

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT: Electronique



PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

SIMULATION D'UN
PANNEAU SOLAIRE

Proposé par :

Haddadi

Etudié par :

Bourahmani

Dirigé par :

Haddadi

PROMOTION :

Juin 86

Dedicace

• ————— •
A la mémoire de ma mère
A mon père
A mes frères et sœurs

Remerciement

Je tiens à remercier très sincèrement
à Mr HADDADI professeur à l'ENPA qui a
proposé et dirigé cette étude pour son
aide efficace et amicale.

Mes remerciements vont aussi à
Messieurs TRABELSI et AZZOUZ pour
m'avoir facilité l'accès aux laboratoires.

Sommaire

Introduction

Chapitre 1 :

Utilisation de la jonction p.n
comme convertisseur photovoltaïque

I.1 - Imperatifs liés à l'obtention de
l'effet photovoltaïque .

a. Absorption du rayonnement
solaire

b. Séparation des charges

I.2 - Explications du fonctionnement
d'une photopile à l'aide de
schémas équivalents

I.3 - Bilan énergétique d'une cellule
photovoltaïque

a. coefficient de réflexion

b. coefficient d'absorption

c. thermalisation

I.4 - Groupement de cellules

a. Groupement en parallèle de
deux cellules

1. cellules identiques

2. cellules non identiques

- b. Groupement de deux cellules en série
 - 1. cas de deux cellules identiques
 - 2. cas de deux cellules non identiques

Chapitre II :

Programmes de simulation.

II.1 - Simulation d'un panneau PHOTOWATT.

- a. présentation du panneau
- b. détermination des paramètres α, β, δ
 - polarité directe
 - polarité inverse
 - détermination de α
 - détermination de β
 - détermination de δ
- c. présentation du programme.

II.2 - Simulation d'un panneau ARCO-SOLAR.

- a. méthode de résolution
- b. présentation du panneau.
- c. présentation du programme.

Chapitre III :

Application

- a. caractéristique de la charge.
- b. présentation du programme
- c. exemples

Conclusion

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

L'intérêt suscitée par la conversion photovoltaïque se manifeste dès les premiers succès de la pile solaire en laboratoire. A l'origine les applications étaient essentiellement spatiales, car le gain en masse fait du générateur solaire, la source privilégiée des satellites.

La crise de l'énergie allait encore intensifier les travaux de recherche et ouvrir plus largement le marché aux applications terrestres.

Pour approcher ces applications terrestres, nous pouvons simuler, le fonctionnement, le comportement voire même les problèmes posés par le groupement de cellules. Cette simulation s'avère être un moyen efficace d'approche, de compréhension voire même de résolution. Et ce grâce au perfectionnement des moyens de calcul (analogique et numérique) et au progrès réalisé dans le domaine de la modélisation mathématique

L'objet de ce travail est de simuler le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque puis l'appliquer à une charge.

CHAPITRE 1

Utilisation de la jonction
p.n. comme convertisseur
photovoltaïque.

CHAPITRE I

Dans ce chapitre, après un rappel sommaire des principes physiques caractérisant l'effet photovoltaïque et une explication du fonctionnement des photopiles à l'aide de schémas équivalents, nous établirons le bilan énergétique d'une cellule. La fin du chapitre est consacrée aux groupements de cellules et de panneaux.

I IMPERATIFS LIES A L'OBTENTION DE L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE :

On peut définir l'effet photovoltaïque comme une production d'énergie électrique résultant directement de l'interaction de la lumière et d'une structure solide.

Cette énergie électrique, pour qu'elle soit utilisable doit résulter de façon générale de la combinaison de deux phénomènes :

- La création de paires électron-trou par absorption du rayonnement solaire.
- La séparation des charges ainsi créées par un champ électrique interne à la structure.

Ces deux points seront précisés ci-dessous.

I.1 Absorption du rayonnement solaire :

De façon générale, l'interaction de la lumière et d'un matériau fait qu'une partie du faisceau incident est transmise aux électrons du solide.

Dans un métal, cette énergie est restituée immédiatement au réseau des atomes sous forme d'énergie vibrationnelle, ce qui correspond à une augmentation de la température.

Par contre, dans un matériau semi-conducteur les porteurs libres ont une durée de vie beaucoup plus importante que dans le cas des métaux, du fait que ces semi-conducteurs possèdent une bande interdite.

Ces porteurs libres vont donc pouvoir migrer dans le matériau, et on peut ainsi définir une longueur de diffusion, grandeur statistique caractérisant le parcours que peuvent effectuer ces porteurs de charges excités avant de revenir à leur état stable. Cette possibilité de migration va nous permettre d'utiliser les charges libres ainsi créées.

La génération des porteurs libres est décrite par la théorie des bandes dans les solides

Elle aura lieu dans un semi-conducteur si l'énergie du rayonnement lumineux, $h\nu$, est supérieure à l'énergie de la bande interdite, E_g (fig 1). En effet en fournissant à un électron de la bande de valence d'un semi-conducteur une énergie supérieure ou égale à E_g , l'électron considéré passe de la bande de valence à la bande de conduction, laissant libre un "trou" dans la bande de valence. On a ainsi formé des charges libres appelées paires électron-trou.

