

FILIERE D'ÉLECTRONIQUE

red

PROJET DE FIN D'ETUDES

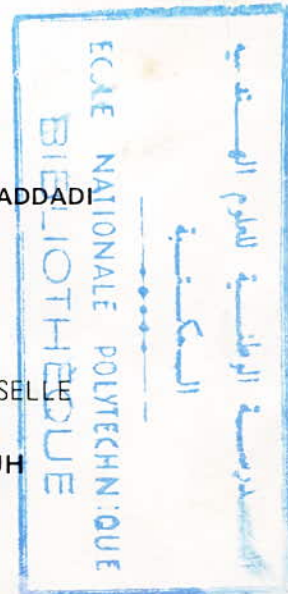
ETUDE DE LA PROTECTION CONTRE LES DESEQUILIBRES ELECTRIQUES DES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES



Proposé par Monsieur M' HADDADI

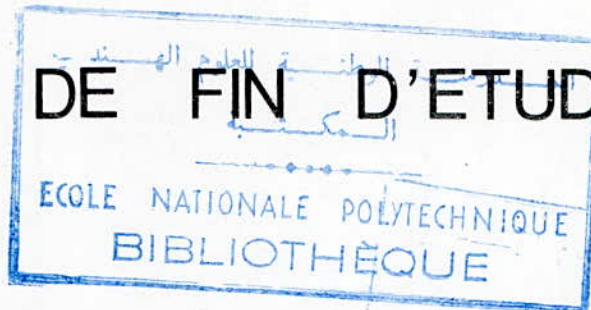
ÉTUDIE PAR MADEMOISELLE

LAËLIA CHETOUH



FILIERE D'ÉLECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES



ETUDE DE LA PROTECTION
CONTRE LES DESEQUILIBRES ELECTRIQUES
DES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

Proposé par Monsieur M' HADDADI

ÉTUDIE PAR MADEMOISELLE

LAÂLIA CHETOUH

D E D I C A C E

A mon père, ma mère

A mes frères, mes soeurs

A Malek

A mes Oncles

A tous mes amis (ies)

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

Ce travail a été fait au Centre des Sciences et de la Technologie Nucléaire (C.S.T.N.), dans le laboratoire "cristaux et couches minces), sous la direction de Monsieur HADDADI Mourad, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Je remercie Monsieur HADDADI de m'avoir proposé ce sujet et de m'avoir guidé durant mon travail.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à :

- Monsieur A. ADANE, Docteur-Ingénieur, Chef du Département Electronique de l'E.N.P.A. pour son aide précieuse et ses bons conseils.

- Monsieur BENMALEK, Maître de conférence à l'U.S.T.H.B et Responsable du Laboratoire C.C.M., de m'avoir accueilli dans son service.

I.- Introduction

II.- Chapitre I

1- Cellules solaires

1.1 - Constitution d'une photopile

a- cellules carrées

b- cellules rondes

1.2- Fonctionnement d'une cellule solaire

1.3- Schéma équivalent

1.4- Paramètres caractéristiques

1.4- a- Résistance série

1.4- b- Résistance Shunt

1.4- c- Facteur d'idéalité

1.5- Rendement de conversion

1.6- Caractéristiques d'une cellule solaire

1.6-a- Ordre de grandeur des paramètres

1.6-b- Description des résultats

1.6-c- Interprétation des résultats

1.7- Association des cellules solaires

1.7-a- Association série

1.7-b- Association parallèle

1.7-c- Association série-parallèle

1.8- Comparaison des cellules du BPX47A et BPX46

2 - Panneaux solaires

2.1- Description du panneau solaire BPX47A

2.2- Fonctionnement

2.3-a- Manipulation

2.3-b- Interprétation des résultats.

III.- CHAPITRE II

- 1- Problèmes posés par l'association de modules solaires
 - 1.1- Différents types d'association
 - 1.1-a- Association parallèle
 - 1.1-b- Association série
 - 1.2- Association de panneaux identiques
 - 1.2-a- Association série
 - 1.2-b- Association parallèle
 - 1.3-a- Manipulation
 - 1.3-b- Interprétation des résultats
 - 1.4- Association de panneaux non identiques
 - 1.4-a- Association série
 - 1.4-b- Association parallèle
- 2- Etude de l'influence de la température

IV.- CHAPITRE III

- 1- Présentation du problème de protection
- 2- Etude de claquage d'une cellule BPX46 à l'obscurité
 - 2.a-1- claquage d'une cellule BPX46 en inverse
 - 2.a-2- Manipulation
 - 2.a-3- Conclusion
 - 2.b- Claquage d'une cellule BPX46 en direct
 - 2.b-1- Manipulation (a)
 - 2.b-2- Manipulation (b)
 - 2.b-3- Manipulation (c)
 - 2.c- Interprétation des résultats
- 3- Détermination des associations maximales
 - 3.a- Association parallèle
 - 3.b- Association série

4- Protection envisagées pour des installations photovoltaïques

4.a- Protection série

4.b- Protection parallèle

5- Optimisation de la protection

V - CONCLUSION

VI - ANNEXE.

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

Les besoins mondiaux en énergie augmentant de jour en jour, alors que les énergies fossiles ne pourront peut être plus répondre à la demande dans un proche avenir.

Le soleil qui représente pour la terre la principale source d'énergie est inépuisable. Donc la conversion directe de l'énergie solaire en électricité est mieux adaptée aux diverses applications terrestres.

On a ainsi pensé à la conversion par effet photovoltaïque, en utilisant des panneaux solaires qui ne consomment aucun carburant et ne produisent ni bruit, ni déchet.

Mais le prix de l'énergie photovoltaïque est élevé, il est donc indispensable d'utiliser ces panneaux au voisinage de leurs caractéristiques optimales, et d'éviter leur détérioration.

Ce travail a pour but d'étudier l'**optimisation** de la protection électrique des panneaux solaires, ce qui a **nécessité** 4 étapes : D'abord nous exposerons tous les cas de déséquilibres, qui peuvent avoir lieu dans un générateur photovoltaïque, puis nous déterminerons les points critiques (limites d'utilisation) des panneaux solaires.

Ensuite nous proposerons les associations maximales qu'il est possible de concevoir sans avoir recours à la protection.

Enfin nous proposerons une protection efficace optimisée.

CHAPITRE I

1. Cellules solaires

La cellule solaire est l'élément de base formant le générateur d'énergie. C'est une diode à jonction P-N de grande surface, à effet photovoltaïque : qui transforme directement l'énergie solaire en énergie électrique.

1.1. Constitution d'une photopile voir schéma figure (1.1.)

On obtient une photopile en prenant une pastille de silicium dopée (P), sur laquelle on crée par diffusion une couche très mince (N) ($0,5 \mu\text{m}$) exposée à la lumière solaire.

On réalise ensuite sur les couches (N) et (P) des contacts **obliques** : nécessairement de faible résistance, en vue de réduire les chutes de tension, lors de fonctionnement de la photopile. On distingue deux types de cellules photovoltaïques :

a - les cellules carrées :

On les utilise surtout pour les engins spatiaux, car l'assemblage de telles cellules minimise la surface d'occupation du système de conversion photovoltaïque. On obtient alors le maximum d'énergie par unité de surface.

b - les cellules rondes :

Elles sont employées pour les besoins terrestres en énergie. Le prix de la matière semi-conductrice conditionne le prix de revient des photopiles. Ainsi les cellules rondes sont plus économiques que les cellules carrées, car les rondes sont obtenues directement après le découpage des barreaux cylindriques de silicium.

Il en résulte une perte beaucoup plus faible en matériau semi-conducteur, que lors de la réalisation de cellules carrées.

1.2. Fonctionnement d'une cellule solaire : voir figure (1.2.)

On utilise des cellules à effet photovoltaïque qui fonctionnent de la manière suivante :

L'énergie d'un faisceau lumineux incident dans un matériau semi-conducteur et plus particulièrement sur la couche dopée (N) est transmise aux électrons de valence qui pourront migrer dans le semi-conducteur sous forme de paires d'électrons trous, si cette énergie est supérieure au gap d'énergie de la bande interdite la longueur d'onde seuil λ_s , au delà de laquelle nous n'avons plus création de paires électron-trou correspond à $1,1 \mu\text{m}$ pour le silicium, soit une énergie de $1,12 \text{ eV}$.

Donc pour les valeurs de λ supérieures à λ_s , l'absorption est négligeable, alors que pour les valeurs de λ inférieures à λ_s elle augmente rapidement.

Dans la partie infra-rouge du spectre solaire (pour les λ supérieures à λ_s) le rayonnement correspondant sera dissipé sous forme thermique dans le métal du contact arrière de la cellule.

De même il y a dissipation sous forme thermique dans la masse du semi-conducteur due à l'énergie fournie par le rayonnement qui pourrait être supérieure à la largeur de la bande interdite.

1.3. Schéma équivalent :

Pour rendre compte du fonctionnement d'une cellule solaire, on doit considérer les différents phénomènes physiques qui y contribuent, et ceux qui limitent ses performances.

On représente la cellule solaire par les deux schémas (1.3) et (1.4) lors de son fonctionnement à l'obscurité et à l'éclairement. Le courant fourni à une charge par la cellule est la différence entre le photocourant et le courant de diode .

A l'obscurité : le flux de lumière est nul, donc le photocourant est nul alors l'expression du courant sera :

$$I = I_0 \exp \left(\frac{q (V - R_s I)}{nkt} - 1 \right) + \frac{V}{R_{sh}}$$

./.

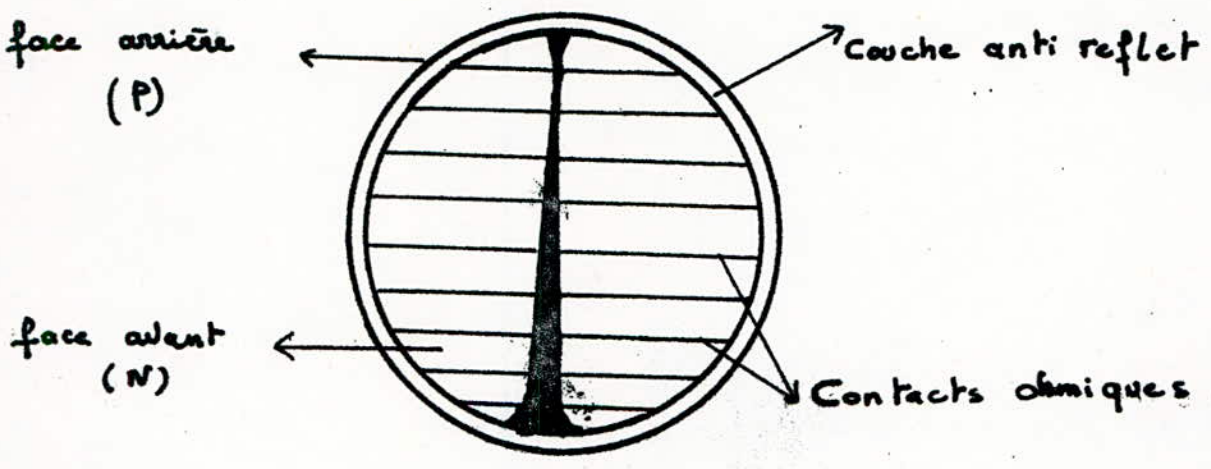


figure (1.1)

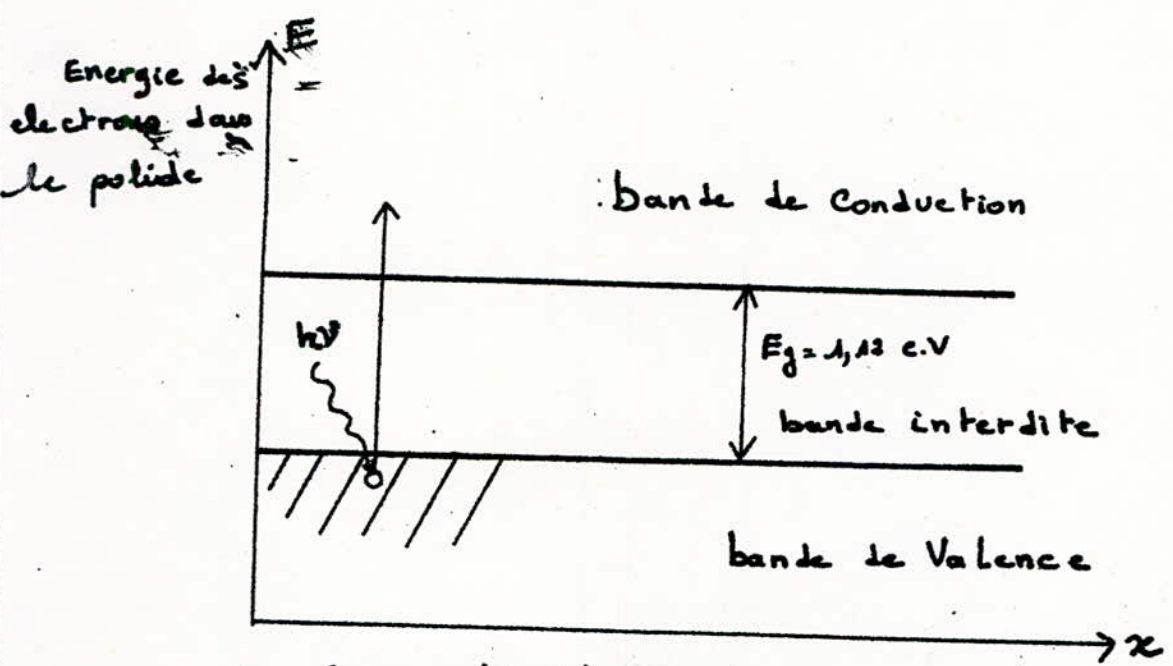


figure (1.2)

Schéma équivalent à l'obscurité

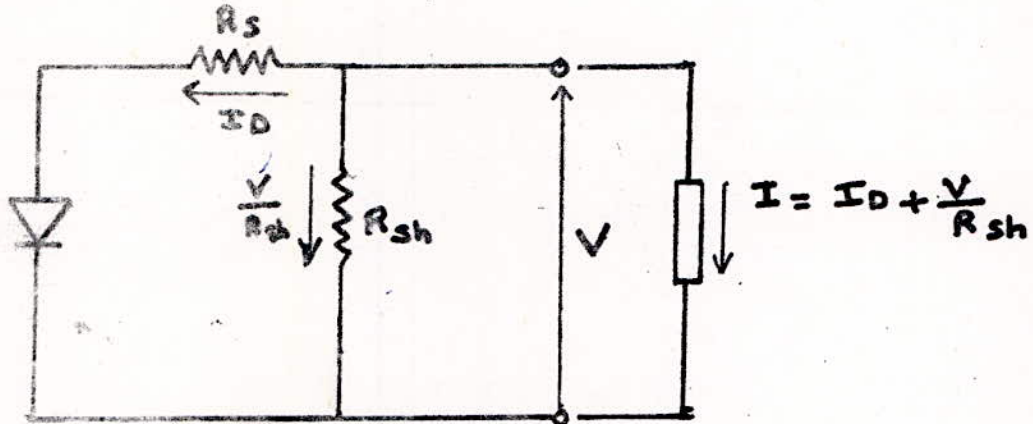


figure 1.3

Schéma équivalent à l'éclairement

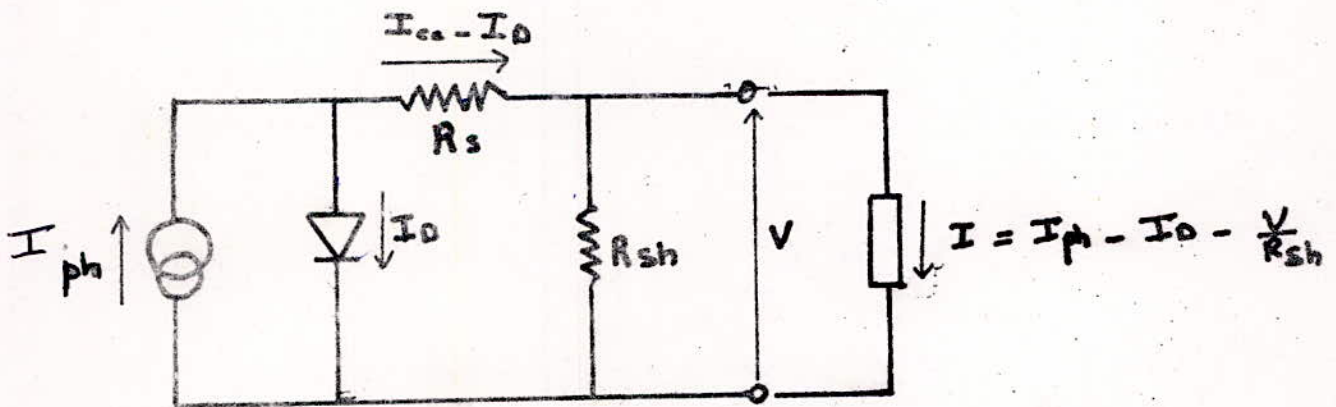


figure 1.4.

A l'éclairement : on a le même schéma équivalent avec l'introduction d'un générateur de courant (photocourant).

Et l'expression du courant sera alors :

$$I = I_{ph} - I_0 \exp \left(\frac{q (V + R_s I)}{n k T} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$$

avec I_0 = courant de saturation

K = constante de Boltzmann

T = température en degrés kelvin

n = facteur d'idéalité

1.4. Paramètres caractéristiques

1.4.a. Résistance série

Elle est due aux contacts des électrodes avec le semi-conducteur, et à la résistance interne de ce dernier.

Elle influe énormément sur le rendement, puisqu'elle est en série avec la charge aux bornes de la photopile. La puissance optimale de la cellule est aussi conditionnée par cette résistance, car la diminution du produit $I_m \cdot V_m$ modifie la caractéristique de la cellule.

Alors que la résistance série diminue avec l'éclairement et augmente avec la température, on penserait que l'on pourrait la réduire en augmentant la couche (N), or on diminuera ainsi la probabilité d'absorption des photons de lumière; on s'arrange donc pour avoir la couche (N) optimale.

On dispose des contacts sous forme de grilles en parallèle sur la face antérieure de la cellule pour diminuer cette résistance. Ainsi la cellule se ramène à un grand nombre de cellules en parallèle, ce qui diminue la résistance série équivalente; donc augmente la puissance optimale mais diminue le courant de court-circuit car la surface active a diminué.

./.

1.4. b. Résistance Shunt

Cette résistance est d'ue aux effets de surface de la cellule : s'il existe des fissures sur la surface, elle devient le siège de phénomènes physiques assimilables à une résistance au niveau de la jonction le phénomène est nuisible et cette résistance augmente lorsque la cellule travaille sous éclairnement.

1.4. b. Facteur d'idéalité

le courant qui traverse une diode au silicium est :

$$I_D = I_0 \left(\exp \frac{q (V - R_s I)}{KT} - 1 \right) + \frac{V}{R_{sh}}$$

on doit introduire un terme correctif appelé facteur d'idéalité et noté n pour rendre compte du courant de diode réel traversant la cellule - alors Is devient :

$$I_D = I_0 \left(\exp \frac{q (V - R_s I)}{nkt} - 1 \right) + \frac{V}{R_{sh}}$$

n dépend des interfaces et des propriétés physiques et technologiques de la cellule solaire.

1.5. Rendement de conversion

En négligeant les pertes, le rendement de conversion est donné par le rapport entre la puissance recueillie sous forme de paires électron-trou à la puissance totale des photons incidents.

$$R = \frac{\int_{E_g}^{\infty} \frac{(dE)}{(du)} du}{\int_0^{\infty} U \frac{(dE)}{(du)} du}$$

et comme le transfert d'énergie lumineuse en énergie électrique est fortement lié à la bande interdite E_g du semi-conducteur, le rendement est limité par différentes pertes d'énergie électrique et thermique lesquelles sont :

./.

- Absorption incomplète des photons
- Pertes d'énergie lorsque E incidente est plus importante que E_g
- Réflexion à la surface
- Collectage des porteurs
- Facteur de tension
- facteur de forme
- Résistance série.

1.6. Caractéristiques d'une cellule solaire

1.6.a. Ordre de grandeur des paramètres

- D'après les courbes (a) et (b) de la figure (1.5.) on voit que lorsque la résistance Shunt croit de 100μ jusqu'à l'infini, la caractéristique (I - V) de la cellule reste inchangée; par contre lorsque la résistance série croit de 0 à 5μ , la caractéristique (I - V) de la cellule change brutalement.

On déduit donc que l'effet de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule est important; sa valeur est de quelques centaines de milliohms.

La valeur de la résistance Shunt étant de quelques dizaines de mégohms, son effet est négligeable (secondaire).

- En ce qui concerne le facteur d'idéalité, dans le cas de la jonction P-N au silicium, il vaut (1) pour les faibles débits et (2) pour les forts débits de courant.

