moyenne du jour, dans les régions visibles (1,7 à 3 eV), au niveau de la mer.

#### DENSITE MAXIMALE DU COURANT PHOTOELECTRIQUE

Si l'on admet que les pertes sont négligeables, et que tous les photons absorbés donnent une paire "électron-trou" :

Le courant  $I_{cc}$  aura l'expression suivante

$$I_{cc} = q \int \frac{dF}{dU} dU$$

#### RENDEMENT DU TRANSFERT PHOTOELECTRIQUE

Toute l'énergie des photons absorbés n'est pas utilisée, l'excédent ne sert qu'à échauffer le cristal, et l'énergie recueillie "électron-trou" n'est jamais supérieure au saut d'énergie le rendement énergétique est donc suffisant.

On note également que le rendement est le rapport entre la puissance recueillie et la puissance totale des photons incidents, des courbes de rendement en fonction du saut d'énergie ont montré que le saut d'énergie le plus favorable est situé entre 1 et 1,2 eV

#### COLLECTION DES CHARGES MINORITAIRES

Condition pour qu'une charge minoritaire soit utilisable

La libération d'une paire "électron-trou" est en elle-même incapable de produire un effet électrique puisque la charge

mise en jeu est nulle . Dans les cellules photovoltaïques la barrière de potentiel est due aux variations de concentration des impuretés .

Pour qu'une charge minoritaire soit utilisable, il faut qu'elle atteigne la barrière de potentiel ; le champ l'oblige à passer dans la région où elle devient majoritaire.

#### VARIATION DE LA COLLECTION AVEC L'ENERGIE DES PHOTONS;

E: te ...

L'étude des variations spectrales et l'efficacité de collection, accessible à l'expérience comme au calcul permet d'obtenir des renseignements intéressants sur les régions n et p .

Pour un éclairement monochromatique  $E_u$  donné , l'efficacité de collection  $K_u$  est:

$$K_u = \frac{j_{Eu}}{J_{Eu}}$$

Les coefficients  $K_n$  et  $K_p$  peuvent être calculés en résolvant l'équation différentielle en  $G_x$  qui peut être établie si les paramètres de construction de la cellule sont connus ( $S_n, S_p, L_n, L_p, a, b, c$ ) "leur expression étant trop compliquée".

#### RENDEMENT DE LA JONCTION

Analyse du problème:

Pour qu'une cellule donnée , la puissance recueillie à la barrière de potentiel , sous forme de porteurs minoritaires d'origine photoélectrique est égale à  $\Delta E \cdot \frac{i_{cc}}{q}$

Sur la figure 4 on remarque que cette puissance est maximale au point de coordonnées  $V_m, i_m$  , on a alors:

$$W_m = V_m \cdot i_m$$

Nous appelons rendement de la jonction  $\eta$  le rapport entre les deux puissances suivantes:

$$\eta = \frac{V_m \cdot i_m}{\frac{\Delta E}{q} \cdot i_{cc}}$$

D'après la relation de la différence de potentiel, on peut considérer que le courant électrique d'obscurité de la jonction  $i_v$  est le courant  $i$  qui peut traverser la charge.

Ce raisonnement justifie le circuit équivalent de la cellule (chapitre 2); circuit auquel on a rajouté une résistance  $R_s$  représentant l'influence du matériau.

La puissance fournie est alors:

$$-V_i = V(-i_v + i_{cc})$$

il importe donc que  $i_v$  soit le plus petit possible pour que le rendement soit grand.

Courant d'obscurité:

Puisqu'on peut traiter le problème en considérant les courants  $i_v$  et  $i_{cc}$  comme indépendants, examinons d'abord le comportement de la jonction en polarisation directe, dans l'obscurité qui correspond à  $i_v$ . La densité de courant correspondante  $j_v$  est uniformément une fonction rapidement croissante de  $V$ . En pratique, la valeur de  $j_v$  est déterminée par la distribution énergétique des électrons et des trous dans les bandes et par les phénomènes de recombinaison des porteurs minoritaires injectés.

On peut considérer deux cas principaux:

-La majorité des recombinaisons a lieu dans la couche désertée, avant que les minoritaires aient pu pénétrer dans les régions non chargées.

-la majorité des recombinaisons a lieu dans les régions non chargées et aux surfaces.

$$J_{nvp} = 2q \frac{n_i^2}{N} \sqrt{\frac{D}{T}} B e^{\frac{qV}{kKT}}$$

Pour réduire  $J_{nvp}$  il est intéressant de prendre pour B une valeur petite, cette condition favorise l'efficacité de collection et est très difficile à réaliser et à maintenir dans le temps en particulier pour les cellules en silicium. Condition optimale de fonctionnement:

Nous qualifions d'optimales les conditions de fonctionnement correspondant au point  $V_m, i_m$  de la figure (4). Tant que le potentiel optimale  $V_m$  est suffisamment supérieur à  $\frac{k.T}{q}$  et inférieur à  $V_d$  (de quelques  $\frac{k.T}{q}$ ) les relations donnant  $J_v$  prennent une forme commune.