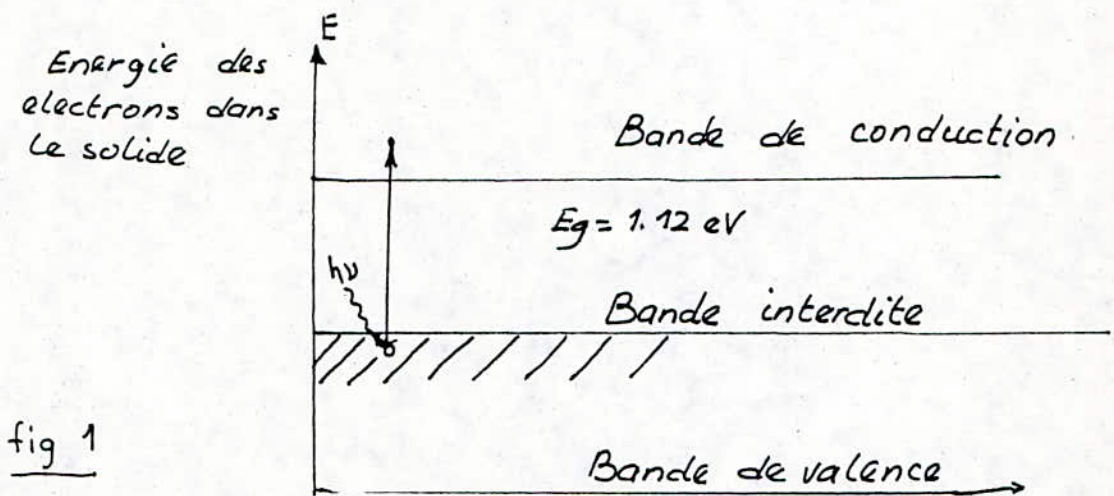


fig 1

L'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou par absorption d'un photon est liée à la fréquence de rayonnement associée à ce photon par la relation :

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

h : constante de Planck.

c : vitesse de la lumière.

Les fortes énergies correspondent aux faibles longueurs d'ondes et vice-versa. On peut définir une

Longueur d'onde seuil, λ_s , déterminé par la largeur de la bande interdite du semi-conducteur. Pour le Silicium

$$\lambda_s = 1.1 \mu\text{m} \quad (\text{L'énergie correspondante étant } 1.12 \text{ eV})$$

Physiquement, ce seuil d'énergie correspond à l'énergie nécessaire pour arracher un électron d'une liaison de valence Si-Si ; cet électron devient alors libre de se mouvoir dans ce matériau. Le mouvement d'un trou correspond à la compensation, par un autre trou électron de valence, de la lacune ainsi créée.

Il faut se rappeler que le coefficient d'absorption du semi-conducteur (α) est une fonction de la longueur d'onde incidente - de la lumière -. Pour des valeurs de λ inférieures à λ_s , (α) sera négligeable. Pour des énergies croissantes au-dessus de λ_s , (α) augmente très rapidement et les radiations correspondantes seront absorbées de plus en plus près de la surface.

I.2 Séparation des charges

La deuxième condition pour l'obtention d'un courant photoélectrique est que l'on puisse séparer et collecter les charges créées dans le solide.

Pour cela, il faut tout d'abord réaliser une structure présentant un champ électrique interne. Ce champ électrique peut être obtenu de diverses façons, nous ne considérons dans ce qui suit que le cas des jonctions P.N de grande surface.

a) Rappel du principe de la jonction P.N:

De façon générale, la résistivité d'un semi-conducteur est diminuée par dopage. Pour ce faire, on introduit des impuretés dans le matériau et on peut obtenir des semi-conducteurs de type N ou P. Dans le cas des cellules solaires, le silicium de type N est dopé au Phosphore, d'où une densité d'électrons libres supérieures à celle du silicium pur. Le silicium de type P est dopé au Bore, d'où une densité de trous supérieure à celle du silicium pur. Lors de la réalisation de la jonction, il y a diffusion des porteurs majoritaires (électron pour type N, trous pour type P) d'un côté à l'autre sous l'effet des gradients de

de concentration. Cette migration s'arrête lorsqu'il y a suffisamment d'ions Phosphore positifs d'un côté et d'ions Bore négatifs de l'autre pour créer un champ interne E orienté du matériau N vers le matériau P (fig 2)

