

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

S U J E T

Etude Expérimentale
et Simulation Numérique
du Déséquilibre dans un
Générateur Photovoltaïque

Proposé par :
S.A. DARADJI

Etudié par :
LAHMIGI ATHMANE
TLILI MOUNIR

Dirigé par :
S.A. DARADJI

PROMOTION : JUIN 1986

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

S U J E T

Etude Expérimentale
et Simulation Numérique
du Déséquilibre dans un
Générateur Photovoltaïque

Proposé par :
S.A. DARADJI

Etudié par :
LAHMICI ATHMANE
TLILI MOUNIR

Dirigé par :
S.A. DARADJI

PROMOTION : JUIN 1986

D E D I C A C E S

*
* Je dedie ce travail a la memoire de mon père, *
* a ma mère, a mes frères et mes soeurs, a Habib, *
* a tous mes amis (ies). *
*

Tlili Mounir

*
* A mon père, ma mère, mes frères et soeurs, *
* A tous mes amis (ies). *
*

Lahmici Athmane

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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Ce travail a été fait au laboratoire d'Énergie Solaire de l'école nationale polytechnique d'Alger, sur des panneaux solaires installés sur la terrasse de l'école.

Nous remercions Monsieur S.A. DARADJI chargé de cours, responsable du laboratoire d'Énergie Solaire à l'école nationale polytechnique d'avoir proposé ce sujet et de nous avoir guidé durant notre travail.

De même nous remercions Monsieur M. BELHAMEL pour nous avoir accueilli à la station d'expérimentation des équipements solaires (S.E.E.S) de Bouzereah.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements à :

- tous les professeurs qui ont contribué à notre formation au sein de l'école

- tous nos camarades qui nous ont aidé au cours de ce projet.

Introduction	1
Chapitre I : Rayonnement et cellule solaire	2
1-1 .Généralités	3
1-2 .Constante solaire	3
1-3 .Affaiblissement du rayonnement solaire	4
1-4 .Rayonnement diffus,direct,global.	4
1-5 .Evaluation de l'éclairement directement reçu	5
1-6 .Evaluation du flux diffus	5
1-7 .Energie solaire reçue par une surface inclinée	5
1-8 .Appareils de mesure	8
2-1 .Effet photovoltaïque	9
2-2 .Les cellules solaires	9
2-3 .Procédés de fabrication des cellules solaires au silicium	10
2-4 .Charge spatiale	12
2-5 .Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	14
2-6 .Schéma équivalent d'une cellule solaire	17
2-7 .Parametres caractéristiques	20
2-8 .Association de cellules solaires	23
Chapitre II :Systeme photovoltaïque	25
1-1 .Systeme photovoltaïque	26
1-2 .Générateur photovoltaïque	26
1-3 .Module photovoltaïque	26

1-4 .Couplage serie-parallèle des modules photovoltaïques	38
1-5 .Le stockage	38
1-6 .Le régulateur	41
1-7 .Les convertisseurs continu-alternatif	43
Chapitre III :Etude théorique du déséquilibre dans un generateur photovoltaïque	46
1) Problèmes posés par l'association des modules solaires	47
1-1 .Association de deux cellules en serie	47
1-2 .Association de deux cellules en parallèle	50
1-3 .Association des modules photovoltaïques	53
2) Détermination de la résistance critique (simulation-numerique)	56
2-1 .Définition de la résistance critique	56
2-2 .Détermination de la résistance critique dans le cas d'association de 3 modules en serie	56
2-3 .Résultats de la simulation	57
2-4 .Détermination de la résistance critique dans le cas d'association de 3 modules en parallèle	59
2-5 .Résultat et interpretation de la simulation	61
2-6 .Etude comparative entre les 2 cas de la simulation	63
3) Protection des modules photovoltaïques contre le déséquilibre	65
3-1 .Protection des photopiles par des diodes en parallèle	65
3-2 .Protection des par des diodes placées en serie avec les photopiles	65
Chapitre IV :Etude experimentale du déséquilibre (Arco-Solar)	68
1) Introduction	69
1-1 .Manipulation	69
2) Etude de la protection spécifique a Arco-solar	69
3) Etude du déséquilibre dans un groupement serie	73
3-1 .Cas d'un groupement de 3 modules	73
3-2 .Groupement de six modules en serie	83

4) Groupement parallèle	83
5) Groupement mixte (serie-parallele)	83
5-1. Cas du groupement mixte en equilibre	86
5-2 .Un module caché .	86
6) Interpretation des résultats	89
Conclusion	90
Annexes	
Bibliographie	

La diversification énergétique est indispensable en Algérie, et d'ailleurs pratiquement partout dans le monde.

Elle impose de développer constamment des filières énergétiques nouvelles et des moyens toujours plus performants pour transformer, stocker et utiliser l'énergie. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est l'une des voies actuellement intéressante pour développer une nouvelle filière de production et d'utilisation d'électricité, celle-ci s'adopte particulièrement aux pays peu industrialisés et à certaines parties des pays développés.

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

En effet, bien que la protection des modules solaires joue un grand rôle en empêchant la destruction de ces derniers, néanmoins elle introduit un déséquilibre dans le groupement, lors de son action.

Pour cela, dans ce projet nous proposons une étude sur le déséquilibre, cette étude sera divisée en deux parties:

- 1) une partie théorique basée sur une approche par simulation numérique du phénomène de déséquilibre des cellules photovoltaïques associées.
- 2) une étude expérimentale sur des modules photovoltaïques couplés entre eux et constituant un générateur en charge.

Au début de ce projet on propose une étude bibliographique détaillée sur la cellule solaire, puis le module photovoltaïque et enfin sur le système photovoltaïque.

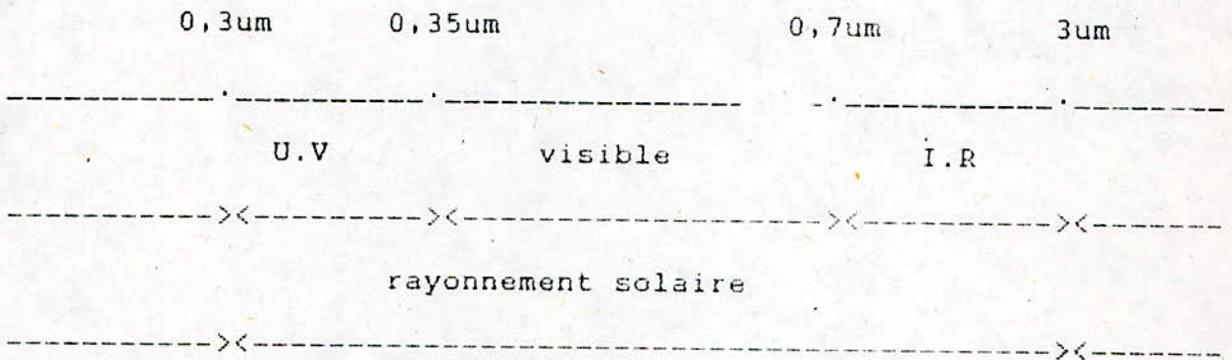
Nous avons introduit ce travail par une étude sur le rayonnement solaire, étude nécessaire pour l'optimisation de toute installation énergétique solaire.

CHAPITRE I

1.1 Généralités

Le soleil est un globe composé presque exclusivement d'hydrogène (70%) et d'hélium (30%). Il se comporte comme une bombe thermonucléaire, transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. La masse du soleil est telle qu'il peut encore rayonner pendant des milliards d'années. La vitesse de sa lumière est de 300 000 Km/s, et met un peu plus de 8 minutes avant de nous parvenir.

Le rayonnement solaire est réparti en un spectre compris entre la longueur d'onde 0,3 μ m (U.V), et la longueur d'onde 3 μ m (I.R), avec un maximum pour 0,47 μ m dans le visible.



1.2 Constante solaire

Elle est définie comme étant l'énergie reçue en une minute par une surface d'1 m², normale aux rayons solaires, placée aux confins de l'atmosphère terrestre à la distance moyenne de la terre au soleil. La valeur adoptée de cette constante est de 1,395 KW/m².

1.3 Affaiblissement du rayonnement solaire

Avant de nous parvenir sur la terre, le rayonnement solaire traverse une masse atmosphérique d'environ 80 Km d'épaisseur constituée par les nuages, l'ozone, la vapeur d'eau, des gaz et des particules de toutes natures en suspension dans l'atmosphère.

La présence de tous ces corps dans l'atmosphère; entraîne l'affaiblissement du rayonnement solaire; dont les causes peuvent être résumées dans ce qui suit: (voir Fig.1-1)

-l'absorption par les gaz et vapeurs de l'atmosphère.

-la diffusion moléculaire d'une fraction du rayonnement direct par les gaz et vapeurs de l'atmosphère.

-affaiblissement par les particules en suspension dans l'atmosphère, qui est du à l'absorption et surtout à la diffusion du rayonnement par ces particules. Cet affaiblissement est accentué dans les régions industrielles (pollution atmosphérique), et se manifeste dans la gamme de l'U.V .

1.4 Rayonnement diffus, direct, global

Comme nous venons de le voir, le rayonnement solaire se décompose à la traverse de l'atmosphère, en:

-une fraction absorbée par la couche atmosphérique

-une fraction diffusée par les molécules et les particules de l'atmosphère, et engendre ainsi un rayonnement dit diffus

-une partie du rayonnement qui parvient directement à la surface de la terre, appelée rayonnement direct.

On appelle rayonnement global l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui comprend le rayonnement direct et diffus.

1.5 Evaluation de l'éclairement directement reçue

L'expression de l'éclairement (E) direct qui est le flux d'énergie reçue par unite de surface est de la forme:

$$E=A.K.\exp(-C/\cos(h)) \quad /1/$$

avec:

K: constante solaire ($K=1395 \text{ W/m}^2$)

A et C: coefficient dépendant de l'état de l'atmosphère.

Exemple:

cof.	ciel très pur	conditions normales	zone industrielle
A	0,87	0,88	0,91
C	0,17	0,28	0,43

1.6 Evaluation du flux diffus

Le flux diffus est le plus difficile à évaluer. Ce flux ne provient pas d'une direction déterminée, comme le flux direct, mais de tous les points de la voûte céleste. Des études statistiques ont abouti à la formule suivante: (voir Fig. 1-2)

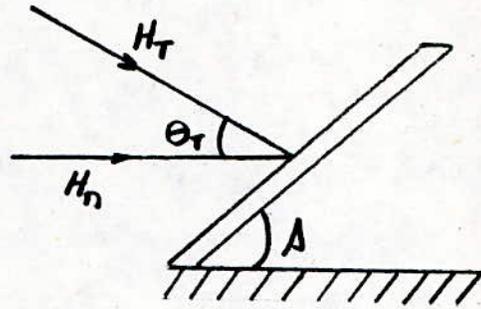
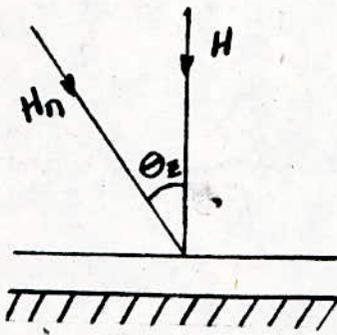
$$E=K.A.(0,271-0,2939\exp(-C/\cos(h))\cos(h)\cdot(1+\sin.s)/2$$

avec s: angle formé par la normale au capteur avec l'horizon.

1.7 Énergie solaire reçue sur une surface inclinée

Pour évaluer cette énergie, on introduit le taux de conversions solaire qui est définie comme étant le rapport de l'énergie reçue par un capteur plan incliné, sur l'énergie reçue par un cap-

teur plan horizontal. (Fig.1-3)



$$R = H_s / H_T = H_s \cdot \cos(\theta_s) / H_T \cdot \cos(\theta_r) = \cos(\theta_s) / \cos(\theta_r) \quad /2/$$

avec:

s: angle d'inclinaison du capteur

theta: angle d'inclinaison entre la normale à la surface de captation et la direction des rayons solaire.

Mais on peut définir R à partir de:

L: la latitude qui détermine la position de la verticale du lieu

D: la déclinaison

H: l'angle horaire

et bien sur S (angle d'inclinaison du capteur); soit la valeur du taux de conversion qui est:

$$R = \frac{\cos(L-S) \cdot \cos(H) \cdot \cos(D) + \sin(L-S) \cdot \sin(D)}{\cos(L) \cdot \cos(H) \cdot \cos(D) + \sin(L) \cdot S} \quad /2/$$

Les angles D et H peuvent être calculés par les relations suivantes:

$$D = 23,45 \cdot \sin(360 \cdot (284+n) / 365)$$

$$H = 15(12-t)$$

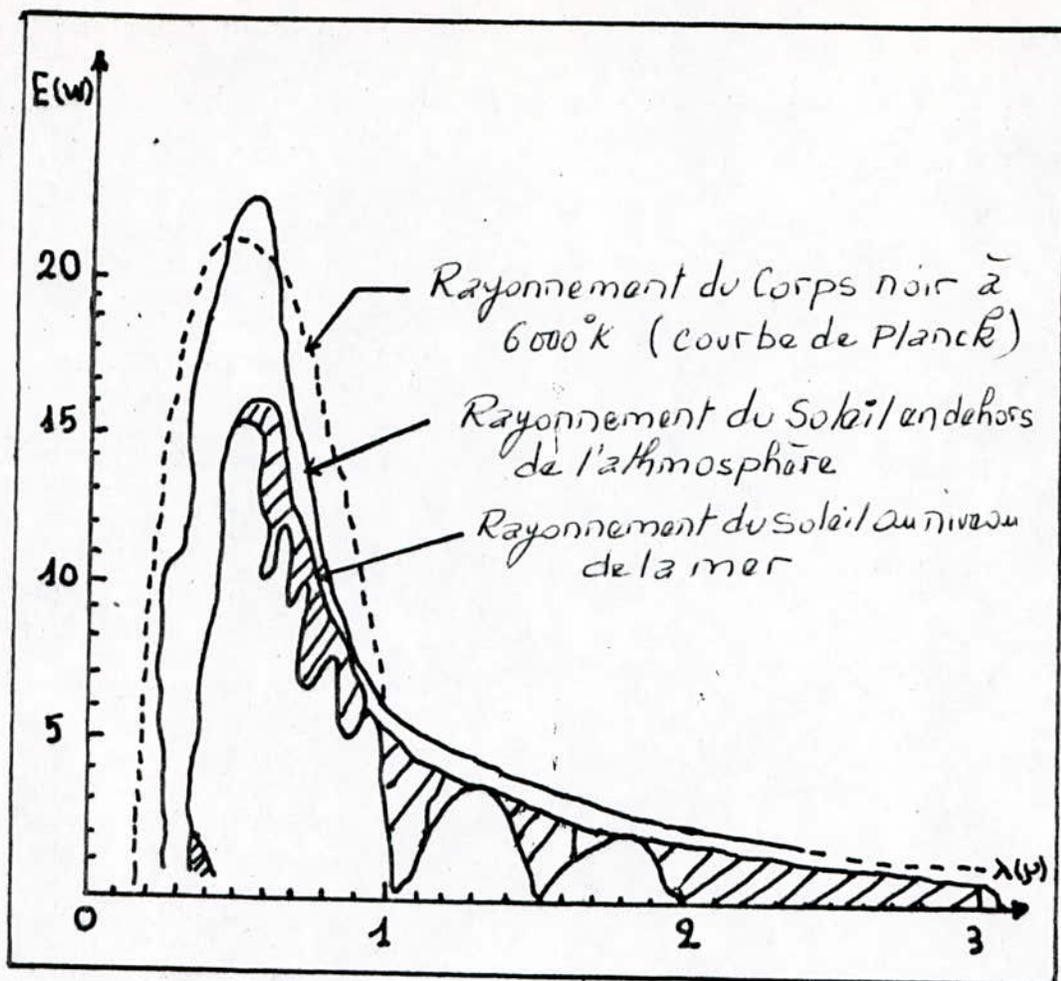


Fig. 1-1

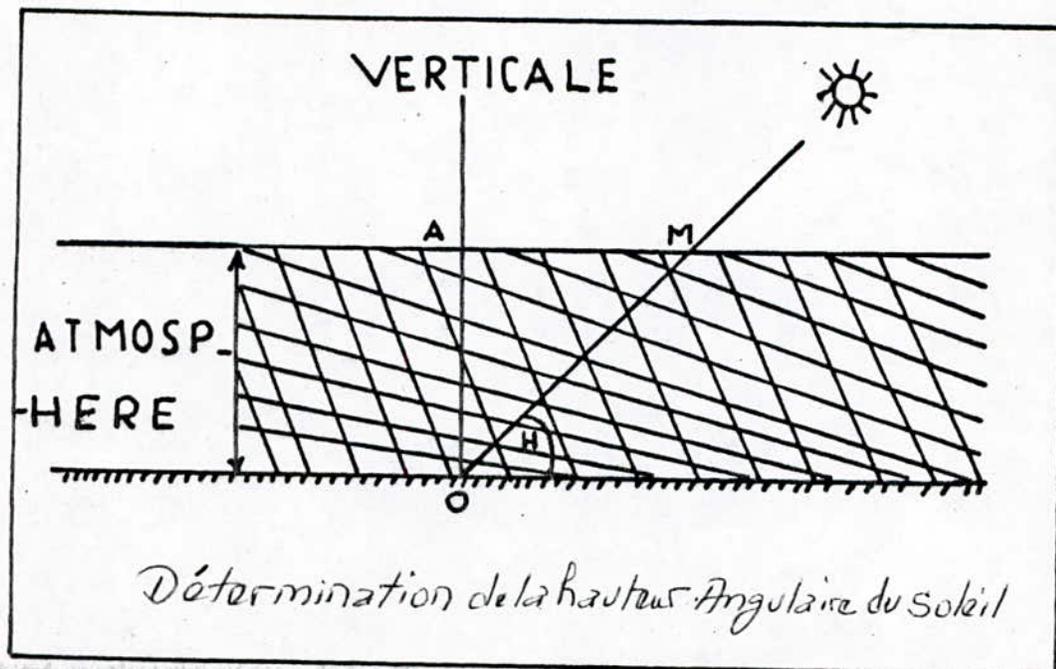


Fig. 1-2

dans lesquelles:

n: est le numero du jour depuis le premier Janvier

t: est l'heure considérée dans la journée.

Un exemple de calcul de R (taux de conversion) par ordinateur, et cela pour tout le mois d'Avril, de 8h à 16h (heures des expériences), est donné en Annexe 1.

1.8 Appareils de mesures

Les principaux appareils de mesures du rayonnement solaire sont:

-Pyrhéliometre: cet appareil permet la mesure du rayonnement direct. Il peut être couplé soit avec des enregistreurs, soit avec des intégrateurs, soit les deux à la fois.

-pyranomètre: il est utilisé pour la mesure du rayonnement global. Il est étalonné en mV/mW/cm au moyen d'appareils etalons de référence, et couplé à des intégrateurs, donnant les resultats en $W.h/m^2$.

-Héliographe: il permet de déterminer les durées d'ensoleillement. Il utilise l'effet thermique du rayonnement en enregistrant les traces laissées sur un papier brulé par les rayons solaires localisés.

2.1 Effet photovoltaïque

Le phénomène physique, qui intervient dans la conversion de l'énergie solaire (sous forme de rayonnement) en énergie électrique par photopiles est l'effet photovoltaïque.

Le principe de l'effet photovoltaïque est simple. Dans un cristal pur, un semi-conducteur en général, soumis à l'influence d'action extérieure tel qu'un rayonnement solaire, un électron peut être chassé de sa liaison covalente et produire une paire d'électron-trou, ceci à condition que l'énergie fournie à l'électron (énergie du photon incident) soit suffisante.

L'électron et le trou ainsi créés, sont porteurs de charges, et peuvent se mouvoir dans le cristal et participer à la conduction électrique. Un phénomène de recombinaison peut avoir lieu évidemment. L'adjonction d'impuretés dans le cristal, ou un contact intime avec un autre cristal sur l'une de ses surfaces, altère sa structure et modifie ses propriétés de conductibilité électrique. De cette manière on crée deux régions différentes (jonction) qui permettent l'échange de particules.

C'est ce principe qui a permis la réalisation de cellules solaires.

2.2 Les cellules solaires

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.

2.3 Procédés de fabrication des cellules solaires au silicium

Les cellules solaires les plus courantes sont à base de silicium, en effet cet élément a une énergie d'extraction de 1,12 eV (laquelle peut être fournie par les photons solaires).

Vu que le silicium pur (degré d'impureté de 10 à 10 %) est un semi-conducteur (intrinsèque) présentant une conductibilité électrique basse, en devra pour le rendre conducteur le doper en introduisant une petite concentration d'impuretés (10 à 10 %).

selon la nature de ces impuretés, le cristal peut devenir conducteur de charges négatives (électrons). Dans ce cas on parlera de "semiconducteur de type n", ou conducteur de charges positives (trous), dans ce cas on parlera de "semiconducteur de type p".

La fabrication de ces cellules a lieu en plusieurs phases:

1) La première opération consiste à réaliser une petite barre cylindrique de silicium de type p ayant un diamètre allant de 5 à 10 cm. On ajoutera au silicium pur en fusion du bore, de façon à ce que lors de la solidification de la structure cristalline, les atomes de bore (trivalent) aillent prendre certaines positions occupées habituellement par les atomes de silicium (tétravalent) dans la structure cristalline. Dans cette disposition dont on peut voir le schéma à la figure 1-4, il manquera une liaison et on assistera à la formation d'un trou (charge positive) due à la présence d'un atome de bore (receveur) dans la structure cristalline. L'énergie liant le trou à l'ion receveur est très faible ($< 0,1$ eV).

2) La deuxième étape consistera à découper la barre cylindrique de silicium monocristallin du type p en tranches très fines (de 0,1 à

Dopage du Silicium (type P) avec des atomes de Bore

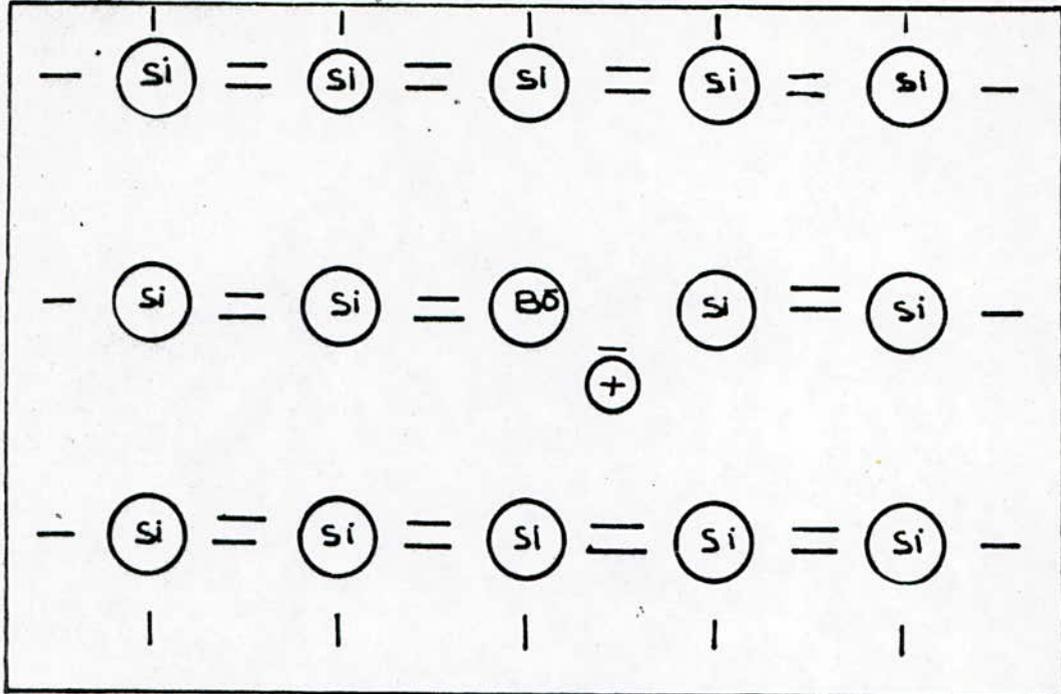


Fig. 1-3

Dopage du Silicium (type N) avec des atomes de phosphore

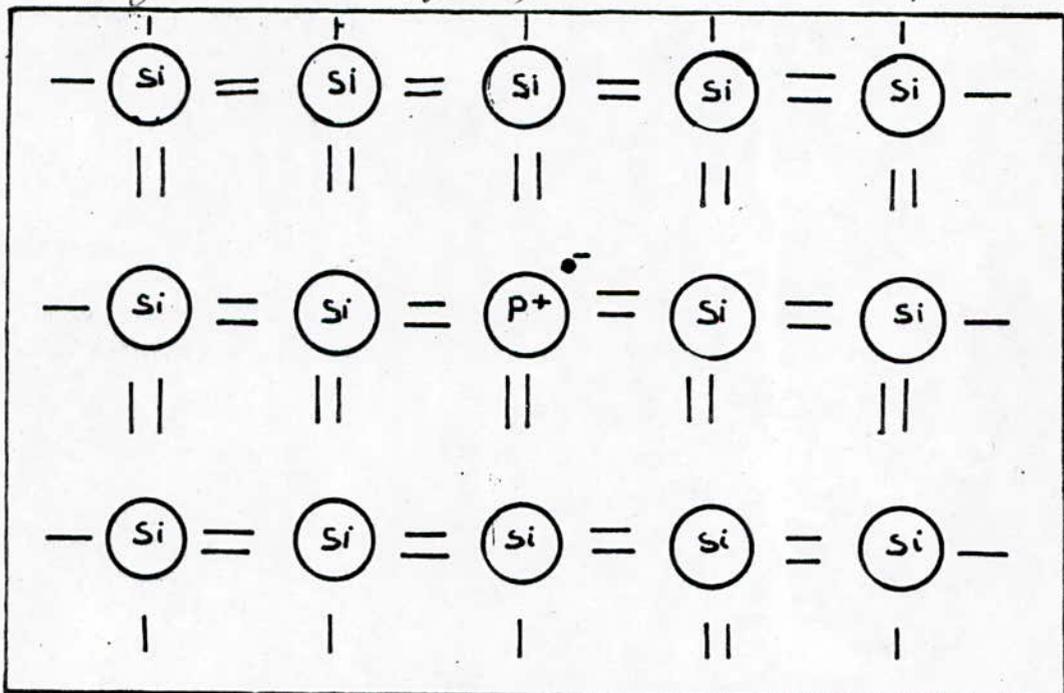


Fig. 1-4

0,2 mm).

On réalisera ensuite la "jonction p-n", en répandant sur une surface de la tranche du phosphore (pentavalent) porté à une très haute température. De cette façon on obtiendra un strate de matériau du type n très fin (de quelques microns), caractérisé par la présence dans la structure cristalline de donneurs (atomes de phosphores) facilement ionisables (énergie d'ionisation $< 0,1$ eV). Cette situation est illustrée par le schéma de la figure 1-4.

On devra fixer avec soin l'épaisseur du strate n qui devra correspondre à 4 microns environ.

3) Une fois que l'on aura réalisé la jonction p-n, on mettra sur la face externe de la partie n, une grille métallique couvrant 7 à 10 % de la surface de la cellule en appliquant un procédé photolithographique ou par évaporation sous vide. Cette grille permet le contact électrique. La face externe destinée à recevoir la lumière sera recouverte d'un strate anti-refléchissant de TiO_2 , ceci dans le but d'améliorer le rendement optique de la cellule.

Enfin la surface externe de la cellule sera complètement métallisée de façon à ce qu'elle puissent réfléchir les photons non absorbés et constituer le deuxième contact externe de la cellule.

A la figure 1-5 on donne le schéma de la section d'une cellule solaire au silicium.

2.4 Charge spatiale

Dans la zone constituant la limite entre le semiconducteur du type n et le semiconducteur du type p, on assiste à la formation d'une région pauvre en porteurs et par conséquent à haute résistance.

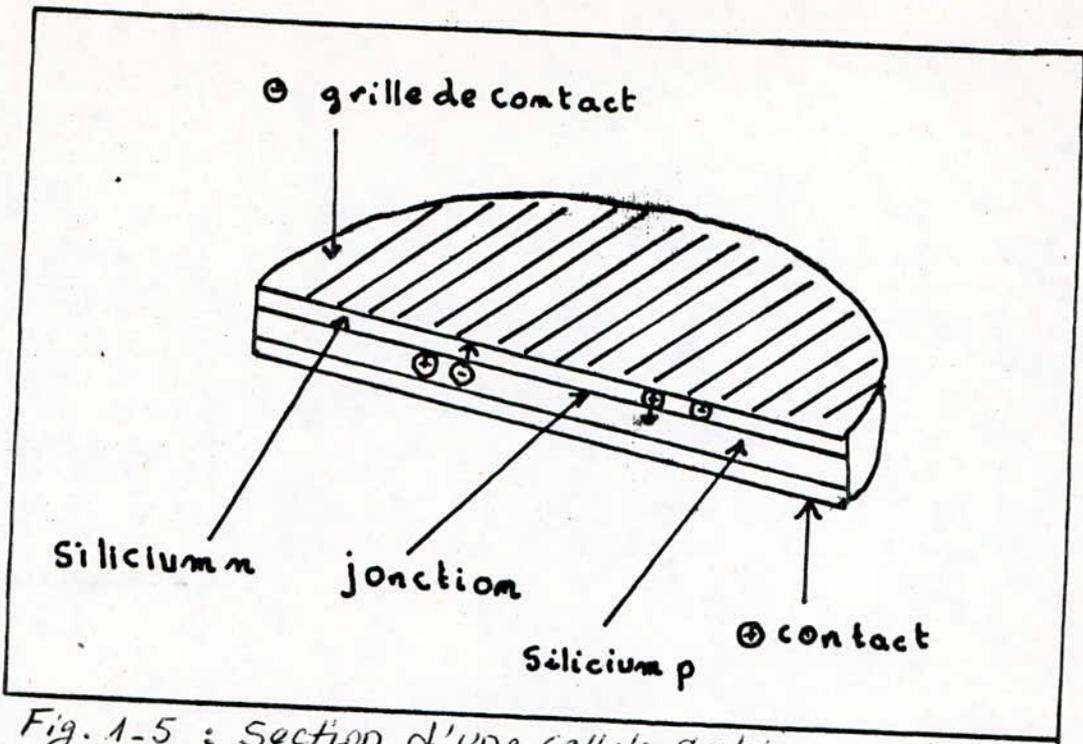


Fig. 1-5 : Section d'une cellule solaire au silicium

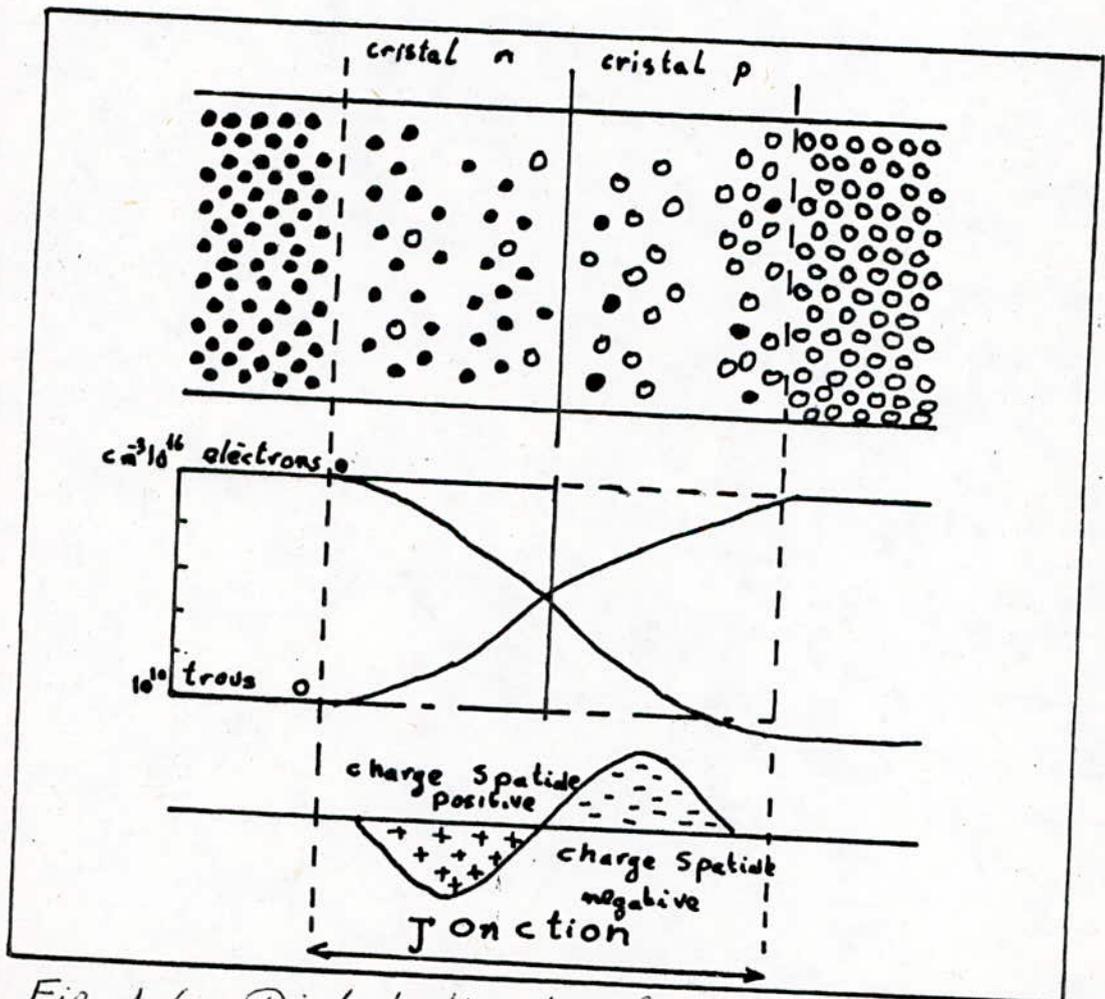


Fig. 1-6 : Distribution de charges spatiales

En effet à cause du gradient de concentration, les trous passent de la zone p à la zone n, et les électrons de la zone n à la zone p, jusqu'à ce qu'il y ait un équilibre dû à la formation de la "charge spatiale" située au double strate.

