

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

2/87

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

lex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : DÉLECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DU DESEQUILIBRE DANS UN GENERATEUR
PHOTOVOLTAIQUE (G.P.V)

CONCEPTION ET REALISATION D'UN INDICATEUR
DE DESEQUILIBRE DANS
UN G.P.V

Proposé Par :

S.A. DARADJI

Etudié par :

AGROUI KAMEL
KHODJA YAZID

Dirigé par :

S.A. DARADJI

PROMOTION : janvier 1987

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DU DESEQUILIBRE DANS UN GENERATEUR
PHOTOVOLTAIQUE (G.P.V)

CONCEPTION ET REALISATION D'UN INDICATEUR
DE DESEQUILIBRE DANS
UN G.P.V

Proposé Par :

S. A. DARADJI

Etudié par :

AGROUI KAMEL
KHODJA YAZID

Dirigé par :

S. A. DARADJI

PROMOTION : janvier 1987

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- mes chers parents .
- mon frère et mes soeurs .
- toute ma famille .
- mes neveux HAMID et NABIL .
- ma petite nièce AMINA agée d'une année le 06/01/87 .
- tous mes amis .

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

KHODJA Yazid

Je dédie ce travail à :

- * mes chers parents
- * mes frères et soeurs
- * mes nièces FELLA et NAWAL
- * toute ma famille
- * tous mes amis

AGROUI Kamel

 * ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات *
 * Département: Electronique دائرة : الإلكترونيات *
 * Promoteur: Mr S.A-DARRADJI الأستاذ المساعد : س. أ. داررادجي *
 * Elèves Ingénieurs: Mr K-AGROU التلاميذ المهندسين : ك. أ. أ. جرو *
 * Mr Y-KHODJA يا. خوجة *

BIBLIOTHEQUE - المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique
 يا. خوجة

الموضوع: إختلال التوازن في مولد كهروضوئي (م.ك.ض)
 تصميم وإنجاز منبه إختلال التوازن في م.ك.ض

ملخص: الدراسة المفصلة في هذا المشروع تهدف إلى تعريف المکانزمات الفيزيائية المرتبطة بظهور إختلال التوازن، راجع إما إلى إختلاف مميزات الخلايا الشمسية أو حجب سطح الخلايا. هذه الدراسة مركزة على التشابه العددي والبحث التجريبي

تصميم وإنجاز منبه الإختلال يعرفنا بحالات وحدات المولد والتأثيرات المتبادلة

Sujet: DESEQUILIBRE DANS UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE (G.P.V)

 CONCEPTION ET REALISATION D'UN INDICATEUR DE DESEQUILIBRE
 DANS UN G.P.V

Résumé: L'étude développée dans ce projet tente de définir les processus physiques liés à l'apparition des déséquilibres provenant soit d'une disparité des caractéristiques des cellules photovoltaïques soit d'une occultation accidentelle d'un certain nombre de cellules . Cette étude est basée sur la simulation numériques et une investigation expérimentale . La conception et la réalisation d'un indicateur de déséquilibre et de panne permet de connaître les états des modules et par conséquent ceux du générateur photovoltaïque dans son ensemble .

Subject: STUDY OF THE UNBALANCE INTO PHOTOVOLTAIQUE GENERATOR (P.V.G)

 CONCEPTION AND REALIZATION OF AN UNBALANCE INDICATOR INTO P.V.G

Abstract: This study try to define the physical processes which are related to the vanishment of the photovoltaic cells characteristics or the shadow of some of the cells. This work is divided in two works. The first one deales with the numerical simulation, the second part is devoted to pratical investigation . The study and building of the testes helps to know the subsystem states and therefore the photovoltaic generator all together .

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

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à :

- * Monsieur S-A. DARADJI, professeur et responsable du laboratoire d'énergie solaire à l'E.N.P.A. pour avoir personnellement dirigé cette étude .
- * Monsieur M. HADDADI, professeur à l'E.N.P.A. pour ses précieux conseils .
- * Monsieur BELHAMEL, directeur de la station solaire de BOUZAREAH, pour son aide matériel.
- * Monsieur A. ANSSEUR, magasinier du département d'électronique pour sa précieuse collaboration .
- * Tous ceux qui ont contribué de **prés** ou de loin à la réalisation de ce travail .

INTRODUCTION.

 CHAPITRE I GENERALITES SUR LES CELLULES SOLAIRES

- 1-1 Introduction.
- 1-2 La cellule solaire.
- 1-2-1 Généralités.
- 1-2-2 Technologie conventionnelle des cellules solaires au silicium.
- 1-3 L'effet photovoltaïque.
- 1-3-1 Etude qualitative.
- 1-3-2 Etude quantitative.
- 1-3-2a Jonction P-N à l'équilibre.
- 1-3-2b Jonction P-N polarisée dans l'obscurité.
- 1-3-2c Jonction P-N sous éclaircissement.
- 1-4 Schéma équivalent d'une cellule solaire.
- 1-4-1 Définition des différents paramètres.
- 1-4-2 Modèle théorique de la cellule solaire.
- 1-5 Réponse spectrale d'une cellule solaire.
- 1-6 l'absorption dans les cellules solaires.
- 1-7 Le rendement dans les cellules solaires.
- 1-8 Association des cellules solaires.
- 1-8-1 Introduction.
- 1-8-2 Association série.
- 1-8-3 Association parallèle
- 1-8-4 Association série-parallèle(mixte).

 CHAPITRE II ETUDE THEORIQUE ET SIMULATION DU DESQUILIBRE

 DANS UN RESEAU DE MODULES SOLAIRES

- 2-1 Définition.
- 2-2 Causes du déséquilibre.
- 2-2-1 Causes propres à la cellules.
 - A-la résistance série (R_s)
 - a-Méthodes d'évaluation de R_s .
 - b-Influence de R_s sur la caractéristiques I-V.
 - B-Influence de R_{sh} sur la caractéristique I-V.
 - C-Influence du facteur ALPHA.
- 2-2-2 Causes extérieures à la cellule.
 - A-Effet de la température.
 - B-Effet du flux.
 - C-Diverses autres causes.
- 2-3 Etude du déséquilibre dans une association de cellules solaires
- 2-4 Description d'un module solaire de type ARCO SOLAR M 53 .
 - A-Modélisation d'un module solaire.
 - B-Simulation par ordinateur des caractéristiques I-V et P-V du module M 53 .
- 2-5 Simulation par ordinateur du déséquilibre dans une association série de modules solaires.
 - A-Schéma équivalent d'un module devenu récepteur .
 - B-Comportement de l'association dans les cas suivants
 - a-Cas où Aucun module n'est occulté.
 - b-Cas où un module est occulté.
 - c-Cas où deux modules sont occultés.
 - d-Conclusion.

- 3-1 Introduction.
- 3-2 Conditions expérimentales.
 - A-Installation de base.
 - B-Choix de l'heure des relevés expérimentaux.
 - C-Téchniques de mesures du courant et de la tension.
- 3-3 Caractéristiques d'un module solaire type M 53 .
- 3-4 Association de deux modules solaires en série.
 - A-Cas où aucun module n'est occulté.
 - B-Cas où un module est occulté.
- 3-5 Association de trois modules en série.
 - A-Cas où aucun module n'est occulté.
 - B-Cas où un module est occulté.
 - C-Cas où deux modules sont occultés.
- 3-6 Association de deux modules en parallèle.
 - A-Cas où aucun module n'est occulté.
 - B-Cas où un module est occulté.
- 3-7 Association mixte.
 - A-Cas où aucun module n'est occulté.
 - B-Cas où un module est occulté.
 - C-Cas où deux modules sont occultés.
 - D-Cas où trois modules sont occultés.
- 3-8 Association de vingt quatre modules.
 - 3-8-1 Introduction.
 - 3-8-2 Caractéristiques I-V et P-V de l'association dans les cas suivants:
 - A-Cas où aucune branche n'est occultée.
 - B-Cas où une branche est occultée.
 - C-Cas où deux branches sont occultées.
 - D-Cas où trois branches sont occultées.
 - 3-8-3 Conclusion.

- 4-1 Introduction.
- 4-2 Principe de base.
- 4-3 Fonctionnement électronique et choix des composants.
 - 4-3-1 Ponts diviseurs de tensions.
 - 4-3-2 Compérateurs de tensions.
 - 4-3-3 Visualisations des états des modules.
 - 4-3-4 Visualisation de l'état normal du générateur.
 - 4-3-5 L'horloge.
 - 4-3-6 Visualisation de l'état de déséquilibre du générateur.
 - 4-3-7 Indicateur sonore de l'état de déséquilibre du générateur.
 - 4-3-8 Alimentation.
 - a-Alimentation piles/secteur.
 - b-Alimentation par module solaire.
 - 4-3-9 Voltmètre-Ampèremètre.
- 4-4 Réalisation pratique.
 - 4-4-1 Circuits imprimés.
 - 4-4-2 Câblage.

- 4-5 Réalisation de la programmation.
- 4-5-1 Mise en marche de l'I.D.F .
- 4-5-2 Procédure de programmation.
- 4-6 Exemple d'application.
- 4-7 Utilisation de l'I.D.F en tant que régulateur.
 - a-Description d'un système photovoltaïque.
 - b-Principes de la régulation .

CONCLUSION.

ANNEXE (LISTING DES PROGRAMMES)

BIBLIOGRAPHIE

La question du remplacement des sources d'énergie conventionnelles et la recherche d'énergie nouvelles est d'actualité brûlante pour l'Algérie. On pense sérieusement à l'après pétrole.

Une des solutions activement étudiée en Algérie et par le monde pour la production d'énergie électrique est celle basée sur la conversion photovoltaïque.

Toutefois étant donné le prix de revient relativement élevé des modules solaires, il est donc du devoir de l'ingénieur de prêter une grande attention lors du dimensionnement et l'exploitation de ces générateurs.

Un des problèmes qui se pose pour ces derniers est celui de la recherche de la puissance optimale que l'on peut en tirer.

Cette puissance est liée évidemment à l'intensité de rayonnement solaire qui arrive au niveau du récepteur (générateur photovoltaïque). Ce rayonnement peut, pour plusieurs raisons, ne pas être uniformément réparti sur la totalité de la surface des modules solaires.

La répartition non uniforme du flux solaire engendre l'apparition d'un déséquilibre électrique à la sortie des modules. Ce déséquilibre peut être néfaste à la centrale électrique photovoltaïque, car d'une part il affaiblit la puissance transmise à la charge et d'autre part il fait de sorte que certains modules se comportent comme de vrais récepteurs à l'intérieur même du générateur.

Ces problèmes nous semblent très sérieux pour la centrale photovoltaïque. Aussi on se propose dans ce projet de :

a- définir les processus physiques liés à l'apparition du déséquilibre et ce par étude théorique basée sur la simulation numérique et une investigation expérimentale.

b- tirer les interprétations qui s'imposent et susceptibles d'aider le concepteur et l'exploitant à apprécier les risques de déséquilibres.

c- concevoir et réaliser un appareil capable de renseigner à tout moment et sans intervention directe sur l'installation sur l'état énergétique de chaque module et par conséquent celui du générateur dans son ensemble.

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES CELLULES SOLAIRES

1-1: Introduction .

La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire de piles solaires constituées de cellules solaires, suivant le processus appelé couramment effet photovoltaïque. Aussi les cellules solaires sont non seulement adaptées aux régions ensoleillées mais elles présentent aussi un intérêt pour les régions à faible ensoleillement. Ce comportement provient du fait que les photons de la lumière solaire transfèrent directement leur énergie aux électrons sans étape thermique intermédiaire, d'où la possibilité d'une production relative des cellules quelque soit les conditions météorologiques.

1-2 La cellule solaire.

1-2-1: Généralités

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus adapté pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. La cellule solaire est fabriquée à partir d'une plaquette de silicium monocristallin dopée différemment sur chacune des faces, dont l'une est dopée positivement et l'autre dopée négativement. L'ensemble forme une jonction P-N .

La figure 1-1 illustre la structure d'une cellule solaire au silicium. Cette structure est la plus répandue mais on peut y apporter des modifications, par exemple: réduire l'épaisseur de la cellule, supprimer la couche anti-reflet, employer d'autres matériaux pour doper le silicium.....

1-2-2: Technologie conventionnelle des cellules solaires au silicium.

Cette technologie peut se résumer ainsi:

- Silicium monocristallin tiré à partir d'un creuset (CZOCHEWSKI) dopé au bore (accepteur); résistivité située entre 0.1 et 10 ohms.cm ; plaquettes ayant une épaisseur d'environ 0.3 mm coupées à la scie ; polissage mécanique et chimique des plaquettes .
- Dopage au phosphore (donneur) dans un four de diffusion vers 1000 °C sous une atmosphère d'oxyde de phosphore. L'épaisseur de la couche N ainsi formée est de 0.3 micromètre.
- Contacts évaporés sous vide , trois couches successives: titane pour l'adhérence, Palladium comme protection contre l'humidité, argent comme conducteur de courant.
- Couches anti-reflet évaporées sous vide.

1-3: L'effet photovoltaïque.

1-3-1: Etude qualitative.

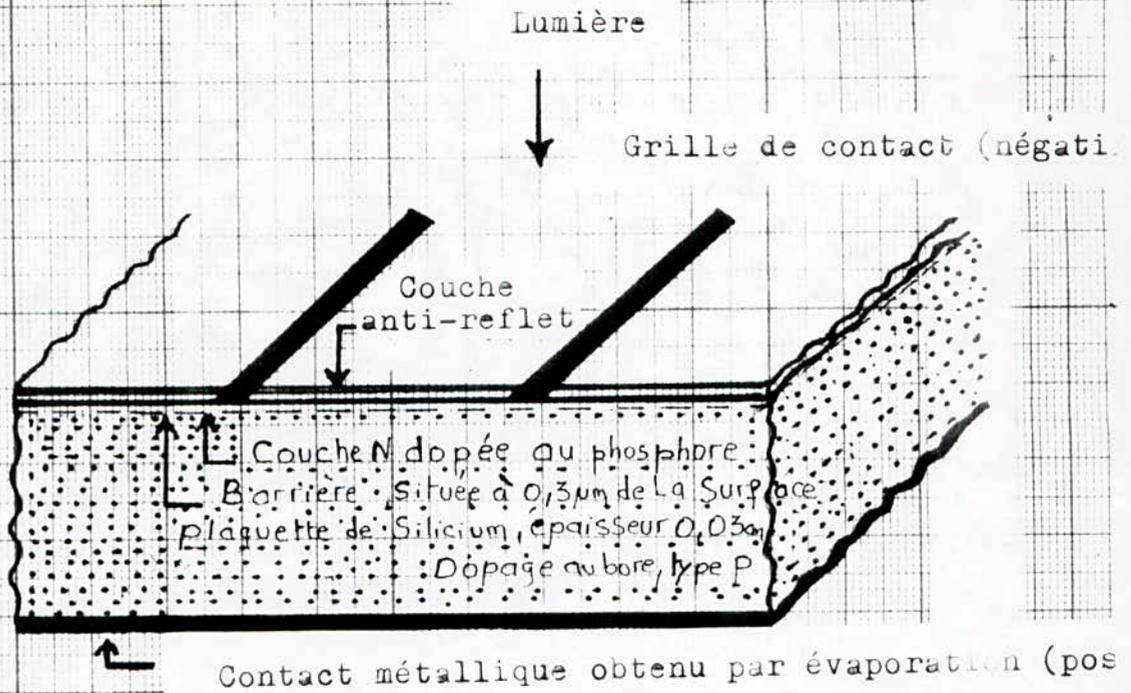


Fig-1.1-Coupe schématique d'une cellule solaire conventionnelle au silicium .

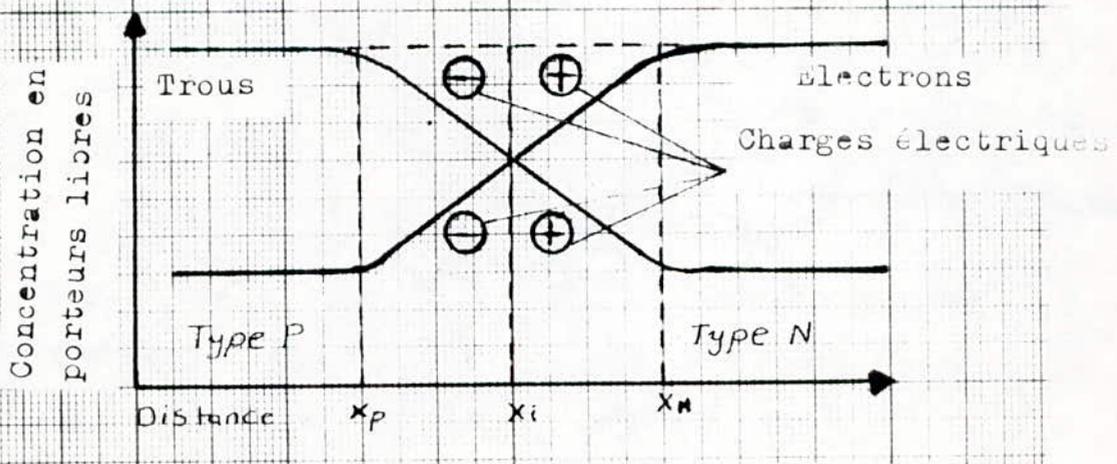


Fig-1.2-Concentration d'électrons et de trous à l'interface P-N à l'équilibre thermique.

(Distribution de boltzmann)

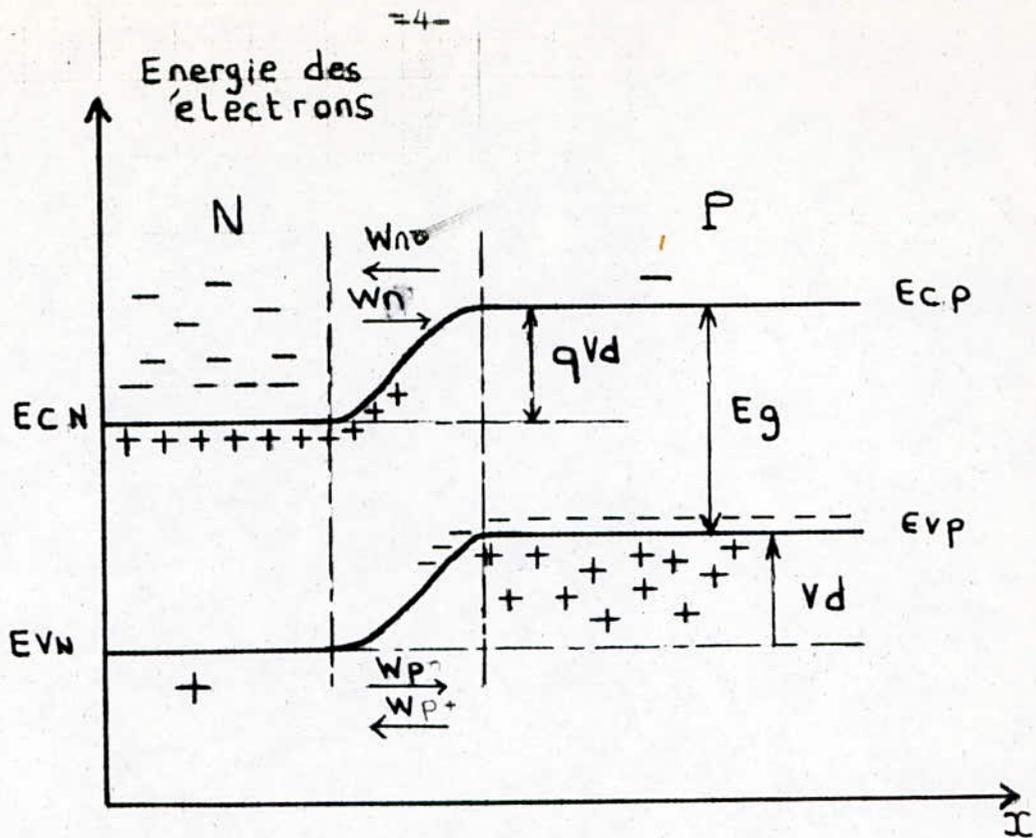


Fig 1.3 Niveau d'énergie d'une jonction à l'état d'équilibre

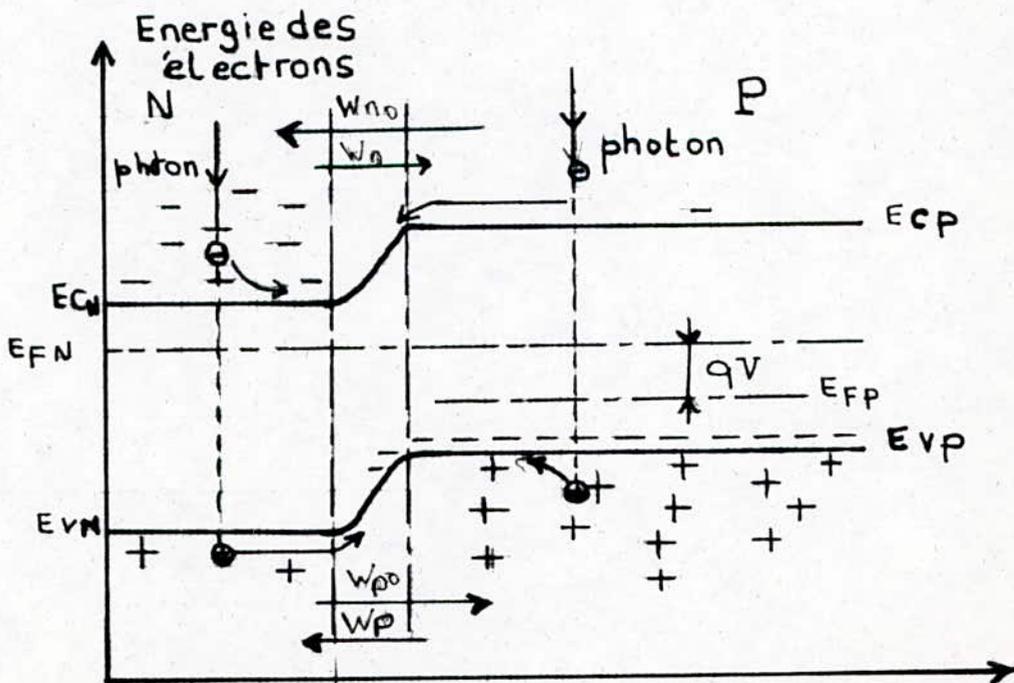


Fig 1.4 Niveau d'énergie d'une cellule éclairée débitant dans une charge

Lorsque un matériau Semi-conducteur se trouve exposé aux radiations lumineuses, il y'a apparition de l'effet photovoltaïque. Cet effet ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel E_g dans le Semi-conducteur avant d'être éclairé. Cette barrière existe à l'interface entre la région dopée positivement et la région dopée négativement d'une jonction P-N. Si ce matériau est éclairé, l'énergie $h\nu$ d'un faisceau lumineux est transmise aux électrons de valence qui vont migrer dans le Semi-conducteur sous forme de paires d'électrons-trous. Donc les charges électriques sont séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre les charges négatives. C'est à-dire apparition d'une tension, donc un courant électrique. C'est l'effet photovoltaïque qui est un processus de production de puissance électrique.

1-3-2: Etude quantitative.

Le phénomène physique de l'effet photovoltaïque est étroitement lié à la théorie de la diode. Pour rendre plus accessible la compréhension de cet effet, il est donc nécessaire de prendre en compte quelques éléments de la physique du Semi-conducteur.

1-3-2-a: Jonction P-N à l'équilibre :

Soit N_d et N_a les concentrations des atomes respectivement donneurs et accepteurs, injectés dans le Semi-conducteur intrinsèque. On a alors :

$$\begin{array}{l} \text{Région N} \\ \left\{ \begin{array}{l} n = N_d \quad (1-1) \\ P_o = n_i / N_d \quad (1-2) \end{array} \right. \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Région P} \\ \left\{ \begin{array}{l} n_o = n_i / N_a \quad (1-3) \\ P = N_a \quad (1-4) \end{array} \right. \end{array}$$

avec :

- n: concentration des majoritaires (électrons) de la région N.
- n_o : // // minoritaires (trous) de la région P.
- P: // // majoritaires (trous) de la région P.
- P_o : // // minoritaires (électrons) de la région N.

A l'interface, les électrons diffusent depuis la couche N vers la couche P par suite de leur gradient de concentration élevée. Ce courant de diffusion, de la face N vers la face P, s'écrit :

$$I_n = e \cdot D_n \cdot dn/dx \quad (1-5) \quad \text{où } D_n \text{ est la constante de diffusion pour les électrons, } x \text{ est la distance dans le cristal et } e \text{ la charge électrique élémentaire.}$$

La relation d'EINSTEIN permet de calculer la constante de diffusion D_n :

$$D_n = \mu_n \cdot K \cdot T / e \quad (1-6)$$

μ_n est la mobilité des électrons.

K: constante de BOLTZMAN.

T: température absolue.

Symétriquement, un courant de diffusion des trous I_p s'écoule en direction opposée. Il est donné par : $I_p = \mu_p \cdot K \cdot T / e \quad (1-7)$

Les couches P et N sont électriquement neutres avant d'être réunies. Quand la jonction se forme, les charges négatives se déplacent dans le matériau de type P laissant derrière elles un déficit en charges négatives, c'est-à-dire une charge positive. Du côté opposé, les trous

diffusent dans le matériau de type N. Ces deux courants font que la couche N de l'interface se charge positivement alors que la couche P prend une charge négative.

A l'état d'équilibre les charges majoritaires ne peuvent plus diffuser dans la région voisine de la barrière de potentiel qui s'oppose à leur mouvement. Cette barrière est donnée par : $V_D = V_N - V_D$ (1-8)

Le flux W_n^0 des électrons minoritaires, dans la région P, qui passe dans la région N, va juste compenser le flux W_n des électrons majoritaires dans la région N. Ces derniers diffusent dans le sens inverse. De même le flux des trous W_p^0 et W_p se compensent aussi bien qu'aucun courant n'est perceptible dans le circuit extérieure. (Fig 1-3)

1-3-2-b: Jonction P-N polarisée dans l'obscurité:

Si une jonction P-N est polarisée et placée dans l'obscurité, la tension de polarisation s'ajoute en valeur algébrique à la barrière de potentiel. Soient alors :

$$V_N - V_D = V_D - V \quad (1-9) \text{ en polarisation directe.}$$

$$V_N - V_d = V_D + V \quad (1-10) \text{ en polarisation inverse.}$$

En polarisation directe (fig 1-6 courbe a) V_D est progressivement compensée alors que la barrière $e.V_D$ est réduite. Les courants de champ qui compensent, à l'équilibre, les courants de diffusion dus aux gradients des électrons et des trous dans la jonction sont alors réduites. Il apparaît un courant de trous et d'électrons en sens opposé. Quand la tension directe appliquée est égale à V_D , la barrière de charges d'espace disparaît complètement et le courant augmente brusquement suivant l'équation suivante :

$$I = I_s. (\exp(e.V/K.T) - 1) \quad (1-11)$$

I_s : courant de saturation (ou courant inverse)

$$I_s = e. ((D_n.n_0/L_n) + (D_p.P_0/L_p)) \quad (1-12)$$

L_n et L_p sont les longueurs de diffusion respectivement des électrons et des trous.

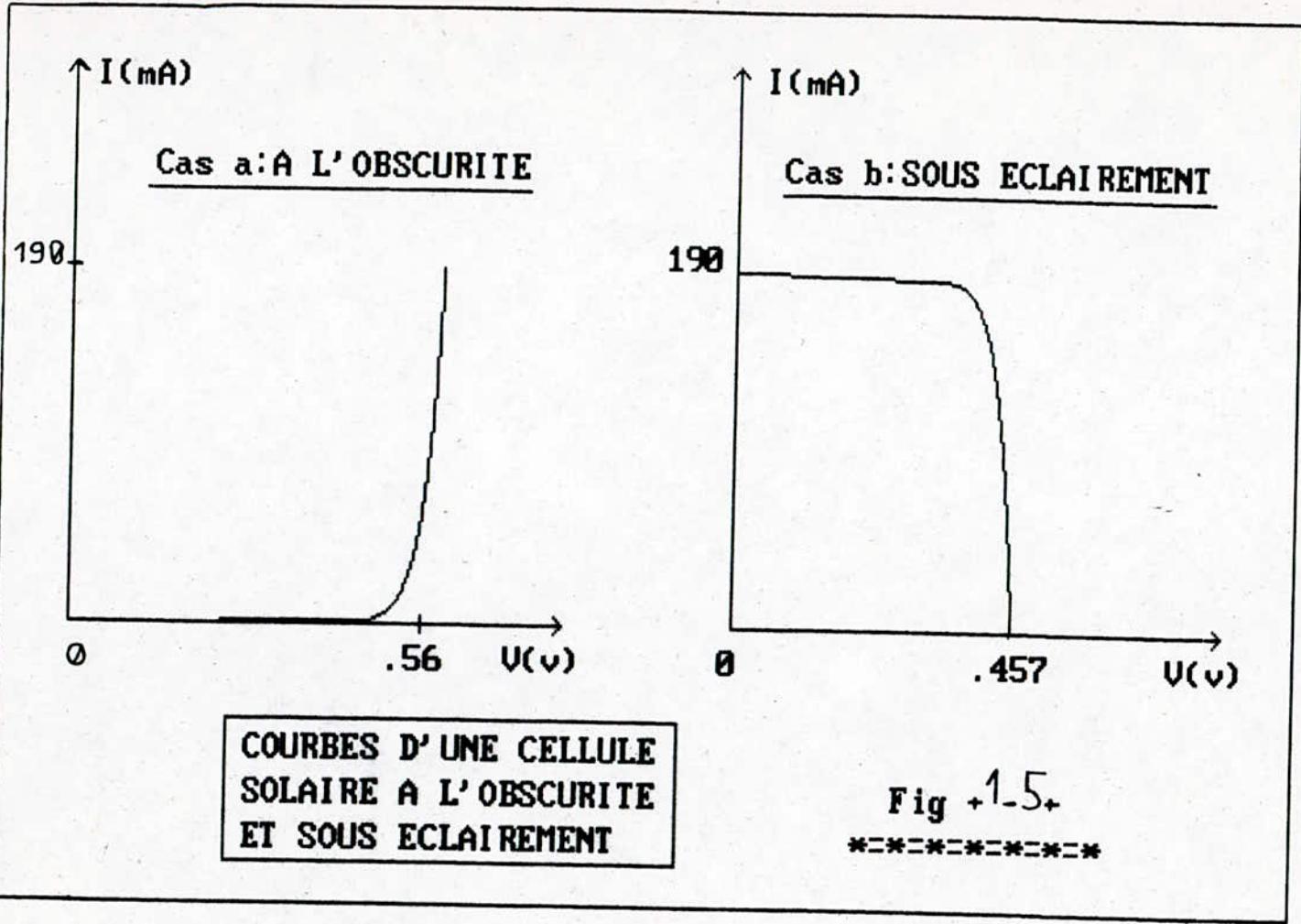
- En polarisation inverse, la barrière de potentiel augmente et un faible courant du aux porteurs minoritaires apparaît suivant l'équation suivante :

$$I = I_s. (\exp(-e.V/K.T) - 1) \quad (1-13)$$

2-3-2-c: Jonction P-N sous éclaircissement :

L'étude de la jonction P-N non polarisée a montré l'existence d'un champ interne $E = V_D/W$. Ce champ est très important. V_D est de l'ordre de 900 mV à la température ambiante et la largeur de la charge d'espace W est de l'ordre de 0.5 μm (matériau de 1 $\Omega-cm$). La force du champ peut être évaluée à environ 10 KV-cm. Les électrons et les trous créés à l'intérieur de la barrière de charge sont directement exposés à ce champ.

L'interaction qui se produit dans un champ important entre les électrons et les photons optiques du réseau de Silicium est trop forte. Les porteurs acquièrent plus d'énergie qu'ils n'en possèdent à l'équilibre thermique. Puisque la production de porteurs par la lumière est homogène dans la barrière, le courant de diffusion n'est pas modifié dans la barrière mais le courant de champ devient plus élevé à cause de la concentration élevée des porteurs. Le photocourant dans la lumière est un courant de champ.



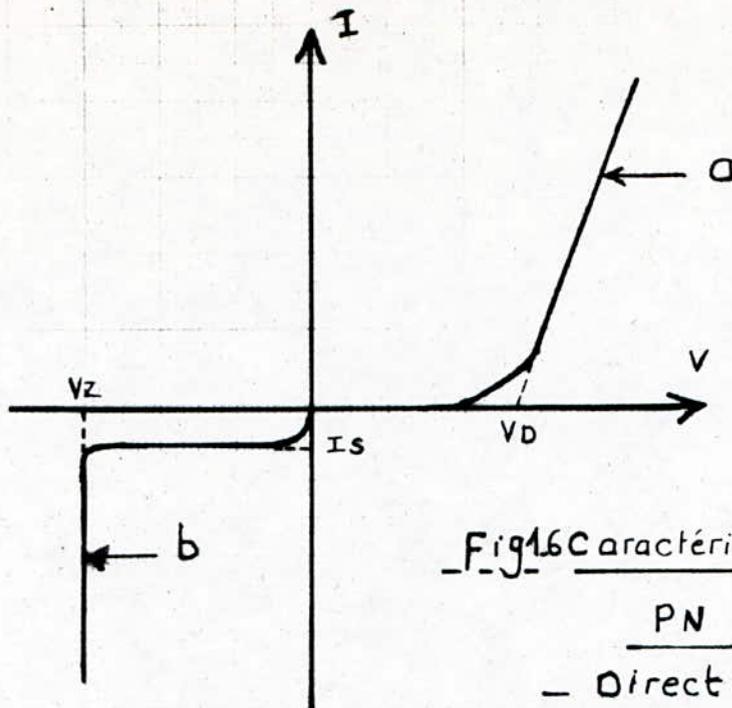


Fig 16 Caractéristique I-V d'une jonction

PN polarisée en:

- Direct (Courbe a)
- inverse (Courbe b)

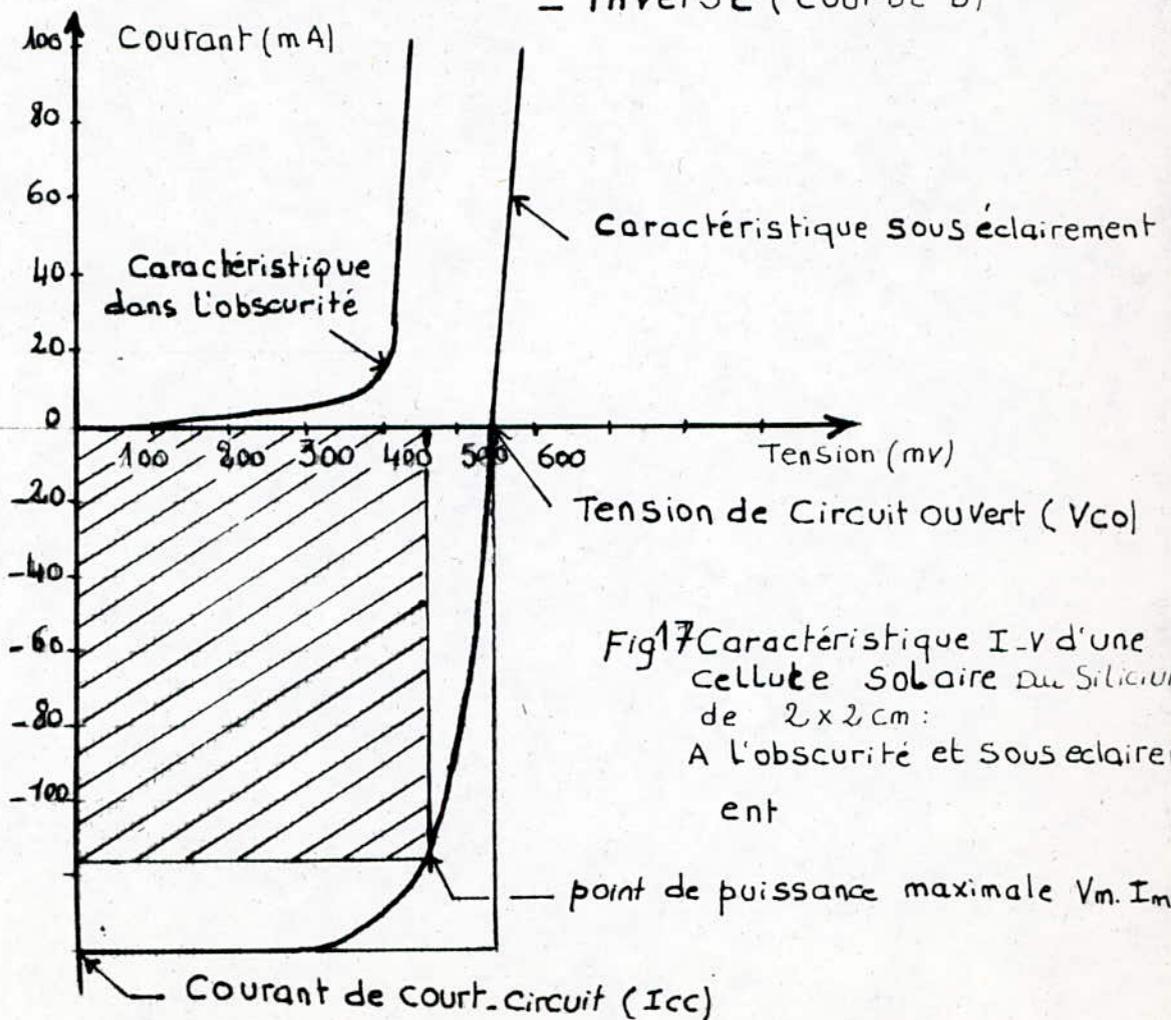


Fig 17 Caractéristique I-V d'une cellule solaire de Silicium de 2 x 2 cm : A l'obscurité et sous éclairciment

point de puissance maximale $V_m \cdot I_m$

Courant de court-circuit (I_{cc})

-9-
Fig 18 Différents modes de fonctionnement d'une

Cellule Solaire

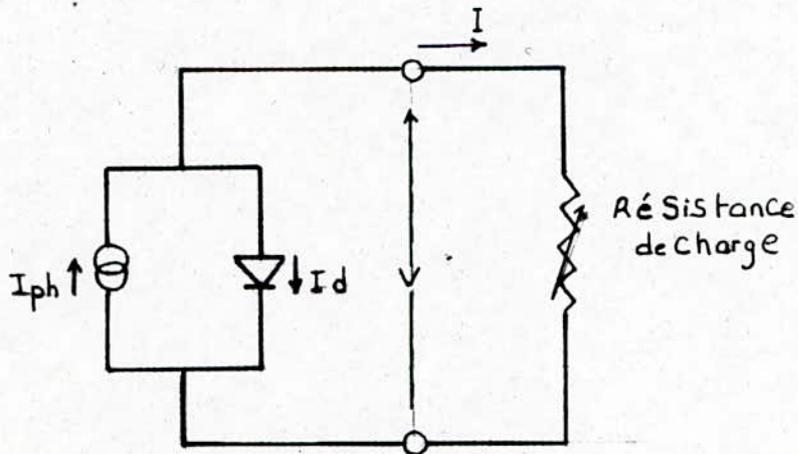
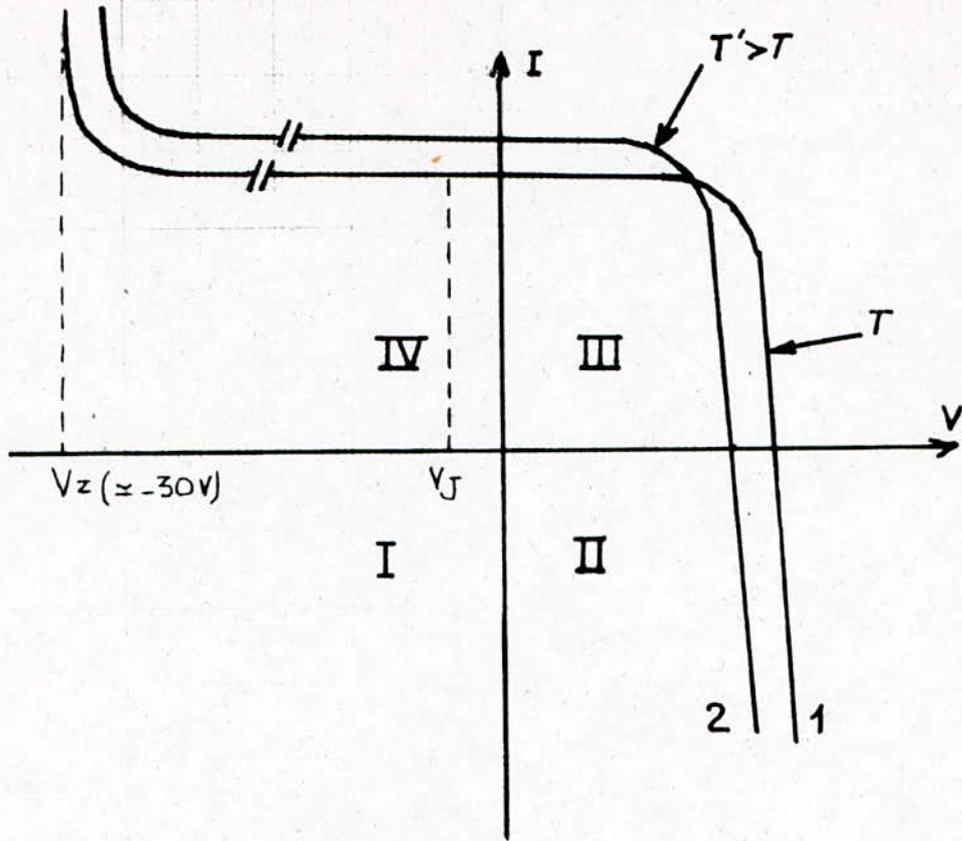


Fig 19 Schéma équivalent d'une Cellule Solaire
idéale ($R_s = 0$ et $R_{sh} = \infty$)

Le processus de base de la création du photocourant est la photo-ionisation. Quand la lumière est absorbée dans un solide, elle libère des électrons et des trous par ionisation interne. La concentration des électrons et des trous étant proportionnelle au taux d'absorption de la lumière et à la durée de vie respectives des porteurs.