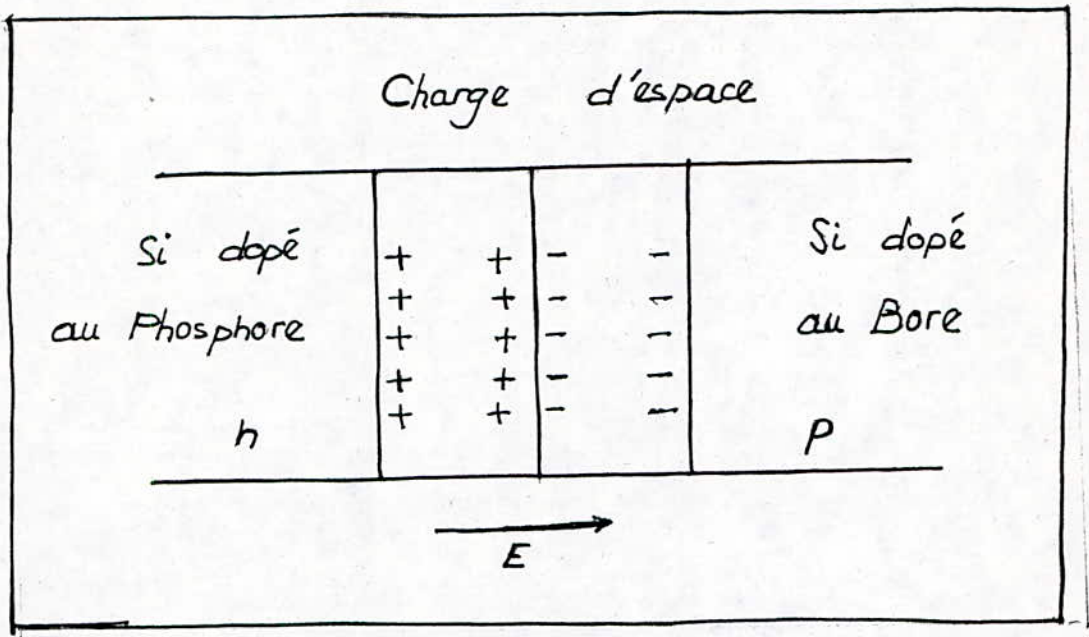


fig 2

Ce champ interne E pourra dissocier les porteurs de charge, dus à l'absorption de la lumière dans le Silicium, avant leur recombinaison, à condition qu'ils aient apparu à une distance de la zone inférieure à la longueur de diffusion.

Il y a donc apparition d'un photocourant I_{ph} dans le semi-conducteur dû à la séparation des

charges libres et l'accumulation de part et d'autre de la structure.

Ce phénomène a pour conséquence de polariser la jonction et de créer un nouveau ~~ch~~ champ interne E' opposé à celui de jonction qui va donc lui aussi faire diffuser des 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 I_d . I_d est fonction de la tension développée aux bornes de la cellule ($V = RI$) d'où le courant fourni à la charge R :

$$I = I_{ph} - I_D(V_j)$$

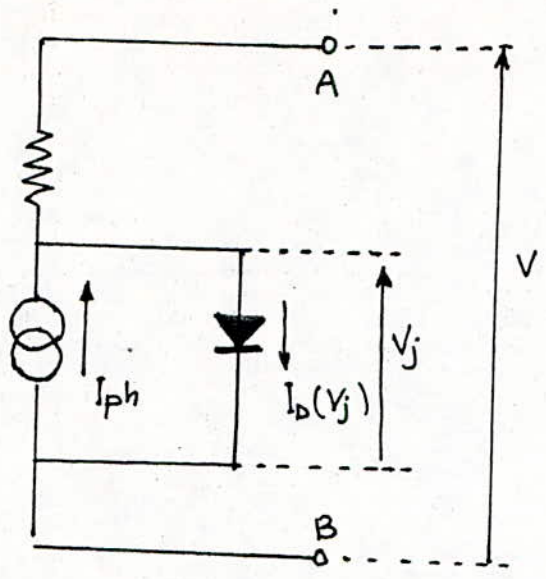
En résumé : on peut dire qu'une cellule solaire est la rencontre de deux phénomènes physiques distincts :

- La propriété qu'ont les solides d'absorber la lumière.

- Le fait qu'une telle jonction, lorsqu'elle est polarisée dans le sens direct, est le siège d'un courant électrique important.

II EXPLICATION DU FONCTIONNEMENT D'UNE PHOTOPILE
A L'AIDE DE SCHEMAS EQUIVALENTS

fig 3



Le courant I_{ph} est fonction du flux solaire incident ϕ et de la surface de la cellule S

$$I_{ph} = \alpha \cdot \phi \cdot S$$

α : coefficient caracterisant la génération du photocourant.

R_s : Resistance serie propre à la plaquette de Silicium et aux contacts.

Sous flux constant tout se passe comme si nous avons un générateur de courant constant (I_{ph}) aux bornes duquel serait monté une diode dont le sens passant est indiqué sur le schéma.

La tension de jonction n'est pas exactement la tension developpée par la cellule V mais V_j telle que

$$V_j = V + R_s I$$

Le courant direct de la diode $I_0(V_j)$ a pour expression

$$I_0 = I_s \left(\exp\left(\frac{eV_j}{nKT}\right) - 1 \right)$$

I_s : courant de saturation.

T : température en Kelvin

K : constante de Boltzmann.

n : coefficient d'idéalité.

N.B.: Isolée la cellule fonctionne toujours en générateur électrique sur une charge passive. Mais dès qu'elle est associée à d'autres cellules elle peut très bien fonctionner en récepteur.