Cette charge spatiale qui est due à la présence d'ions receveurs et d'ions donneurs, agit dans le sens opposé à celui de la propagation. L'épaisseur de ce double strate est de l'ordre du micron. La figure 1-6 représente la distribution de la concentration de porteurs de charges mobiles et de la charge spatiale.

2.5 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une jonction p-n a pour caractéristique électrique essentielle de constituer une diode laissant passer le courant dans un sens et le bloquant dans l'autre.

L'exposition d'une cellule solaire à la lumière a pour résultat la formation par effet photoélectrique des porteurs qui se propagent dans le champ de charge spatiale qui se forme autour de la jonction p-n, et le courant inverse de saturation augmentera proportionnellement à l'intensité de l'éclairement.

A la figure 1-7 sont représentées les courbes caractéristiques d'une jonction p-n (diode), dont la description est la suivante:

-La zone (A) de la figure 1-7 est la zone de fonctionnement d'une photodiode.

Lorsqu'un photon de la radiation solaire frappe la zone de la jonction p-n, une paire électron-trou se forme par effet photoélectrique, le champ électrique existant dans la jonction effectuée la séparation des charges produites en faisant passer les électrons négatifs dans la zone n et les trous dans la zone p,

on voit alors se produire une f.p.e.m (ou photo-tension) au détriment de la différence de potentiel interne de la jonction p-n, qui diminuera. Dans l'obscurité on a un équilibre entre la d.d.p au niveau de la jonction p-n et la d.d.p au niveau des électrodes et aucune tension interne ne sera mesurée.

-La zone (B) de la figure 1-7 représente la zone de fonctionnement des "cellules solaires".

En effet les cellules solaires peuvent être considérées comme des générateurs de courant proportionnel au degré d'éclairement et à la surface de la jonction exposée à la lumière. Contrairement à ce qui se passe dans les batteries, où le courant débite augmente au fur et à mesure que la résistance de charge diminue et où en cas de court-circuit, le courant tend à l'infini provoquant la destruction de la pile. Dans les cellules solaires le courant ne va pas au delà d'une certaine valeur finie, qui dépend de l'intensité lumineuse et qui est quasiment constante dans une grande partie du champ des tensions débitées. Ceci même si la résistance de charge devient très basse.

-La zone (C) de la figure 1-7 se réfère au cas où la jonction p-n à une "polarisation directe". C'est à dire au cas où est appliquée une tension négative à la partie n et une tension positive à la partie p.

Dans ce cas, le potentiel dérivant du contact avec la jonction subit une réduction correspondant à la valeur de la tension appliquée directement. L'équilibre instauré initialement entre les forces tendant à provoquer la diffusion des porteurs positifs, et les forces contraires dues à la barrière de potentiel dans la jonction se rompt, permettant ainsi aux trous de la traverser dans le sens opposé.

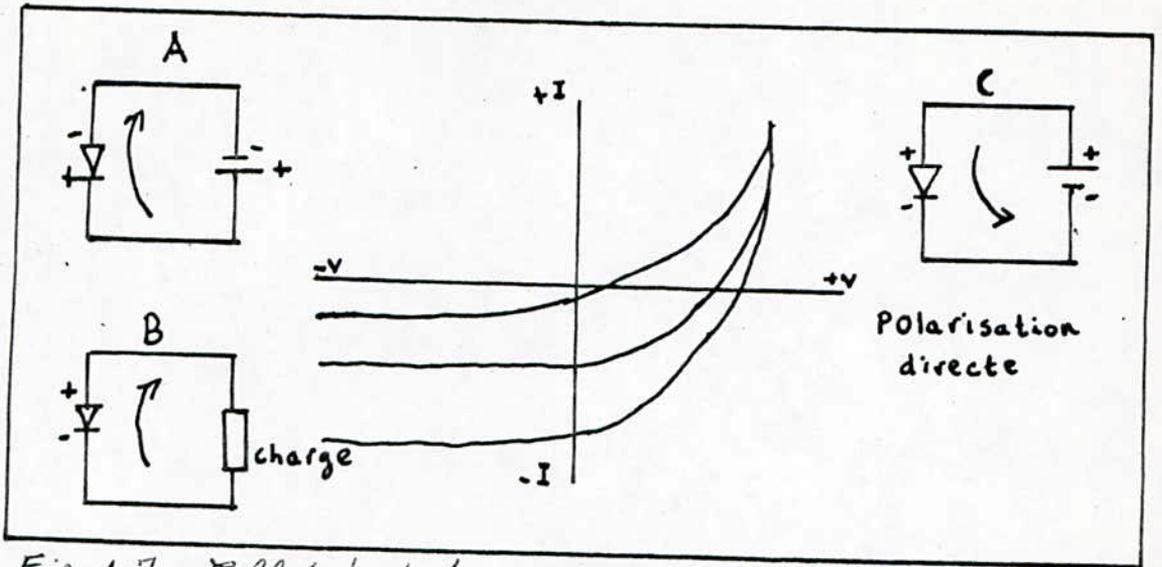


Fig. 1-7 : Effet de la lumière sur le Comportement d'une jonction PN

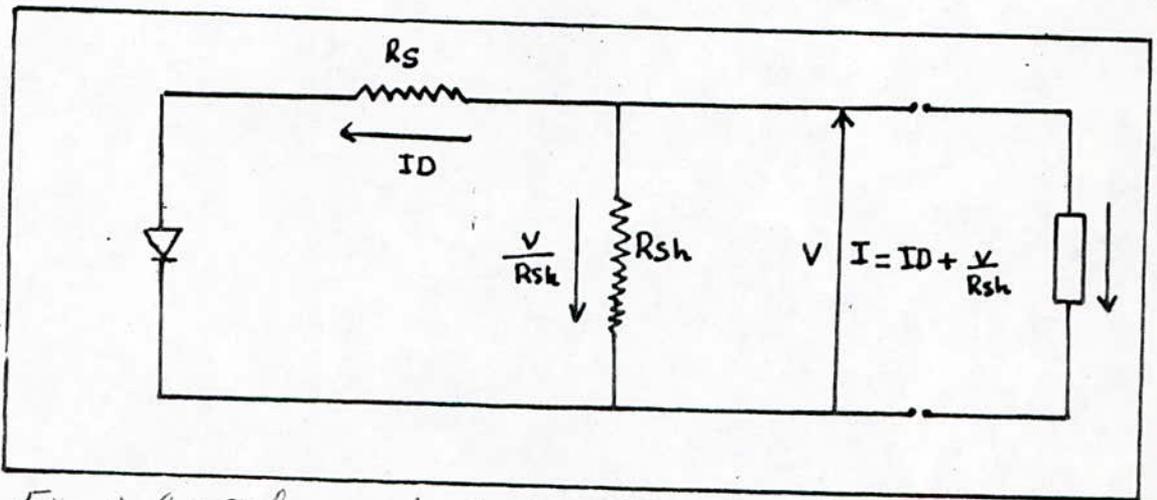


Fig. 1-8 : Schema équivalent à l'obscurité

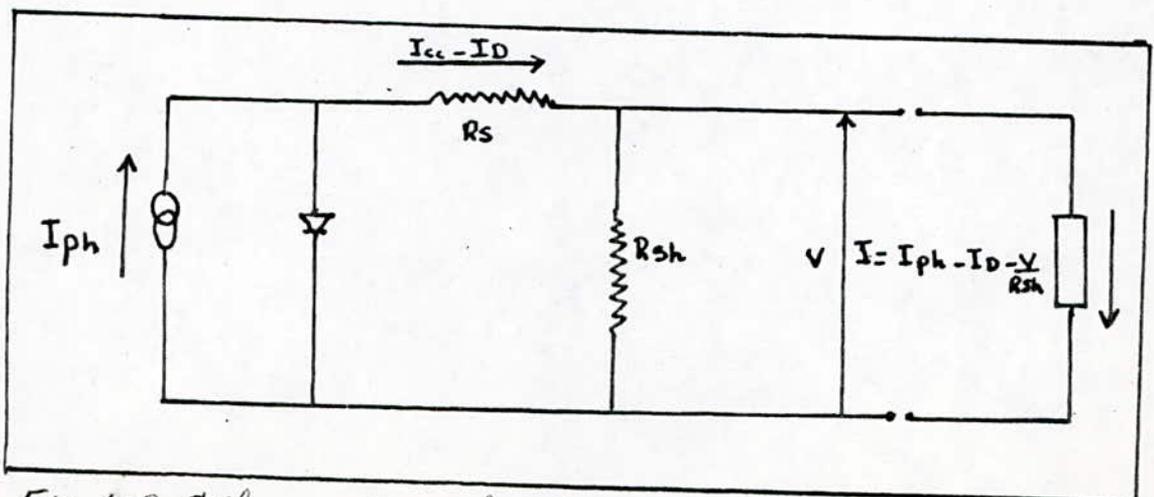


Fig. 1-9 : Schema équivalent sous éclaircissement

Il se crée un courant relativement élevé dans tout le circuit. On devra remarquer que les cellules solaires au silicium, peuvent très difficilement travailler en dehors de la zone (B), ceci à cause de leur structure. En particulier la tension inverse qu'elles peuvent supporter est très faible, et surtout que l'on devra les protéger par une diode de barrage mise en série de façon à ce qu'une tension inverse ne puisse les détériorer.

2.6 Schema equivalent d'une cellule solaire

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 figures 1-8 et 1-9 respectivement lors de son fonctionnement à l'obscurité et sous éclairage, le courant appliqué à une charge par la cellule et la différence entre le photocourant et le courant de diode.

A) A l'obscurité

Le flux est nul, donc le photocourant est nul alors l'expression du courant d'après la figure 1-8 sera:

$$I = I_0 (\exp(q(v - R_s I) / n \cdot K \cdot T) - 1) + v / R_{sh} \quad /3/$$

avec:

I_0 : est le courant de saturation

R_s : est la résistance série

R_{sh} : est la résistance shunt

T : température en degré Kelvin

n: coefficient d'idéalité

K: constante de Boltzman

q: charge de l'électron

Pour une cellule solaire idéale, $R_s=0$, $R_{sh}=\infty$ et $n=1$; l'expression du courant à l'obscurité devient:

$$I=I_0 (\text{EXP}(qv/KT) - 1)$$

Le resultat de la simulation numérique de ce modèle est représenté par la figure 1-10, qui montre que la cellule à l'obscurité se comporte comme une simple diode. (voir listing Annexe 2)

B) Sous éclairement

On a le meme schema equivalent dans lequel on introduit un générateur de courant (photocourant), alors l'expression du courant devient:

$$I=I_{ph} - I_0 (\text{EXP}(q(v+R_s.I)/n.K.T) - 1) - v/R_{sh}$$

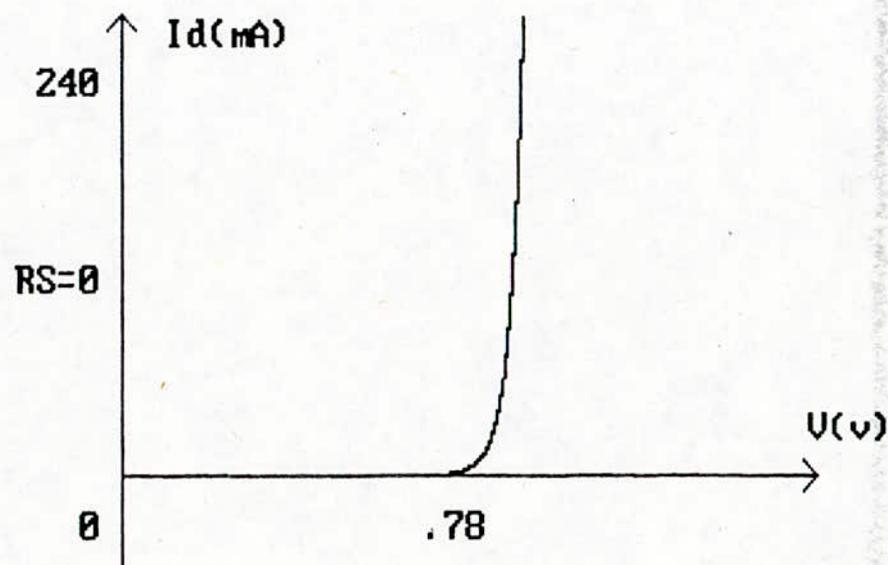
I_{ph} étant le courant de court-circuit

Dans le cas d'une cellule solaire idéale $R_s=0$, $R_{sh}=\infty$ et $n=1$.

L'expression du courant sous éclairement devient donc:

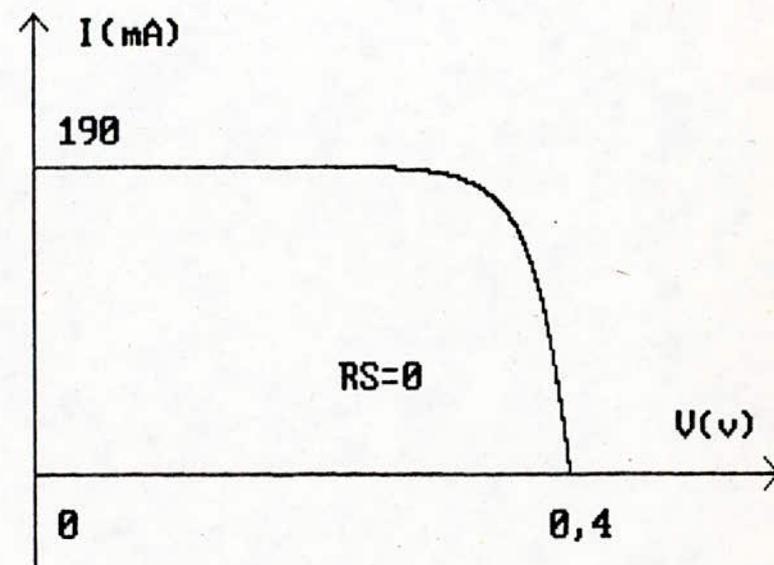
$$I=I_{ph} - I_0 (\text{EXP}(qv/K.T) - 1)$$

Le resultat de la simulation numérique de ce modèle (Fig.1-11), montre d'une part que la cellule solaire travaille en génératrice, et d'autre part que le courant garde une valeur constante et proportionnelle au flux solaire; puis ce courant chute brusquement au voisinage du circuit ouvert. (voir listing Annexe 2)



 * COURBE DE $I_d = F(U)$ D'UNE CELLULE *
 * SOLAIRE A L'OBSCURITE' $T = 17^\circ\text{C}$ *

Fig 1 10



 * COURBE DE I FONCTION DE U D'UNE *
 * CELLULE SOAIRE $T = 17^\circ\text{C}$ *

Fig 1 11

2.7 Paramètres caractéristiques

2.7.1 Résistance serie

Elle est due aux contacts des électrodes avec le semiconducteur et à la résistance interne de ce dernier. On pourrait envisager sa réduction en augmentant la couche (N), mais ceci diminuerait la probabilité d'absorption des photons incidents; on s'arrange pour optimiser la couche (N).

D'autre part on dépose des contacts sous forme de grilles sur la surface extérieure 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 serie équivalente, donc augmente la puissance optimale, mais diminue le courant de court-circuit car la surface active a diminuée.

1) Description du modèle

A partir de l'expression générale du courant débité dans la charge:

$$I = I_{ph} - I_0 (\exp(q(v + R_s \cdot I) / n \cdot K \cdot T) - 1) - v / R_{sh}$$

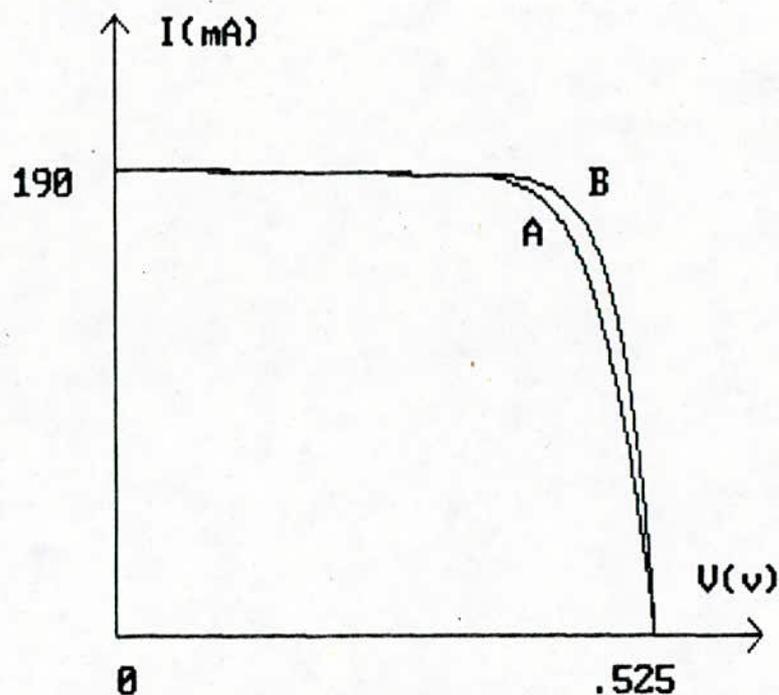
on décompose ce modèle en deux parties:

-cas où R_{sh} est très grande; d'où le modèle suivant:

$$I = I_{ph} - I_0 (\exp(q(v + R_s \cdot I) / n \cdot K \cdot T) - 1)$$

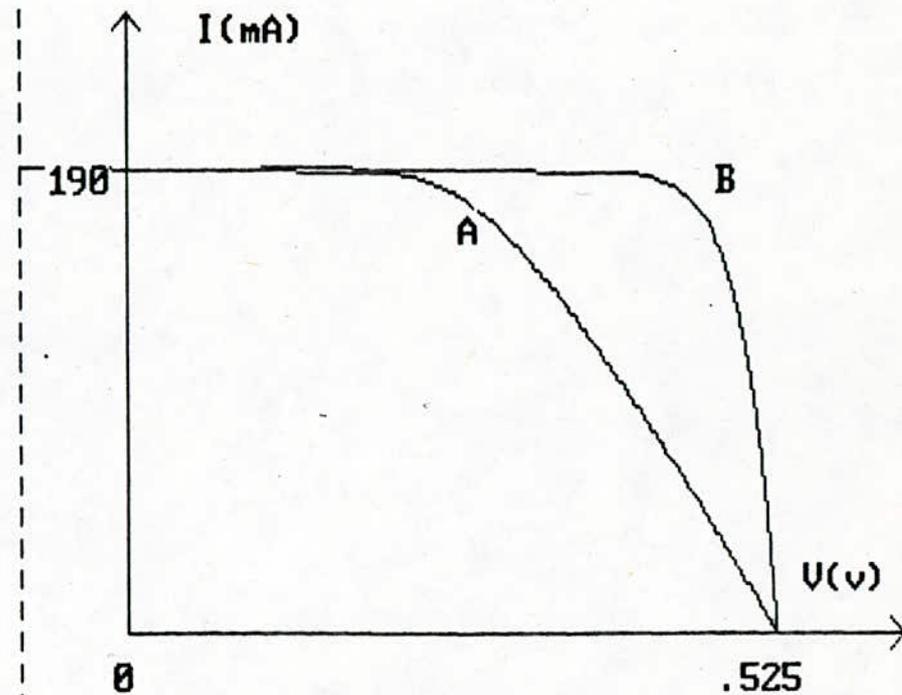
-cas où la cellule est idéalisée, c'est à dire $R_s = 0$, $R_{sh} = \text{infini}$ et $n = 1$:

$$I = I_{ph} - I_0 (\exp(qv / K \cdot T) - 1)$$



 * A: CARACTERISATION D'UNE CELLULE *
 * SOLAIRE POUR $RS1=0,0001$ OHMS *
 * B: CARACTERISATION D'UNE CELLULE *
 * SOLAIRE POUR $RS=0$ OHMS *

Fig. 1-12



 * A: CARACTERISATION D'UNE CELLULE *
 * SOLAIRE POUR $RS2=10*RS1$ *
 * B: CARACTERISATION D'UNE CELLULE *
 * SOLAIRE POUR $RS=0$ OHMS *

Fig. 1-13

Le resultat de la simulation numérique dans les deux cas est donné par les courbes A et B des figures 1-12 et 1-13.

2) Interprétation de la simulation

Dans le cas de la figure 1-12 ,l'effet de la resistance seriè ($R_s = 0,0001\Omega$), influe sur l'allure de la courbe malgre sa très faible valeur.Ceci à pour consequence le déplacement du point de fonctionnement,d'où la diminution de la puissance optimale de la cellule.

D'autre part dans le cas de la figure 1-13 et en prenant $R_s = 10.R_s$, la diminution de la puissance optimale est beaucoup plus importante. Ce resulta nous confirme l'effet préponderant de la résistance serie (voir listing en Annexe 3).

2.7.2 Résistance shunt et facteur d'idealité

La résistance shunt est due aux fissures sur la surface de la cellule,elle devient le siege de phénomènes physiques assimilables à une résistance au niveau de la jonction,cette résistance augmente lorsque la cellule travaille sous éclairément.

La valeur de la résistance shunt étant de quelques dizaines de mega ohms,son effet est donc négligeable.On peut ainsi simplifier les expressions ennoncées auparavant en posant $v/R_{sh}=0$.En ce qui concerne le facteur d'idéalite dans le cas de la jonction p-n au silicium,il est égal à 1 pour les faibles débits et 2 pour les débits de courants plus importants.

2.8 Association de cellules solaires

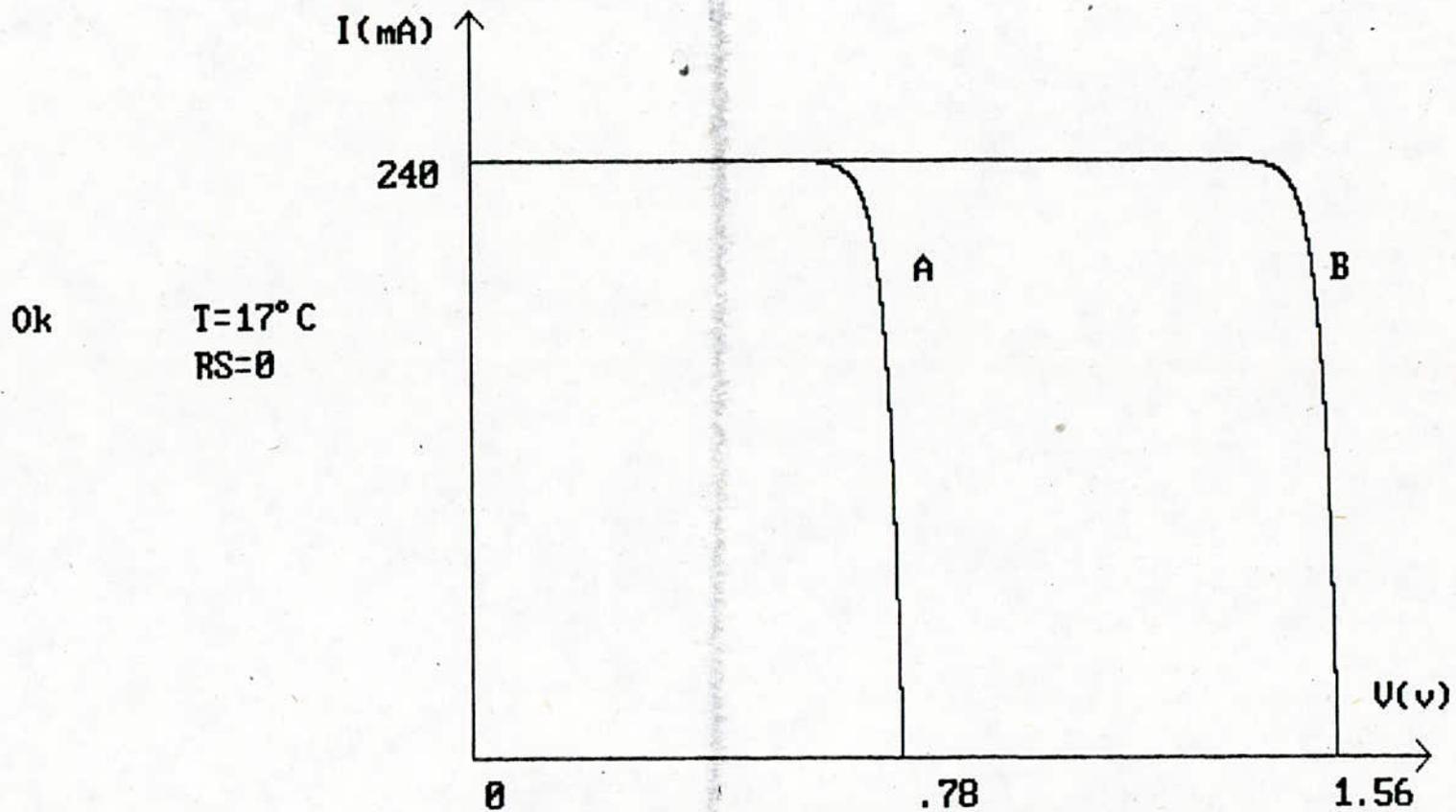
La puissance délivrée par une seule cellule solaire est de quelques centaines de milliwatts. Pour obtenir de fortes puissances, il est nécessaire d'associer un grand nombre de cellules. Cette association ne doit pas affecter le point de fonctionnement.

2.8.1 Association serie

Pour ce type d'association, la tension totale obtenue est la somme des tensions V_m de chaque cellule et le courant prend la valeur la plus basse des courants unitaires I_m . On doit grouper en serie les cellules ayant des valeurs de I_m voisines pour qu'elles conservent le point de fonctionnement optimal (catégorisation des cellules). Pour l'association en serie, il a été procédé à une simulation numérique dont le modèle est basé sur l'équation (2). Les résultats sont représentés par la figure 1-14 (listing en Annexe 4) qui montre en effet que lors de l'association serie les tensions s'ajoutent pour des courants débités très proches.

2.8.2 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 , alors que le courant est la somme des courants unitaires (I_m). Pour éviter que les cellules ayant de fortes tensions ne débitent dans les autres, on choisit celle dont les valeurs de V_m sont voisines.



 * A: CARACTERISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE SEUL*
 * B: ,, DE DEUX CELLULES SOLAIRES *
 * IDENTIQUES EN SERIE SOUS UN FLUX CONSTANT. *

Fig. 1-14

CHAPITRE II

1-1 Système photovoltaïque

1-1-1 Généralités

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs organes qui sont :

- Le générateur photovoltaïque
- Le stockage
- Le régulateur
- Le convertisseur CC/CA
- La charge

Dans ce qui suit nous verrons séparément chacun de ces organes :

(voir figure 2-1)

1-2 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose de un ou plusieurs modules. Dans la pratique il est rare d'utiliser un seul module, vu que sa puissance est relativement faible ($P_{max}=40W$). Ainsi dans la plupart des installations photovoltaïques on est amené à coupler plusieurs modules entre eux afin de satisfaire les besoins spécifiques de la consommation (charge). Ce couplage a lieu lorsque les paramètres tensions et courants d'un module ne sont pas suffisantes pour fournir la puissance nécessaire à la charge.