Ce phénomène a pour conséquence de polariser la jonction et de créer un nouveau champ interne opposé à celui de la jonction. On voit alors se produire une phototension au détriment de la différence de potentiel interne de la jonction P-N qui diminue (fig 1-4). Ce nouveau champ va diffuser les charges dans le solide mais en sens inverse. Ce courant s'oppose à chaque instant au photocourant et il correspond au courant direct de diode.

La forme générale de la courbe sous éclairement, d'une cellule photovoltaïque (fig 1-7), garde la même allure que sa caractéristique dans l'obscurité mis à part l'addition d'un photocourant qui peut se décrire comme suit :

- Le courant supplémentaire dû à la lumière est indépendant de la tension appliquée.
- Il est proportionnel à l'intensité de la lumière.
- Il passe dans la direction opposé au courant en sens direct (diode passante) de la caractéristique à l'obscurité.

L'allure de la courbe I-V, d'une cellule éclairée, permet d'écrire:

$$I = I_D - I_{ph} \quad (1-14)$$

I_D : courant de diode.

I_{ph} : photocourant

Mais seulement pour que I et V soient positifs, c'est-à-dire dans le premier quadrant.

$$I = I_{ph} - I_D \quad (1-15)$$

D'après la relation 1-11 on peut écrire:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot (\exp(e \cdot V_j / K \cdot T) - 1) \quad (1-16)$$

D'autre part, cette courbe fait ressortir trois paramètres importants :

- Une tension de circuit-ouvert V_{oc} .
- Un courant de court-circuit I_{cc} .
- Un point de fonctionnement optimal pour lequel une cellule délivre une puissance maximale.

Ces trois paramètres définissent les caractéristiques normalisées des cellules photovoltaïques.

Enfin une simulation numérique des relations 1-11 et 1-16 est illustrée par la figure 1-5.

Ainsi la figure 1-8 met en évidence les différents modes de fonctionnement possibles d'une cellule solaire.

Pour une cellule sous-éclairage la représentation de sa caractéristique I-V se décompose en trois parties dans les trois secteurs II, III et VI. La cellule travaille en générateur dans le quadrant III, correspondant à son fonctionnement normal. Elle peut toutefois être amenée à travailler en récepteur dans le quadrant II en polarisation inverse et dans le quadrant IV en polarisation directe.

Dans le quadrant IV la caractéristique présente un coude apparaissant pour une tension voisine de 30 V et qui correspond à un effet d'avalanche (ou effet Zener) se traduisant par une augmentation brutale du courant. Une augmentation de la température modifie la caractéristique I-V de la cellule entraînant une augmentation du courant et une diminution de la tension générée.

1-4: Schéma équivalent d'une cellule solaire.

Fig1_10 Schéma équivalent d'une Cellule Solaire réelle ($R_{sh} = \infty$)

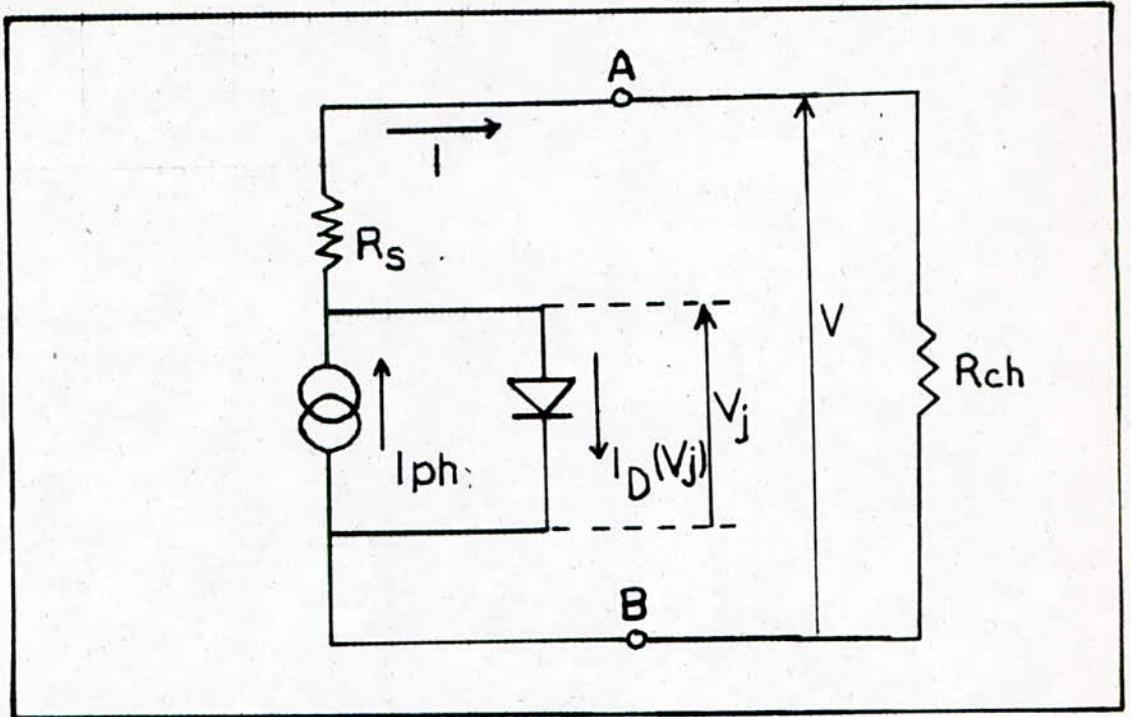
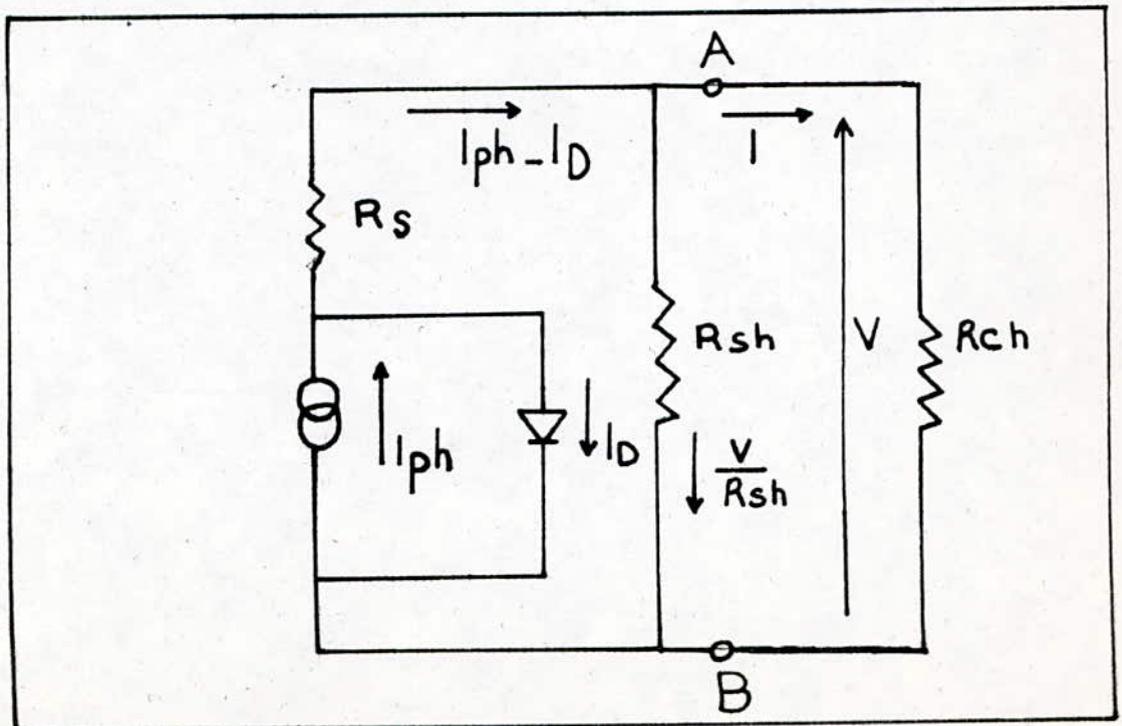


Fig1_11 Schéma équivalent d'une Cellule Solaire réelle



Du point de vue électrique une cellule exposée aux rayonnements solaires se comporte comme un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode D et une résistance R_{sh} en série avec une résistance série R_s (fig 1-11).

1-4-1: Définition des différents paramètres.

a- Résistance série: R_s .

Cette résistance est due aux contacts des électrodes avec le semi-conducteur et à la résistance intrinsèque de celui-ci. Notons que cette résistance a tendance à diminuer le rendement de la cellule. Sa valeur est fonction de l'éclairement et de la température (elle augmente avec la température et diminue avec l'éclairement).

b- La résistance Shunt: R_{sh} .

Cette résistance est due à l'état de la surface de la cellule. Sa valeur a tendance à augmenter quand la cellule fonctionne sous éclairement (elle est de l'ordre de quelques mégohms).

c- Facteur d'idéalité n .

Le facteur d'idéalité dépend des interfaces et des propriétés physiques et techniques de la cellule. Sa valeur est l'unité pour les faibles débits et deux pour les forts débits de courant.

1-4-2: Modèle théorique de la cellule solaire.

La tension V générée par la cellule n'est pas exactement celle qui apparaît aux bornes de la jonction V_j . On a alors:

$$V_j = V + R_s \cdot I \quad (1-17) \quad (R_{sh} \text{ est supposée assez grande})$$

D'après la figure 1-11 on a:

$$I = I_{ph} - I_D - V/R_{sh} \quad (1-18) \quad \text{Or } I_{ph} = I_{cc} \quad (1-19)$$

$$\text{d'où } I = I_{cc} - I_s \cdot (\exp((e/K \cdot T) \cdot (V + R_s \cdot I)) - 1) - V/R_{sh} \quad (1-20)$$

La relation 1-20 décrit le fonctionnement d'une cellule solaire sous éclairement en tenant compte de tous les phénomènes physiques qui contribuent.

On remarque que si dans la relation (1-20) R_s est nulle et R_{sh} infinie on obtient l'équation suivante:

$$I = I_{cc} - I_s \cdot (\exp((e \cdot V / K \cdot T) - 1) \quad (1-20-1)$$

Cette équation régit le fonctionnement d'une cellule solaire idéale dont le schéma équivalent est représenté par la figure 1-9. Par contre si dans la relation (1-20) R_{sh} est infinie (qui est le cas le plus fréquent), on obtient l'équation qui régit le fonctionnement d'une cellule solaire réelle:

$$I = I_{cc} - I_s \cdot (\exp((e/K \cdot T) \cdot (V + R_s \cdot I)) - 1) \quad (1-21)$$

Cette expression servira de modèle mathématique pour la simulation ultérieure de la cellule solaire.

1-5: Réponse spectrale d'une cellule solaire.

La réponse spectrale (RS) d'une cellule solaire est définie comme suit:

$$RS = I / \phi \quad (1-22) \quad \text{Où}$$

I: Le courant collecté (en mA).

ϕ : Le flux solaire en W/m^2 .

La réponse spectrale d'une cellule solaire au silicium est représentée à la figure 1-12.

Le spectre solaire s'étend de l'ultra-violet à l'infra-rouge lointain en passant par le domaine visible. Cette figure montre que:

-Les cellules solaires ne sont sensibles qu'aux rayonnements qui se situent dans le domaine du visible et de l'infra-rouge très proche.

-L'absorption de la lumière n'est possible que si la longueur d'onde est inférieure au front d'absorption du matériau éclairé correspondant à une longueur d'onde seuil λ_s .

Donc pour $\lambda \gg \lambda_s$, l'absorption est négligeable quelque soit l'intensité de la lumière incidente. Par contre les valeurs de $\lambda < \lambda_s$, l'absorption augmente rapidement.

*Evaluation de λ_s pour certains matériaux semi-conducteurs: (Fig 1-13)

Le phénomène photovoltaïque a lieu que si ----->

$$h\nu = h.c/\lambda > E_g \implies \lambda < h.c/E_g$$

$$\text{Soit } \lambda_s = h.c/E_g = 12400(\text{ev} \cdot \text{Å}^0)/E_g(\text{ev}) \quad (1-23)$$

-Cas du Silicium: $E_g(\text{Si}) = 1.1 \text{ ev}$

$$\text{d'où } \lambda_s(\text{Si}) = 12400/1.1 = 1.1 \mu\text{m}$$

-Cas du Germanium: $E_g(\text{Ge}) = 0.67 \text{ ev}$

$$\text{d'où } \lambda_s(\text{Ge}) = 12400/0.67 = 1.85 \mu\text{m}$$

1-6: L'absorption dans les cellules solaires:

La loi définissant l'absorption d'un rayonnement par un matériau à une profondeur x de sa surface, s'écrit:

$$\phi(x) = \phi_s \cdot (1 - R) \cdot \exp(-a \cdot x) \quad (1-24)$$

$\phi(x)$: est le flux énergétique à une distance x de la surface (W/m^2).

ϕ_s : est le flux énergétique à la surface du matériau (W/m^2).

R est le coefficient de réflexion caractérisant la part de l'énergie incidente réfléchie à la surface du matériau (ϕ_R).

$$R = \phi_R / \phi_s \quad (1-25)$$

a : coefficient d'absorption en centimètre et sa grandeur inverse (a^{-1}) est numériquement égale à l'épaisseur de la couche du solide qui réduit l'intensité de rayonnement de e fois.

Pour absorber le maximum d'énergie, il faut que R soit le plus petit possible (d'après 1-24). C'est ce qu'on réalise en apposant sur la surface de la cellule une couche anti-reflet.

D'autre part du fait que le maximum d'intensité solaire est compris entre les longueurs d'onde variant de $0.43 \mu\text{m}$ à $0.79 \mu\text{m}$. Les distances correspondantes à leur absorption seront faibles (la densité des porteurs libres, dans cette zone, sera alors maximale).

1-7: Le rendement des cellules photovoltaïques.

Le rendement de conversion photovoltaïque d'une cellule solaire se définit comme le rapport entre la puissance maximale de la courbe

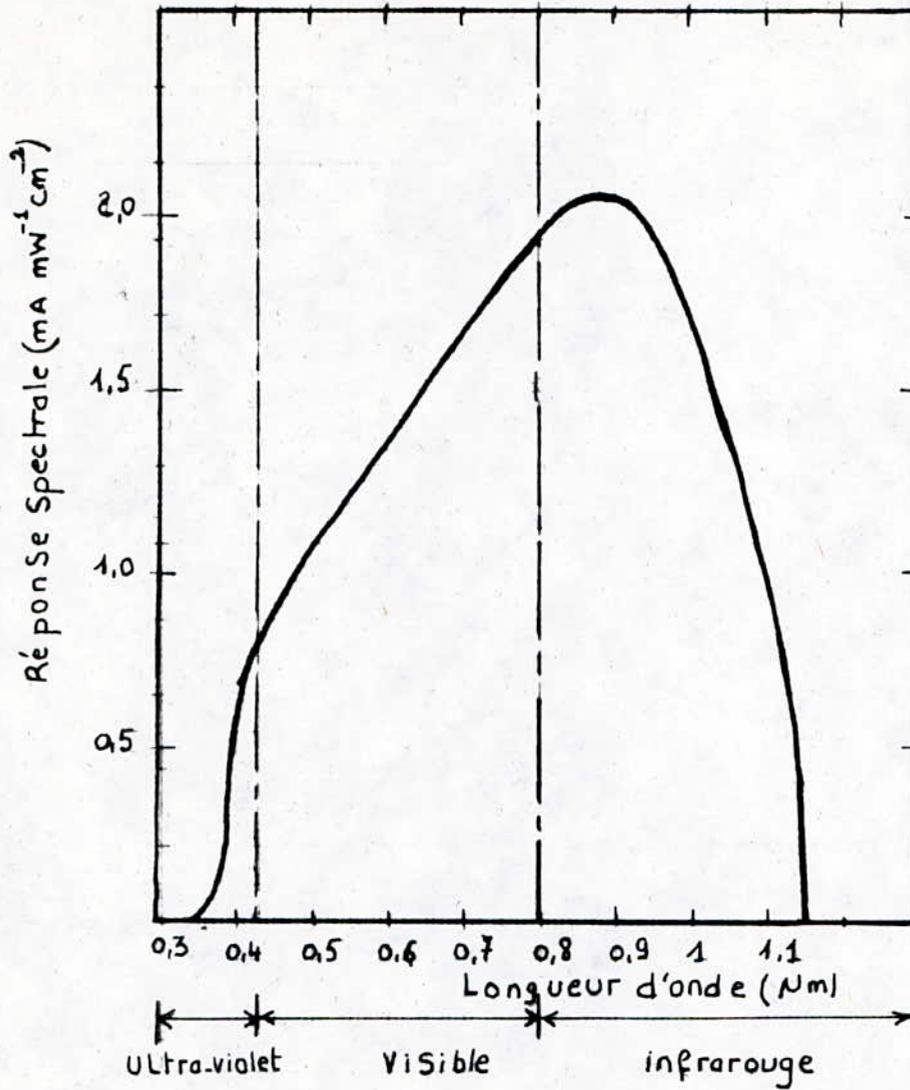


Fig 1.12 Réponse Spectrale d'une Cellule Solaire
Conventionnelle au Silicium

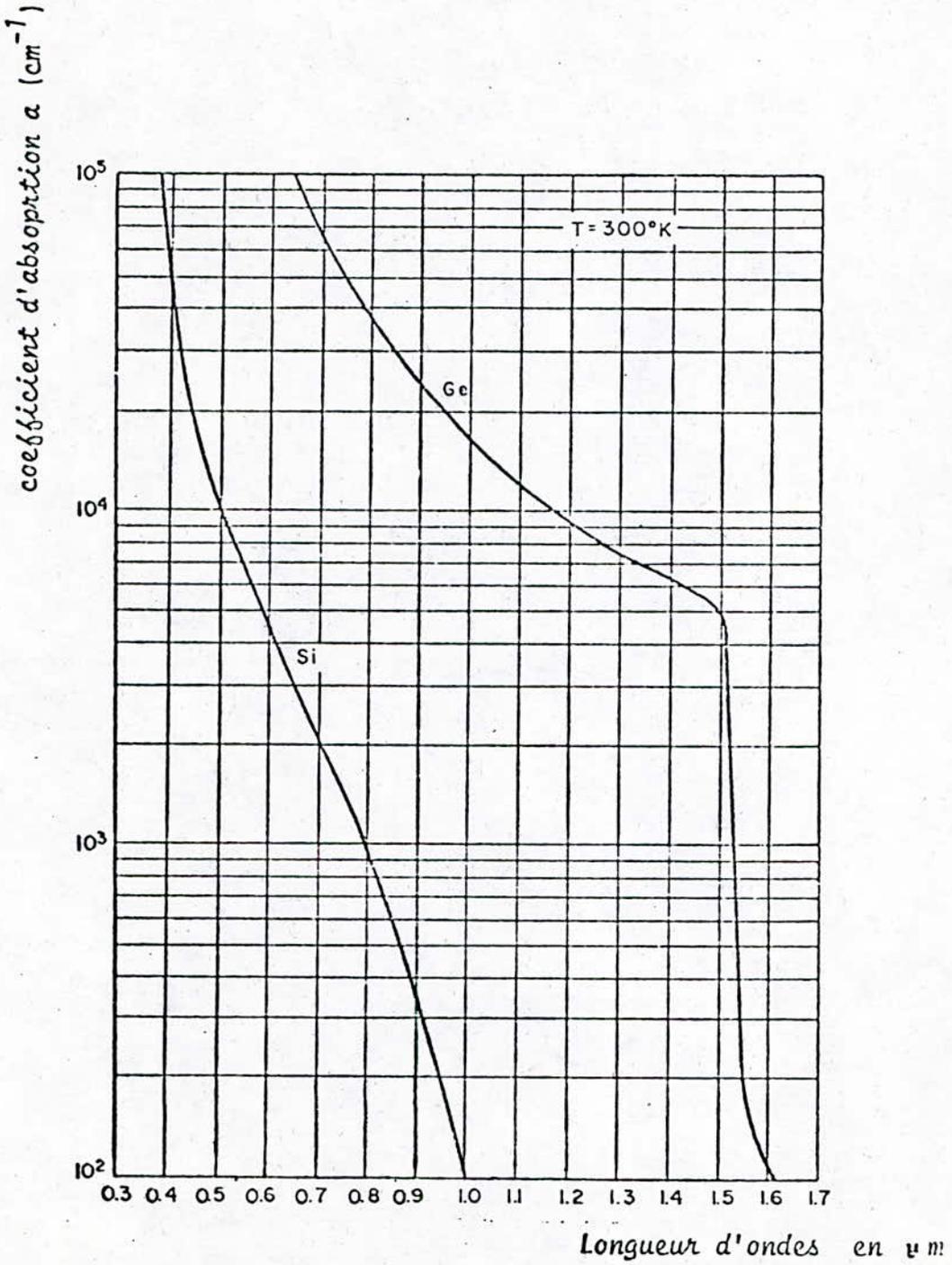


Figure 13

I-V recueillie à la puissance totale des photons incidents (rayonnement). Le rendement maximal théorique d'une cellule solaire au Silicium atteint 45-50 %. Pourtant les rendements réels sont plus faibles et cela pour diverses causes :

A-Pertes d'énergie d'origine électrique et thermique .

* Absorption incomplète des photons.

Les photons dont l'énergie $h\nu$ est inférieure au gap d'énergie E_g et dont $\lambda > \lambda_s$ ne peuvent pas créer des paires électrons-trous, donc ils sont des pertes pour la conversion photovoltaïque.

* Excès d'énergie ($h\nu - E_g$).

Les photons dont l'énergie est supérieure à E_g cèdent leur énergie excédentaire sous forme d'énergie cinétique aux électrons, élevant ainsi la température du Semi-conducteur. C'est le phénomène de thermalisation.

* Réflexion à la surface .

Une partie de l'énergie incidente est réfléchi au niveau de la surface de la cellule.

Le bilan des pertes s'établit ainsi :

- Photons non absorbés : 23 %
- Energie perdue dans la thermalisation : 34 %
- Energie désexcitée avant collection : 3.7 %
- Divers facteurs électriques : 25.5 %

Total des pertes : 86 %

Energie utilisable : 14 %

1-8: Association des cellules solaires:Le module solaire.

1-8-1: Introduction .

La cellule est l'élément de base d'un système photovoltaïque. Les caractéristiques mécaniques et électriques d'une cellule ne permettent pas une application directe sous cette forme.

C'est pourquoi les cellules solaires sont connectées électriquement formant ainsi des modules. L'association de ces modules constitue un panneau solaire.

L'association d'un certain nombre de panneaux constitue un générateur photovoltaïque.

Ce genre d'associations forme des systèmes résistants, hermitiques et de tensions conventionnelles.

1-8-2: Association série de cellules solaires .

La figure 1-14 représente n cellules solaires en série .

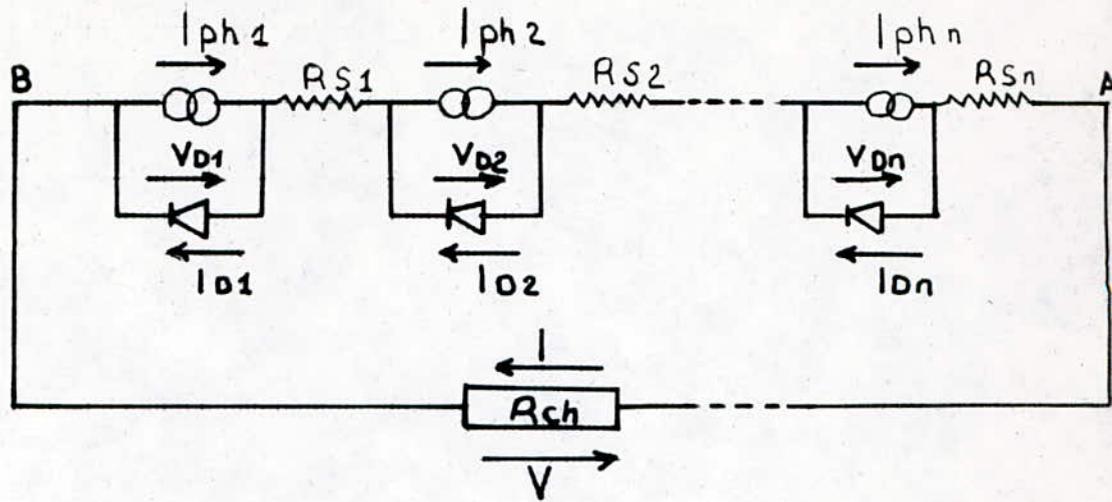


Fig1.14 Association des Cellules Solaires en Série

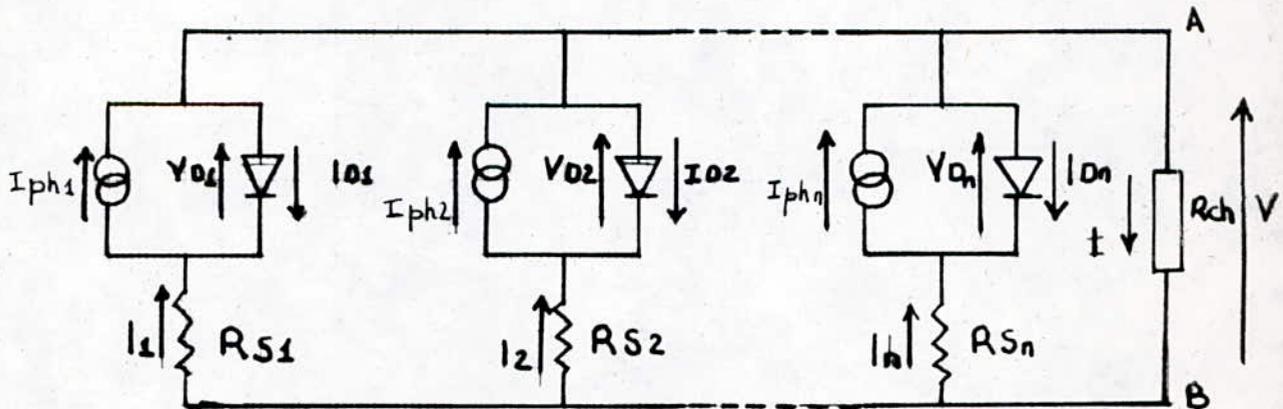


Fig1.15 Association des Cellules Solaires en parallèle

La loi d'OHM s'écrit :

$$V_A - V_B = V = Rch.I = \sum_{i=1}^n VDi - I. \sum_{i=1}^n Rsi \quad (1-26)$$

où $I = I_{ph1} - ID1 = I_{ph2} - ID2 = \dots = I_{phn} - IDn \quad (1-27)$

Pour les cellules identiques on a :

$$VD1=VD2=\dots=VDn=VD \quad (1-28)$$

$$I_{ph1}=I_{ph2}=\dots=I_{phn}=I_{ph} \quad (1-29)$$

$$ID1=ID2=\dots=IDn=ID \quad (1-30)$$

$$Rs1=Rs2=\dots=Rsn=Rs \quad (1-31)$$

L'équation s'écrira alors :

$$V = n.(VD - Rs.I) \quad (1-32)$$

a-Courant de court-circuit .

En court-circuit on a: $V=0 \implies n.(VD-Rs.I)=0 \implies I=I_{cc}=V/Rs \quad (1-33)$
 On voit bien que le courant de court-circuit est limité la résistance série R_s .

b-Tension de circuit-ouvert .

Dans ce cas $I=0 \implies V = V_{co} = n.VD$

c-La puissance.

La puissance dissipée dans le circuit extérieure est :

$$P = V.I = n.(VD - Rs.I).I = n.VD.I - n.Rs.I \quad (1-36)$$

La puissance active est égale à la somme des puissances fournies par les cellules plus la somme des puissances dissipées sous forme d'effet joule dans les n résistances série R_s .

1-8-3: Association parallèle de cellules solaires .

La figure 1-15 représente n cellules solaires en parallèle.
 La loi d'OHM s'écrit:

$$V_A - V_B = Rch.I$$

avec: $I = I_1+I_2+\dots+I_n \quad (1-37)$

où: $I_1=I_{ph1}-ID1$

$$I_2=I_{ph2}-ID2$$

$$\dots$$

$$\dots$$

$$I_n=I_{phn}-IDn$$

Pour des cellules identiques et en tenant compte des relations 1-28 jusqu'à 1-31 , on a:

$$I = n.I_1 \quad (1-38) \quad V = VD -Rs.I_1 \quad (1-39)$$

a-Courant de court-circuit.

En court-circuit $V=0 \implies I_{cc1}=VD/Rs \quad (1-40)$

Comme $I_{cc}=n.I_{cc1} \implies I_{cc}=n.VD/Rs=VD/(Rs/n) \quad (1-41)$

La relation ci-dessus montre que le courant de court-circuit dans un groupement parallèle est intense.

b-Tension de circuit-ouvert.

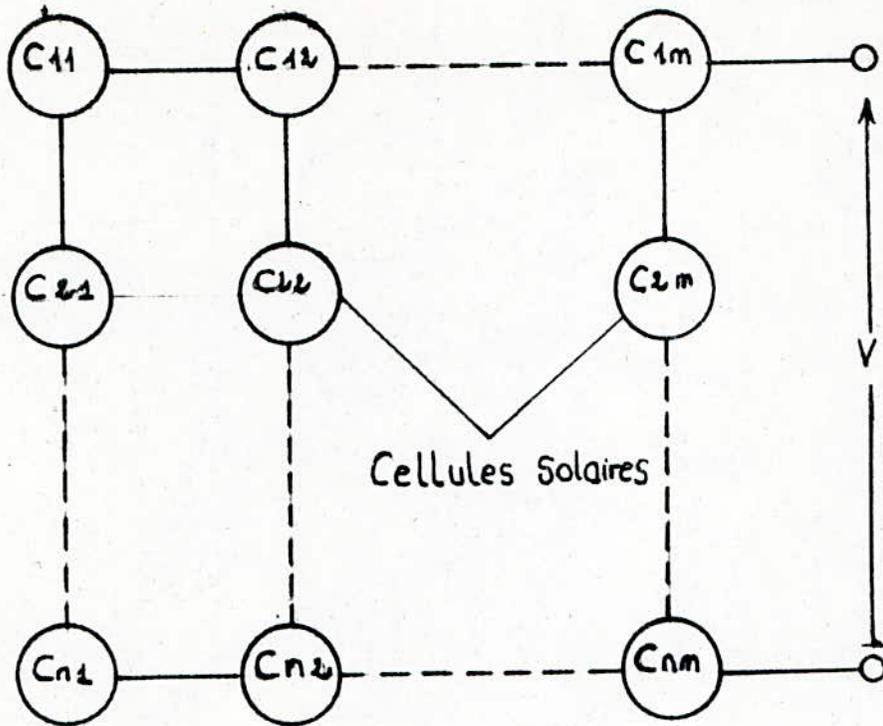


Fig 116 Association Série - parallèle
de $n \times m$ cellules Solaires

En circuit-ouvert, $I = 0 \implies V_{co} = VD$ (1-42)

La tension de circuit-ouvert est faible.

c-Puissance:

La puissance mise en jeu, dans une association, a pour équation:

$$P = V.I = (VD - R_s.I) \cdot n.I = n.VD.I - n.R_s.I^2 \quad (1-42)$$

Les puissance fournie par une association parallèle est identique à celle fournie par une association série (le nombre de cellules étant le même).

1-8-3: Association série-parallèle.

Considérons une association constituée de m branches en parallèle dont chacune est constituée de n cellules identiques disposées en série, suivant une matrice à n lignes et m colonnes (fig 1-16).
Calculons la puissance fournie :

$$P = V.I$$

I : Courant total issu de l'association.

D'après (1-32) et (1-38) : $V = n.(VD - R_s.I)$ et $I = m.I_1$

d'où $P = n.(VD - R_s.I) \cdot m.I$
soit $P = n.m.VD.I - n.m.R_s.I^2$ (1-43)

La puissance obtenue par une telle association est m fois plus grande que dans les cas 1-8-2 et 1-8-3.

Ce genre d'association permet d'avoir une grande puissance.

CHAPITRE II ETUDE THEORIQUE ET SIMULATION DU DESEQUILIBRE DANS
UN RESEAU DE MODULES SOLAIRES

2-1: Définition .

On dit qu'un groupement de modules photovoltaïques est en déséquilibre 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 peut devenir récepteur.

2-2: Causes du déséquilibre .

Les raisons du déséquilibre dans un réseau de modules photovoltaïques sont de deux types.

- Causes propres à la cellule.
- Causes extérieures à la cellule.

2-2-1: Causes propres à la cellule:

Ces causes sont dues principalement à la dispersion des caractéristiques des cellules lors de leur fabrication.

A-La résistance série:

La résistance série intervient dans le calcul de la puissance d'une cellule et tend à diminuer le rendement.

a-Evaluation de la résistance série:

La transformation de la relation 1-21 nous donne:

$$V = (KT/e) \cdot \ln(1 - I/ICC) + Voc - Rs \cdot I \quad (2-1)$$

à partir de 2-1, on tire Rs:

$$Rs \Big|_{\frac{V}{I}} = [Voc - V + (KT/e) \cdot \ln(1 - I/ICC)] / I \quad (2-2)$$

Il est clair que Rs dépend du couple (I, V). Dans la pratique, on travaille toujours au point de puissance maximale. En ce point $V = Vm$ et $I = Im$. (2-2) devient alors:

$$Rs \Big|_{\substack{V=Vm \\ I=Im}} = [Voc - Vm + (KT/e) \cdot \ln(1 - Im/ICC)] / Im$$

-La figure 2-1 illustre une autre méthode d'évaluation de Rs.

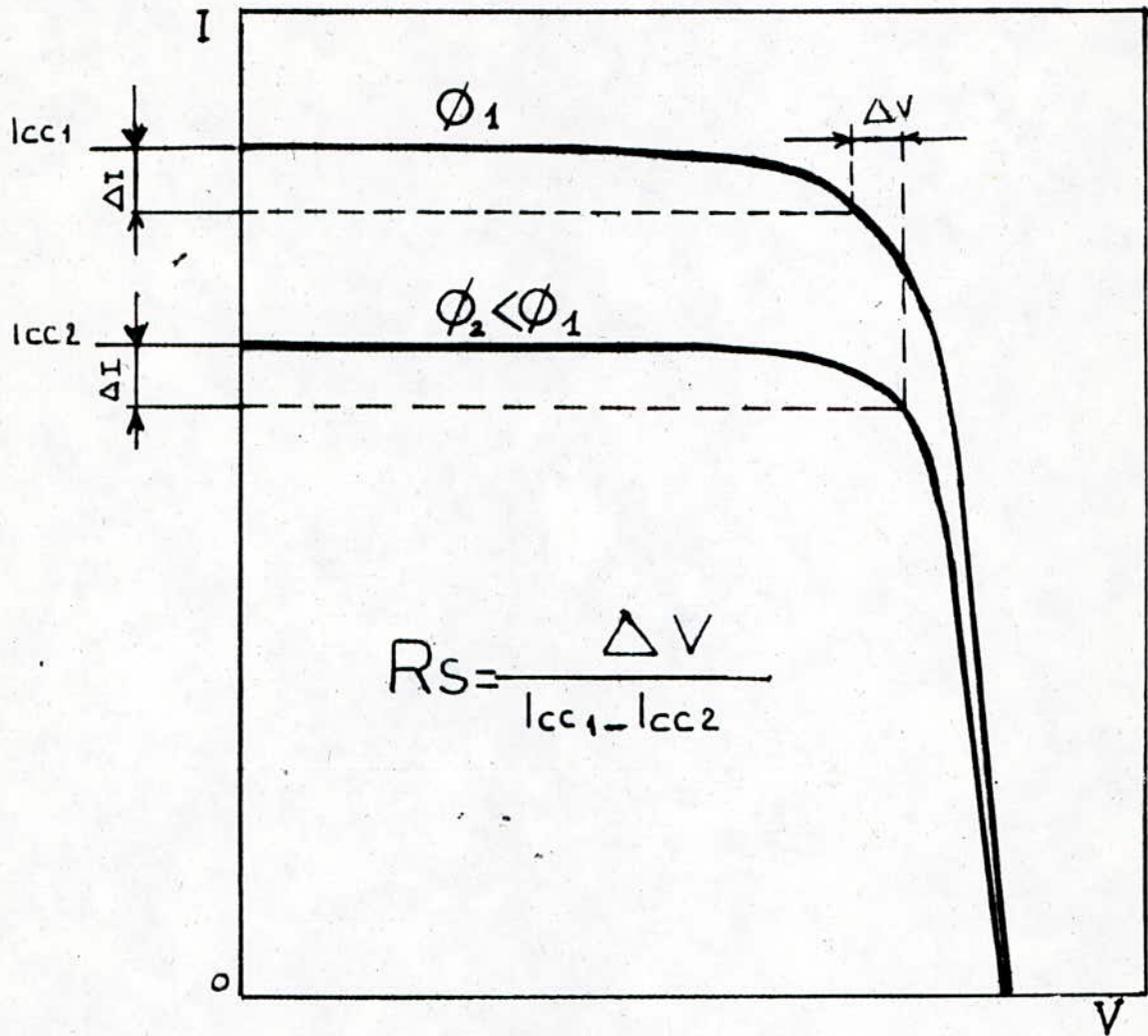
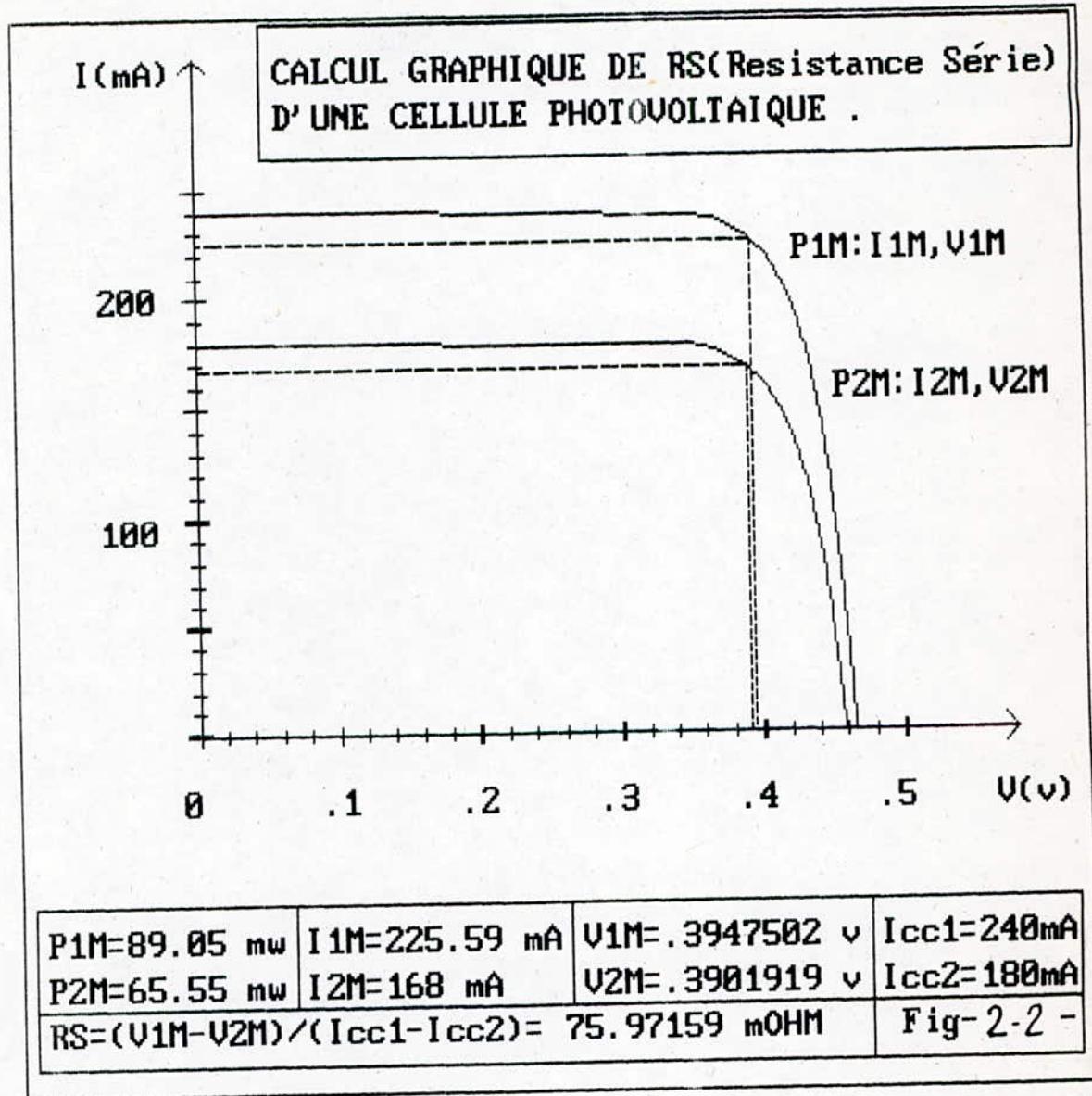


Fig 2-1

Determination de R_s par le procédé de
Variation de l'irradiation Solaire



On trace la caractéristique I-V de la cellule sous un flux constant ϕ puis une autre caractéristique sous un flux ϕ_2 tel que ϕ_2 soit supérieure à ϕ_1 . R_s est alors donnée par :

$$(2-4) \quad R_s = \Delta V / (I_{cc1} - I_{cc2}) \quad \text{où}$$

ΔV : Variation de tension aux points optimums des caractéristiques I-V.