Lorsque la cellule fonctionne comme un générateur photovoltaïque l'expression du courant sera

$$I = I_{ph} - I_0(V_j)$$

avec
$$I_0(V_j) = I_s \left(\exp\left(\frac{eV_j}{nKT}\right) - 1 \right)$$

III BILAN ENERGETIQUE D'UNE CELLULE

III. 1/ Bilan énergétique d'une jonction p.n de grande surface

Sachant que la photopile reçoit un flux énergétique ϕ_s (mw/cm²) du rayonnement solaire, il faut tout d'abord déterminer quelle partie de cette énergie va être absorbée par la structure, sous quelle forme d'énergie dégradée elle va apparaître et quelle part pourra être récupérée sous forme d'énergie électrique au niveau de la charge.

La loi définissant l'absorption d'un rayonnement par un matériau est : " A une profondeur x à partir de la surface le flux énergétique $\phi(x)$ s'écrit :

$$\phi(x) = \phi_s (1 - R) e^{-ax} . "$$

R: coefficient de réflexion caractérisant la part de l'énergie incidente réfléchié à la surface du solide (ϕ_R)

$$R = \phi_R / \phi_s$$

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

En théorie électromagnétique de la lumière, on démontre que le coefficient de réflexion d'un faisceau incident normal peut s'exprimer à l'aide des indices de réfraction et d'absorption qui sont fonction de la longueur d'onde λ .

L'étude du spectre d'absorption $\alpha = f(\lambda)$ pour le Silicium montre que α décroît très vite en fonction de λ .

L'énoncé de cette loi nous permet de discuter l'influence des paramètres (R, α) sur l'absorption de l'énergie incidente par le solide.

III.2/Coefficient de réflexion;

Il apparaît que si l'on veut absorber le maximum de flux incident Φ_s , il faut que R soit le plus petit possible.

R diminuera considérablement en apposant sur la surface de la cellule une couche semi-transparente (de quelques centaines d'Angström) appelée couche anti-reflet.

III.3/Coefficient d'absorption;

L'étude du paramètre α montre que le Silicium est pratiquement transparent pour des longueurs d'ondes supérieures à $1 \mu\text{m}$, (soit la partie infra-rouge du spectre solaire).

Cette énergie ne servira qu'à chauffer le métal de base de contact arrière avec la cellule ainsi que l'électrode collectrice supérieure. On perd ainsi 23% de l'énergie solaire incidente. (zone 1 de la fig 3)

Par contre pour les longueurs d'ondes inférieures à $1 \mu\text{m}$, l'énergie absorbée par les électrons du milieu est supérieure à la largeur de la bande interdite ($1,12 \text{ eV}$) et sert donc à créer des paires électron-trou.

Du fait que le maximum d'intensité du spectre solaire est

comprise entre les longueurs d'onde variant de $0.35 \mu\text{m}$ à $0.75 \mu\text{m}$, les distances correspondant à leur absorption seront faibles (la densité de porteurs libres dans cette zone sera alors maximale). Or pour augmenter le rendement de la cellule, il faut que soient collectés et séparés le plus de porteurs possible, et de ce fait, la jonction doit se trouver dans cette région.

III.4/ Thermalisation:

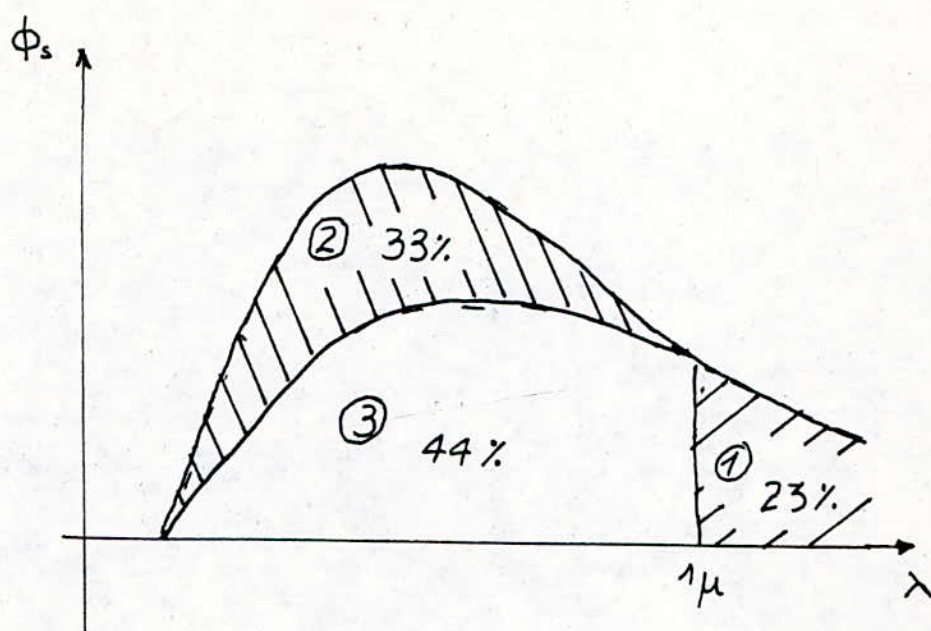
Pour une énergie $h\nu$ absorbée par les électrons du réseau, supérieure à la largeur de la bande interdite E_g , les électrons se trouvent dans le haut de la bande de conduction dans des états énergétiques instables et ils redescendent très rapidement à un niveau plus stable correspondant au bas de cette bande de conduction. Ceci en un temps de beaucoup inférieur au temps de recombinaison des paires électron-trou. L'énergie $h\nu - E_g$ qu'ils cèdent aux atomes du réseau ne sert qu'à augmenter l'état d'agitation de ceux-ci, donc la température.