1-3 Module photovoltaïque

Les modules solaires sont constitués de cellules montées généralement en série, ces cellules sont choisies de façon à ce que leurs caractéristiques soient pratiquement identiques (notamment en courant)

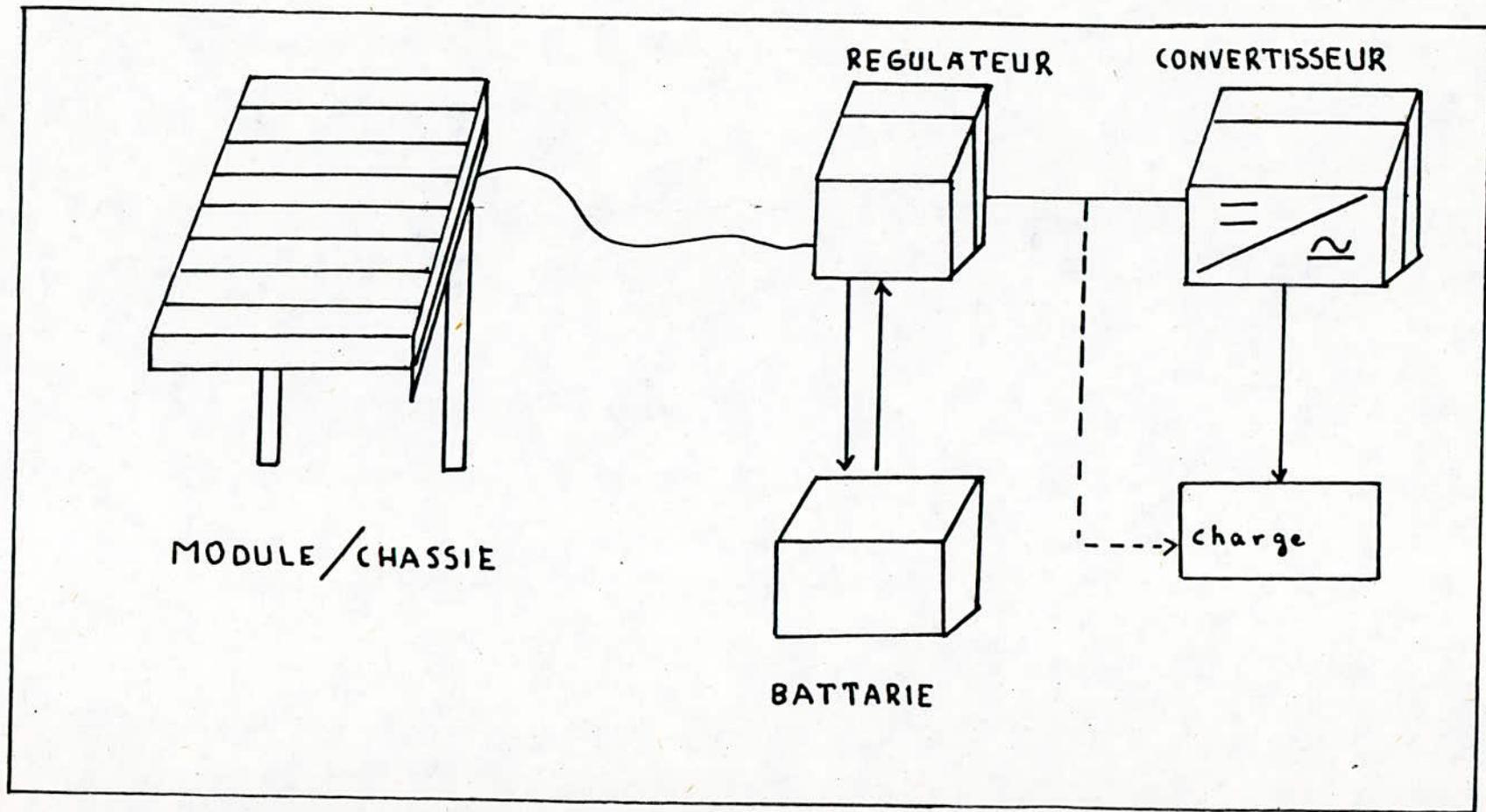


Fig. 2-1 Système photovoltaïque

afin d'éviter les problèmes de surchauffe, du à la différence de leurs caractéristiques ce qui peut provoquer leurs destruction. Remarque: Dans nos études expérimentales on a utilisé des modules photovoltaïques (type Arco-solar Model M53).

1-3-1 Description du module solaire (M53)

Le module solaire (M53) comporte 36 cellules au silicium monocristallin carrées en séries, ayant 9,5 cm de cote chacune. On dispose de 37 grilles parallèles sur la face active de la cellule, qui servent à réduire la résistance série de la photopile.

Les cellules sont recouvertes d'une couche antireflet pour diminuer au maximum les pertes par réflexion, cette couche doit être mince et transparente aux radiations utiles à l'effet photovoltaïque. Les connexions entre les cellules sont faites par soudure automatique, cette méthode supprime le circuit imprimé et diminue le temps de fabrication.

Enfin ce module sera protégé par un châssis en aluminium anodisé.

1-3-2 Etude théorique du module photovoltaïque (M53)

1) Fonctionnement

Le principe de fonctionnement du module solaire est similaire à celui de l'ensemble des cellules le constituant.

2) Schéma équivalent du module photovoltaïque (M53)

Pour rendre compte du fonctionnement du module solaire; on trace le schéma équivalent qui est représenté par la figure 2-2.

D'après cette figure on déduit que:

$$I_{tot} = I_{r1} = I_{ph1} - I_{D1} = \dots = I_{phj} - I_{Dj} = I_{36} = I_{ph36} - I_{D36}$$

La tension aux bornes de la j ème cellule est:

$$V_j = U_{Dj} - r_j \cdot I_{rj} \quad \text{avec} \quad I_{Dj} = f(U_{Dj})$$

I_{rj} : est le courant qui circule dans la résistance serie de la j ème cellule

I_{phj} : est le courant de court-circuit de la j ème cellule

I_{Dj} : est le courant du diode de la j ème cellule

U_{Dj} : est la tension au borne de la diode de la j ème cellule

La fonction $I_D = f(U_D)$, définit la caractéristique de la diode D a l'obscurité.

La condition de court-circuit des 36 cellules en series est:

$$\sum_{j=1}^{36} V_j = \sum_{j=1}^{36} (U_{Dj} - r_j \cdot I_{rj}) = 0 \quad \text{et} \quad I_{tot} = \frac{\sum_{j=1}^{36} U_{Dj}}{\sum_{j=1}^{36} r_j}$$

D'après les équations précédentes on deduit:

$$\sum_{j=1}^{36} V_{oc}^{(j)} < V_{oc} \text{ tota}$$

V_{oc} : etant la tension à vide de la j ème cellule

-Pour déterminer l'expression du courant de court-circuit dans un module photovoltaïque on trace la figure 2-3.

D'après cette figure nous pouvons écrire les relations suivantes:

$$V = +V_1 = -V_2 < 0 \quad (1)$$

$$I = V_1 / R_1 - I_{ph}^{(1)} \quad (2)$$

$$R_1 = K T / q I_0^{(1)} \cdot \text{EXP}(q \cdot V_{oc}^{(1)} / K \cdot T) \quad (3)$$

$$I_2 = (q \cdot V_{oc}^{(2)} / K \cdot T) \cdot I_{ph}^{(2)} \quad (4)$$

Schema équivalent d'un module photovoltaïque

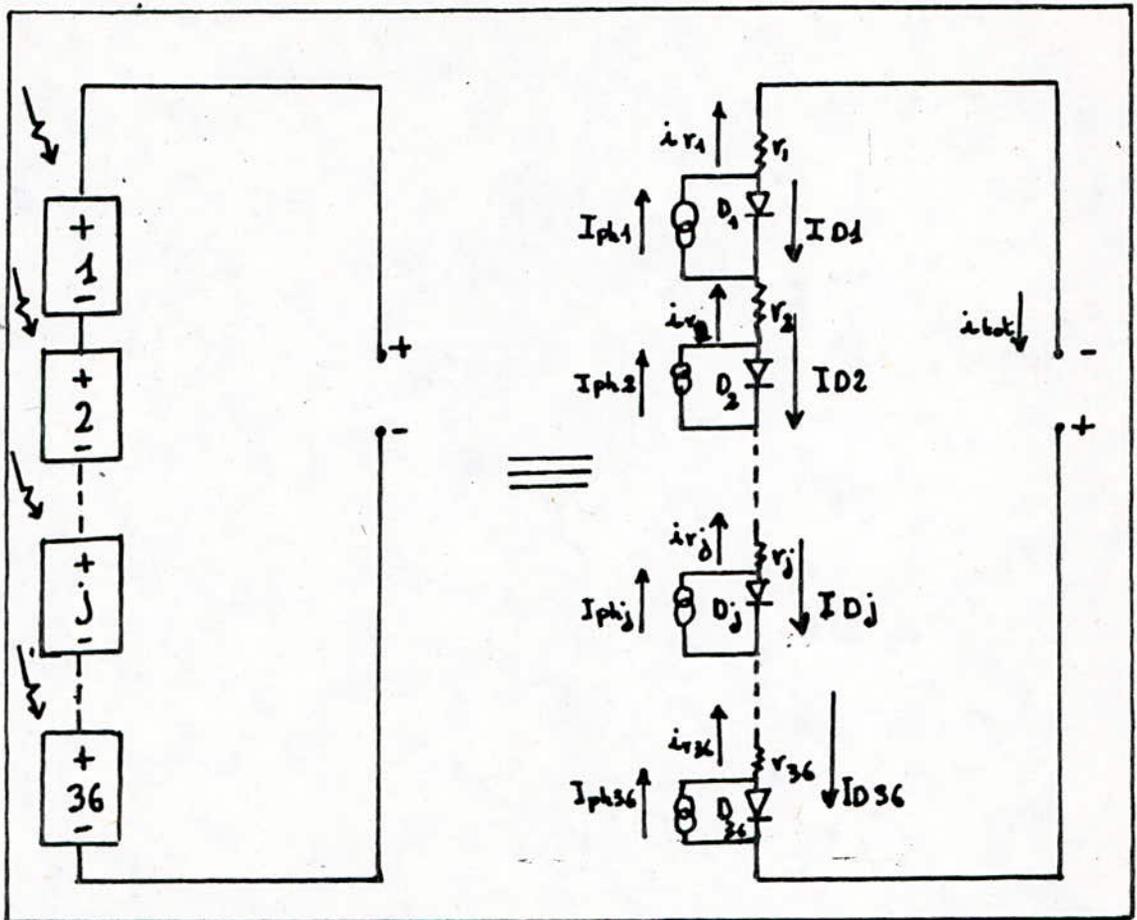


Fig. 2-2

Schema équivalent de deux cellules en court-circuit

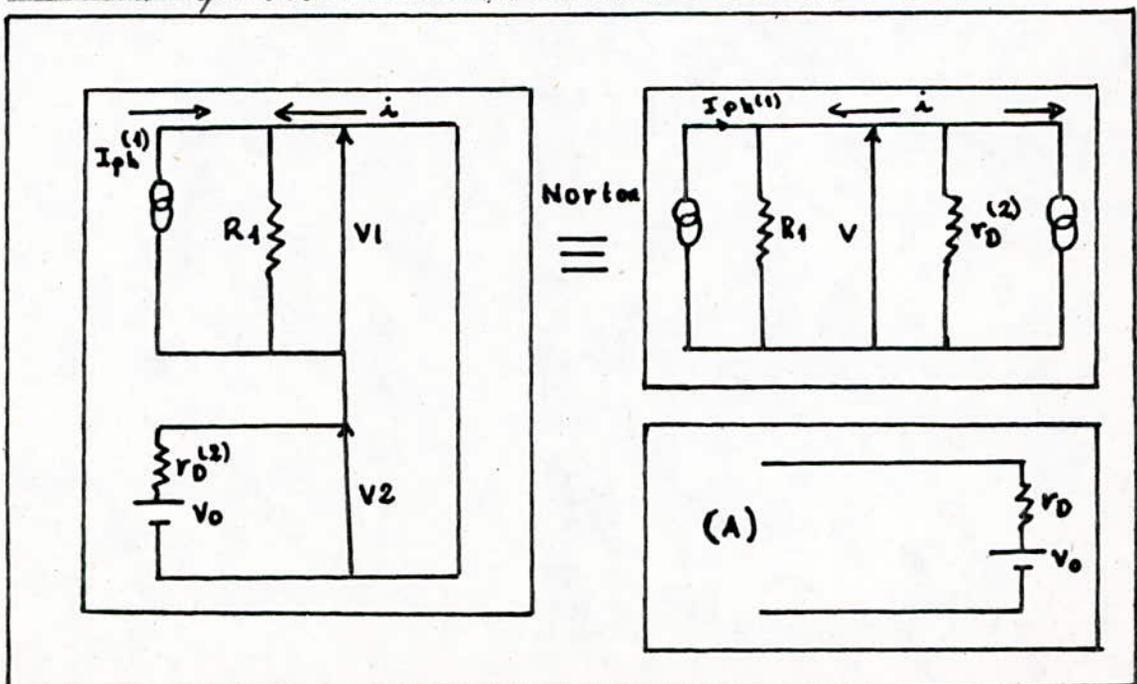


Fig. 2-3

$$I \approx V_2 / r_D - I_2 \quad (5)$$

avec

V1: est la tension aux bornes de la cellule 1

V2: ,, ,, ,, ,, 2

I⁽¹⁾_{ph}: est le courant de court-circuit de la cellule 1

I⁽²⁾_{ph}: ,, ,, ,, ,, 2

V⁽¹⁾_{oc}: est la tension de circuit ouvert de la cellule 1

V⁽²⁾_{oc}: ,, ,, ,, ,, 2

R1: est la résistance parallèle de la cellule 1

R2: ,, ,, ,, ,, 2

rD: est la résistance de la diode

Ces relations conduisent au resultat suivant:

-dans le cas de deux cellules en serie à caracteristiques voisines:

$$I_{ph} = (R_1 \cdot I_{ph1} + R_2 \cdot I_{ph2}) / (R_1 + R_2) \quad (1) \quad /4/$$

On peut donc déduire, dans le cas ou R1=R2=...=Rn, et pour un module de n. cellules, d'après la relation(1) que:

$$I_{ph} = \sum_{i=1}^n I_{ph}^{(i)} / n$$

n étant le nombre de cellules en serie dans un modules photovoltaïque, l'erreur relative étant de 10 %.

Pour n=36:
$$I_{ph} = \sum_{j=1}^{36} I_{ph}^{(j)} / 36 \quad (2)$$

I_{ph}: est le courant de court-circuit du module

I_{ph}: ,, ,, ,, ,, de la j eme cellule

Or

$$I_{ph}^{(j)} = \alpha_j \cdot \phi_j \cdot S \quad (3) \quad /5/$$

φ_j: est le flux lumineux

S: est la surface de la cellule

α: est le coefficient de création du photocourant qui est défini

par l'expression suivante:

$$\alpha(T) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,224 \quad (W)^{-1} \quad /5/$$

ou T est la température de la jonction p-n en °K.

D'après l'équation (3) et en supposant que S et ϕ_s soient constants et pour une température constante, α aussi sera constant pour les n cellules; ainsi I_{ph} devient constant, ce qui permet de déduire d'après l'équation (2) et pour une association serie

$$I_{ph}(\text{module}) = I_{ph}(\text{cellule})$$

Remarque: une photopile pourra être représentée dans ce cas par le schema équivalent de la figure 2-3-A.

3) Simulation numérique

Le resultat de la simulation numérique qui est donné par la figure 2-4 se base sur le modèle suivant:

$$I = I_{ph} - I_0 (\exp(qv/2.K.T) - 1)$$

$$I_0 = I_{ph} / (\exp(qV_{oc}/2.K.T) - 1)$$

avec les valeurs suivantes:

$$R_s = 0, \quad R_{sh} = \text{infini}$$

$$V_{oc} = \sum_{j=1}^{36} V_{oc}^{(j)}$$

$$I_{ph}(\text{module}) = I_{ph}(\text{cellule})$$

ou

V_{oc}: est la tension de circuit ouvert

R_s: est la résistance serie

R_{sh}: est la résistance shunt

I_{ph}: est le courant de court-circuit

On remarque que la puissance optimale obtenue est de 41,73 W, sous un flux de 860 W/m² et une temperature de 25°C.

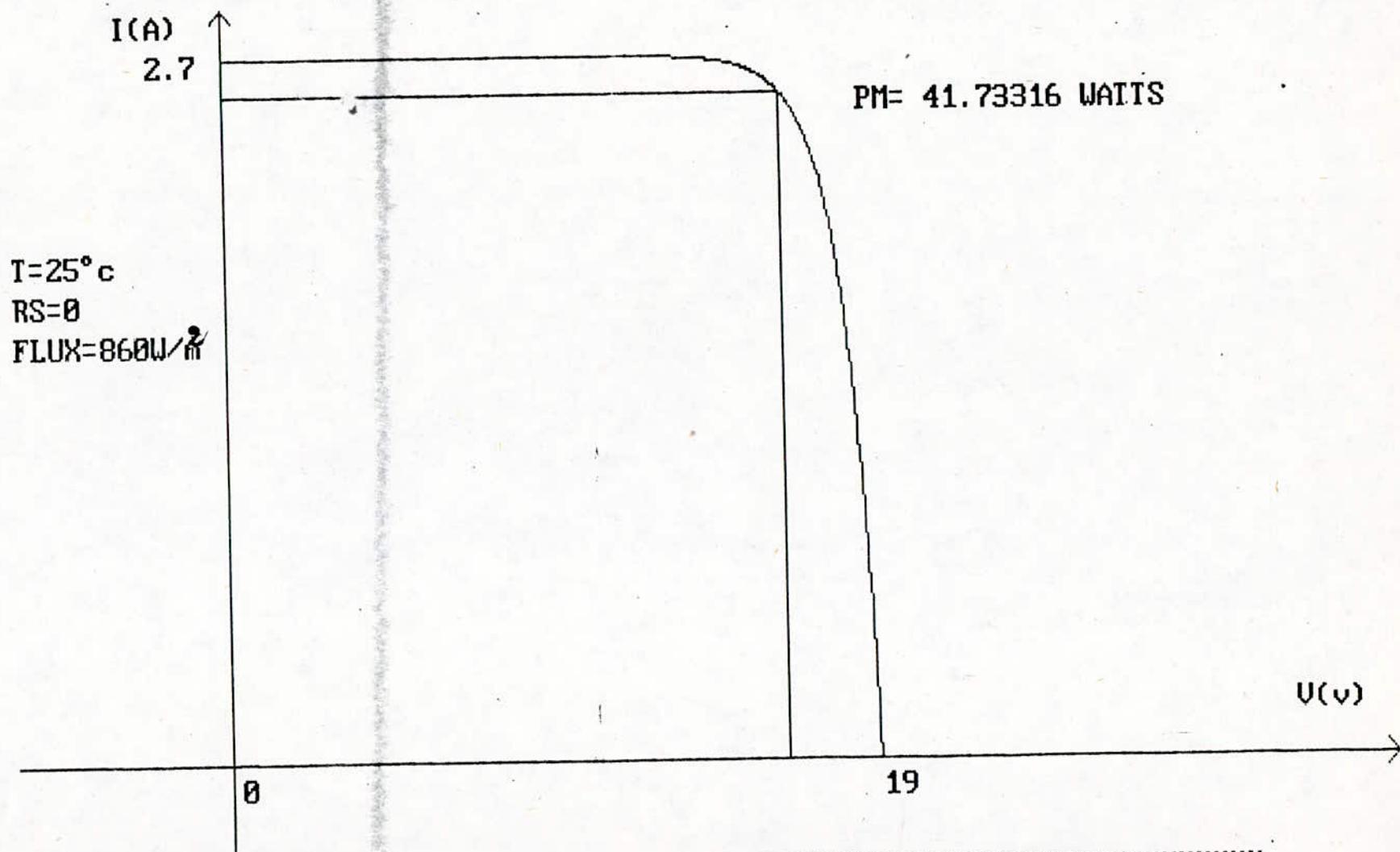


Fig. 2.4

 LA PUISSANCE TOTALE D'UN PANNEAU A 36 CELLULES EST DE 48.73955 WATTS *

1.3.3 Etude expérimentale du module photovoltaïque (M53)

1) Installation du module

Le montage des modules photovoltaïques doit tenir compte de plusieurs paramètres liés au site. Parmi ceux-ci citons les plus importants à savoir:

- Une orientation plein sud pour le cas de l'hémisphère nord.
- Une inclinaison optimisée des modules qui est fonction de la latitude considérée. En générale on peut adopter une inclinaison environ égale à la latitude (pour ALGER $\approx 40^\circ$).
- Un espace dégagé autour des modules de manière à éviter les obstacles aux rayons solaires, et cela pour toute la journée.

2) Manipulation

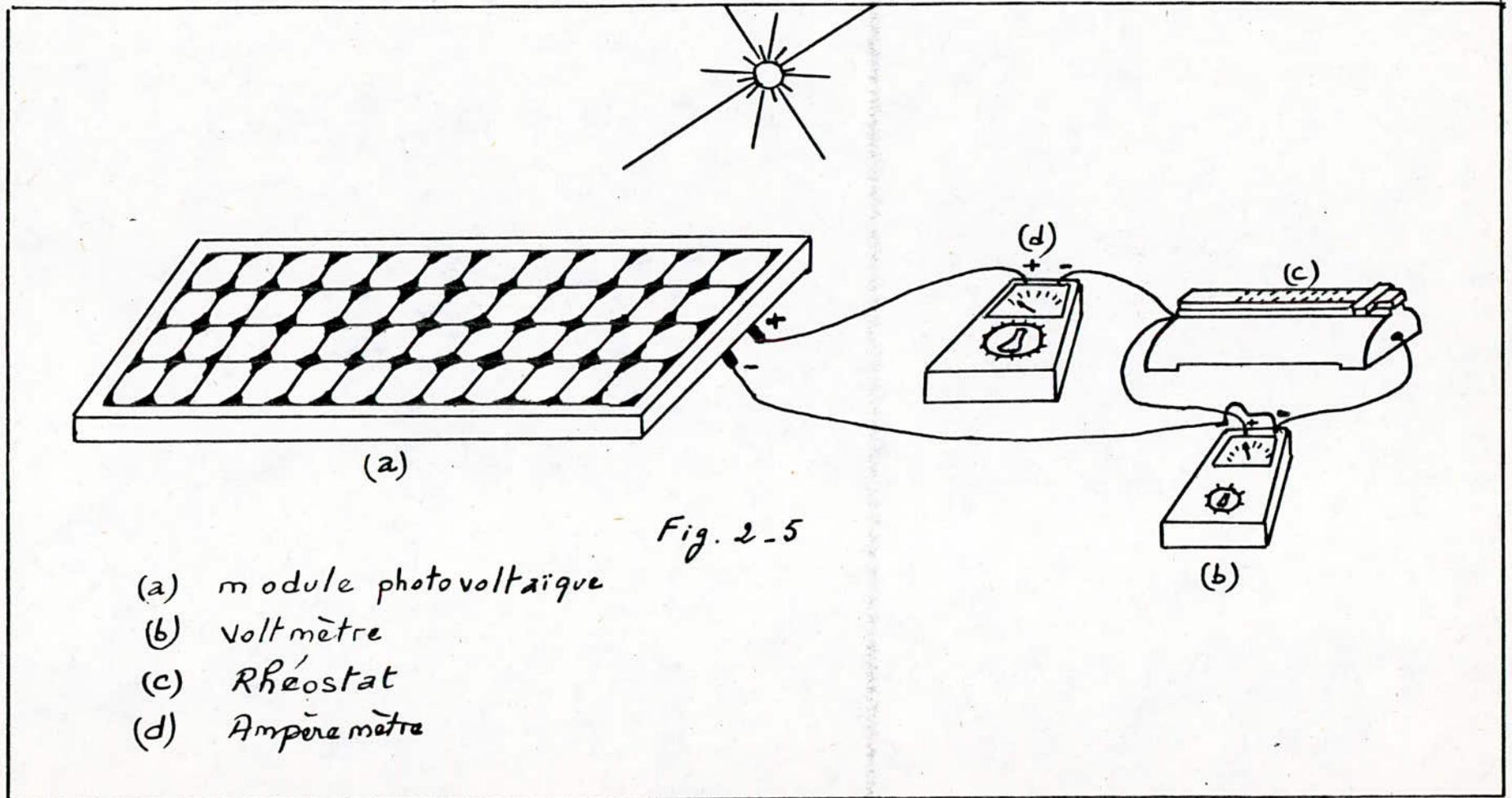
Le but de cette manipulation est de déterminer la caractéristique d'un module photovoltaïque expérimentalement. On utilise pour cela le montage de la figure 2-5.

Lors de cette manipulation le flux solaire est considéré constant, ainsi que la température ambiante. Pour avoir ces conditions les relevés ont été effectués pour une journée parfaitement ensoleillée et dans la période où la variation du flux est faible, à savoir entre 12h 30 et 13h 30.

Pour déterminer les caractéristiques du module (M53) on procède comme suit:

- le module débite dans une charge résistive (rhéostat)
- on fait varier la valeur de la charge (rhéostat)
- on mesure pour chaque variation la valeur de la tension et du courant.

Caractérisation (Courant-tension) d'un module photovoltaïque



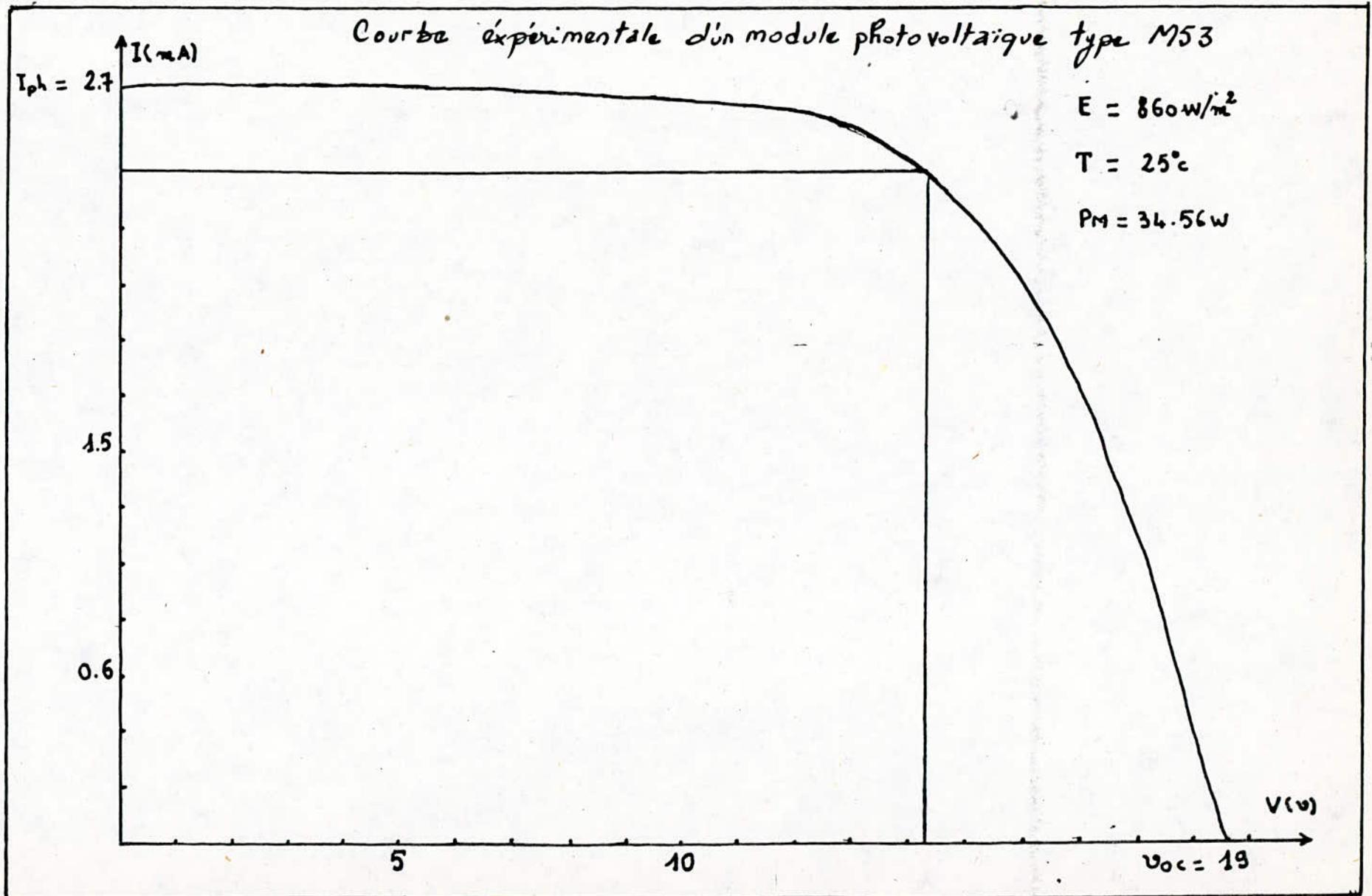


Fig. 2-6

3) Interprétation des résultats

La figure 2-6 qui donne la courbe (I-V) expérimentale du module (M53), montre que celle-ci a la même allure que celle d'une cellule solaire. Dans le tableau ci dessous on fait une comparaison entre le résultat déterminé expérimentalement et le résultat donné par le constructeur.

	: Resultats expérimentaux	: Resultats donnés	:
	:	: par le constructeur	:
	-----	-----	-----
Flux	: 860 W/m ²	: 860 W/m ²	:
	-----	-----	-----
I _{ph}	: 2,7 A	: 2,7 A	:
	-----	-----	-----
V _{oc}	: 19 V	: 21,7 V	:
	-----	-----	-----
T	: 23 °C	: 25 °C	:
	-----	-----	-----
P _{max}	: 34,56 W	: 40 W	:
	-----	-----	-----

Nous remarquons que les résultats expérimentaux diffèrent peu de ceux donnés par le constructeur.

Cependant l'écart existant entre la puissance expérimentale et la puissance donnée par le constructeur s'explique par le fait que ces derniers sont théoriques et ne tiennent pas compte de la résistance série et de la variation du flux et de la température.

Remarque: en comparant les deux figures 2-4 et 2-6, on remarque que l'écart entre la puissance débitée par le module respectivement expérimentale et théorique est: $41,73 - 34,56 = 7,17$ W, soit 17 %.

1-4 Couplage serie-parallèle des modules photovoltaïques

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de modules connectés entre eux. Ce couplage est effectué en fonction de la tension sous laquelle on désire alimenter les charges. Celle-ci est généralement de 12 V ou de 24 V pour les systèmes de faible puissance, et elle croît avec la puissance moyenne consommée; en effet pour une puissance donnée, il est préférable de travailler sous des tensions élevées afin de diminuer les intensités (pertes et coût des lignes).

Voir figure 2-7.

1-5 Le stockage

Le caractère discontinu de l'énergie solaire nécessite un stockage de l'énergie produite, pour son utilisation lors d'un déficit du rayonnement (nuit ou temps couvert). Le stockage peut être réalisé dans des accumulateurs chimiques, ou l'énergie électrique est convertie et stockée grâce à des réactions chimiques réversibles.

Énergie électrique --- Charge ---> Réaction chimique --- Décharge ---
---> Énergie électrique.

Un cycle d'utilisation est constitué d'une charge suivi d'une décharge.