I_{cc1} et I_{cc2} sont respectivement les courants de court-circuit.

La figure 2-2 illustre clairement cette méthode simulée par ordinateur. On trouve une résistance série de l'ordre de 76 mohms.

b-Influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I-V.

d'une cellule solaire (Simulation numérique): Figure 2-3.

Si on introduit une variation progressive de R_s , on obtient un réseau de caractéristiques qui s'écartent de la caractéristique idéale (courbe a). Cet écartement est d'autant plus remarquable que R_s augmente. Pour $R_s < 0.1$ ohm les caractéristiques gardent pratiquement la même allure que (a).

Pour R_s comprise entre 0.1 et 2 ohms, toutes les caractéristiques ont en commun la même tension de circuit-ouvert et le même courant de court-circuit, mais le palier de chaque caractéristique diminue entraînant un déplacement du point de fonctionnement optimum.

À partir de $R_s = 2$ ohms, la caractéristique I-V est linéaire c'est-à-dire que $I = a.V + b$. Ce qui conduit au schéma équivalent de la figure 2-4

Le coefficient b est positif et il est homogène à un courant. Par contre a est négatif et il est homogène à une admittance.

Lorsque R_s augmente davantage, les coefficients a et b diminuent entraînant une diminution du courant et de la tension, jusqu'à ce les caractéristiques I-V soient pratiquement confondues avec l'axe des tensions.

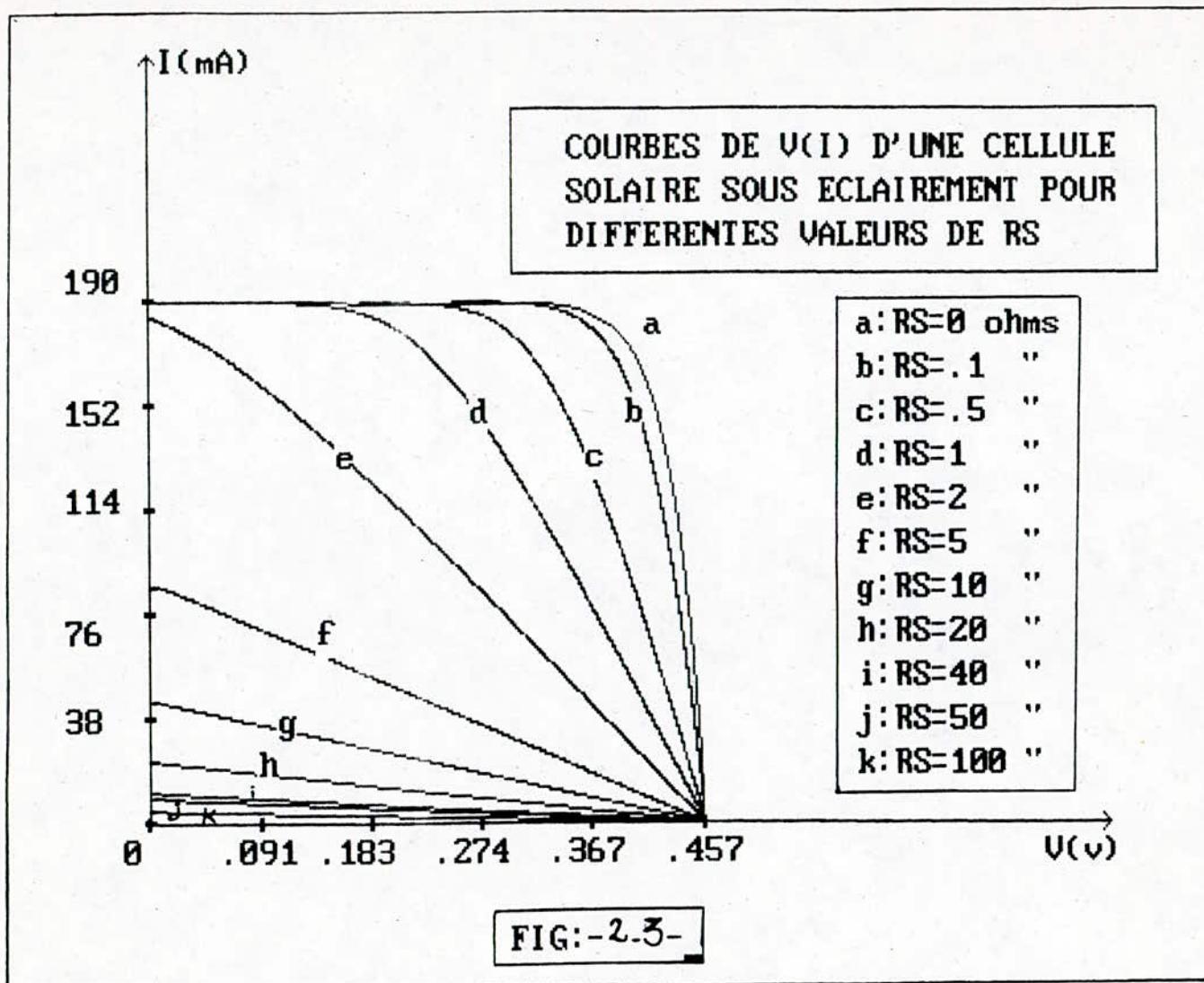
Conclusion: L'analyse de ces caractéristiques a montré les effets néfastes d'une grande résistance série sur la puissance maximale et par conséquent sur le rendement de la cellule.

De ce fait, la disparité de R_s dans chaque cellule entraîne un déséquilibre inévitable.

B-Influence de la résistance Shunt sur la caractéristique I-V d'une

cellule solaire: (Fig 2-5)

Si on introduit un accroissement dans la résistance Shunt (R_{sh}), on obtient un réseau de caractéristiques qui s'écartent de la caractéristique idéale ($R_{sh} = \infty$). Cet écartement est d'autant plus important que R_{sh} diminue. Le courant de court-circuit reste inchangé, par contre la tension de circuit-ouvert change, ce qui fait réduire la puissance.



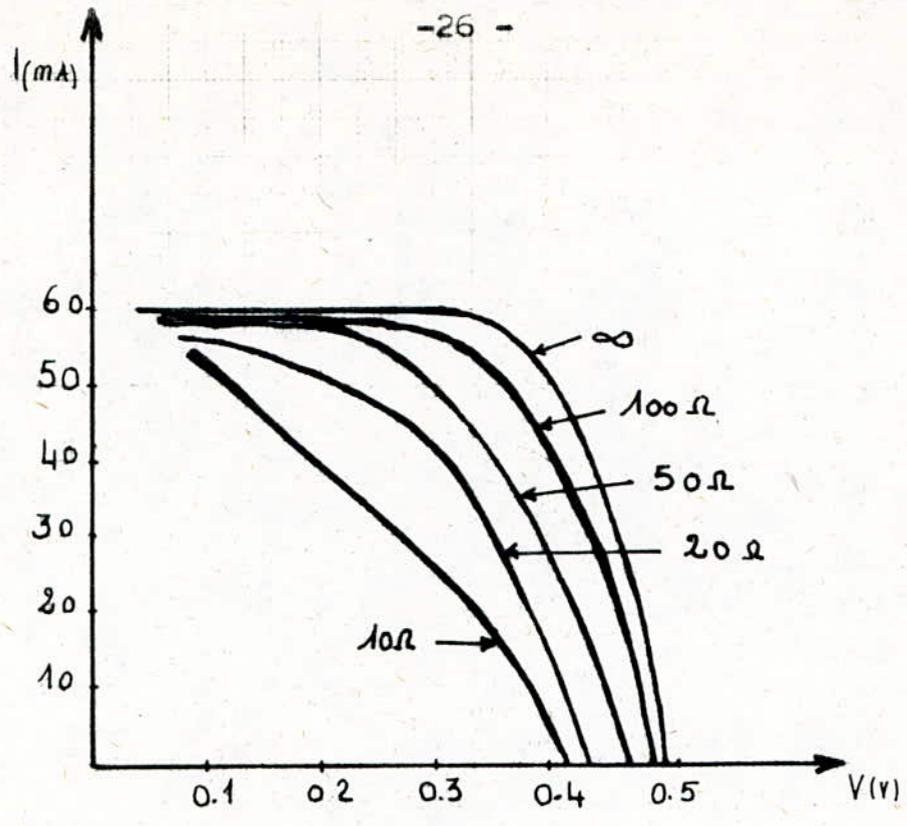


Fig: 2.5

Effet de La Résistance Shunt (R_{sh}) sur
La caractéristique I-V d'une cellule solaire

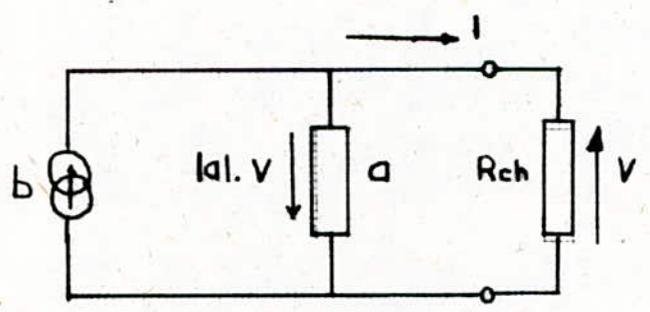


Fig: 2.4

Schéma équivalent d'une cellule solaire
pour une caractéristique I-V Linéaire ($R_s \gg 2 \Omega$)

C- Influence du facteur ALPHA. (Fig 2-6)

Le processus de création du photocourant par une cellule est régit par la relation suivante:

$$I_{cc} = \alpha \cdot \phi \cdot S \quad (2-5)$$

où ϕ : Le flux lumineux en W/m².

S : La surface de la cellule en m².

α : Coefficient qui caractérise la création du photocourant.

L'expérience a montré que le coefficient α varie de 10% entre la première et la dernière cellule de l'association.

Si on introduit une dispersion linéaire sur le coefficient α , ceci a pour conséquence de changer le point de fonctionnement optimal de la cellule.

L'effet du coefficient α sur la caractéristique I-V de la cellule est identique à celui du flux lumineux.

Ceci met en évidence un déséquilibre entre les cellules de ce module, ce qui signifie qu'une ou plusieurs cellules pourront être amenées à dissiper des puissances relativement importantes dès que la charge du module deviendra inférieure à la charge optimale.

2-2-2: Causes extérieures à la cellule.

A- Effet de la température: (Fig 2-7)

Les défauts des éléments à base de semi-conducteur résident dans leur instabilité vis à vis de la température. Les cellules solaires n'échappent pas à ce défaut. Lorsque la température varie, la caractéristique I-V se trouve modifiée. Ce qui affecte I_{cc} , V_{co} et P_m d'une variation:

*Variation du courant de court-circuit:

L'expérience a montré que le coefficient α a pour expression :

$$\alpha(T) = 0.00025 \cdot T + 0.224 \quad (A \cdot W^{-1}) \quad (2-6)$$

T: température absolue (°K)

D'après la relation 2-5, si ϕ et S sont constants on remarque que si la température croit, le courant de court-circuit croit aussi.

*Variation de la tension du circuit-ouvert:

En circuit-ouvert $I=0$ et $V=V_{co}$. D'après 1-21 on a:

$$V_{co} = (KT/e) \cdot \ln[(I_s + I_{cc})/I_s] \quad (2-7)$$

Mais $I_s \ll I_{cc}$ d'où $V_{co} = (KT/e) \cdot \ln(I_{cc}/I_s)$

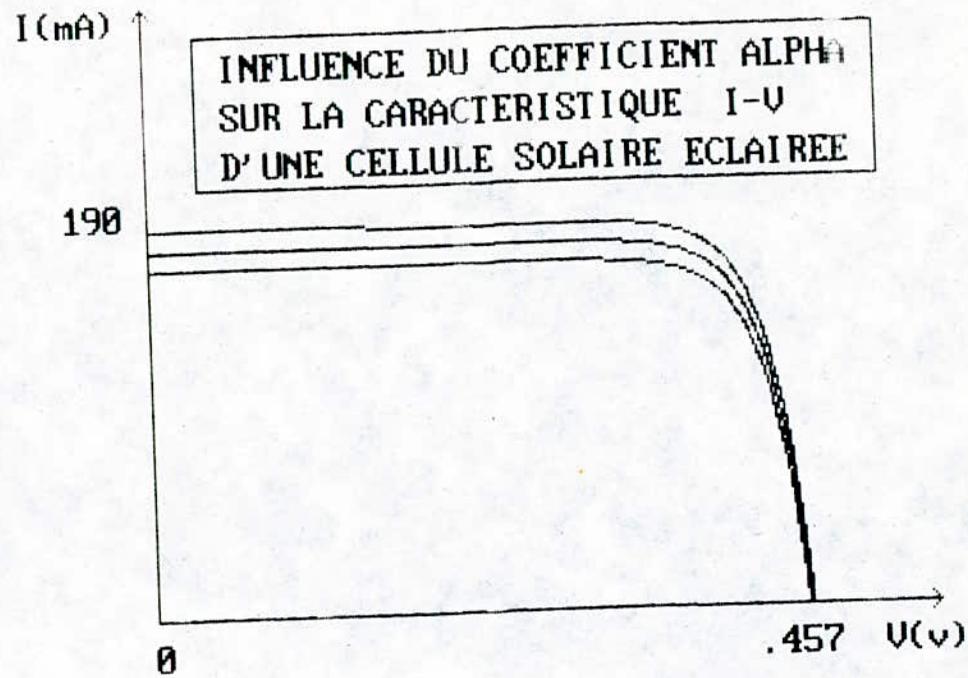
Le courant de saturation est aussi fonction de la température. On a

$$I_s(T) = K \cdot T^3 \cdot \exp(-E_g/K \cdot T) \quad (2-8)$$

K: constante (A.°K⁻³)

T: température absolue

Fig - 2.6 -



Cas a: VARIATION DE ALPHA DE 5%
Cas b: VARIATION DE ALPHA DE 10%

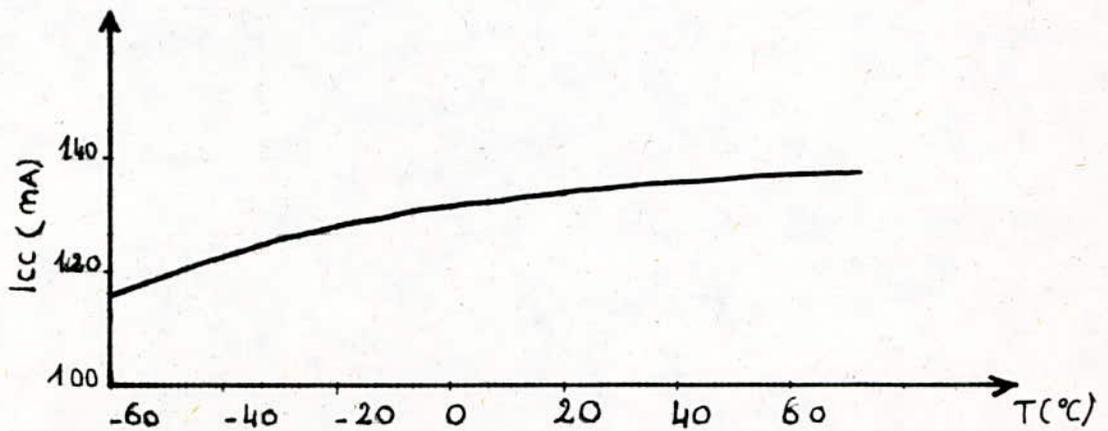
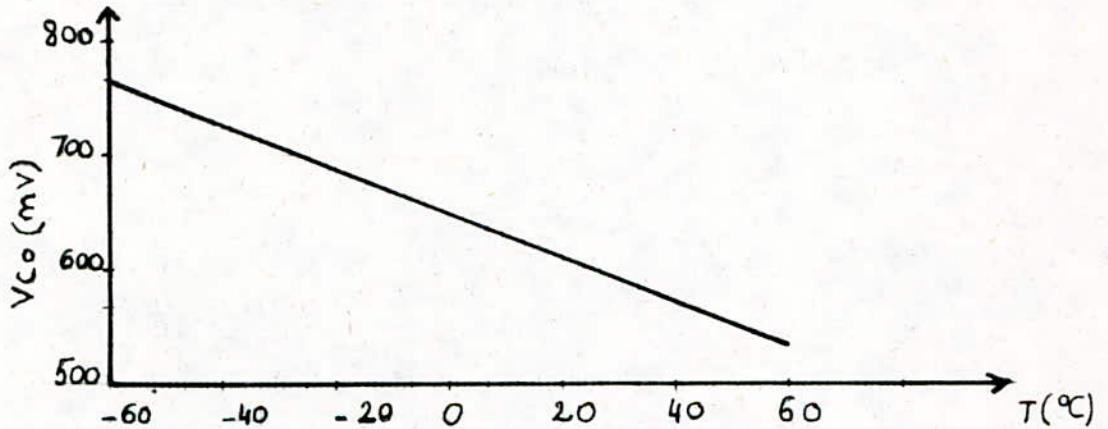
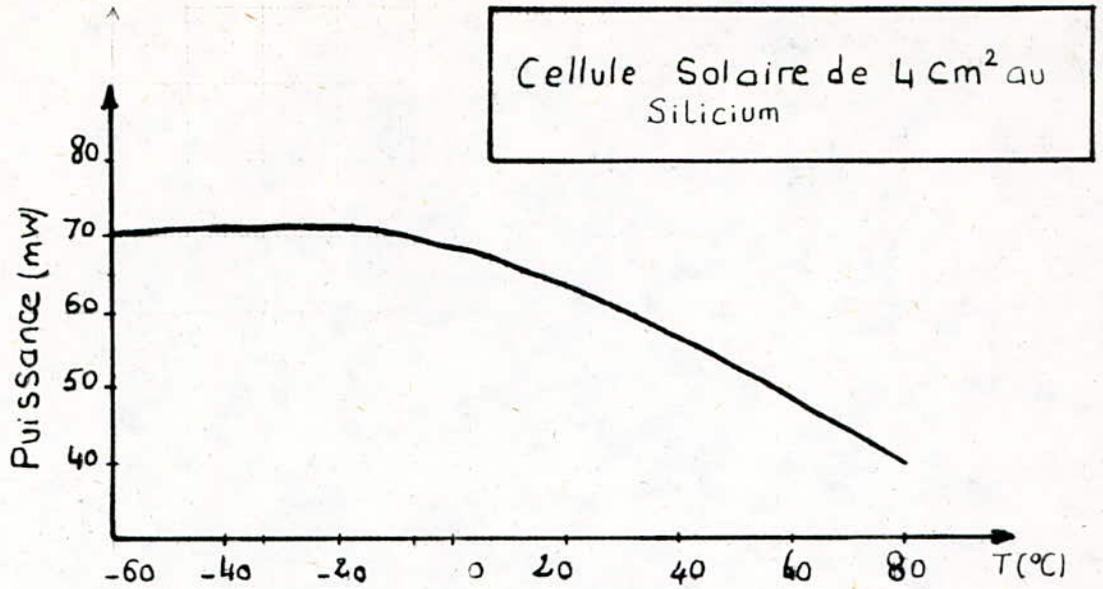


Fig 27 Dépendance en température de la puissance, de la
tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit

Le rapport I_{cc}/I_s décroît rapidement lorsque la température augmente, ce qui entraîne une diminution du terme $\ln(I_{cc}/I_s)$ plus rapide qu'une augmentation du terme KT/e .
D'où V_{co} diminue lorsque T augmente.

*Variation de la puissance maximale.

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (2-9)$$

$$\text{or } I_m = I_{cc} - I_s \cdot (\exp((e \cdot V_m / K \cdot T) + R_s \cdot I_m) - 1) \quad (2-10)$$

$$\text{d'où } P_m = V_m \cdot (I_{cc} + I_s) - V_m \cdot I_s \cdot \exp((V_m / K \cdot T) \cdot (R_s \cdot I_m + V_m)) \quad (2-11)$$

$$\text{En circuit ouvert on a: } I_{cc} + I_s = I_s \cdot \exp(e \cdot V_{co} / K \cdot T) \quad (2-12)$$

$$\text{Finalement } P_m = V_m \cdot I_s [\exp(V_{co} \cdot e / K \cdot T) - \exp((V_m - R_s \cdot I_m) / K \cdot T)] \quad (2-13)$$

Lorsque la température augmente, les deux termes en exponentielle décroissent plus vite et l'emporte sur le produit $V_m \cdot I_s$.
D'où lorsque la température augmente la puissance maximale diminue. Ainsi, les fluctuations de la température influent pour une part importante sur le comportement de l'ensemble des cellules et qu'il n'est pas possible de les négliger.
Il va falloir rejeter les radiations lumineuses non converties en en électricité.
L'aération et la convection naturelle des modules sont recommandées.

C- Diverses autres causes:

- * Court-circuit accidentelle.
- * Augmentation inadmissible de la charge.
- * Cellules défectueuses.
- * Répartition inégale du flux solaire.
- * Occultation involontaire (passage nuageux partiel, couche de sable ...) ou volontaire.

B-Influence du flux:

Le photocourant est proportionnel au flux lumineux d'après la relation 2-6.

Si I_{cc1} est le photocourant à un flux lumineux unité (1 sol AM1 = 1000 W/m²), le photocourant à X sol est:

$$I_{cc} = X \cdot I_{cc1} \quad (2-14)$$

Si V_{co1} est la tension de circuit-ouvert à un sol, la tension à X sol se calcule par la relation suivante:

$$V_{co} = V_{co1} + (K \cdot T / e) \cdot \ln(X) \quad (2-15)$$

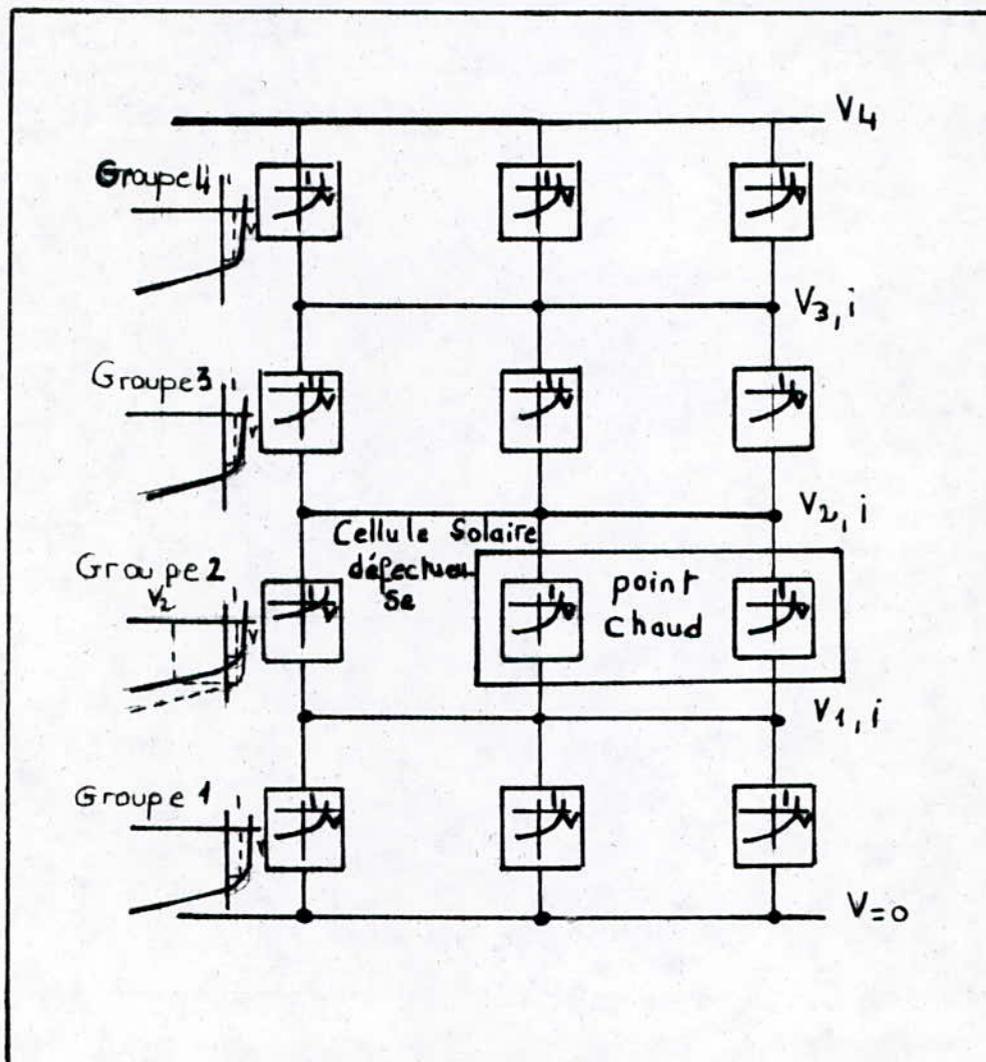
Le rayonnement maximal au sol, au niveau de la mer, s'élève à environ 1000 W/m² c'est-à-dire que X est assez proche de l'unité.

D'où $V_{co} \approx V_{co1}$. Donc lorsque l'éclairement augmente, la tension de circuit-ouvert reste pratiquement constante.

2-3: Etude du déséquilibre dans une association de cellules solaires

La conception d'un assemblage de cellules solaires doit prendre compte de la contrainte appelé problème du "point chaud" (hot-spot).

Fig 2-8 principe du problème du point chaud («hot spot»).



Une cellule défectueuse, dans un couplage en parallèle, peut détruire l'ensemble du module.

Pour comprendre ce problème, considérons le module représenté par la figure 2-8.

Supposons que les cellules possèdent les mêmes caractéristiques I-V. Supposons de plus qu'il ait dégradation du fonctionnement de l'une des cellules.

Pour chaque groupe, la tension est la même que celle d'une seule cellule. Par contre le courant résultant est trois fois plus élevé. Sauf pour le groupe qui présente une cellule défectueuse, puisque le même courant traverse chaque groupe de cellules. Par conséquent le courant i est imposé au groupe qui contient la cellule défectueuse. Cet accroissement de courant, dans ce groupe, entraîne un déplacement du point de fonctionnement vers les tensions négatives élevées. Ainsi la dissipation de puissance, dans les deux cellules en fonctionnement du groupe défectueux, devient $i.V/2$ alors que la puissance est $i.V$ pour les cellules du groupe "en bon état". $V/2$ peut atteindre plusieurs fois la valeur de V . En conséquence, une dissipation de puissance considérable est présente dans les cellules en bon état couplées en parallèle avec les cellules dégradées. Il en résulte une augmentation de la température qui s'achève par fondre les connexions soudées et arrêter le fonctionnement de l'ensemble du module.

2-4: Description d'un module solaire de type ARCO SOLAR M 53.

Le module solaire M53 est constitué de 36 cellules solaires carrées, ayant chacune 9.5 cm de côté connectées en série. Géométriquement le module comporte trois guirlandes de douze cellules chacune, comme l'indique la figure 2-9.

Les diodes D1 et D2 sont de type "by pass" (MR 756 MOTOROLA). Elles assurent une protection du module contre un éventuel déséquilibre.

La caractéristique I-V de ces diodes est donnée par la figure 2-12. Le schéma équivalent du module est représenté par la figure 2-10.

D1 et D2 sont celles qui ont été décrites précédemment.

g_1 , g_2 et g_3 représentent chacune l'association série de 12 cellules solaires.

* Caractéristiques données par le constructeur :

!	25 °C	!	47 °C	!
!	$P_m = 43 \text{ W}$!	$P_m = 39.1 \text{ W}$!
!	$I_m = 2.49 \text{ A}$!	$I_m = 2.56 \text{ A}$!
!	$V_m = 17.3 \text{ V}$!	$V_m = 15.3 \text{ V}$!
!	$I_{cc} = 2.7 \text{ A}$!	$I_{cc} = 2.8 \text{ A}$!

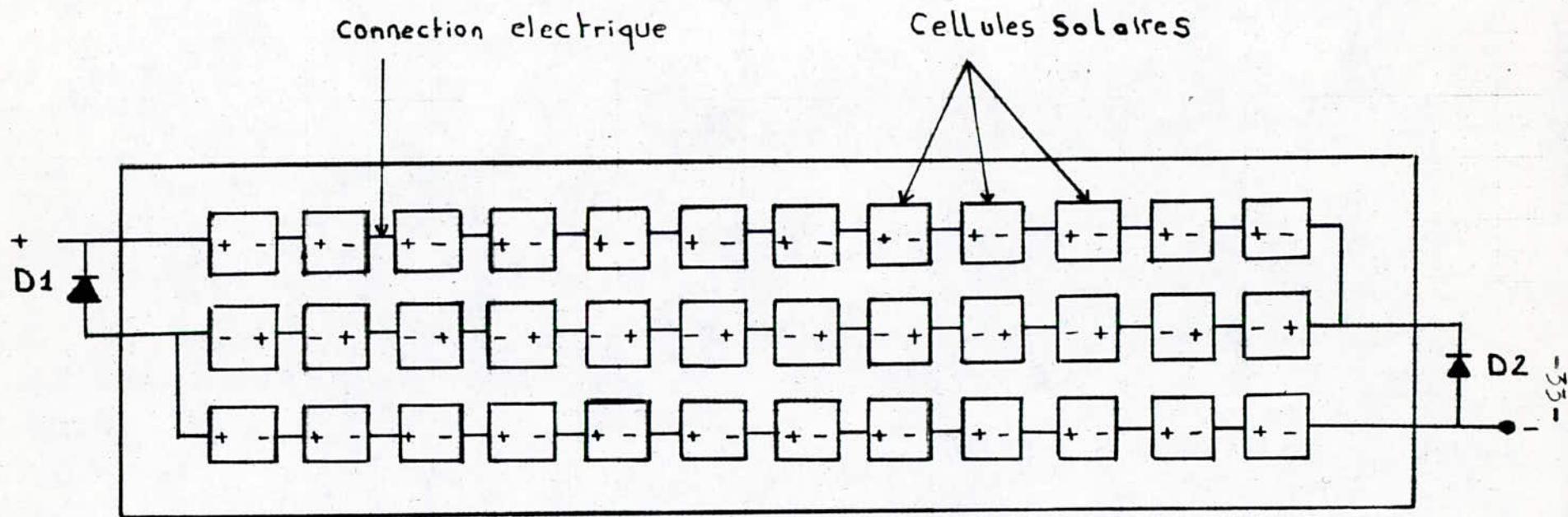


Fig 2.9 Module solaire (M53)

Fig 2.10

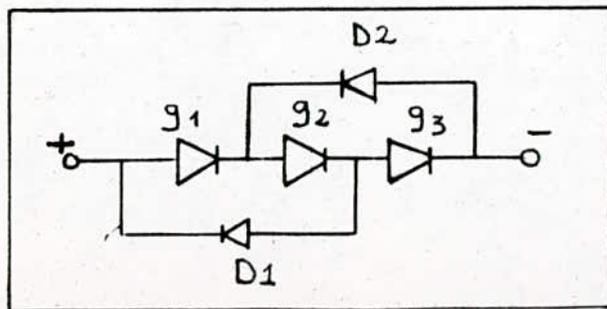
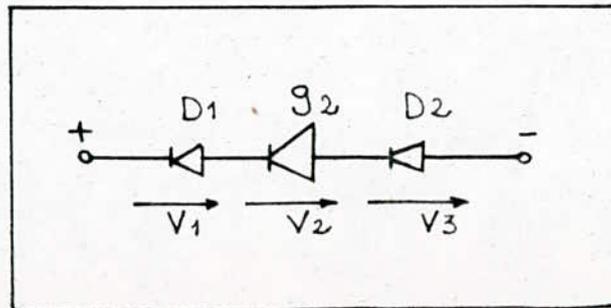


Fig 2.11



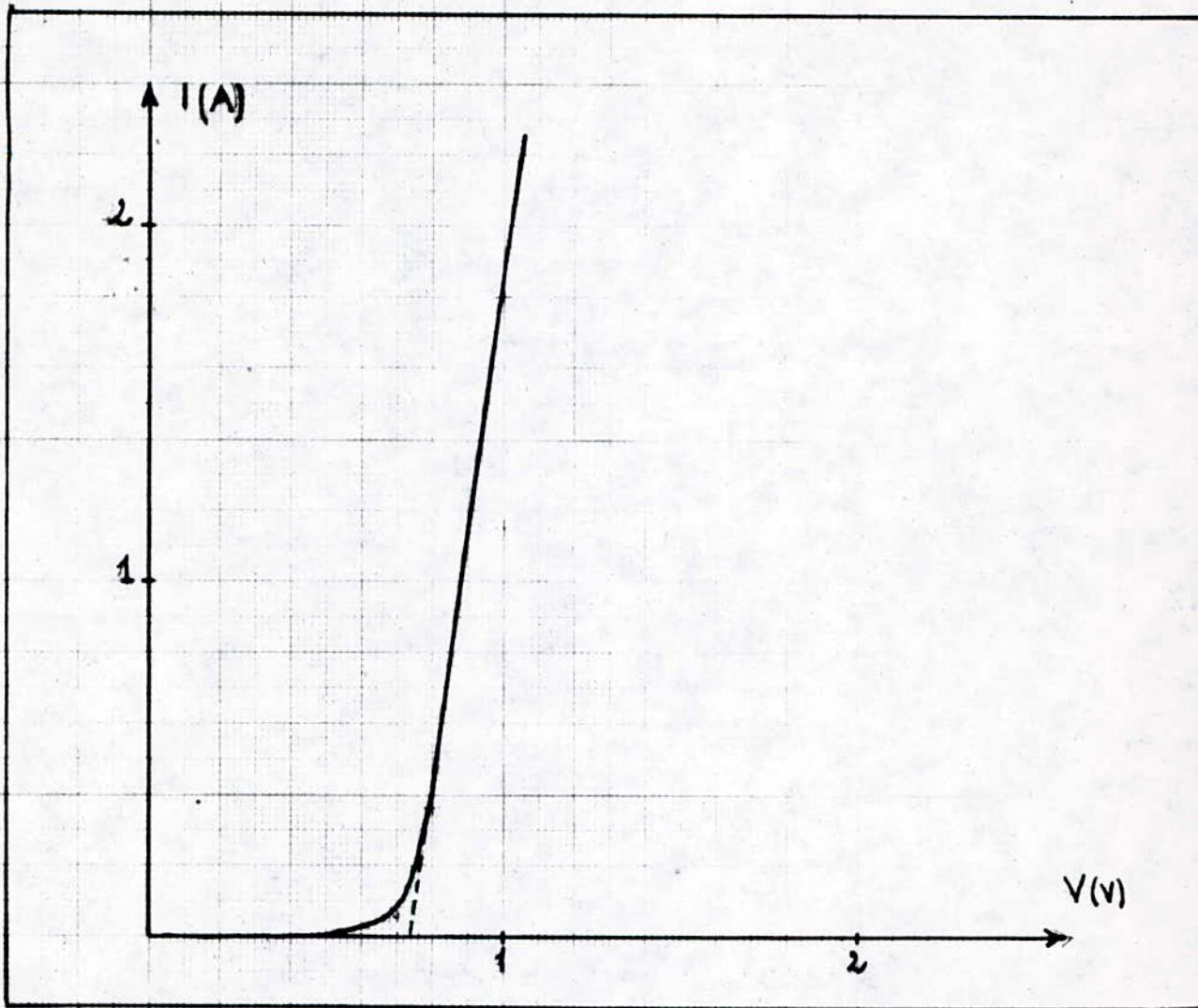


Fig 2.1.2

Caractéristique I-V de la diode de protection (MR 756 Motorola)

A- Modélisation d'un module solaire:

Après avoir fixé les paramètres physiques de la cellule : comment peut on simuler la caractéristique I-V d'un module solaire ?

L'idée de base est la suivante :

Sachant qu'un module solaire n'est rien d'autre que l'association de n cellules photovoltaïques en série , d'après 1-32 on a :

$$V_A - V_B = n(V_D - R_s I)$$

Dans ce cas on peut assimiler ce module à une grande cellule dont la tension à ses bornes s'écrit :

$$V_{AB} = V_D' - R_s' . I$$

avec : $V_D' = n . V_D$; V_D' est la tension due à l'association de n cellules disposées en série.

De l'équation 1-32 on tire V_D :

$$V_D = V_{AB}/n + R_s . I \quad (2-15)$$

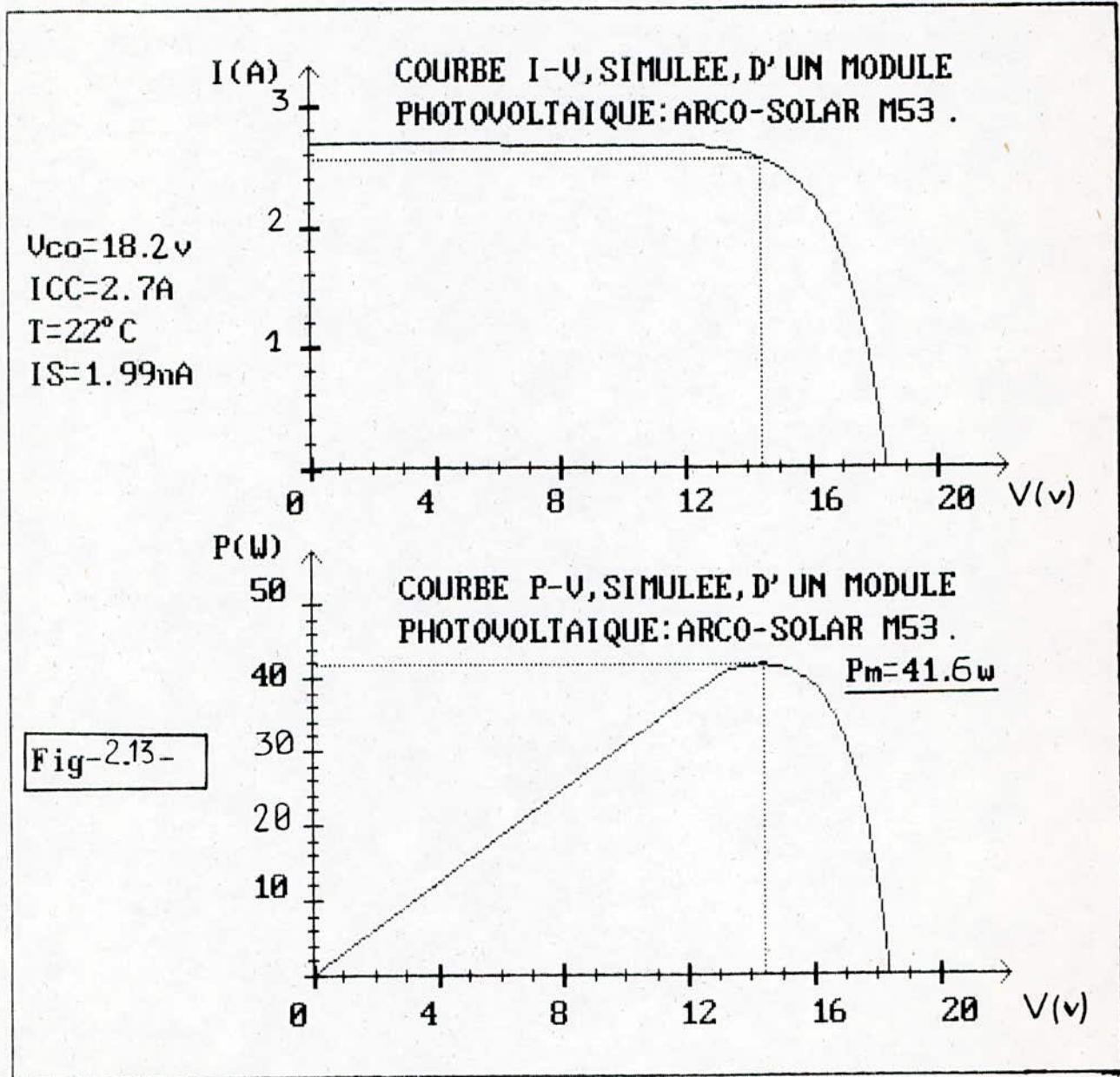
En remplaçant V_D dans l'équation on aura :

$$I = I_{cc} - I_s . \left[\exp\left(\frac{e}{K.T} . \left(\frac{V}{n} + R_s . I\right)\right) - 1 \right] \quad (2-16)$$

d'où on tire V de (2-16).

$$V = \left(\frac{n . K . T}{e}\right) . \ln\left(\frac{I_s - I + I_{cc}}{I_s}\right) - n . R_s . I \quad (2-17)$$

On peut donc simuler maintenant par programmation sur ordinateur , n'importe quel type de modules constitué à base de cellules solaires associées en série.