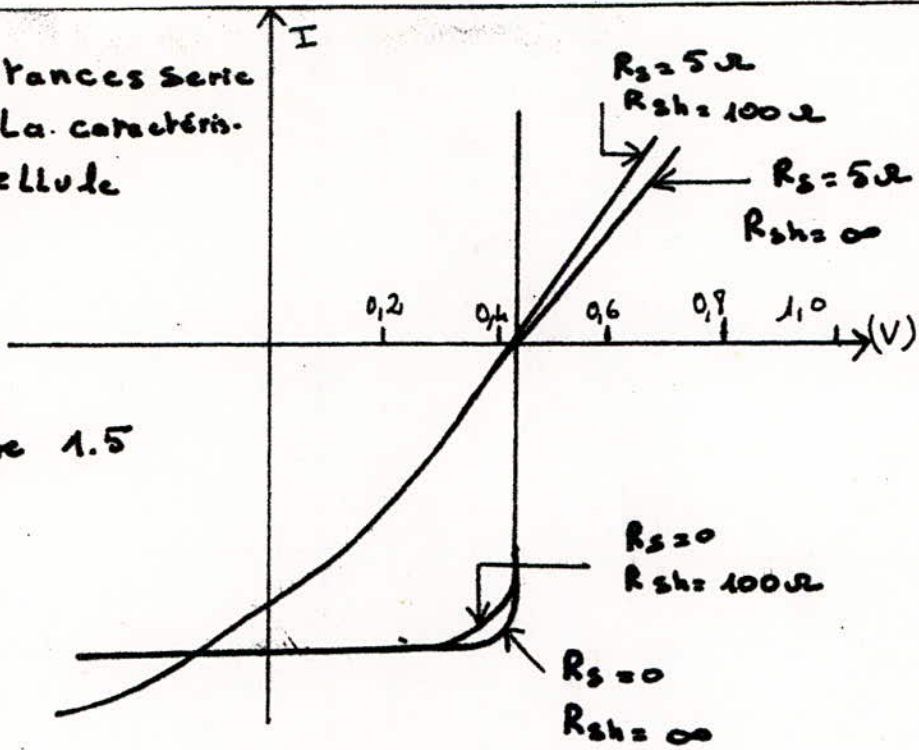
On peut ainsi simplifier les formules énoncées auparavant en posant $\frac{V}{R_{sh}} = 0$.

1.6.b. Description des manipulations

Les manipulations consistent à tracer les caractéristiques d'une cellule BP X 46 à l'obscurité et à l'éclairement, et ce à une température et un flux de lumière constants.

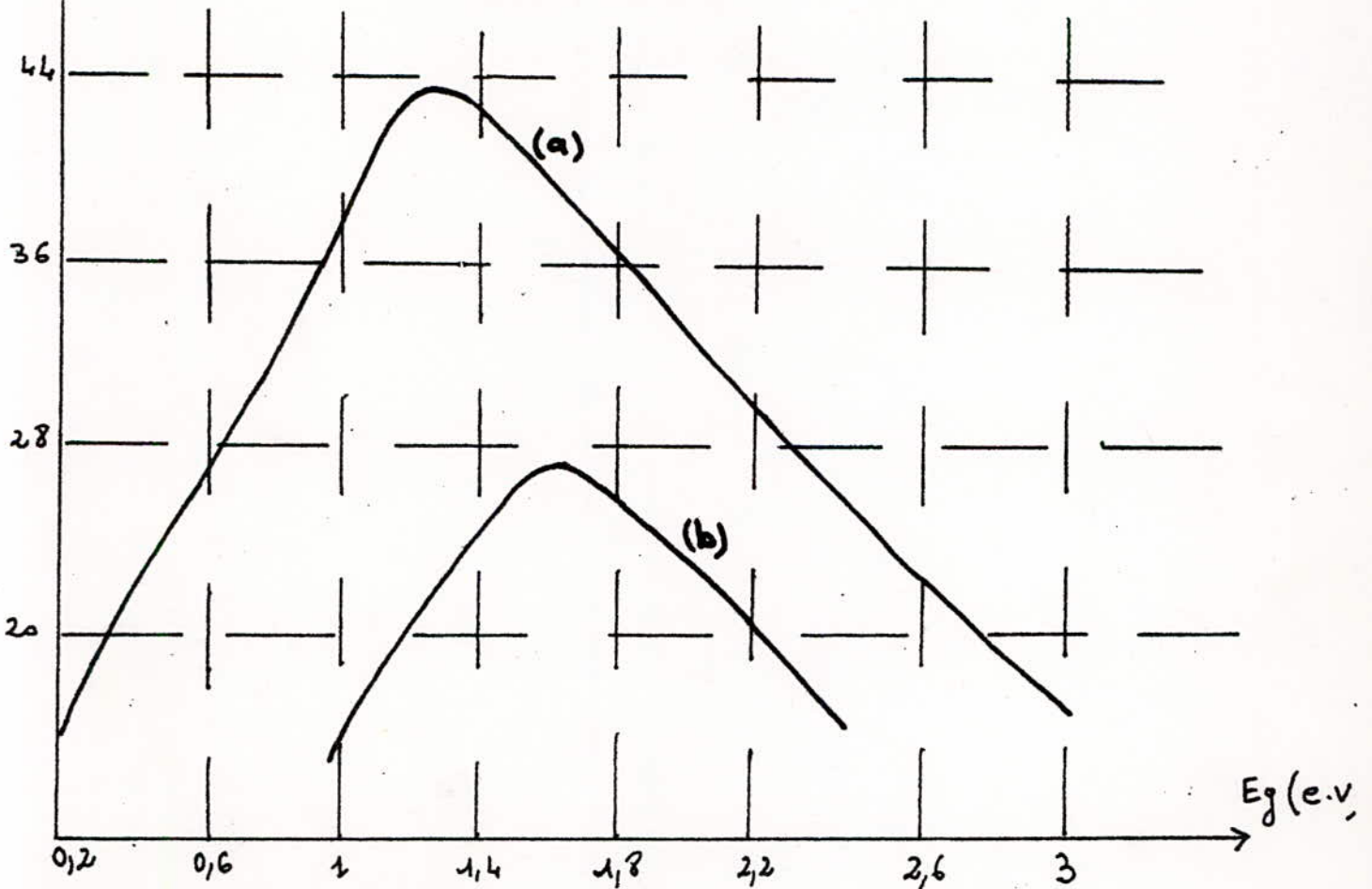
Effet des résistances Série et Shunt sur la caractéristique d'une cellule Solaire.

figure 1.5



Rendement (R) en fonction du gap d'énergie E_g

figure (1.6)



- a) rendement Limite
- b) rendement thermique cas d'une jonction PN

Le pyréliomètre est constitué par une cellule BP X 46 carrée étalonnée.

L'étalonnage a été fait de la manière suivante :

on mesure le courant de court-circuit d'un panneau de type "ARCO" à l'aide d'un ampèremètre, et on mesure sous les mêmes conditions d'éclairement et de température le courant de la cellule étalon sur un milliampèremètre.

Le panneau ARCO est supposé neuf et garanti, donc peut être pris comme étalon. A partir du courant de court-circuit du panneau ARCO on détermine l'éclairement, qui correspond sur le milliampèremètre à n divisions. On peut ainsi à partir de ce milliampèremètre déterminer la valeur de l'éclairement par la relation suivante :

n divisions correspondent à E

n' divisions correspondent à :

$$E' = \frac{n'}{n} E$$

on pose $\frac{E}{n} = k$ donc $E' = k \cdot n'$

pour notre manipulation on a eu :

$$K = 93,5 \quad \text{W/m}^2$$

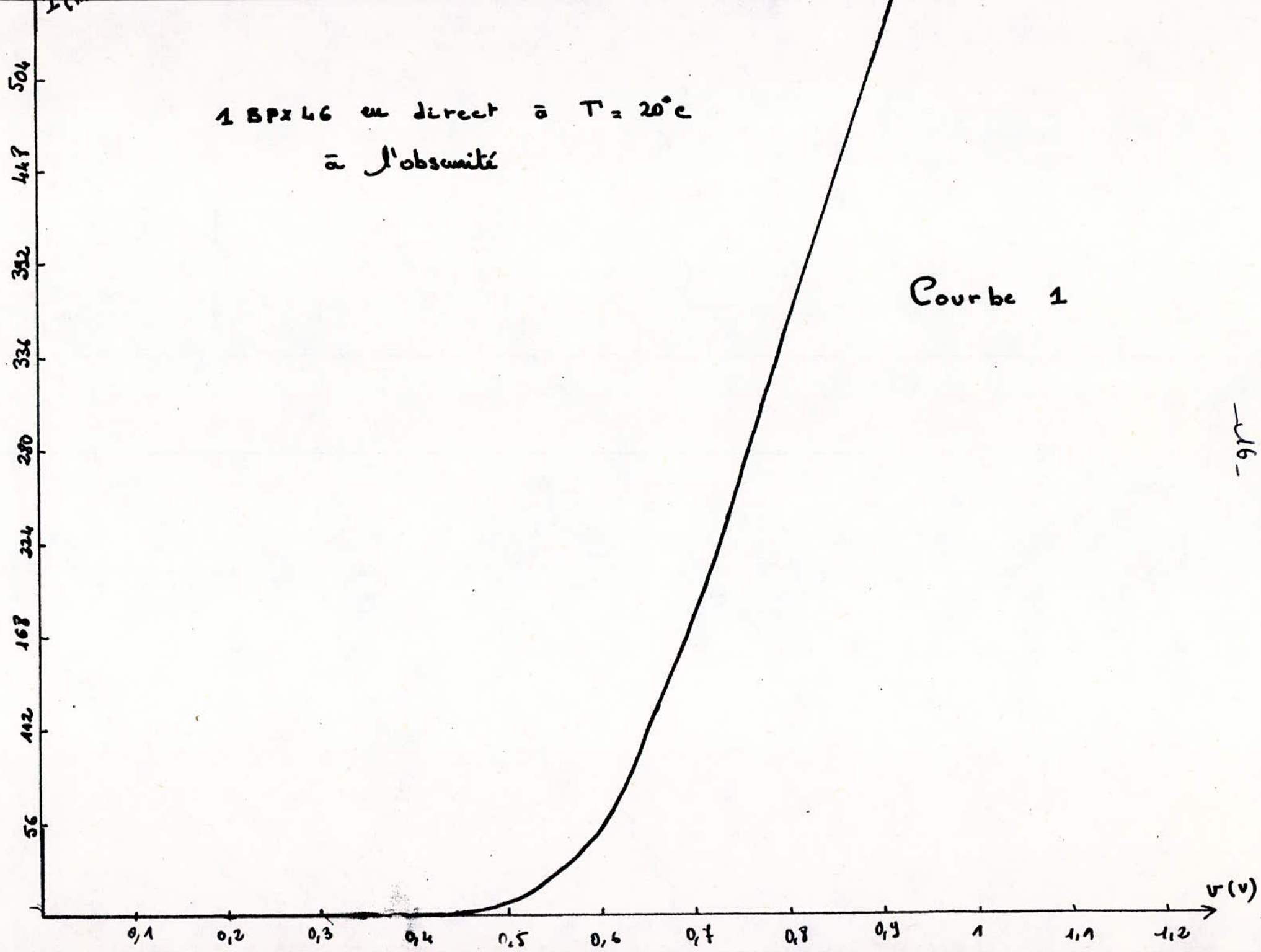
Le montage utilisé pour le relevé des caractéristiques est représenté à la figure (1.7.)

On trace la caractéristique : $I = f(V)$ de la cellule BP X 46 à l'obscurité et à l'éclairement.

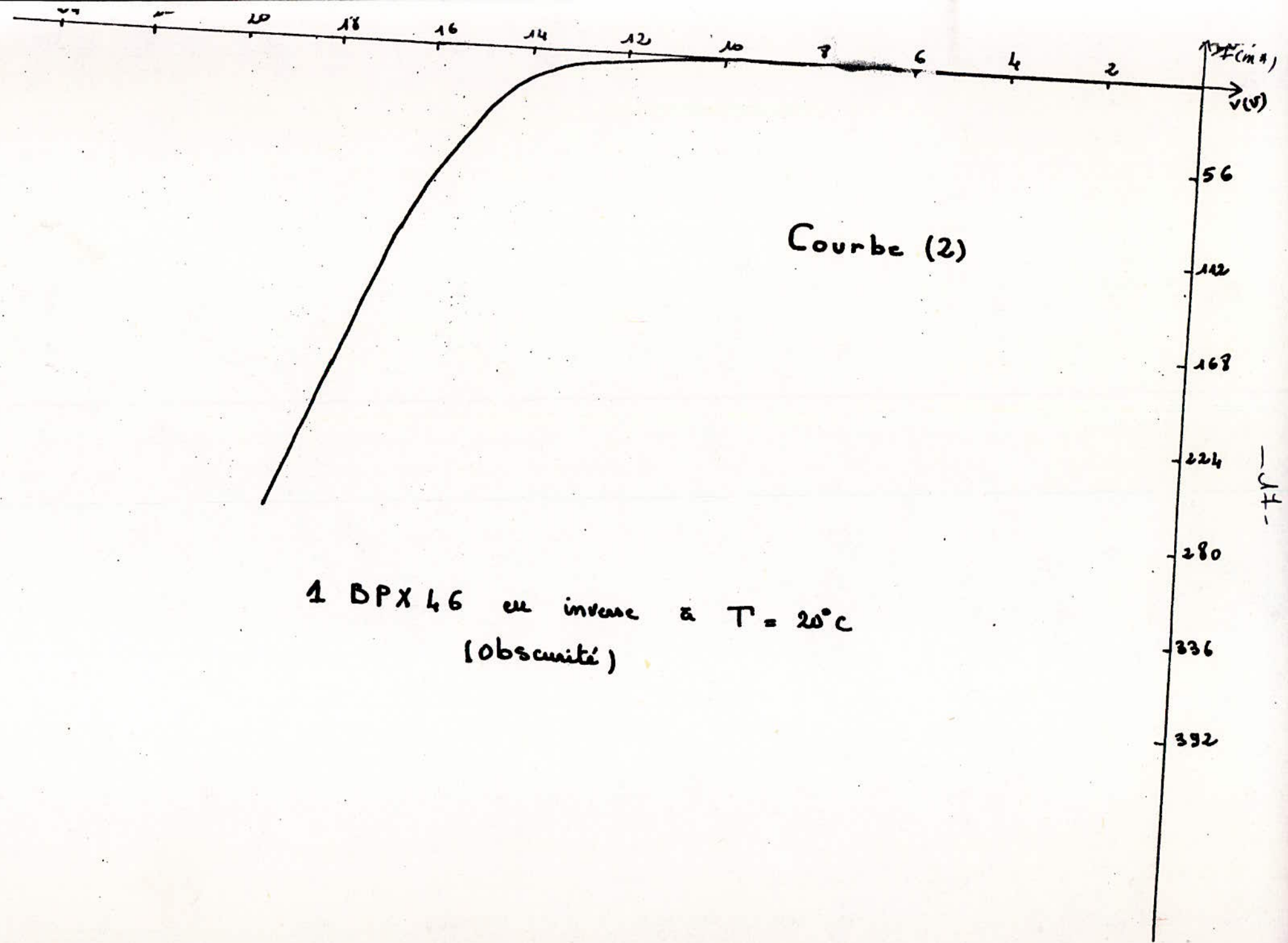
- Obscurité : on enferme la cellule dans une boîte, on enregistre sa caractéristique en direct et en inverse - représentées par les courbes (1) et (2).

- Eclairement : On met la cellule dans un support en plexiglas recouvert d'une plaque de verre pour la protéger, et on l'expose à la lumière solaire. On enregistre sa caractéristique en direct représentée par la courbe (3).

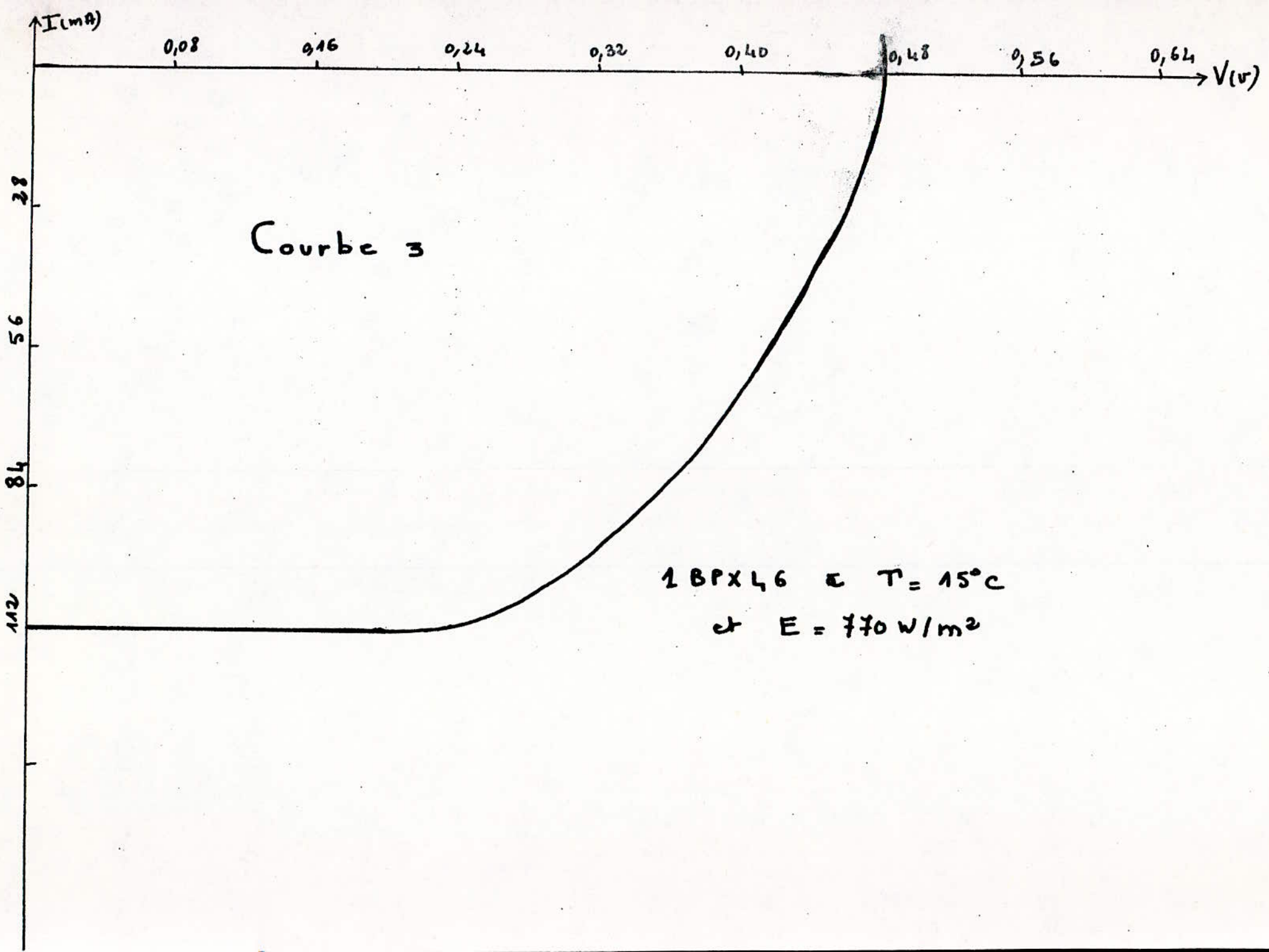
./.



-46-



1 BPX 46 en inverse à $T = 20^{\circ}C$
 (obscurité)



-87-

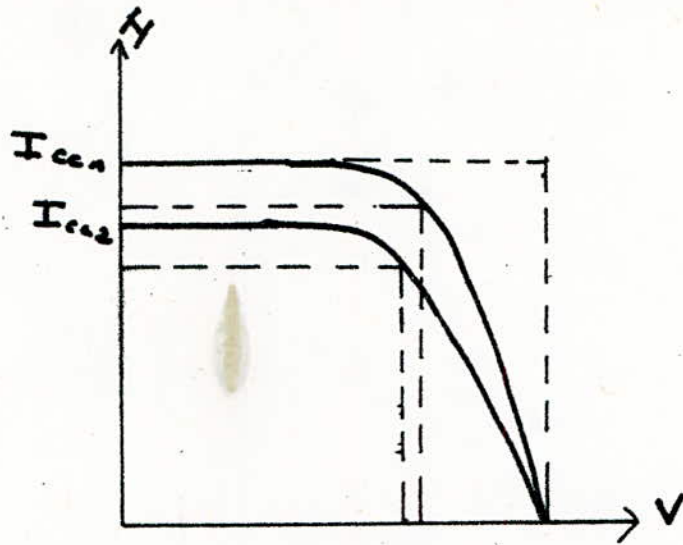


figure (1.8)

Alimentation Stabilisée

Amperemètre

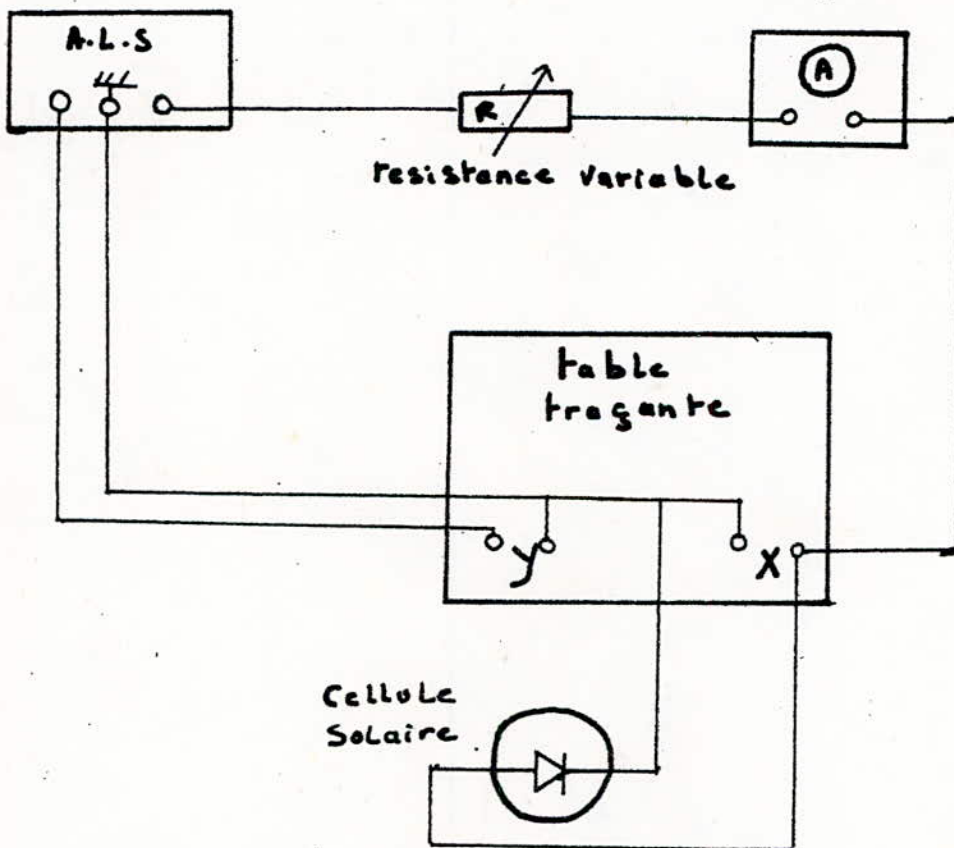


figure (1.7)

1.6.C. Interprétation des résultats

A l'obscurité la cellule se comporte comme une diode ce qui était prévisible, car en absence de lumière la jonction P-N est traversée par le courant de diode :

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

en inverse on remarque un effet d'avalanche à partir de $V_{in} = -12V$ à l'éclairement l'effet photovoltaïque a lieu et le courant de la cellule est régit par la loi :

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

pour la cellule BP X 46 utilisé les caractéristiques sont :

$$\begin{aligned} I_{cc} &= 112 \text{ mA} \\ V_{cc} &= 0,43 \text{ V} \\ I_m &= 93,3 \text{ mA} \quad \text{à } T = 15^\circ \text{ c} \\ V_m &= 0,3 \text{ V} \end{aligned}$$

le courant maximal et la tension maximale correspondent à la puissance maximale P_m que peut délivrer une cellule.