Ce phénomène s'appelle La thermalisation.

Ainsi tout photon d'énergie supérieure à 1.12 eV ne peut donner, au mieux, qu'une paire électron-trou, si bien que la région du spectre solaire où existe cet excès d'énergie n'est utilisée qu'en partie. On perd ainsi 33% de l'énergie totale incidente (zone 2 de

de la figure 3), cette énergie perdue étant transformée en chaleur.

fig 3

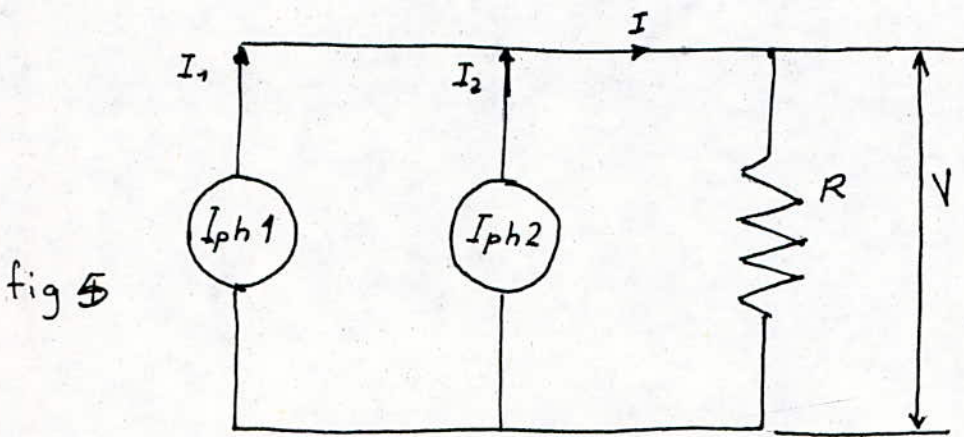


N.B : Ces considérations sur le bilan énergétique d'une cellule ne sont relatives qu'à l'énergie provenant du rayonnement. Pour une représentation énergétique plus conforme à la réalité. Il nous faut déterminer l'influence d'autres phénomènes relatifs à la charge de la cellule, suivant qu'elle est purement passive ne pouvant qu'absorber l'énergie ou bien une charge pouvant apporter de l'énergie à cette cellule.

IV Groupement de cellules:

En premier lieu il faut distinguer entre un groupement parallèle et un groupement série.

IV 1°) Groupement en parallèle de deux cellules



a) Cas de deux cellules identiques :

Deux cellules de même caractéristique génèrent chacune d'elle le même courant de court-circuit. soit pour le groupement le courant est $I = 2I_{ph}$ et pour la tension de circuit ouvert on a V_{co} (fig 5)

En groupant en parallèle plusieurs cellules le raisonnement sera le même (dans ce cas aucune des cellules ne fonctionne en récepteur)

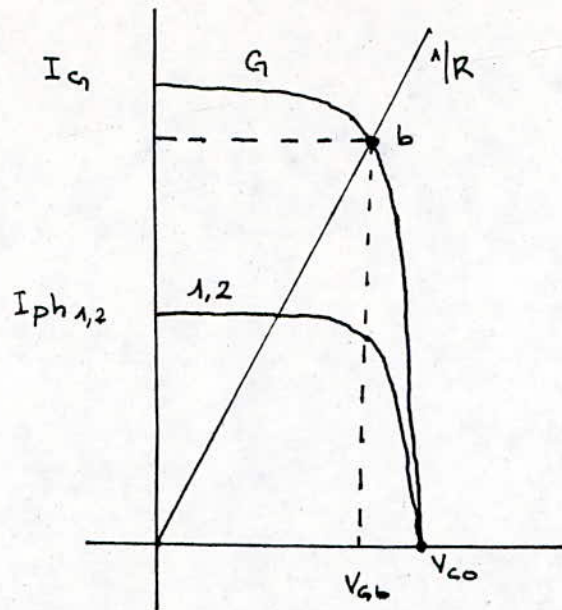


fig 6. Groupement en parallèles de deux cellules identiques

b) Cas de deux cellules non identiques :

(ou éclairées de manière différente)

Soit la cellule (2), la cellule la moins performante
 sa caractéristique est la courbe 2. Pour déterminer la
 courbe caractéristique du montage, il faut garder à
 l'esprit que la tension reste la même pour les deux
 cellules alors que les courants s'ajoutent .