B- Simulation des caractéristiques I-V et P-V du module photovoltaïque

ARCO-SOLAR M 53 .

Sachant que le module ARCO-SOLAR M 53 est constitué de 36 cellules disposées en série, nous pouvons mettre en évidence les équations qui régissent les caractéristiques I-V et P-V, en se référant au modèle de base suivant:

$$V = (n.K.T/e) \cdot \ln((I_{cc} - I)/I_s + 1) - n.R_s.I$$

Pour le cas idéal $R_s = 0$, d'où:

$$V = (n.K.T/e) \cdot \ln((I_{cc} - I)/I_s + 1) \quad (2-18)$$

Pour notre modèle:

$$\begin{aligned} I_{cc} &= 2.7 \text{ A} \\ I_s &= 1.9992 \text{ nA} \\ n &= 36 \end{aligned}$$

La puissance délivrée par le module a pour équation :

$$P = V.I = 36.(K.T.I/e) \cdot \ln((I_{cc} - I)/I_s + 1) \quad (2-19)$$

Les deux équations respectives (2-18) et (2-19) ont été utilisées pour la simulation numériques.

Les courbes obtenues sont représentées par la figure (2-13). La courbe P-V ressemble à une cloche dont l'optimum est apparent pour un couple de valeurs $(I, V) = (2.58 \text{ A}, 14,4 \text{ V})$ qui correspond à une puissance maximale de 41.6 Watts.

Les valeurs citées ci-dessus sont théoriques et ne tiennent pas compte des paramètres qui font diminuer le rendement du module à savoir R_s, T, \dots . Autrement dit il faut s'attendre à des valeurs expérimentales légèrement différentes, car on sera dans un cas réel de fonctionnement.

2-5: Simulation du déséquilibre d'une association série de modules

solaires par ordinateur.

Pour faire l'étude de cette simulation, on suppose que les modules ont les mêmes caractéristiques et on considère le cas idéal, c'est-à-dire $R_s = 0, R_{sh} = \infty$. Dans ces conditions, pour un module non occulté, la tension à ses bornes s'écrit:

$$V = 36.(K.T/e) \cdot \ln((I_{cc} - I)/I_s + 1)$$

A- Schéma équivalent d'un module devenu receptrice dans une association quelconque : (Fig 2-11).

Le schéma correspondant résulte du fait que dans ce cas, le courant circulant dans le module emprunte le chemin D2, g2, D1 (g3 et g1 étant bloquées à cause de la différence de potentiel à leurs bornes). Donc nous pouvons écrire:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ \text{avec } V_1 &= V_3 = (K.T/e) \cdot \ln(1 + I/I_s) \\ V_2 &= (12.K.T/e) \cdot \ln(1 + I/I_s) \end{aligned} \quad (2-20)$$

D'où : $V = f(I) = (K.T/e) \cdot (2 \cdot \ln(1 + I/I_s) + 12 \cdot \ln(1 + I/I_s))$
 I_s : courant de saturation des diodes de protection (D1 et D2).
 I_s : courant de saturation des cellules.

B- Comportement de 3 modules en série:

On suppose que nous avons n modules montés en série dont P modules sont devenus récepteurs à cause d'une occultation quelconque (fig-214.0) La tension V résultante s'écrit:

$$V = (n-P).V1 - P.V2$$

avec V1: tension d'un module générateur.
V2: tension d'un module receptr.

- Exemple d'application .(n=3)

a- Cas où aucun module n'est occulté (P = 0).

Dans ce cas $V = 3.V1$.Nous retrouvons la forme de la caractéristique d'un module avec $I_{cc} = 2.4$ A et $V_{co} = 56.4$ V .La puissance P_m est de 110.2 W. (Fig 2-14 et 2-15 courbes a)

b-Cas où un module est occulté (P=1).

Dans ce cas $V = 2.V1 - V2$.La tension V_{co} n'est plus 56.4 V ,mais elle devient égale à 38.2 V .D'autre part P_m est de 57.7 W soit une diminution de 52.3 % par rapport au cas a. (fig 2-14 et 2-15 courbes b) Nous remarquons que P_m est inférieure à celle si on avait deux modules en série .Cela nous permet de déduire que le module occulté est devenu récepteur à tel point qu'il a consommé de l'énergie . Cette énergie est évaluée à 15.76 W.La résistance (simulée au module occulté) est de 3.38 ohms.

Calculons la résistance optimale pour laquelle le déséquilibre est apparent:

$$R_{opt} = V_m/I_m = 29.18/2.26 = 12.9 \text{ ohms.}$$

c-Cas où deux modules sont occultés (p=2).

Dans ce cas $V = V1 - 2.V2$.La tension V_{co} est de 18.5 V soit le tiers de celle du cas a.Ce qui montre que les deux modules occultés ne sont plus générateurs.Du point de vue énergitique ,on remarque que P_m est de 4.85 W ,soit une diminution de 95.5 % par rapport au cas a.Cela correspond à une chute considérable qui engendre une perte d'énergie consommée par les deux modules en déséquilibre .(Fig 2-14 et 2-15 courbes c).

Calculons la résistance équivalente ,simulée, des modules occultés: Si on avait un module couplé à une charge ,il aurait délivré une puissance maximale de 36.7 W.Or pour notre cas ,cette dernière est de 4.85 W.Ce qui montre que la différence d'énergie a été consommée par les deux modules en déséquilibre.

Soit: $P = 36.7 - 4.85 = 31.85$ W ==> $R = P/I_m = 31.85/1.05=29$ ohms
Si on suppose que les deux modules occultés ont une résistance identique ,la résistance de chacun est de $R/2$ soit 14.5 ohms.

d- Conclusion.

Pour une telle association ,le risque de déséquilibre entre les trois modules est flagrant à tel point qu'on perd toute l'énergie requise

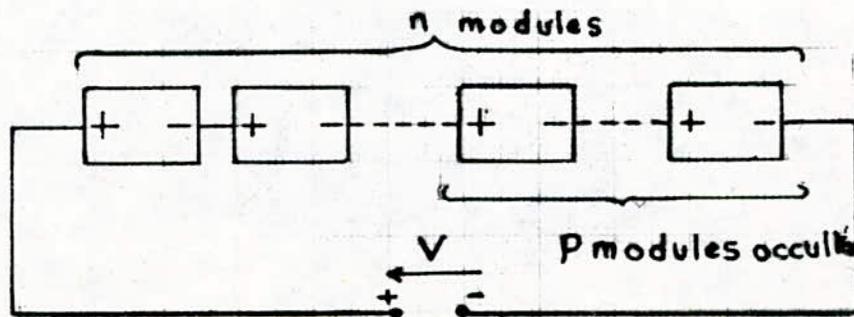
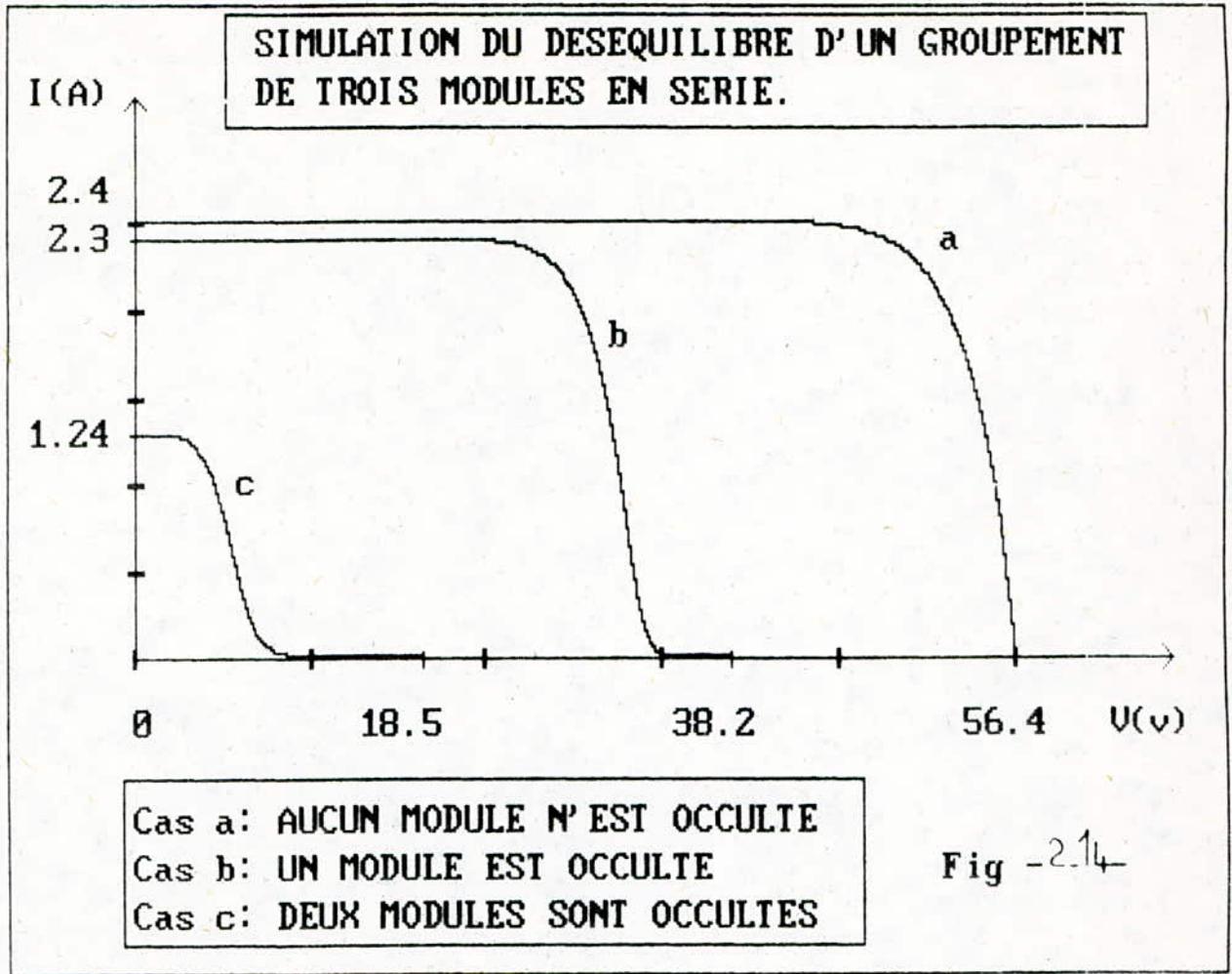
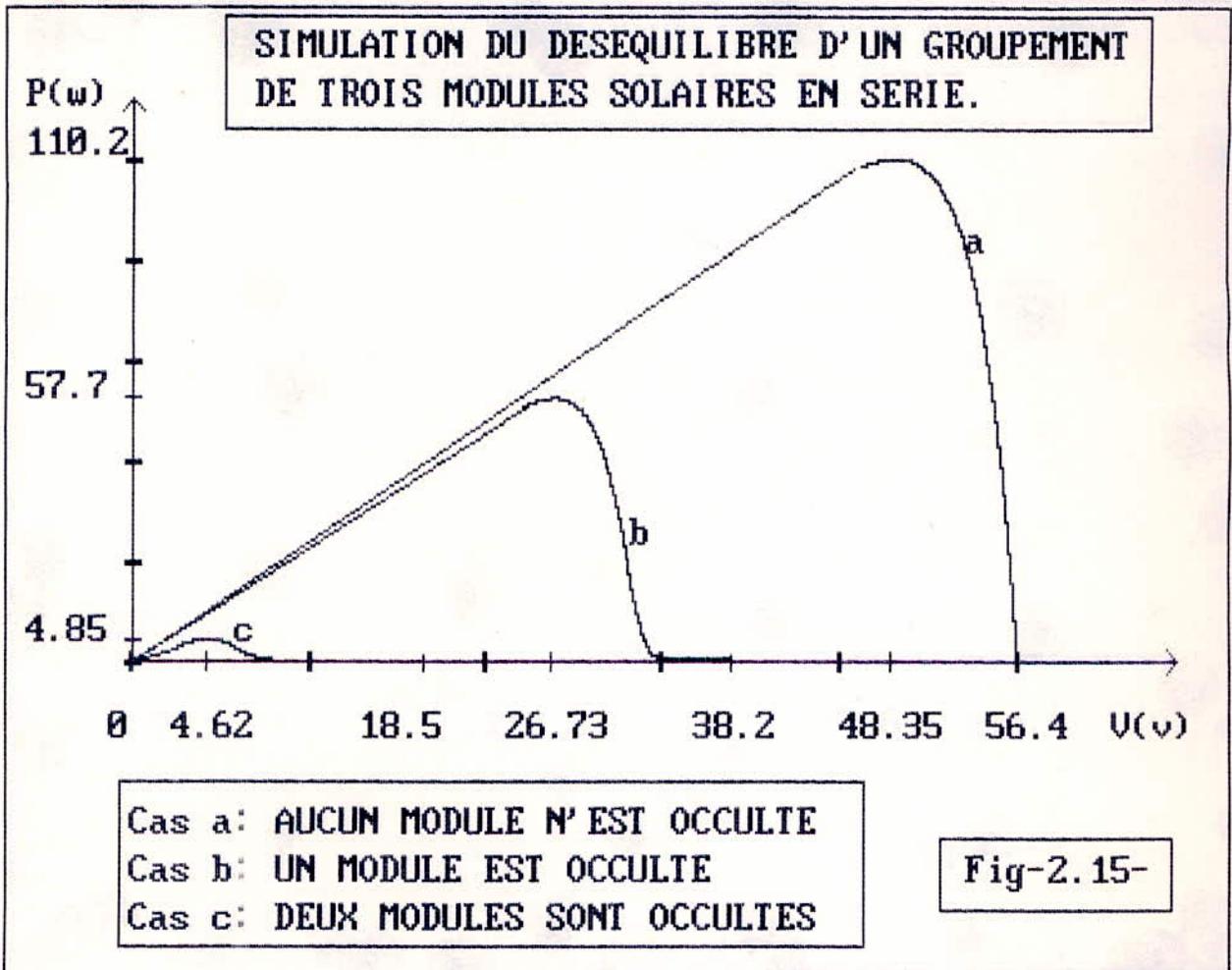


Fig-2.14.0-



Néanmoins quand l'ensemble travaille à plein régime , nous pouvons jouir d'une puissance maximale de 110.2 W.

D'autre part on constate que la charge simulée au module occulte varie d'un état de déséquilibre a un autre .De plus le phénomène de déséquilibre n'est apparent qu'à partir d'une certaine valeur de la charge (cas b).

3-1 Introduction

L'étude expérimentale du déséquilibre dans un réseau de modules solaires doit commencer par une étude systématique des caractéristiques de l'ensemble des modules avant et après occultation. Ces mesures expérimentales seront confrontées aux résultats obtenus par simulation sur ordinateur. Pour effectuer cette étude on envisage les différents groupements possibles en augmentant à chaque fois le nombre de modules.

3-2 Conditions expérimentales.

A- Installation de base.

Le générateur photovoltaïque, constitué de 24 modules solaires de type ARCO-SOLAR M 53, est incliné d'un angle voisin de la latitude, soit environ 45° , orienté plein sud et installé sur la terrasse du département d'Electronique de l'E.N.P. Toutes les sorties des modules sont ramenées séparément sur une table, ce qui nous permet de faire les différentes associations selon le besoin de la charge.

B-Choix de l'heure des relevés expérimentaux.

La caractéristique I-V d'une cellule solaire est fortement liée à la température et surtout au flux solaire. Généralement les caractéristiques des cellules sont données pour un flux solaire de 1000 W/m^2 et une température de 25°C . Afin que ces deux facteurs soient constants tout au long de nos expériences, on opère à un moment de la journée où le flux est maximal et relativement constant, à savoir entre 12h et 15h.

C- Techniques de mesures du courant et de la tension.

Le courant débité par le module est mesuré par un ampèremètre placé en série avec la charge, la tension est mesurée aux bornes de la charge. Cette méthode est illustrée par la figure

3-3 Caractéristiques d'un module solaire.

La caractéristique I-V d'un module solaire est donnée par la figure 3-1. L'allure de cette courbe confirme l'étude théorique

Fig 3.1 Caractéristique I.V d'un module solaire éclairé

T = 27°C

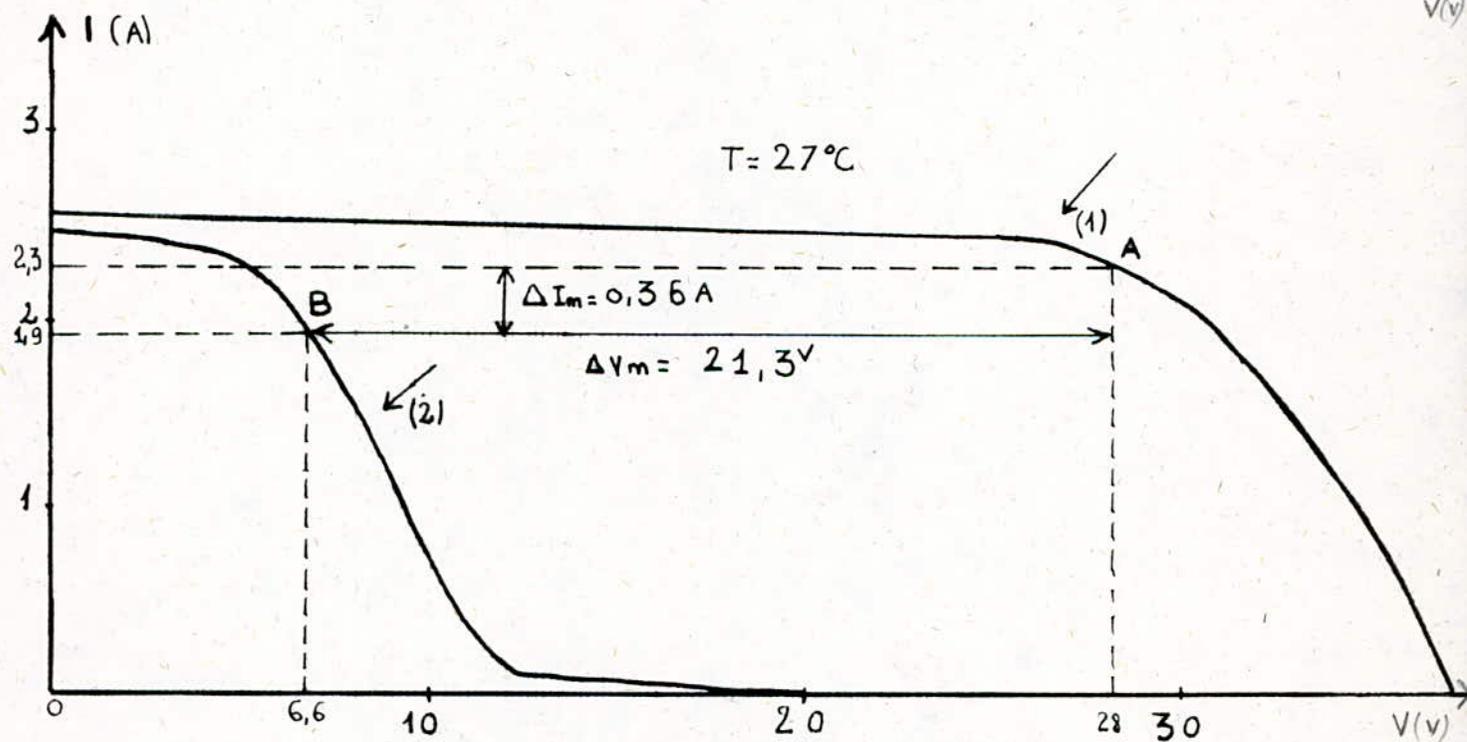
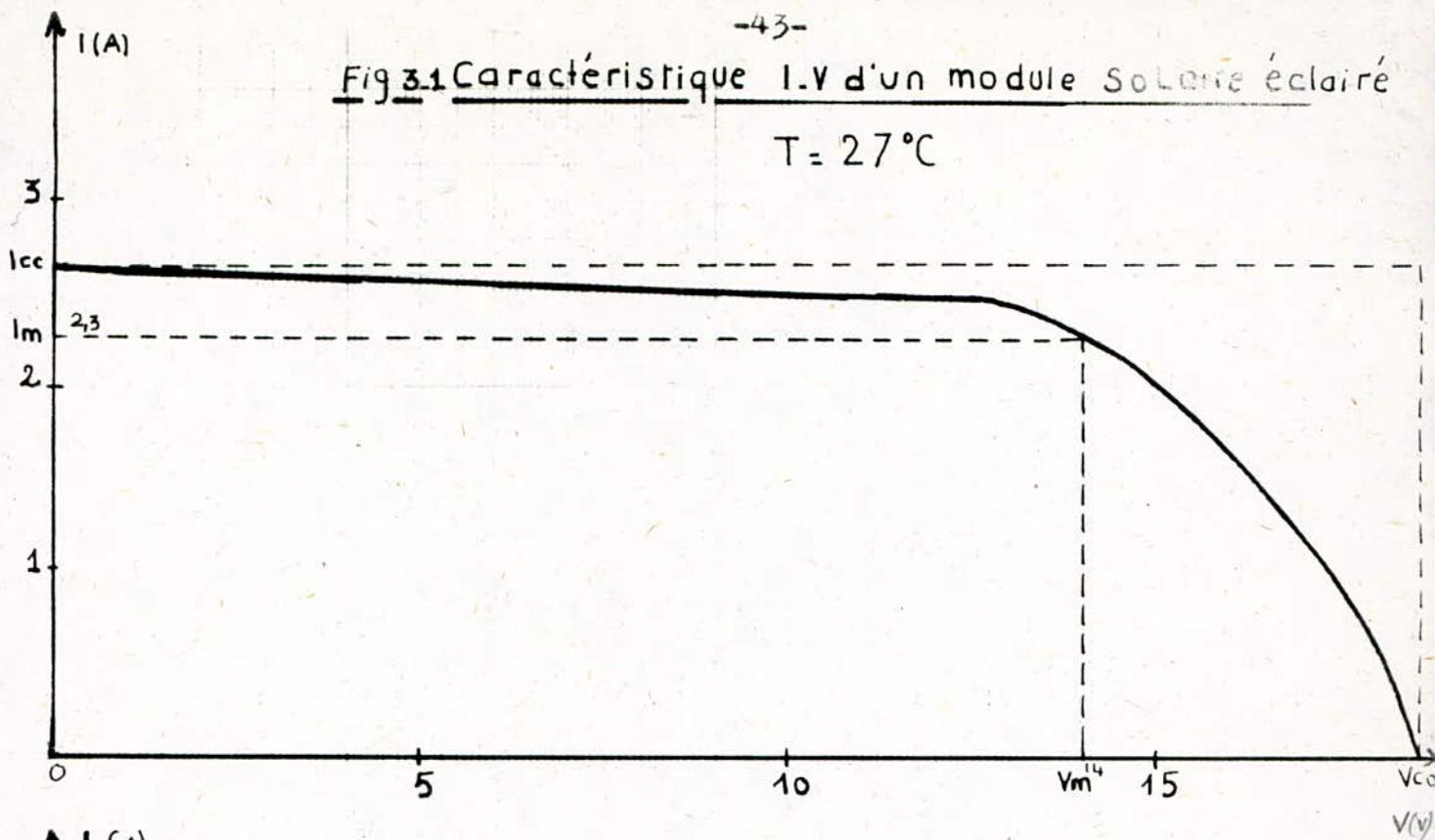


Fig 3.2

- (1) Caractéristique I.v de deux modules en Série
- (2) Caractéristique I.v de deux modules en Série dont l'un est occulté.

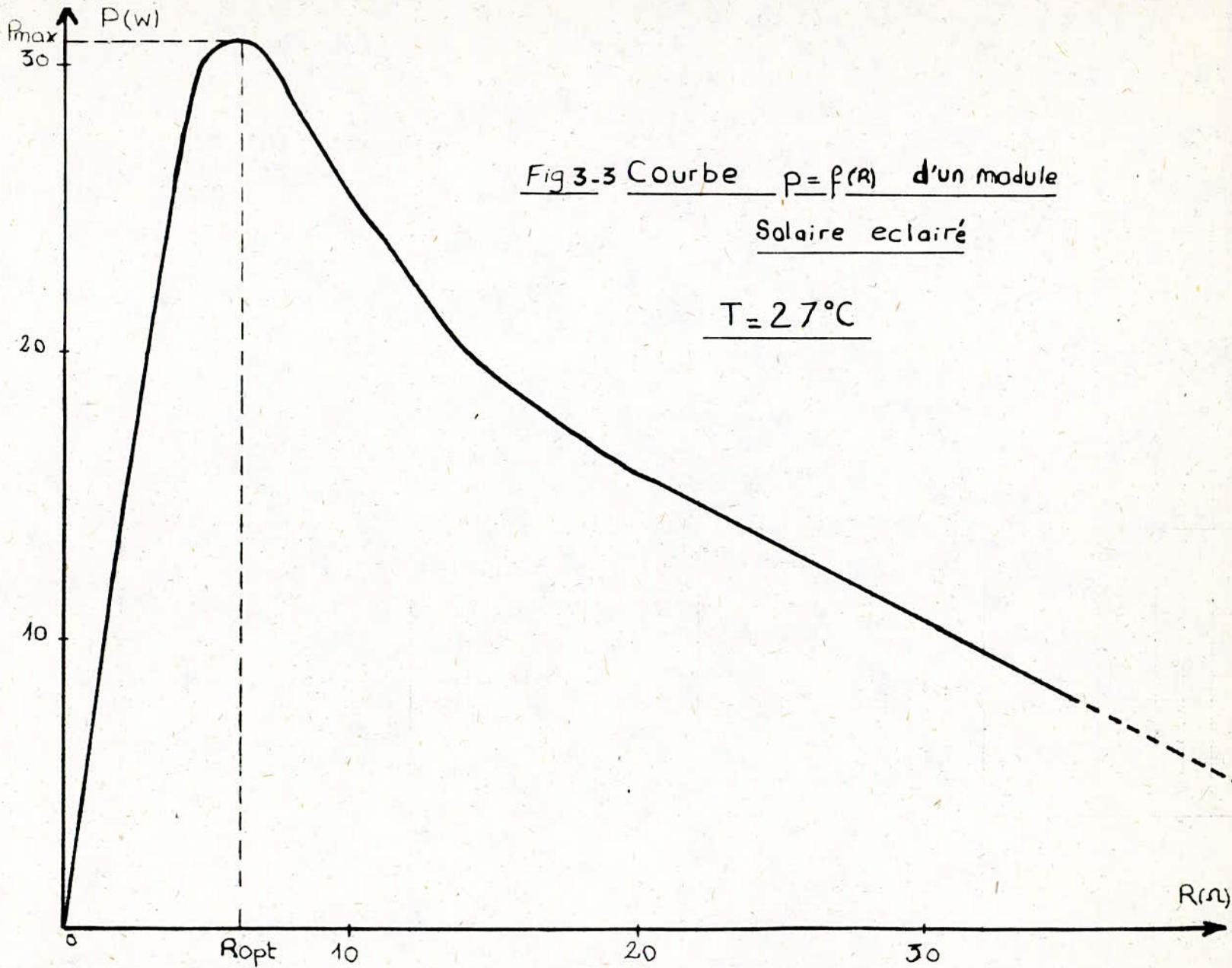
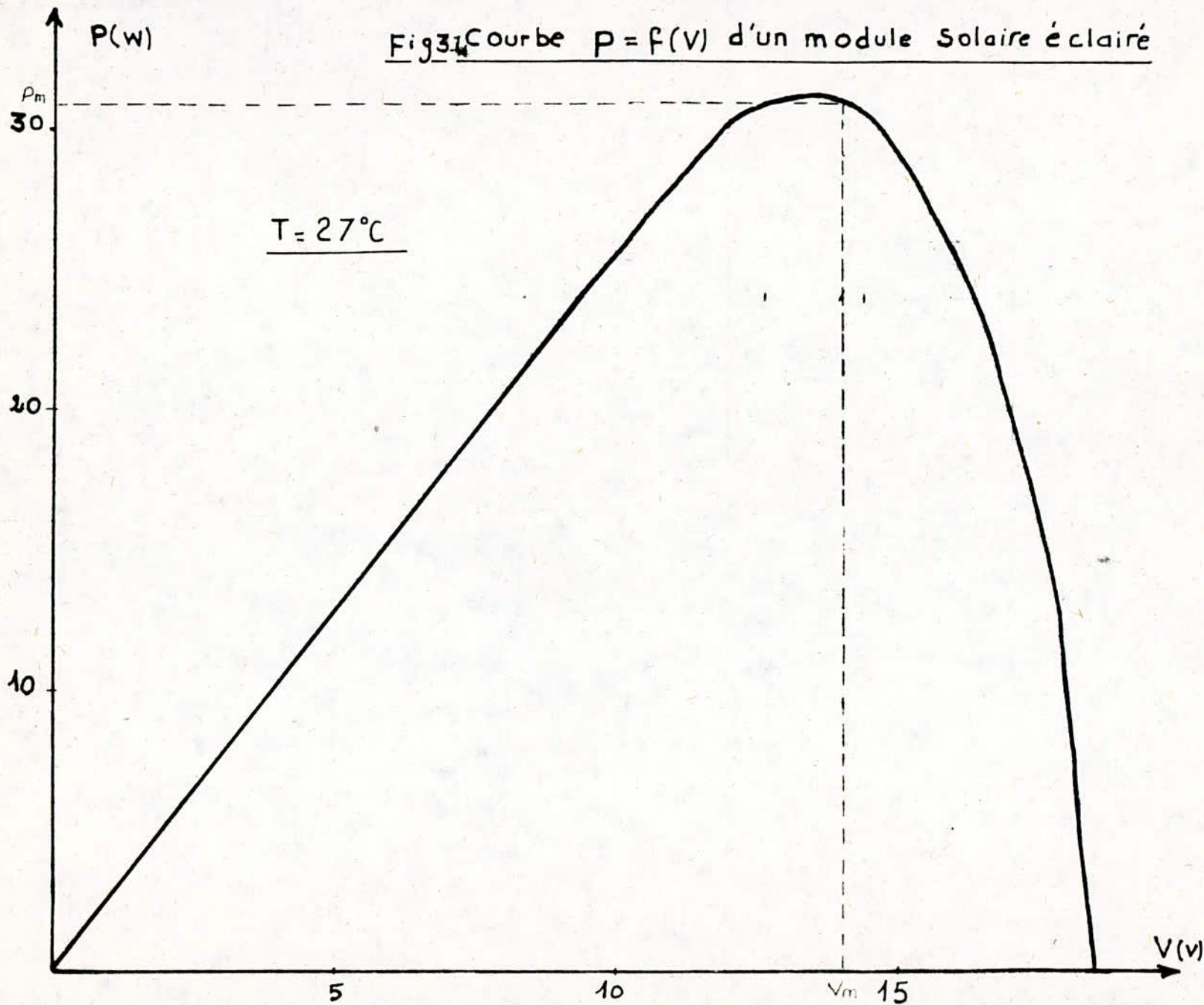


Fig 31 Courbe $p = f(V)$ d'un module solaire éclairé



faite au chapitre II (voir 2-4A). Cette courbe montre que le courant de court-circuit, I_{cc} , est de 2.65 A alors que la tension de circuit ouvert, V_{co} , est de 18.5 V. Ces valeurs sont très proches des valeurs données par le constructeur. Ces légères variations, $\Delta I_{cc}=0.05$ A et $\Delta V_{co}=0.05$ V, ont pour cause principale la non constance du flux durant nos expériences. Ceci montre l'influence majeure du rayonnement sur le module.

Le facteur de forme (voir chapitre I) est $FF = 0.63$.

Les variations de la puissance avec la résistance de charge est illustrée par la figure 3-3. On remarque que la puissance maximale est obtenue pour $R = R_{op} = 6.2$ ohms. (C'est l'adaptation).

La puissance délivrée par un module est obtenue en optimisant le produit $I.V$. Le tracé de la courbe de puissance en fonction de la tension nous donne $P_m = 32$ W. Cette valeur diffère de celle trouvée dans le chapitre II. La cause est que cette dernière ne tient pas compte des paramètres physiques de la cellule.

Remarque:

Un module solaire peut être maintenu à son point de puissance maximale soit en lui appliquant une tension externe V_m soit en le couplant à une résistance de charge R_{op} telle que $R_{op} = V_m/I_m$.

3-4 Association de deux modules en série.

A- cas où aucun module n'est occulté.

La caractéristique $I-V$ (fig 3-2 courbe 1) pourra être obtenue en ajoutant les caractéristiques $I-V$ de chaque module à courant constant. La tension de circuit-ouvert a doublé (2.19 V). Par contre le courant de court-circuit est pratiquement inchangé (2.45 A) conformément aux propriétés d'une association série décrites au chapitre I. D'autre part la courbe $P-V$ (Fig 3-5 courbe 1) atteint son optimum de puissance pour $V_m = 28.2$ V et $I_m = 2.28$ A soit $P_m = 64.3$ W.

Cas où un module est occulté. (Fig 3-6a)

Lorsqu'un module est occulté, il ne débite pas de courant $\rightarrow I_{ph2}=0$. La loi d'OHM s'écrit $V_1 + V_2 = R_{ch}.I$. On sait que V_1 est positive montrons que V_2 est négative:

Au court circuit ($R_{ch}=0$) on a $V_1 = -V_2$.

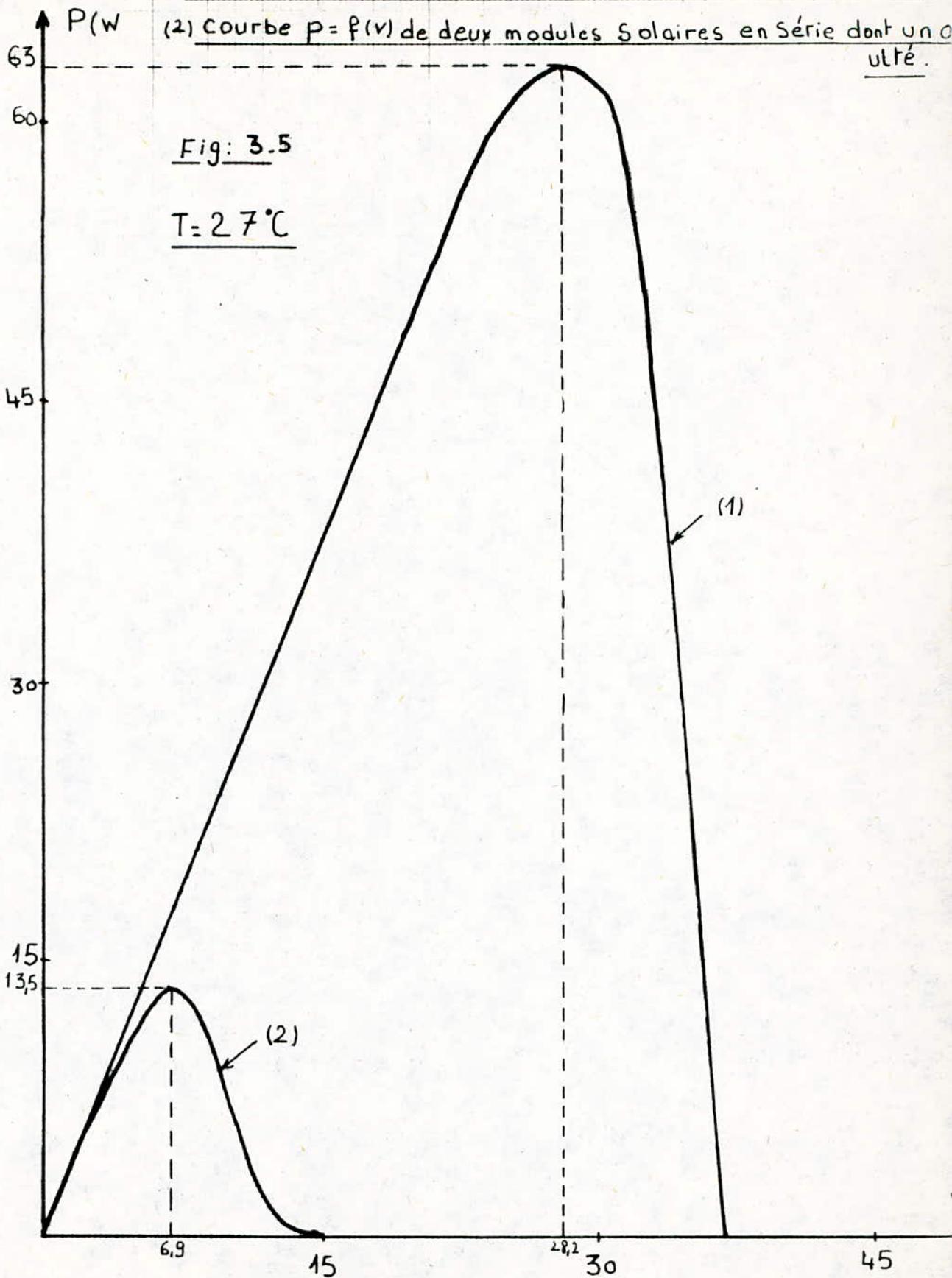
D'autre part en circuit-ouvert ($R_{ch}=\infty$) on a $V_1 = -V_2$.

Entre ces deux cas extrêmes le module occulté est polarisé en inverse par la force électromotrice photovoltaïque du module éclairé. Ceci tend à accroître le courant inverse provoquant ainsi une augmentation de température. Le phénomène étant cumulatif ce qui provoque un emballement thermique avant même d'atteindre la tension de claquage. D'où la nécessité d'une protection des modules. Ceci est mis en évidence par la figure 3-2 courbe 2 où le courant débité par le module éclairé, décroît rapidement. On assiste à un déplacement du point de fonctionnement de A vers B :

$$\Delta V_m = V_{mA} - V_{mB} = 28.2 - 6.9 = 21.3 \text{ V}$$

(1) Courbe $P = f(V)$ de deux modules solaires en série.

(2) Courbe $P = f(V)$ de deux modules solaires en série dont un est ultré.