Les recombinaisons dominantes ont lieu dans les couches désertées en charges.

Si la relation de  $J_v$  est applicable, il est alors possible de chercher les coordonnées du point de puissance maximale. Combinée avec la formule de la puissance de la cellule cette équation donne une relation implicite pour

$$V_m = V_m; J_m$$

Ces résultats combinés avec les relations précédentes permettent de prévoir pour un matériau donné, caractérisé par sa bande interdite (qui commande à la fois les valeurs de  $J_v$  et  $J_E$ ), les caractéristiques  $V_m$  et  $J_m$  et le rendement maximal. Le calcul mené à partir de la relation de  $J_{nvp}$  conduit à deux valeurs de  $V_m$ :  $V_{md}$  et  $V_{mnp}$ . Pour lever cette ambiguïté prenons les caractéristiques de la figure (6)

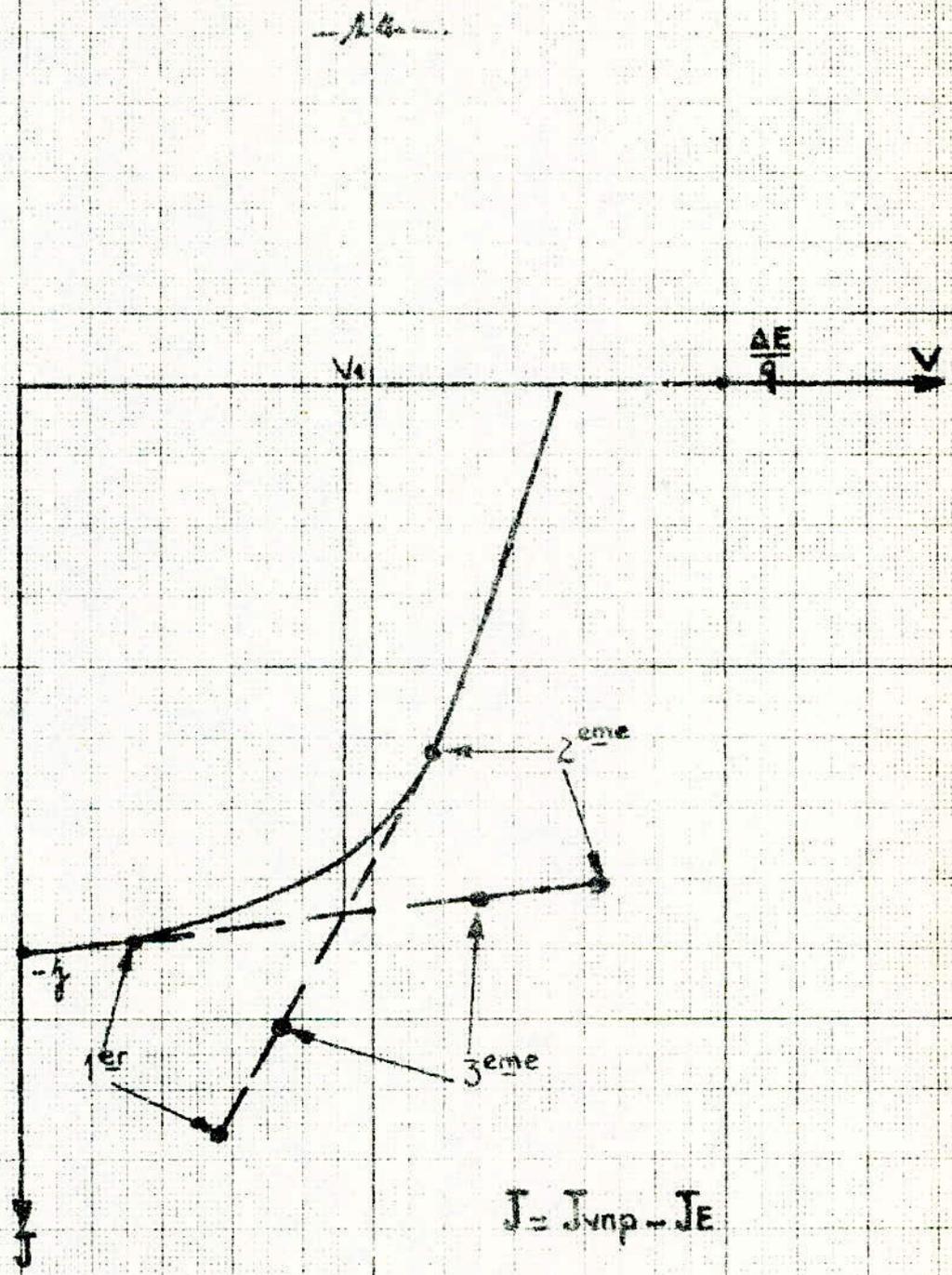


Fig 6: les trois cas de la cellule solaire.