- en court-circuit ; (le point a) on a

$$I_{Ga} = I_{ph1} + I_{ph2} \quad \text{et} \quad V_{Ga} = 0$$

- En circuit-ouvert ; (le point d) on a

$$I = 0 \quad \text{et} \quad V_{Gd} = V_{co}$$

I étant la somme des deux courants et les

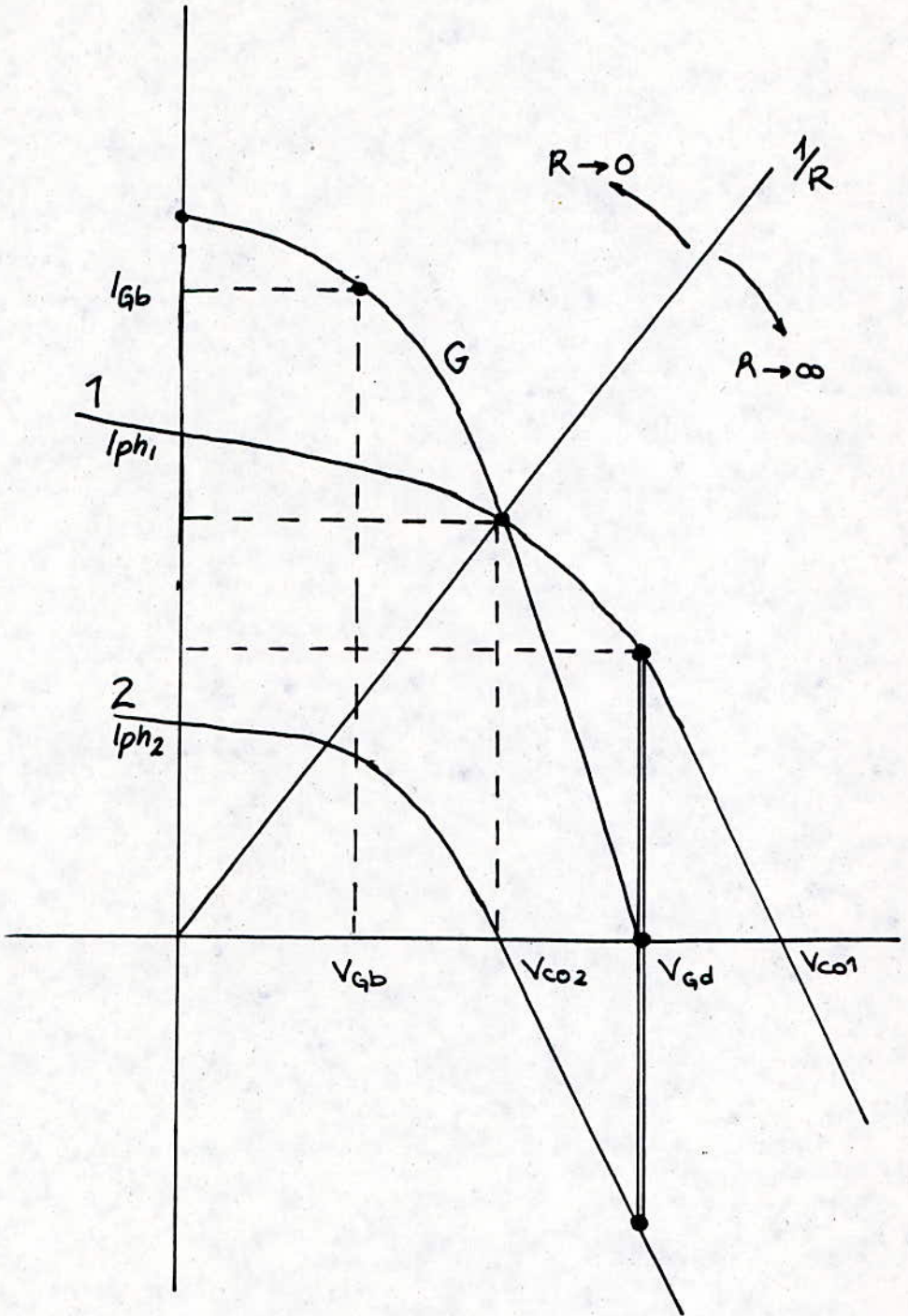


fig 76

cellules n'étant pas identiques, les courants I_1 et I_2 sont donc égaux mais de signes contraires, c-à-d la cellule (1) débite dans la cellule (2).

N.B : même dans le cas extrême où la cellule (2) est complètement occultée, il ne pourra pas lui être fourni plus de courant que ne peut en débiter la cellule (1), soit I_{ph1} .

- Le point (c) est un point de fonctionnement limite (correspondant à la tension de circuit-ouvert de la cellule occultée V_{co2} avec $I_{gc} = I_{c1}$). c-à-d la cellule (2) pourrait être supprimée, elle n'est ni générateur ni récepteur.

- Pour un point de fonctionnement (b) entre (a) et (c) correspondant à une tension V_{gb} sur la charge nous avons : $I_{gb} = I_{b1} + I_{b2}$

Les deux cellules travaillent alors en générateur.

Dans le cas de plusieurs cellules ou d'un groupement de panneaux en parallèles dont une cellule est occultée, le raisonnement reste le même. Mais cette fois la cellule occultée peut recevoir le courant délivré par tout le groupement et risque de se détériorer.

Ce déséquilibre se traduit en général par un échauffement et une modification du bilan énergétique.