1.5.1 Utilisation d'un accumulateur

L'utilisation d'un accumulateur est conditionnée par les caractéristiques suivantes:

- la tension d'utilisation

- la capacité, c'est à dire la quantité d'énergie électrique restituée par l'accumulateur qui s'exprime en A.H ou W.H

- le rendement qui est définie par l'expression suivante:

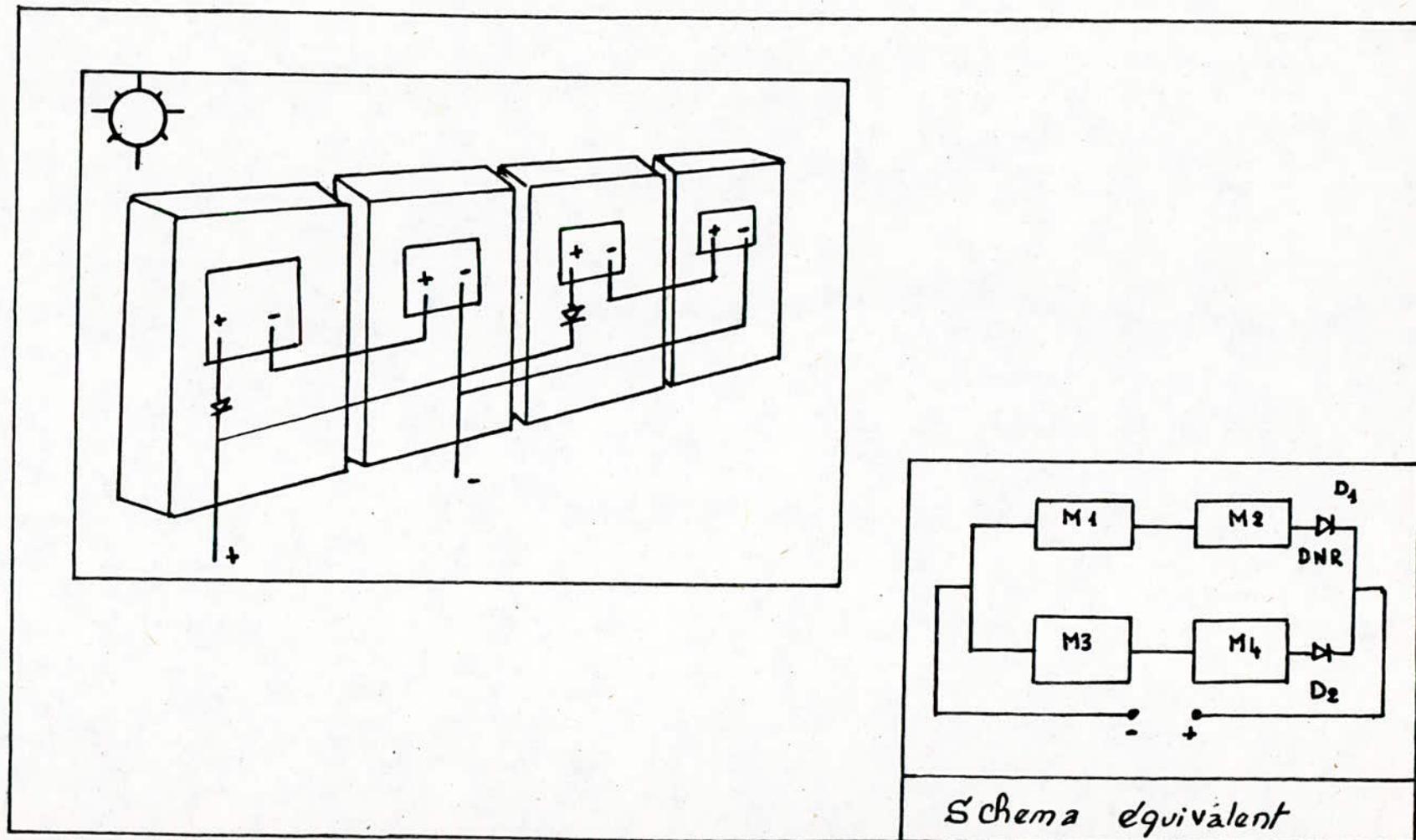


Fig. 2-7

Couplage serie - parallèle des modules photovoltaïques

Schema équivalent

Énergie électrique restituée par l'accumulateur

$\eta = \frac{\text{-----}}{\text{-----}}$

Énergie fournie à l'accumulateur

-la durée de vie: un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ses caractéristiques ne se détériorent, ainsi sa durée de vie sera égale au nombre de cycles complets avant sa détérioration

-le taux d'auto-décharge: c'est le taux de "fuite" du non fonctionnement

Quantité d'énergie perdue sans utilisation

$t_{ad} = \frac{\text{-----}}{\text{-----}}$

Quantité d'énergie stockée

L'auto-décharge représente en général 2 à 3 % de la capacité totale de l'accumulateur.

1.5.2 Les principaux types d'accumulateurs utilisés dans les

systèmes photovoltaïques

Pour les systèmes photovoltaïques il est recommandé d'utiliser des batteries, qui sont maintenues constamment en charge presque complète et ne subissent une forte décharge qu'occasionnellement, ces batteries sont conçues pour présenter une très faible auto-décharge, elles sont bien adaptées aux systèmes photovoltaïques. Il en existe deux sortes:

1) Batteries au plomb-calcium

Ces batteries n'exigent aucun entretien, leurs taux d'auto-décharge est faible (2 à 3 % de leur capacité par mois).

2) Batteries au plomb pur ou plomb doux

Ces accumulateurs dits aussi à plaques tubulaires sont souvent

produits en élément de 2V. La capacité de ces éléments peut être de quelques milliers d'A.H. Il suffira donc de monter en série des éléments de capacité suffisante pour obtenir la tension nécessaire. Le taux d'auto-décharge est également très faible (2 à 3%). Ces batteries nécessitent un entretien périodique.

1-6 Le régulateur

Pratiquement les systèmes photovoltaïques doivent tous comporter une régulation de la charge et décharge de la batterie. En effet la batterie est l'un des éléments les plus fragiles d'un système photovoltaïque, sa durée de vie est étroitement liée à la façon dont elle est chargée et déchargée. Une longévité raisonnable n'est atteinte que par une protection soignée contre la surcharge ou la décharge trop profonde (voir figure 2-8).

1-6-2 Indicateur de l'état de charge et de décharge d'une batterie

Le meilleur indicateur de l'état de charge d'une batterie serait une paire de comparateurs électriques mesurant directement les quantités d'électricité y entrant et en sortant, un tel dispositif est envisageable mais exclu sur le plan pratique car il est trop cher et délicat à étalonner; le degré d'acidité ou plutôt la densité de l'électrolyte est théoriquement un excellent indicateur de l'état de charge, mais souvent cet indicateur ne prend sa valeur caractéristique que plusieurs jours après la charge, il faudrait agiter

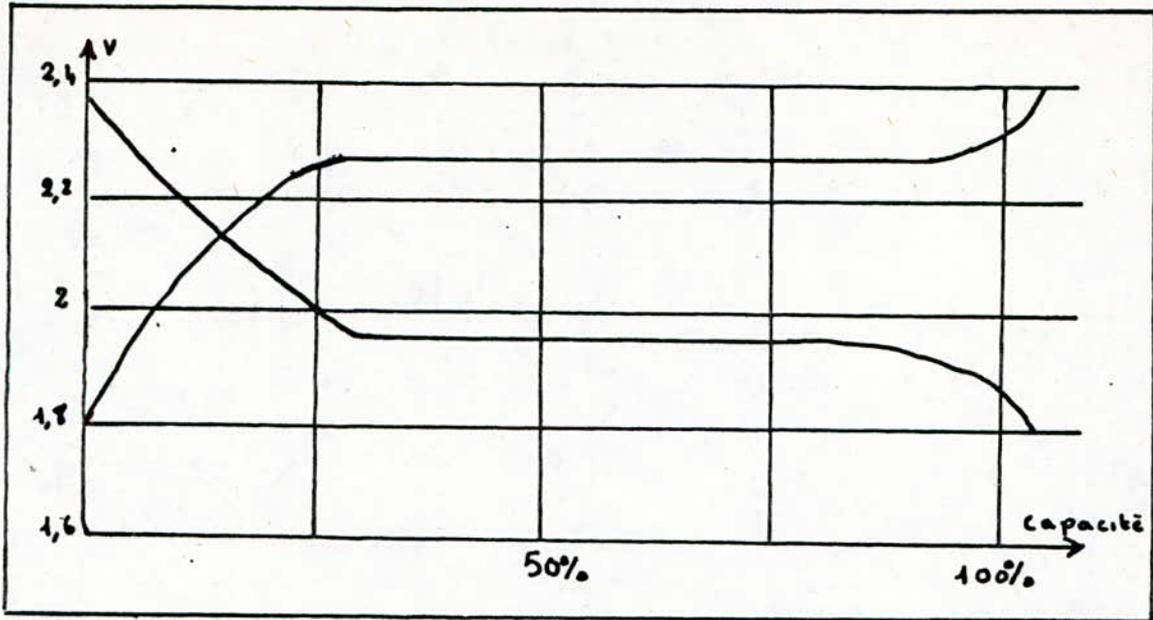


Fig. 2.8 : Tension de charge et decharge d'un accumulateur

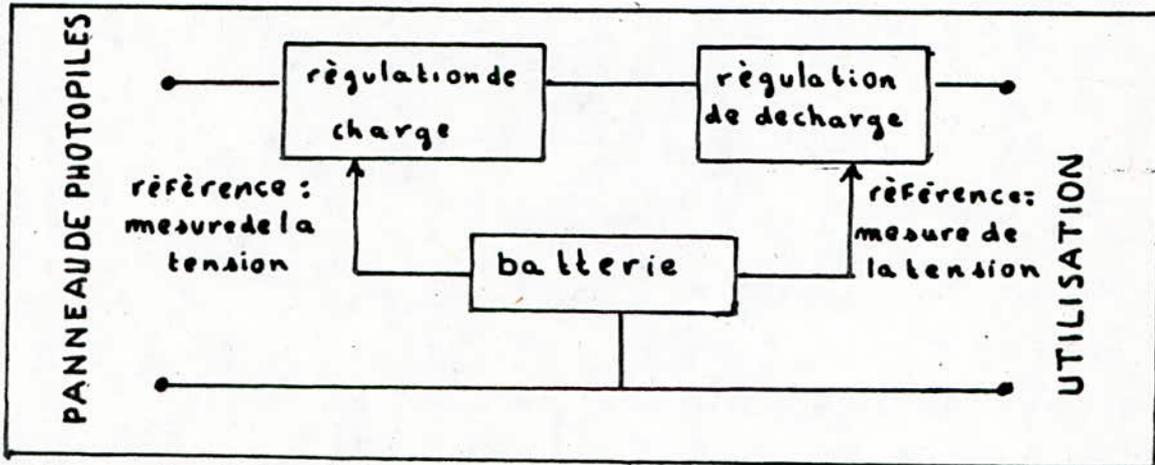


Fig. 2.9 : Régulation du fonctionnement d'une Batterie

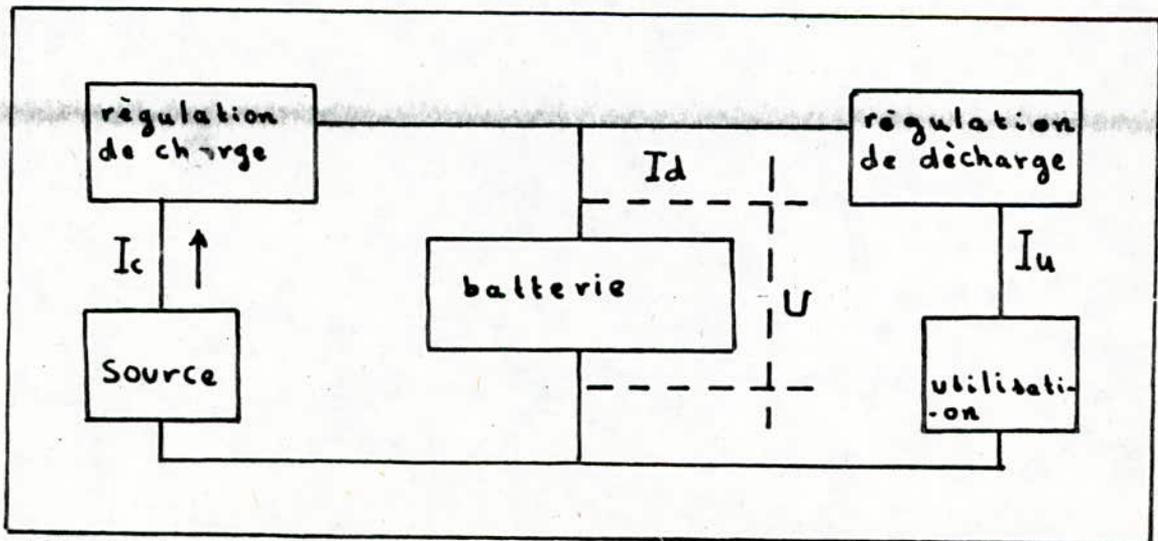


Fig. 2.10 : Tension aux bornes d'une Batterie

agiter l'électrolyte pour faire une bonne mesure (voir figure 2-9).
Finalement le meilleur indicateur est la tension aux bornes de la batterie. Cette tension est mesurée alors que la batterie est en cours de charge ou de décharge (voir figure 2-10). Ceci se fera d'après le processus suivant:

- lorsqu'on interrompt la décharge $I_c < I_u$ donc $I_d > 0$ et $E - R \cdot I > 0$ alors que $R \cdot I_d > E$, ainsi la tension après interruption augmente de U à E

- lorsqu'on interrompt la charge on aura $I_c > I_u$ donc $I_d < 0$ alors que $R \cdot I_d > E$, ainsi la tension après interruption diminue de U à E ; avec:

I_c : est le courant de charge

I_u : est le courant utilisé

I_d : est le courant de décharge

E : est la force électromotrice de la batterie (tension à vide)

U : est la tension aux bornes de la batterie

R_i : est la résistance interne de la batterie

u : $u = E - R_i \cdot I_d$

i_u : $i_u = I_d + I_c$

Les dispositifs régulateurs devront tenir compte de ces "sauts" de tension.

1.7 Les convertisseurs continu-alternatif

Pour alimenter des appareils qui fonctionnent en courant alternatif, il faut interposer un convertisseur entre la batterie et ces appareils.

1.7.1 Les convertisseurs tournants

Ils sont constitués (fig. 2-11) d'un moteur à courant continu couplé avec un alternateur. Un ensemble électronique pilote le bobinage

inducteur du moteur à courant continu.

1.7.2 Les convertisseurs statiques

Ces convertisseurs, souvent appelés onduleurs, transforment le courant continu en signal carré ou sinusoïdal, grâce à la fermeture, et l'ouverture d'interrupteurs électroniques qui sont des transistors ou des thyristors.

La figure 2-12 représente le schéma de principe d'un convertisseur avec transformateur à point milieu. La tension est appliquée alternativement (par T1 puis par T2) à chaque demi-bobinage primaire du transformateur, il en résulte un flux magnétique dans le transformateur qui induit une onde pseudo-sinusoïdale aux bornes du bobinage secondaire.

L'idéal consiste à disposer, au moindre coût, d'un convertisseur ayant une onde la plus proche possible d'une sinusoïde (fig. 2-13), offrant le rendement le plus élevé possible, quelque soit la puissance délivrée.

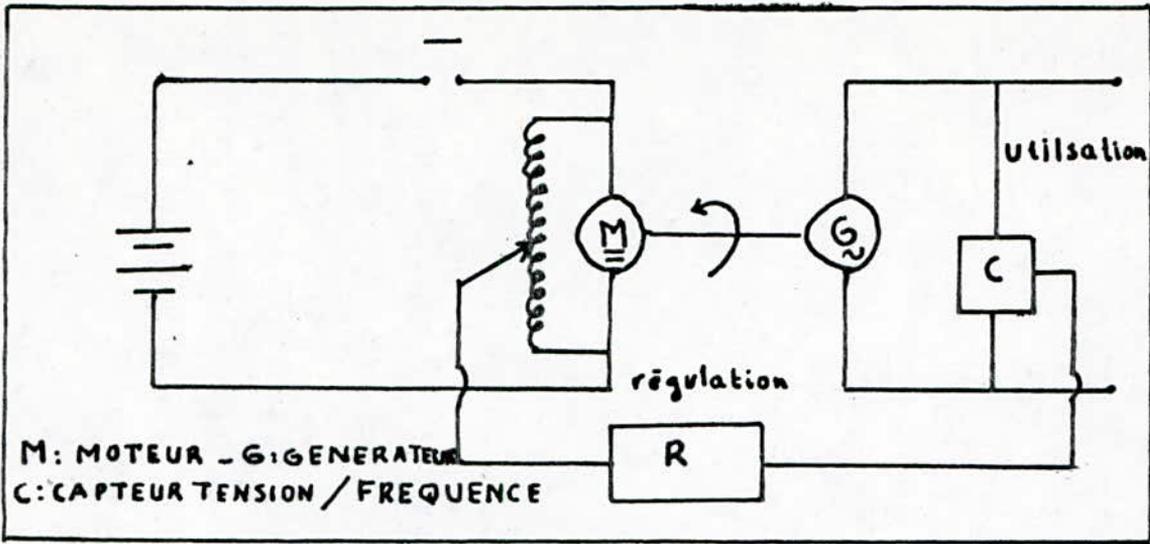


Fig. 2-11: Convertisseur Tournant

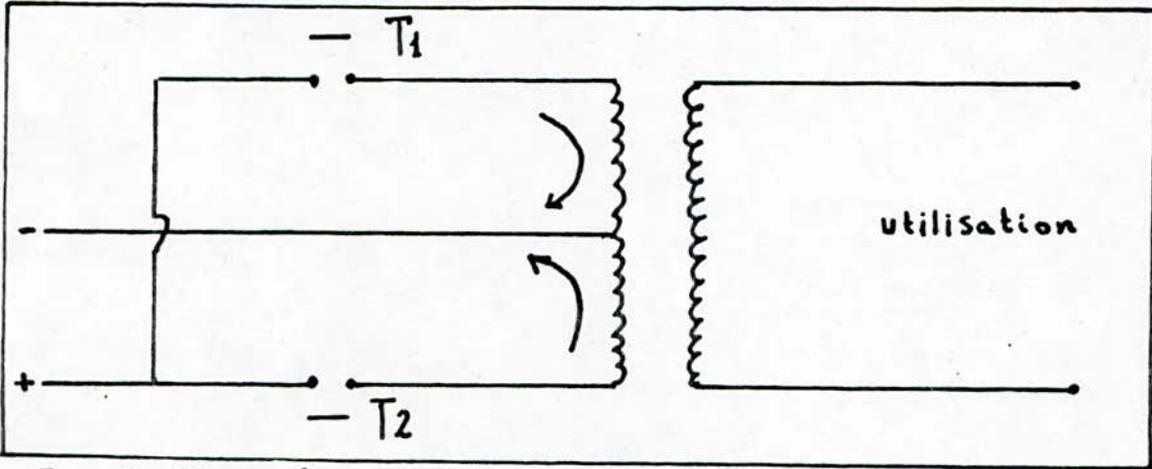


Fig. 2-12: Convertisseur Statique

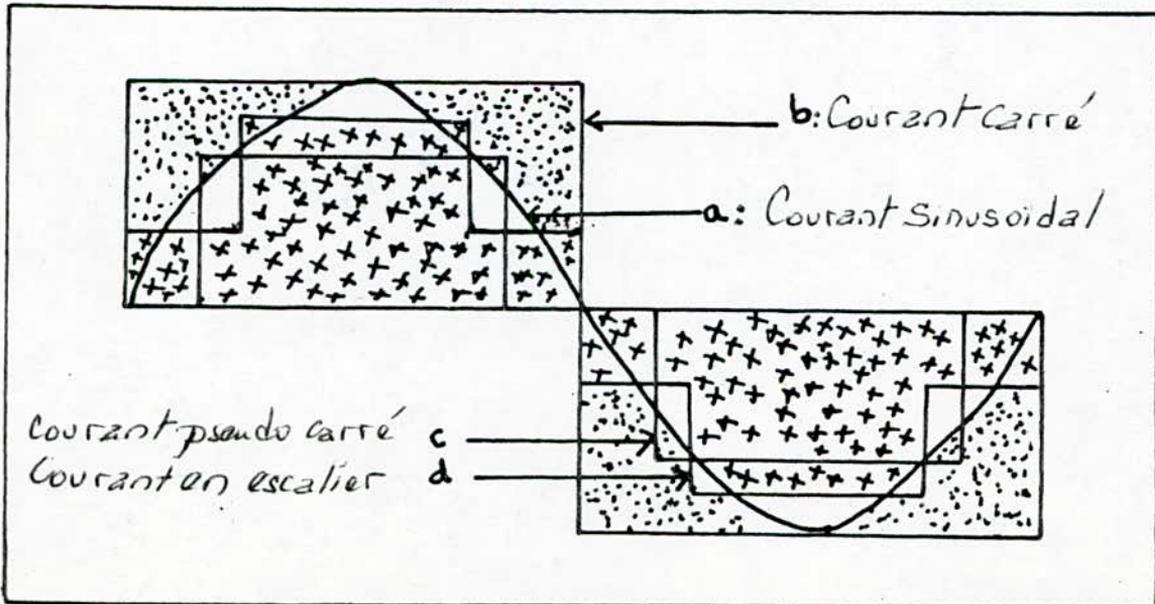


Fig. 2-13

CHAPITRE III

1) Probleme posés par l'association des modules solaires

Le panneau solaire, élément de base du générateur photovoltaïque, est formé par des associations de module photovoltaïque. Cette association nécessite des protections, pour assurer le panneau contre toute détérioration, celle-ci est due généralement à l'occultation d'une partie des modules. Elle peut être aussi causée par la destruction d'une ou plusieurs cellules solaires, à l'intérieur d'un module, ou bien au mauvais choix d'association des modules.

Dans ce qui suit nous nous proposons de voir le comportement des cellules associées, entre elles pour différents cas de figure ainsi que l'association des modules.

Dans une première étape une étude théorique est présentée, puis une simulation numérique.

1-1 Association de deux cellules en série

1-1-1 Cas de deux cellules identiques éclairées de la même façon

Considérons deux cellules branchées en série et débitant sur une charge R (Fig 1-1).

Si les deux cellules sont identiques, le courant est le même pour les deux cellules, alors que les tensions s'ajoutent.

La figure 3-2 montre que lorsque le montage est en circuit ouvert le courant total I_G est nul, alors que la tension de circuit ouvert est égale à deux fois la tension d'une des deux cellules soit $I_G=0$ et $V_{Gd}= 2.V_{co}$.

Dans le cas du montage en court-circuit, le courant I_{Ga} est le même que le courant de chaque cellule, la tension aux bornes du générateurs est nulle et la tension aux bornes de chacune des cellules est nulle

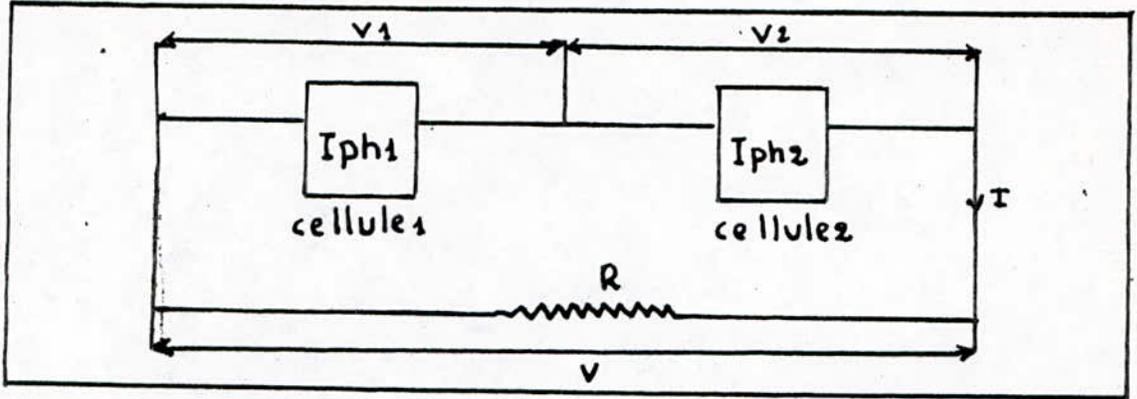


Fig. 3-1: Deux cellules en serie

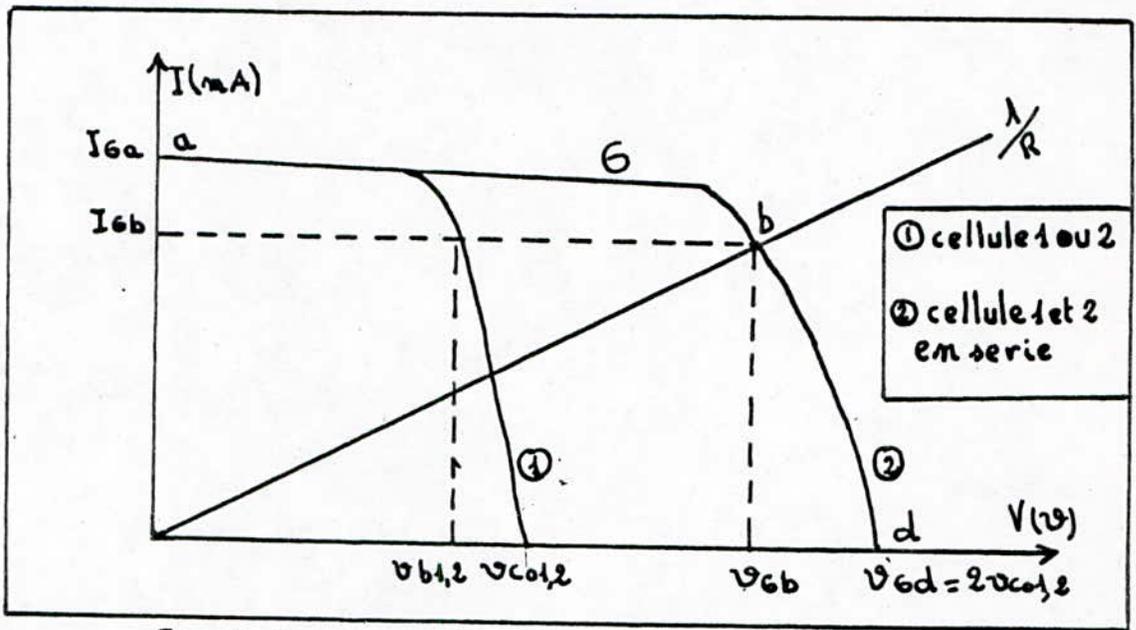
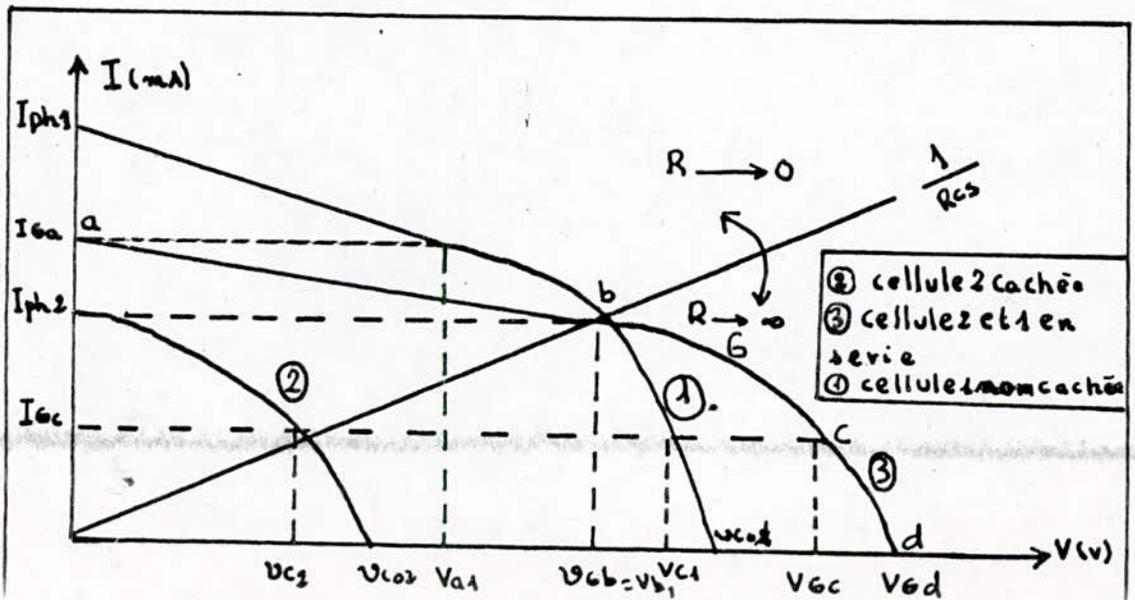


Fig. 3-2



Dans ce cas les cellules n'étant plus identiques. La tension au borne de la cellule(1) se retrouve au borne de la cellule(2) mais en polarité inverse $V_2 = -V_1$.

La cellule(2) travaille en recepteur. Cependant meme dans le cas extreme ou la cellule(2) est completement occultee (performance nulle), il ne pourra pas lui etre appliquee une tension superieure a celle que peut developper la cellule(1) a savoir V_{col} .

Dans le cas de plusieurs cellules montees en series dont une est occultee le raisonnement reste le meme. La somme des tensions de l'ensemble des cellules risque de se retrouver aux bornes de la cellule occultee qui de ce fait s'echauffe enormement, cet echauffement a pour effet de modifier ses caracteristiques electriques et en consequence le bilan energitique globale.

1-2 Association de deux cellules en paralleles

1-2-1 Cas ou les deux cellules sont identiques et eclairees de la

de la meme facon

Considerons deux cellules branchees en parallele, et debitant sur une charge R (Fig 3-4).

Si les deux cellules sont identiques pour chaque valeurs du flux solaire leurs caracteristiques sont elles memes identiques. Pour chaque valeurs du flux solaire chacune d'elle genere le meme courant de court-circuit $I_{ph1} = I_{ph}$ et possede une meme tension de circuit ouvert (figures 3-4, 3-5). On remarque d'apres ces figures que la tension est la meme aux bornes de chaque cellule et ceci quelque soit la valeur de la charge R , par contre le courant est le double de celui genere par chaque cellule (figure 3-5). Lorsque $R=0$ (montage en court-circuit), le

courant total I est égal à deux fois le courant I_{ph} , soit $I_G = 2 \cdot I_{ph}$ et $V = 0$. Lorsque R est nul et le courant dans chaque cellule est lui aussi égal à zéro. Aucune des deux cellules ne peut donc fonctionner en receptrice dans ce cas. La figure 3-5 représente la courbe du générateur constitué par les deux cellules. Le raisonnement est la même lorsque on groupe en parallèle un grand nombre de cellules identiques sous la même éclairement.

1-2-2 Cas du groupement en parallèle de deux cellules sous des flux

différents

Prenons le cas de deux cellules dont une seule est occultée (Fig 3-6). La caractéristique de la cellule la moins performante est représentée par la courbe (2) de sorte que le courant de court-circuit I_{ph2} est inférieur au courant de court-circuit I_{ph1} de la cellule (1). Et la tension de circuit ouvert V_{co2} est inférieure à V_{co1} . Pour déterminer la caractéristique du montage de ces deux cellules (courbe G), il faut garder à l'esprit que la tension reste la même pour les deux cellules alors que les courants s'ajoutent. Au point de fonctionnement (a) le montage est en court-circuit.

: $I_G = I_{ph1} + I_{ph2}$ et $V_G = 0$:

Pour un point de fonctionnement (b) compris entre (a) et (c) correspondant à une tension V_{Gb} sur la charge nous aurons alors:

$$I_{Gb} = I_{b1} + I_{b2}$$

Les deux cellules travaillent alors en générateur, le point de fonctionnement limite (correspond à la tension de circuit ouvert de la cellule occultée V_{co2} avec $I_G = I_{c1}$).