1.7. Association de cellules solaires

La puissance délivrée par une seule cellule solaire est de quelques centaines de milliwatts. Pour obtenir de fortes puissances, il est nécessaire d'associer un grand nombre de cellules, cette association ne doit pas affecter le point de fonctionnement.

1.7.a. Association série

Pour l'association série de cellules élémentaires, la tension totale obtenue est la somme des tensions unitaires V_m , et le courant prend pratiquement la valeur la plus basse des courants unitaires I_m donc c'est la photopile ayant la plus grande résis-

tance série qui imposera la valeur du courant débité.
On doit grouper en série les cellules ayant les valeurs de I_m voisines pour qu'elles conservent le point de fonctionnement optimal.

1.7.b. Association parallèle

Quand on associe des cellules en parallèle, la tension est relativement la même que celle de la cellule délivrant la plus faible tension V_m , et le courant est la somme des courants unitaires. Pour éviter que les cellules ayant de fortes tensions ne débitent dans les autres, on choisit celles dont les valeurs de V_m sont voisines.

1.7.C. Association série-parallèle (parallèle-série)

On associe en série-parallèle (ou parallèle-série) les cellules ayant un même point de fonctionnement optimal (I_m, V_m).

1.8. Comparaison des cellules BP X 47 A et BP X 46

Le critère de comparaison que l'on considère est basé sur deux paramètres caractérisant la cellule solaire:

- la puissance convertie et le facteur de forme
- la puissance convertie : $P_c = \eta_c E.S.$

On considère η_c (rendement de la cellule) le même pour les deux cellules : $\eta_1 = \eta_2 = \eta_c$

$$\begin{array}{l}
 P_{c1} = \eta_c \cdot E \cdot S_1 \\
 P_{c2} = \eta_c \cdot E \cdot S_2
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
) \\
) \\
)
 \end{array} \right\} \longrightarrow \frac{P_{c1}}{P_{c2}} = \frac{S_1}{S_2}$$

donc
$$P_2 = P_1 \cdot \frac{S_2}{S_1}$$

On note par P_2 la puissance de la BPX46 A et P_{c1} celle de la BP X 47A .

./.

Soit par définition le facteur de forme :

$$F.F. = \frac{I_{cc} \cdot V_{co}}{P \text{ optimale}}$$

en considérant les facteurs de forme pratiquement égaux pour les 2 cellules on aura la relation (voir figure 1.8)

$$\frac{I_{cc1} \cdot V_{co1}}{P1} = \frac{I_{cc2} \cdot V_{co2}}{P2}$$

ayant les mêmes jonctions on a : $V_{co1} = V_{co2}$ alors

$$\frac{I_{cc1}}{P1} = \frac{I_{cc2}}{P2} \quad \text{donc} \quad \frac{P1}{P2} = \frac{I_{cc1}}{I_{cc2}}$$

$$I_{cc2} = I_{cc1} \cdot \frac{P2}{P1}$$

soit finalement la relation générale :

$$\left(\frac{I_{cc2}}{I_{cc1}} = \frac{P2}{P1} = \frac{S2}{S1} \right)$$

On note que la cellule BP X 46 est identique à la BPx47 A , mais son diamètre est de 41 mm alors que celui de la BP X 47 est de 57 mm donc elles ont des surfaces actives différentes.

2. Panneaux solaires

Les panneaux solaires constitués de cellules élémentaires montées en série. Ces cellules sont choisies par le constructeur de façon à ce que leurs caractéristiques soient pratiquement identiques (notamment en courant), afin d'éviter les problèmes d'emballement thermique et de destruction de cellules; dûs à la différence des caractéristiques.

Dans les manipulations nous utilisons le panneau BP X 47 A de RTC.

2.1. Description du panneau solaire BPX47A

Ce panneau comporte 34 cellules au silicium, (du type BPX46) associées en série, ayant 57 mm de diamètre chacune . On dispose 17 grilles parallèles sur la face active de chaque cellule, qui servent à réduire la résistance série de la photopile.

Les cellules sont recouvertes d'une couche anti-reflet pour diminuer au maximum les pertes par réflexion, cette couche doit être mince et transparente aux radiations utiles à l'effet photovoltaïque.

Les connections entre les cellules sont faites par soudure automatique. Cette méthode supprime le circuit imprimé et diminue le temps et le coût de fabrication. Les cellules et les connections sont alors moulées dans une résine qui est une matière très mauvaise conductrice de courant et de la chaleur; l'ensemble est recouvert de deux plaques de verre (sur les deux faces) qui vont améliorer la résistance aux agents atmosphériques et aux variations de température, pour un éclairement de 1 KW/M2 la cellule fonctionne à une température de jonction T_j telle que : $T_j - T_{amb} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ et pour $T_{amb} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ on a $T_j = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cette haute température diminue légèrement le rendement, mais ne risque pas de détériorer la cellule solaire.

L'ensemble est encadré d'une couche protectrice en caoutchouc, puis doublé d'une seconde ceinture en aluminium anodisé.

Le poids total est de 2,4 Kg; et les dimensions sont :

$L = 468 \text{ mm}$, $l = 365 \text{ mm}$, $e = 15 \text{ mm}$.

2.2. Fonctionnement

Le principe de fonctionnement du panneau solaire est similaire à celui d'une cellule le constituant. Il y a juste les valeurs qui varient.

./.

I (mA)

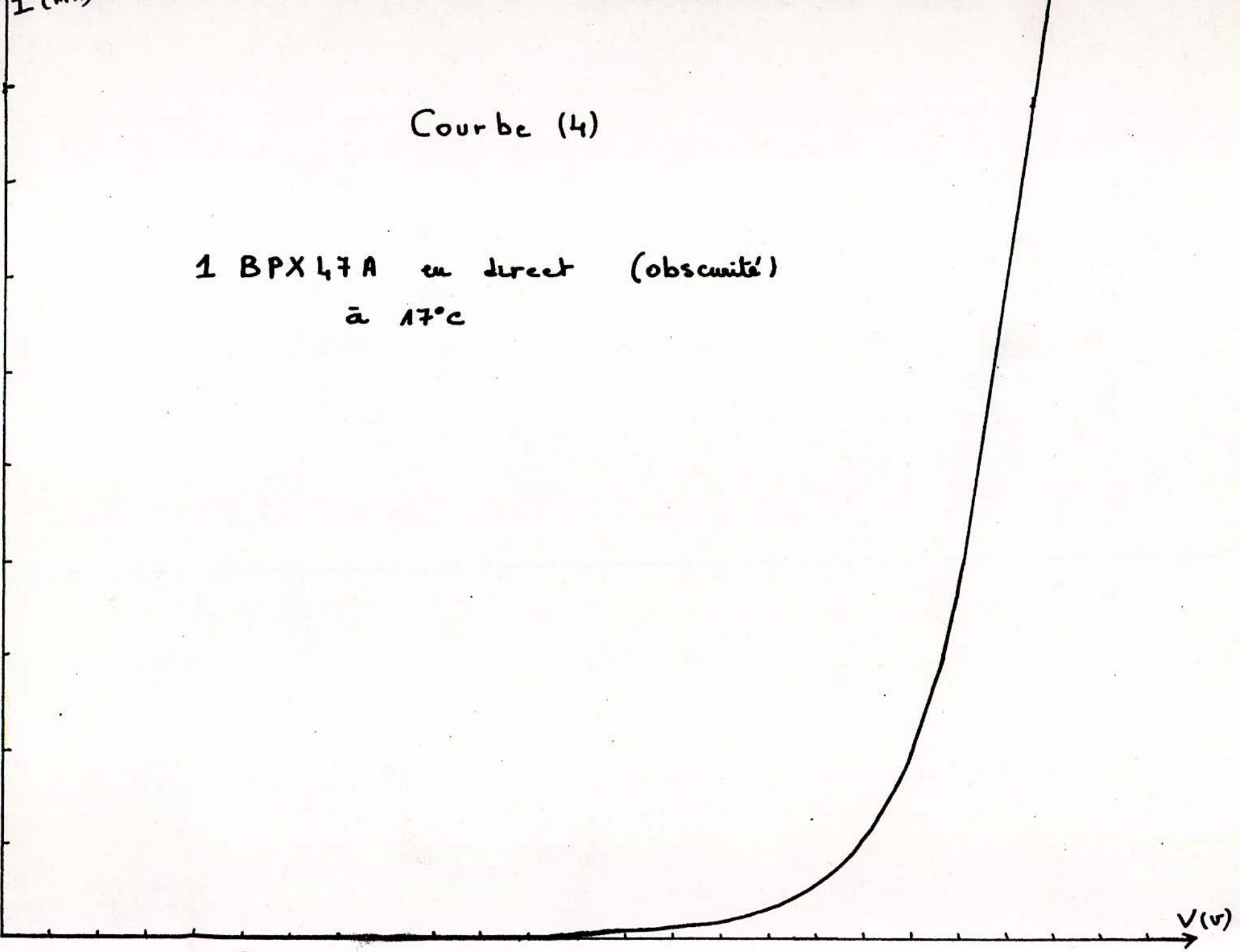
- 24 -

Courbe (4)

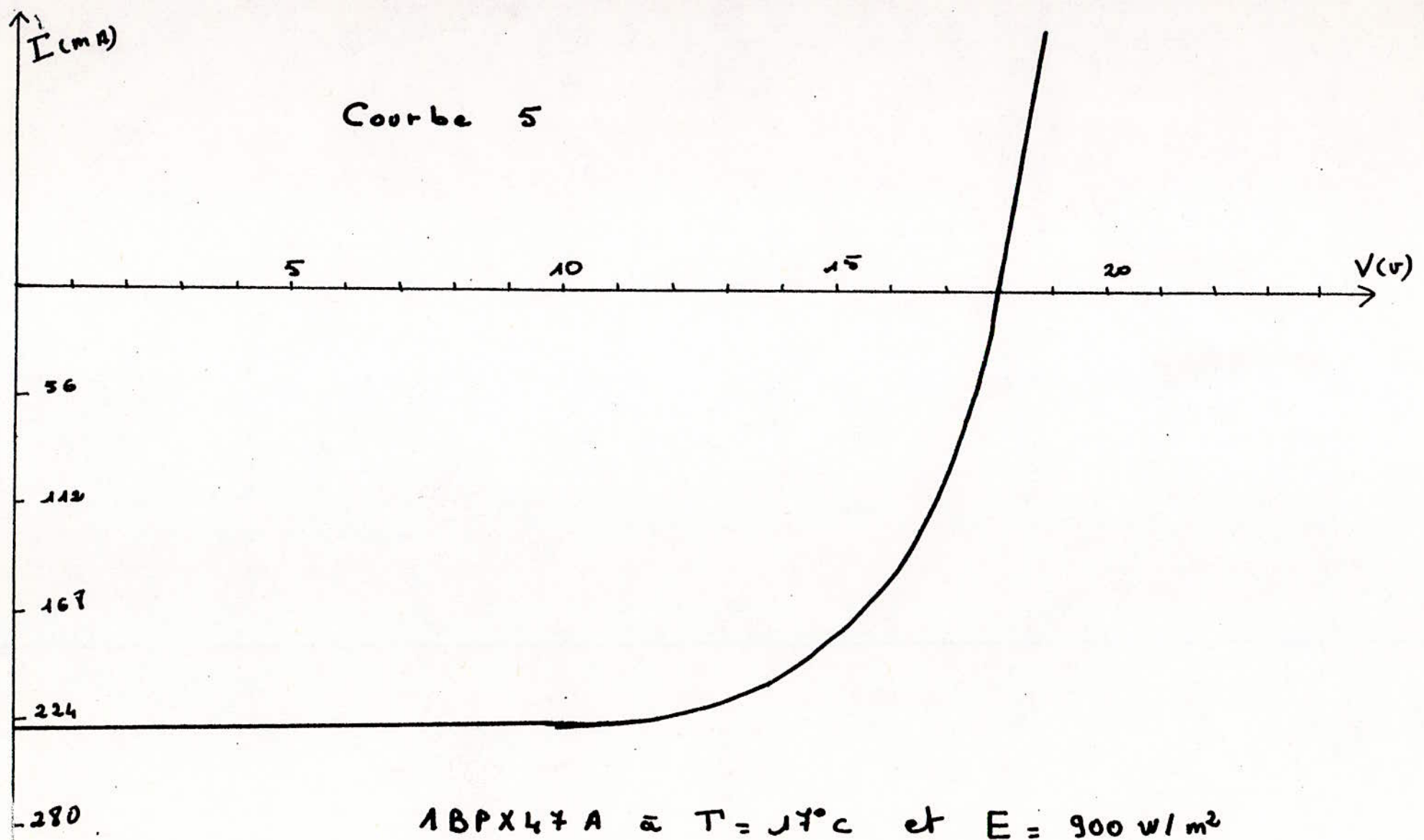
1 BPX 47 A en direct (obscurité)
à 17°C

504
448
392
336
280
224
168
112
56

V (V)



-25-



2.3.a. - Manipulation

On utilise le montage de la figure (1.7) et on remplace la cellule solaire par le panneau BPX47A.

La manipulation est faite suivant le même principe (éclairage, température) de mesure.

Obscurité : On enferme le panneau dans un carton que l'on met à l'obscurité et on enregistre sa caractéristique représentée par la courbe (4).

Eclairage : On expose le panneau à la lumière solaire et on enregistre sa caractéristique (fig.5).

2.3.b - Interprétation des résultats

Le panneau a le même comportement que la cellule élémentaire, à l'obscurité et à l'éclairage; ce qui était prévisible.

Les caractéristiques du BPX47A utilisé sont :

$$I_{cc} = 230 \text{ mA}$$

$$V_{oc} = 18 \text{ V}$$

$$I_m = 202 \text{ mA} \quad \text{à } T = 17^\circ \text{ C}$$

$$V_m = 14 \text{ V} \quad \text{et } E = 900 \text{ W/m}^2$$

Nous remarquons que ces caractéristiques obtenues expérimentalement sont assez différentes de celles données par le constructeur. Cela est dû à la température qui est assez faible, de même la résistance que nous avons mis en série dans le circuit du montage utilisé pour limiter le courant fait que le courant de court-circuit enregistré par la table n'est pas le courant de court circuit réel, notons le fait que le vieillissement du panneau change également les caractéristiques.

CHAPITRE II

1. Problèmes posés par l'association de modules solaires

1.1. Différents types d'association

Les installations photovoltaïques de très hautes tensions existent actuellement, montées en grands nombres de modules séries ou parallèles.

On distingue 2 types d'association :

1.1.a. Association parallèle :

Les panneaux connectés en parallèle débitent un fort courant, qui est la somme des courants élémentaires de chaque panneau.

1.1.b. Association série :

Les panneaux connectés en série présentent une forte tension due à la somme des tensions de chaque panneau.

On peut relier les panneaux par deux autres associations qui **dérivent** des deux principales :

* Association série-parallèle: voir figure (2.1.)

On groupe n panneaux en série, et ensuite m branches (constituées de ces n panneaux en série) en parallèle.

* Association parallèle-série : voir figure (2.2.)

m panneaux sont associés en parallèle, et on groupe n de ces modules en série.

Nous notons que pour chaque type d'association, il existe des risques de défaillance. Même lorsque les panneaux sont de même type, il peut y avoir une différence des caractéristiques électriques due à un ombrage d'une partie des panneaux ou au vieillissement (le panneau ne devient plus performant).

./.

figure (2.1)

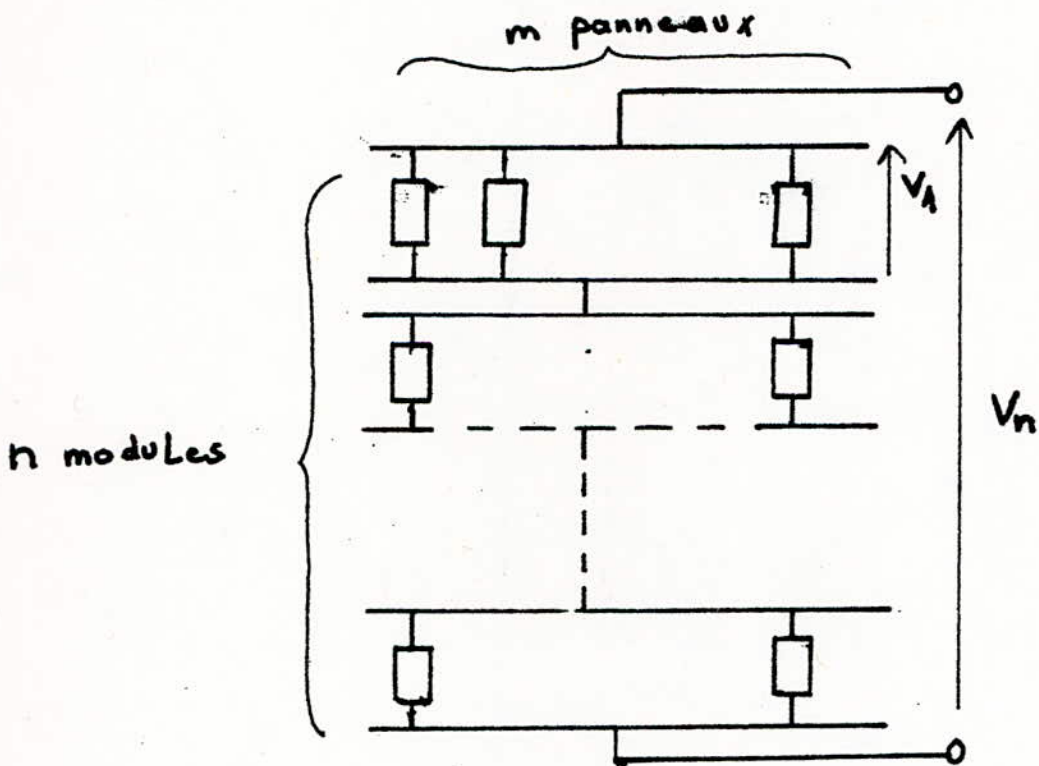
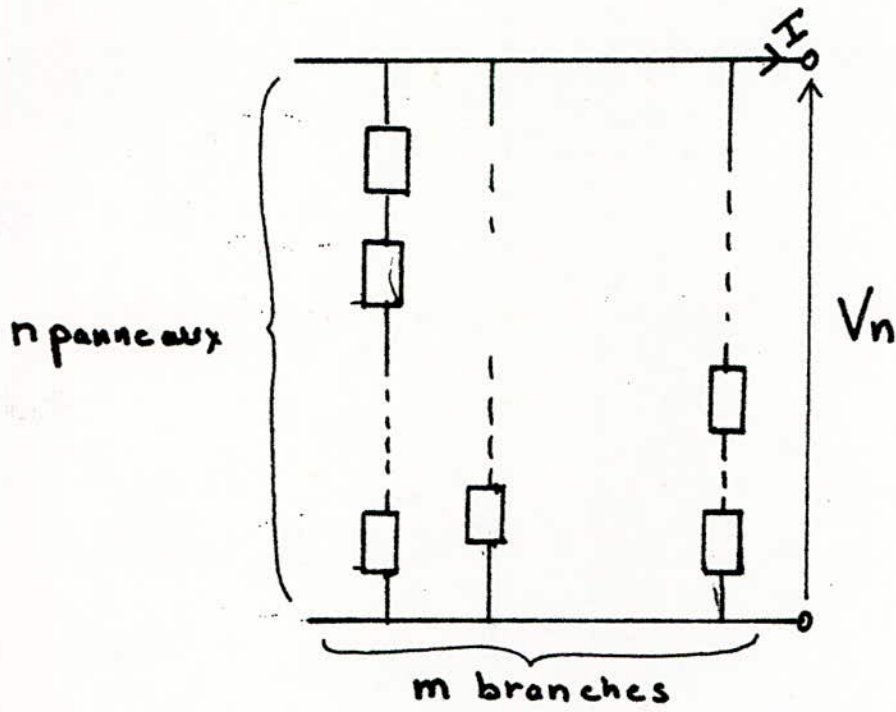


figure (2.2)

1.2. Association de panneaux identiques

1.2.a. Association série

- Mise en série de 2 panneaux identiques :

Considérons le montage de deux ^{panneaux} branchés en série et fermés sur une charge R.