IV 2°) Groupement de deux cellules en série :

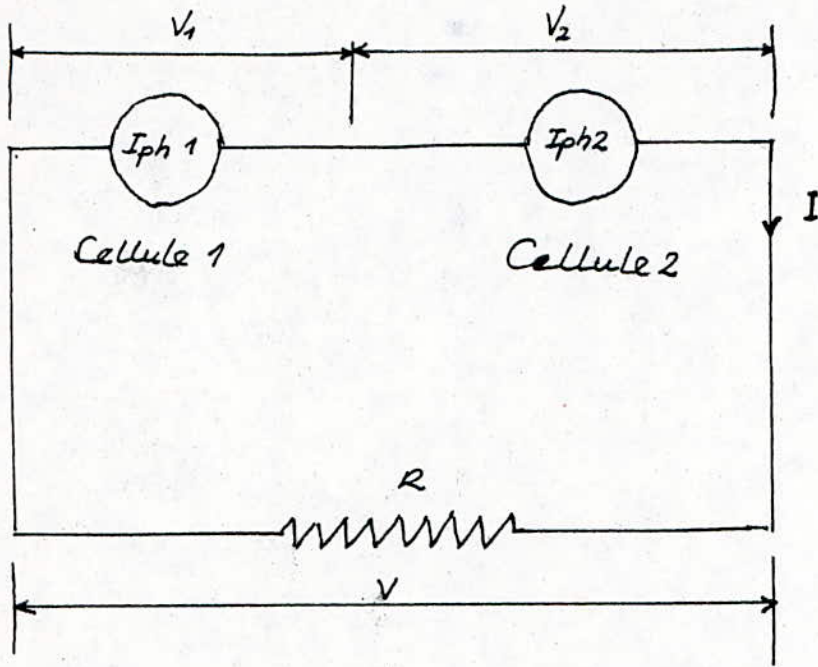


fig. 7.

N.B : Pour le groupement en série, les tensions s'ajoutent

a) Cas de deux cellules identiques :

Quand le montage est en circuit-ouvert le courant total I_a est nul, alors que la tension de circuit ouvert est égale à deux fois la tension d'une cellule

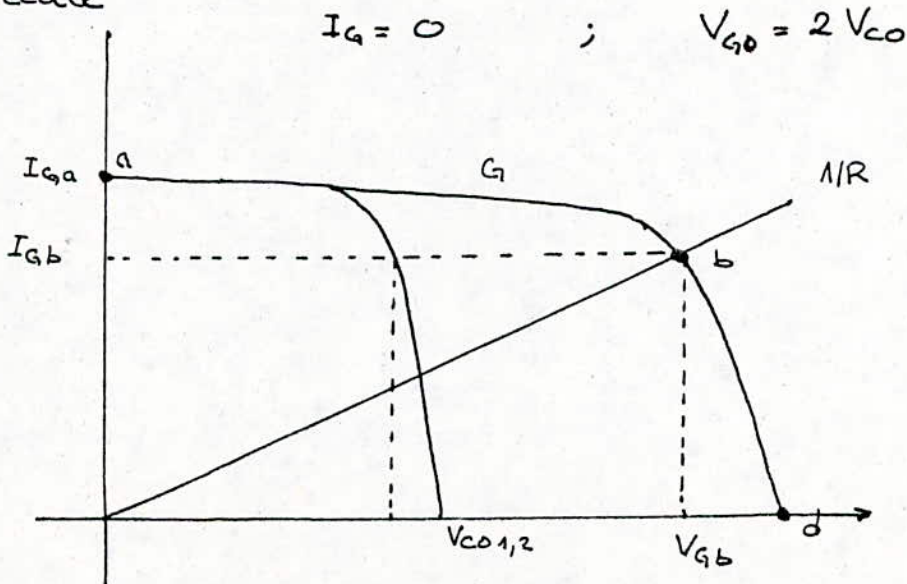


fig 8

Quand le montage est en court-circuit, le courant total I_{GA} est le même que le courant de chaque cellule, la tension aux bornes du générateur est nulle.

$$I_{GA} = I_{ph}$$

$$V_G = 0$$

Aucune des deux cellules ne peut fonctionner en récepteur.

b) cas de deux cellules non identiques : (fig 9)

La courbe (2) représente la caractéristique de la cellule la moins performante ($I_{ph1} > I_{ph2}$, $V_{co1} > V_{co2}$).

- En circuit-ouvert (point d) :

Le courant total est nul $I_G = 0$ alors que la tension de circuit-ouvert du montage V_{Gd} est la somme des tensions de circuit-ouvert de chaque cellule soit