$$J_d = J_{vd} - J_E$$

$$J_{np} = J_{vnp} - J_E$$

Ces caractéristiques se coupent en un point dont l'abscisse  $V_1$  peut être calculée en égalisant les deux relations. On peut trouver alors trois cas:

1-  $V_{md}$  et  $V_{mnp}$  sont inférieurs à  $V_1$ ; l'abscisse du point de puissance maximale est inférieure à  $V_1$ ; c.à.d. que dans les conditions optimales les recombinaisons dans la couche désertée dominant

2-  $V_{md}$  et  $V_{mnp}$  sont supérieurs à  $V_1$ ; dans les conditions optimales les recombinaisons dans les régions n et p sont les plus importantes.

3-  $V_{md} > V_1 > V_{mnp}$  : les deux modes ont à peu près la même importance?

Rendement des cellules solaires utilisant diverses substances

Le calcul des conditions optimales de fonctionnement et du rendement maximum a été effectué par un certain nombre de matériaux, en tenant compte de nos connaissances actuelles sur leurs propriétés.

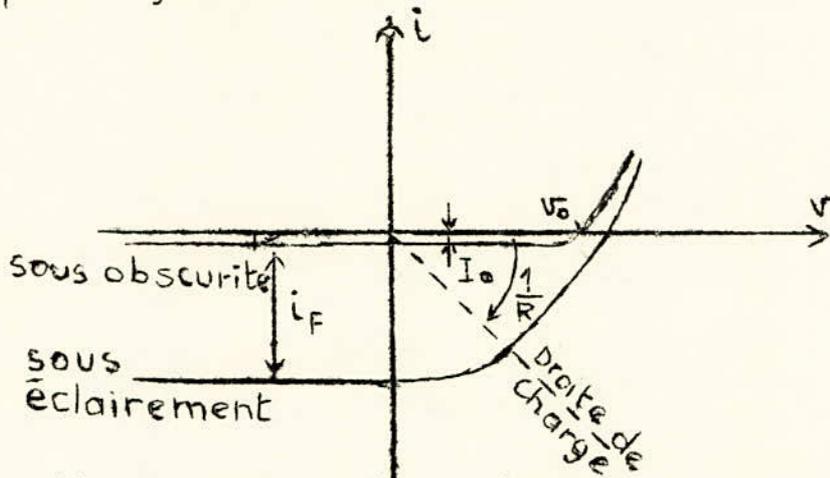
Les résultats de ce calcul prouvent qu'au fur et à mesure qu'on considère des matériaux dont le saut d'énergie est de plus en plus élevé:

1-  $V_m$ , d'abord supérieure à  $V_1$ , lui devient rapidement inférieure; alors que pour le germanium les régions n et p sont le siège de recombinaisons les plus nombreuses, dans le cas des matériaux dont E est supérieure à celui du silicium les recombinaisons ont lieu pratiquement dans la couche désertée, le silicium travaille dans les régions intermédiaires où les deux modes de recombinaison ont à peu près la même importance.

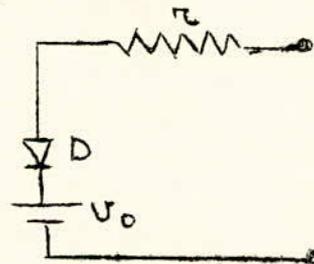
2-Le rendement  $n$  du transfert photons-paires maximum pour le silicium est une fonction décroissante, alors qu'au contraire le rendement de jonction  $n$  est une fonction croissante. Le rendement maximal théorique  $R$ , ici égal à  $H_m$  dépend peu du saut d'énergie dans l'intervalle 1 à 3 eV ; dans cet intervalle les différences dans la durée de vie, qui intervient dans les relations précédentes joue un rôle important.