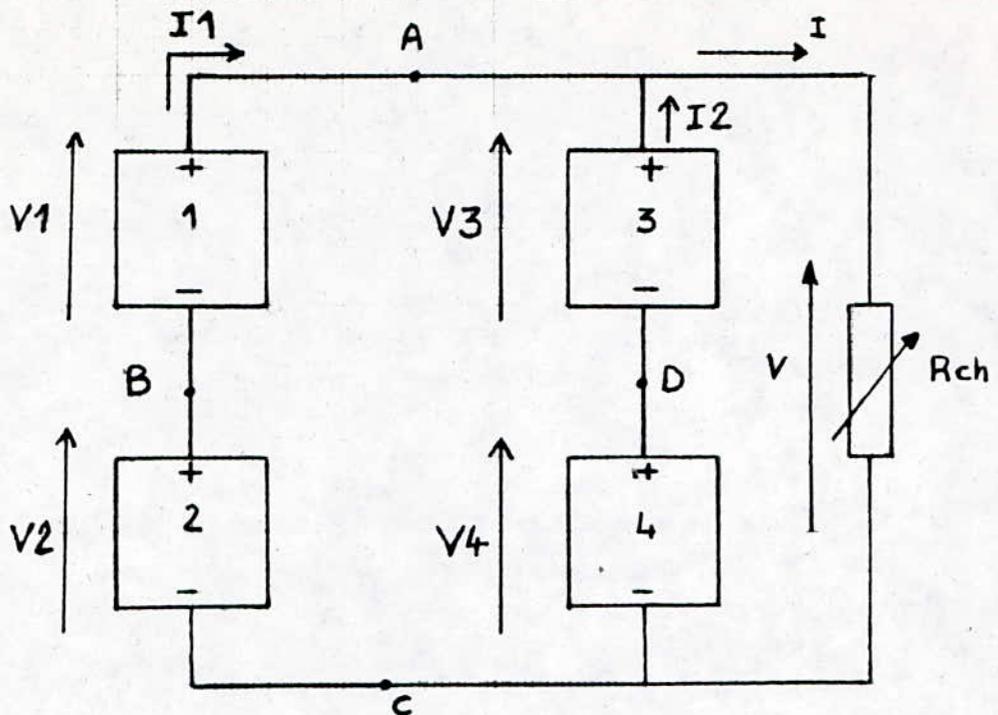


Fig: 3-6c.

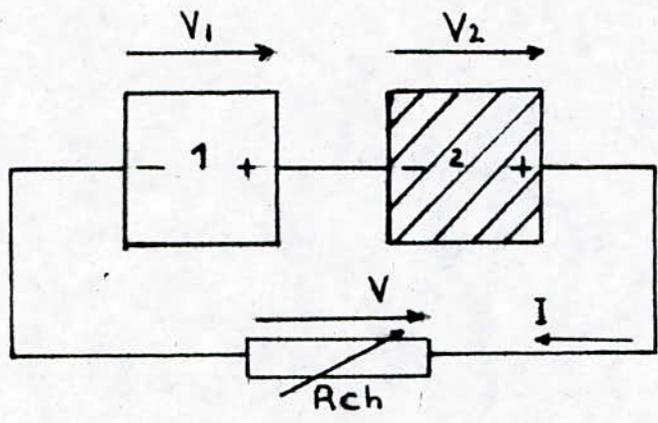


Fig: 3-6a

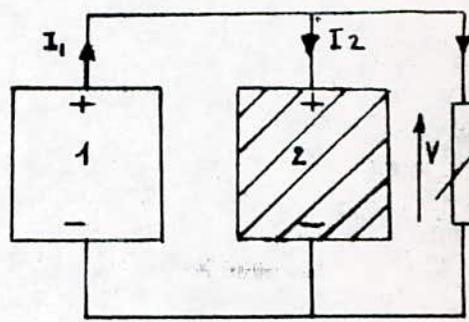


Fig: 3-6b

$$\Delta I_m = I_{mA} - I_{mB} = 2.28 - 1.92 = 0.36 \text{ A}$$

D'autre part les courbes $P=f(V)$ de la figure 3-5 permettent de calculer la chute de puissance. On alors:

$$\Delta P = P_{mA} - P_{mB} = 64.3 - 13.2 = 51 \text{ W}$$

Soit une variation relative de 79% environ.

Ceci montre encore une fois que le module occulté devient récepteur en consommant toute l'énergie fournie par le module non occulté.

3-5: Association de trois modules en série.

A- Cas où aucun module n'est occulté. (Fig 3-7 et 3-9 courbes 1)

Lors de l'association de trois modules en série on remarque que la caractéristique garde la même allure avec:

Un courant de court-circuit le même que celui d'un seul module (2.5A)

Une tension de circuit-ouvert triple de celle d'un seul module ($2 \times 19V$)

Une puissance optimale triple de celle d'un seul module ($3 \times 32W$).

B- Cas où un module est occulté. (Fig 3-7 et 3-9 courbes 2)

On remarque que :

- Pour $R < R_0$ ($R_0 = 6$ ohms dans le cas présent) les deux caractéristiques sont confondues c'est à dire pas de déséquilibre. Par contre pour $R > R_0$ les caractéristiques s'écartent car le module occulté passe en mode récepteur.

- La puissance optimale diminue: $P_m = 41.2 \text{ W}$ soit une variation relative d'environ 60% par rapport au cas A à cause du déplacement du point de fonctionnement optimum

C- Cas où deux modules sont occultés. (Fig 3-7 et 3-9 courbes 3)

Dans ce cas le groupement entre en déséquilibre à partir d'une charge nulle (court-circuit) et s'accroît davantage lorsque la charge augmente. D'autre part la caractéristique $I-V$ est déformée ce qui entraîne une chute de puissance de l'ordre de 98% par rapport au cas A.

3-6 Association de deux modules en parallèle.

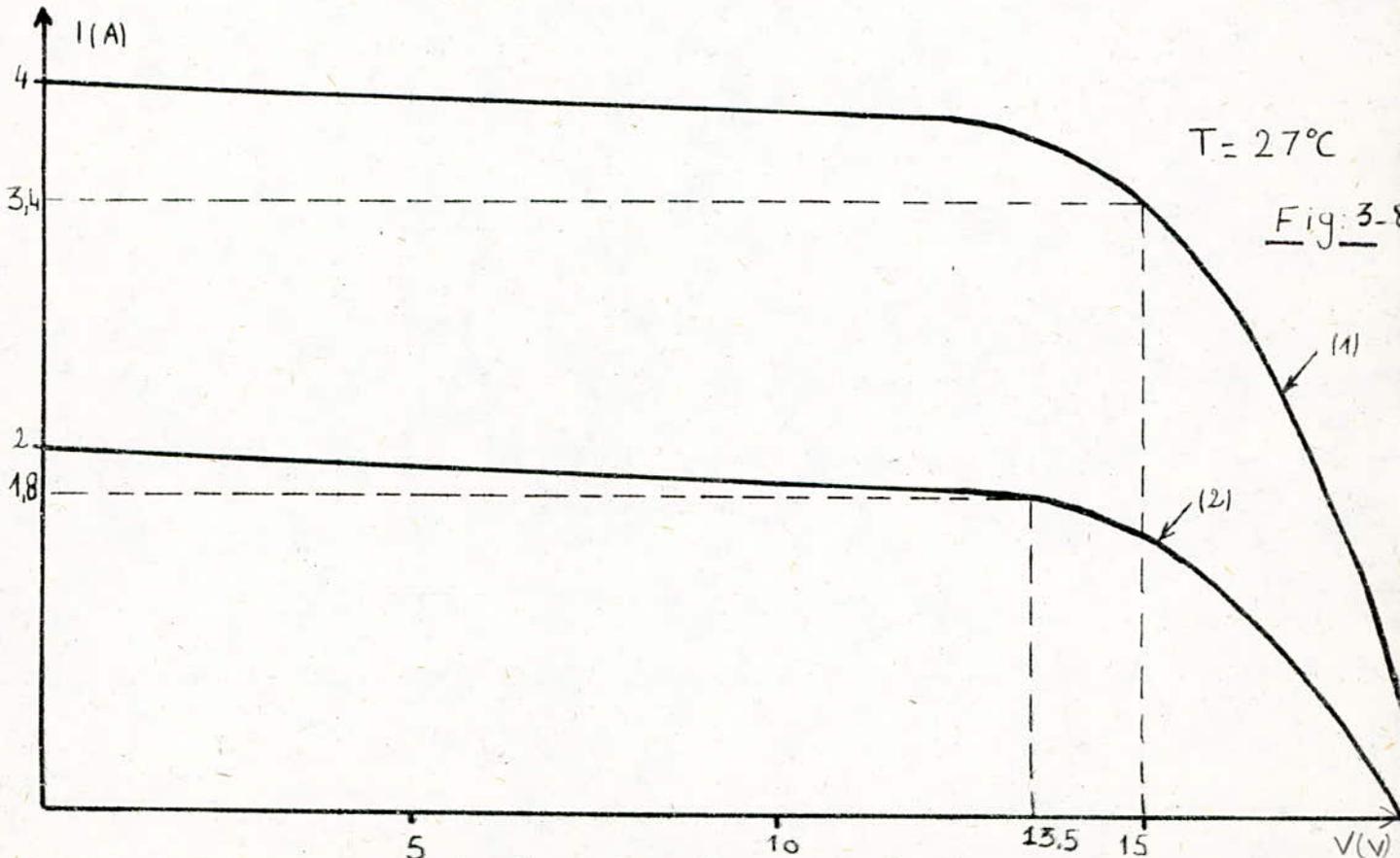
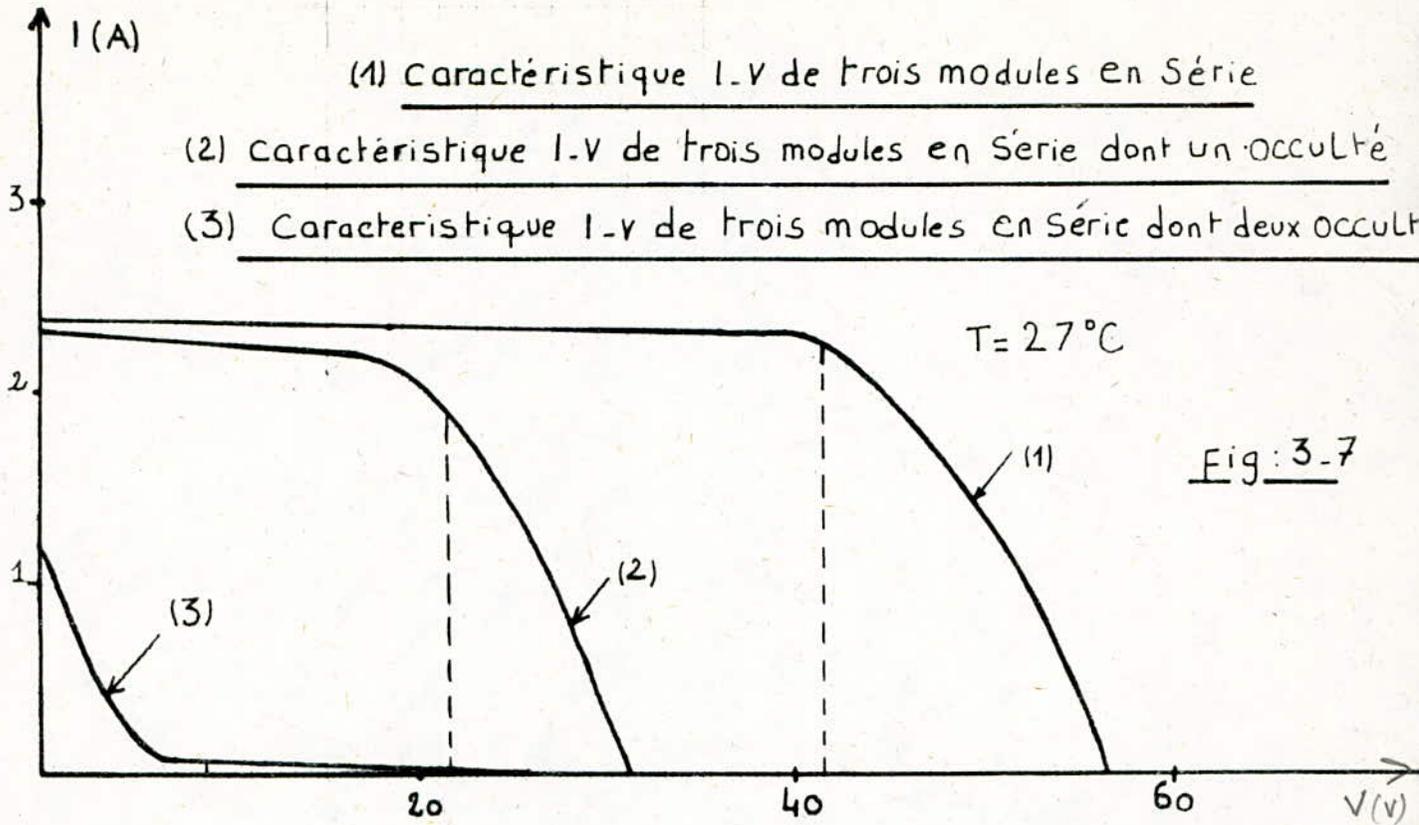
A- Cas où aucun module n'est occulté

Lors de l'association de 2 modules en parallèle chacun génère le même courant photovoltaïque et possède la même tension de circuit-ouvert. La tension est la même aux bornes de chaque module et quelque soit la valeur de la charge le courant dans celle-ci est le double de celui généré par un seul module.

La figure 3-18 courbe 1 montre qu'en court-circuit le courant est de 4 A. Par contre en circuit-ouvert la tension est de 19 V. Le courant dans chaque branche est nul, donc aucun module ne peut fonctionner en mode récepteur.

La courbe $P = f(V)$ (Fig 3-10 courbe 1) permet de déterminer le point de fonctionnement optimum. On trouve alors:

$$\begin{aligned} I_m &= 3.36 \text{ A} & \implies & P_m = V_m \cdot I_m = 50.4 \text{ W} \\ V_m &= 15 \text{ V} & \implies & R_m = V_m / I_m = 4.5 \text{ ohms} \end{aligned}$$



- (1) Caractéristique I-V de deux modules en parallèle
(2) Caractéristique I-V de deux modules en parallèle dont un occulté

P(w)

(1) Courbe $P = f(v)$ de trois modules en Serie

(2) Courbe $P = f(v)$ de trois modules en Serie
dont l'un est occulté

(3) Courbe $P = f(v)$ de trois modules en Serie
dont deux sont occultés

Fig: 3-9

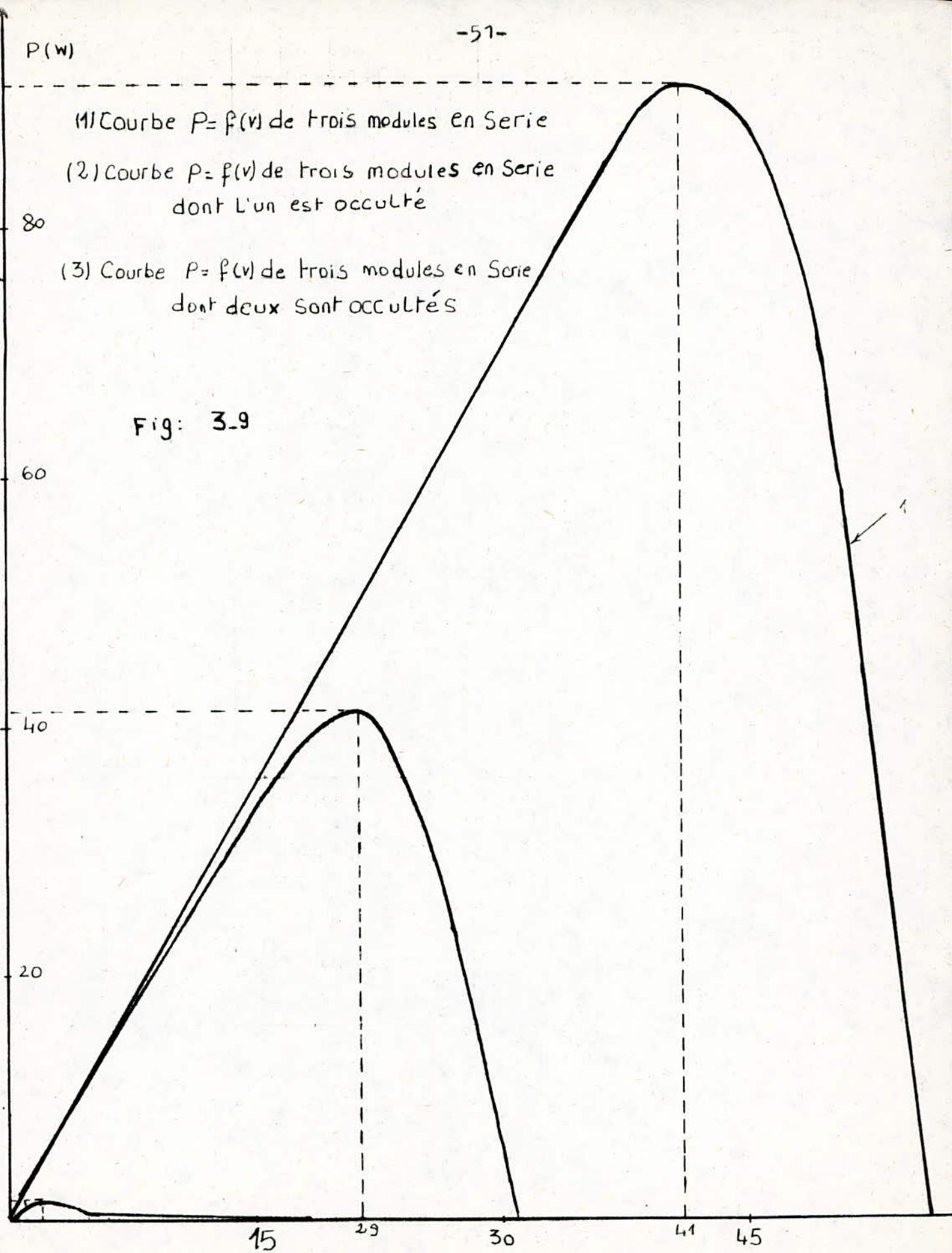
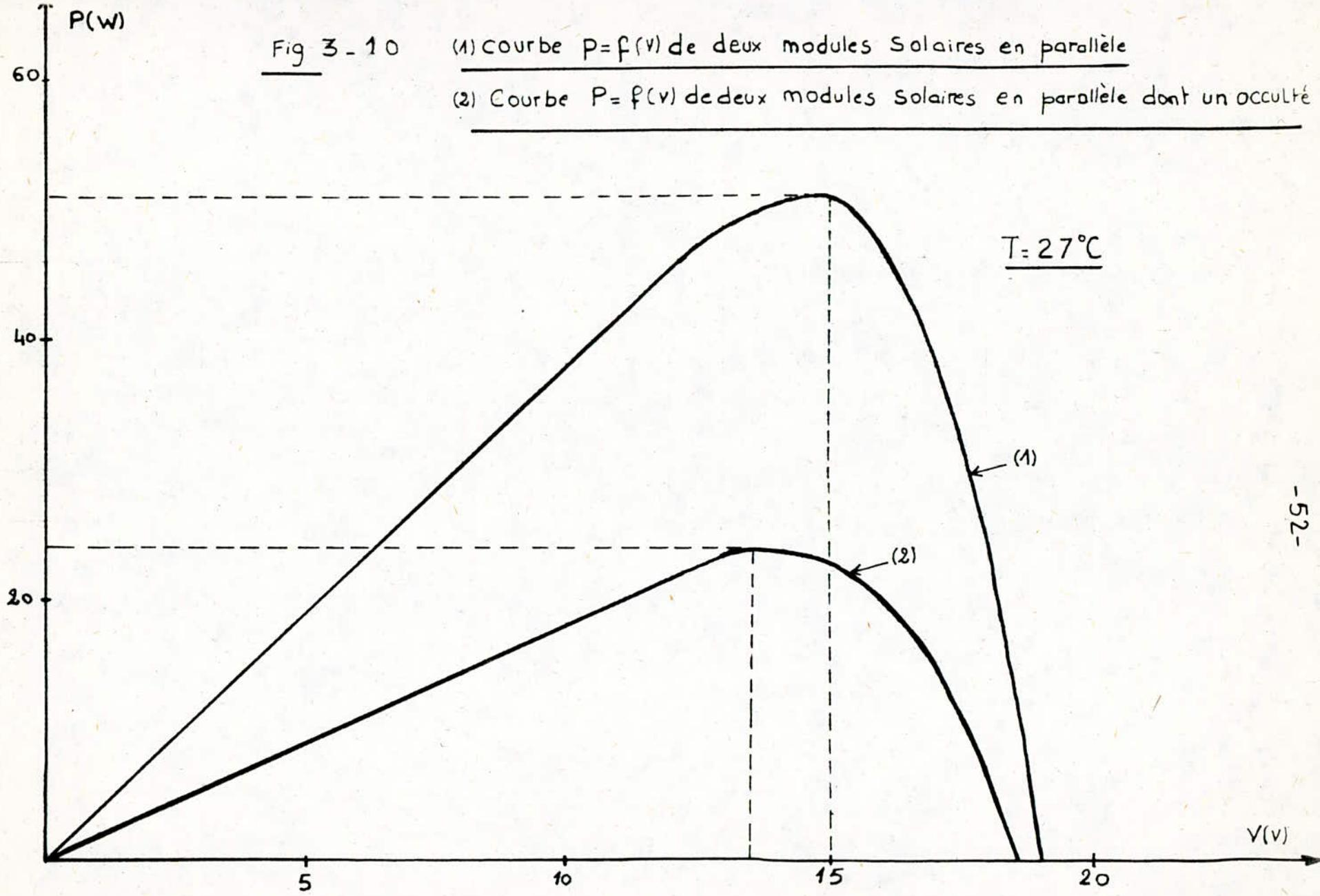


Fig 3 - 10

(1) courbe $P=f(V)$ de deux modules solaires en parallèle

(2) Courbe $P=f(V)$ de deux modules solaires en parallèle dont un occulté



La puissance de deux modules en parallèle devraient être identique à celle de deux modules en série. La différence (environ 14W) provient du fait que le flux solaire a diminué. D'autre part la résistance optimale de deux modules en parallèle est inférieure à celle d'un seul module.

B-Cas où un module est occulté. (Fig 3-6b)

Lorsque le module 2 est occulté il ne débite pas de courant par conséquent il sera traversé par un courant I_2 généré par le module 1 qui est non occulté. Ainsi le module 2 devient récepteur. La caractéristique I-V est donnée par la figure 3-8 courbe 2. On remarque que le courant est divisé par deux en court-circuit, par contre en circuit-ouvert le module 1 débite dans le module 2 ce qui explique qu'on obtient une puissance maximale $P_m = 28.8 \text{ W}$ (Fig 3-10 courbe 2) soit une variation d'environ 50% par rapport au cas A.

3-7 Association mixte.

Il s'agit de l'association en parallèle de deux groupements forme chacun de deux modules en série (Fig 3-6c).

A-Cas où aucun module n'est occulté. (Fig 3-11 et 3-12 courbes a)

La forme de la caractéristique I-V que nous avons obtenu ressemble à celle d'un seul module avec une tension de circuit-ouvert valant le double ($2 \times 19 \text{ V}$) et un courant de court-circuit qui vaut 4.5 A . Ceci grâce à la contribution de I_1 avec I_2 .

Nous remarquons que la forme de la caractéristique P-V ressemble à une cloche dont l'optimum de puissance est obtenu pour $I_m = 3.75 \text{ A}$ et $V_m = 22.7 \text{ V}$ soit $P_m = 107.8 \text{ W}$ ==> $R_{op} = V_m / I_m = 6.06 \text{ ohms}$.

B-Cas où un module est occulté. (Fig 3-11 et 3-12 courbes b)

Supposons que la charge est court-circuitée dans ces conditions nous avons $V=0$.

Le module 1 étant occulté se voit forcé à devenir récepteur et la tension à ses bornes s'écrit :

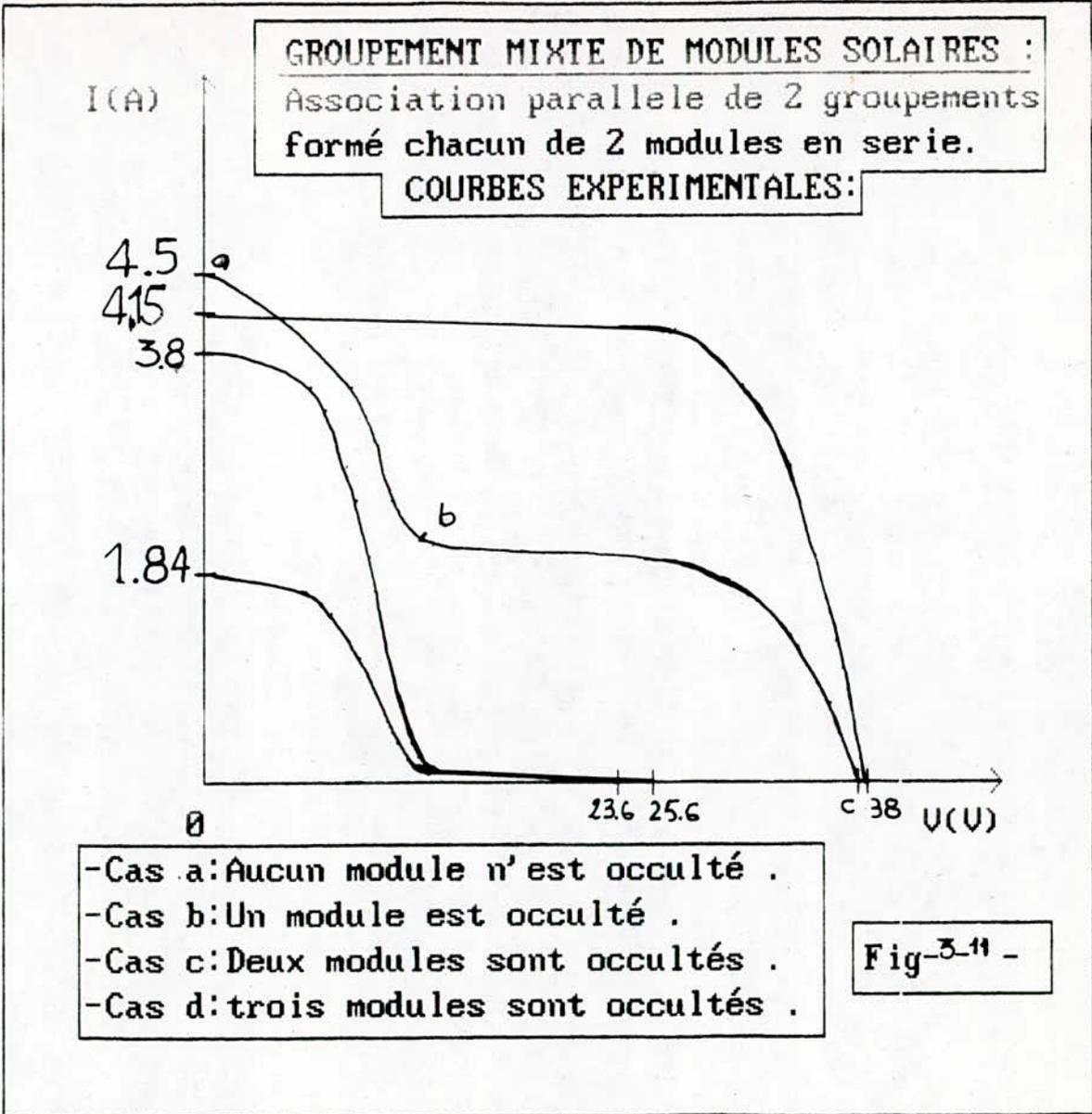
$$V_1 = -(0.5 \times I_2 + 2 \times 0.7) = -7.4 \text{ V}$$

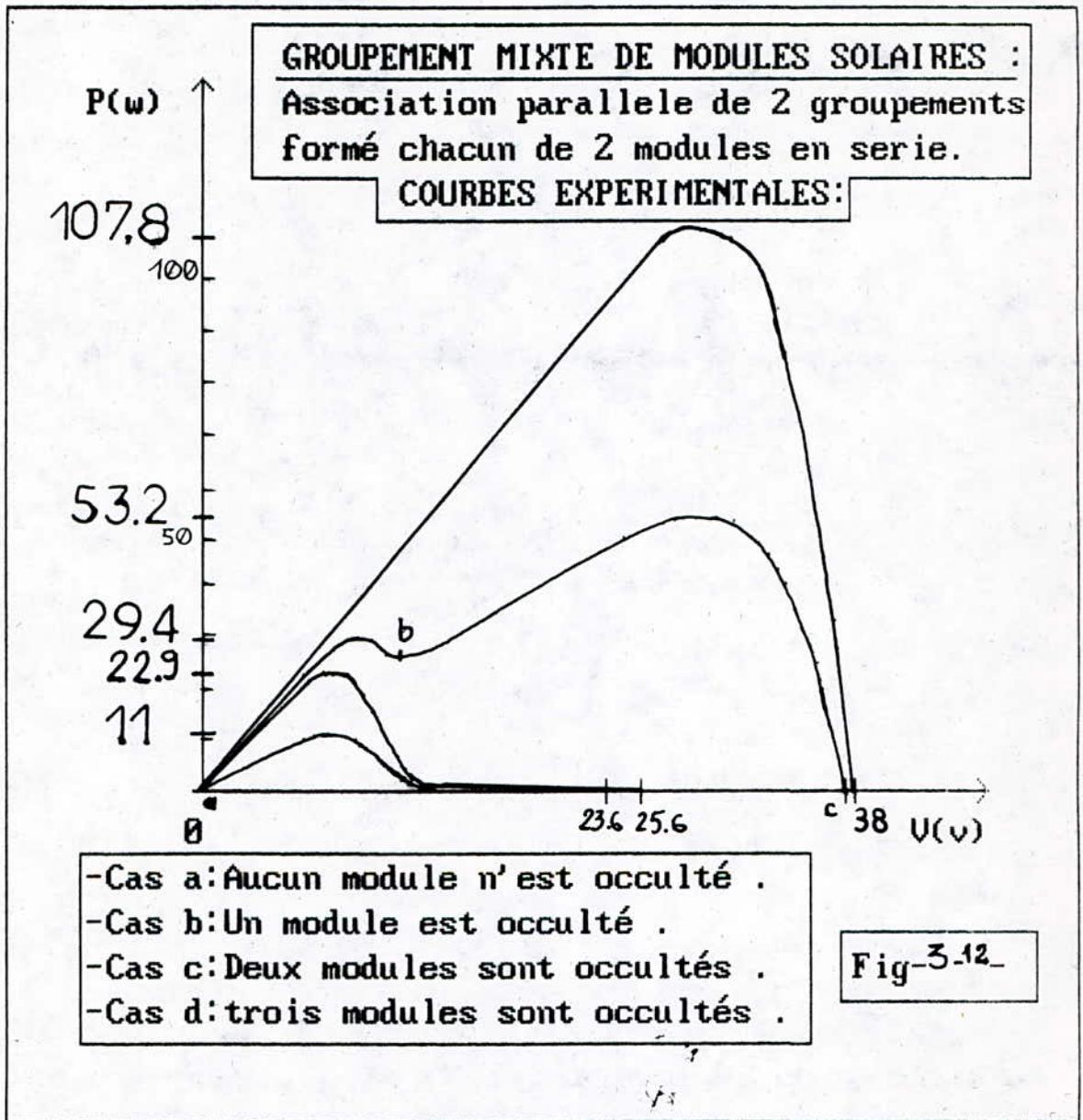
Nous avons $V = V_2 + V_1 = V_3 + V_4$ ==> $V_3 = -V_4$ et $V_2 = -V_1$
 or $V_1 = -7.4 \text{ V}$ ==> $V_2 = 7.4 \text{ V}$

Le courant de court circuit est de 4.5 A .

En augmentant la charge, nous pouvons constater que I diminue plus rapidement que lorsque V augmente et cela jusqu'à la valeur 11.6 V . A cet instant comme $V = V_2 + V_1$ ==> $V_2 = V - V_1 = 11.6 + 7.4 = 19 \text{ V}$. Cela signifie que V_2 a atteint V_{oc} autrement dit le module 2 ne peut plus débiter de courant et I_1 s'annule. (Fig 3-6c)

La branche ABC est considérée comme ouverte et il ne reste plus que l'association série des modules 3 et 4 dont la caractéristique est connue. C'est ce qui explique la forme de la caractéristiques I-V qui est partagée en deux portions de courbe l'une allant de a vers b et l'autre de b vers c. De même pour la courbe P-V nous remarquons deux





parties distinctes . l'une allant de a vers b et qui a pour optimum de puissance 29.4 W . l'autre allant de b vers c avec un optimum de 53.2W

C-Cas ou deux modules sont occultés. (Fig 3-11 et 3-12 courbes c)

Considérons la charge court-circuitée : (modules N°1 et 3 étant occultés)
 $V = V_1 + V_2 = V_3 + V_4 = 0$ or $V_1 = V_3 = -7.4 \text{ V} \implies V_2 = V_4 = 7.4 \text{ V}$
 En augmentant la charge le courant I diminue plus rapidement que lorsque V augmente jusqu'à la valeur 11.6 V .
 Comme V_2 et V_4 démarrent de 7.4 V et arrivent à 19 V, nous obtenons la forme d'une partie de la caractéristique d'un module avec un courant de court-circuit de 3.8 A .

D-Cas ou trois modules sont occultés. (Fig 3-11 et 3-12 courbes d)

Le raisonnement est analogue à celui du cas C sauf que nous avons un seul module générateur (N°4). Nous constatons que le courant de court circuit vaut la moitié de celui trouvé au cas C . C'est ce qui explique une chute considérable de puissance dont le maximum est atteint pour une valeur de : $P = 107.8 - 11.025 = 96.825 \text{ W}$

Tableau récapitulatif du bilan énergétique (à $T = 27^\circ\text{C}$)

	Fm(W)	pourcentage de la puissance par rapport au cas A	diminution en % par rapport au cas A
cas A	107.8	/	/
cas B	53.2	49.35	58.45
cas C	22.298	21.298	86.502
cas D	11.025	10.227	97.573

A cette étape de l'expérimentation, une conclusion partielle s'impose. En effet nous avons pu constater que lorsqu'un déséquilibre se présente dans une telle association, la puissance fournie est affaiblie et peut atteindre une diminution de 98% environ par rapport au cas A. L'avantage de l'association mixte réside dans le fait que nous pouvons avoir un courant et une tension assez forts. L'adaptation de l'association est réalisée pour $R = R_{\text{oc}} = 6.05 \text{ ohms}$.

3-8 Association de 24 modules.

3-8-1 Introduction.

Toute demande spécifique en puissance peut être satisfaite en associant un nombre convenable de modules en série et en parallèle. La standardisation pour une conception modulaire simplifie le processus de production et apporte une souplesse considérable aux systèmes de puissances photovoltaïques de plus la production automatique et le contrôle des processus de fabrication sont alors facilités. Les 24 modules existant au niveau du laboratoire sont associés comme l'indique la figure 3-13. Afin d'étudier l'évolution du déséquilibre dans cette association, nous occulterons une ou plusieurs branches et le tracé des courbes I-V et P-V permet de "quantifier" ce déséquilibre et de confirmer les résultats obtenus dans le cas des petites associations.

3-8-2 Caractéristiques I-V et P-V de l'association.

suivants.

A- Cas où aucune branche n'est occultée .

La caractéristique I-V obtenue a l'allure de celle d'un seul module avec un courant de court-circuit de 5.2 A (double de celui d'un seul module) et une tension de circuit-ouvert de 215 V (pratiquement 12 fois la tension de circuit-ouvert d'un seul module). L'optimum de puissance est obtenue pour $V_m = 160$ V et $I_m = 4.7$ A soit $P_m = 764$ W .

B-Cas où la branche I est occultée. (Fig 3-16 et 3-17 courbes 2)

L'occultation des modules de la branche I a pour conséquence de réduire le courant circulant dans ces modules, de ce fait le courant total diminue . Ceci explique la partie AA' de la caractéristique I-V . La partie A'A'' est celle de l'association de 12 modules, en série. Tout se passe comme si la branche I est ouverte . Ainsi la branche II impose son courant aux branches III et IV. La puissance maximale est $P_m = 420$ W , soit une variation de 45% par rapport au cas A.

C-Cas où les branches I et II sont occultées. (Fig 3-16 et 3-17 courbes 3).

Les branches I et II deviennent réceptrices et le courant total diminue beaucoup plus vite. La puissance optimale est $P_m = 184$ W soit une variation relative de 76% par rapport au cas A.