Le courant est le même pour les panneaux, et c'est la tension aux bornes des panneaux que l'on somme qui va déterminer la courbe caractéristique de l'ensemble.

- La figure (2.3.) représente le cas idéal pour lequel en circuit ouvert, le courant total I_t serait nul, alors que la tension totale est égale au double de celle de l'un des panneaux.

$$I_t = 0 \quad V_{co} = V_t = 2 V_{co_{1,2}}$$

Quand le montage est en court circuit, le courant total I_{ta} est le même dans chaque panneau en étant maximal $I_{ta} = I_{ph}$, la tension aux bornes des panneaux est nulle.

On remarque que les deux panneaux travaillent toujours en générateurs. au point (b) la puissance est maximale, le courant total est I_{mb} (le même pour les 2 panneaux) et la tension V_{mb} vaut le double de V_{t_1} ou V_{b2} car $V_{t_1} = V_{b2}$

- Cas de n panneaux identiques :

Le raisonnement reste le même. Le courant total I sera égal au courant d'un panneau, et la tension totale vaut n fois celle d'un panneau comme le montre la figure (2.4.).

./.

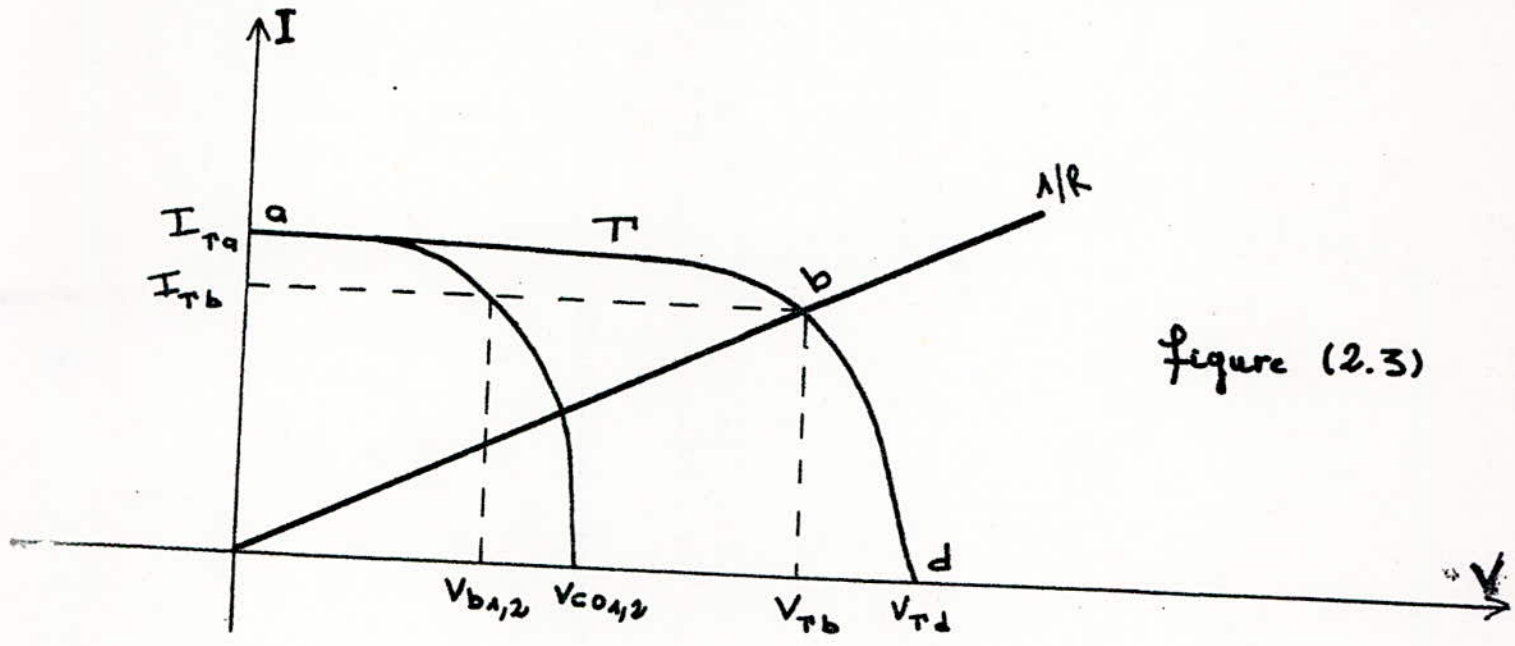


figure (2.3)

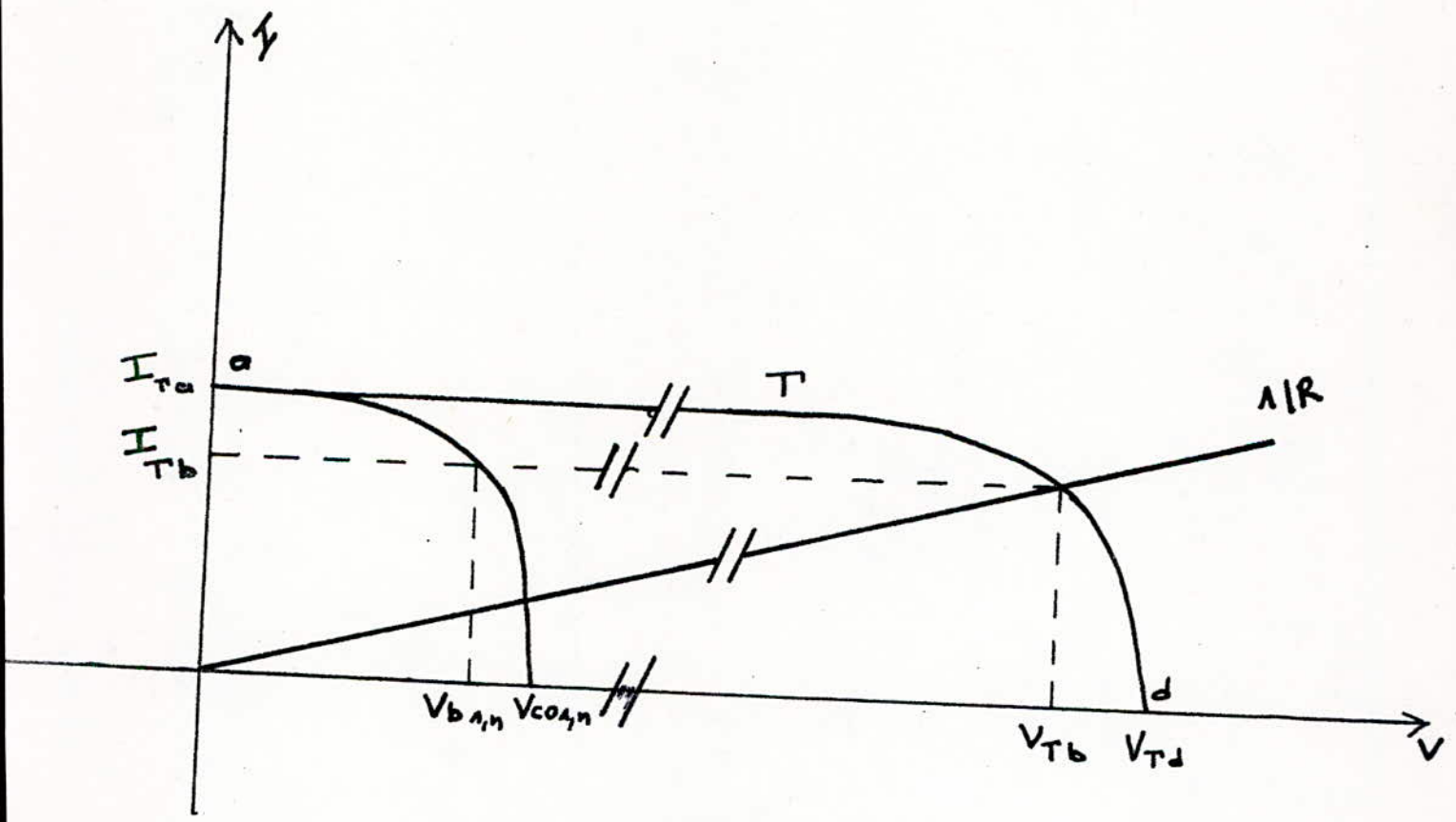


figure (2.4)

1.2.b. Association parallèle

* Mise en parallèle de deux panneaux identiques

Soit le cas de deux panneaux branchés en parallèle et fermés sur une charge R .

La tension est la même aux bornes de chaque panneau et c'est le courant débité que l'on somme qui va déterminer la caractéristique de l'ensemble.

La figure (2.5) représente le cas idéal pour lequel en circuit ouvert, le courant total I_{ζ} serait nul, et la tension totale celle d'un panneau.

En court circuit, le courant total $I_{\zeta a}$ est le double du courant d'un panneau I_{ph} . Soit $I_{\zeta a} = 2 I_{ph}$, et la tension est nulle.

Aucun panneau ne peut fonctionner en récepteur, les panneaux étant identiques.

Au point (b) la puissance est maximale, le courant total est $I_{\zeta b}$ et la tension $V_{\zeta b}$.

- Cas de n panneaux identiques

Le raisonnement est le même. Le courant total va être n fois celui de l'un des n panneaux, et la tension est la même aux bornes des n panneaux (figure 2.6);

./.

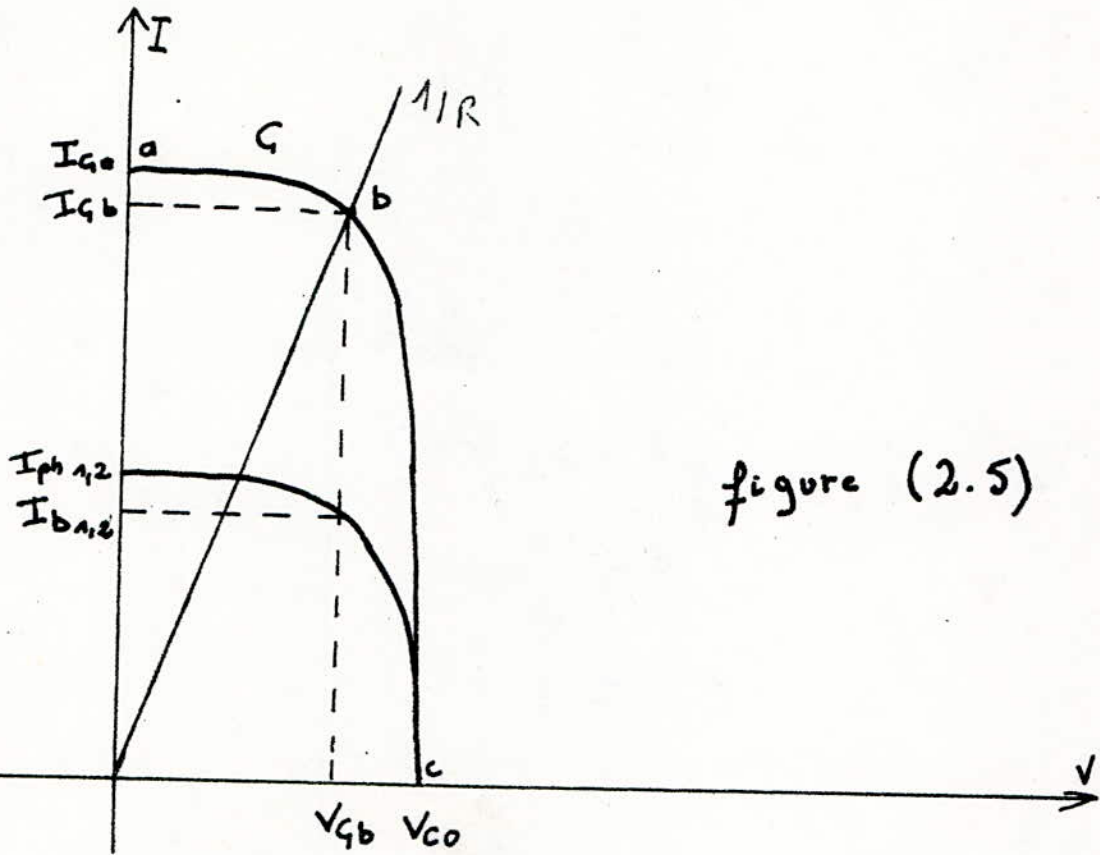


figure (2.5)

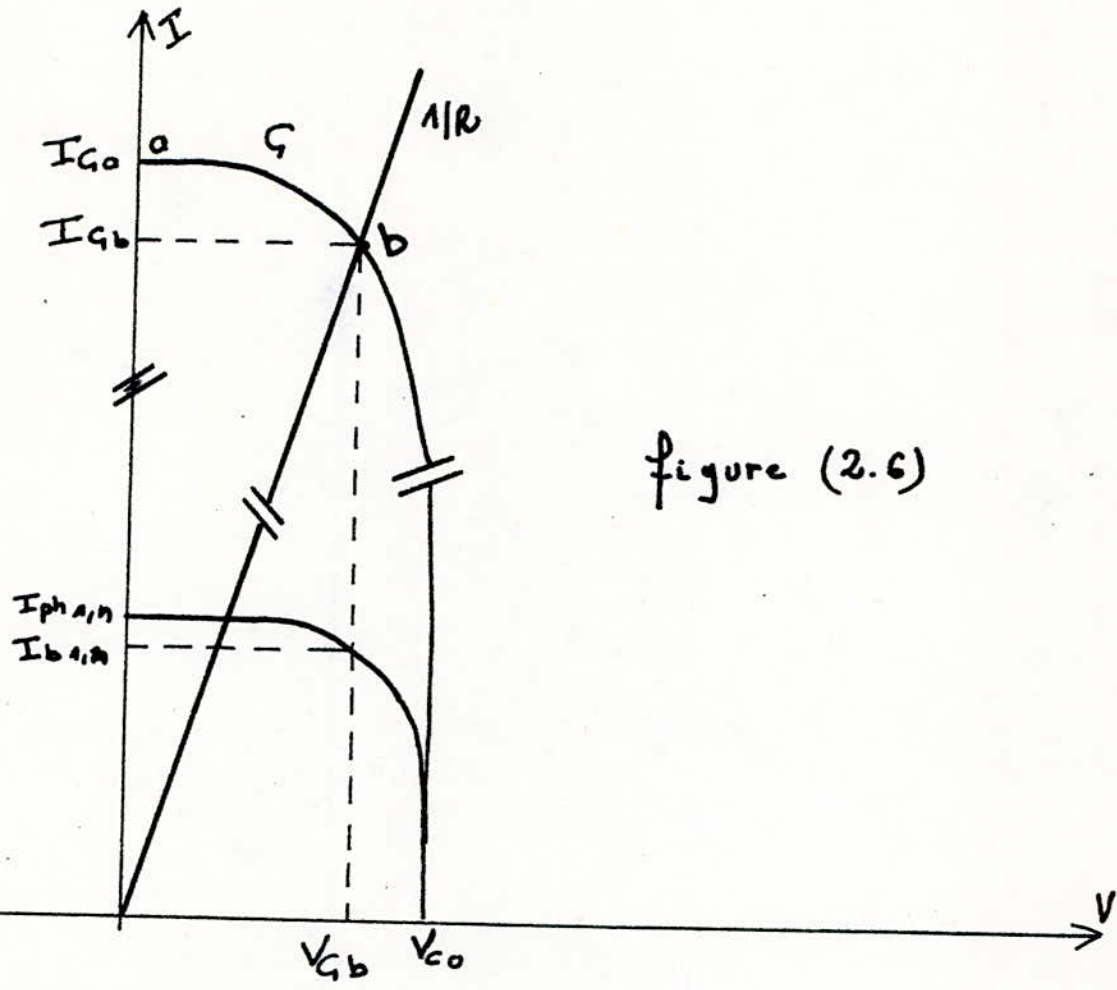


figure (2.6)

1.3.a. Manipulation

La manipulation consiste à tracer les caractéristiques de panneaux BPX47A, en série et en parallèle, dans le cas où ils sont éclairés et à l'obscurité. On utilise toujours le même montage, et on enregistre les courbes (2.7) et (2.8) représentant la mise en série des panneaux, ainsi que les courbes (2.9), (2.10) représentant leur mise en parallèle.

1.3.b. Interprétation des résultats :

On vérifie bien que pour l'association série, le courant de l'ensemble est celui de l'un des panneaux, et que la tension de l'ensemble est pratiquement le double de la tension de panneau.

Pour la mise en parallèle, la tension de l'ensemble est sensiblement celle d'un panneau et le courant la somme des courants.

Nous remarquons que les deux BPX47A utilisés ne sont pas identiques, car ils sont anciens et ne sont plus très performants. Néanmoins ils ont des caractéristiques convenables (utilisables).

1.4. Association de panneaux non identiques

Les groupements de panneaux solaires accroissent la puissance générée, mais beaucoup de problèmes entrent en jeu et créent des déséquilibres qui sont dûs à :

- a - Ombrage partiel de quelques modules ou leur endommagement.
- b- Dispersion des caractéristiques de panneaux d'origine à la fabrication.
- c - Quelques cellules peuvent être en court-circuit, ou en circuit ouvert.

Dans les 3 cas quelques cellules auront à travailler plus ou moins en réceptrices.

604
441
392
336
270
224
168
142
56

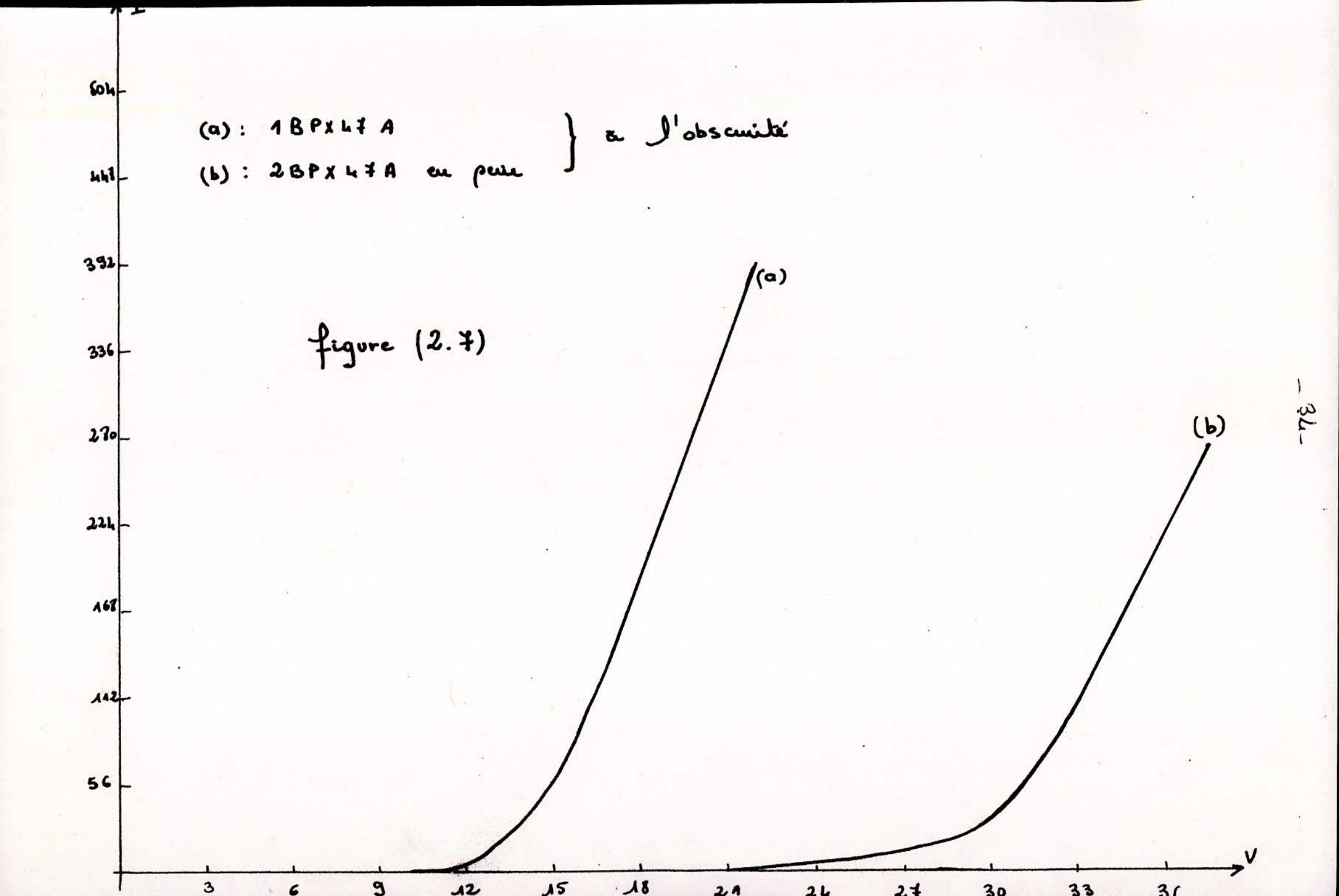
(a) : 1BPx47A
(b) : 2BPx47A en pure } a l'obscurité

figure (2.7)