Pour une résistance supérieure, la cellule (2) devient receptrice nous

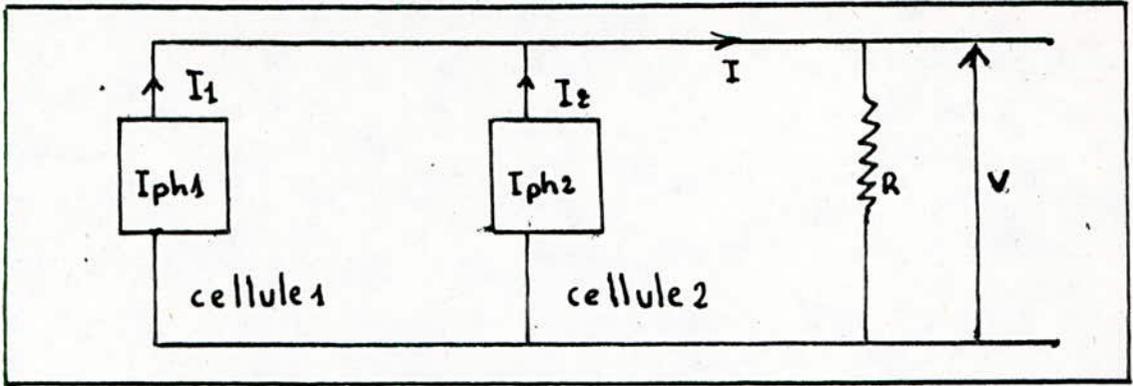


Fig. 3-4: schéma de 2 cellules en parallèles

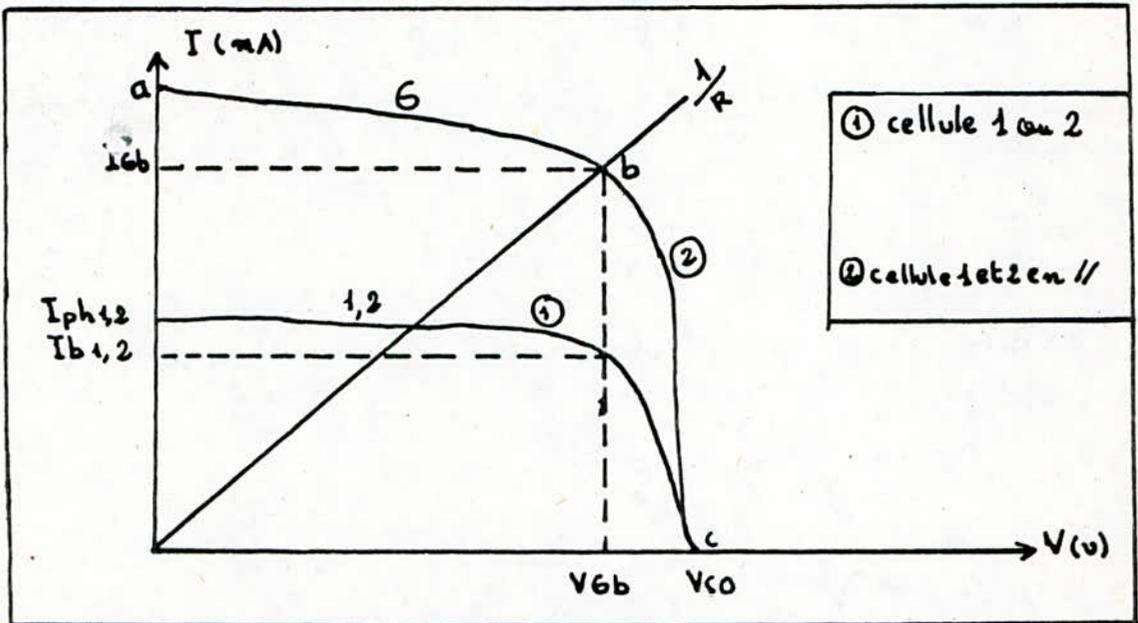
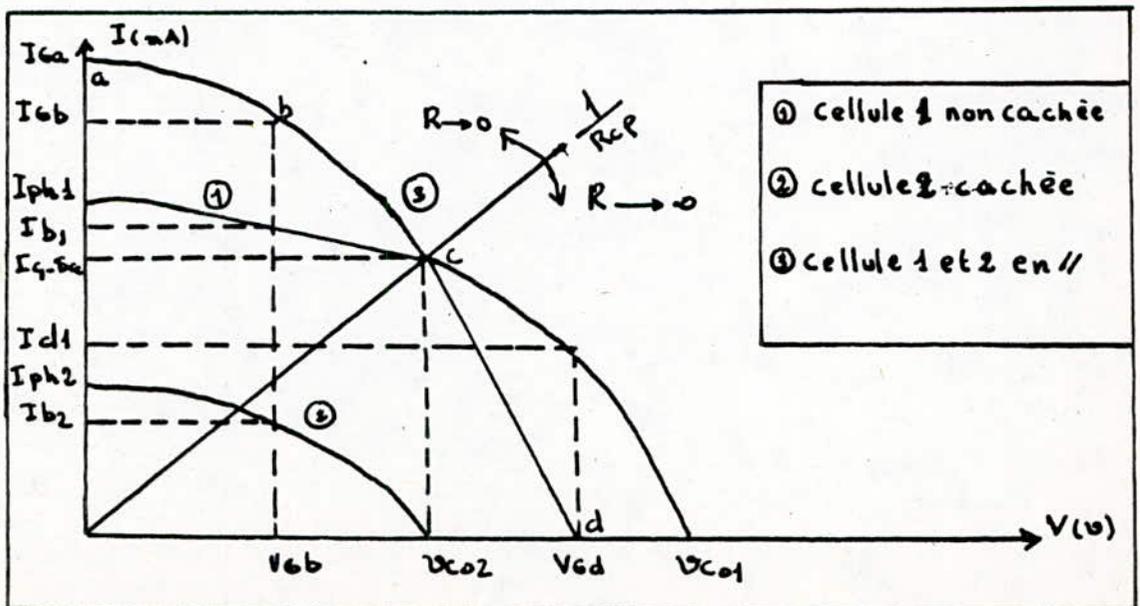


Fig. 3-5; Caractéristiques d'une ou deux cellules en //.



pouvons définir, alors une certaine résistance critique R_{cp} correspondant à ce point où la cellule (2) pourrait être supprimée, elle n'est ni générateur, ni récepteur (cas limite). Le point (d) correspond au cas où le montage est en circuit ouvert (R est infini), le courant total I étant nul pour $V_{Gd} = V_{co}$, ou I est la somme des deux courants. Les cellules n'étant pas identiques, les courants I_1 et I_2 sont donc de signes contraires, la cellule (1) débite dans la cellule (2). Cependant même dans le cas extrême où la cellule (2) est complètement occultée et sa caractéristique passe par zéro, il ne pourra pas lui être fourni plus de courant que ne peut en débiter la cellule (1), soit I_{ph1} . Dans le cas de plusieurs cellules ou d'un groupement des modules en parallèles dont une cellule est occultée, le raisonnement reste le même, mais cette fois la cellule occultée peut recevoir le courant débité par tout le groupement alors elle risque de se détériorer. Ce déséquilibre se traduit en général par un échauffement excessif et une diminution des performances énergétiques.

1-3 Associations des modules photovoltaïques

1-3-1 Les différents causes de déséquilibre lors de l'association

des modules photovoltaïques

Dans un module photovoltaïque l'association la plus performante des cellules est du type série, en une ou plusieurs guirlandes (Chp II). Ainsi un module composé de 36 cellules aurait trois "guirlandes" de 12 cellules connectés en série.

Lorsque des modules photovoltaïques sont connectés en série et en parallèle sans précautions particulières, certaines circonstances peuvent provoquer la dégradation des modules. On peut citer les cas suivant :

- A) Eclairage inégal : certaines cellules sont moins éclairées que d'autres, répartition inégale du flux solaire.
- B) Court-circuit accidentels.
- C) Augmentation inadmissible de la charge (exemple moteur bloqué).
- D) Courant de démarrage trop élevé d'un moteur.
- E) Cellules defectueuses.
- F) Décharge profonde de l'accumulateur (stockage).

Dans le cas cités certains modules peuvent être le siège d'une tension inverse élevée, ou être traversées par un courant trop important. Il peut en résulter des dégradations irréversibles des cellules, d'autant plus que les effets néfastes sont généralement cumulatifs et se propagent à tout les modules (courant de circulation). Parmi tous les cas cités plus haut la plupart trouvent un remède au niveau de l'exploitation rationnelle du système photovoltaïques.

Toute fois un des cas dont la solution est la plus délicate à trouver est celui de l'occultation involontaire (passage nuageux partiel) ou volontaire, ombre portée; ceci se traduit par une répartition non uniforme du flux solaire au niveau de tout le générateur photovoltaïque (figure 3-7).

Nous avons supposé jusqu'à ici que les cellules photovoltaïques dans un module étaient identiques en réalité elles ne le sont pas.

L'expérience a montré que le paramètre qui caractérise la création des photocourants varie de 10% entre la première et la dernière cellule de l'association, cette variation est due en effet à la jonction p-n qui n'est pas la même dans toutes les cellules (défaut de fabri-

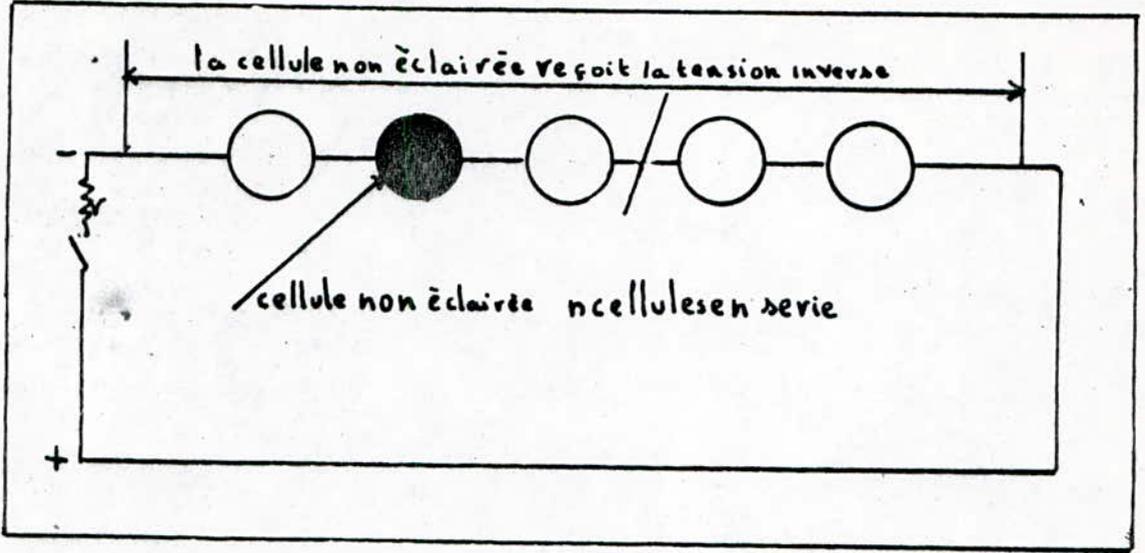


Fig. 3-8: Module photovoltaïque sans diodes de protection

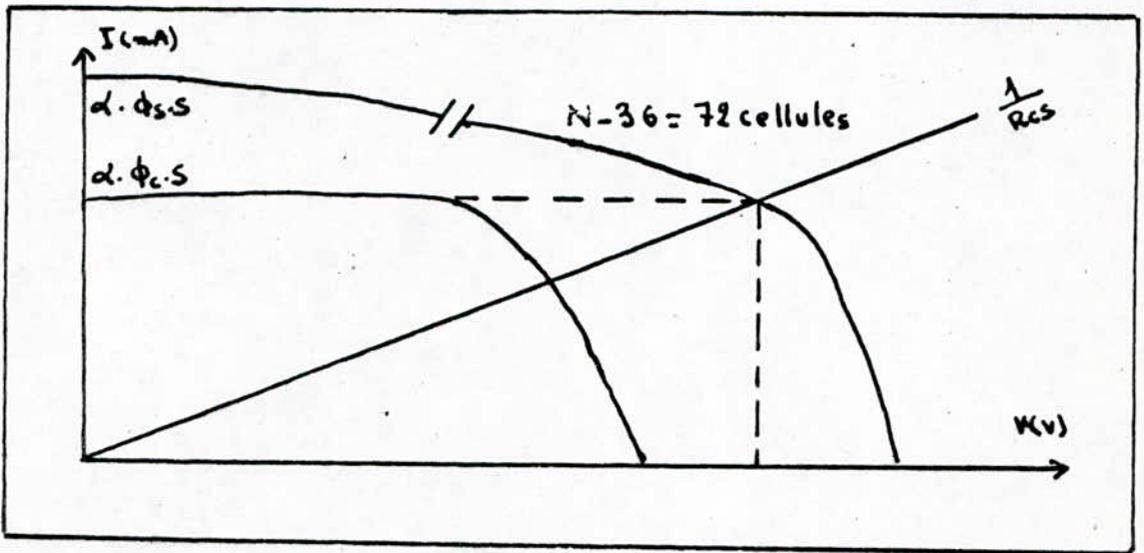


Fig. 3-8

cation). La dispersion du parametre est equivalente a une occultation partielle de la cellule puisque le photocourant est donne par l'expression :

$$I = \eta \Phi_s s \quad /5/$$

ou

Φ_s : est le flux solaire

s : est la surface de la cellule

2) Determination de la resistance critique (simulation numerique)

2-1 Definition de la resistance critique

C'est la resistance au dessous de laquelle un module ou groupement de cellules peut devenir recepteur.

2-2 Determination de la resistance critique dans le cas d'association

de trois modules en serie (figure 3-8)

Afin de determiner cette resistance critique considerons trois modules en serie, ayant chacun d'eux 36 cellules, en supposant que la temperature de chaque cellule reste constante. Si l'un des modules est occulte le flux qu'il recoit varie alors que les deux autres modules sont sous eclairement constant, ceci nous amene a un taux d'eclair-ement tels que

$$N = \frac{\Phi_c}{\Phi_s}$$

ou est le flux du module occultee, et est le flux des modules non occultes. La description mathematique du cas considere est donnee par les equations suivantes:

$$\alpha \Phi_s + \beta S \left[\exp \frac{\gamma V}{n-36} - 1 \right] = \alpha \Phi_s S$$

$$I = \alpha \Phi_c S = \alpha N \Phi_s S = \alpha \Phi_s S - \beta S \left[\exp \frac{\gamma V}{n-36} - 1 \right] \quad (1)$$

d'où
$$\alpha \Phi_s (1-N) = \beta \left[\exp \frac{\gamma V}{n-36} - 1 \right] \quad (2)$$

de l'équation (2) on tire

$$V = \left(\frac{n-36}{\gamma} \right) \ln \left[1 + \frac{\alpha \Phi_s (1-N)}{\beta} \right] \quad (3)$$

et la valeur limite de la charge au dessous de laquelle la cellule devient receptrice est donneepar l'expression:

$$R_{cs} = \frac{V}{I} = \frac{n-36}{\alpha \gamma N \Phi_s S} \ln \left[1 + \frac{\alpha \Phi_s (1-N)}{\beta} \right] \quad (4)$$

ou

n est le nombre de cellules totales (n=108) et $\alpha(T) = 2,5 \cdot 10^{-4} T + 0,224$ en AW (coefficient de photocourant) /5/

ou T est la temperature en degre kelvin.

S est la surface de l'une de cellule du module (S= 90,25 cm²) (Model Arco-solar M53).

β et γ : traduisent les phenomenes de courant de recombinaison

$$\beta(T) = \text{EXP}(7,42 \cdot 10^{-24} T - 28,28) \quad \text{en} \quad \text{A.m}^{-2} \quad /5/$$

et
$$\gamma(T) = 5,8 \cdot 10^3 / T \quad \text{en} \quad \text{V}^{-1} \quad /5/$$

Sur la base de ce modele un programme de simulation nous a permis de tirer la courbe de la figure 3-9.

2-3 Resultats de la simulation

En analysant la courbe de la figure 3-9, on constate que si n=1 (module non occulte) Rcs tend vers zero.

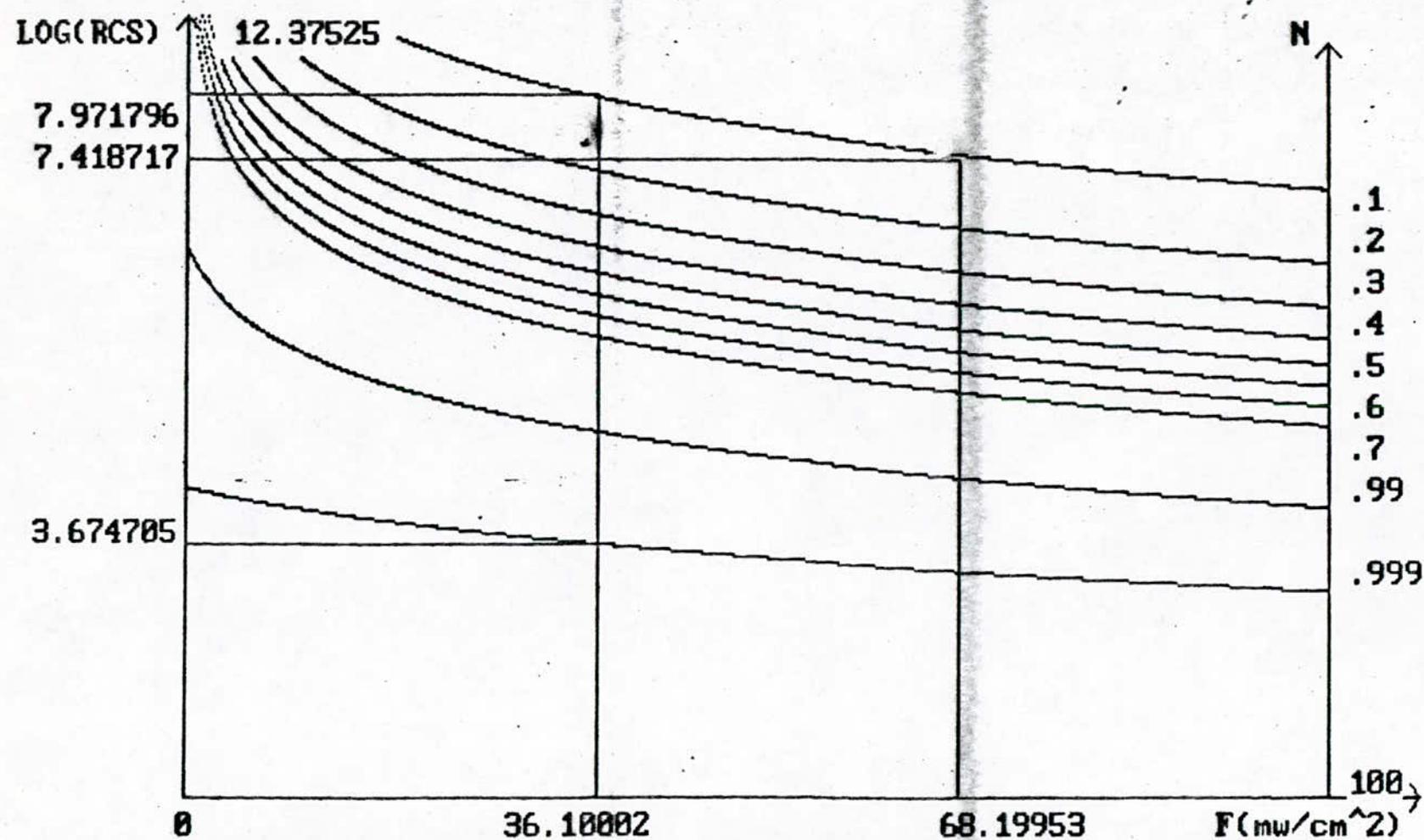


Fig.3-9

DETERMINATION DE LA RESISTANCE CRITIQUE DE 3 MODULES
 PHOTOVOLTAIQUES EN SERIES DONT L'UN EST CACHE'
 POUR UN TAUX D'ILLUMINATION ET UN FLUX CONNU $T=40^{\circ}\text{C}$

On constate que plus N est élevé, plus R_{cs} est petit pour un taux d'illumination donné.

Pour un flux déterminé, si on occulte de plus en plus le module (N variant de 1 à 0), la valeur R_{cs} augmente.

La figure 3-9 traduit la fonction de l'équation (4).

Elle nous permet ainsi de déterminer la résistance critique en dessous de laquelle le module occulté travaille en récepteur, ceci pour un ensoleillement et un taux d'éclairement donné.

Si par exemple pour un ensoleillement de 360 W/m^2 le taux d'illumination du module est de 0,999. La résistance sera 39,43 ohms, cependant si on maintient l'ensoleillement constante et si le taux d'illumination de module est de 0,1, la résistance critique sera égale à 2,898 $\text{k}\Omega$. C'est à dire qu'en dessous de cette valeur le module occulté deviendra récepteur. D'autre part si on maintient le taux d'illumination constant par exemple $N = 0,1$ la résistance critique pour $\phi_s = 681 \text{ W/m}^2$ sera égale 1,666 $\text{k}\Omega$, alors que pour $\phi_s = 360 \text{ W/m}^2$ sera égale à 2,898 $\text{k}\Omega$.

Remarque: Pour un flux supérieur à 600 W/m^2 et pour $N = 0,9$ la résistance critique devient très faible donc on peut dire que l'effet de l'occultation dans ce cas est négligeable. (voir listing en Annexe 6)

2-4 Détermination de la résistance critique dans le cas d'association

de trois modules en parallèle

Afin de déterminer cette résistance critique considérons 3 modules photovoltaïques couplés en parallèle, chacun d'eux ayant 36 cellules, en

supposant que la température de chaque cellule reste constante, si l'un des modules est occulté le flux qu'il reçoit varie alors que les deux autres modules sont sous éclaircment constant ceci nous amène à un taux d'éclaircment tels que

$$N = \frac{\Phi_c}{\Phi_s}$$

La description mathématique du cas considéré est donnée par les équations suivantes:

$$V_{co1} + \frac{1}{\gamma} \ln \left[\frac{\alpha \Phi_s S - I}{(n-36)\beta S} + 1 \right] = V_{co2} \quad (1)$$

$$V_{co1} = V_{co2} - \frac{1}{\gamma} \ln \left[\frac{\alpha \Phi_s - I}{(n-36)\beta S} + 1 \right]$$

avec

Vco1: est la tension de circuit ouvert du module occulté

Vco2: ,, ,, ,, de deux modules non occultés

n: est le nombre du cellule totale (ici n = 108)

$$V_{co1} = \frac{1}{\gamma} \ln \left[\frac{\alpha \Phi_c}{36\beta} + 1 \right] \quad (2)$$

$$V_{co2} = \frac{1}{\gamma} \ln \left[\frac{\alpha \Phi_s}{72\beta} + 1 \right] \quad (3)$$

En remplaçant l'équation (2) et (3) dans (1) on trouve L'expression du courant:

$$I = \frac{\alpha \Phi_s N_s [\Phi_s \alpha + 72\beta]}{\alpha N \Phi_s + 36\beta}$$

D'où la valeur de la résistance critique

$$R_{cp} = \frac{1}{\delta} \ln \left[\frac{\alpha N \Phi_s + 36 \Psi}{36 \Psi} \right] \cdot \left[\frac{\alpha \Phi_s N + 36 \Psi}{\alpha \Phi_s N S (\Phi_s + 72 \Psi)} \right] \quad (4)$$

sur la base de ce modèle une simulation a été effectuée, les résultats sont donnés par la figure 3-10.

2-5 résultat et interprétation de la simulation

En analysant la courbe de la figure 3-10 on constate que plus ϕ_s est élevé, plus R_{cp} est petit pour un taux d'illumination donné.

Pour un flux déterminé si on occulte de plus en plus le module (N variant de 1 à 0), la valeur R_{cp} augmente.

La figure 3-10 traduit l'équation 4, elle nous permet de déterminer la résistance critique en dessous de laquelle le module occulté travaille en récepteur, ceci pour un ensoleillement et un taux d'illumination donné.

Si par exemple pour un ensoleillement de 350 W/m^2 le taux d'illumination du module est de 0,999, la résistance critique sera 1 ohm. Cependant si le taux d'illumination du module est de 0,002 (occultation presque complète). La résistance critique sera égale à 19,9 ohms c'est à dire qu'en dessous de cette valeur le module occulté deviendra récepteur. D'autre part si on maintient le taux d'illumination constant par exemple $N = 0.002$ la résistance critique pour $\phi_s = 671 \text{ W/m}^2$ sera égale à 5,84 ohms, alors que pour $\phi_s = 350 \text{ W/m}^2$ sera égale à 19,9 ohms.

Remarque: Pour un flux supérieur à 600 W/m^2 et pour $N > 0.6$ la résistance critique devient très faible on peut dire que l'effet de l'occultation dans ce cas est négligeable. (voir listing en annexe 7).

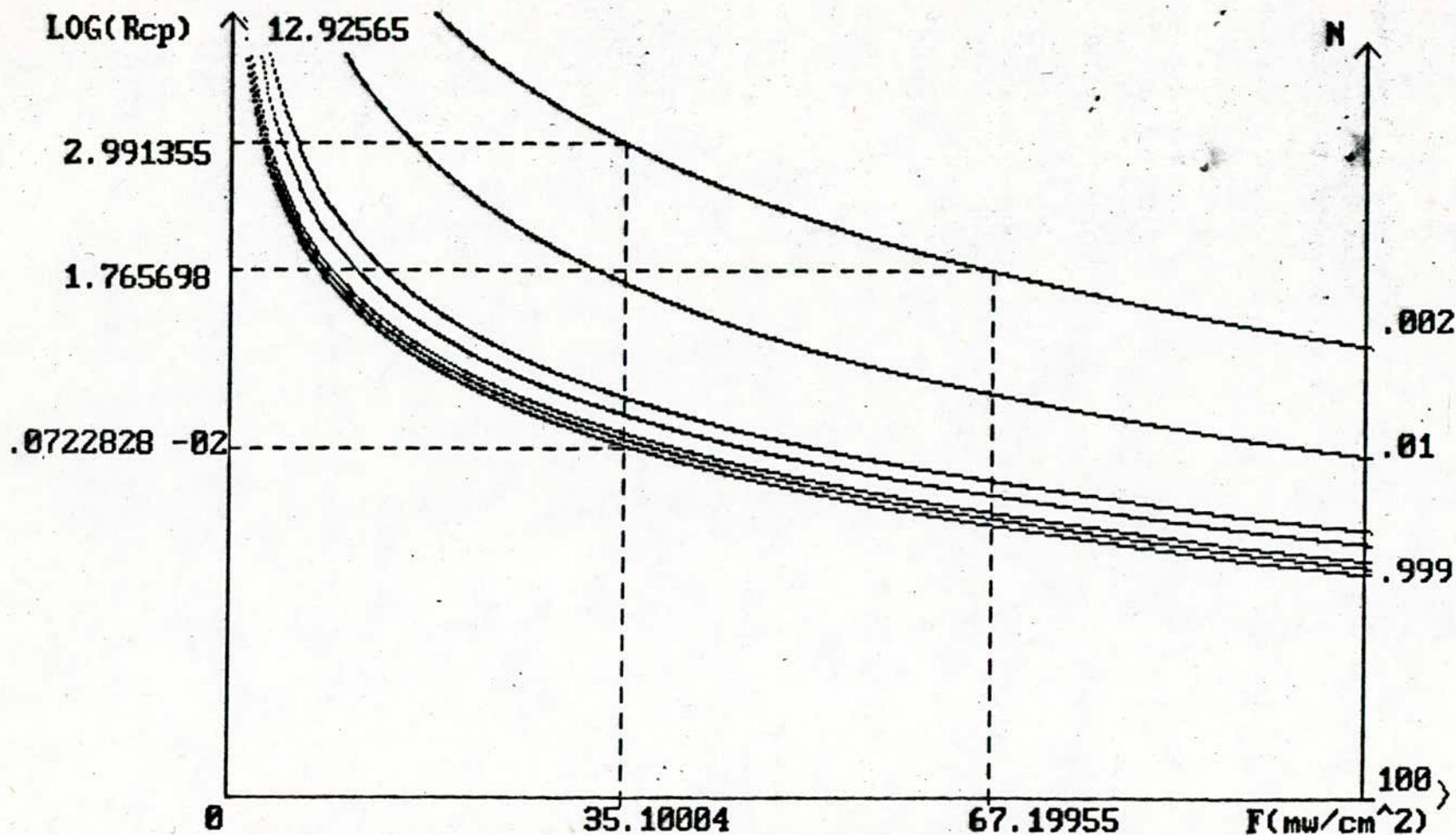


Fig.3-10

DETERMINATION DE LA RESISTANCE CRITIQUE DE 3 MODULES PHOTOVOLTAIQUES EN PARALLELES DONT L'UN EST CACHE' POUR UN TAUX D'ILLUMINATION ET UN FLUX CONNU $T=40^{\circ}\text{C}$

2-6 Etude comparative entre les deux cas de la simulation

En analysant les courbes des figures 3-9 et 3-10, on remarque que la résistance critique pour l'association parallèle est très faible. Car le courant est très important, de plus la résistance critique totale R_{cptot} est de la forme $R_{cp1} // R_{cp2} // R_{cp3}$

ou R_{cp1} : est la résistance critique du module N°1

R_{cp2} : ,, ,, ,, N°2

R_{cp3} : ,, ,, ,, N°3

sachant que pour une association serie on a $R_{cstot} = R_{cs1} + R_{cs2} + R_{cs3}$

ou R_{cs1} : est la résistance critique du module N°1

R_{cs2} : ,, ,, ,, N°2

R_{cs3} : ,, ,, ,, N°3

: $R_{cptot} < R_{cstot}$ -----> $R_{cp1} // R_{cp2} // R_{cp3} < R_{cs1} + R_{cs2} + R_{cs3}$:

Dans le cas d'une association serie-parallèle, on peut calculer directement la résistance critique par exemple dans le cas d'une association d'une paire de 3 modules en serie et parallèle entre eux. (Fig 3-11

pour $\phi_s = 360 \text{ W/m}^2$ et pour $N = 0,999$ on a $R_{cstot1} = 39,43$ ohms

or pour le montage decrit on a la valeur :

de $Requivalent = R_{cstot1} \cdot R_{cstot2} / (R_{cstot1} + R_{cstot2})$

dans le cas ou $R_{cstot1} = R_{cstot2}$ c'est à dire que les 6 modules sont parfaitement identiques et qu'il sont occultés de la meme facon:

: $Requivalent = R_{cstot} / 2 = 19,71$ ohms :

Dans le cas d'une paire de 3 modules pralléle entre eux et couplés en

serie. (Fig 3-12)

pour $\rho = 351 \text{ W/m}$ avec $N=0,999$

on a $R_{\text{cptot}} = 1 \text{ ohm}$ donc pour cette association on a :

: $R_{\text{cptot}} = 2 \cdot R_{\text{cptot1}} = 2 \text{ ohms}$:

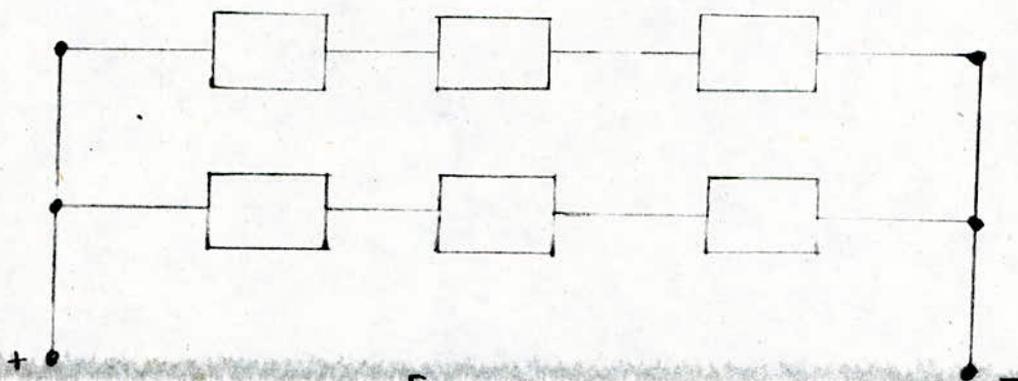


Fig. 3-11

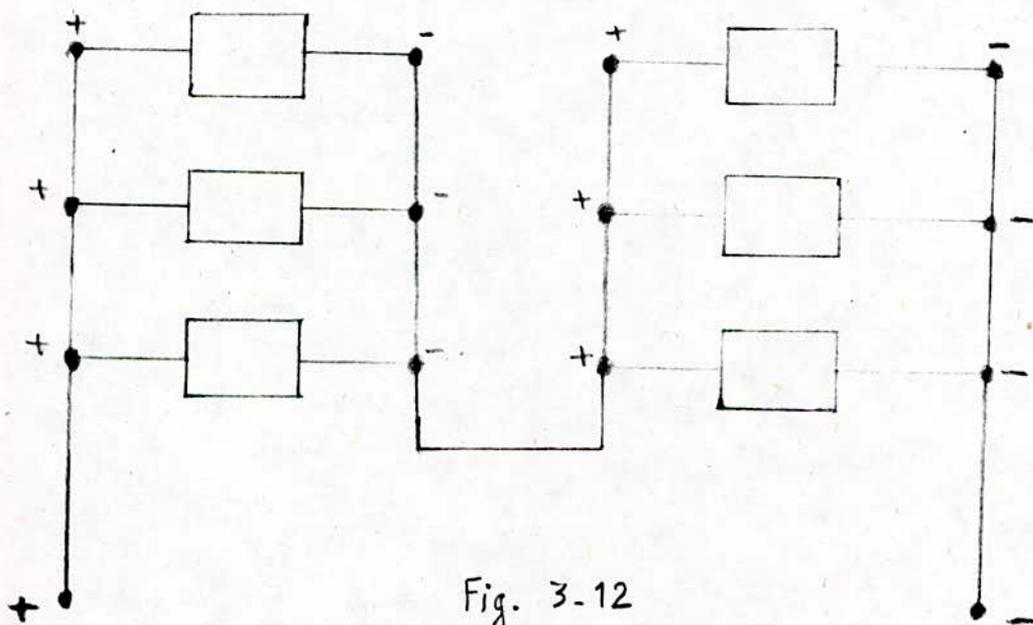


Fig. 3-12

Ainsi pour assurer le bon fonctionnement des modules photovoltaïques une protection est parfois indispensable.