Annexe : "3"      SCHEMA EQUIVALENT D'UNE PHOTOPILE

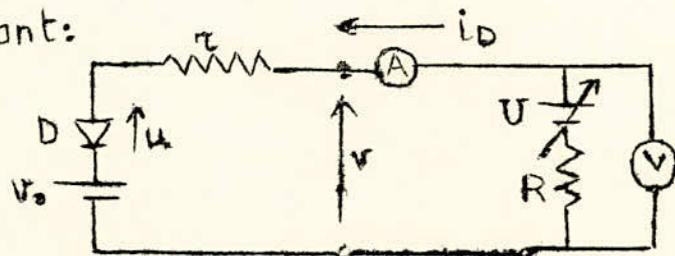
Les courbes  $i = f(v)$  à E et T = C<sup>EE</sup> d'une photopile à jonction PN sont les suivantes:



A l'obscurité, la photopile se comporte comme une diode. Et, compte tenu de la résistance série due aux contacts électriques, le schéma équivalent de la photopile à l'obscurité sera:

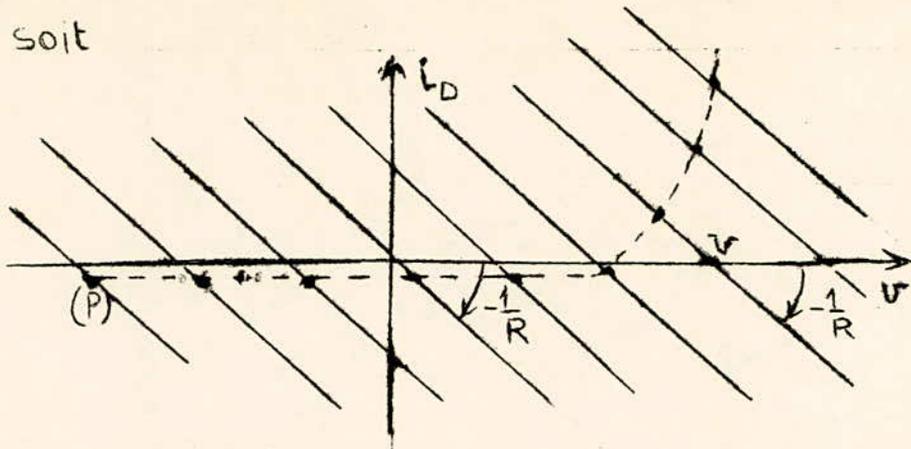


La courbe précédente est obtenue en utilisant le montage suivant:



Pour une valeur donnée de U, le point de repos de la diode D est l'intersection de la courbe  $i_D = f(v)$  caractérisant la diode et la droite  $i_D = - (V - U) / R$

soit



Le réseau de courbes ci-dessus montre que la courbe  $i = f(v)$  peut être tracée point par point (les points tels que  $P$  étant les points de repos correspondant à des valeurs données de  $V$ ). on a donc successivement:

1°)  $i_D > 0$  et  $v > 0$  avec  $v = r i_D + u + U_0$  ou  $u = v - U_0 - r i_D$

et  $i_D = I_0 \left[ \exp \frac{e(v - r i_D - U_0)}{k_B T} - 1 \right]$

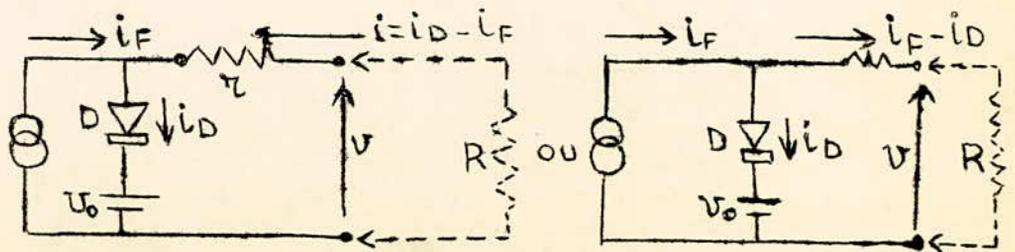
2°)  $i_D < 0$  et  $v > 0$  avec  $u = v - r |i_D| - U_0 = v + r |i_D| - U_0$

et  $i_D = I_0 \left[ \exp \frac{e(v + r |i_D| - U_0)}{k_B T} - 1 \right]$

3°)  $i_D < 0$  et  $v < 0$  avec  $u = v + r |i_D| - U_0 = -|v| + r |i_D| - U_0$

et  $i_D = I_0 \left[ \exp \frac{e(-|v| + r |i_D| - U_0)}{k_B T} - 1 \right]$

sous éclairage, la caractéristique  $i_D = f(v)$  subit une translation  $-I_F$ , dans le sens des  $i$  négatifs. et on a le schéma équivalent suivant:



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

(1) MONTLOIUS -Juin- 1958

L'énergie solaire Application thermique dans le domaine de  
la recherche et de l'industrie.

(2) G. FOURNET

Physique du solide.

(3) G. BLET

Photopiles au Silicium. -DUNOD-

(4) H. DURAND

Les sources autonomes d'énergie.

L'onde électrique (Vol. 55 N° 3 1975).

(5) F. DESVIGNES

Les sources autonomes d'énergie.

L'onde électrique (VOL. 42 N° 3 1975).

(6) Acta Electronica. ( 1961 Vol. 5 N° 3).

(7) Acta Electronica. ( 1959 Vol. 3 N° 2).