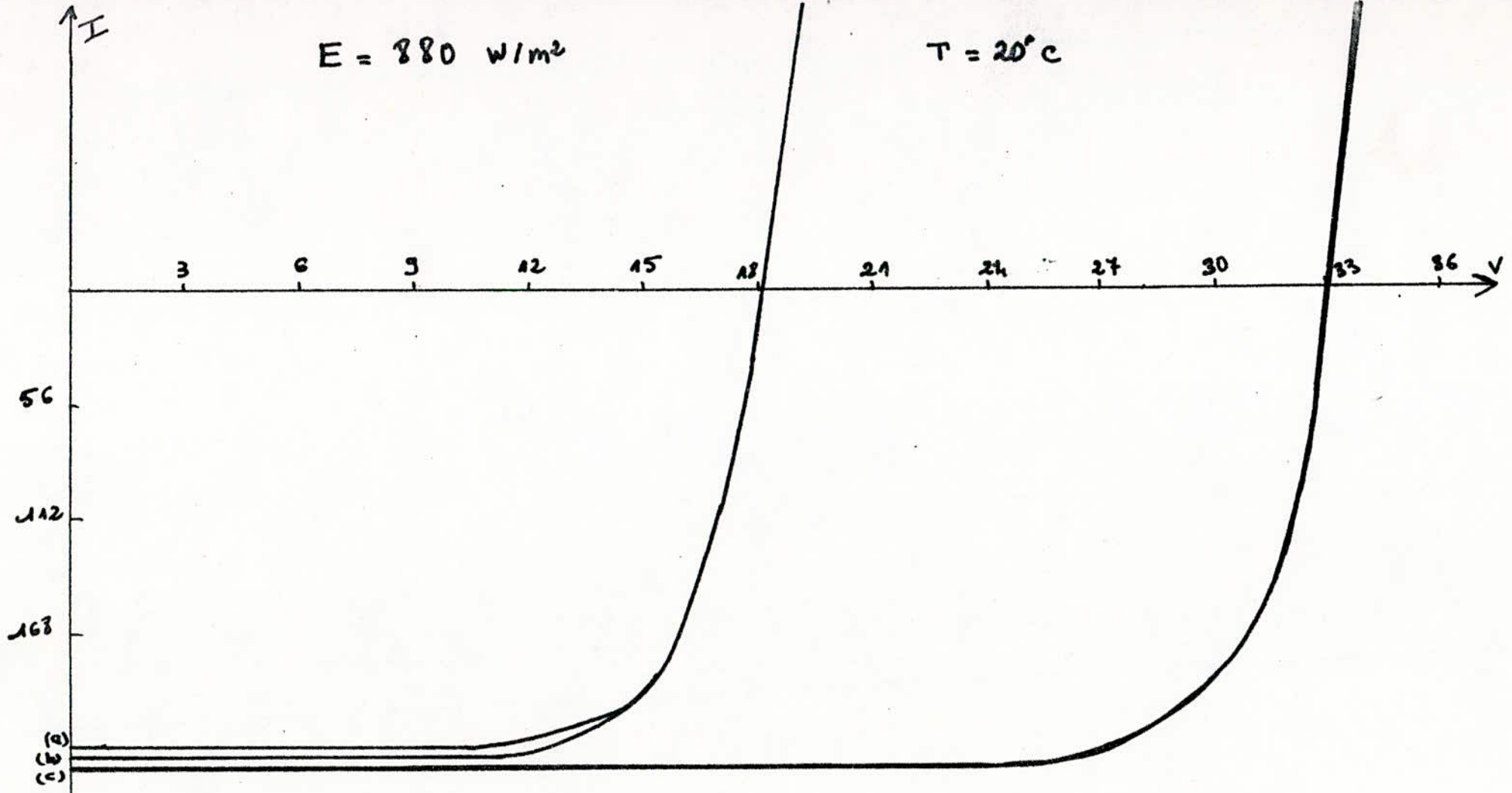
3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36

(b)

(a)



- 35 -



280
336

- (a): 1 BPX 47 A $n^2: 1$
- (b): 1 BPX 47 A $n^2: 2$
- (c): 2 BPX 47 A en série

figure (2.8)

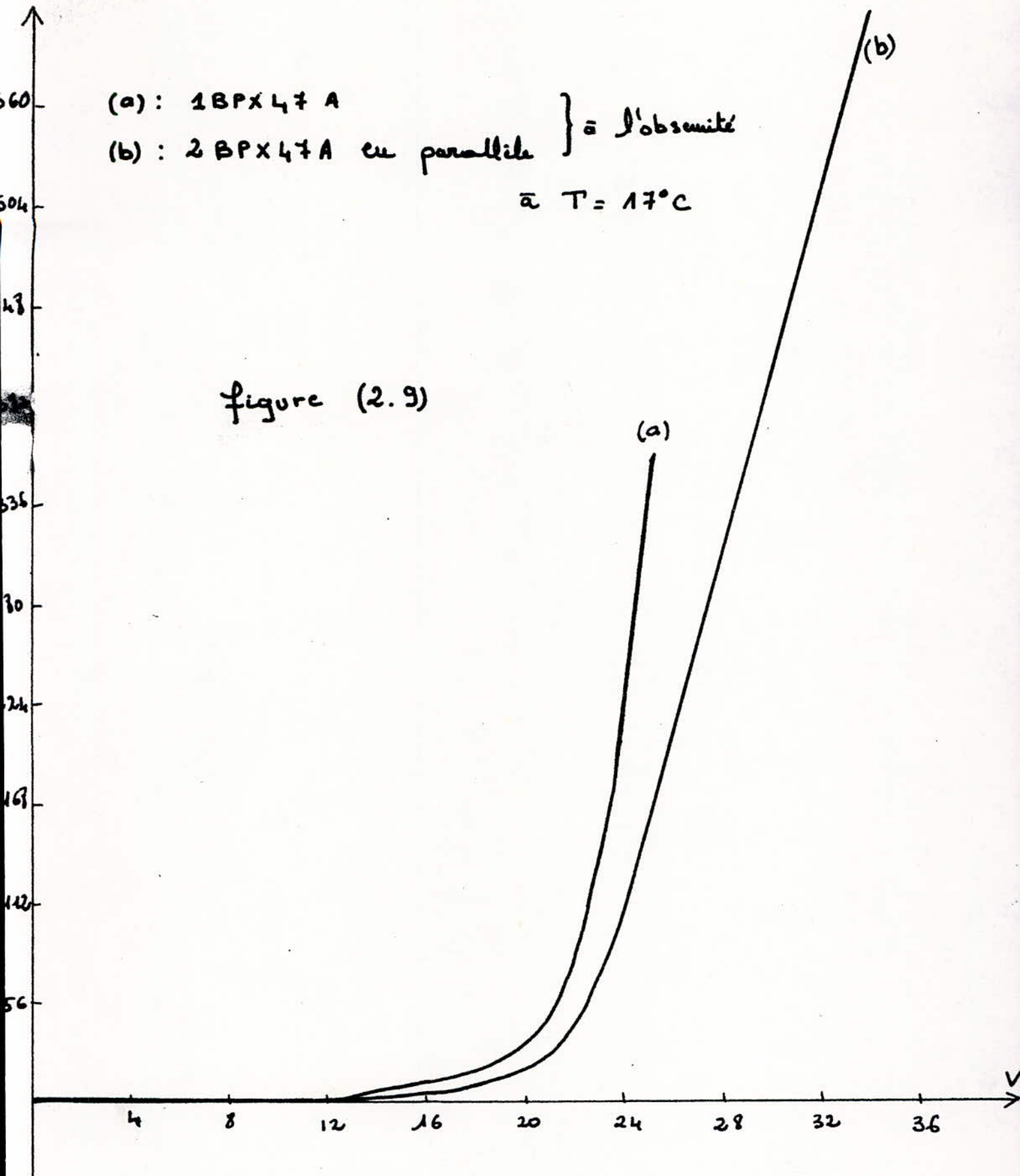
(a) : 1 BPX 47 A

(b) : 2 BPX 47 A en parallèle

} $\bar{\alpha}$ l'obscurité

$\bar{\alpha}$ T = 17°C

figure (2.9)



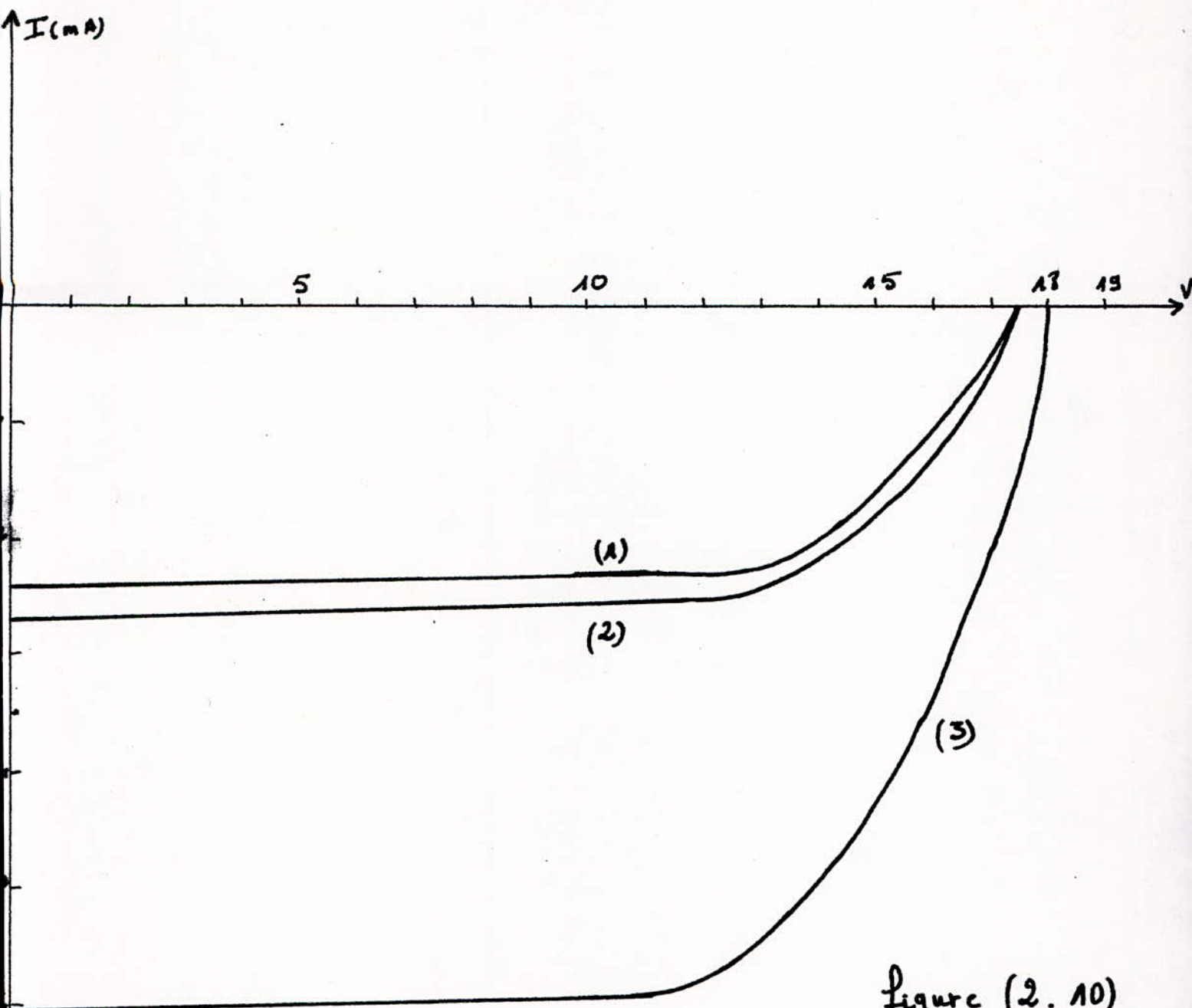


figure (2.10)

- (1) : 1 BPX47A $n_s:1$
- (2) : 1 BPX47A $n_s:2$
- (3) : 2 BPX47A en parallèle

$T = 24^{\circ}\text{C}$

$E = 800 \text{ W/m}^2$

1.4.a. Association série :

En associant plusieurs panneaux ayant des caractéristiques différentes en série, le rendement de toute la chaîne est réduit par le fonctionnement du plus mauvais panneau.

Dans la configuration série, une section ombrée (ou partiellement ombrée) du module, a une tension inverse à ses bornes; et la plus grande puissance est dissipée dans les parties non éclairées; cette tension risque de détruire le panneau si elle est supérieure à la tension inverse maximum qu'il peut supporter.

- Cas de 2 panneaux non identiques :

Considérons le montage de deux panneaux non identiques en série (figure 2.11) . La courbe (2) représente le panneau le moins performant avec $I_{ph_1} > I_{ph_2}$ et $V_{oc_1} > V_{oc_2}$.

La courbe C_1 est la caractéristique de l'ensemble.

Au point (a) le montage est en court circuit, la charge est nulle le courant total est I_{ca} et la tension nulle. Ces panneaux étant différents, la tension aux bornes du premier panneau se retrouve en polarité inverse aux bornes du second, qui travaille alors en récepteur avec une tension égale pratiquement à celle du premier panneau.

Au point (d) , le montage est en circuit ouvert, le courant total I_{cd} est nul alors que la tension V_{cd} est la somme des tensions de circuit ouvert de chaque panneau : $V_{cd} = V_{oc1} + V_{oc2}$

Au point (K) compris entre (b) et (d), les deux panneaux travaillent en générateurs.

./.

Figure (2.11)

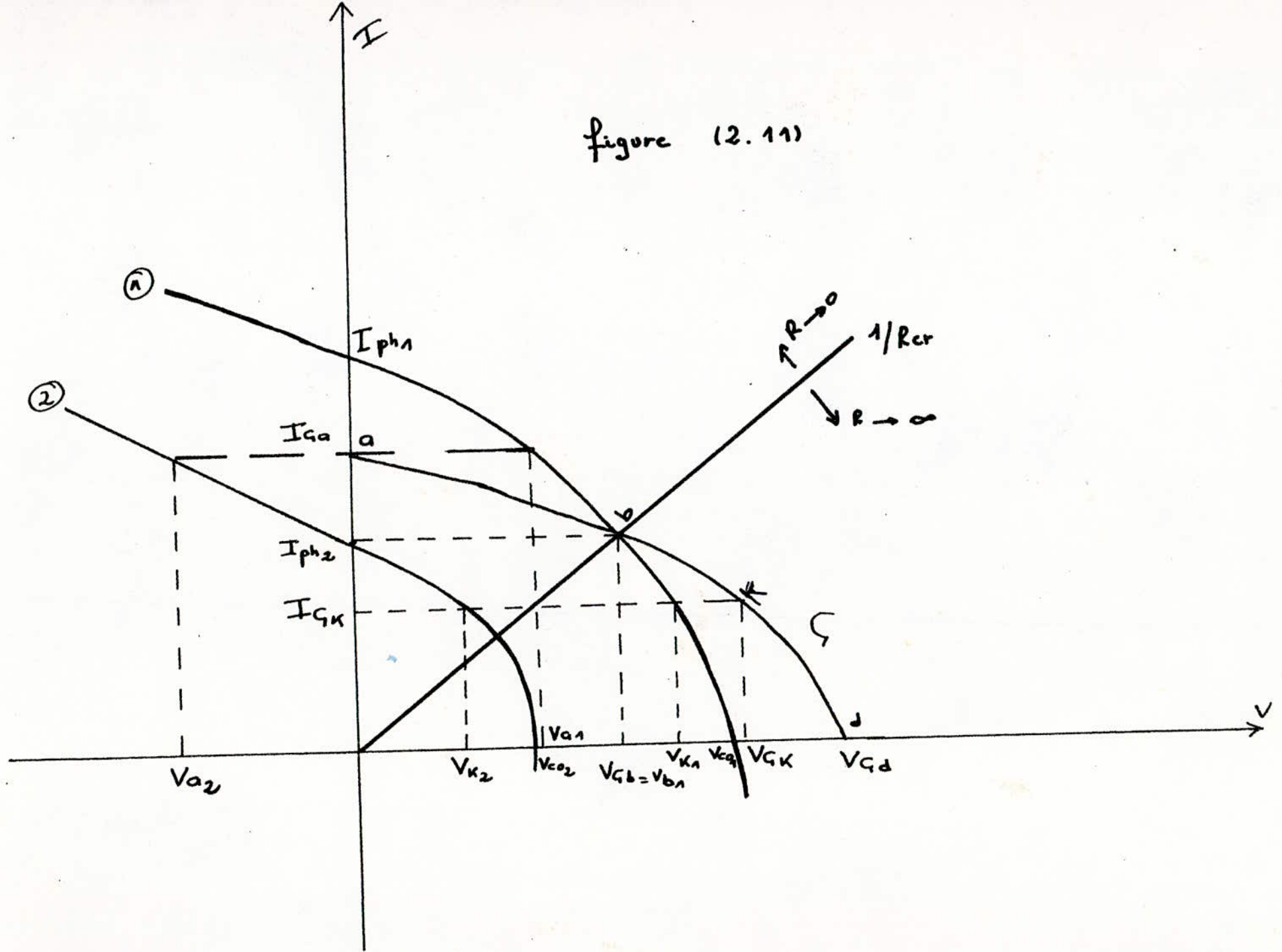
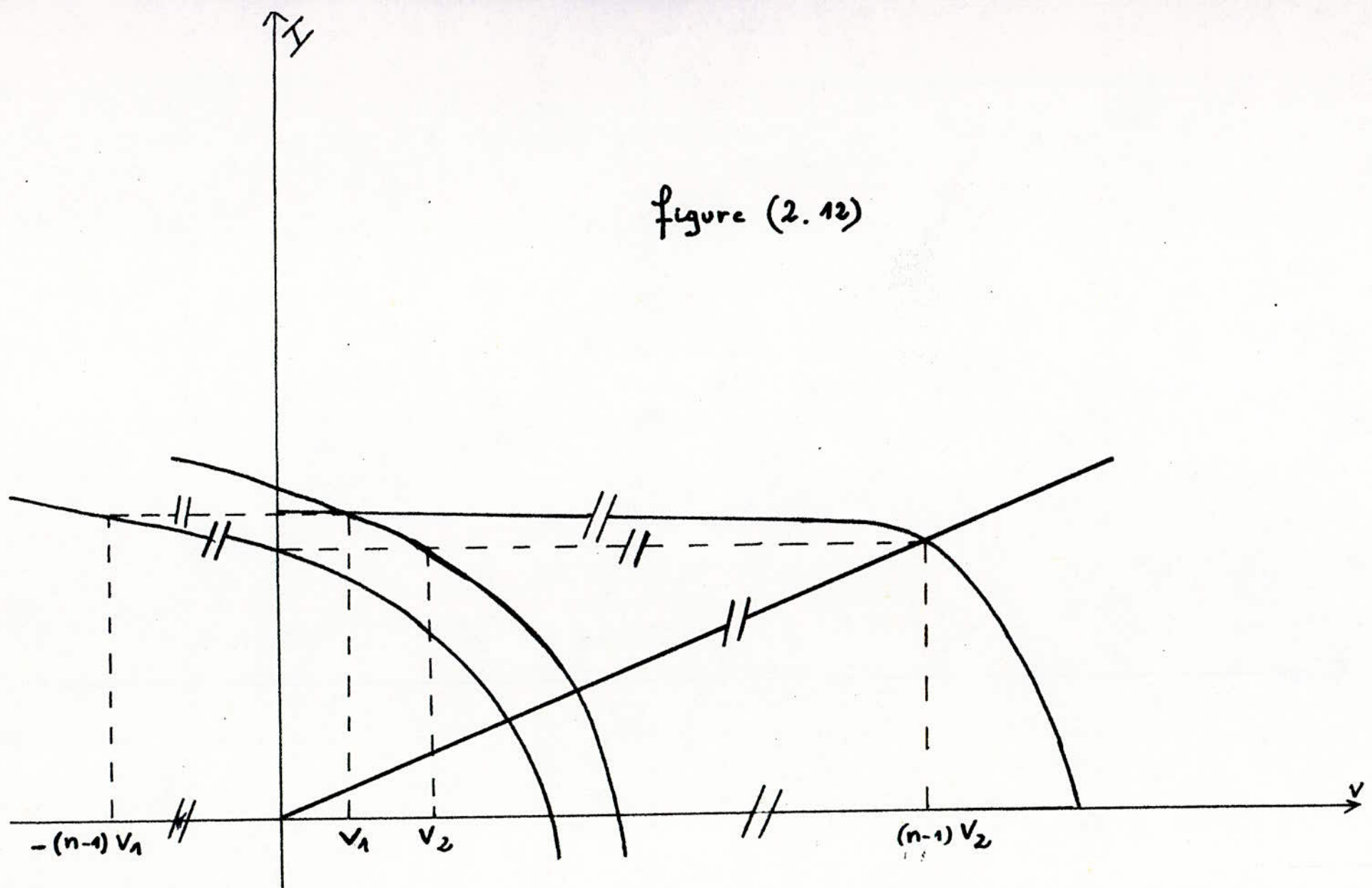


figure (2.12)



-40-

Le point (b) caractérise la limite correspondant au courant de court-circuit du panneau le moins performant I_{ph_2} , alors que la tension de l'ensemble est celle aux bornes du premier panneau ($V_{\phi b} = V_{b_1}$). Ce point est obtenu pour une valeur de la résistance de charge critique R_{cr} , pour laquelle le second panneau n'est ni générateur, ni récepteur. Et pour une valeur de R inférieure à celle de la résistance critique, ce panneau devient récepteur.

- Cas de n panneaux ; voir figure (2.12)

Soit un groupement de n panneaux en série, avec un panneau moins performant que les autres. Le raisonnement reste le même, donc la tension de l'ensemble des $(n-1)$ panneaux peut se retrouver en inverse aux bornes du panneau le moins performant.

Ainsi ce panneau va s'échauffer, entraînant une modification de son bilan énergétique et de ses caractéristiques; dans le cas où la résistance critique est dépassée évidemment.