3) Protection des modules photovoltaïques contre le déséquilibre

Comme on l'a vu au début de ce chapitre les modules photovoltaïques ne peuvent pas être à l'abri des accidents qui peuvent conduire à leur destruction. Pour cela une protection est nécessaire, on utilise pour cela des diodes en parallèle ou en série.

3-1 Protection des photopiles par des diodes en parallèle

Dans certains cas on est obligé d'associer plusieurs modules, afin d'obtenir des tensions nominales importantes, le problème se pose ici, au cas où l'un des modules est occultés, ce dernier va recevoir l'ensemble du courant débité par les autres modules. La solution consiste à protéger ce module en plaçant une diode en parallèle sur chaque groupe de photopiles en série (guirlande), on limite alors les effets "comportement inverse" d'une guirlande, en effet si celle-ci devient réceptrice le courant venant des autres guirlandes sera dérivé par la diode et ne traversera pas en totalité la guirlande défaillante (ou moins éclairée) (voir figure 3-13).

En effet, on pourrait imaginer de protéger ainsi chaque photopile, la sécurité obtenue serait excellente, mais le coût des diodes est tel que le branchement devient prohibitif. Pour résoudre ce problème on optimise le système afin d'utiliser un nombre minimal de diodes.

3-2 Protection par des diodes placées en série avec les photopiles

Le rôle de la diode série est d'empêcher le courant de s'inverser et de bloquer le module si celui-ci devient récepteur. Autrement dit si M3 (fig. 3-12) débite moins que M2 (par défaut ou occultation), alors

la diode DS1 va empêcher le courant de traverser M3 dans le mauvais sens, ce module sera "neutralisé".

Cependant une diode introduit une chute de tension de l'ordre de 0,6 V à 1 V. Il faut donc placer une diode DS en série sous une tension déjà assez importante, pour amortir la chute de tension.

Pratiquement, on protège des groupement qui délivrent au moins 12 V, soit un module ou la moitié d'un module.

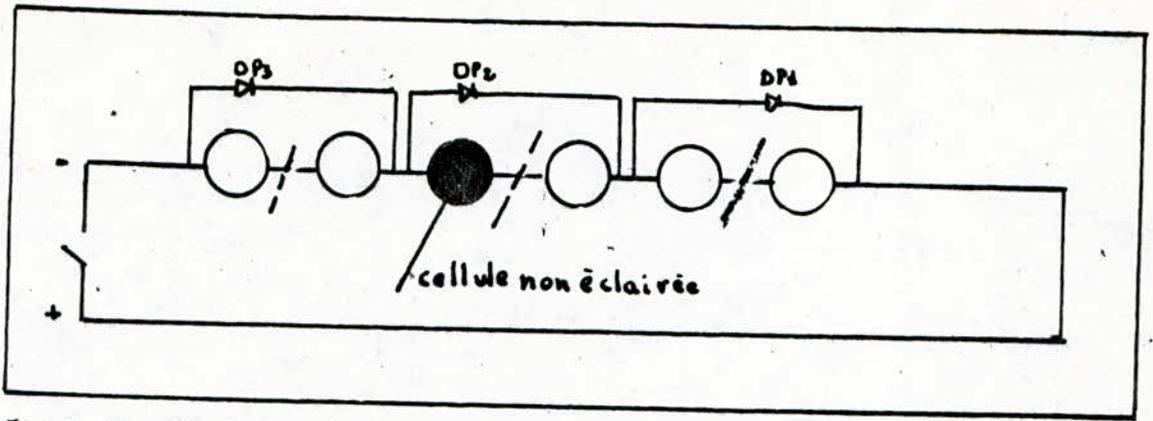


Fig. 3-13: Module photovoltaïque avec diodes de protection

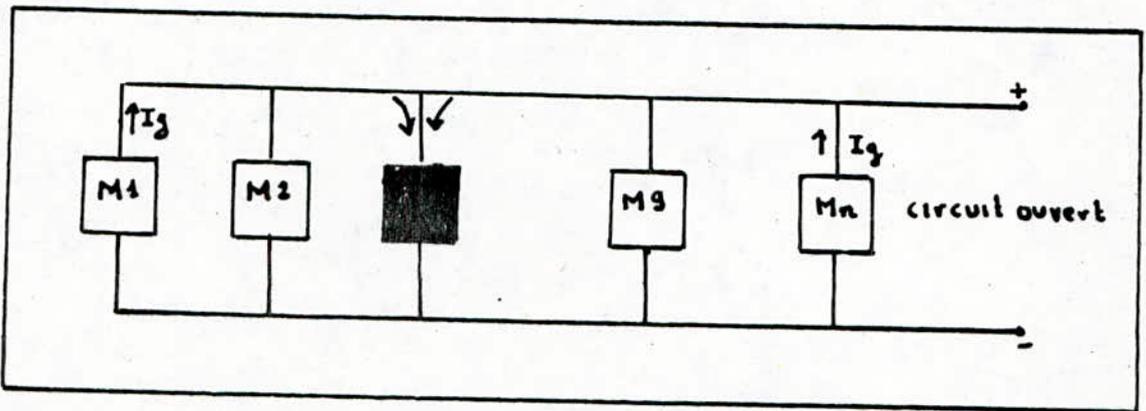


Fig. 3-14: générateur photovoltaïque sans diodes de protection

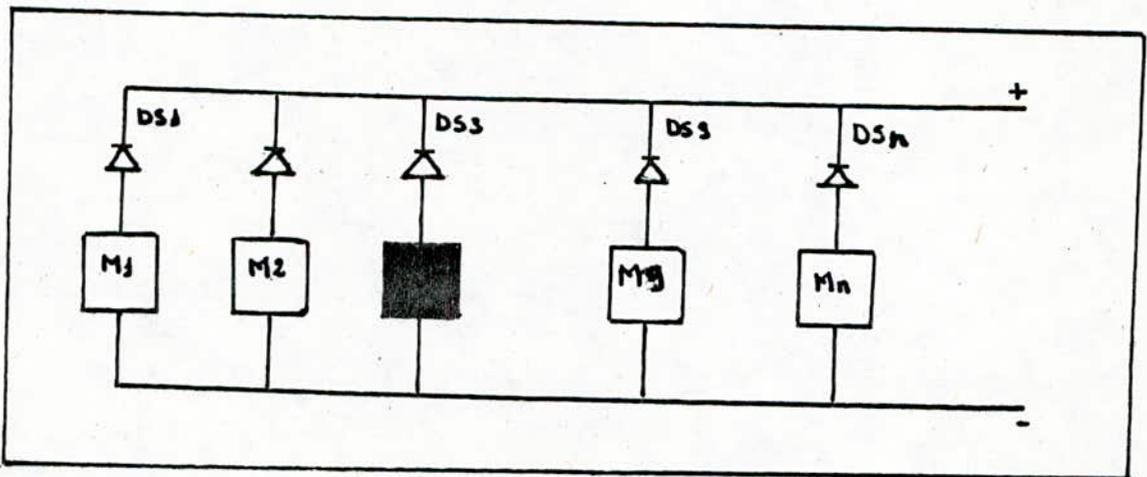


Fig. 3-15: Générateur photovoltaïque avec diodes de protection.

CHAPITRE IV

1) Introduction

On dit qu'il y a déséquilibre dans un groupement de modules, lorsque les valeurs nominales des tensions ou des courants d'un ou plusieurs modules, varient sensiblement. Dans ce cas le fonctionnement d'un module s'inverse et il peut devenir récepteur.

Donc dans ce chapitre nous abordons l'étude expérimentale du déséquilibre dans les groupements de modules photovoltaïques.

L'étude comportera les points suivants:

- étude de la protection spécifique à "Arco-Solar"
- étude de la variation de la puissance pour une charge donnée (charge optimale).
- étude des courbes caractéristiques courant-tension d'un groupement en déséquilibre.

1-1 Manipulation

Lors de cette manipulation on utilise le montage de la figure 2-5 (voir chp. II) et on a essayé de manipuler sous des conditions expérimentales décrites au chapitre II.

Pour obtenir le déséquilibre on occulte l'un des modules d'une association choisie, par une feuille de papier opaque, ce qui diminue l'éclairement, d'où la diminution de la puissance délivrée par le module occulté.

2) Etude de la protection spécifique à "Arco-Solar"

Comme on l'a vu au chapitre II, le module solaire "Arco-Solar" type M53 se compose de 36 cellules de type carré, montées toutes en série. Géométriquement le module comporte 3 guirlandes de 12 cellules chacune comme

l'indique la figure 4-1.

Le schema electrique equivalent est represente a la figure 4-2.

Lors d'un desequilibre dans un groupement serie, la protection est assuree par les diodes "by pass".

Les diodes anti-retour sont en option et ne sont pas livrees avec le module.

Ainsi dans un montage serie de modules, on a les diodes "by pass" qui jouent leur role.

Considerons le schema represente par la figure 4-3, si (I_{ph}) le courant de court-circuit est tres faible devant le courant I delivre par le reste des modules, ce dernier empruntera le chemin $D2-g2-D1$ ($g2$ pour la guirlande 2 de 12 cellules).

Ainsi le module aura le schema equivalent represente par la Fig.4-4.

Dans ces conditions le module devient recepteur, et la tension a ses bornes s'ecrit:

$$V = V1 + V2 + V3$$

$$V1=V3=(K.T/e) . (LOG(1 + I/I's))$$

$$V2=(12.K.T/e) . (LOG(1 + I/Is))$$

$$V = (2.K.T/e) . (LOG(1 + I'/Is)) + (12.K.T/e) . LOG(1 + I/Is)$$

```

*****
* V = (K.T/e) . ((2.LOG(I'/Is) + 12.LOG(I/Is)) *
*****

```

où

K:est la constante de boltzman e :est la charge elementaire

T: est la temperature en degre Kelvin

I's:est le courant de saturation des diodes de protection

Is: ,, ,, des cellules solaires

les diodes solaires utilisees sont des diodes de moyenne puissance

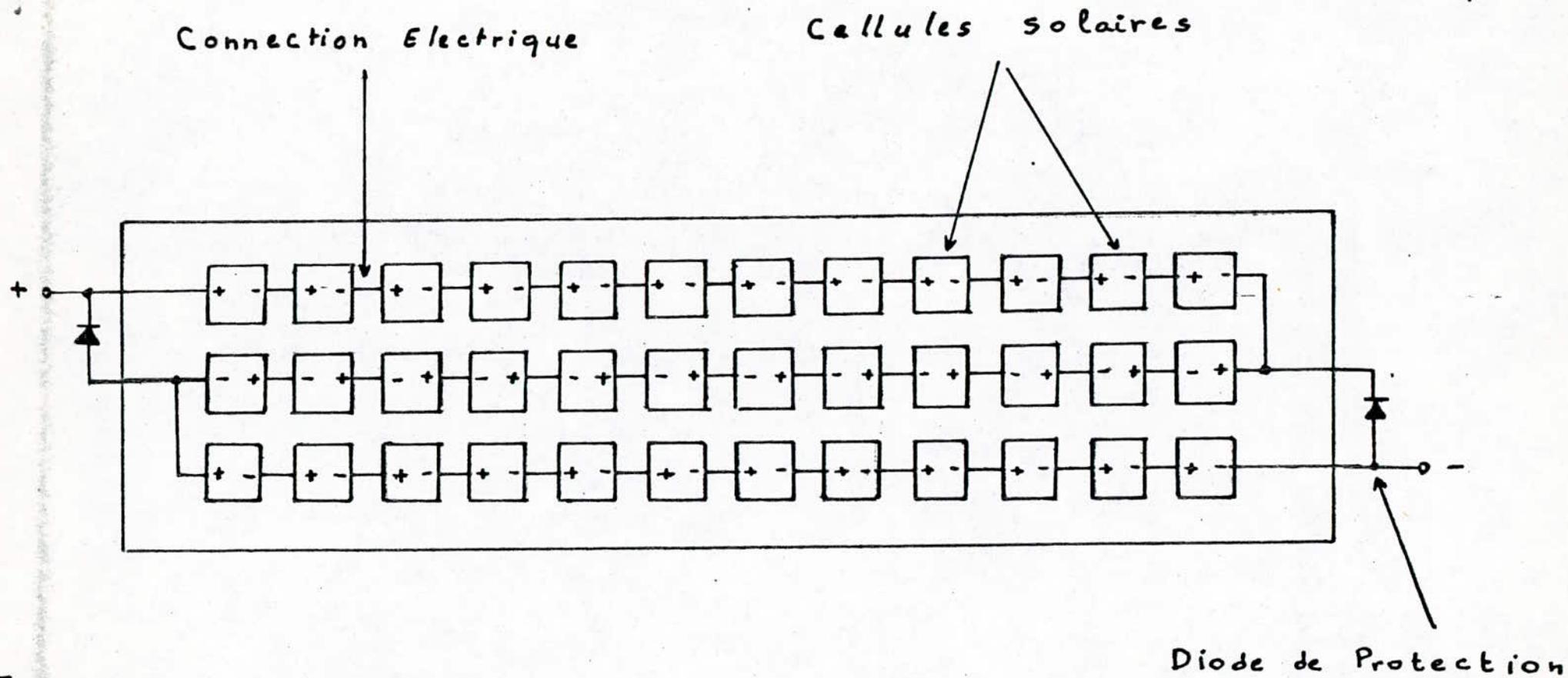


Fig. 4-1

MODULE SOLAIRE (M53)

de type (MR 756 MOTOROLA) .

La caracteristique courant-tension $I=f(V)$ des diodes de protection est representee par la courbe I. Cette caracterisation a ete faite au laboratoire et on a utilise le montage de la figure 4-5, sachant que R est une resistance de protection contre les sur-intensites lors des essais de caracterisation.

* I (A) *	0	* 0,008 *	0,05	* 0,36 *	1,15	* 1,8 *	3,7	* 4 *	5	*
* V (v) *	0,3	* 0,6 *	0,7	* 0,8 *	0,9	* 1 *	1,1	* 1,2 *	1,3	*

Tableau de mesures ($I=f(V)$) de la diode (MR 756 MOTOROLA)

Cette caracterisation va nous permettre d'etudier l'effet de la diode sur les modules lors de l'etude de desequilibre dans une association.

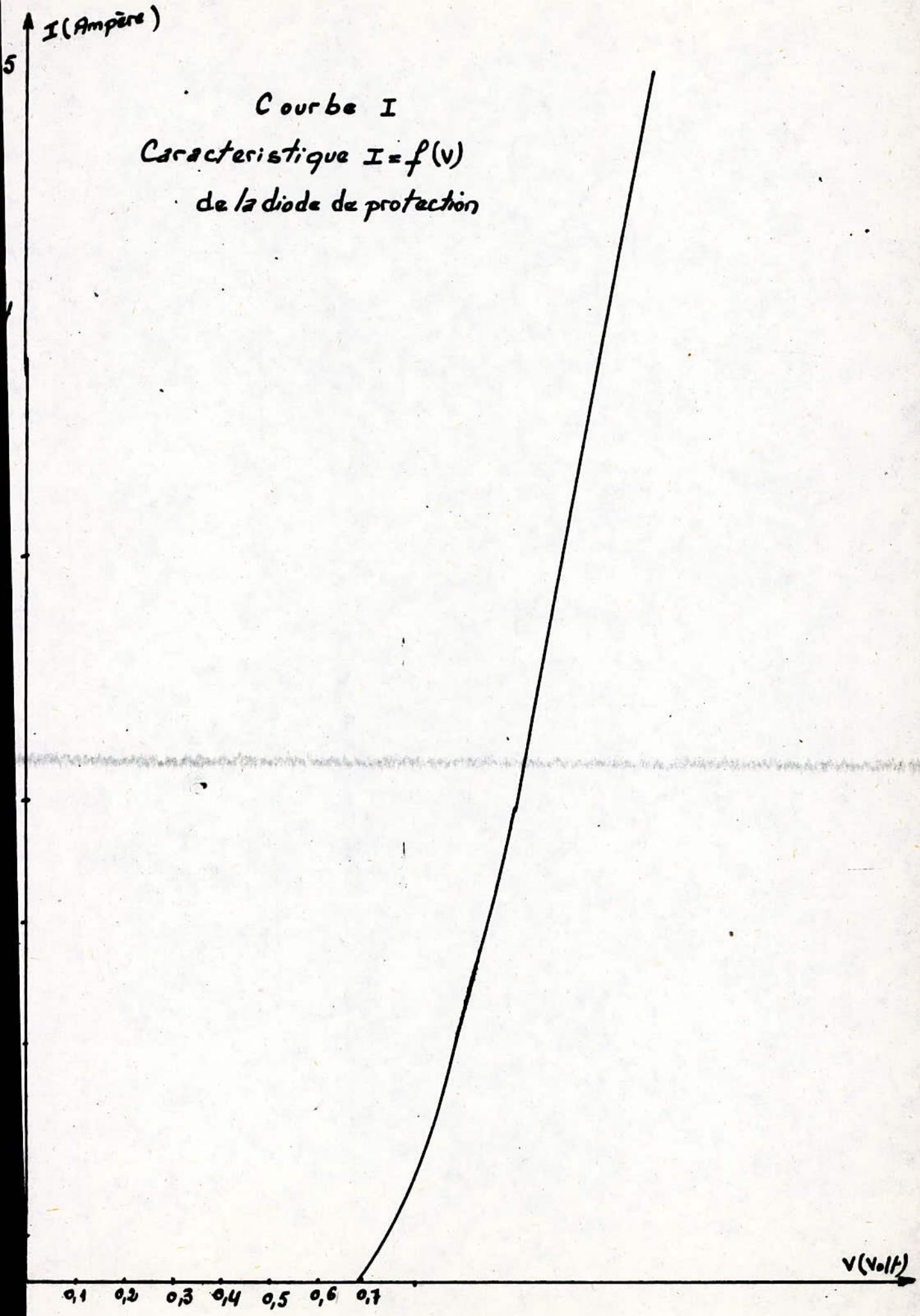
3) Etude du desequilibre dans un groupement serie

3-1 Cas d'un groupement de 3 modules

Pour comprendre ce qui se passe lors d'un desequilibre, on commence par un groupement de 3 modules, puis on va essayer de generaliser ces resultats pour un nombre plus grand.

3-1-1 Aucun module n'est cache (pas de desequilibre), (voir figure 4-6)

D'apres l'allure de la courbe II(1) et on le comparant avec la courbe 2-6 du chapitre 2 on remarque qu'elles ont le meme allure, sauf que les valeurs du tensions ne sont pas la meme, on deduit qu'il n'ya pas



desequilibre c'est a dire que l'equation de la courbe est de la forme

$$I=f(V) = I_{cc} - I_s(\text{EXP}(q.V/K.T) - 1)$$

Tableau de mesures

Voc= 61v		Icc= 1,8 A							
* I(A)	* 1,75 *	* 1,7 *	* 1,6 *	* 1,4 *	* 1,2 *	* 1 *	* 0,8 *	* 0,6 *	* 0,5 *
* V(V)	* 42 *	* 46,5 *	* 49 *	* 53 *	* 55 *	* 56,5 *	* 57 *	* 58,5 *	* 59 *
* I(A)	* 0,4 *	* 0,3 *	* 0,25 *						
							Pmax = 79,05 W		
* V(v)	* 59,5 *	* 60 *	* 60,3 *						

Remarque: Dans ce cas les diodes de protection n'interviennent pas.

3-1-2) Un module est cache(module 15)

Lors de la manipulation on a obtenu les resultats suivants:

-pour le module 15 occulte on a trouve:

- * tension a vide : Voc = 15,5 v
- * courant de court-circuit : Icc = 70 mA

- pour le groupement on a trouve:

- * tension a vide : Voc = 56 v
- * courant de court-circuit : Icc =1,9 A

Le trace de la courbe I=f(V) a ete fait a partir du tableau suivant:

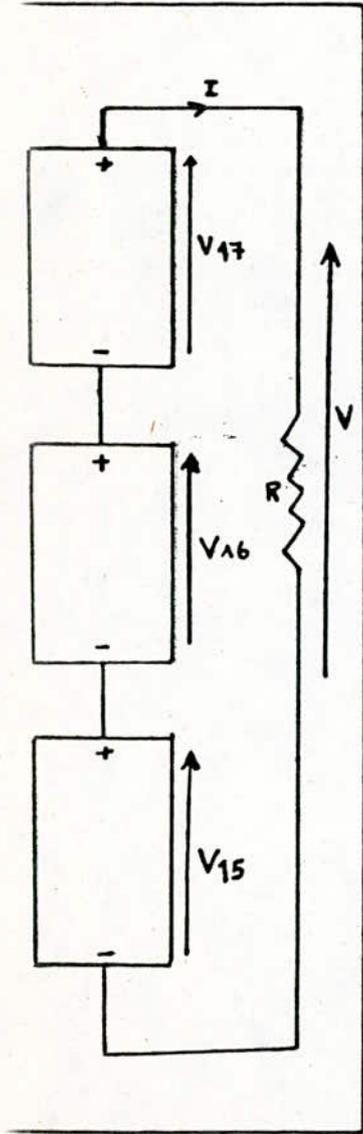


Fig. 4-6

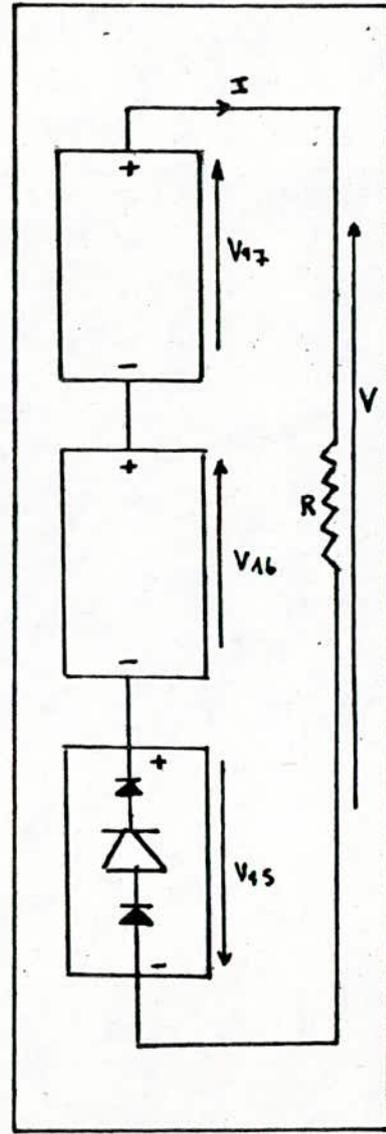


Fig. 4-7

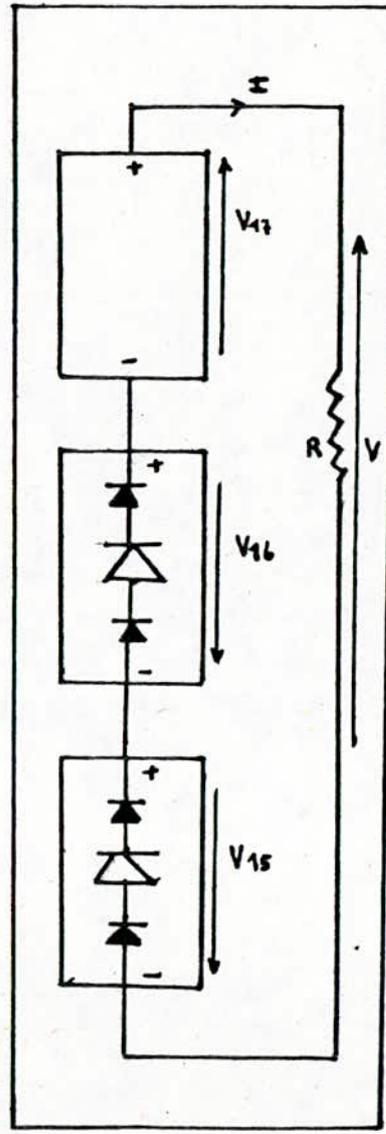


Fig. 4-8

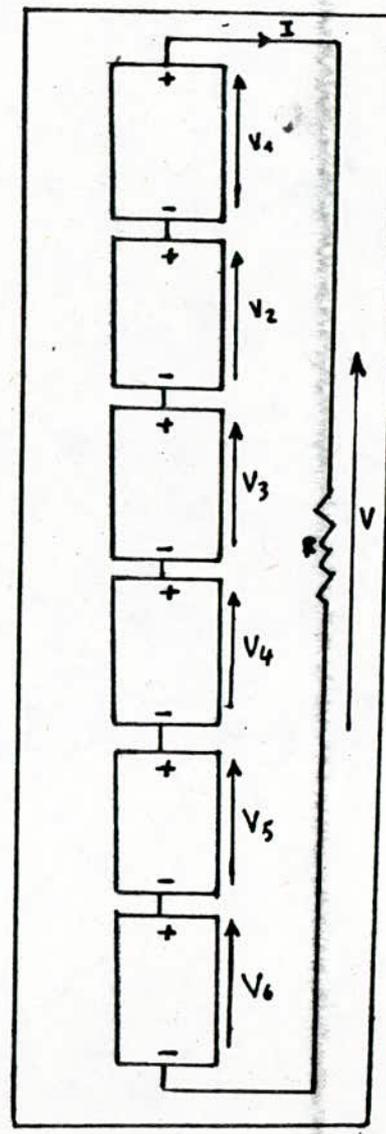


Fig. 4-9

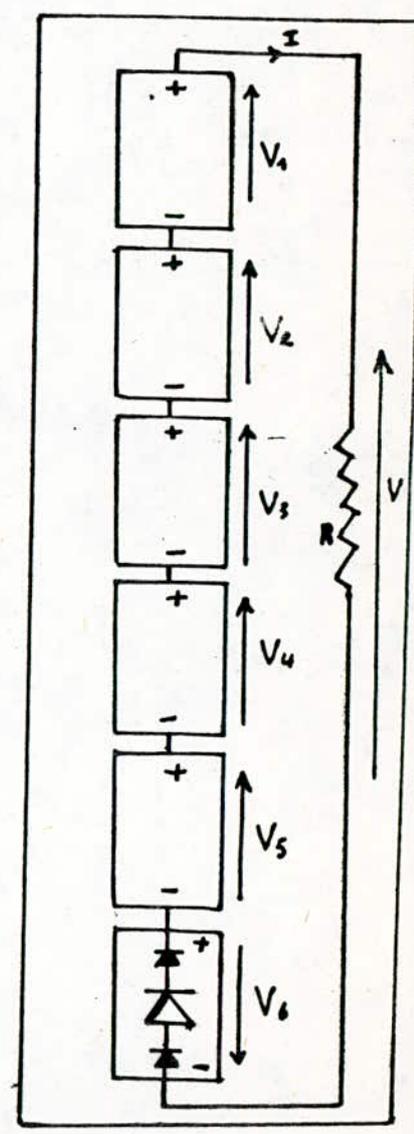


Fig. 4-10

* I(A) * 1,85 * 1,8 * 1,6 * 1,4 * 1,2 * 0,9 * 0,7 * 0,5 * 0,3 *

* V(v) * 1,5 * 17 * 25 * 27,2 * 28,5 * 29,5 * 30 * 30,7 * 32 *

* I(A) * 0,2 * 0,1 * 0,037 *

P_{max} = 40 W

* V(v) * 33 * 41 * 55 *

La courbe est represente sur la graphe II(2).

interpretation de la courbe

En comparant les deux courbes (II(1) et II(2)), on remarque pour ce dernier cas qu'on a une chute de tension d'environ 27,5 v (point A et A' de la courbe), ceci est du au fait que pour tout courant dont l'ordonne est superieur a l'ordonne de point A, le module cache devient recepteur. Donc d'apres la figure 4-7 on a la relation suivante:

$$V = V_{17} + V_{16} - V_{15} = R \cdot I$$

ou V₁₇ et V₁₆ representent les tensions delivrees par les modules non caches 16 et 17.

D'autre part, pour le module 15 on peut ecrire

$$V_{15} = V_1 + V_2 + V_3$$

avec V₁ = V₃ = 0,8 v qui represente les tensions des diodes D1 et D2.