D- Cas où les branches I, II et III sont occultées. (Fig 3-16 et 3-17 courbes 4)

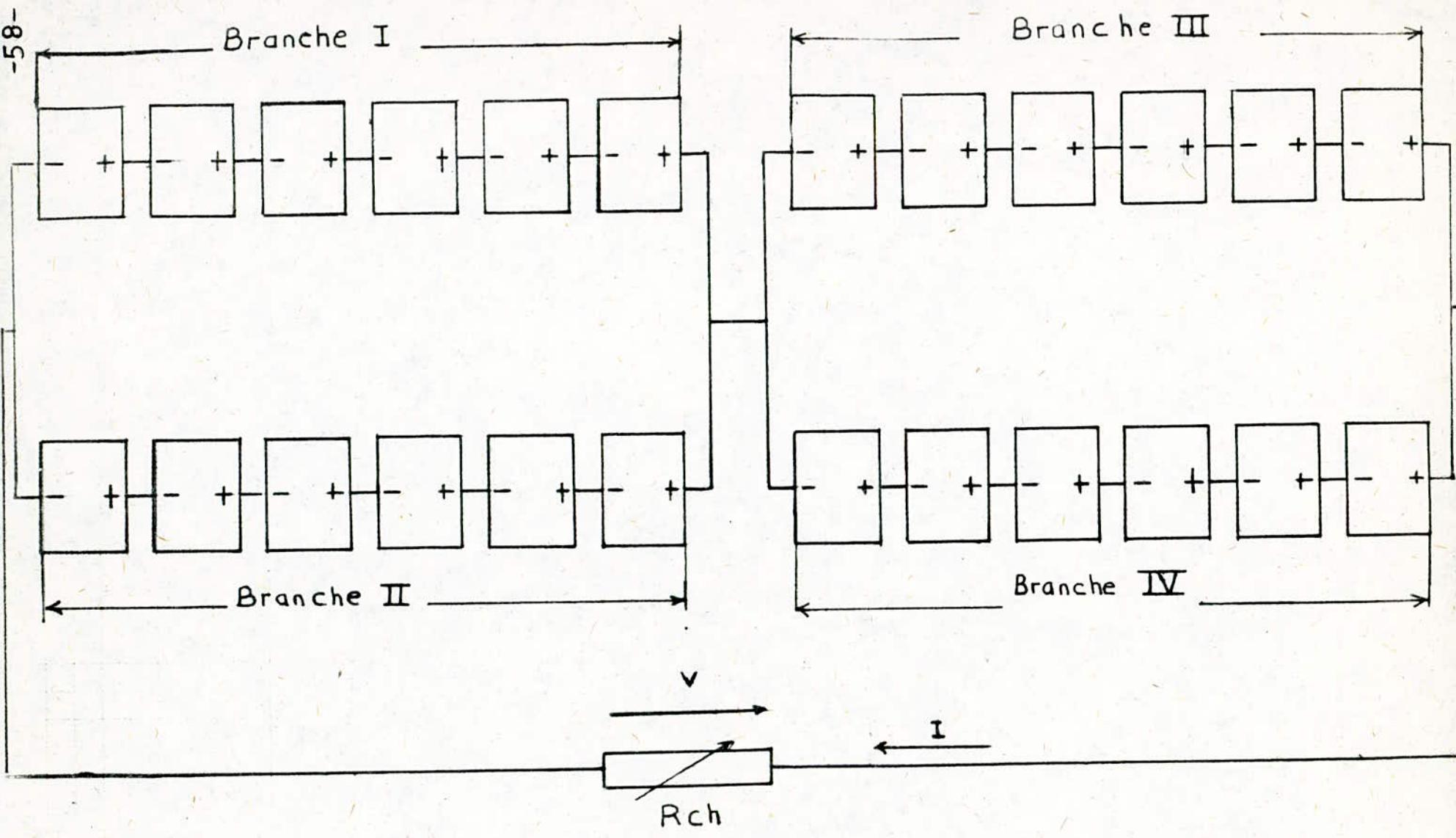
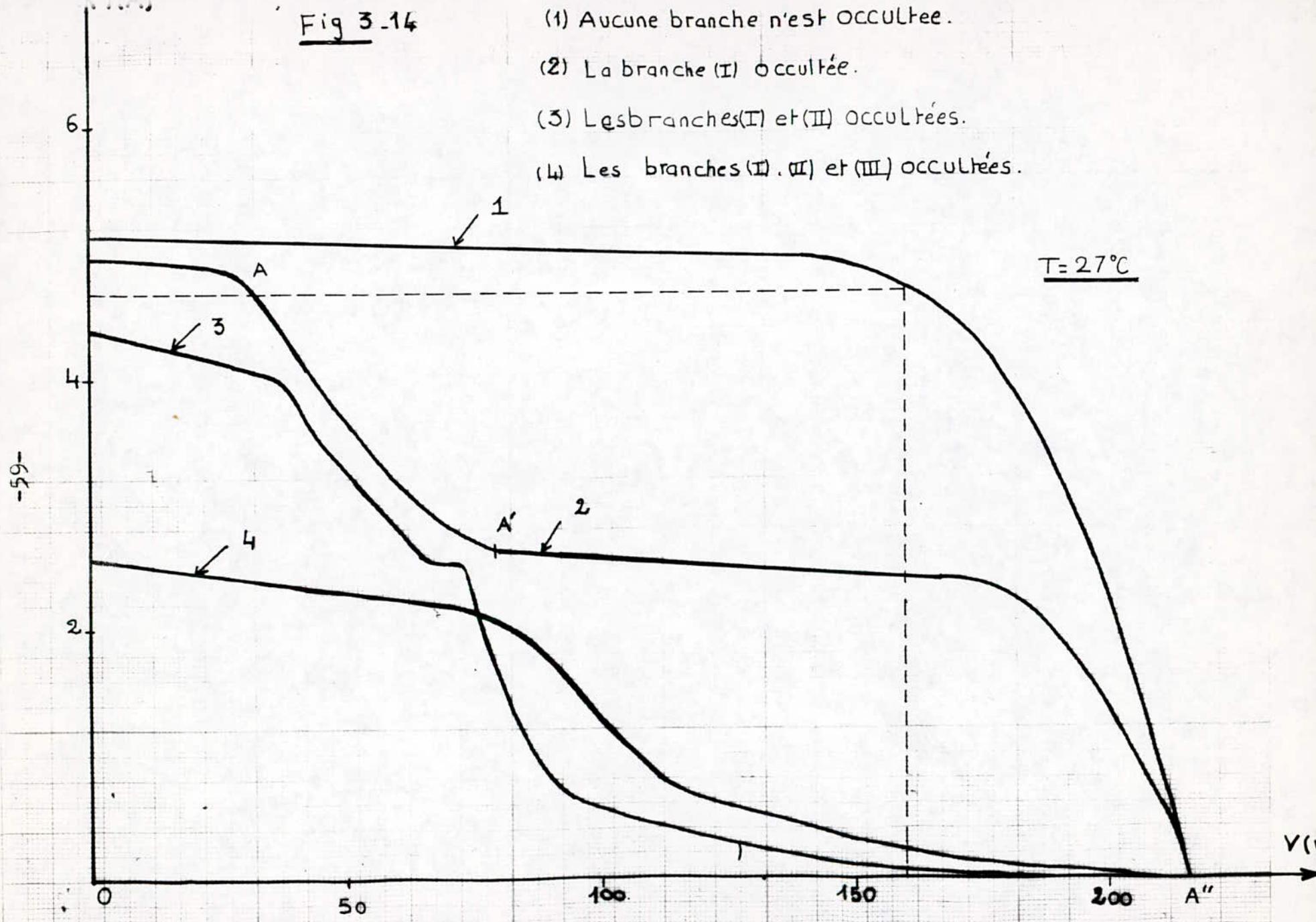


Fig:313 Générateur photovoltaïque de 1 KW

Fig 3-14

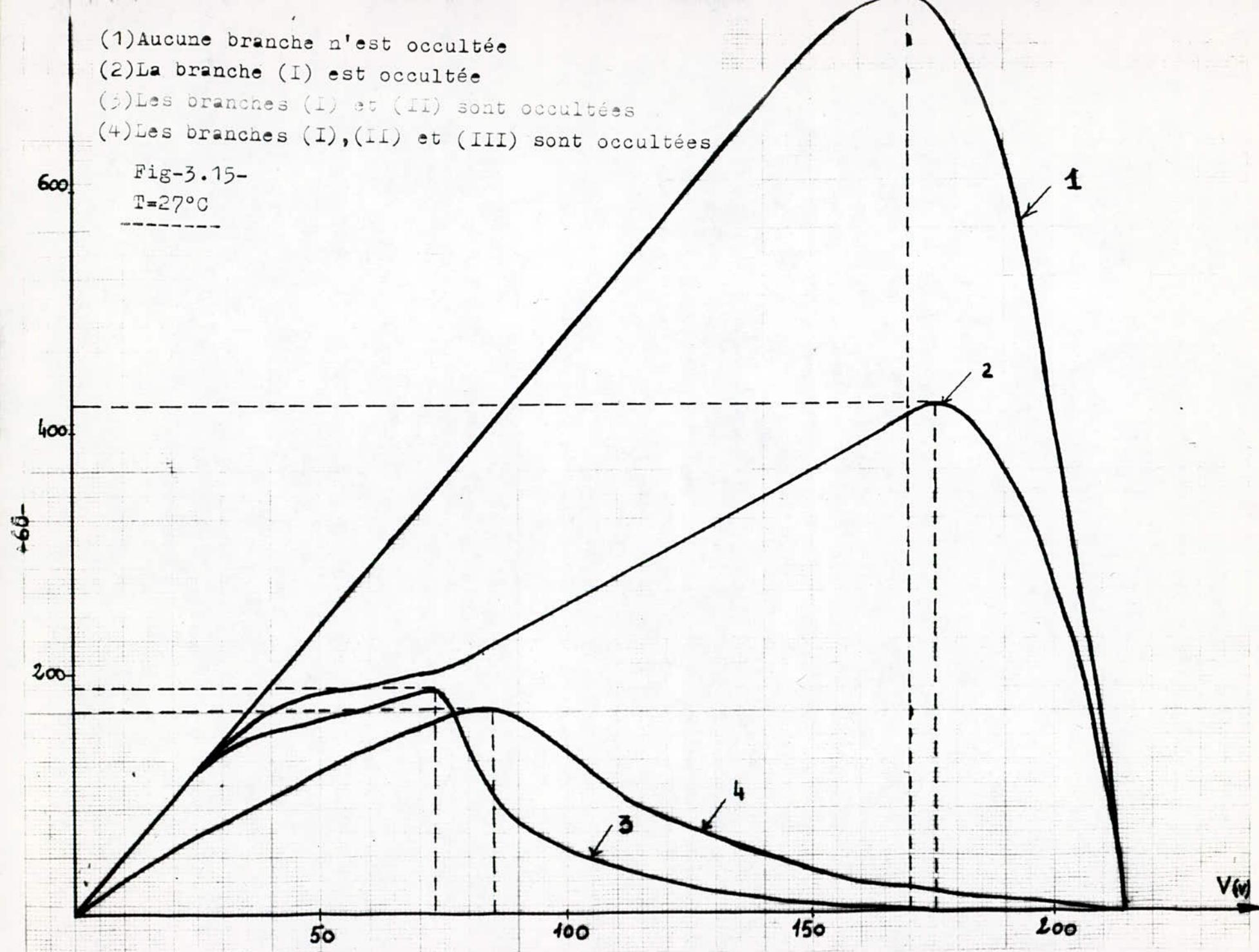
- (1) Aucune branche n'est occultée.
- (2) La branche (I) occultée.
- (3) Les branches (I) et (II) occultées.
- (4) Les branches (I), (II) et (III) occultées.



- (1) Aucune branche n'est occultée
- (2) La branche (I) est occultée
- (3) Les branches (I) et (II) sont occultées
- (4) Les branches (I), (II) et (III) sont occultées

Fig-3.15-

T=27°C



Les **modules** de la branche IV sont générateurs par contre ceux des branches I, II et III sont récepteurs. La puissance mise en jeux est $P_m = 168 \text{ W}$ soit une variation relative de 78% par rapport au cas A.

3-8-2 Conclusion du chapitre III

Il résulte de ces associations l'apparition de déséquilibre s'amplifiant lorsque l'on se rapproche des points de fonctionnement extrêmes qui sont le court-circuit et le circuit-ouvert. dans le cas du court-circuit, les modules deviennent récepteurs et supportent des tensions inverses importantes. La mise au point de diodes de protection semble être une solution pour réduire ces déséquilibres. L'expérimentation n'a pas confirmée cette hypothèse car les courbes I-V et P-V changent d'allure à chaque occultation. En effet les modules opérant en polarité inverse avec ou sans diodes de protection peuvent engendrer un passage de polarité à toute la branche dont laquelle ils interviennent en parallèle (hot-spot). le nombre de modules récepteurs peut augmenter, ainsi que la tension inverse subie par la branche en question, d'où le risque de détérioration des modules.

4-1: Introduction .

La simulation numérique et l'expérimentation effectuées sur un générateur photovoltaïque , nous permet de mettre en évidence et de procéder à des investigations sur le comportement d'un tel système en état de déséquilibre ou de panne . Toutefois pour l'utilisateur il est très difficile , sinon impossible, d'identifier et ainsi de localiser le module defectueux , vu leur grand nombre dans un générateur photovoltaïque (G.P.V) . Ainsi on se propose dans ce chapitre d'exposé , à partir de cette notion de contrôle , de concevoir et de réaliser un indicateur susceptible de donner des informations capitales sur le fonctionnement des modules séparément ou dans leur ensemble , qui sera dénomé "Indicateur de déséquilibre et de panne " (noté I.D.P) .

4-2: Principe de base.

Le principe de base de cette réalisation réside dans le fait que lorsqu'un module se trouve en déséquilibre , par rapport à un autre qui lui est associé en série , il devient récepteur. Dans ces conditions la tension à ses bornes change de polarité d'où l'idée d'utiliser un ampli-opérationnel monté en comparateur de tensions . La figure 4-1 reprend le synoptique du montage dans lequel on distingue 8 blocs :

- 1 - Ponts diviseurs de tensions .
- 2 - Programmation des entrées des ampli-opérationnels avec les sorties du bloc 1 .
- 3 - Comparateurs de tensions .
- 4 - Visualisation des états des modules (LED rouges).
- 5 - Visualisation de l'état normal du G.P.V (LED verte).
- 6 - Horloge .
- 7 - Visualisation de l'état de déséquilibre du G.P.V (LED rouge)
- 8 - Indicateur sonore de l'état de déséquilibre du G.P.V (H-P).

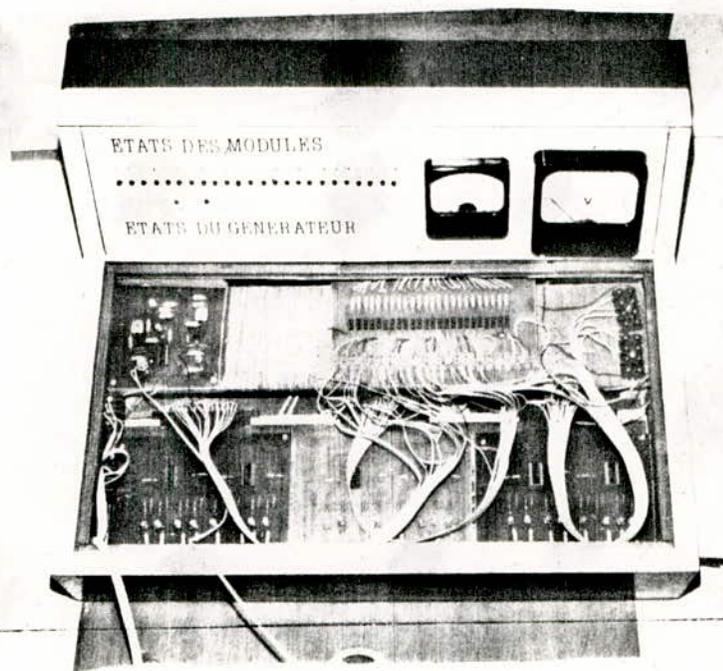
Nous pouvons remarquer que les entrées en provenance des modules , attaquent les ponts diviseurs de tensions dans le but est de respecter et de ne pas dépasser les tensions d'entrées maximales des comparateurs. Une programmation des entrées est nécessaire afin de pouvoir utiliser l'I.D.P quelque soit le type d'association des modules du G.P.V .

Une visualisation , constituée par des LED rouges , indique l'état de chaque module (générateur ou récepteur) .

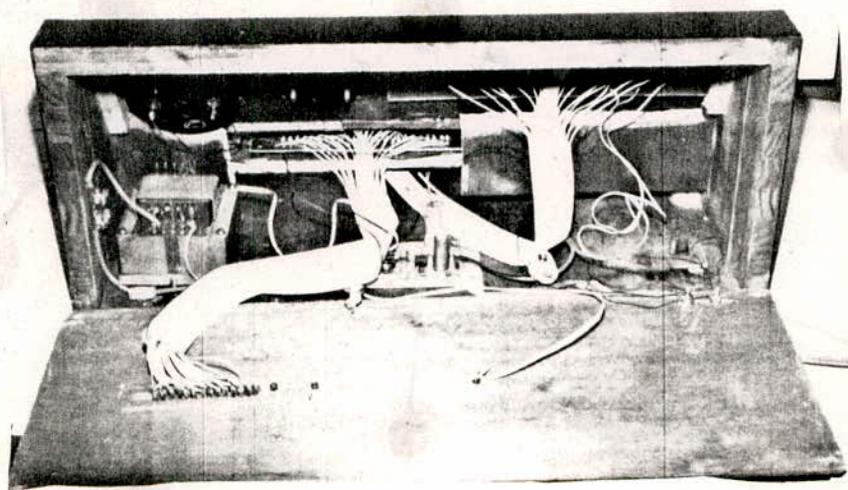
Une sortie commune issue du bloc 3 commande d'une part la LED verte qui indique l'état normal de fonctionnement (bloc 5) et d'autre part l'horloge. L'entrée de cette dernière présente deux états logiques :

- * "1" : état de déséquilibre .
- * "2" : état de fonctionnement normal :

selon le cas l'horloge fonctionne ou pas. Enfin , après le bloc 6 , le train d'impulsions ou le "0" logique résultant de celui-ci , commande le clignotement d'une LED rouge et l'indicateur sonore . Ces derniers



Vue d'interieur du dessus de l'I.D.P .



Vue d'arriere de l'I.D.P .

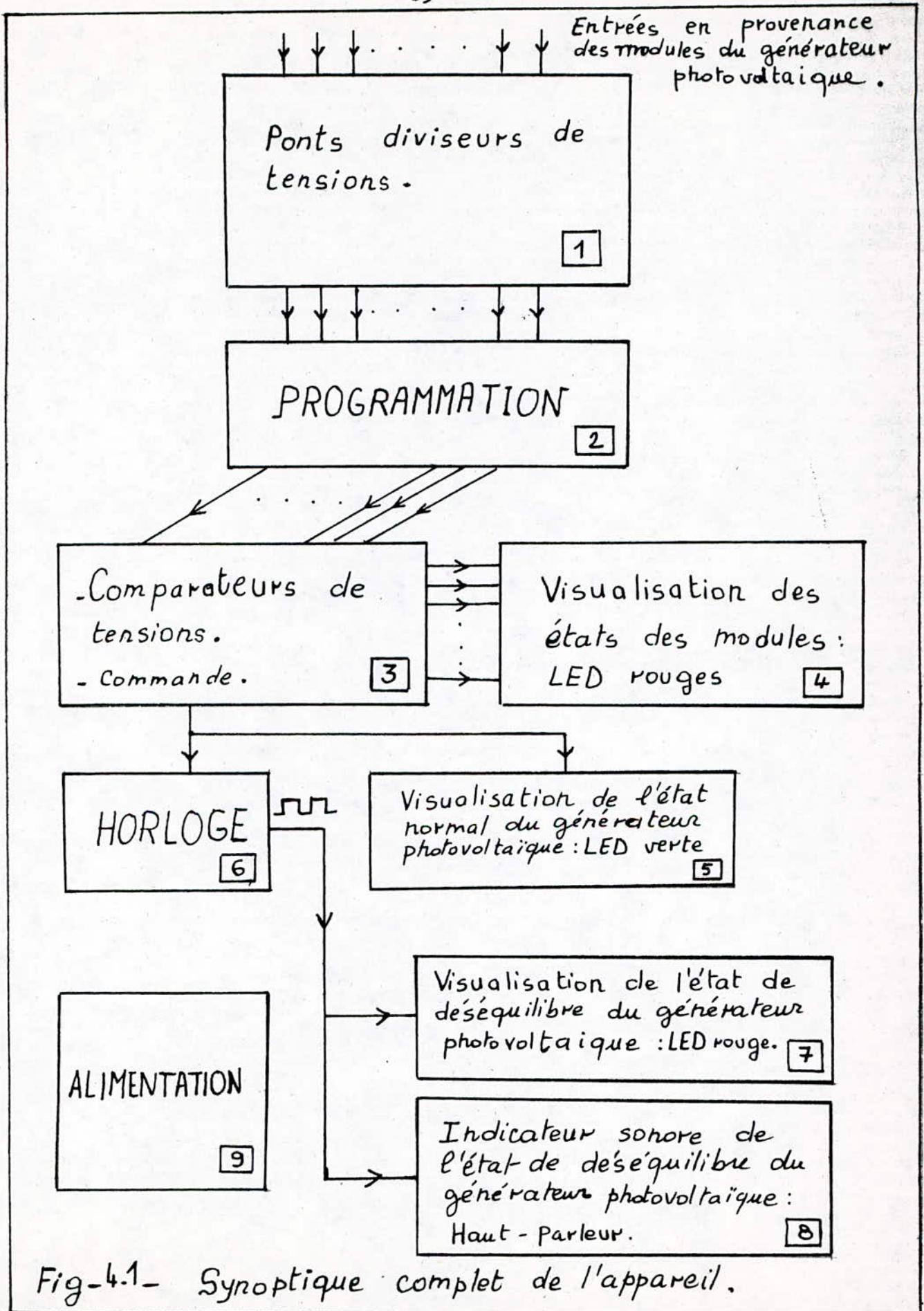


Fig-4.1- Synoptique complet de l'appareil.

mettent en évidence ,encore une fois ,l'état de déséquilibre du G.P.V.

4-3: Fonctionnement électronique et choix des composants:

On distingue 24 ponts diviseurs de tensions ,constitué chacun de 2 résistances R1 et R2 disposées en série (fig 4-2) . Le rapport de division a été calculé en fonction de la tension d'entrée maximale fournie par le G.P.V et la tension d'entrée maximale des ampli-opérationnels.

On supposant que la tension que veut avoir l'utilisateur du G.P.V ne dépasse pas 220 V , nous pouvons alors calculer R1 et R2 de façon à avoir à l'entrée des ampli-opérationnels une tension inférieure ou égale à 12 V.

Le rapport de tension r a pour équation :

$$r = R2/(R1+R2) \text{ -----} \rightarrow \text{ avec } R1=1 \text{ Mohms et } R2=56 \text{ Kohms} \text{ ===} \\ r = 0.053$$

Donc si $V_e = 220 \text{ V} \text{ ===} \Rightarrow V_p = 220 \times 0.053 = 11.6 \text{ V} < 12 \text{ V}$.

(V_p étant la tension divisée).

4-3-2: Comparateurs de tensions:

Le nombre de comparateurs de tensions doit être identique au nombre des modules du G.P.V .

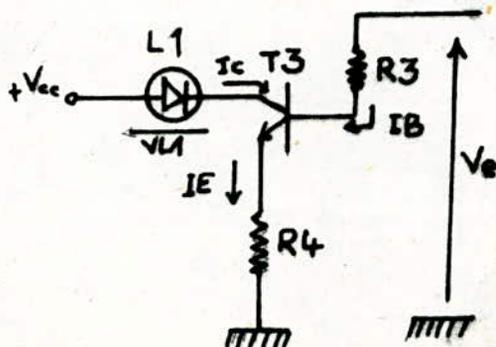
Il faut alors utiliser 6 circuits intégrés ,comportant chacun quatre ampli-opérationnels type LM 224 N (fig 4-4) .

Nous pouvons remarquer que lorsque $U1 > U2$,en sortie nous avons un "0" logique (0 volt) . Par contre dans le cas contraire , la sortie présente un "1" logique ($V_{sat+} = 11 \text{ volt}$) .

4-3-3: Visualisation des états des modules solaires.

Cette visualisation est assurée par une série de 24 LED rouges dont chacune est commandée par la sortie de l'ampli-opérationnel qui lui correspond . La commande est réalisée à l'aide d'un transistor T1 travaillant en commutation type 2N 2222 A.

* Calcul des éléments :



Si $V_e = V_{sat+} = 11 \text{ V} \text{ ===} \Rightarrow T3$ est conducteur d'où on peut écrire :

$$V_{sat+} = R3.IB + V_{BEsat} + R4.IE \quad (I)$$

$$+V_{cc} = V_{L1} + V_{CEsat} + R4.IE \quad (II)$$

$$I_C = I_E = \beta . I_B = 30 \text{ mA} ; V_{CEsat} = 1 \text{ V} \\ V_{BEsat} = 0.6 \text{ V} ; 75 < \beta < 150$$

$$(II) \text{ ===} \Rightarrow R4 = (V_{CC} - V_{L1} - V_{CEsat}) / I_E$$

$$R4 = (12 - 1.5 - 1) / 0.03$$

$$R4 = 316.6 \text{ ohms} .$$

$$(I) \text{ ===} \Rightarrow R3 = (V_{sat+} - V_{BEsat} - R4.IE) . \beta / I_E$$

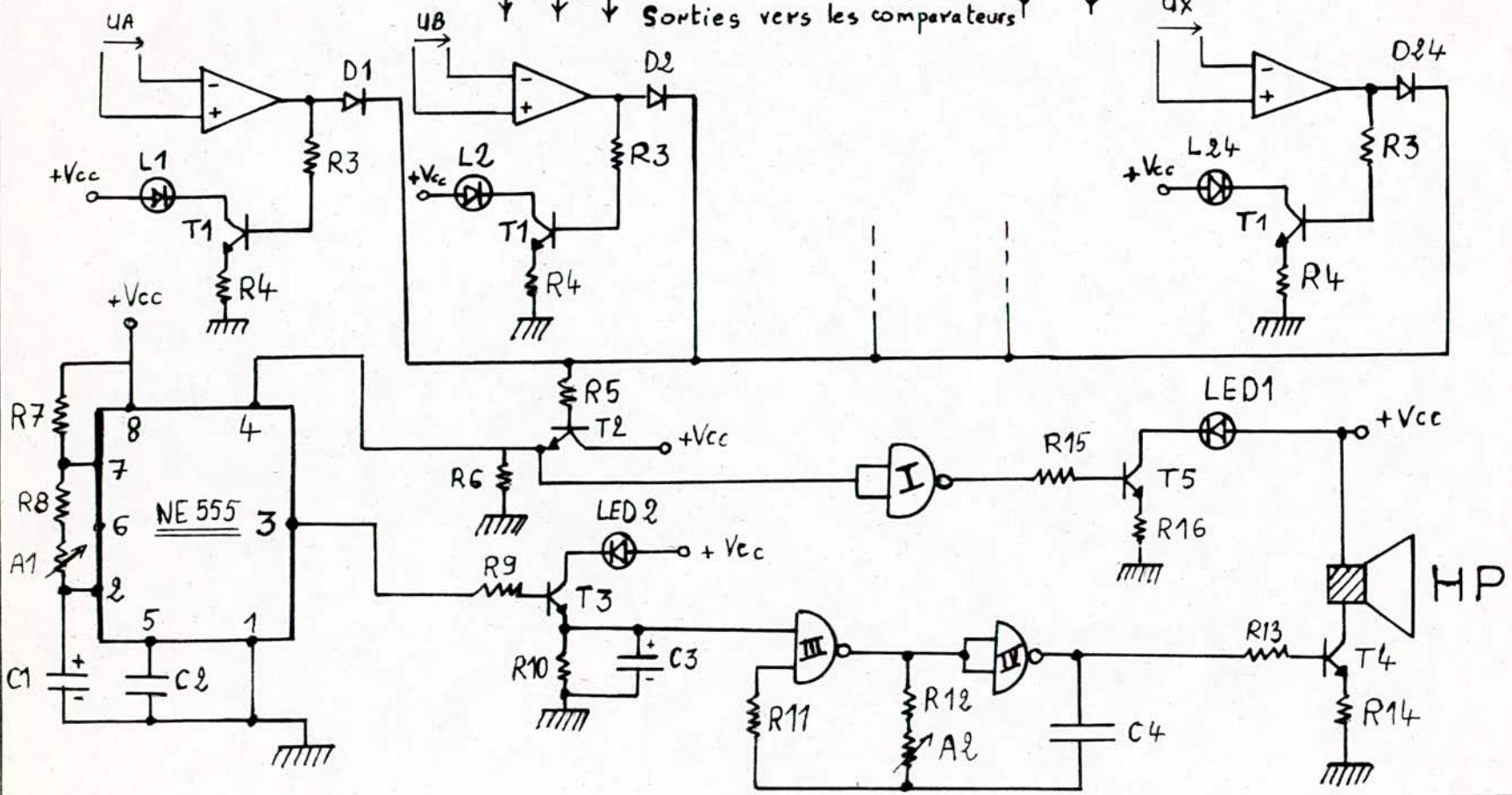
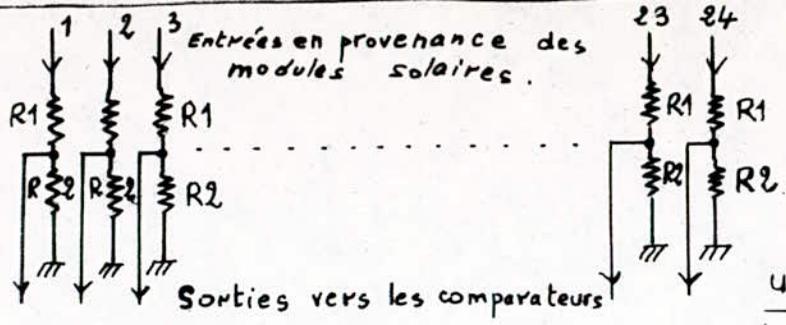
$$R3 = (11 - 0.6 - 316.6 \times 0.03) \times 75 / 0.03$$

$$R3 = 2255 \text{ ohms} = 2.25 \text{ Kohms}$$

- Voir liste des composants utilisés .

$$* U_A = (U_{1A} - U_{2A}) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$* U_X = (U_{1X} - U_{2X}) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



- Schéma de principe général de l'I.D.P

Fig 4-2

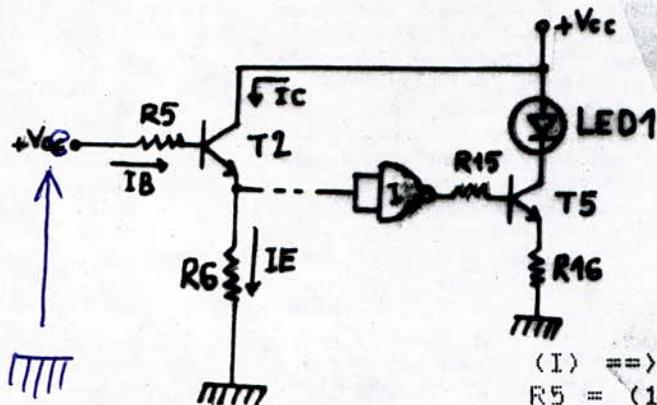
-05-

4-3-4: Visualisation de l'état normal du G.P.V .

Les sorties des 24 ampli-opérationnels sont mises en commun grâce aux diodes de commutation D1-D24 , cela nous permet de commander d'une part la LED verte et d'autre part l'horloge.

La commande est assurée par le transistor T2 utilisé en commutation.

* Calcul des éléments :



Si $V_e = V_{sat+} = 11 \text{ v} \Rightarrow$ T2 est conducteur , d'où on peut écrire:
 $V_{sat+} = R5.IB + R6.IE + V_{BEsat} \quad (I)$
 $+V_{cc} = V_{CE} + R6.IE \quad (II)$

$V_{CE} = 4 \text{ V} ; V_{BEsat} = 0.6 \text{ V}$
 $I_C = I_E = B.IB = 24 \text{ mA}$
 $70 < B < 100$

$(II) \Rightarrow R6 = (V_{cc} - V_{CE}) / I_E$
 $R6 = (12 - 4) / 0.024 = 333.33 \text{ ohms}$

$(I) \Rightarrow R5 = (V_{SAT+} - R6.IE - V_{BESAT}) \times B / I_E$
 $R5 = (11 - 333.33 \times 0.024 - 0.6) . 100 / 0.024$
 $R5 = 10000.33 \text{ ohms} = 10 \text{ Kohms}$

La porte NAND , issue du circuit intégré le MC 14011 , a été utilisée en inverseuse. Elle inverse l'état de l'émetteur de T2 .Donc selon le cas la sortie présente l'état logique "1" ou bien l'état logique "0". Cela permet de bloquer ou de saturer le transistor T5 qui commande l'allumage de la LED verte .

La tension de polarisation de cette dernière est de 2 V .Ce qui nous a permis de choisir les valeurs respectives de R15 et R16 égales à 10 Kohms et 330 ohms.

4-3-5: Horloge.

Cette horloge est constituée à partir d'un circuit intégré type NE 555 .La figure 4-5 représente :

- a- Le schéma de brochage .
- b- Le schéma de principe .
- c- La forme des signaux .

Dans la présente application , IC3 est monté en multivibrateur et les créneaux disponibles à sa sortie ont une période dépendant des valeurs des composants périphériques R7,R8,A1,C1.

Nous pouvons , en jouant sur A1 , faire varier la période des impulsions. Cette variation a été calculée par l'équation et les deux périodes extrêmes suivantes :

$$T = 0.7 \times (R7 + 2 \times (R8 + A1)) \times C1$$

$$T_{min} = 0.05 \text{ s}$$

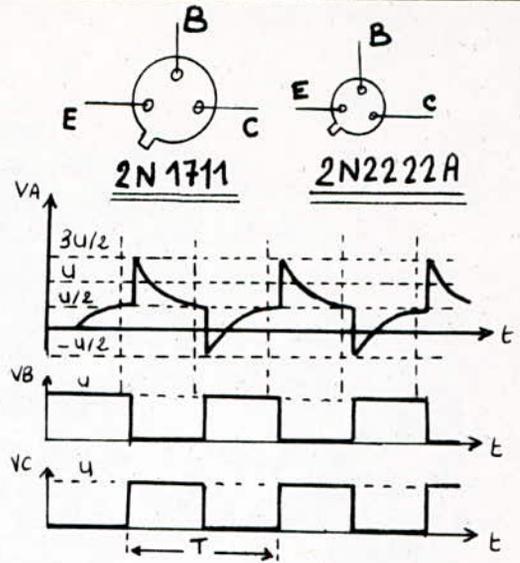
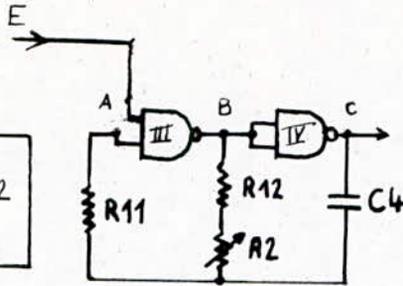
$$T_{max} = 1.5 \text{ s}$$

D'où le calcul des éléments R7,R8,A1 et C1 .Voir liste des composants.

Notons que l'entrée "RAZ" doit rester soumise à un état bas tant qu'il n'ya pas de déséquilibre sur aucun des modules. L'état logique "1" , sur cette entrée , provoque la mise en marche de l'horloge.

Fig-4.3-

$T \approx 2,2 RC$
avec $R = R_{12} + A_2$
 $R_{11} \# 10 \cdot R$

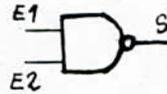
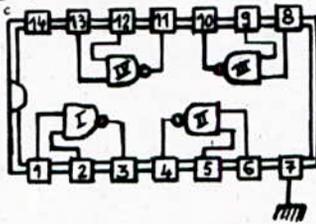


- Astable constitué par 2 portes NAND, III et IV.

Il ne fonctionne que si l'entrée E est soumise à un état logique "1". Sinon, la sortie présente un état logique "0".

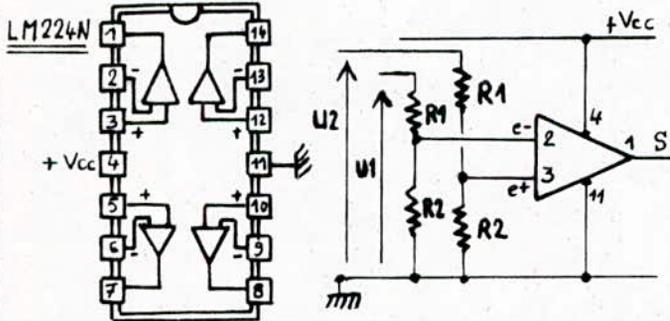
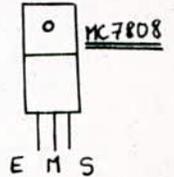
MC 14011

- (4 portes NAND à 2 entrées).



E1	E2	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- Régulateur de tension 8V



- Ampli-Opérationnel monté en Comparateur.

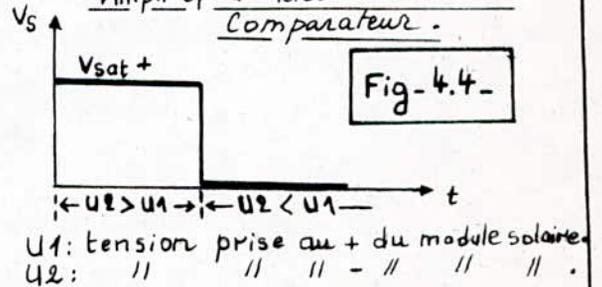


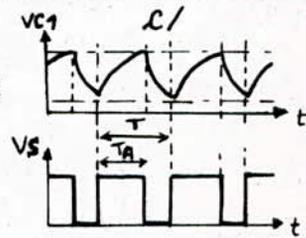
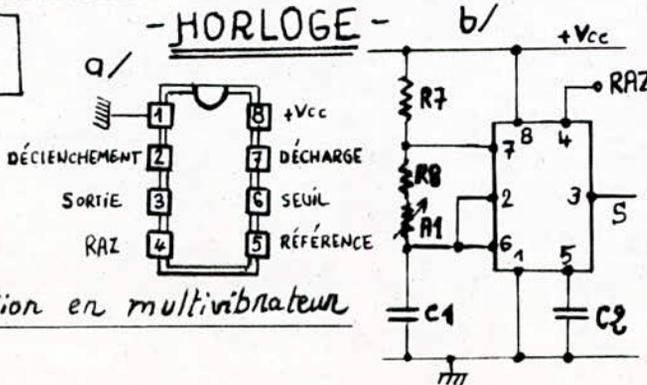
Fig-4.4-

Fig-4.5-

- HORLOGE -

NE 555

Utilisation en multivibrateur



$$T = 0,7 \cdot C_1 \cdot (R_7 + 2 \cdot (R_8 + A_1))$$

$$\frac{T_A}{T} = \frac{R_7 + R_8 + A_1}{R_7 + 2 \cdot (R_8 + A_1)}$$

4-3-6: Visualisation de l'état de déséquilibre du G.P.V .

Cette visualisation est assurée par le clignotement de la LED rouge (LED N°2) ,en fonction de la période des créneaux issus de l'horloge. La commande est faite par un transistor T3 utilisé aussi en commutation .Le calcul des valeurs de R9 et R10 a été fait de la même manière que pour celles de la LED N°1.

4-3-7: Indicateur sonore de l'état de déséquilibre du générateur .

Après l'indication visuelle ,nous avons jugé utile d'ajouter en parallèle ,un indicateur sonore de déséquilibre du G.P.V .Pour cela, il a fallut donc utiliser un astable plus une commande d'un haut - parleur .

La figure 4-3 illustre nettement le fonctionnement de cet indicateur. Toutefois ,le choix des éléments R11 , R12 , A2 et C4 a été fait en fonction de la bande de fréquence audible que pourrait générer l'astable au niveau du haut-parleur .

Soient alors :

$$T \# 2.2 \times (R12 + A2) \times C4 \quad (\text{Période de l'astable}).$$
$$R11 \# 10 \times (R12 + A2)$$

avec

$$T_{\max} = 5 \text{ ms} ; T_{\min} = 0.1 \text{ ms}$$

De ce fait ,nous pouvons écrire ,en posant $C4 = 22 \text{ nF}$:

$$T_{\min} \# 2.2 \times (R12 + 0) \times C4 \implies R12 = (T_{\min}/2.2 \times C4)$$
$$R12 = (0.0001/2.2 \times 22 \times 10^{-9})$$
$$R12 = 2.17 \text{ Kohms} .$$

$$T_{\max} \# 2.2 \times (R12 + A2_{\max}) \times C4 \implies$$
$$A2_{\max} = (T_{\max}/2.2 \times C4) - R12 = (0.005/2.2 \times 22 \times 10^{-9}) - 2.17 \text{E3}$$
$$A2_{\max} = 101.13 \text{ Kohms} .$$

Les valeurs trouvées ci-dessus nous conduisent à une bande de fréquence allant de 200 à 9.5 K Hz .

Ainsi en faisant varier A2 ,on change la valeur de la fréquence selon le désir de l'utilisateur .

Le transistor de commande T4 doit satisfaire à nos exigences en matière de puissance. Le 2N 1711 est nettement adapté pour ce genre d'application ,car il présente une puissance dissipative maximale de de l'ordre de 800 mW .

Avec les valeurs respectives 1.2 Kohms et 100 ohms des résistances R13 et R14 ,on aboutit à un courant de collecteur égale à 100 mA. Comme la résistance du haut-parleur est égale à 25 ohms ,nous pouvons alors calculer sa puissance maximale : $P_m = R.I = 250 \text{ mW}$.

L'effet que produit cet indicateur est un son interrompu d'une façon régulière. Ceci résulte du fait que la commande ,au niveau de l'entrée E1 de la porte NAND N° III de l'astable (fig 4-2) , est issue de l'émetteur de T3 .Le fonctionnement de ce dernier étant lié à la sortie de l'horloge .

L'indicateur de déséquilibre et de panne du G.P.V doit pouvoir être utilisé aussi bien en laboratoire que sur un site isolé . Aussi on prévoit sur l'I.D.P une triple alimentation :

- a- Alimentation pile-secteur .
- b- Alimentation par un module solaire .

a- Alimentation pile-secteur .

La figure 4-6 illustre le schéma de principe de cette alimentation . La source d'énergie sera fournie par le secteur 220 V . A cet effet , un transformateur abaisse la tension primaire à une valeur de 18 V au secondaire . Cette tension alternative est redressée par un pont de diodes D1, D2, D3 et D4 puis filtrée par la capacité C1 . Le régulateur IC1 délivre , au niveau de sa sortie , une tension continue variable entre 8 V et 18 V , selon la valeur de l'ajustable relié a sa broche M. La capacité C2 assure un filtrage supplémentaire . D5 a été utilisée pour protéger IC1 dans le cas où la tension aux bornes de C2 serait supérieure à celle aux bornes de C1 . La différence est donc limitée à 0.6 V. Ce qui permet de protéger la structure interne de IC1.

Dans le cas où une coupure d'électricité se produit , une pile de 9 V est prévue qui ira alimenter l'appareil à travers la diode D7. Dans le cas contraire , cette dernière ne conduit pas , puisque la sortie du régulateur sera réglée à 12 V. R2 et R3 ont été utilisées comme diviseur de tension dont l'application est donnée par la suite (voir 4-5-2).

b-Alimentation par un module solaire.

Il est possible d'alimenter l'I.D.P à l'aide d'un module photovoltaïque. Pour cela, on a prévu deux entrées pour le plus et le masse et un régulateur 12 V .

4-3-9: Voltmètre-ampèremètre.

Nous avons inclus sur la face de visualition du boitier un voltmètre et un ampèremètre.

- Le voltmètre est connecté aux bornes respectives + et - du G.P.V .
- L'ampèremètre est placé entre la charge et le + du G.P.V . Il indique l'intensité de courant qui est delivrée par ce dernier.

4-4: Réalisation pratique .

4-4-1: Circuits imprimés.

Le nombre total de ces circuits s'éleve à 8 :

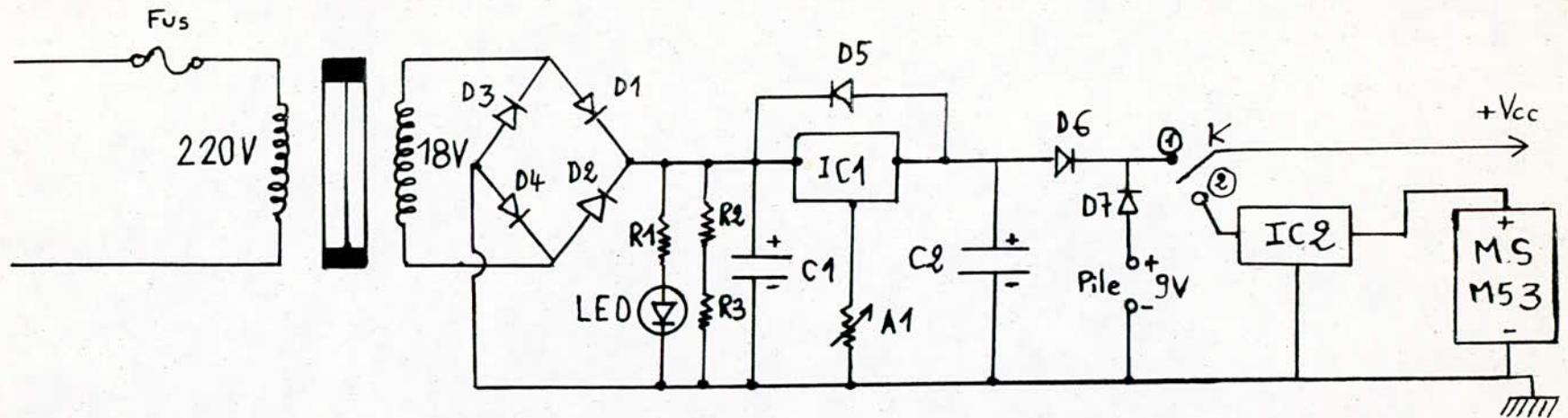


Fig 4.6 - Schéma de principe de l'alimentation de l'I.D.P

D1, D2, D3, D4: 1N 4007.