1.4.b. Association parallèle

En associant plusieurs panneaux en parallèle, le rendement est la moyenne des rendements de chaque unité.

Dans la configuration parallèle, les panneaux éclairés dissipent plus de puissance et les panneaux à l'ombre risquent de recevoir la totalité du courant débité par les autres panneaux, ce qui peut engendrer leur destruction si ce courant est plus important que le courant maximal que peut supporter le panneau.

- Cas de 2 panneaux non identiques

Soit le montage de deux panneaux non identiques en parallèle (figure 2.13) : la courbe (2) est la caractéristique du panneau le moins performant : avec $I_{ph_1} > I_{ph_2}$ et $V_{co_1} > V_{co_2}$

La courbe (S) représente la caractéristique de l'ensemble.

figure (2.13)

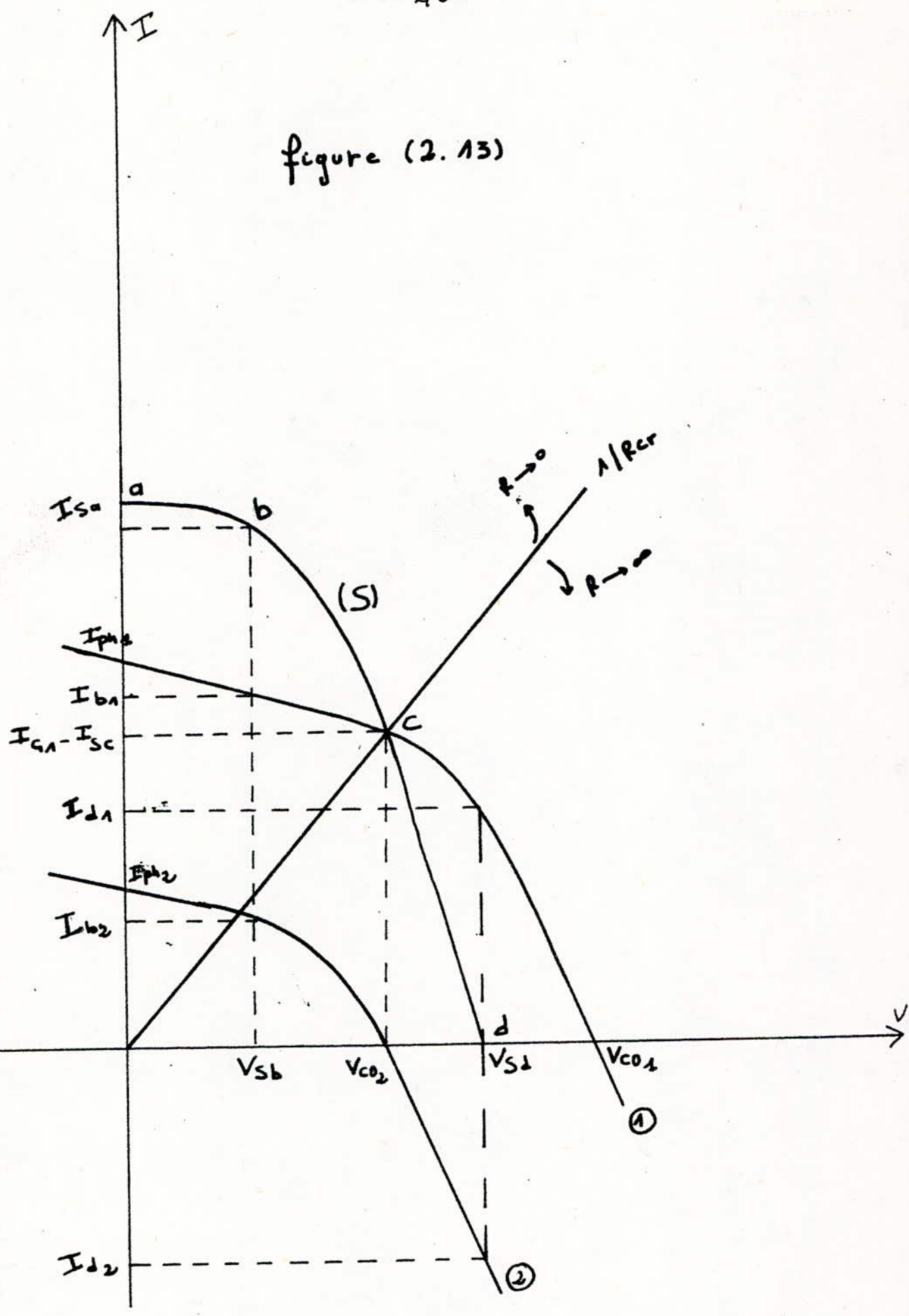
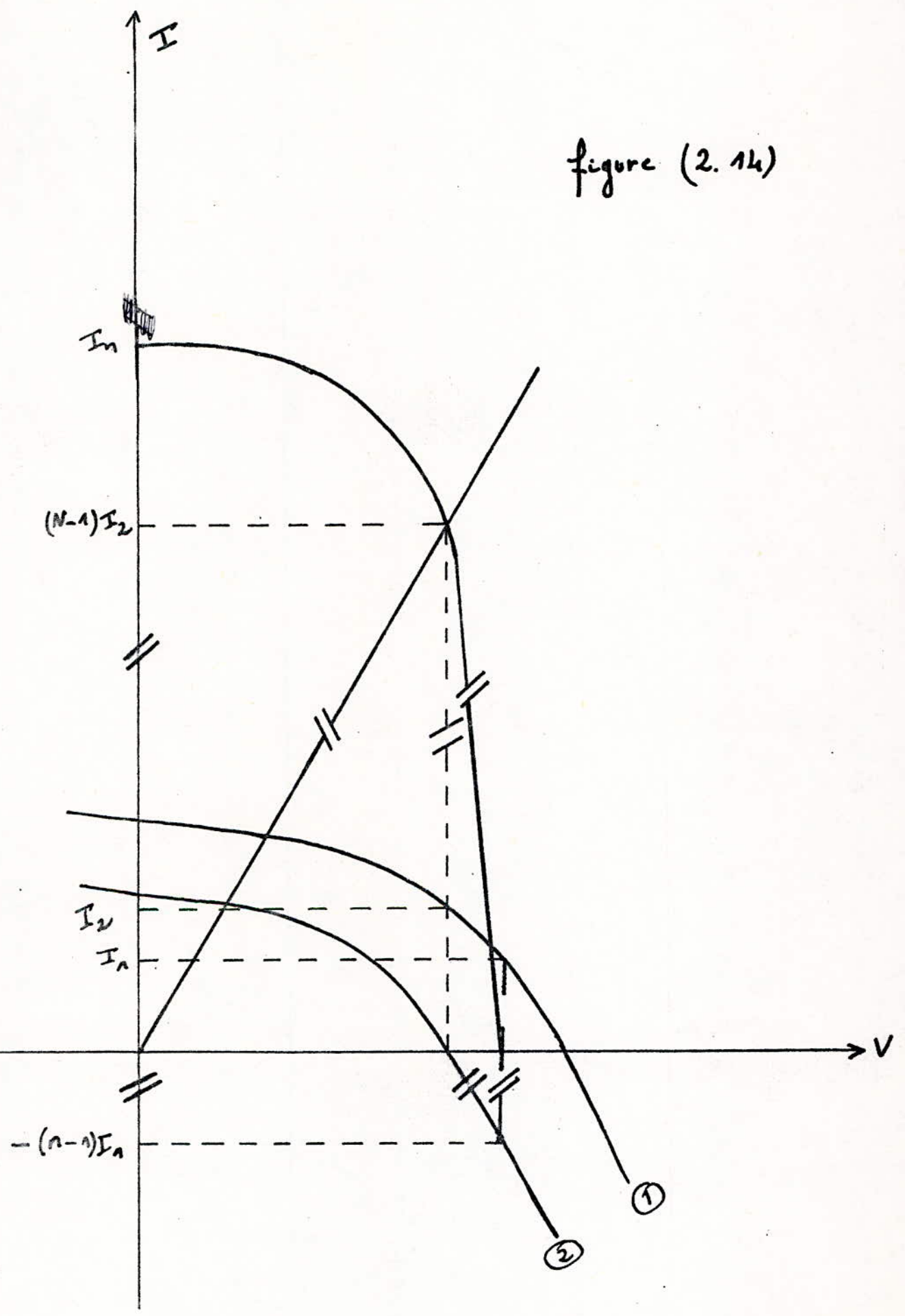


figure (2. 14)



-- au point (a) le montage est en court-circuit

$$I_{sa} = I_{ph_1} + I_{ph_2} \text{ et } V_{sa} = 0$$

-- au point (b) entre (a) et (c) la tension est V_{sb} et le courant : $I_{sb} = I_{b_1} + I_{b_2}$, les 2 panneaux fonctionnent en générateur.

-- le point (c) caractérise une limite de fonctionnement, correspondant à la tension de circuit ouvert du panneau (2) V_{co_2} et $I_{sc} = I_{c_1}$ qu'on obtient pour une résistance de charge critique R_{cr} pour laquelle le panneau (2) n'est ni générateur, ni récepteur. Pour une résistance supérieure à cette valeur le panneau devient récepteur.

-- le point (d) correspond au circuit ouvert, le courant est nul et la tension de l'ensemble est $V_{sd} = V_{co}$. Le courant I est la somme des 2 courants I_1 et I_2 étant égaux et opposés, le panneau (1) débite dans le panneau (2) sera au plus celui généré par le panneau (1) soit I_{ph_1} .

- Cas de n panneaux (voir figure 2.14)

Soit un groupement important de n panneaux dont l'un d'eux est moins performant que les autres. On fait le même raisonnement que précédemment : le panneau le moins performant peut recevoir le courant débité par l'ensemble des $(n-1)$ panneaux et risque de se détériorer par un processus d'échauffement lié à une modification du bilan énergétique si la résistance critique est dépassée.

2. Etude de l'influence de la température

Le fonctionnement des panneaux solaires (cellules solaires) est très sensible à la température. Ce paramètre est un point très important, car tout problème ou déséquilibre par rapport au comportement convenable du panneau entraîne un bilan en puissance différent qui se traduit par une évolution locale de la température.

./.

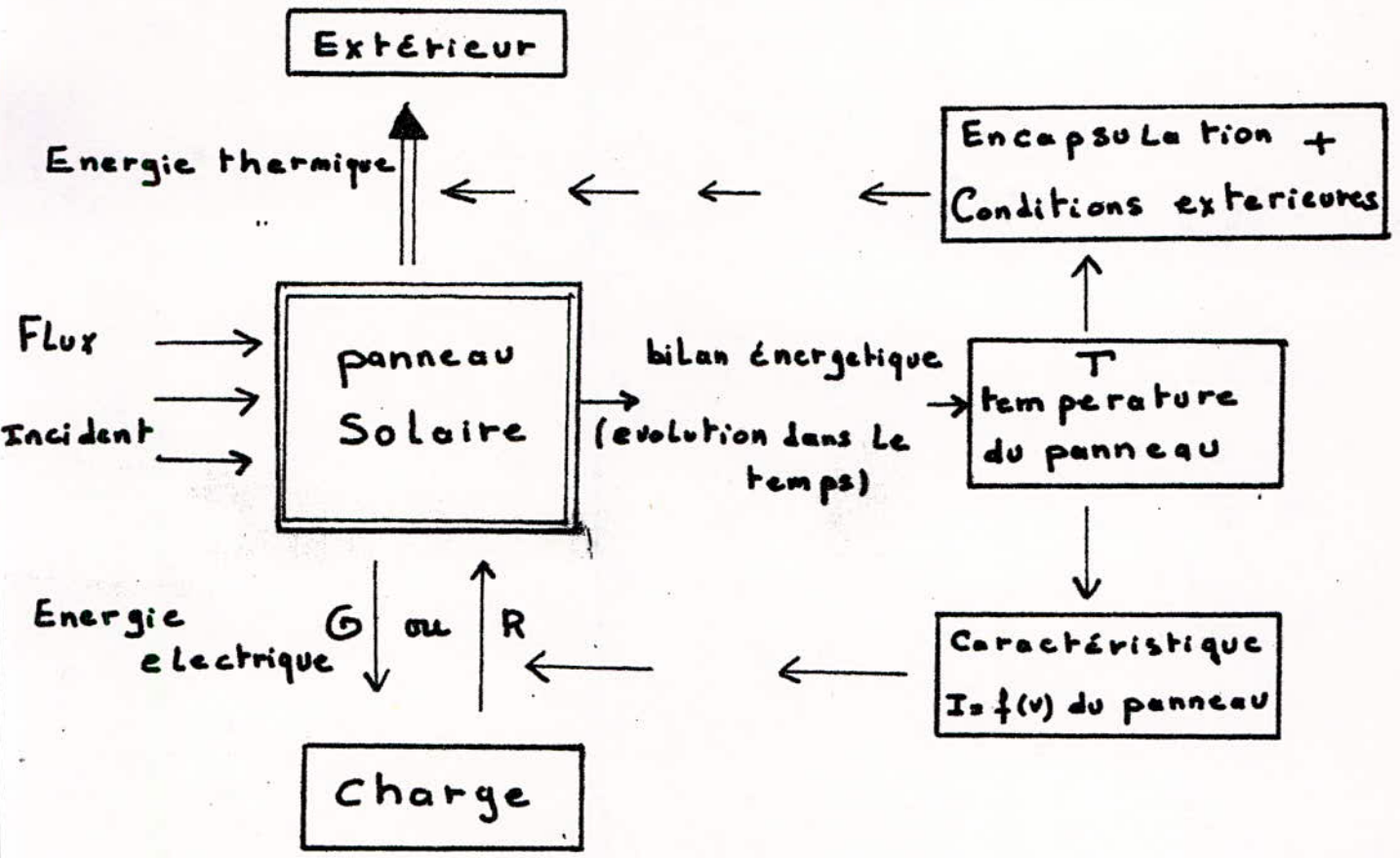


figure (2.15)

Cette évolution entraîne une modification des caractéristiques $I = f(v)$ du panneau, ce qui engendre un nouveau bilan énergétique, qui est fonction des conditions de dissipation thermique de l'encapsulation.

On aboutit donc à un phénomène bouclé température-puissance-température qui peut soit s'autoréguler, soit mener à un emballement thermique donc à la destruction du panneau (en général destruction des contacts ohmiques).

CHAPITRE III

1 - Présentation du problème de protection

L'association de plusieurs panneaux pose certains problèmes, qu'on ne rencontre pas lorsqu'on utilise un seul panneau. Ces problèmes sont causés par les dispersions des caractéristiques, ou par des ombrages partiels : alors quelques panneaux (ou cellules) peuvent fonctionner en récepteurs, ce qui pourra entraîner leur destruction.

Le but de la protection efficace est : d'éviter la détérioration d'un élément du générateur. La détermination de ces protections est relativement empirique. En général on utilise des diodes Shunt ou série pour la protection des panneaux, mais en plus des frais de câblage; ces diodes engendrent des pertes d'énergie.

Il est donc nécessaire de minimiser leur nombre et de prévoir l'emplacement qui donne le meilleur rendement.

2 - Etude de claquage d'une cellule BPX46 à l'obscurité

Pour déterminer les points critiques d'un panneau photovoltaïque (ou même d'un groupement de panneaux), il est nécessaire de déterminer ceux d'une cellule élémentaire.

Il s'agit de déterminer la tension inverse maximale, et le courant direct maximal que peut supporter une cellule BP46 à l'obscurité. On pourra déduire les points critiques du panneau BP47A constitué de cellules identiques à la BPX46 utilisée à la surface prés.

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{S_2}{S_1}$$

Notre étude sur la protection est basée sur l'utilisation des caractéristiques $I = f(v)$. Car tous les problèmes qui apparaissent (claquage de cellules, ombrage partiel, détérioration de l'encapsulation ou bien défauts technologiques) créent un déséquilibre dans ces caractéristiques.

La cellule ne peut supporter une très haute température, la température maximale est de l'ordre de 100°C (référence photovoltaic solar énergy conférence, page 296).

En fait la cellule à l'obscurité chauffe à cause de 2 effets :

- effet série (claquage par avalanche)
- effet parallèle (contacts ohmiques ou soudure des connections)

la puissance dissipée dans la cellule est :

$$P_d = R I^2 \quad R = \text{résistance équivalente de la cellule.}$$

On peut également écrire cette puissance sous la forme :

$$P_D = AK_t (T_c - T_{amb})$$

où A = Surface de la cellule

K_t = Conductivité thermique du panneau

T_c = Température de jonction de cette cellule

T_{amb} = Température ambiante.

En réalité l'échauffement se propage dans toutes les cellules du panneau.

Autrement dit, il faudrait considérer la relation :

$P_{d_1} + P_{d_2} + \dots + P_{d_n} = AK_t \left\{ (T_{c_1} - T_{amb}) + \dots + (T_{c_n} - T_{amb}) \right\}$
et ce problème n'est pas du tout simple à résoudre, car il n'est pas évident de déterminer les données de cette équation.

Il est plus commode d'étudier l'influence de la cellule à l'obscurité sur les autres cellules (les plus voisines).

Lorsque la cellule est éclairée par un rayonnement maximal de 800 W/m², la puissance absorbée est :

$$P_a = 800 (1 - \xi) \quad (W/m^2)$$

où ξ = coefficient de réflexion, exprimant les pertes par rayonnement, ξ est habituellement de l'ordre de 10 %.

Si NOCT est la température nominale de la jonction, la puissance dissipée dans des conditions de fonctionnement normal de la cellule est :

$A \cdot 800 (1 - \xi) = K_T (NOCT - 20^\circ C)$, où $A =$ Surface de la cellule, $K_T =$ Conductivité de la cellule.

On a pris $20^\circ C$, car cette température représente la température ambiante moyenne de notre climat.

$800 (1 - \xi) A$ représente alors la puissance maximale dissipée dans des conditions normales.

Quand la cellule fonctionne à une température : $T_c > NOCT$, l'excédent de puissance dissipée par rapport aux conditions normales de fonctionnement est :

$(A \cdot P_d) - (A \cdot 800 (1 - \xi)) = ((T_c - T_{amb}) - (NOCT - 20^\circ C)) K_T$
en particulier au voisinage de la destruction de la cellule on a :

$T_c = 100^\circ C$ donc :

$\Delta P_d \text{ max} = A K_T (100^\circ C - T_{amb} - (NOCT - 20^\circ C))$
mais notre problème est d'étudier ce phénomène de dissipation dans un panneau aussi pour rendre compte de l'influence de la cellule à l'obscurité sur toutes les cellules éclairées, il est nécessaire d'utiliser la relation suivante :

$$\Delta P'_{d \text{ max}} = A' K'_T ((100^\circ C - T_{amb} - (NOCT - 20^\circ C)))$$

avec $A' =$ surface du panneau

$K'_T =$ Conductivité du panneau

2.a.1 Claquage d'une cellule BPX46 en inverse

Une cellule qui a une tension inverse à ses bornes, dissipe une puissance qui dépend de plusieurs facteurs qui sont :

a- la forme de la caractéristique $I=f(V)$ inverse de la cellule.

b- le degré d'ombrage de cette cellule par rapport aux autres cellules.

c- La configuration du module contenant cette cellule.

Nous voulons déterminer la tension inverse maximale que la cellule supporte à la limite.

2.a.2- Manipulation

On met une cellule BPX46 à l'obscurité, et après l'avoir polarisée en inverse, on augmente la tension jusqu'à son claquage (figure 3.1) on obtient.

(tension inverse de claquage $V = -20$ volts)

(courant inverse de claquage $I = -504$ mA)

nous notons qu'il a été aisé de déterminer la tension inverse, et qu'effectivement après avoir dépassé cette valeur la cellule a claqué irréversiblement.

2.a.3- Conclusion

On sait que $V_{oc} = 18$ volts pour le panneau BPX47A et ayant obtenu $V_{inv} = -20$ volts, nous pouvons faire la remarque suivante :

Le constructeur assure une protection primaire du panneau, en évitant de mettre en série un nombre de cellules capables d'entraîner le claquage de l'une d'entre elles.

Nous avons vérifié cette remarque expérimentalement. En effet, la mise en série d'un panneau BPX47A éclairé avec une cellule BPX46 à l'obscurité (figure 3.2), montre que la caractéristique de l'ensemble est pratiquement celle d'un panneau seul la protection primaire du constructeur est confirmée.

2.b. - Claquage d'une cellule BPX46 en direct

Théoriquement il paraît facile de déterminer le courant maximal direct au delà duquel la cellule BPX46 claque à l'obscurité.

Il suffirait de procéder de la même manière que lors de la polarisation inverse. Mais la cellule a une grande surface de dissipation, et disposant d'une alimentation stabilisée (50 V - 10 A), il est impossible de déterminer ce courant à l'aide d'un circuit électrique (déduction de plusieurs essais).