La valeur 0,8 est tirée de la caracteristique de la diode (courbe I) d'autre part la valeur de V₂ sera:

$$V_2 = 12 \times 0,5 = 6v; \text{ où } 0,5 \text{ v est la tension delivree par une cellule.}$$

Donc l'expression precedente devient:

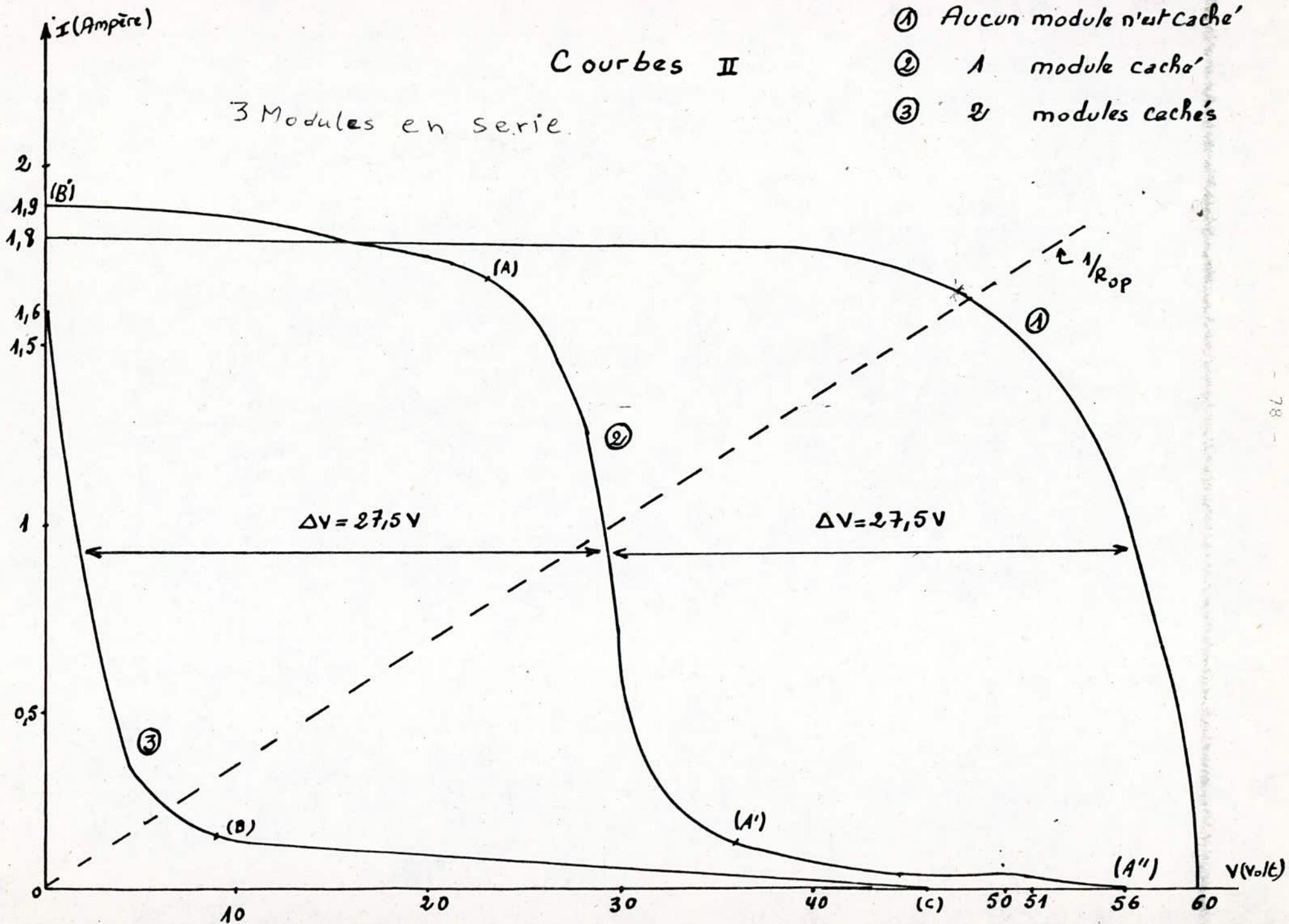
$$V_{15} = 2 \times 0,8 + 12 \times 0,5 = 7,6 \text{ v}$$

et comme un module en regime generateur delivre environ 20v

Courbes II

3 Modules en serie.

- ① Aucun module n'est caché'
- ② 1 module caché'
- ③ 2 modules cachés



d'ou

$$\Delta V = 27,5 \text{ v}$$

qui represente la chute de tension lorsqu'on occulte un seul module (module 15).

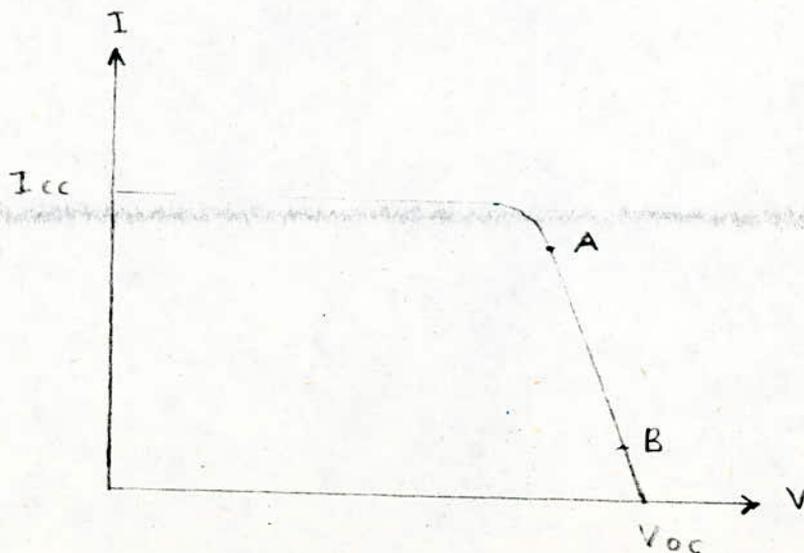
Remarques:

- entre les points A' et A'' (56,0) les diodes "by pass" sont bloquées, et le module 15 se comporte comme generateur.
- le courant de court-circuit a augmente dans ce cas car au cours des mesures faites le flux lumineux a augmente (point B).

3-1-3 Deux modules caches (modules 15 et 16)

On remarque sur ce graphe experimentale (courbe II(3)) qu'il n'ya pas de palier au debut, c'est dire un courant tres peu variable en fonction de la tension. Cela est du au fait que le module 17 non occulte delivre une tension $V_{17} = V_{15} + V_{16} = 7,5 + 7,5 = 15\text{v}$, meme si le groupement est en court-circuit (voir figure 4-8).

Or comme le module 17 est le seule module generateur, on se trouve dans la partie de la caracteristique (cas d'un seule module), ou le courant chute brusquement ceci correspond a la partie A B de la courbe ci-dessous:



Mais dès que le courant délivré par le module 17 devient faible, les diodes de protections se bloquent et on observe la caractéristique courant-tension de 3 modules en série avec un ensoleillement très faible (I_{cc} très faible): partie B.C de la courbe II(3).

3-2 Groupement de six modules en série (figure 4-9)

Afin de généraliser le phénomène observé au couplage précédent, on envisage dans ce qui suit l'expérimentation de six modules en série. Les mesures effectuées sont représentées par les courbes III, qui sont proches du cas de 3 modules en série, dans leurs allures générales. Les résultats sont groupés dans le tableau suivant:

* Nombre de * modules cachés	* P_{max} * (W)	* R * optimal * (Ω)	* R * critique * (Ω)	* P pour (W) * $R = R_{optimal}$	* chute * de puissance
* 0	* 213,9	* 41,3	*	* 213,9	* 0%
* 1	* 158,4	* 27,5	* 766,6	* 141	* 31,4%
* 2	* 96,8	* 20	* 428,5	* 70	* 67,3%
* 3	* 43,47	* 9,85	* 271,7	* 22,57	* 90,27%
* 4	* 3,43	* 7	* 55	* 2,4	* 98,97%

-La chute de puissance est égale à : $(1 - P(R=R_{op}) / P_{max}(0))$

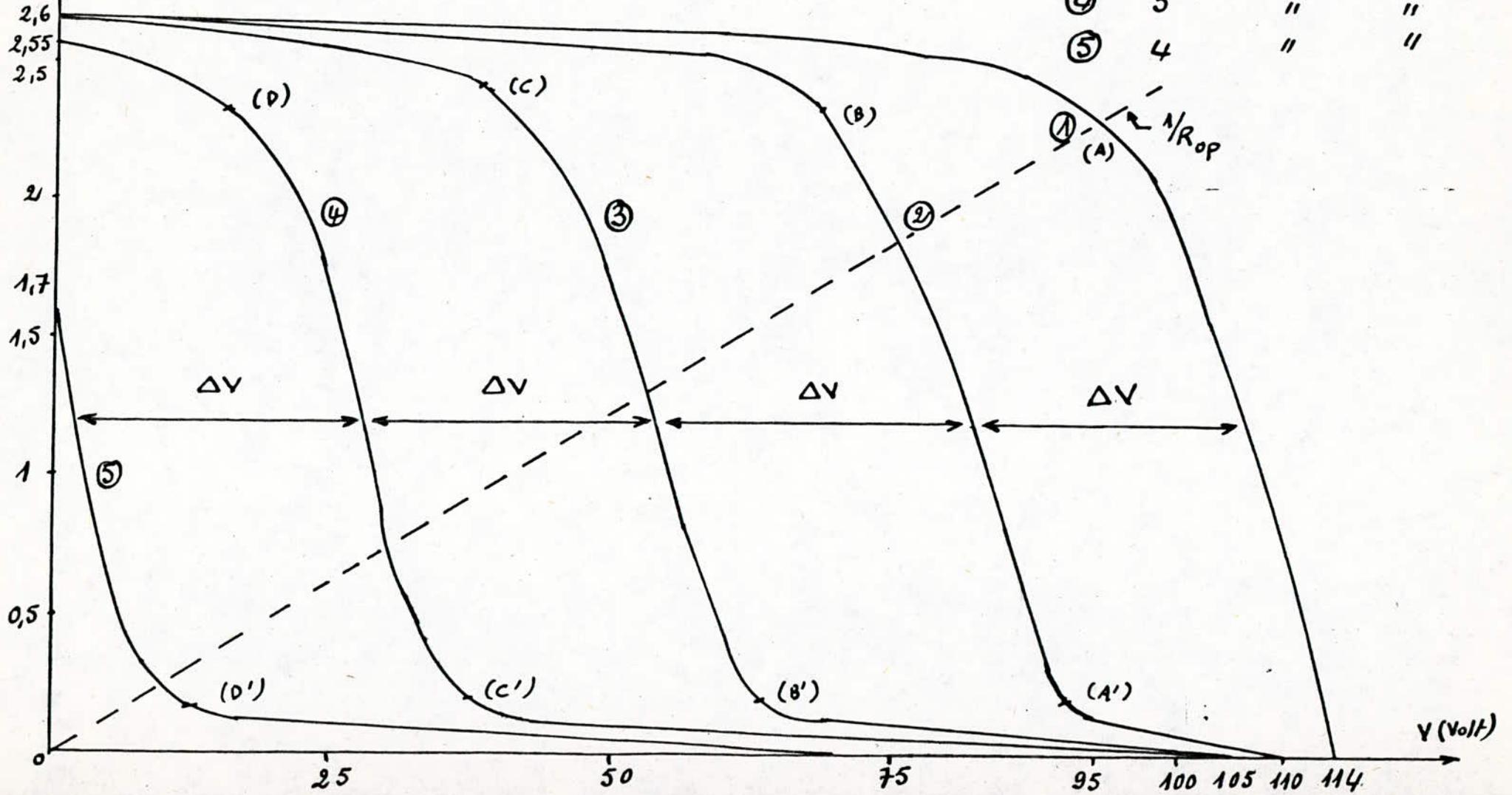
$P_{max}(0)$: est la puissance max avec 0 modules cachés.

I (Ampère)

Courbes III

Groupement de six modules en Serie

- ① Aucun module n'est caché
- ② 1 module caché
- ③ 2 modules cachés
- ④ 3 " "
- ⑤ 4 " "



- Les Pmax sont determinees a partir de la courbe III, (points A, P, C, D).
- La resistance optimale est celle qui correspond a la puissance Max (points A, B, C, D)
- La resistance critique est obtenu pour I= 0,1 A (occultation), voir points A', B', C', D'.
- P pour R= R optimale est la puissance delivree par le generateur ou groupement, lorsqu'il est charge par R optimale, et cela pour les different cas du desequilibre (intersection de la droite de pente egale a 1/R optimale avec les differents graphes).

Generalisation

Approximativement, on a trouve que R optimale avait une variation en fonction de V de la forme:

```
*****
*Roptimale= 1,582.10.V2 + 0,239.V + 5,335*
*****
```

De meme la resistance critique varie en fonction de V d'apres l'equation suivante:

```
*****
*Rcritique=4,1735.10.V2 + 4,189.V + 15,8773*
*****
```

Ces deux equations determinent les variations de R critique et R optimale en fonction de la tension; pour un groupement serie de modules, et cela pour differents modules occultes (desequilibre).

Remarques:

-La resistance critique diminue a chaque fois qu'on occulte un module en plus.Cette diminution s'explique par le fait que le courant resultant de l'occultation est le meme pour chaque module occulte(environ 0,1 A),alors que la tension totale du generateur diminue chaque fois qu'on occulte un module ($\Delta V_s \approx 27v$).

-Ces deux equations ont ete obtenues, par la methode des moindres carres et en utilisant les deux programmes donnees en Annexes(8 et 9).

4)Groupement en parallele

Nous avons groupe 3 modules en parallele(Fig.4-11).Les caracteristiques courant tension obtenues montrent que les graphes ont la meme forme,mais qu'il y'a une translation de I d'une valeur egale a $I_{cctot}/3$ chaque fois qu'on occulte un module .Ces graphes montrent aussi que les diodes "by pass" n'agissent pas car nous sommes dans un groupement parallele.

Les variations de puissances sont donnees par le tableau suivant:

* module cache * 0 * 1 * 2 *

* Pomptimal(W) * 67,5* 49 * 27 *

* P pour R=Rop * 67,5* 45,28* 14,6*

* chute de pui. * 0% * 33% *78,4%*

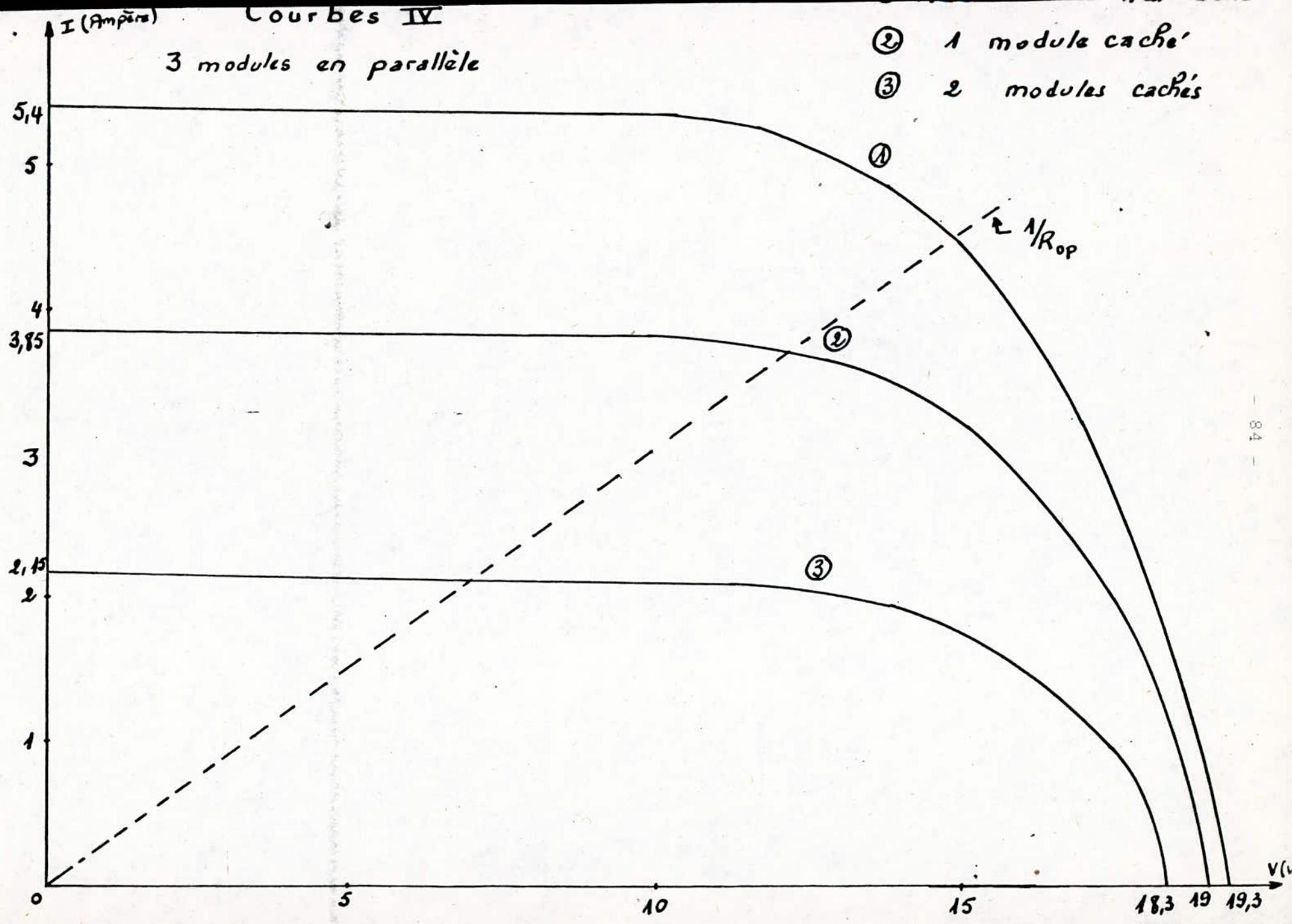
5)Groupement mixte(serie-parallele)

C'est le type de groupement le plus employe,dans le cas D'un recep-

Courbes IV

3 modules en parallèle

- ② 1 module caché
- ③ 2 modules cachés



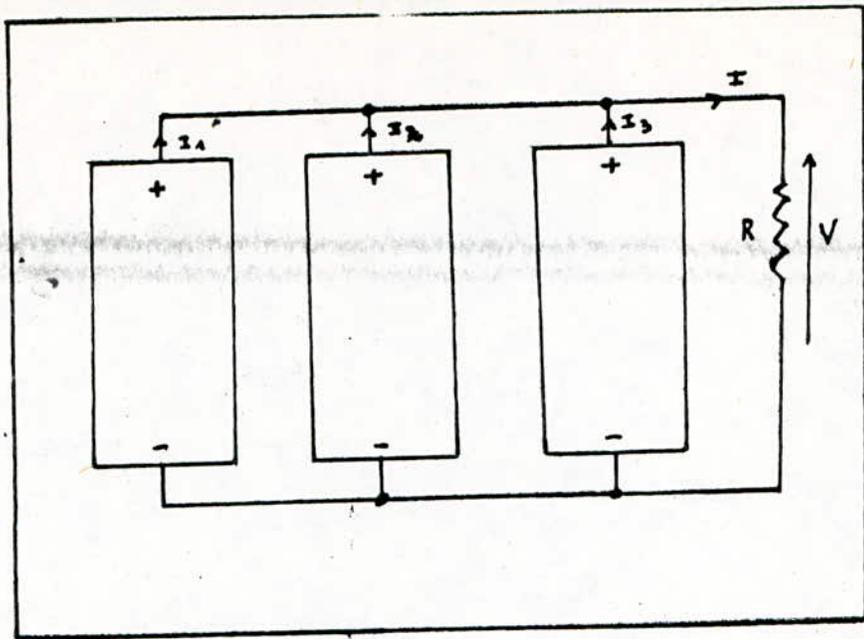


Fig. 4-11: schéma électrique de 3 modules en serie

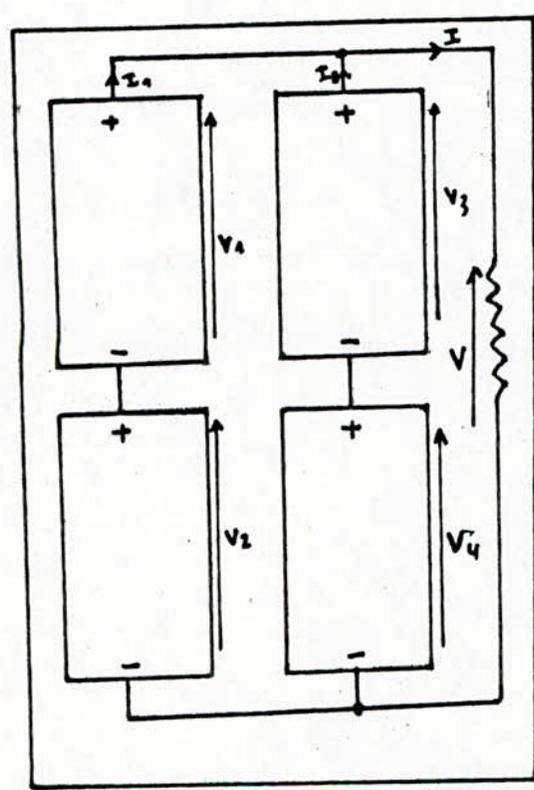


Fig. 4-12: Groupement mixte.

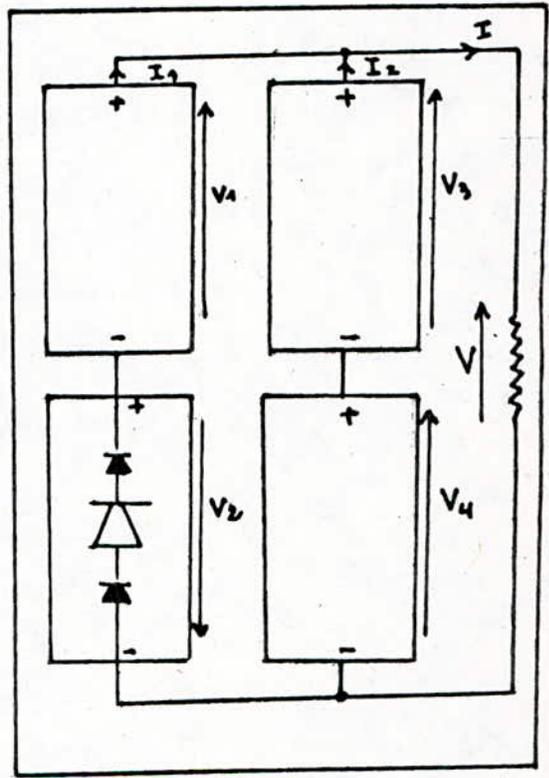
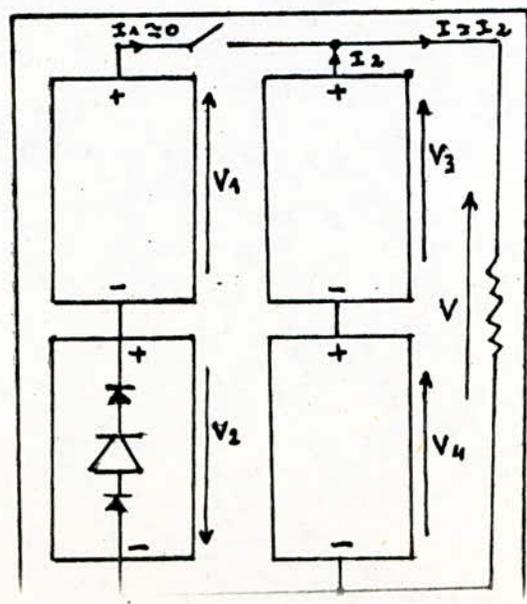


Fig. 4-13: Groupement mixte en déséquilibre.

Fig. 4-14.



teur assez puissant. Comme chaque module delivre environs 2 A sous 18v a 1000 W/m, alors on est oblige de faire appel a un groupement mixte pour des recepteurs qui travaillent sous une tension superieure a 18 v, et un courant superieur a 2 A (Fig.4-12).

5-1) Cas du groupement mixte en equilibre

Dans ce cas comme on s'y attendait, on obtient une caracteristique courant-tension de type classique, c'est a dire de la forme:

$$I = I_{cc} - I_0(\text{EXP}(q \cdot V / K \cdot T) - 1)$$

dont le graphe est donne par la courbe (V1) et trace a partir du tableau suivant:

* I (A) *	4,5	* 4,4	* 4,3	* 4,2	* 4	* 3,5	* 3	* 2,5	* 2 *
* _____ *									
* V (v) *	0	* 21	* 25	* 25,6	* 29,7	* 31,5	* 33	* 34	* 35 *
* _____ *									
* I (A) *	1,5	* 1	* 0,5	* 0					
* _____ *									
* V (v) *	36	* 37	* 38	* 38					
* _____ *									

Pmax = 118,8 W

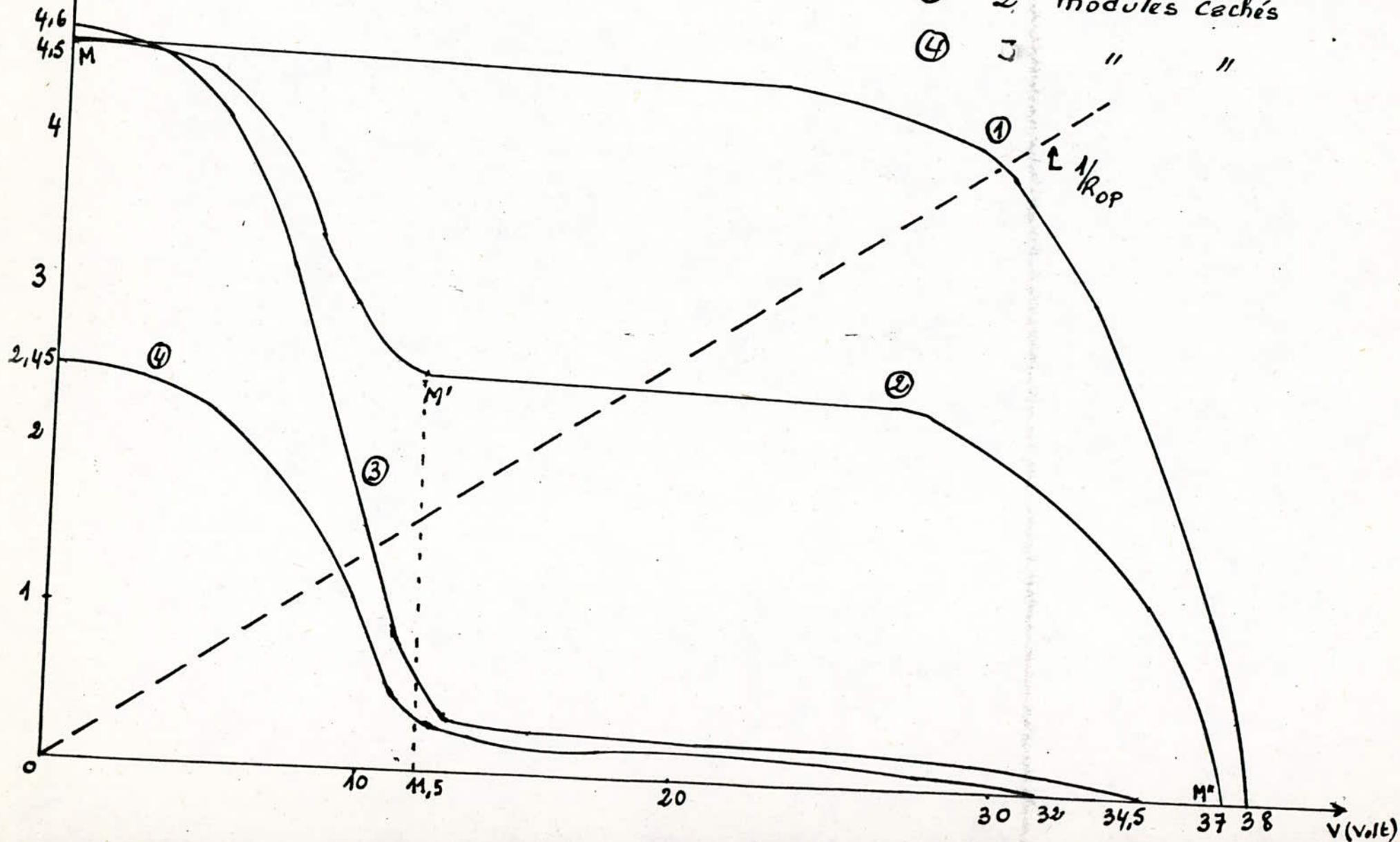
5-2 Un module cache

En cachant un module et en caracterisant le groupement, on obtient le graphe I=f(V), represente par la courbe (V2). On peut decomposer ce graphe en 2 parties:

I (Ampère)

Courbes V Groupement mixte

- ① Groupement en équilibre
- ② 1 module caché
- ③ 2 modules cachés
- ④ 3 " "



- une premiere partie entre les points M et M'.
- une seconde partie entre les points M' et M''.

L'explication de ce graphe se base sur les deux schemas 4-13 et 4-14, en effet d'apres la figure 4-13 on peut ecrire les equations suivantes:

$$V = R.I = V_3 + V_4 = V_1 - V_2$$

en court-circuit ($R = 0$) on a alors:

$$V_1 - V_2 = 0$$

et comme le module 2 est en desequilibre:

$$V_2 = 7,8 \text{ v} \longrightarrow V_1 = 7,8 \text{ v} \quad \text{a } R = 0$$

en augmentant la resistance R, le courant I diminue et la tension V augmente jusqu'a la tension $V = 11,5 \text{ v}$ (point M') ou :

$$V = V_1 - V_2 \longrightarrow V_1 - 7,8 = 11,5 \text{ v} \quad (\text{point M'})$$

$$\text{Donc } V_1 = 11,5 + 7,8 = 19,3 \text{ v}$$

Ainsi la zone MM' du graphe (2) des courbes ∇ represente la caracteristique d'un module photovoltaïque.

V_1 etant egale a 19,3v, le courant qui traverse les modules 1 et 2 est pratiquement nul (valeur de V_1 proche de V_{oc}). Donc le groupement peut etre represente par la figure 4-14.

Donc la zone entre les points M' et M'' represente la caracteristique $I=f(V)$ de deux modules en series.

Pour les 2 autres cas (2, ou 3 modules occultes), on observe l'existence du desequilibre qui se manifeste par la presence de la resistance critique, au dela de laquelle les modules occultes deviennent generateurs.

La variation des puissance est donnee par le tableau suivant:

* Nombre de	*	*	*	*	*
* module cache	* 0	* 1	* 2	* 3	*
* -----	*	*	*	*	*
* P optimale	* 118,8	* 64,4	* 23,1	* 12,96	*
* -----	*	*	*	*	*
* P pour	*	*	*	*	*
* R= Roptimale	* 118,8	* 43,92	* 14,07	* 1,14	*
* -----	*	*	*	*	*
* chute de	*	*	*	*	*
* puissance	* 0%	* 63%	* 88,2%	* 99,04%	*
* -----	*	*	*	*	*

6) Interpretation des resultats

L'étude expérimentale a montré que malgré les protections portées par le constructeur sur le module M53, le risque de déséquilibre n'a pas été éliminé. En effet les diodes de protections "by pass" empêchent la destruction du module, mais elles introduisent un déséquilibre qui se traduit par un déplacement du point de fonctionnement optimal, donc par une perte de puissance parfois très importante.

Ainsi on remarque que la chute de puissance atteint 98,97% pour une association série de six modules.

D'autre part pour une association parallèle, la chute de puissance atteint 78,4%.