LED: Diode electro-luminescente Jaune.

C1: 1000 μ F / 40 V chimique.

C2: 470 μ F / 25 V chimique.

D5, D6, D7: 1N 4003

A1: Ajustable 2 K Ω .

IC1: Régulateur MC 7808

IC2: // // 7812

R1: 1K Ω

R2: 3,3K Ω R3: 1,6 K Ω

MS M53:

Module solaire M53

①: Position Pile-Secteur

②: Position module solaire.

... Schéma d'implantation des composants

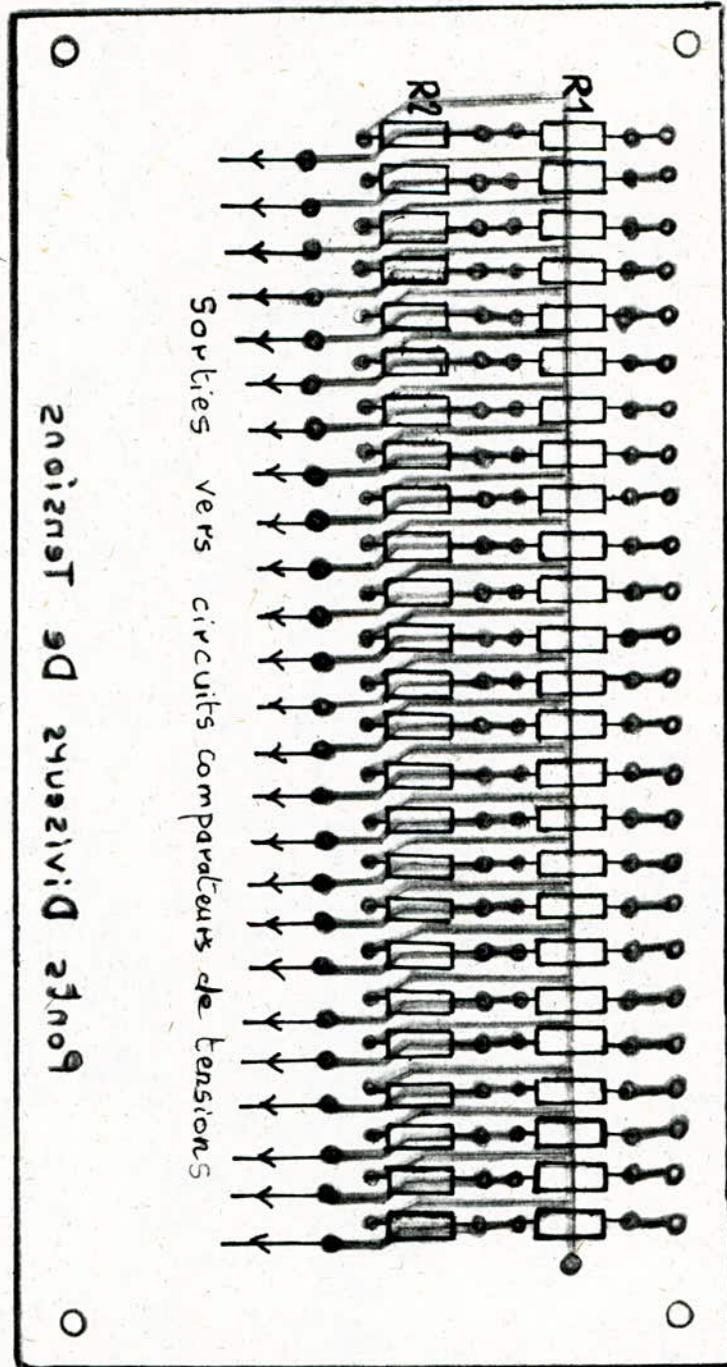


Fig-4.7- Ponts diviseurs de tensions

- Schéma du circuit imprimé -

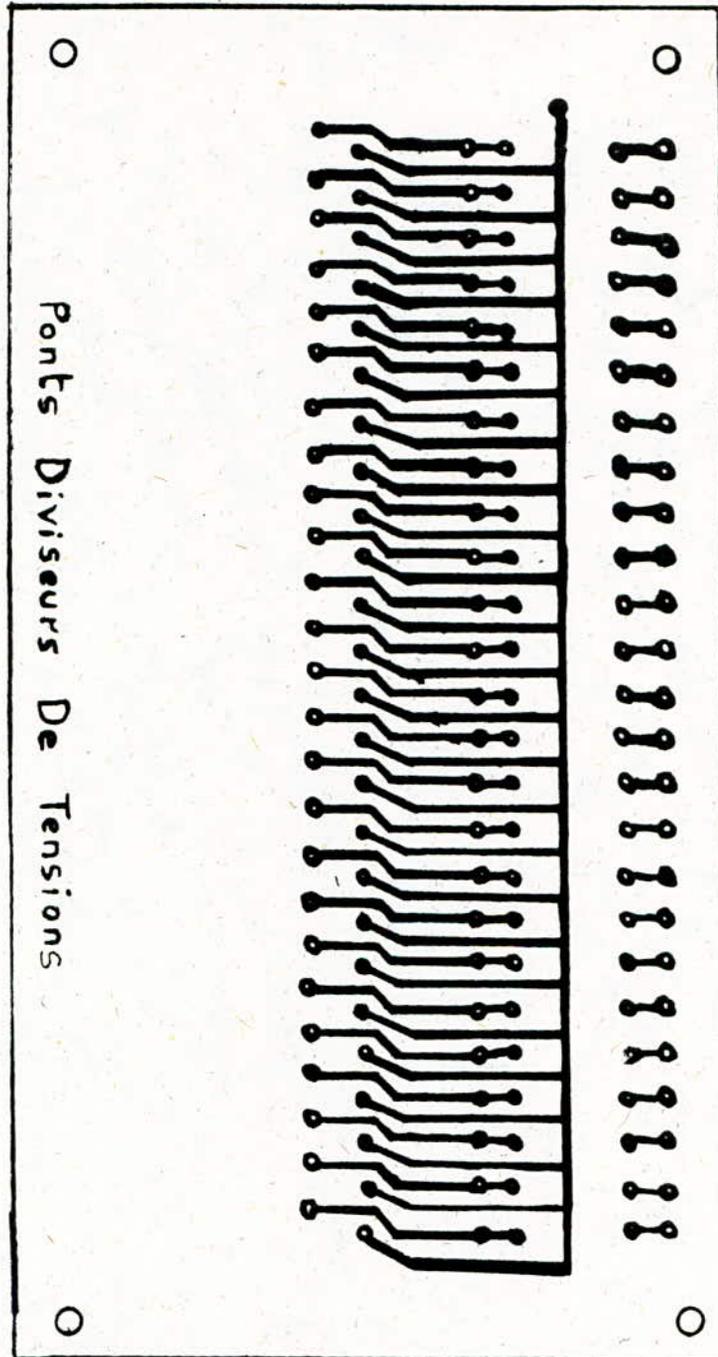


Fig-4.8- Ponts diviseurs de tensions

- Schémas d'implantation des composants

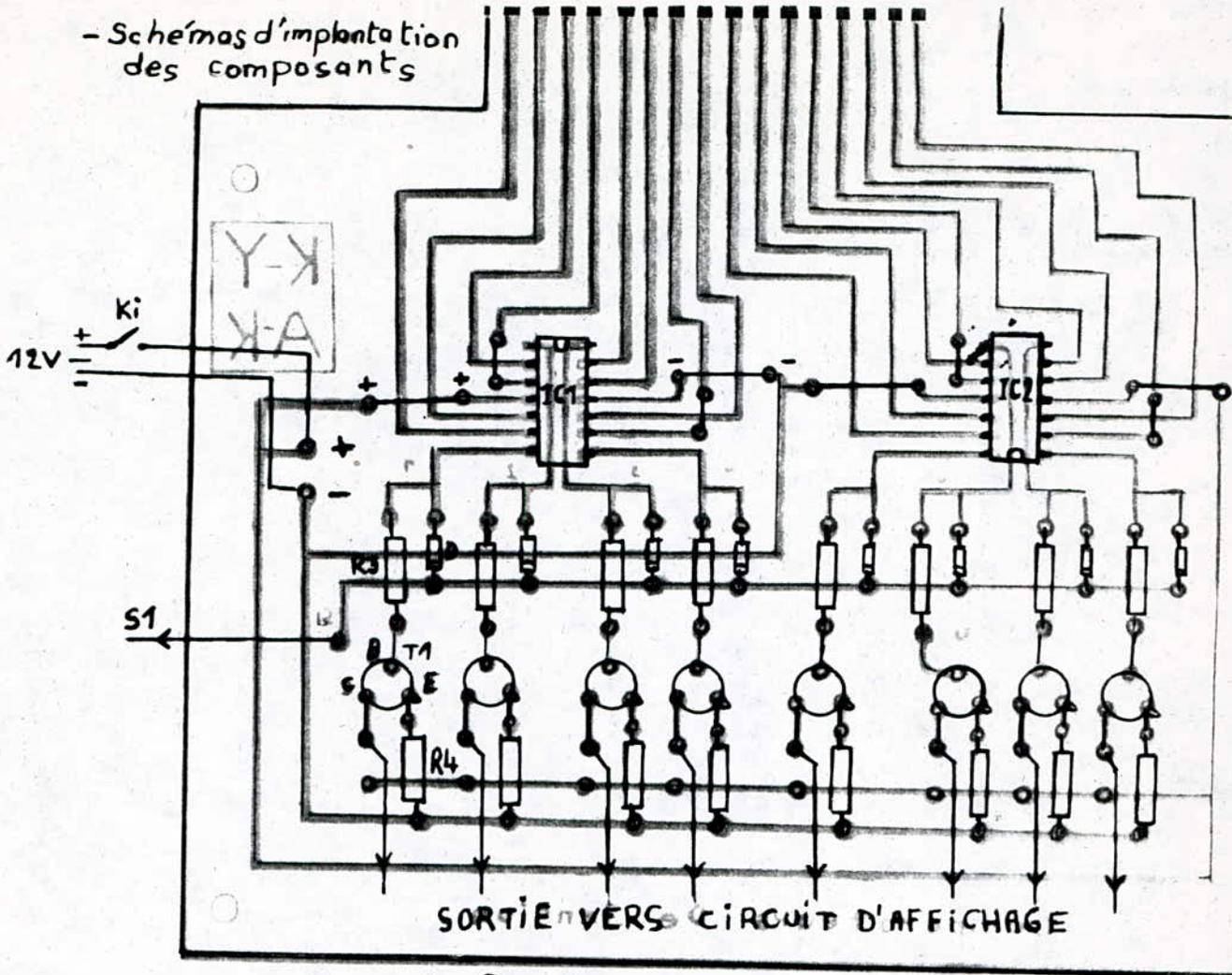


Fig - 4.9 - Comparateurs de tensions

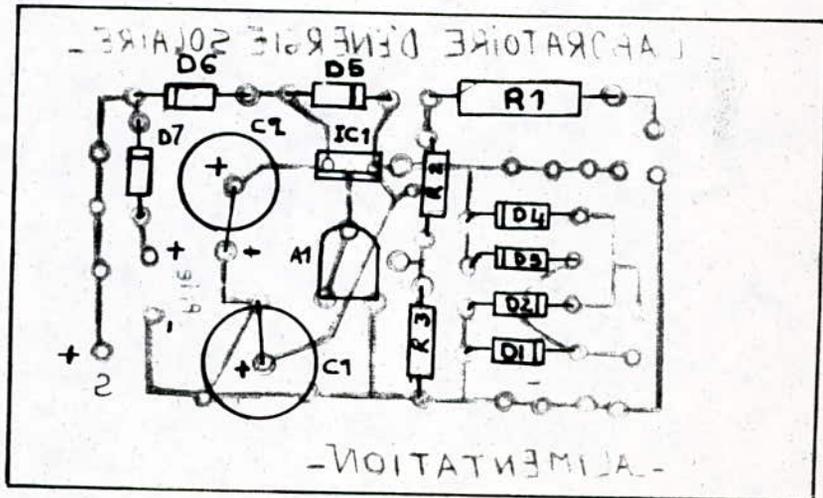
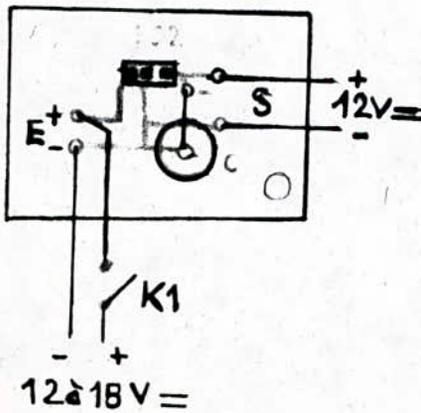


Fig - 4.10 - Alimentations a - Par module solaire b - Pile-secteur

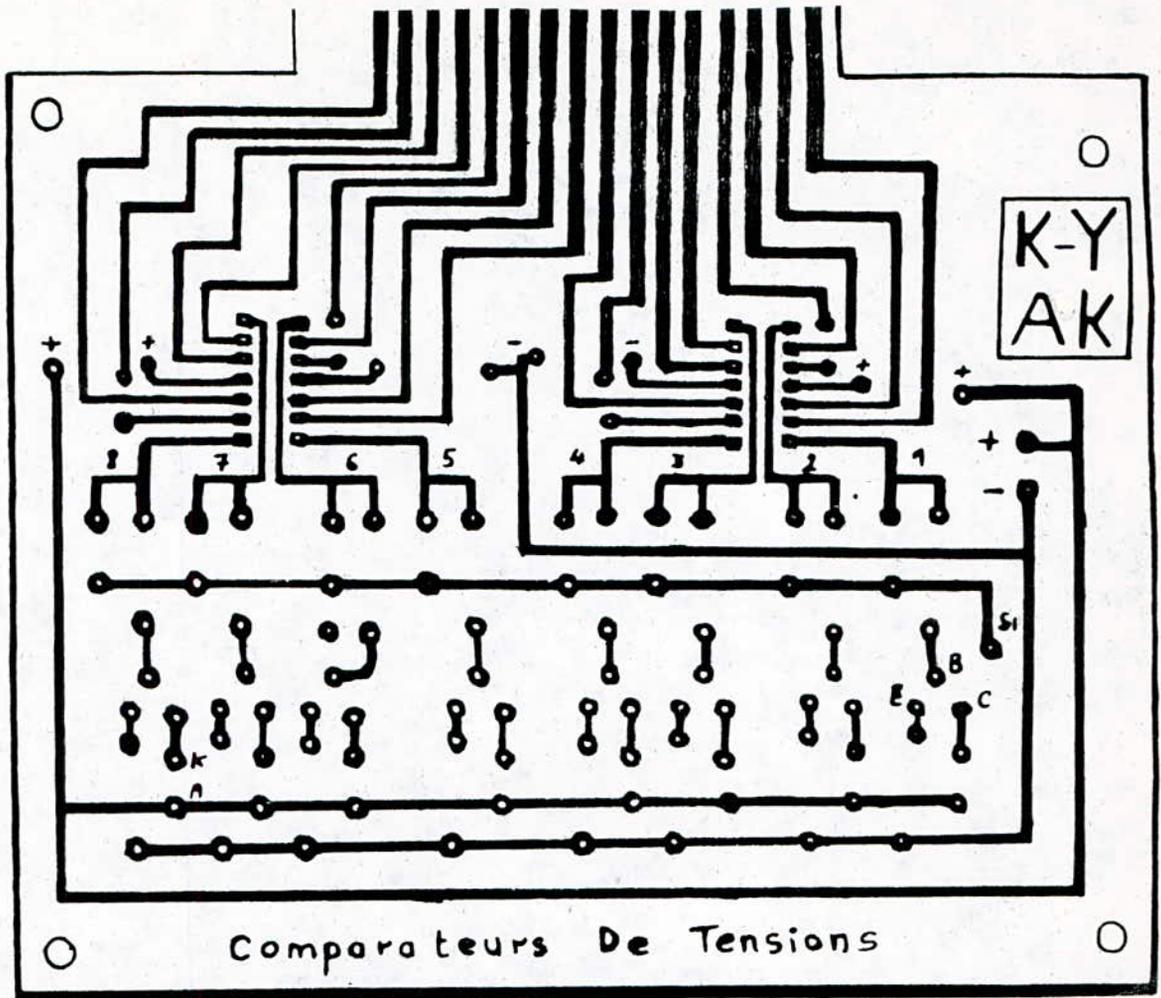


Fig - 4.11 -

- Schémas des circuits imprimés -

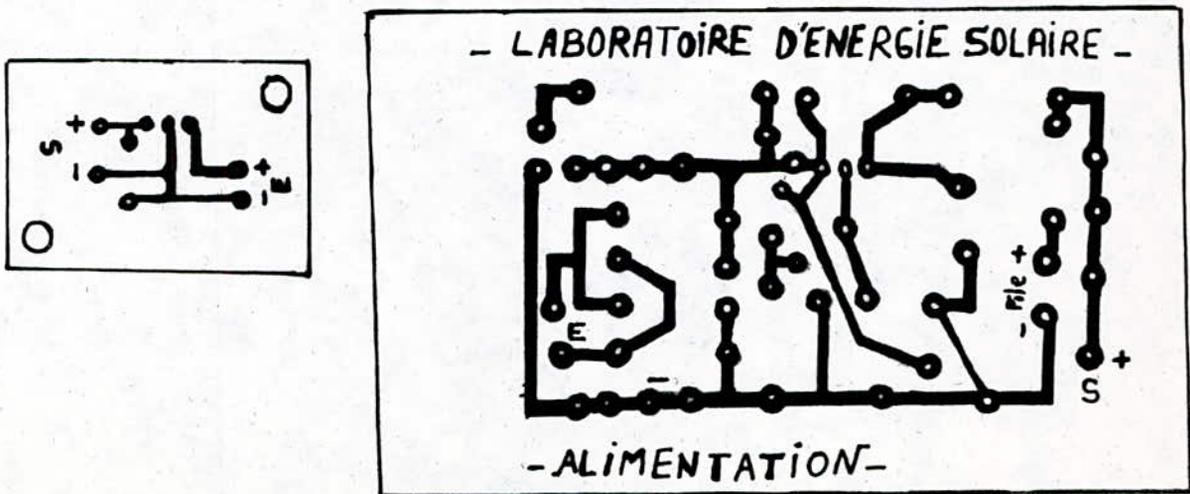


Fig - 4.12 -

-schémas d'implantation des composants

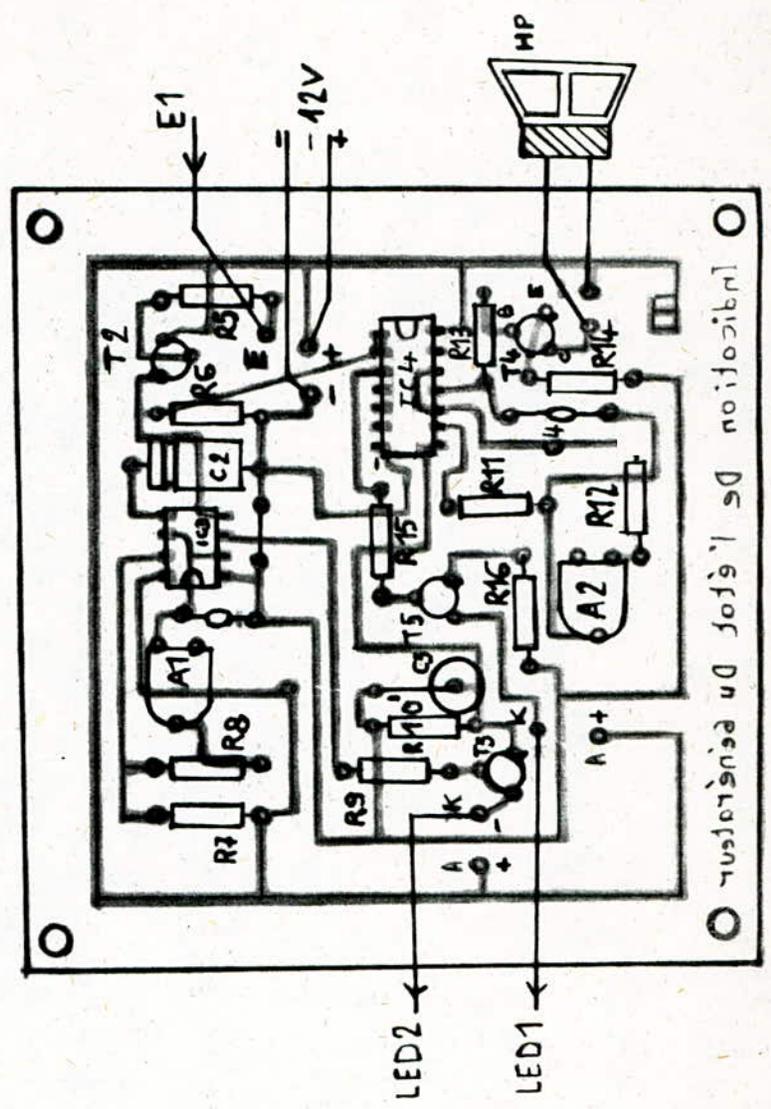
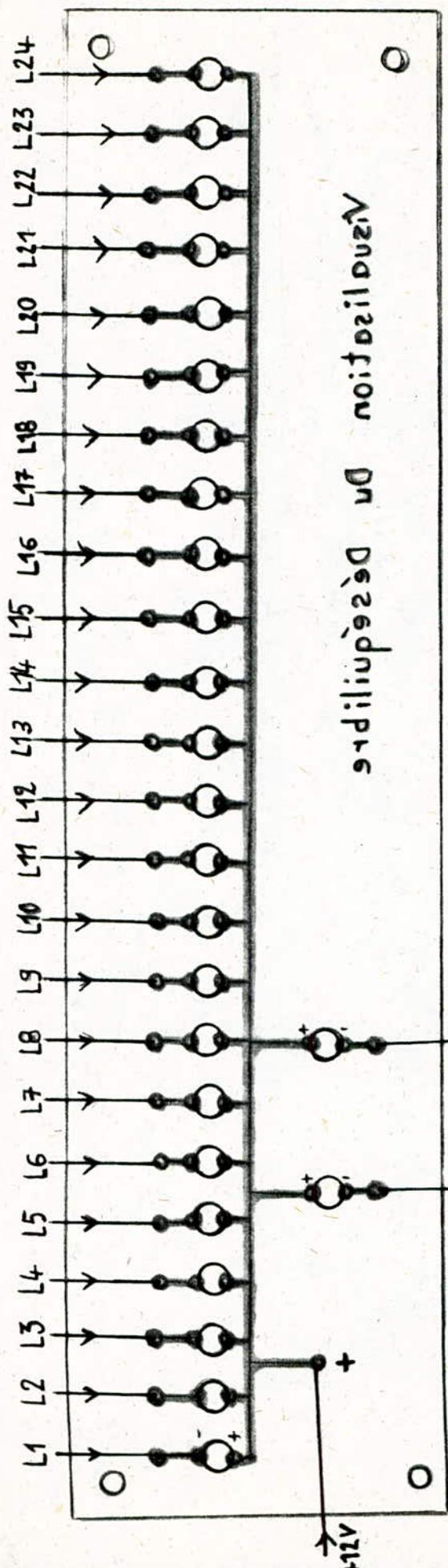
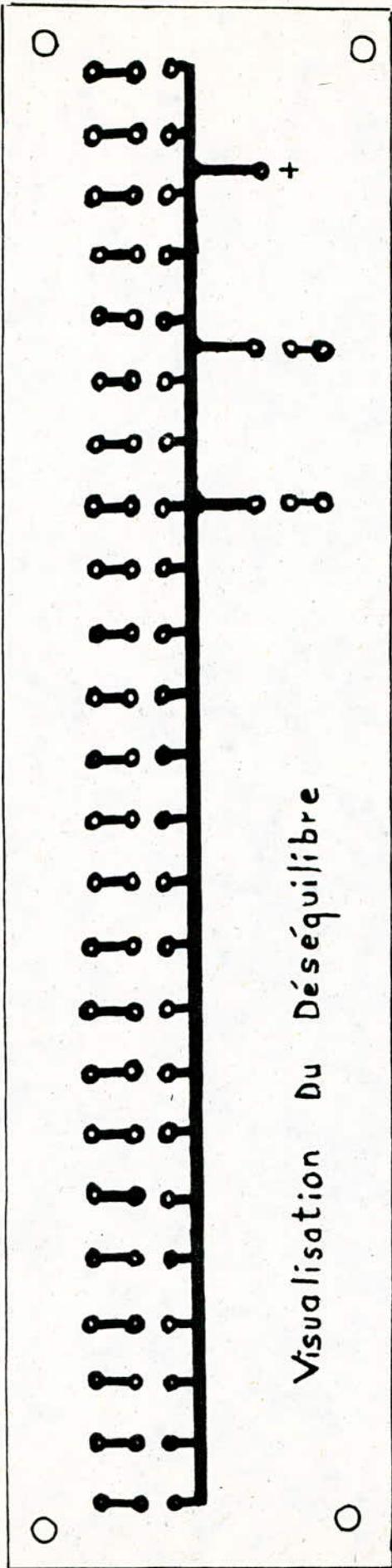


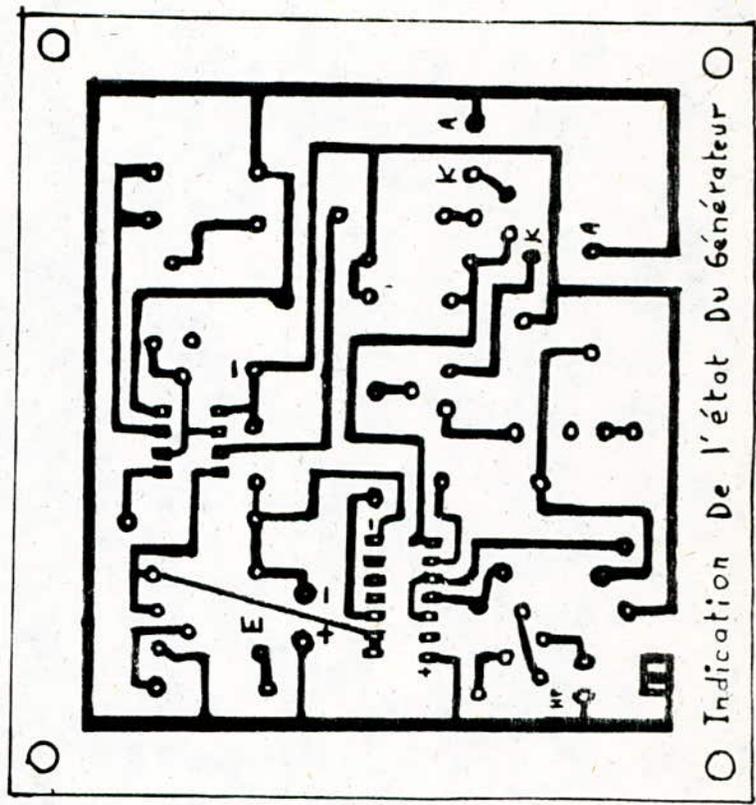
Fig-4.13 - Indication de l'état de déséquilibre du G.P.V

← Fig-4.14 - Visualisation du déséquilibre



← Fig - 4.15 -

↙ Fig - 4.16 -



← Fig-4.17 - Schémas des circuits imprimés

- Ponts diviseurs de tensions .
- Indicateur de l'état du G.P.V .
- Visualisation du déséquilibre du G.P.V .
- Compérateurs de tensions : (Repeté trois fois).
 - a-Canaux de 1 à 8 .
 - b-Canaux de 9 à 16 .
 - c-Canaux de 17 à 24 .
- Alimentation . •

Les fig 4-7 jusqu'à 4-17 illustrent le tracé des différents circuits imprimés ainsi que les schémas d'implantation des composants.

4-4-3: Cablage .

Le câblage des différents circuits imprimés a été réalisé à l'aide de fils en nappe .

* Désignation des quatre interrupteurs de face:

- Le premier a deux positions (pour le choix de l'alimentation):
 - a- Position pile-secteur .
 - b- Position module photovoltaïque .
- Les trois autres interrupteurs sont présents pour sélectionner ou mettre en service les compérateurs de tensions .

* Note : Chaque interrupteur est connecté entre le + de l'alimentation et le circuit imprimé qui lui correspond .
La masse est commune à tous les circuits .

La liaison G.P.V - I.D.F a été effectuée par un câble téléphonique multifils .

4-5: Réalisation de la programmation .

L'I.D.F est adapté à toute association de modules pour peu que l'on respecte deux conditions :

- a- Le G.P.V doit comporter au minimum deux modules en série .
- b- Le nombre de modules maximum doit être limité à 24 .

La programmation consiste à prévoir la possibilité de relier électriquement les entrées des ampli-opérationnels aux sorties des ponts diviseurs de tensions en fonction de l'association choisie . Cette opération s'effectue à l'intérieur de l'appareil .
La figure 4-19 précise une partie de l'intérieur de l'appareil où s'effectue la programmation . Les entrées des compérateurs sont représentées par les lettres alphabétiques allant de A vers X.
Les numéros de 1 à 25 représentent les connexions des dominos .

4-5-1: Mise en marche de l'I.D.F .

Au départ , on définit le schéma représentant l'association désirée suivant la figure 4-18 qui est générale et présente une matrice de m branches et de n modules , avec :

$$0 < n < 12$$

$$0 < m < 12$$

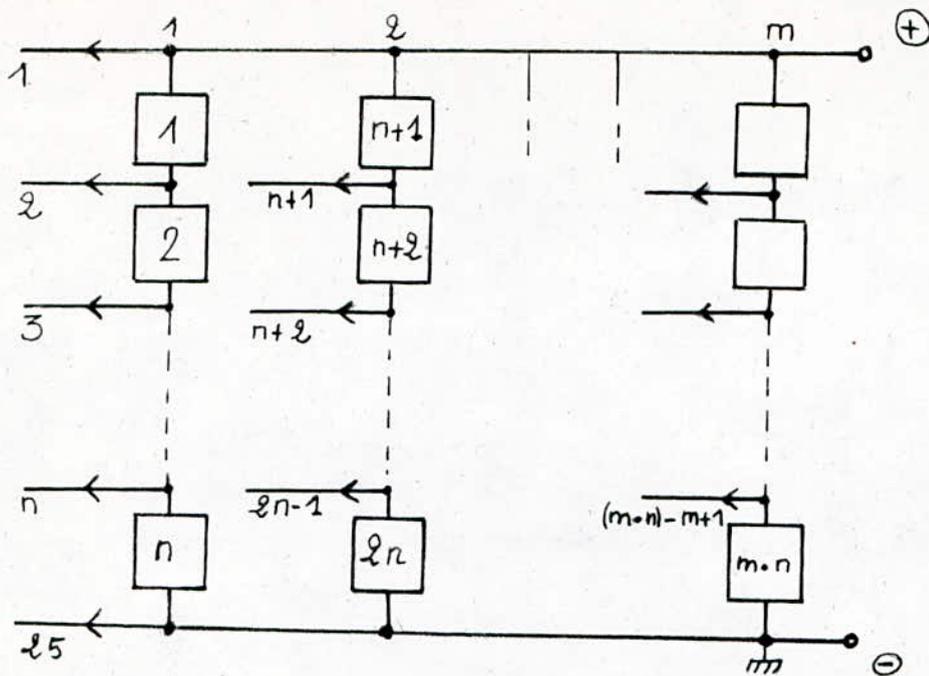


Fig-4.18-

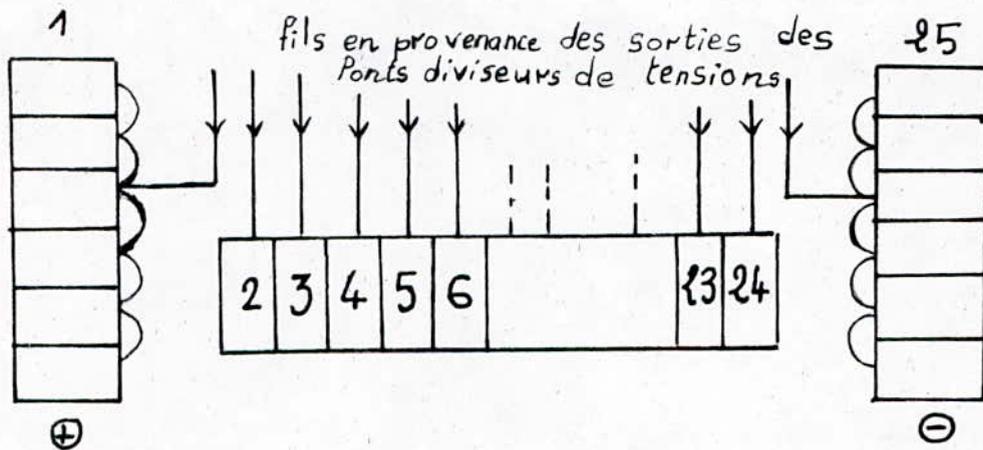


Fig-4.19

Comme il est nécessaire de brancher aux bornes de chaque module un comparateur, il est tout à fait évident qu'il peut y avoir des fils en commun (exemple: le fil N°2 est commun respectivement aux modules 1 et 2).

4-5-2: Procédure de programmation

En s'inspirant des figures 4-18 et 4-19, il faut commencer à relier le premier fil du comparateur A au + des dominos. Ce dernier est représenté par une barette de six connexions avant pour numéros 1. Ensuite on relie le fil constitué par l'association du deuxième fil du comparateur A et du premier fil du comparateur B, au N°2 des barettes de dominos et ainsi de suite. Arrivé au - de la première branche, on connecte le deuxième fil du n-ième comparateur à la masse. Cette dernière est représentée par une barette de six connexions et a pour numéro 25.

On attaque ensuite la deuxième branche et on procède de la même manière que pour la première. Ceci est répété jusqu'à la m-ième branche.

Les comparateurs qui ne sont pas utilisés doivent être connectés à une tension, représentée par un dominos situé à l'extrême droite de l'intérieur du boîtier, de façon à ce que les sorties correspondantes aient un état logique "0". Autrement dit, cela consiste à relier l'entrée e- à une tension positive et l'entrée e+ à la masse. Cette tension est issue du pont diviseur formé par R2 et R3 de l'alimentation (voir 4-3-8a).

Il reste à relier l'extrémité du câble à l'association des modules. Il s'agit de connecter les fils téléphoniques, numérotés de 1 à 25, aux fils de la matrice qui leurs correspondent. Ces derniers sont aussi numérotés de 1 à 25 (pour l'association extrême des 24 modules).

4-6: Exemple d'application

Il s'agit de l'association de deux groupements en série dont chacun est formé de deux branches disposées en parallèle. Chacune de ces dernières comprend 5 modules solaires associés en série (Fig 4-20a).

En suivant la matrice générale de la figure 4-18, n et m prennent comme valeurs respectives 10 et 2. Nous pouvons remarquer la liaison qui fait que le - et le + respectives des modules "5" et "6", soient reliés aux - et + respectives des modules "15" et "16". Ce qui nous amène au "schéma équivalent" de la figure 4-20b.

La procédure de programmation est illustrée par la figure 4-20c. Le nombre de comparateurs utilisés est '20' (identique à celui des modules solaires). Ils sont représentés par les lettres alphabétiques allant de A jusqu'à T. Comme Les comparateurs U, V, W et X n'ont pas été utilisés, les entrées qui leurs correspondent ont été connectées à une tension donnée par le +7,6V et la masse des dominos situés à l'extrême droite de l'intérieur du boîtier. Ceci afin que leurs sorties présentent un état logique "0".

Le courant de court-circuit et la tension du circuit-ouvert de l'association sont :

$I_{cc} = 4,95 A$	$V_{co} = 190 V$
-------------------	------------------

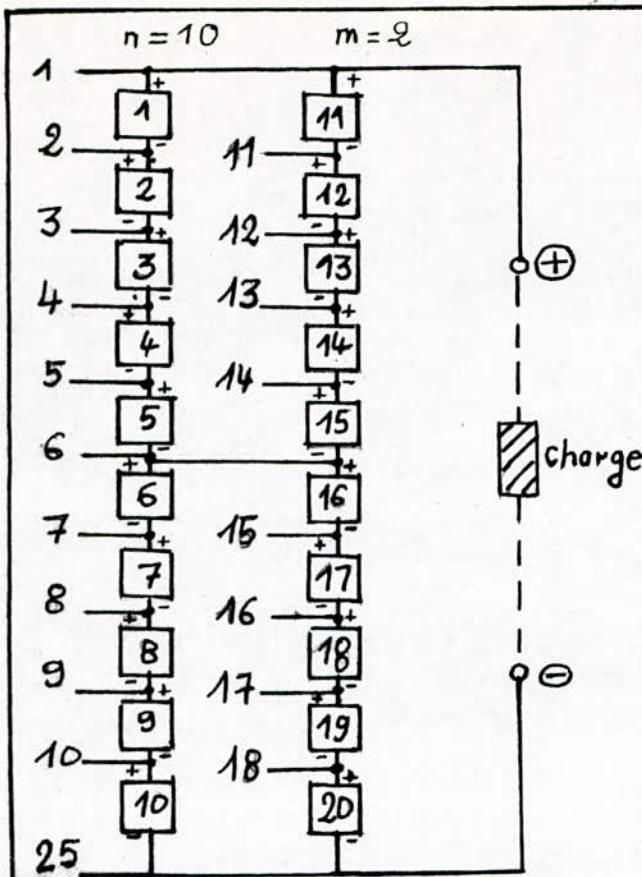


Fig-4.20a-ASSOCIATION MIXTE DE 20 MODULES .