Nous avons pensé à étudier le problème d'un point de vue thermique les causes de destruction de la cellule sont diverses. Les principales sont :

- 5A -

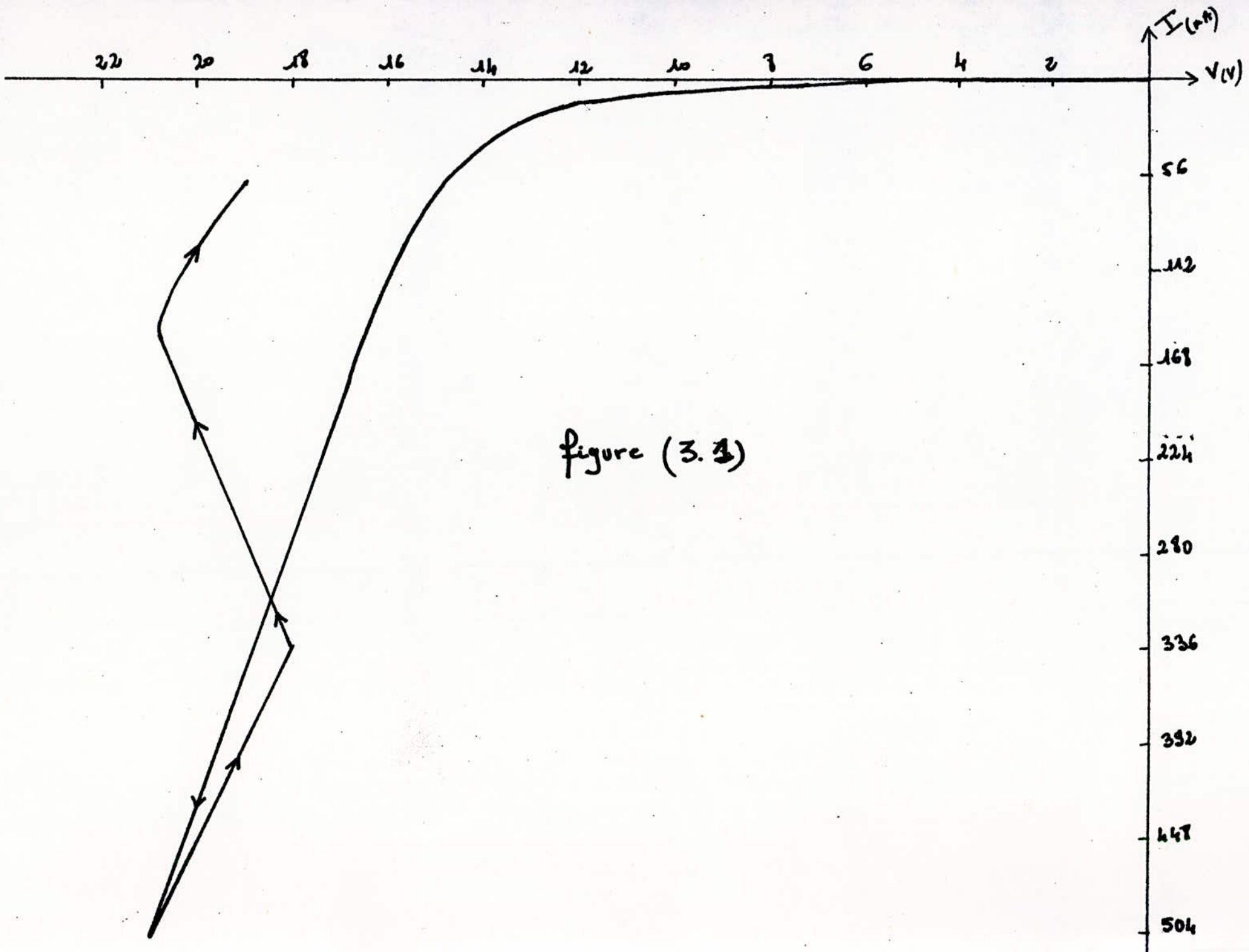
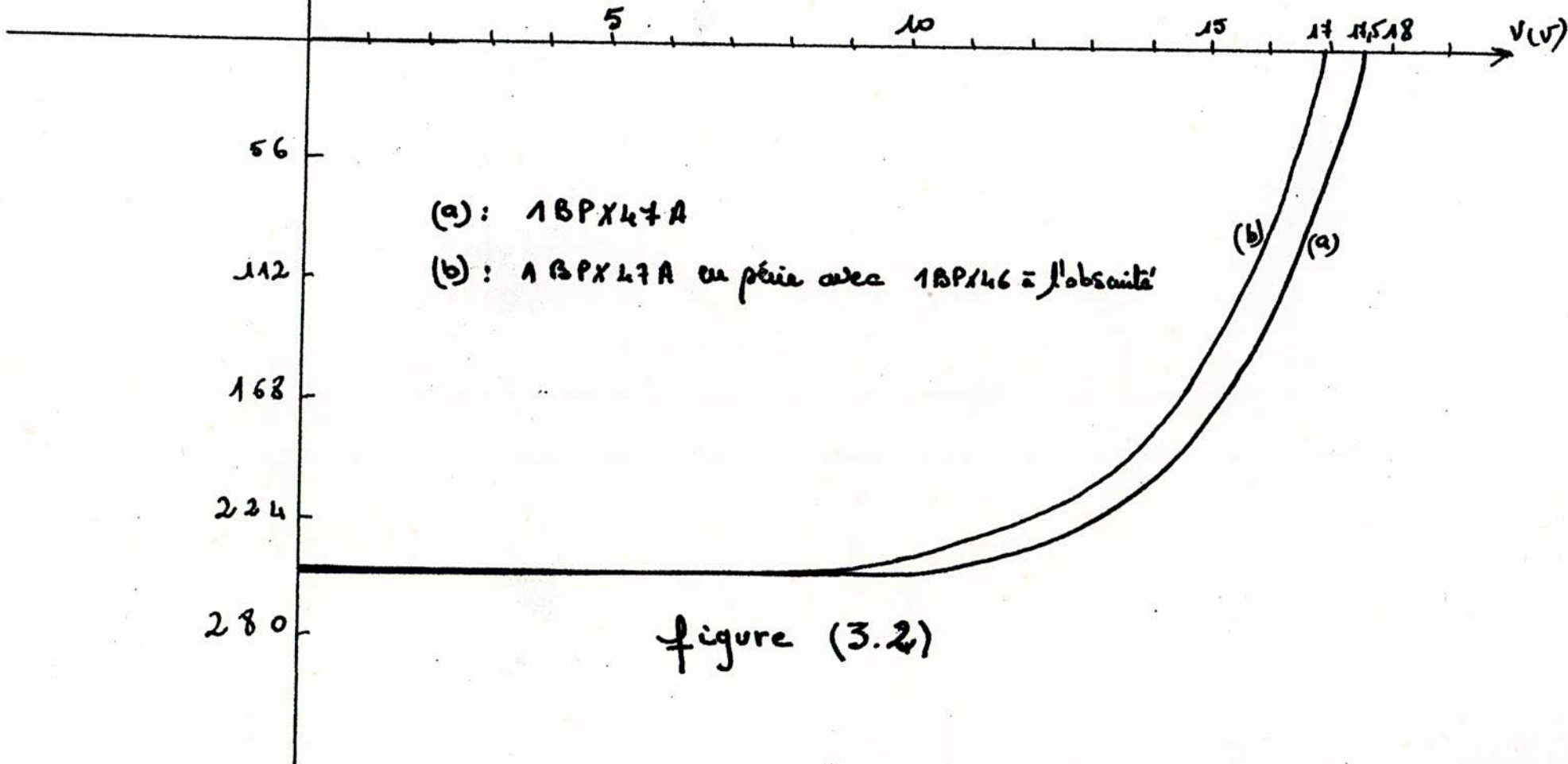


figure (3.4)

$I \text{ (mA)}$

$E = 820 \text{ W/m}^2$

$T = 20^\circ \text{C}$



(a): 1BPX47A

(b): 1BPX47A en série avec 1BPX46 à l'obscurité

figure (3.2)

-52-

- la jonction
- les contacts **ohmiques**
- les électrodes.

Il s'agit de déterminer l'un des éléments précédents qui se détruit le premier, lorsque la cellule est parcouru par un courant direct maximal.

Ainsi on a fait 3 manipulations.

2.b.1.- Manipulation (a)

Nous voulons avoir un ordre de grandeur de la température maximale qui entraîne la destruction de la cellule.

On place la cellule dans un four chauffé électriquement, et on surveille l'augmentation de la température de la cellule, elle est déterminée par un thermocouple qui utilise un enregistreur de tension en millivolts.

On obtient la température de fusion de la soudure $T_f = 230^\circ\text{c}$.

pour les électrodes on peut conclure que :

$$T_{fe} \gg 500^\circ\text{c}$$

car nous avons chauffé jusqu'à 500°c sans remarquer aucun effet sur les électrodes.

Ainsi nous avons déterminé une limite supérieure de la température, elle est plus importante que celle de destruction de la jonction, il serait préférable de trouver la limite inférieure qui causerait la destruction.

2.b.2 - Manipulation (b)

Le refroidissement de la cellule est régit par 3 paramètres :

- la convection
- la conduction
- le rayonnement

le plus significatif est le rayonnement par convection (échanges thermiques avec l'air ambiant). Nous supprimons cet effet en plaçant la cellule dans une enceinte à vide. Ainsi la température

que l'on déterminera sera la température minimale de destruction. Nous relierons la cellule à un ampèremètre, une alimentation variable et une résistance qui limite le courant.

La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre numérique miniaturisé.

Lors de la manipulation, la température augmente avec le courant et à $T = 130^{\circ}\text{C}$, toutes les soudures sautent, donc la cellule ne peut supporter une température plus importante.

$$T_{\text{max}} = 130^{\circ}\text{C}$$

Cette température est due en réalité à la destruction de la jonction. En effet, il y a diffusion des impuretés dans la zone de jonction, ce qu'on appelle contamination de la jonction. La température de jonction augmente et les contacts ohmiques claquent.

2.b.3.- Manipulation (c) (figure 3.3)

Il s'agit de déterminer la loi de variation du courant direct I en fonction de la température T , afin d'en déduire I_{max} pour la température minimale de claquage. Dans cette manipulation on se base sur la relation :

$$Rt I^2 = Q \Delta T$$

$$\text{d'où } I^2 = \frac{(Q) \Delta T}{(R.T)} = \frac{(m.C) \Delta T}{(R.T)}$$

- où m = masse de la cellule = constante
- c = capacité calorifique = constante
- R = Résistance totale de la cellule = constante
- T = temps de chaque mesure = constante

$$\text{Alors } \frac{m.c}{R.T} = \text{Constante} = K$$

$$\text{ainsi on obtient la relation : } I^2 = K. \Delta T$$

La manipulation consiste à faire passer un courant dans une cellule BPX46, et de noter la température correspondante on obtient un tableau de mesures donnant pour chaque valeur de (I) celle de (T) correspondante.

On déduit alors les valeurs de I^2 correspondant à ΔT avec $\Delta T = T_m - T_{amb}$

où T_m = température mesurée

T_{amb} = Température ambiante

pour déterminer la fonction $I^2 = f(\Delta T)$ on utilise le polynome d'interpolation de Lagrange.

Comme nous avons pris 4 points de mesure, on obtient le polynome de degré 3 suivant :

$$I^2 = 3,36 \cdot 10^{-4} (\Delta T)^3 - 38,75 \cdot 10^{-3} (\Delta T)^2 + 1,25 \cdot (\Delta T) - 0,47$$

2.C.- Interprétation des résultats

On utilise le polynome de Lagrange pour déterminer la valeur du courant direct maximal qui correspond à la température de destruction de la cellule.

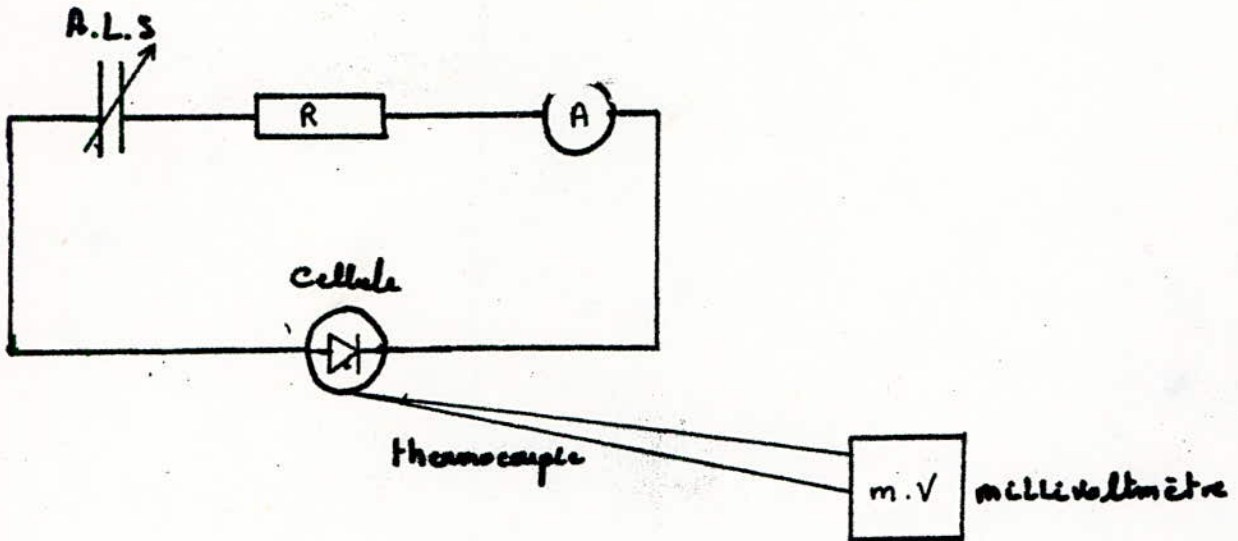
pour $T = 130^\circ\text{c}$ on a $\Delta T = 110^\circ\text{c}$ et on obtient

$$I_{\max} \approx 10 \text{ A}$$

Il se peut que la cellule puisse supporter un courant plus important, car il y a un effet de refroidissement. Mais comme on ne connaît pas la vitesse de régulation (refroidissement) de la cellule, la sécurité de fonctionnement n'est pas assurée.

Il est préférable de considérer cette valeur de I_{\max} comme limite inférieure qu'il ne faut pas dépasser.

Figure (3.3)



I (A)	2,6	3,1	3,6	4,1
T °K	347	359	364	368
I^2 (A ²)	6,76	9,61	12,96	16,81
ΔT °K	54	66	71	75

Tableau de mesures : $T_{\text{ambiante}} = 293^\circ \text{K}$.

On calcule la valeur de I_{max} pour la cellule BPX46 qui constitue le panneau BPX47A, en utilisant la relation donnée précédemment :

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \text{ et on obtient}$$

$$I_2 = 20 \text{ A}$$

Les cellules sont en série dans le panneau, elles sont supposées identiques à 10 % près (par le constructeur), alors en appliquant les lois d'association on déduit que le courant maximal direct que peut supporter le panneau est celui de la cellule qui le constitue.

$$I \text{ claquage} = 20 \text{ A}$$

Les manipulations (a) et (c) ont montré que l'effet de température sur la cellule est différent lorsqu'elle est chauffée par l'augmentation du courant, ou par l'élévation de température du milieu dans lequel elle se trouve.

En effet, pour la manipulation (c) l'équilibre thermique est à $T = T_{amb}$ lorsque le courant (I) est nul.

Lorsque la cellule chauffe par le passage du courant, l'équilibre thermique est atteint pour :

$$W_2 = A \cdot K_T (T_C - T_0) = 20^\circ \text{ c}$$

Si on prend comme référence $T_0 = 20^\circ \text{c}$ on a alors :

$$W_1 = A \cdot K_T \cdot \Delta T = A \cdot K_T (T_{amb} - T_0)$$

$$W_2 = A \cdot K_T (T_C - T_{amb} + T_{amb} - T_0)$$

$$W_2 = A \cdot K_T (T_C - T_{amb}) + A \cdot K_T (T_{amb} - T_0)$$

$$W_2 = R I^2 + W_1$$

avec Ri^2 = chauffage par effet Joule

W_1 = écart d'énergie par rapport à la température ambiante moyenne.

Par contre dans la manipulation ((a) nous n'avons que (W_1) car la cellule n'est pas parcourue par un courant.

C'est pourquoi cette manipulation (a) n'a^{pas} pu donner un paramètre caractéristique propre à la cellule.

On note que la manipulation (b) a donné une bonne approximation de la température maximale supportée par la cellule, de la valeur théorique.

3 - Détermination des associations maximales

3.a - Association parallèle

Nous avons déterminé le point critique d'un panneau BPX47A donc ce panneau à l'obscurité claque lorsqu'il est parcouru par un courant direct :

$$| I \geq 20 \text{ A} |$$

lorsque l'association de (n) panneaux BPX47 A en parallèle débite sur une charge quasiment infinie, donc est en circuit ouvert, nous savons que le panneau le moins performant aura à supporter (n-1) fois le courant maximal débité par un panneau (on suppose le montage constitué de n panneaux identiques, l'un étant à l'obscurité). Ce cas engendre tous les problèmes déjà cités.

Si on suppose que ces panneaux travaillent dans les conditions standard : $T = 25^\circ\text{C}$, et sous un éclairement maximal de 1KW/m^2 , le courant maximal débité par un panneau est celui de court circuit.

$$I_{cc} = 720 \text{ m.A}$$

On détermine en première approximation le nombre de panneaux qui associés en parallèle débitent un courant égal à celui de claquage (20 A).

$$\text{soit } N = \frac{I_{\text{claquage}}}{I_{cc}} = 27,5$$

on obtient donc ! N = 27 panneaux !

Il est évident que l'on ne peut associer 28 panneaux BPX47A en parallèle. Si l'un des panneaux (ou même l'une de ses cellules) est à l'obscurité, il reçoit le courant débité par les 27 autres ce qui mène à sa limite de destruction.

Il est préférable de calculer le nombre exact de panneaux que l'on peut associer en parallèle, en se donnant une marge de sécurité convenable.

Lors de l'association de $n' = \frac{N}{2} = 13$ panneaux, on assure la

sécurité de fonctionnement du groupe, puisque la zone de claquage est loin d'être atteinte.

Nous pouvons ainsi considérer que l'association maximale de panneaux en parallèle qu'il est possible d'utiliser est :

$$\boxed{! n' = 13 \text{ panneaux } !}$$

Mais si on considère le côté économique de cette association, on remarque que le nombre de panneaux est assez important. La destruction serait néfaste, aussi on préfère associer le tiers du nombre de panneaux qui associés en parallèle sont à la limite de claquage.

$$\text{donc } n = \frac{27}{3} = 9 \quad \boxed{! n = 9 \text{ panneaux } !}$$

Cette association a des avantages économiques et électriques.

3.b.- Association série

Pour ce type d'association, le cas défavorable est le court circuit de la chaîne de panneaux. Le panneau le moins performant doit supporter une tension inverse très importante, qui risque d'entraîner sa destruction. La tension inverse maximale que peut supporter une cellule BPX46 est de : $V = - 20$ volts (à l'obscurité).

Les cellules qui constituent le BPX47A sont aussi des BPX46 avec la même tension de claquage, mais avec une surface active plus importante.

Le panneau BPX47A peut ainsi supporter une tension inverse (qui est la somme des tensions des cellules qui le constituent) :

$$\underline{\underline{! V = -680 \text{ volts} !}}$$

Il s'agit de déterminer le nombre de panneaux que l'on pourrait mettre en série, lorsque l'un d'eux à une ou plusieurs cellules à l'obscurité.

Nous avons tracé expérimentalement la caractéristique d'un panneau BPX47A éclairé en série avec une cellule BPX46 à l'obscurité; ce qui est équivalent à tracer la caractéristique d'un panneau de 35 cellules en série dont l'une est à l'obscurité (figure 3.2). On remarque la faible influence de la cellule à l'obscurité sur les autres. Donc le point de fonctionnement est loin de la zone de destruction.

Par conséquent la tension inverse appliquée à cette cellule est faible par rapport à celle de son claquage.

Mais l'association de deux panneaux BPX47A éclairés en série avec une cellule BPX46 à l'obscurité (figure 3.4) mène à un système en déséquilibre qui risque d'entraîner le claquage d'une cellule. En effet lorsque le montage est en court-circuit, cette cellule doit supporter une tension inverse plus importante que sa limite de claquage.

(a): 2 BPX47A en parallèle

(b): 2 BPX47A en parallèle + 1 BPX46 en série à l'obscurité

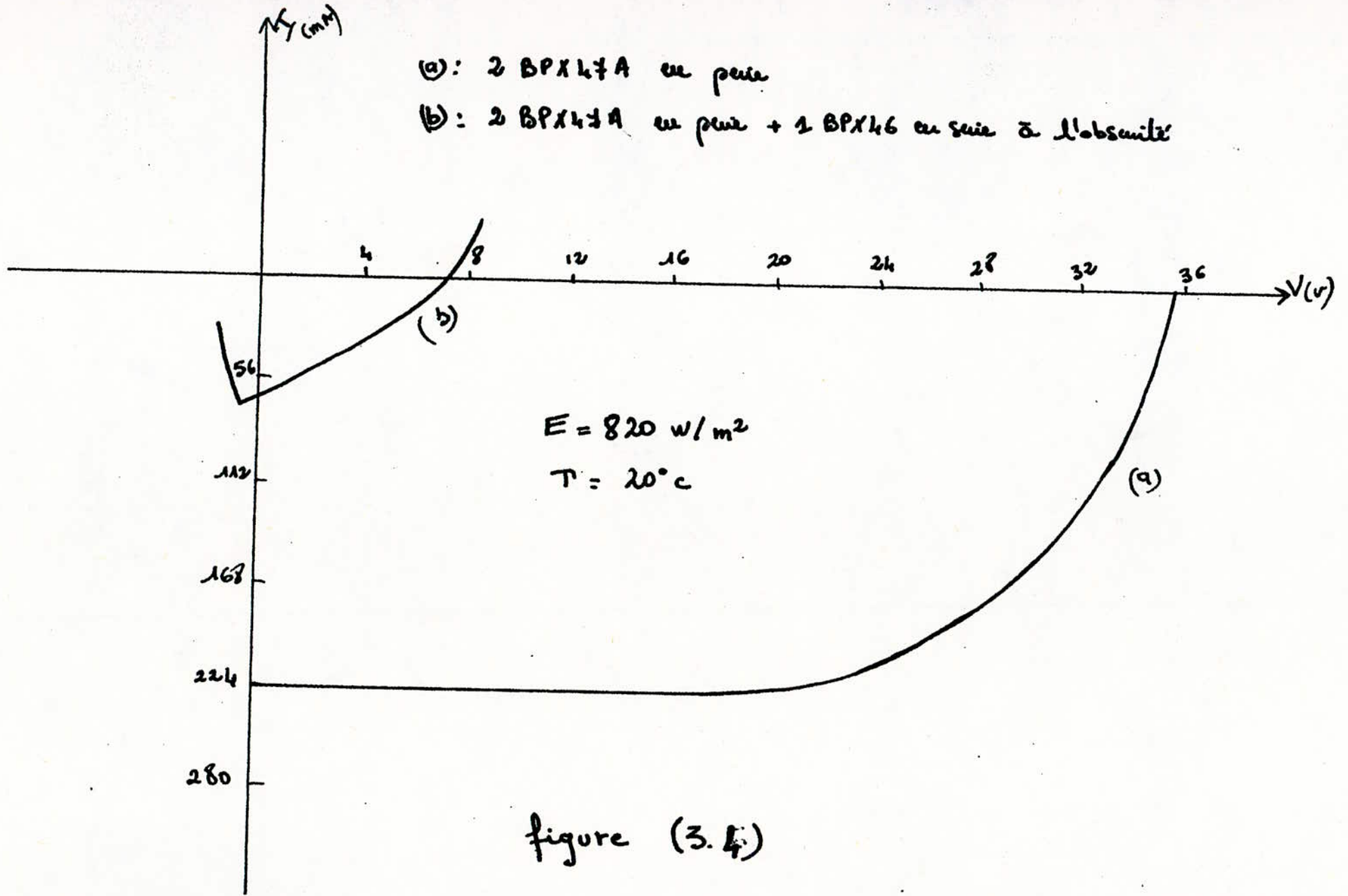


figure (3.4)

On peut alors affirmer que le cas le plus défavorable de l'association série de panneaux solaires, est l'occultation d'une seule cellule de l'un des panneaux. Sachant que c'est un cas très probable, l'importance de ce problème est à prendre en considération.