Pour une association mixte la chute de puissance atteint 99,04% lorsqu'on occulte 3 modules.

Ainsi en Annexe 10 on a proposé le schéma d'un indicateur de déséquilibre.

C O N C L U S I O N

Le présent travail nous a permis d'étudier le phénomène de déséquilibre d'un générateur photovoltaïque lors de la répartition non uniforme du flux incident (occultation de cellules).

Après une étude théorique confirmée par une simulation numérique, nous avons obtenu les résultats suivants:

- on constate que les cellules solaires peuvent être considérées comme des générateurs de courant proportionnel au degré d'éclairement et à la surface de la jonction exposée à la lumière.
- Nous avons constaté aussi que dans une cellule solaire le courant ne dépasse pas une certaine valeur finie, qui dépend de l'intensité lumineuse, et qui est quasi constante dans une grande partie du champ des tensions débitées. Ceci même dans le cas où la résistance de la charge devient très faible.
- Nous avons de même observé que la résistance série d'une cellule déplace le point de fonctionnement d'où diminution de la puissance optimale.
- On a confirmé grâce aux relevés expérimentaux que l'allure de la courbe d'un module photovoltaïque est analogue à celle d'une cellule.
- On détermine l'écart de puissance entre les résultats expérimentale et théorique qui est de l'ordre de 17%.
- Lors d'une associations en série des modules solaires dont une cellule est occultée, la somme des tensions de l'ensemble des cellules risque de se retrouver aux bornes de la cellule occultée.
- Dans le cas d'un groupement des modules en parallèle dont une cellule est occultée, la somme du courant de l'ensemble des cellules peut être recue par la cellule occultée.
- La résistance critique du fonctionnement est plus faible lors de l'association parallèle des modules (pour $\phi = 350 \text{ W/m}^2$ $R_{cp} = 1 \text{ ohm}$), que

lors d'une association serie (pour $\phi = 360 \text{ W/m}^2$ $R_{cs} = 39,4 \text{ ohms}$).

-L'étude expérimentale qui a été confirmée par la simulation numérique a mis en évidence le double rôle de la protection dans les générateurs photovoltaïques.

En effet si la protection par diode assure le non retour du courant en cas de déséquilibre par contre elle introduit des pertes de puissances. Ces derniers se traduisent par le déplacement de la courbe (I-V) ou celui du point de fonctionnement optimale.

-L'importance du déséquilibre a été constatée lors de l'association mixte (serie-parallèle).

-Nous avons fait une étude théorique sur un montage qui permet d'indiquer le déséquilibre lors d'un groupement des modules, voir Annexe 10.

A N N E X E S

A N N E X E 1

PROGRAMME QUI PERMET LE CALCUL DE TAUX DE CONVERSION
R POUR LES 3 PREMIERS JOURNEES D'AVRIL

```

10 DEG
20 FOR n=91 TO 95
30 FOR t=8 TO 16
40 a= COS(37-45)*COS(15*(12-t))*COS(23.45*SIN(360*(284+n)/365))
      + SIN(37-45)*SIN(23.45*SIN(360*(284+n)/365))
50 b=SIN(37-45)*SIN(23.45*SIN(360*(284+n)/365))
60 c= COS(37)*COS(15*(12-t))*COS(23.45*SIN(360*(284+n)/365))
70 d= SIN(37)*SIN(23.45*SIN(360*(284+n)/365))
80 R= (a+b)/(c+d)
90 e= n-90
100 PRINT # 8," AVRIL";"          ";t"h";"          ";R="R
110 NEXT t
120 NEXT n
    
```

1 AVRIL	8 h	R=1.09915045
1 AVRIL	9 h	R=1.13751842
1 AVRIL	10 h	R=1.15523259
1 AVRIL	11 h	R=1.16353937
1 AVRIL	12 h	R=1.16601215
1 AVRIL	13 h	R=1.16353937
1 AVRIL	14 h	R=1.15523259
1 AVRIL	15 h	R=1.13751842
1 AVRIL	16 h	R=1.09915045
2 AVRIL	8 h	R=1.08663467
2 AVRIL	9 h	R=1.12812654
2 AVRIL	10 h	R=1.14735503
2 AVRIL	11 h	R=1.15638768
2 AVRIL	12 h	R=1.15907848
2 AVRIL	13 h	R=1.15638768
2 AVRIL	14 h	R=1.14735503
2 AVRIL	15 h	R=1.12812654
2 AVRIL	16 h	R=1.08663467
3 AVRIL	8 h	R=1.0743793
3 AVRIL	9 h	R=1.11888317
3 AVRIL	10 h	R=1.139583374
3 AVRIL	11 h	R=1.14932465
3 AVRIL	12 h	R=1.15222851
3 AVRIL	13 h	R=1.14932465
3 AVRIL	14 h	R=1.13958374
3 AVRIL	15 h	R=1.11888317
3 AVRIL	16 h	R=1.0743793

ANNEXE 2

PROGRAMME PERMETANT LA DETERMINATION DES COURBES
 $I=F(V)$ D'UNE CELLULE SOLAIRE A L'OBSCURITE ET
 SOUS ECLAIREMENT

```

10 SCREEN 3
20 CLS
30 X0=40
40 X1=360
50 Y1=150
60 FZ=200/.4
70 FW=100/190
80 FOR V1=0 TO .4 STEP .00001
90 I1=190-(2.1554/100000!)*(EXP(39.98*V1)-1)
100 PSET(V1*FZ+X1-I1*FW+Y1)
110 NEXT
120 Y0= 150
130 LINE(360,0)-(360,180)
140 LINE(360,150)-(639,150)
150 LINE(360,0)-(355,5):LINE(360,0)-(365,5)
160 LINE(639,150)-(634,145):LINE(639,150)-(634,155)
170 FX=150/.78
180 FY=150/240
190 FOR V=0 TO .78 STEP .00001
200 I=(6.87E-12)*(EXP(39.98*V)-1)
210 PSET (V*FX+X0,-I*FY+Y0)
220 NEXT
230 LINE(40,0)-(40,180)
240 LINE(90,150)-(300,150)
250 LINE(40,0)-(35,5):LINE(40,0)-(45,5)
260 LINE(300,150)-(295,145):LINE(300,150)-(295,155)
270 FOR I=0 TO 400 STEP 10
280 LINE (340,I)-(340,I+5)
280 NEXT
290 LOCATE 1,8 :PRINT "Id(mA)"
300 LOCATE 9,38:PRINT "V(v)":LOCATE 9,76:PRINT "V(v)"
310 LOCATE 3,47:PRINT "190"
320 LOCATE 6,1:PRINT "RS=0"
330 LOCATE 1,48:PRINT "I(mA)"
340 LOCATE 20,20:PRINT "Fig 1.10":LOCATE 20,58:PRINT "Fig 1.11"
350 END
    
```

A N N E X E 3

PROGRAMME PERMETANT LA CARACTERISATION D'UNE
CELLULE SOLAIRE POUR DIFFERENTES VALEURS DE LA
RESISTANCE SERIE

```

10 SCREEN 3
20 CLS
30 LINE(40,200)-(280,200)
40 LINE(280,200)-(275,195):LINE(280,200)-(275,205)
50 LINE(40,1)-(40,200)
51 LINE(40,1)-(35,6):LINE(40,1)-(45,6)
60 LINE(350,200)-(639,200)
61 LINE(639,200)-(634,195):LINE(639,200)-(634,205)
70 LINE(350,1)-(350,200)
71 LINE(350,1)-(345,6):LINE(350,1)-(355,6)
80 X0=50
90 Y0=200
100 FX=250/.525
110 FY=150/190
120 X2=400
130 Y2=200
160 FOR I=0 TO 190 STEP 2
170 V=.025*(LOG(46395.1*(190-I)+1))
180 V1=.025*(LOG(46395.1*(190-I)+1))-.0001*I
190 V2=.025*(LOG(463695.1*(190-I)+1))
200 V3=.025*(LOG(463695.1*(190-I)+1))-.001*I
210 Z2=V2*FX+X2:Y1=-I*FY+Y2
215 Z1=V1*FX+X0:Y=-I*FY+Y2
216 Z=V*FX+X0
220 Z3=V3*FX+X2
230 IF I=0 THEN 280
240 LINE (Z,Y)-(ZZ,YZ)
250 LINE (Z1,Y)-(ZZ1,YZ)
260 LINE (Z2,Y1)-(ZZ2,Y12)
270 LINE (Z3,Y1)-(ZZ3,Y12)
280 ZZ=Z
290 ZZ1=Z1
300 ZZ2=Z2:Y12=Y1
310 ZZ3=Z3
320 NEXT
330 FOR J=0 TO 400 STEP 10
340 LINE(310,J)-(310,J+5)
360 NEXT
361 LOCATE 4,1:PRINT"190":LOCATE 4,41:PRINT"190"
362 LOCATE 1,8:PRINT"I(mA)":LOCATE 16,48:PRINT"I(mA)"
363 LOCATE 14,6:PRINT"0":LOCATE 14,44:PRINT"0"
364 LOCATE 12,33:PRINT"V(v)":LOCATE 12,76:PRINT"V(v)"
365 LOCATE 5,25:PRINT"A":LOCATE 5,60:PRINT"A"
366 LOCATE 4,28:PRINT"B":LOCATE 4,72:PRINT"B"
367 LOCATE 22,17:PRINT"Fig.1-12":LOCATE 22,60:PRINT"Fig.1-13"
368 END

```

A N N E X E 4

PROGRAMME PERMETTANT LA CARACTERISATION DE DEUX
CELLULES SOLAIRES IDENTIQUES EN SERIES

```

10 SCREEN 3
20 CLS
30 X0 =180
40 Y0 =250
50 FX=150/.7
60 FY=200/240
70 FOR V=0 TO .78 STEP .0001
80 I=240-(6.87E-12)*(EXP(39.98*V)-1)
100 PSET (V*FX+X0,-I*FY+Y0)
120 NEXT
130 LINE(180,0)-(180,250)
140 LINE(180,250)-(550,250)
150 LINE(180,0)-(175,5):LINE(180,0)-(185,5)
160 LINE(550,250)-(545,245):LINE(550,250)-(545,255)
170 FOR V=0 TO 1.56 STEP .0001
190 I1= 240-(1.96E-25)*(EXP(39.98*V)-1)
210 PSET (V*FX+X0,-I1*FY+Y0)
220 NEXT
221 LOCATE 1,17:PRINT"I(mA)":LOCATE 17,45:PRINT".78"
222 LOCATE 17,24:PRINT"0":LOCATE 4,19:PRINT"240"
223 LOCATE 15,67:PRINT"V(v)":LOCATE 17,65:PRINT"1.56"
224 END

```

A N N E X E 5

PROGRAMME PERMETANT LA CARACTERISATION D'UN
MODULE PHOTOVOLTAIQUE ET LA DETERMINATION DE
SA PUISSANCE TOTALE

```

10 SCREEN 3
20 CLS
30 X0=100
40 Y0=300
50 FX=300/.527
60 FY=280/2.7:PM=0:PU=0
70 FOR V= 0 TO .527 STEP.001
80 I=2.7-(1.992E-09)*(EXP(39.9*V)-1)
90 P=I*V:PX=ABS(I*(V-A)):PU=PU+PX
100 IF P>PM THEN GOSUB 250
110 IF V=0 THEN 130
120 LINE(V*FX+X0,-I*FX+X0,Y0-B*FY)
130 A=V:B=I
140 NEXT
150 LINE(100,0)-(100,350)
160 LINE(0,300)-(639,300)
170 LINE(100,0)-(95,5):LINE(100,0)-(105,0)
180 LINE(639,300)-(634,295):LINE(100,0)-(634,305)
190 LINE(X0,T)-(S,T)
200 LINE(S,T0)-(S,T)
210 PU=PU*36
220 LOCATE 23,2:PRINT"LA PUISSANCE TOTALE D'UN MODULEA 36 CELLULE
EST DE";PU;"WATTS"
230 LOCATE 1,1
235 LOCATE 3,50:PRINT"PM=";PM*36;"WATTS"
240 E=I:F=V:PM=P
250 S=F*FX+X0:T=Y0-E*FX:REZTURN
260 END

```

ANNEXE 6

PROGRAMME PERMETANT LA DETERMINATION DE LA
RESISTANCE CRITIQUE POUR 3 MODULES EN SERIE

```

4   DIM K(10,100)
10  CLS
20  SCEEN 3 :DIM N(10)
25  FOR I=1 TO 10
30  READ N(I)
36  NEXT I
100 DATA .1,.2,.3,.4,.5,.6,.7,.8,.99,.999
110 GOSUB 1000
500 END
1000 Y0=350:X0=100
1010 FX=500/100
1020 FY=400/100
1025 FOR I=1 TO 10
1030 FOR F=.1 TO 100 STEP .1
1035 K(I,F)=LOG(1+47.448*(1-N(I)))
1037 T=7.262+LOG(K(I,F))-LOG(F*N(I))
1040 IF T>TM THEN TM=T
1041 LOCAT 1.15:PRINT TM
1050 X=F*FX+X0:Y=-T*FY+Y0
1052 PSET(X,Y):IF INT(X)=280 AND I=1 THEN LOCATE 3,4:PRINT
    T:LOCATE 20,30:PRINT F
1053 PSET(X,Y):IF IN(X)=280 AND I=10 THEN LOCATE 13,4:PRINT
    T:LOCATE 20,3054:PRINT F
1054 PSET(X,Y):IF IN(x)=440 AND I=1 THEN LOCATE 4,4:PRINT
    T:LOCATE 20,54:PRINT F
1055 A=F*FX+X0:B=-T*FY+Y0
1060 NEXT F
1065 NEXT I
1070 LINE(100,0)-(100,300):LINE(600,10)-(600,300)
1075 LINE(280,300)-(28,30)
1076 LINE(280,30)-(100,30)
1077 LINE(280,203)-(100,203)
1078 LINE(440,300)-(440,55)
1079 LINE(440,55)-(100,55)
1080 LINE(100,300)-(639,300)
1090 LINE(100,.0)-(95,5):LINE(100,0)-(105,5)
1091 LINE(600,10)-(595,15):LINE(600,10)-(605,15)
1100 LINE(639,300)-(635,295):LINE(639,300)-(635,305)
1101 LOCATE 1,4:PRINT"LOG(Rcs)"
1102 LOCATE 20,70:PRINT"F(mW/cm^2)"
1103 LOCATE 1,74:PRINT"N"
1104 LOCATE 19.74:PRINT"100"
1105 LOCATE 21,15:PRINT"DETERMINATION DE LA RESISTANCE CRITIQUE DE
    3 MODULES PHOTOVOLTAIQUE
1106 LOCATE 22,4:PRINT"Fig.1-4"
1107 RETURN

```

A N N E X E 7

PROGRAMME PERMETANT LA DETERMINATION DE LA
RESISTANCE CRITIQUE DE 3 MODULES PHOTOVOL-
VOLTAIQUES EN PARALLELES

```

4   DIM L(7,100)
5   DIM Z(7)
6   DIM H(7,10)
10  CLS
20  SCREEN 3:DIM N(7)
25  FOR I=1 TO 7
30  READ N(I)
35  DATA .002,.1,.2,.5,.7,.01,.999
36  NEXT I
110 GOSUB 1000
500 END
1000 Y0=170:X0=105
1010 FX=500/100
1020 FY=400/10
1025 FOR I=1 TO 7
1030 FOR F=1 TO 100 STEP .1
1031 AL=.30225
1032 BE=.006374
1033 GA=18,53
1034 S=.009025
1035 H(I,F)=AL*F*N(I)+36*BE
1037 Z(I)=ABS(LOG((AL*N(I))*F+36*BE)/36*BE))
1038 L(I,F)=LOG(GA*N(I)*AL*F*S*(F+72*BE))
1039 T=LOG(H(I,F)*Z(I))-L(I,F)
1040 IF T>TM THEN TM=T
1041 LOCATE 1,15:PRINT TM
1050 X=F*FX+X0:Y=-T*FY+Y0
1052 PSET(X,Y):IF INT(X)=280 AND I=1 THEN LOCATE 4,4:PRINT T:LOCATE 20,33:PRINT F
1053 PSET(X,Y):IF INT(X)=280 AND I=1 THEN LOCATE 11,1:PRINT T:L-OCATE 20,33:PRINT F
1054 PSET(X,Y):IF INT(X)= 440 AND I=1 THEN LOCATE 7,4:PRINT T:L-OCATE 20,54:PRINTE F
1060 NEXT F
1065 NEXT I
1070 LINE(105,0)-(105,302):LINE(602,10)-(602,302)
1074 FOR J=50 TO 300 STEP 10
1075 LINE(280,J)-(280,J+5)
1076 NEXT J
1078 FOR L=105 TO 280 STEP 10
1079 LINE(L,50)-(L+5,50)
1080 NEXT L
1081 FOR L=105 TO 280 STEP 10
1082 LINE(R,168)-(R+5,168)
1083 NEXT

```

ANNEXE 7 (SUITE)

```
1085 LINE(105,103)-(610,302)
1090 LINE(105,0)-(100,5):LINE(105,0)-(110,5)
1091 LINE(602,10)-(579,15):LINE(602,10)-607,15)
1100 LINE(639,300)-(635,295):LINE(639,300)-(635,305)
1101 LOCATE 1,4 :PRINT"LOG(Rcp)"
1102 LOCATE 20,70 :PRINT"F(mw/cm^2)"
1103 LOCATE 1,74 :PRINT"N"
1104 LOCATE 19,77 :PRINT"N"
1105 LOCATE 21,15 :PRINT"DETERMINATIO DE LA RESISTANCE CRITIQUE
DE 3 MODULES"
1106 LOCATE 22,145 :PRINT"PHOTOVOLTAIQUES EN PARALLELES DONT L'-
UN ET CACHE'"
1107 LOCATE 23,15 :PRINT"POUR UN TAUX D'ILLUMINATION ET UN FLUX
CONNU T=40°C"
1111 LOCATE 8,77 :PRINT".002"
1115 LOCATE 22,4 :PRINT"Fig.3-10"
1118 LOCATE 11.17 :PRINT".1"
1119 LOCATE 14,77 :PRINT".999"
1120 FOR Z=99 TO 440 STEP 10
1121 LINE(440,Z)-(440,Z+5)
1122 NEXT Z
1123 FOR H=105 TO 440 STEP 10
1124 LINE(H,99)-(H+5,99)
1125 NEXT H
1200 LOCATE 1,4:PRINT"LOG(Rcp)"
1202 LOCATE 20,70:PRINT"F(mw/cm^2)"
1203 LOCATE 1,74:PRINT"N"
1205 LOCATE 20,13:PRINT"0"
1230 RETURN
```

A N N E X E 8

PROGRAMME PERMETTANT LE CALCUL DE R PAR LA
METHODE DES MOINDRES CARRES

```

10 INPUT X1,X2,X3,X4,Y1,Y2,Y3,Y4
20 A= X1^4+X2^4+X3^4+X4^4
30 B= X1^3+X2^3+X3^3+X4^3
40 C= X1^2+X2^2+X3^2+X4^2
50 D= X1+X2+X3+X4
60 E=4
70 F=Y1*X1^2+Y2*X2^2+Y3*X3^2+Y4*X4^2
80 G=Y1*X1+Y2*X2+Y3*X3+Y4*X4
90 H=Y1+Y2+Y3+Y4
100 DELTA=A*(E*C-D^2)-B*(E*B-C*D)+C*(B*D-C^2)
110 DELTA1=F*(E-D^2)-G*(E*B-C^2)+H*(B*D-C^2)
120 DELTA2=-F*(E*B-C*D)+G*(A*E-C^2)-H*(B*D-B*C)
130 DELTA3=F*(B*D-C^2)-G*(A*D-B*C)+H*(A*C-B^2)
140 PRINT "A0"=DELTA1/DELTA;"A1"=DELTA2/DELTA;"A2"=DELTA3/DELTA

```

A0= 4.17353E-02 A1=4.18978707 A3=15.8773572

* R= 4.17353E-02*V^2 + 4.18978707*V +15.8773572 *

A N N E X E 9

PROGRAMME PERMETTANT LE CALCUL DU POLYNOME
D'INTERPOLATION DE R OPTIMALE=F(V)

```

10 INPUT X1,X2,X3,X4,X5,Y1,Y2,Y3,Y4,Y5
20 A=X1^4 +X2^4 +X3^4 +X4^4 + X5^4
30 B=X1^3 +X2^3 +X3^3 +X4^3 + X5^3
40 C=X1^2 +X2^2 +X3^2 +X4^2 +X5^2
50 D=X1+X2 +X3+X4+X5
60 E=5
70 F=Y1*X1^2+Y2*X2^2+ Y2*X2^2+Y3*X3^2+ Y4*X4^2+ Y5*X5^2
80 G=Y1*X1+ Y2*X2+ Y3*X3+ Y4*X4+ Y5*X5
90 H=Y1+Y2+Y3+Y4+Y5
100 DELTA=A*(E*C-D^2)-B*(E*B-C*D)+C*(D*B-C^2)
110 DELTA1=F*(E*C-D^2)-G*(E*B-C*D)+H*(B*D-C^2)
120 DELTA2=F*(E*B-C*D)+G*(A*E-C^2)-H*(A*D-B*C)
130 DELTA3=F*(D*B-C^2)-G*(A*D-B*C)+H*(A*C-B^2)
140 PRINT "A0"=DELTA1/DELTA;"A1"=DELTA2/DELTA;"A2"=DELTA3/DELTA

```

A0=1.58199E-03 A1=0.238953523 A2=5.33455887

* R=1.58199E-3*V^2 +0.238953523*V + 5.33455887 *

Etude d'un indicateur de déséquilibre

Après l'étude expérimentale du déséquilibre dans les générateurs photovoltaïques (type Arco-Solar M53), et après avoir bien assimilé le phénomène, on propose dans cet annexe le schéma d'un montage indicateur de déséquilibres pour groupement série ou mixte.

Le principe de fonctionnement de ce montage est donné à la figure 1.

Le générateur de niveaux logiques est réalisé à partir d'ampli-op montés en amplificateurs de différences (fig. 2), et alimentés par une seule source (-Vcc à la). Nous avons adopté ce type de montage car la tension qui nous intéresse est bien "la différence" de potentiel aux bornes de chaque module et non pas une tension par rapport à la référence des potentiels (masse).

D'après la figure 2 on a :

$$V_s = (e_2 - e_1) \cdot (R_2/R_1)$$

e_1 et e_2 étant respectivement les tensions à la borne (+) et la borne (-) de chaque module du générateur.

L'horloge est d'un multivibrateur en série avec un diviseur de fréquence (compteur). Le multivibrateur est un circuit intégré NE 555 fonctionnant à la fréquence 12 Hz, alors que le diviseur de fréquence est un compteur par 12 dont on recueille un signal de 1 Hz par la broche correspondante au bit du poids le plus faible.

Le multiplexeur a pour rôle l'aiguillage des informations (états logiques) issues du générateur d'états logiques (donc des modules), vers les L.E.D de visualisations.

Ainsi chaque tension différentielle issue d'un module est convertie en un état logique 1 (si $e_2 > e_1$, module non occulté donc en bon état) ou en état logique 0 ($V_s = 0$ si $e_2 < e_1$, module occulté ou défectueux), et aiguillée par le multiplexeur vers LED 1 et LED 2.

Ainsi si on a un "1" à la sortie du multiplexeur, la LED 1 (verte) s'allume. Ce "1" devient un "0" à la sortie de l'inverseur, donc la LED 2 (rouge) est éteinte: pas de déséquilibre.

Si on a un "0" à la sortie du multiplexeur, la LED 1 s'éteint. Ce "0" devient un "1" à la sortie de l'inverseur, donc la LED 2 s'allume: déséquilibre causé par le module indiqué par l'afficheur.

L'ensemble est alimenté à partir d'un module solaire, en parallèle duquel on place une diode zener qui agit comme un convertisseur continu-continu, et telle que: $V_z = 10\text{v}$ et $P = 10\text{ W}$.

Schéma de Principe d'un Indicateur de Déséquilibre

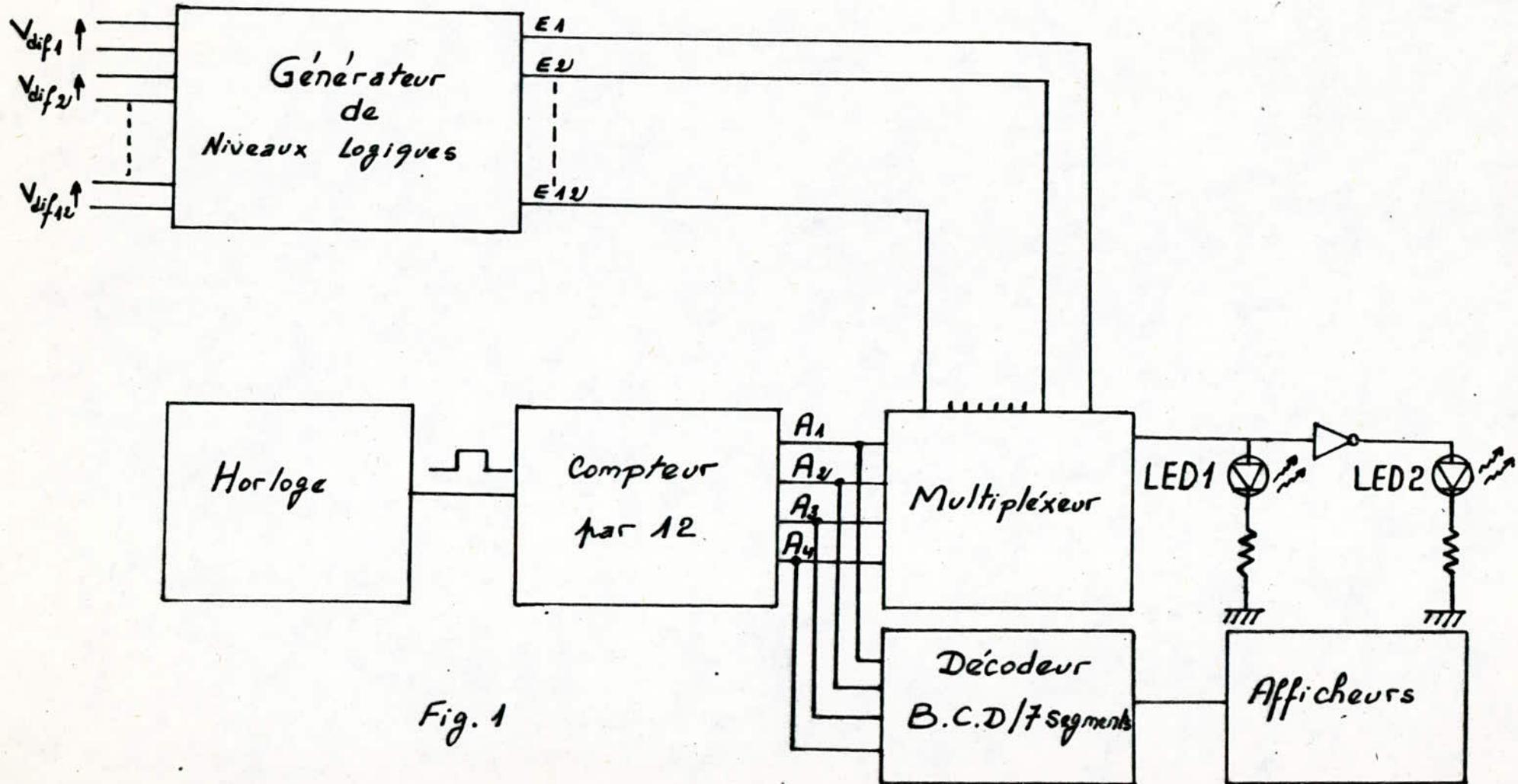


Fig. 1

Convertisseur continu-continu
à diode Zener.

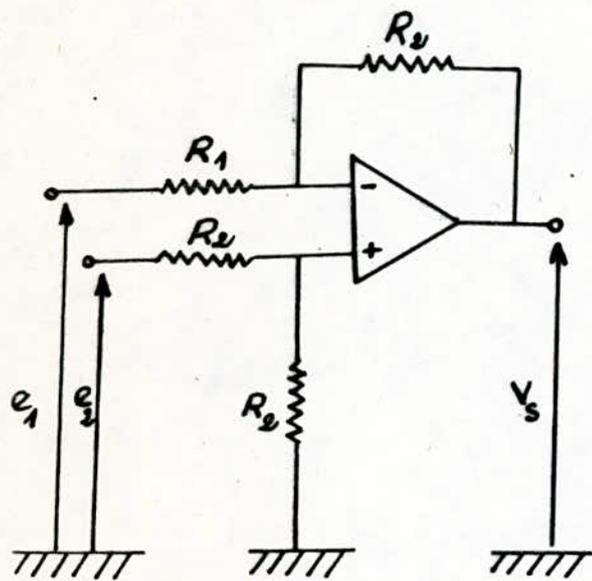
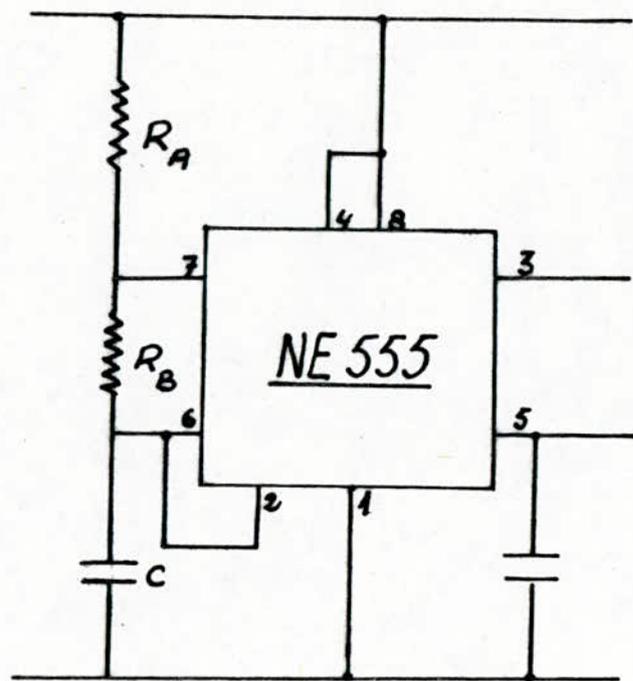


Fig. 2



$$F = \frac{1,49}{(R_A + 2R_B)C}$$

Fig. 3

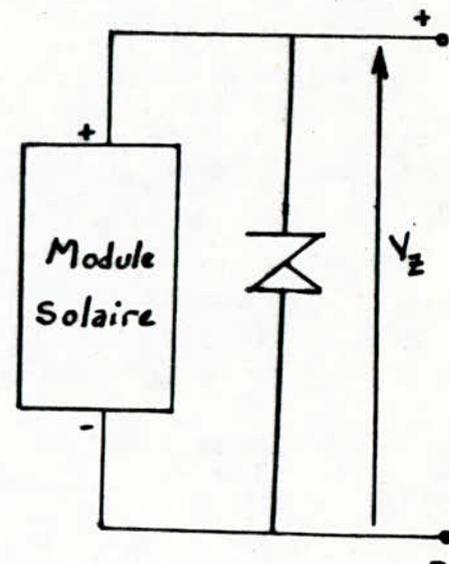


Fig. 4