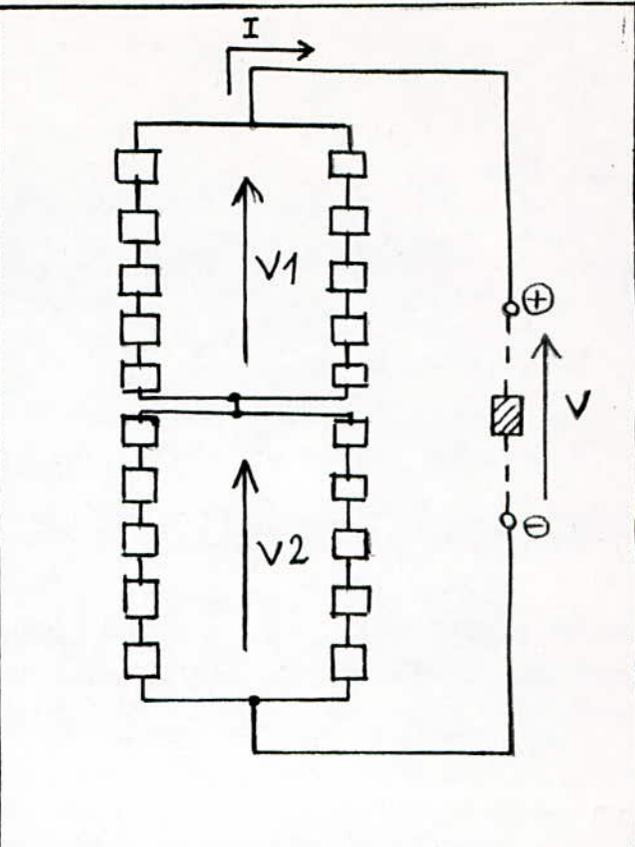


Fig-4.20b-SCHEMA EQUIVALENT

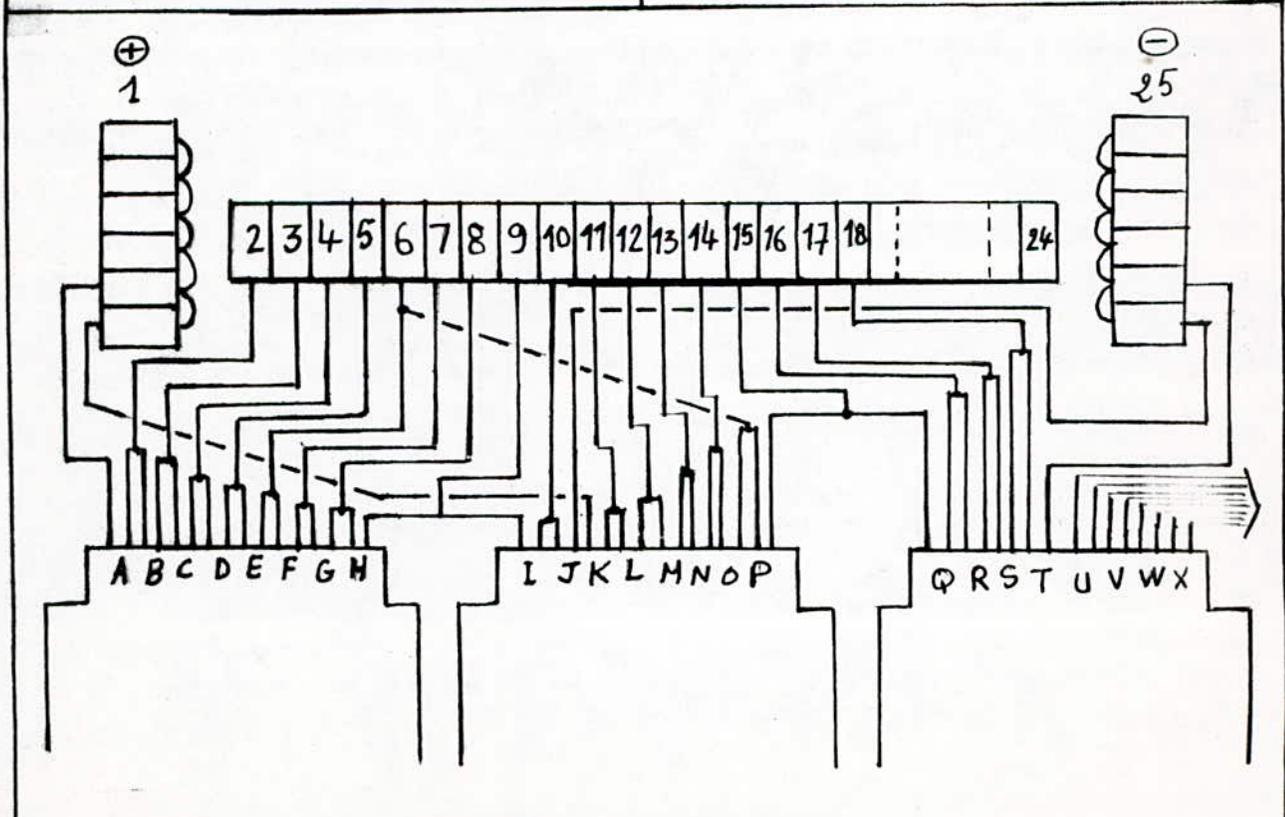


Fig-4.20c- PROCEDURE DE PROGRAMMATION

3-7 L'I.D.P en tant que régulateur .

Après experimentation de l'appareil ,d'autres applications nous sont apparues .Une de ces applications et certainement pas la dernière , consiste à utiliser l'I.D.P comme régulateur de charge et protecteur des modules .Il fait ainsi l'économie de l'utilisation d'un régulateur de charge classique moyennant l'incorporation d'un simple relais commandé par un transistor .

a- Description d'un système photovoltaïque.

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs organes qui sont :

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

Un tel système est représenté par la figure 4-21 .

La plupart des applications des générateurs photovoltaïques nécessitent des moyens de stockage par batteries .

Le bon fonctionnement et la tenue des performances des batteries dans le temps sont liés aux conditions de leur utilisation .

Pour cela ,le contrôle précis des conditions de charge et de décharge est nécessaire .C'est ce qu'on adopte en intercalant entre le générateur et les batteries un dispositif de régulation électronique appelé régulateur .

Enfin un convertisseur CC/CA permet d'alimenter la charge en courant alternatif .

b- Principes de la régulation . (Fig 4-22)

La régulation se fait en deux étapes :

* En régime normal (pas de déséquilibre) à la sortie S de L'I.D.P un niveau logique 0 se présente ,ce qui bloque le transistor T . De ce fait le contact K du relais se ferme ,ceci permet de charger les batteries (car $V_G > V_B$) et d'alimenter la charge .

* Lorsqu'un ou plusieurs modules sont en déséquilibre un niveau logique 1 se présente à la sortie S de L'I.D.P ,ce qui rend conducteur T et par conséquent K s'ouvre .Ainsi d'une part le générateur est mis hors circuit (protection du générateur) et d'autre part les batteries assurent l'alimentation de la charge (protection de la charge) .

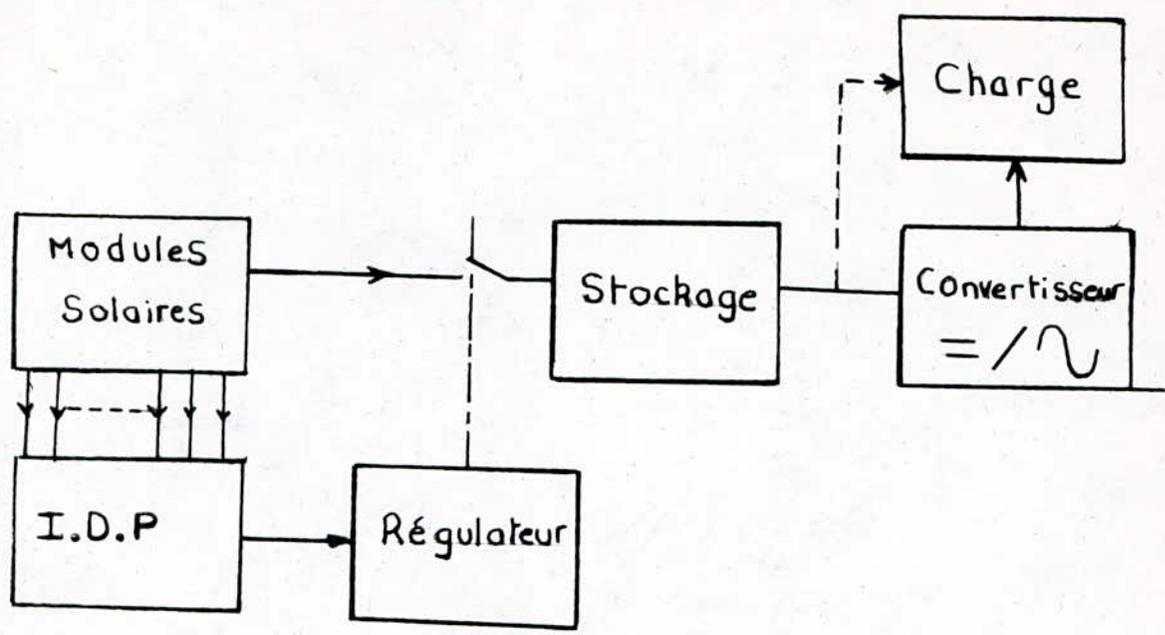


Fig 4.21 SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

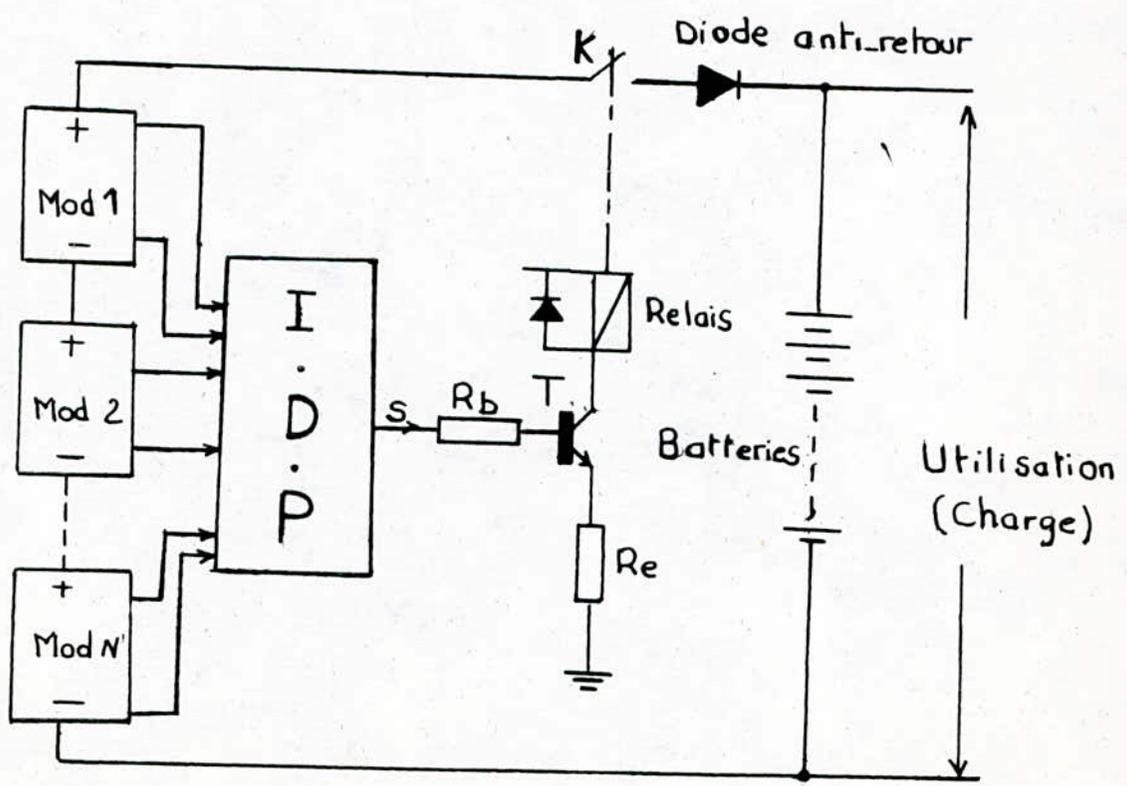


Fig 4.22 UTILISATION DE L'I.D.P EN REGULATEUR

LISTE DES COMPOSANTS: (VALEURS NORMALISEES).

- R1 = 1 M ohms
- R2 = 56 K ohms
- R3 = 1,2 K ohms
- R4 = 330 ohms
- R5 = 10 K ohms
- R6 = 330 ohms
- R7 = 6.8 K ohms
- R8 = 3.3 K ohms
- A1:ajustable = 100 K ohms
- R9 = 10 K ohms
- R10 = 330 ohms
- R11 = 22 K ohms
- R12 = 2.2 K ohms
- A2:ajustable = 100 K ohms
- R13 = 1.2 K ohms
- R14 = 100 ohms
- R15 = 10 K ohms
- R16 = 330 ohms
- C1 = 10 μ F / 25V
- C2 = 4.7 PF / 25V
- C3 = 10 μ F / 25V
- C4 = 22 nF
- T1 = 2N.2222.A
- T2 = T3 = T5 = 2N.2222.A
- T4 = 2N.1711
- IC1 = IC2 : circuits intégrés (Quadruple ampli-operationnel)
- IC3 :circuit intégré le NE.555
- IC4 :circuit intégré le MC.14011 (Quatre portes NAND à deux entrées)
- LED : diode electro-luminiscente
- HP : haut parleur
- MC 7808 :régulateur 8 volts
- MC 7812 :régulateur 12 volts

C O N C L U S I O N

Ce travail a permis une approche des déséquilibres survenant lors de l'association des modules solaires photovoltaïques.

Il a été montré que la disparité des caractéristiques électriques des cellules dans une association peut conduire cette dernière à fonctionner en mode de polarité inverse en absorbant de l'énergie au lieu d'en générer. D'où la nécessité de disposer des caractéristiques équivalentes pour les cellules qui vont être connectées.

Nous avons remarqué que l'occultation des modules dans une association se traduit par le changement des allures des caractéristiques I-V et P-V et par conséquent un déplacement du point de fonctionnement optimum.

Ce déplacement est d'autant plus remarquable que le degré d'occultation des modules est important. De ce fait la puissance optimale diminue et peut mener à la non satisfaction de la charge, ou même à la détérioration des cellules.

A partir de cette constatation, nous avons donc conçu et réalisé un indicateur capable de 'repérer' le ou les modules en déséquilibre ou franchement en panne; Ainsi que son utilisation comme régulateur entre le G.P.V. les batteries et la charge .
Ainsi la connaissance de l'Etat du générateur en tout moment est d'une importance capitale aussi bien pour apprécier ses performances que pour intervenir lors de sa maintenance .

ANNEXE

CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE : A L'OBSCURITE
ET SOUS-ECLAIREMENT

```
10 SCREEN 3:CLS
20 GOSUB 200
30 FOR I=0 TO 190 STEP 2
40 A11=A1:A22=A2:B1=B
50 V1=.025*LOG((I/6.87E-09)+1)
60 V2=.025*LOG(((190-I)/2.1554E-06)+1)
70 A1=80+V1*250:A2=350+V2*250:B=250-I/1.5
80 PSET (A1,B):PSET (A2,B)
90 IF I<>0 THEN LINE(A11,B1)-(A1,B):LINE(A22,B1)-(A2,B)
91 LOCATE 19,45:PRINT "V1=";V1;" V2=";V2
100 NEXT
110 PSET (A1-7,250):LINE(A1-7,247)-(A1-7,253)
111 PSET(80,B):LINE(77,B)-(83,B)
120 LOCATE 22,45:STOP
200 LOCATE 19,20:PRINT "COURBES D'UNE CELLULE":LOCATE 20,20:PRINT "SOLAIRE A L'O-
BSCURITE":LOCATE 21,20:PRINT "ET SOUS ECLAIREMENT"
210 LINE(80,250)-(80,50):LINE(80,250)-(280,250):LINE(350,250)-(350,50):LINE(350,
250)-(550,250)
212 LINE(280,250)-(277,247):LINE(280,250)-(277,253)
214 LINE(80,50)-(77,53):LINE(80,50)-(83,53)
216 LINE(550,250)-(547,247):LINE(550,250)-(547,253)
218 LINE(350,50)-(353,53):LINE(350,50)-(347,53)
220 LOCATE 6,15:PRINT"Cas a:A L'OBSCURITE"
221 LOCATE 6,47:PRINT"Cas b:SOUS ECLAIREMENT"
224 LOCATE 4,12:PRINT"I(mA)":LOCATE 17,33:PRINT"V(v)"
226 LINE(110,95)-(265,95):LINE(368,95)-(545,95)
228 LOCATE 17,10:PRINT"0":LOCATE 17,44:PRINT"0"
229 LOCATE 17,67:PRINT"V(v)":LOCATE 4,46:PRINT"I(mA)"
230 LOCATE 8,41:PRINT"190"
232 LOCATE 17,57:PRINT".457"
234 LINE(145,335)-(328,335):LINE(328,335)-(328,284):LINE(328,284)-(145,284):LINE
(145,284)-(145,335)
236 LOCATE 17,27:PRINT".56"
238 LOCATE 8,7:PRINT"190"
240 LINE(40,30)-(580,30):LINE(580,30)-(580,350)
242 LINE(580,350)-(40,350):LINE(40,350)-(40,30)
250 RETURN
```

CALCUL GRAPHIQUE DE R_s (RESISTANCE SERIE) D'UNE
CELLULE PHOTOVOLTAIQUE

```

50 CLS
60 DEF FN V1(I)=.025*LOG(((240-I)/1.9992E-06)+1)
70 DEF FN V2(I)=.025*LOG(((180-I)/1.9992E-06)+1)
100 SCREEN 1:CLS
101 LOCATE 10,10:PRINT"CALCUL EN COURS !!"
102 LOCATE 12,10:PRINT"PATIENTEZ UN PEU ."
110 DIM V1(300),I1(300),I2(300),V2(300)
112 DIM V1(300),I1(300),I2(300),V2(300)
114 DIM P1(300),P11(300),P2(300),P22(300)
120 FOR F=0 TO 240 STEP 2.4
121 LOCATE 1,10:PRINT "I=";F;"A":LOCATE 3,10:PRINT "BOUCLE=";I
125 I=I+1
130 IF F<178 THEN V2(I)=FN V2(F) :F1=F:V2=V2(F):I1=I
135 I1(I)=F:I2(I)=F
140 V1(I)=FN V1(F)
141 P1(I)=V1(I)*I1(I):P2(I)=V2(I)*I2(I)
143 IF I>1 AND P1(I)>P1(I-1) THEN P1=P1(I):V1M=V1(I):I1M=I1(I)
144 IF I>1 AND P2(I)>P2(I-1) THEN P2=P2(I):V2M=V2(I):I2M=I2(I)
150 NEXT
201 SCREEN 3
205 GOSUB 700
210 FOR I=1 TO 101
212 V11(I)=V1(I)*1000:V22(I)=V2(I)*1000:I11(I)=I1(I)*1.2
213 I22(I)=I2(I)*1.2
220 IF I>1 THEN LINE(V11(I),I11(I))-(V11(I-1),I11(I-1))
230 IF I>1 THEN LINE(V22(I),I22(I))-(V22(I-1),I22(I-1))
300 NEXT
310 LINE(V11(101),I11(101))-(0,I11(101))
320 FOR H=I1M*1.2 TO 0 STEP -2
325 PSET (V1M*1000,H):NEXT
330 FOR H=I2M*1.2 TO 0 STEP -2
335 PSET (V2M*1000,H):NEXT
340 FOR H=V1M*1000 TO 0 STEP -2
345 PSET (H,I2M*1.2):NEXT
350 FOR H=V1M*1000 TO 0 STEP -2
355 PSET (H,I1M*1.2):NEXT
358 K=26
360 FOR J=0 TO .5 STEP .1:K=K+7
362 LOCATE 2,39:PRINT"CALCUL GRAPHIQUE DE R5(Resistance Serie)"
364 LOCATE 3,39:PRINT"D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE ."
365 LOCATE 18,K:PRINT J:NEXT
370 LOCATE 21,27:PRINT"P1M=";"89.05 mW"
371 LOCATE 21,40:PRINT"I1M=225.59 mA"
372 LOCATE 12,30:PRINT"100"
374 LOCATE 7,30:PRINT"200"
375 LOCATE 6,65:PRINT"P1M:I1M,V1M"
376 LOCATE 9,67:PRINT"P2M:I2M,V2M"
377 LOCATE 21,69:PRINT"Icc1=240mA"
378 LOCATE 21,54:PRINT"V1M=.3947502 v"
379 LOCATE 2,29:PRINT"I(mA)":LOCATE 18,75:PRINT"V(v)"
380 LOCATE 22,27:PRINT"P2M=65.55 mW"
381 LOCATE 22,40:PRINT"I2M=168 mA"
382 LOCATE 22,54:PRINT"V2M=.3901919 v"
383 LOCATE 22,69:PRINT"Icc2=180mA"
384 LOCATE 23,27:PRINT"R5=(V1M-V2M)/(Icc1-Icc2)="
385 LOCATE 23,70:PRINT"Fig-  -"

```

SUITE....

```
386 LOCATE 23,51:PRINT*="(V1M-V2M)/.00006"m0HM"  
400 LOCATE 1,1  
410 LINE(-117,-149)-(621,-149)  
690 END  
700 XM=630:YM=393  
800 VIEW(205,315)-(625,370),,1  
803 VIEW(300,7)-(627,52),,1  
804 VIEW(200,5)-(630,380),,1  
810 WINDOW(-.2*XM,-.5*YM)-(XM,YM)  
820 LINE(0,0)-(XM-50,0):LINE(0,0)-(0,YM-20)  
830 LINE(XM-50,0)-(XM-58,-8):LINE(XM-50,0)-(XM-58,8)  
840 LINE(0,YM-20)-(-9,YM-27):LINE(0,YM-20)-(9,YM-27)  
850 FOR T=0 TO 500 STEP 20  
855 LINE(T,3)-(T,-3):NEXT  
860 FOR T=0 TO 500 STEP 100  
865 LINE(T,5)-(T,-5):LINE(T+1,5)-(T+1,-5):NEXT  
870 FOR T=0 TO 250*1.2 STEP 250*1.2/25  
875 LINE(4,T)-(-4,T):NEXT  
880 FOR T=0 TO 250*1.2 STEP 250*1.2/5  
885 LINE(-8,T)-(8,T):LINE(-8,T+1)-(8,T+1):NEXT  
890 LINE(260,-95)-(260,-150)  
895 LINE(474,-95)-(474,-183)  
900 LINE(65,-95)-(65,-150)  
1000 RETURN
```

CARACTERISTIQUE I(V) D'UNE CELLULE SOLAIRE ECLAIREE
POUR DIFFERENTES VALEURS DE R_s

```

10 CLS:SCREEN 3
15 GOSUB 200
20 LOCATE 4,35:PRINT"COURBES DE V(I) D'UNE CELLULE":LOCATE 5,35:PRINT"SOLAIRE 50
US ECLAIREMENT POUR":LOCATE 6,35:PRINT "DIFFERENTES VALEURS DE R5"
21 J=J+1:R5=R5(J)
22 R5=R5/1000
23 IF J=12 THEN LOCATE 21,2:PRINT"STOP":STOP
24 IF R5=0 THEN N=1:GOTO 30
25 N=.1
26 IF R5>20 THEN N=.01:GOTO 30
30 FOR I=0 TO 190 STEP N
35 A1=A:B1=B
40 V=.025*(LOG(463695.1*(190-I)+1))-R5*I
41 LOCATE 23,40:PRINT "V=";V
43 IF V<.01 AND V>0 THEN GOTO 21
50 A=300-I:B=100+500*V
55 IF I<>0 THEN LINE(B,A)-(B1,A1)
60 PSET (B,A)
70 NEXT
100 GOTO 20
150 REM *****TRACE DES*****
200 LINE(100,20)-(100,300):LINE(100,300)-(500,300)
205 LOCATE 20,12:PRINT"0":LOCATE 20,40:PRINT".457":LOCATE 20,60:PRINT"V(v)"
206 LOCATE 7,9:PRINT"190":LOCATE 2,14:PRINT"I(mA)"
207 LOCATE 10,9:PRINT"152":LOCATE 12,9:PRINT"114":LOCATE 15,9:PRINT"76":LOCATE 1
7,9:PRINT"38"
209 DIM R5(20)
210 FOR I=1 TO 11:READ R5(I):NEXT
211 DATA 0,.1,.5,1,2,5,10,20,40,50,100
215 FOR G=100 TO 328.5 STEP (328.5-100)/5
216 LINE(G,298)-(G,302):LINE(G-1,298)-(G-1,302):NEXT
218 FOR G=300 TO 110 STEP -190/5
219 LINE(98,G)-(102,G):LINE(98,G-1)-(102,G-1):NEXT
222 LINE(500,300)-(497,297):LINE(500,300)-(497,303)
224 LINE(100,20)-(97,23):LINE(100,20)-(103,23)
226 LOCATE 20,17:PRINT".091":LOCATE 20,22:PRINT".183":LOCATE 20,28:PRINT".274":L
OCATE 20,34:PRINT".367"
228 LINE(250,40)-(520,40):LINE(520,40)-(520,100)
229 LINE(520,100)-(250,100):LINE(250,100)-(250,40)
250 RETURN

```

INFLUENCE DU COEFFICIENT ALPHA SUR LA CARACTERISTIQUE
I(V) D'UNE CELLULE SOLAIRE ECLAIREE

```

10 SCREEN 3:CLS
20 GOSUB 200
30 FOR I=0 TO 190 STEP .5
40 A11=A1:A22=A2:B1=B:A33=A3:A44=A4
60 V2=.025*LOG(((190-I)/2.1554E-06)+1)
61 IF I<181 THEN V3=.025*LOG(((180.5-I)/2.1554E-06)+1)
62 IF I<171.5 THEN V4=.025*LOG(((171-I)/2.1554E-06)+1)
70 A1=80+V1*250:A2=250+V2*550:B=250-I/1.5
71 A3=250+V3*550:A4=250+V4*550
80 PSET (A2,B)
81 IF I>0 AND I<181 THEN PSET (A3,B)
82 IF I>0 AND I<181 THEN PSET (A4,B)
90 IF I<>0 THEN LINE (A22,B1)-(A2,B)
92 IF I>0 AND I<172 THEN LINE (A44,B1)-(A4,B)
93 IF I>0 AND I<181 THEN LINE (A33,B1)-(A3,B)
100 NEXT
120 LOCATE 22,45:STOP
200 LOCATE 5,36:PRINT "INFLUENCE DU COEFFICIENT ALPHA ":LOCATE 6,36:PRINT "SUR L
A CARACTERISTIQUE I-V":LOCATE 7,36:PRINT "D'UNE CELLULE SOLAIRE ECLAIREE"
201 LOCATE 19,36:PRINT "Cas a: VARIATION DE ALPHA DE 5%"
202 LOCATE 20,36:PRINT "Cas b: VARIATION DE ALPHA DE 10%"
210 LINE (250,250)-(250,50):LINE (250,250)-(550,250)
216 LINE (550,250)-(547,247):LINE (550,250)-(547,253)
218 LINE (250,50)-(253,53):LINE (250,50)-(247,53)
220 LINE (270,60)-(530,60):LINE (530,60)-(530,110)
221 LINE (530,110)-(270,110):LINE (270,110)-(270,60)
224 LOCATE 4,26:PRINT "I (mA) "
228 LOCATE 17,32:PRINT "0"
229 LOCATE 17,67:PRINT "V (v) "
230 LOCATE 8,28:PRINT "190"
232 LOCATE 17,61:PRINT ".457"
234 LINE (250,320)-(560,320):LINE (560,320)-(560,284):LINE (560,284)-(250,284):LINE
(250,284)-(250,320)
240 LINE (40,30)-(580,30):LINE (580,30)-(580,350)
242 LINE (580,350)-(40,350):LINE (40,350)-(40,30)
244 LOCATE 12,12:PRINT "Fig - -"
250 RETURN

```

CARACTERISTIQUES I(V) ET P(V) SIMULEES D'UN MODULE

PHOTOVOLTAIQUE TYPE ARCO-SOLAR M 53

```

5 CLS
10 DIM A(200),B(200),P(200),AA(200)
20 DIM BB(200),PP(200)
90 DEF FN V(I)=36*.025*LOG(((2.7-I)/1.9992E-09)+1)
95 SCREEN 1:LOCATE 10,8:PRINT"CALCUL EN COURS !!"
96 LOCATE 12,8:PRINT"PATIENTEZ UN PEU ."
100 FOR I=0 TO 2.7 STEP .027
105 F=F+1
110 A(F)=FN V(I):B(F)=I:P(F)=I*A(F)
115 AA(F)=200+20*A(F):BB(F)=170-45*B(F)
120 PP(F)=360-P(F)*2.8
130 IF F>1 AND P(F)>P(F-1) THEN F1=F:A1=A(F)
134 IF F>1 AND P(F)>P(F-1) THEN B1=B(F):P1=P(F)
140 NEXT
145 SCREEN 3
150 FOR F=1 TO 101
170 IF F>1 THEN LINE(AA(F),BB(F))-(AA(F-1),BB(F-1))
180 IF F>1 AND F<100 THEN LINE(AA(F),PP(F))-(AA(F-1),PP(F-1))
190 LINE(AA(99),PP(99))-(AA(101),360)
220 NEXT
300 LINE(AA(101),170)-(630,170)
310 LINE(AA(101),360)-(630,360)
320 LINE(AA(101),170)-(AA(101),20)
330 LINE(AA(101),360)-(AA(101),200)
332 FOR I=AA(101) TO AA(F1) STEP 2
333 PSET (I,BB(F1)):PSET (I,PP(F1)):NEXT
335 FOR I=BB(F1) TO 170 STEP 2
336 PSET (AA(F1),I):PSET (AA(F1),I+190):NEXT
340 LINE(AA(101)-4,24)-(AA(101),20)
345 LINE(AA(101)+4,24)-(AA(101),20)
350 LINE(AA(101)+4,204)-(AA(101),200)
355 LINE(AA(101)-4,204)-(AA(101),200)
360 LINE(626,166)-(630,170):LINE(626,174)-(630,170)
365 LINE(626,356)-(630,360):LINE(626,364)-(630,360)
370 FOR I=AA(101) TO 600 STEP (600-AA(101))/20

```

SUITE....

```
380 LINE(I,168)-(I,172):NEXT
385 FOR I=AA(101) TO 600 STEP (600-AA(101))/5
390 LINE(I,166)-(I,174):LINE(I+1,166)-(I+1,174):NEXT
395 FOR I=AA(101) TO 600 STEP (600-AA(101))/20
400 LINE(I,358)-(I,362):NEXT
405 FOR I=AA(101) TO 600 STEP (600-AA(101))/5
410 LINE(I,356)-(I,364):LINE(I+1,356)-(I+1,364):NEXT
420 FOR I=35 TO 170 STEP 135/15
430 LINE(AA(101)-2,I)-(AA(101)+2,I):NEXT
440 FOR I=35 TO 170 STEP 135/3
445 LINE(AA(101)-4,I)-(AA(101)+4,I):NEXT
447 FOR I=35 TO 170 STEP 135/3
450 LINE(AA(101)-4,I+1)-(AA(101)+4,I+1):NEXT
455 FOR I=220 TO 360 STEP (360-220)/25
460 LINE(AA(101)-2,I)-(AA(101)+2,I):NEXT
465 FOR I=220 TO 360 STEP (360-220)/5
470 LINE(AA(101)-4,I)-(AA(101)+4,I)
475 NEXT
480 LINE(200,0)-(639,0):LINE(639,0)-(639,398)
490 LINE(639,398)-(200,398):LINE(200,398)-(200,0)
500 LOCATE 2,47:PRINT"COURBE I-V, SIMULEE, D'UN MODULE"
510 LOCATE 3,47:PRINT"PHOTOVOLTAIQUE:ARCO SOLAR M53"
520 LOCATE 14,47:PRINT"COURBE P-V, SIMULEE, D'UN MODULE"
525 LOCATE 15,47:PRINT"PHOTOVOLTAIQUE:ARCO SOLAR M53"
549 X=-4
550 FOR I=0 TO 35 STEP 7
555 X=X+4:LOCATE 12,I+40:PRINT X;
560 LOCATE 24,I+40:PRINT X;:NEXT I
565 LOCATE 2,37:PRINT"I(A)":LOCATE 13,37:PRINT"P(W)"
```

SIMULATION DU DESEQUILIBRE D'UN GROUPEMENT DE
TROIS MODULES EN SERIE : COURBE I(V)

```
10 SCREEN 3:CLS:N=.01
11 N=.01
12 DIM N(1000),M(1000),K(1000)
20 GOSUB 130
30 FOR I=0 TO 2.4 STEP N
31 D=D+1
35 LOCATE 12,60:PRINT I
40 A11=A1:B1=B:A22=A2:A33=A3
80 A1=50+6*V1:B=225-I*60:A2=50+6*V2:A3=50+6*V3
85 N(D)=A1:M(D)=A2:K(D)=A3
86 B1=B:B2=B:B3=B
90 GOSUB 500
91 GOSUB 600
92 GOSUB 700
102 LOCATE 20,60:PRINT V1:LOCATE 21,60:PRINT V2:LOCATE 22,60:PRINT V3
110 NEXT
115 LINE(279,223)-(279,228):LINE(161,223)-(161,228)
120 LOCATE 21,50:STOP
128 LOCATE 21,60:STOP
130 LINE(50,225)-(450,225):LINE(50,225)-(50,40)
131 LINE(50,40)-(54,44):LINE(50,40)-(46,44)
132 LINE(450,225)-(446,221):LINE(450,225)-(446,229)
133 LOCATE 16,7:PRINT "0":LOCATE 16,18:PRINT "18.5"
134 LOCATE 16,33:PRINT "38.2":LOCATE 16,47:PRINT "56.4"
135 LOCATE 3,2:PRINT "I(A)":LOCATE 5,3:PRINT "2.4"
136 LOCATE 6,3:PRINT "2.3":LOCATE 10,2:PRINT "1.24"
137 LOCATE 16,54:PRINT "V(v)"
138 LINE(1,10)-(470,10):LINE(470,10)-(470,330)
139 LINE(470,330)-(1,330):LINE(1,330)-(1,10)
140 FOR G=50 TO 388.64 STEP (338.64/5)
141 LINE(G,222)-(G,228):LINE(G-1,222)-(G-1,228):NEXT
143 LOCATE 2,13:PRINT "SIMULATION DU DESEQUILIBRE D'UN GROUPEMENT"
144 LOCATE 3,13:PRINT "DE TROIS MODULES SOLAIRES EN SERIE."
145 LINE(85,50)-(440,50):LINE(440,50)-(440,13)
146 LINE(440,13)-(85,13):LINE(85,13)-(85,50)
147 LOCATE 18,7:PRINT "Cas a: AUCUN MODULE N'EST OCCULTE"
148 LOCATE 19,7:PRINT "Cas b: UN MODULE EST OCCULTE "
149 LOCATE 20,7:PRINT "Cas c: DEUX MODULES SONT OCCULTES"
150 LINE(45,265)-(330,265):LINE(330,265)-(330,320)
151 LINE(330,320)-(45,320):LINE(45,320)-(45,265)
152 LOCATE 6,46:PRINT "a":LOCATE 8,30:PRINT "b"
153 LOCATE 11,12:PRINT "c"
170 FOR G=81 TO 225 STEP (144/5)
180 LINE(47,G)-(53,G):LINE(47,G+1)-(53,G+1)
200 NEXT
210 RETURN
500 V1=2.7*LOG(((2.4-I)/1.9992E-09)+1)
504 V1=2.7*LOG(((2.4-I)/1.9992E-09)+1)
505 PSET (A1,B1)
506 BC=B1
507 IF I>2.39 THEN LINE(A1,B)-(50,B)
508 IF I>.1 THEN LINE(A1,B)-(A11,B1)
510 RETURN
```

SUITE....

```
600 IF V2<7 AND I>0 THEN LINE(A22,BB)-(48,BB):GOTO 610
605 V2=1.83168*LOG(((2.3-I)/1.9992E-09)+1)-.025543*(2*LOG((I/.000002)+1)+12*LOG(
(I/2.15E-08)+1))
606 PSET (A2,B2)
607 IF I>.01 THEN LINE(A2,B)-(A22,B1)
608 BB=B2
610 RETURN
700 IF V3<2 AND I>0 THEN LINE(A33,BA)-(48,BA):GOTO 710
705 V3=2*.45792*LOG(((1.24-I)/1.9992E-09)+1)-.051086*(2*LOG((I/.000002)+1)+12*LO
G((I/2.15E-08)+1))
706 PSET (A3,B3)
707 BA=B3
708 IF I>.01 THEN LINE(A3,B)-(A33,B1)
710 RETURN
808 BB=B2
```

SIMULATION DU DESEQUILIBRE D'UN GROUPEMENT DE
TROIS MODULES EN SERIE : COURBE P(V)

```
10 SCREEN 3:CLS:N=.01
11 N=.01
12 DIM N(1000),M(1000),K(1000)
20 GOSUB 130
30 FOR I=0 TO 2.4 STEP .01
31 D=D+1
35 LOCATE 12,60:PRINT "I=";I
40 A11=A1:B1=B:A22=A2:A33=A3
80 A1=50+6*V1:B=225-P1*1.5:A2=50+6*V2:A3=50+6*V3
81 BA1=225-P2*1.5:BA2=225-P3*1.5
85 N(D)=A1:M(D)=A2:K(D)=A3
86 B1=B:B2=BA1:B3=BA2
90 GOSUB 500
91 GOSUB 600
92 GOSUB 700
102 LOCATE 20,60:PRINT "V1=";V1:LOCATE 21,60:PRINT "V2=";V2:LOCATE 22,60:PRINT "
V3=";V3
110 NEXT
115 LINE(279,223)-(279,228):LINE(161,223)-(161,228)
120 LOCATE 21,50:STOP
128 LOCATE 21,60:STOP
130 LINE(50,225)-(450,225):LINE(50,225)-(50,40)
131 LINE(50,40)-(54,44):LINE(50,40)-(46,44)
132 LINE(450,225)-(446,221):LINE(450,225)-(446,229)
133 LOCATE 16,6:PRINT "0":LOCATE 16,18:PRINT "18.5"
134 LOCATE 16,34:PRINT "38.2":LOCATE 16,48:PRINT "56.4"
135 LOCATE 3,2:PRINT "P(w)":LOCATE 4,2:PRINT "110.2"
136 LOCATE 9,2:PRINT "57.7":LOCATE 14,2:PRINT "4.85"
137 LOCATE 16,54:PRINT "V(v)"
138 LINE(1,10)-(470,10):LINE(470,10)-(470,330)
139 LINE(470,330)-(1,330):LINE(1,330)-(1,10)
140 FOR G=50 TO 388.64 STEP (338.64/5)
141 LINE(G,222)-(G,228):LINE(G-1,222)-(G-1,228):NEXT
143 LOCATE 2,13:PRINT "SIMULATION DU DESEQUILIBRE D'UN GROUPEMENT"
144 LOCATE 3,13:PRINT "DE TROIS MODULES SOLAIRES EN SERIE."
145 LINE(85,50)-(440,50):LINE(440,50)-(440,13)
146 LINE(440,13)-(85,13):LINE(85,13)-(85,50)
147 LOCATE 18,7:PRINT "Cas a: AUCUN MODULE N'EST OCCULTE"
148 LOCATE 19,7:PRINT "Cas b: UN MODULE EST OCCULTE "
149 LOCATE 20,7:PRINT "Cas c: DEUX MODULES SONT OCCULTES"
150 LINE(45,265)-(330,265):LINE(330,265)-(330,320)
151 LINE(330,320)-(45,320):LINE(45,320)-(45,265)
152 LOCATE 6,47:PRINT "a":LOCATE 12,31:PRINT "b"
153 LOCATE 14,12:PRINT "c"
160 LOCATE 16,9:PRINT "4.62":LOCATE 16,25:PRINT "26.73"
162 LOCATE 16,41:PRINT "48.35"
170 FOR G=59.6 TO 225 STEP (165/5)
180 LINE(47,G)-(53,G):LINE(47,G+1)-(53,G+1)
200 NEXT
201 LINE(47,138.39)-(53,138.39):LINE(47,217.7)-(53,217.7)
204 LINE(77.72,222)-(77.72,228)
205 LINE(210.38,222)-(210.38,228)
206 LINE(340.1,222)-(340.1,228)
210 RETURN
```

SUITE....

```
500 IF I>2.35 THEN LINE(A1,B)-(50,225):GOTO 510
501 V1=2.7*LOG(((2.4-I)/1.9992E-09)+1)
502 P1=I*V1
504 V1=2.7*LOG(((2.4-I)/1.9992E-09)+1)
505 PSET (A1,B1)
506 BC=B1
508 IF I>.1 THEN LINE(A1,B)-(A11,B1)
510 RETURN
600 IF I>2.26 THEN LINE(D5,BB)-(50,225):GOTO 610
605 V2=1.83168*LOG(((2.3-I)/1.9992E-09)+1)-.025543*(2*LOG((I/.000002)+1)+12*LOG(
(I/2.15E-08)+1))
606 P2=V2*I:PSET (A2,B2)
607 IF I>.01 THEN LINE(A2,BA1)-(A22,B2)
608 BB=B2
609 D5=A22
610 RETURN
700 IF V3<2 AND I>0 THEN LINE(AD5,BA)-(50,225):GOTO 710
705 V3=2*.45792*LOG(((1.24-I)/1.9992E-09)+1)-.051086*(2*LOG((I/.000002)+1)+12*LO
G((I/2.15E-08)+1))
706 P3=V3*I:PSET (A3,B3)
707 BA=B3
708 IF I>.001 THEN LINE(A3,BA2)-(A33,B3)
709 AD5=A33
710 RETURN
```

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

- /1/ L'électricité solaire. W.PALZ . Edition DUNOD .
- /2/ Etude expérimentale et simulation numérique du déséquilibre dans un générateur photovoltaïque.
Projet de fin d'études . Promotion juin 1986.
Proposé par: S-A-DARRADJI.
Etudié par: TLILI et LAHMICI
- /3/ Problèmes associés aux déséquilibres électriques et thermiques dans les réseaux de modules photovoltaïques.
Diplôme d'études supérieures. Présenté à l'université CLAUDE BERNARD - Lyon I - par PATRICE FAYOLLE .
- /4/ Curso de : Electricidad solar fotovoltaica .
Sistemas fotovoltaicos autonomos .
Partie I : Fundamentos de la electricidad solar fotovoltaica .
Universidad politencia de Madrid .
- /5/ Rapport d'activité N°2 . YAICI BOUKHALFA .
Institut d'énergie solaire de Madrid(Espagne)
- /6/ Electronique pratique.N°68.Février 1984.