Conclusion

Comme une association série entraîne le claquage d'une ou plusieurs cellules (suivant le nombre de cellules occultées) pour une tension supérieure à $V = 20$ volts, et que l'occultation d'une seule cellule présente un danger de destruction de l'ensemble, l'utilisateur serait tenté d'utiliser les panneaux en association parallèle puisqu'elle donne une puissance importante sans risque de destruction.

Nous notons le grand intérêt de la détermination des points critiques du panneau BPX47A, car on a pu déduire de façon exacte les limites d'utilisation de chaque type d'association, ce qui facilite la résolution du problème de protection et garantit son efficacité.

4 - Protections envisagées pour des installations photovoltaïques

Nous avons étudié dans le chapitre précédent, les associations maximales de panneaux solaires séries et parallèles. Sachant que les installations photovoltaïques nécessitent un grand nombre de ces générateurs d'énergie (panneaux solaires), il est nécessaire de prévoir une protection contre tous les déséquilibres cités auparavant, afin de pouvoir utiliser ces panneaux en grand nombre et au voisinage de leurs caractéristiques optimales.

Dans une première partie, on déterminera une protection générale qui peut éliminer les déséquilibres. Ensuite on pensera à la manière d'améliorer cette protection, donc de faire son optimisation dans le but d'utiliser des installations photovoltaïques de plus forte puissance en gardant un bon rendement.

Cette protection est basée sur l'insertion de diodes qui servent à éviter l'application de tensions inverses pour les associations série, et d'empêcher le fort courant de débiter dans les panneaux les moins performants lors d'une association en parallèle. Il faudrait des diodes haute tension pour la protection série, et des diodes qui consomment peu pour la protection parallèle.

4.a- Protection série

Nous avons montré que le problème de l'association série est la tension inverse qu'aurait à supporter le panneau le moins performant de la chaîne série (ou celui ayant une ou plusieurs cellules à l'obscurité), lorsque l'ensemble est en court circuit.

On associe alors au panneau une diode en parallèle, comme le montre la figure (3.5)

Lorsque l'une des cellules du panneau est à l'obscurité, elle devient une diode polarisée en inverse, par conséquent le courant de la chaîne série passe dans la diode Shunt. Ce panneau aura à ses bornes la tension de la diode qui est faible et positive. Le panneau peut être approximativement considéré en court-circuit figures (3.6), (3.7) et (3.8).

La présence de la diode aux bornes du panneau sert donc à empêcher la présence d'une haute tension inverse, et permet au circuit de fonctionner même dans la condition la plus défavorable, à savoir le court-circuit.

4.b- protection parallèle : figure (3.9)

Dans ce type d'association, il faut protéger les panneaux contre le fort courant qu'ils pourraient recevoir de l'ensemble du reste du générateur, s'ils se trouvent à l'obscurité.

Il est logique qu'une diode en série avec ces panneaux et convenablement polarisée, empêche le courant de débiter dans les panneaux les moins performants, lorsque le montage est en circuit ouvert évidemment.

Donc la diode assure le fonctionnement du circuit dans le plus mauvais cas (circuit ouvert), mais elle présente des inconvénients

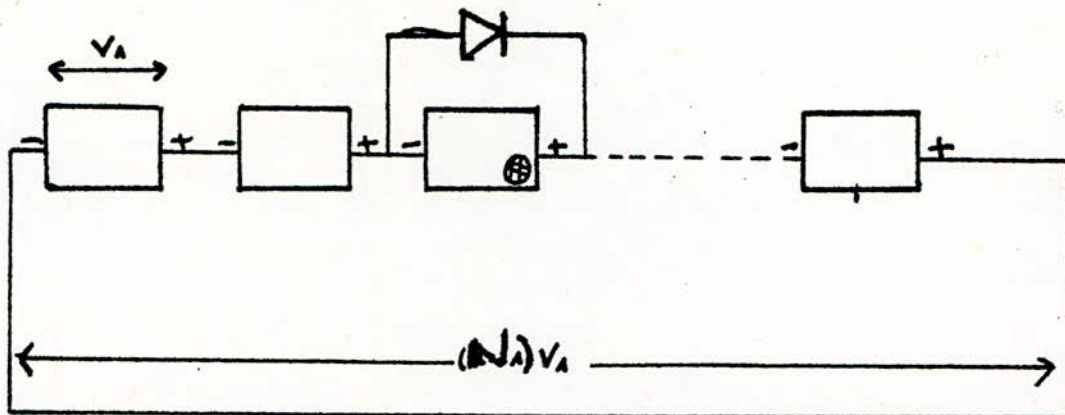


figure (3.5)

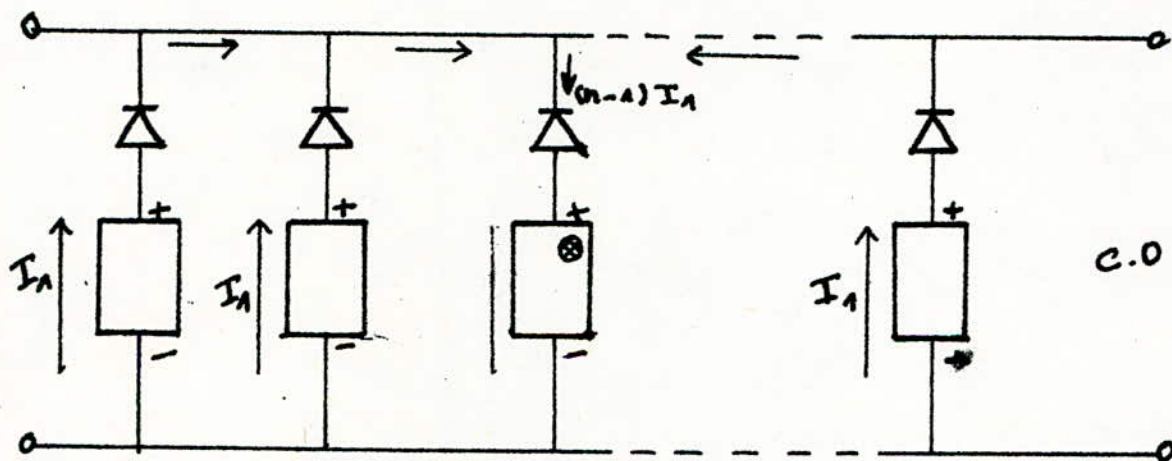


figure (3.9)

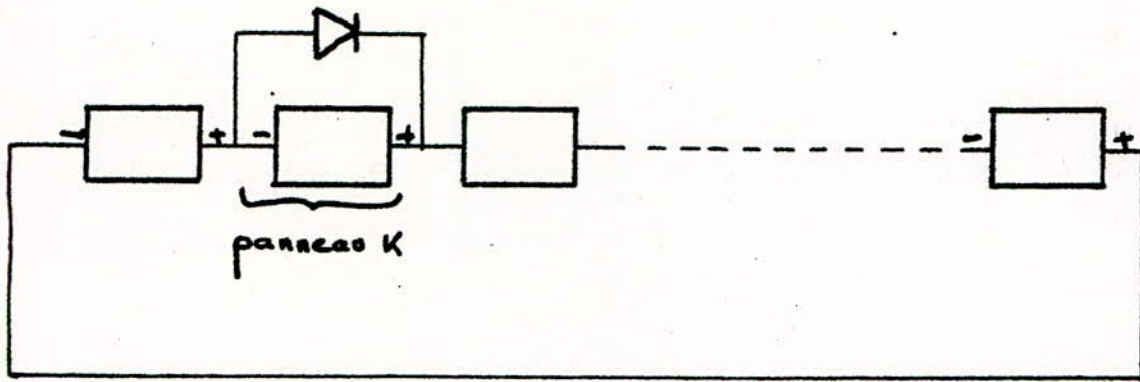


figure (3.6)

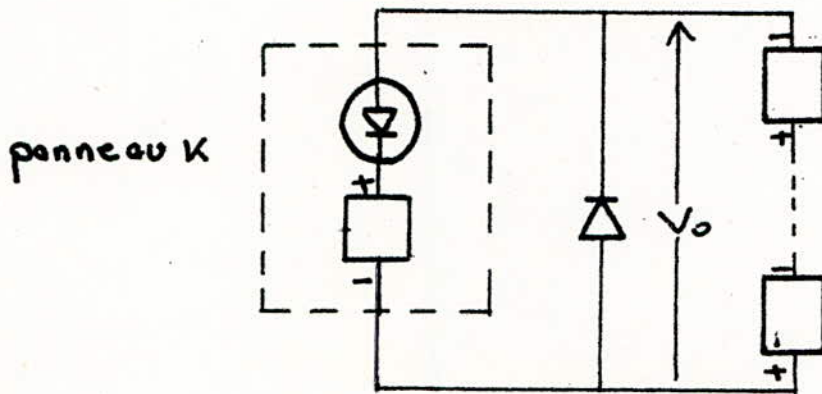


figure (3.7)

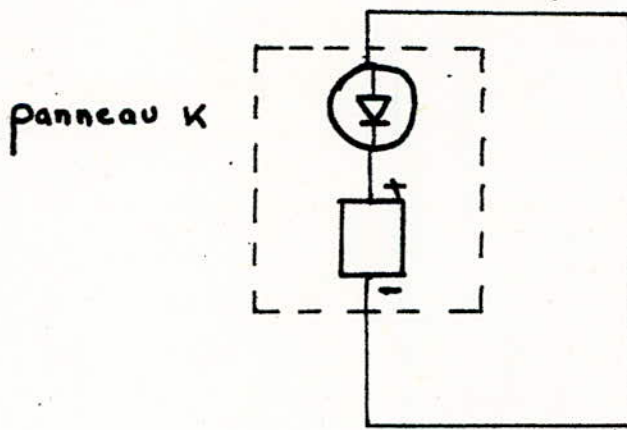


figure (3.8)

que nous verrons par la suite.

5 - Optimisation de la protection

L'utilisation des diodes de protections assure une bonne sécurité de fonctionnement des panneaux solaires, donc des installations photovoltaïques. Néanmoins il reste un problème que l'on voudrait minimiser : la diminution du rendement due à la consommation des diodes, et au cablage de l'ensemble de l'installation.

En effet, la détermination des associations maximales que l'on pourrait utiliser sans risque de destruction des panneaux (ou cellules), nous donne deux résultats importants qui sont :

a- quand on associe des panneaux BPX47A en série, il est nécessaire d'utiliser une diode de protection en parallèle avec chaque panneau . Nous avons démontré qu'une seule cellule à l'obscurité menait à la destruction de 2 panneaux en série, car elle devient réceptrice. Ainsi lorsque le nombre d'éléments de la chaîne augmente, la tension qu'aura à supporter cette cellule augmente de même que le courant inverse, et par conséquent le risque de destruction devient inévitable :

On peut ainsi affirmer qu'il est possible d'associer autant de panneaux que l'on veut en série, à condition d'utiliser des diodes de protection en parallèle (pour chaque panneau utilisé). Mais il faudrait utiliser des diodes de puissance (qui peuvent supporter des tensions inverses importantes),

b- Pour l'association de panneaux BPX47A en parallèle nous avons montré qu'il était possible d'associer 9 panneaux sans aucun risque de destruction, puisque nous avons prévue une marge de sécurité suffisante. Ainsi pour l'insertion de diodes de protection, il suffit de mettre une seule diode en série avec un groupement de 9 panneaux en parallèle pour éviter que leur courant ne débite dans l'ensemble des panneaux les moins performants (à l'obscurité).

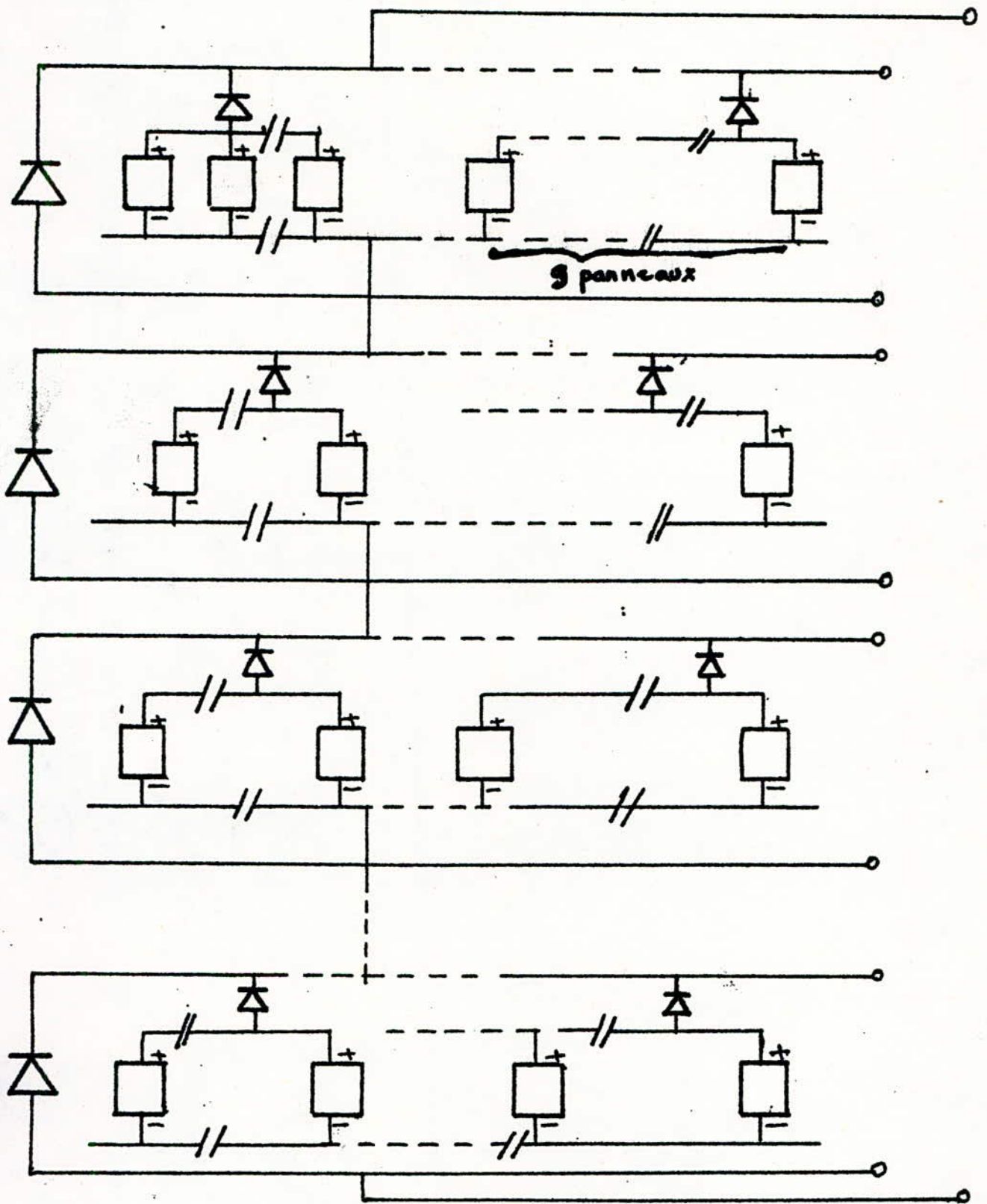


figure (3. 10)

Dans le cas où le groupement des 9 panneaux est à l'obscurité ce qui est rare, il devient récepteur, mais la diode empêchera le passage d'un courant dans le groupe.

L'optimisation de la protection nous a ainsi permis de minimiser le nombre de diodes à utiliser, mais la consommation de ces diodes est inévitable. Il faudrait penser à utiliser des diodes ayant une faible tension de seuil, donc consommant le moins possible, L'utilisation des diodes Shunt nécessite aussi le choix de diodes de puissances qui supportent une haute tension inverse.

En application on note que pour un groupement de n panneaux en série et n panneaux en parallèle, le schéma proposé (figure 3.10) minimise aussi le nombre de diodes protégeant la chaîne série avec l'utilisation de lignes d'équilibrage.

C O N C L U S I O N

Cette étude a permis l'analyse d'un problème important qui se pose dans les associations de modules solaires, et qui est leur protection.

Nous avons procédé à différentes manipulations pour déterminer les limites d'utilisation en polarisation inverse et directe des panneaux solaires, afin d'éviter le fonctionnement des panneaux au voisinage de ces points limites.

Notre système de protection est basé sur les résultats de ces manipulations, il est constitué de diodes Shunt et série.

Nous avons déterminé une protection optimale pour chacune des associations série et parallèle, pour lesquelles il a été possible de minimiser le nombre de diodes de protection.

Nous avons aussi pensé à la manière de réduire la consommation des diodes séries (cas parallèle) qui est inévitable, en conseillant l'utilisation de diodes ayant une faible tension de seuil, et qui supportent un courant important.

De même, il s'est avéré nécessaire d'utiliser des diodes de commutation haute tension pour la protection série, car elles doivent supporter d'importantes tensions inverses.

En conclusion des résultats obtenus pour les associations maximales, nous pouvons déduire que : la protection est obligatoire pour les associations séries, mais pour les associations parallèle il est nécessaire de protéger le module quand il débite plus de 90 W.

A N N E X E

Calcul du polynome d'interpolation de Lagrange.

ΔT	54	66	71	75
I^2	6,76	9,61	12,96	16,81

On pose $x = \Delta T$
 $y = I^2 = f(x)$

On veut calculer le polynome $L_n(x)$ de degré $\leq (n-1)$ tel que :

$L_n(x) = Y_i$ avec $i = 0, 1, 2, 3$

les coefficients de Lagrange sont déterminés par la relation :

$$L_i^{(n)}(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)}$$

l'erreur d'interpolation est : $R_n(x) = |f(x) - L_n(x)| \leq \frac{M_{n+1}}{(n+1)!} |\pi_{n+1}(x)|$

avec $M_{n+1} = \max_{a \leq x \leq b} |f^{(n+1)}(x)|$, où (a,b) = intervalle d'interpolation

1) $L_1(x) = 6,76 \frac{(x-66)(x-71)(x-75)}{(54-66)(54-71)(54-75)} = 6,76 \frac{(x-66)(x^2-146x+5325)}{(-12)(-17)(-21)}$

$L_1(x) = -1,578 \cdot 10^{-3} x^3 + 0,335 x^2 - 23,61 x + 554,59$

2) $L_2(x) = 9,61 \frac{(x-54)(x-71)(x-75)}{(66-54)(66-71)(66-75)} = 9,61 \frac{(x-54)(x^2-146x+5325)}{(12)(-5)(-9)}$

$L_2(x) = 0,018 x^3 - 3,559 x^2 + 235,071 x - 5117,32$

$$3) L_3(x) = 12,96 \frac{(x-54)(x-66)(x-75)}{(71-54)(71-66)(71-75)} = 12,96 \frac{(x-54)(x^2-141x+4950)}{(17)(5)(-4)}$$

$$L_3(x) = -0,038 x^3 + 7,43 x^2 - 478,91 x + 10188,84$$

$$4) L_4(x) = 16,81 \frac{(x-54)(x-66)(x-71)}{(75-54)(75-66)(75-71)} = 16,81 \frac{(x-54)x^2-137x+4680}{(21)(9)(4)}$$

$$L_4(x) = 0,0222 x^3 - 4,247 x^2 + 268,692 x - 5626,535$$

$$L^{(n)}(x) = L_1(x) + L_2(x) + L_3(x) + L_4(x)$$

$$L(x) = 3,358 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,0388 x^2 + 1,246 x - 0,47$$

BIBLIOGRAPHIE

1.- Photovoltaic solar Energy conférence

MAI 1982

2.- Physique des semi-conducteurs

B. PISTOULET

3.- Rappels sur la conversion photovoltaïque

Séminaire de CARGESE

M. BENMALEK