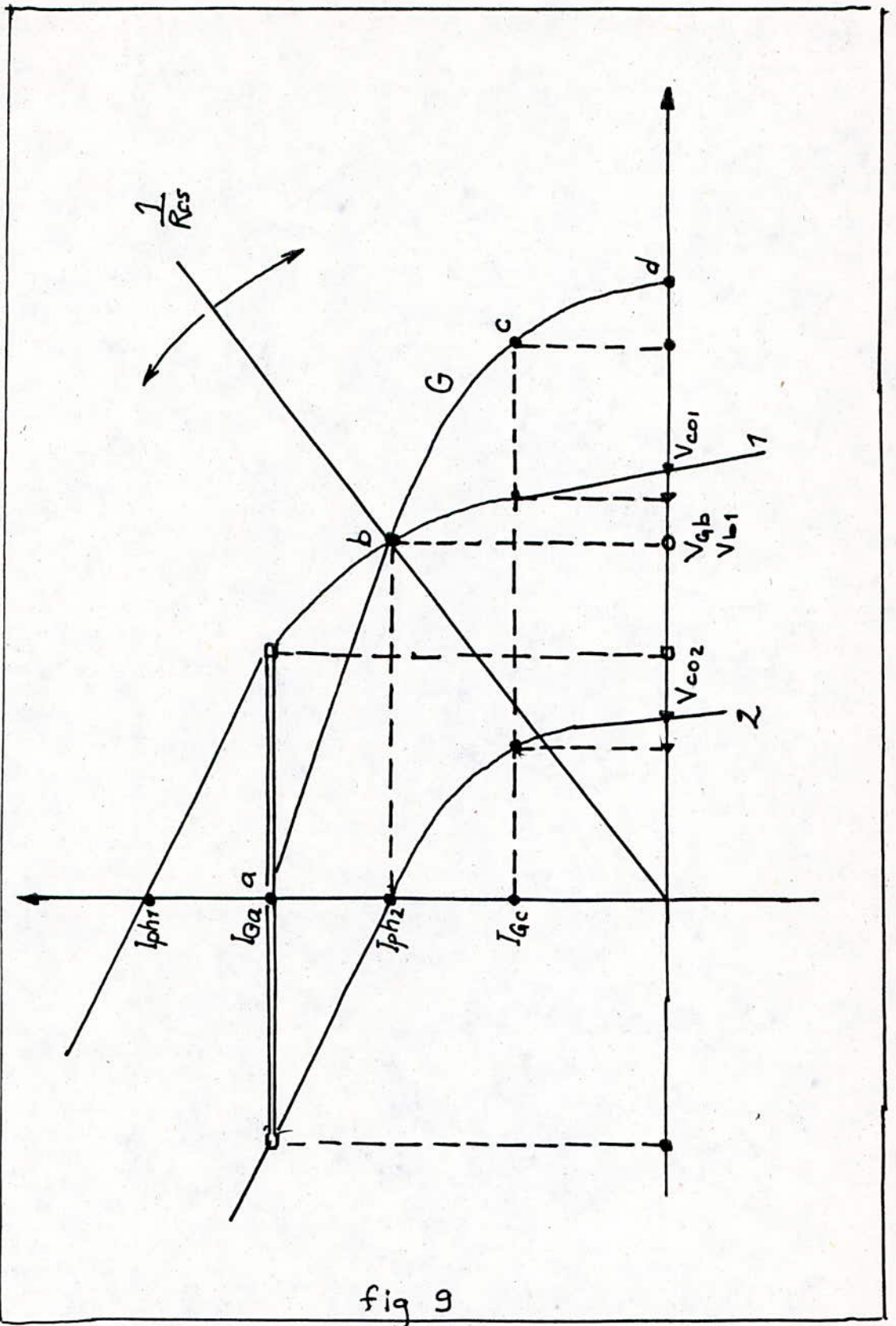
$$V_{Gd} = V_{co1} + V_{co2}$$

- Le point (b) : est un point de fonctionnement limite, correspondant au courant de court-circuit de la cellule la moins performante I_{ph2} . Alors que la tension aux bornes du montage V_G correspond à la tension aux bornes de la cellule (1)

$$V_{Gb} = V_{b1}$$

Pour une résistance inférieure, la cellule (2) passe en récepteur.

- Le point (a) : correspond au cas où la charge est nulle. Au courant de court-circuit I_{Ga} correspond



une tension totale nulle, les cellules n'étant pas identiques la tension aux bornes de la cellule (1) se retrouve aux bornes de la cellule (2) mais en polarité inverse ($V_2 = -V_1$). La cellule (2) travaille en récepteur.

N.B: même dans le cas extrême où la cellule (2) est complètement occultée, il ne pourra pas lui être appliquée une tension supérieure à celle que peut développer la cellule (1) soit V_{co1} .

→ Pour un point (c) entre les points (b) et (d) les deux cellules travaillent en générateur.

Dans le cas de plusieurs cellules ou d'un groupement de panneaux en série dont une cellule est occultée, le raisonnement reste le même. La tension de l'ensemble du système peut se retrouver aux bornes de la cellule occultée qui de ce fait s'échauffe. Cet échauffement a pour effet de modifier ses caractéristiques électriques et en conséquence le bilan énergétique.

CHAPITRE 2

Programmes de Simulation.

II.1 SIMULATION D'UN PANNEAU PHOTOWATT.

Dans cette première partie le modèle est tiré de l'étude faite par P. DIMAIO (1/1)

a. Présentation du panneau :

Le module BPX47A est constitué de 34 cellules photovoltaïques - au Silicium - rondes, d'un diamètre de 57 mm, montées en série. Les cellules solaires et les connexions électriques sont montées dans une résine comprise entre deux plaques de verre.

Les caractéristiques électriques données par le constructeur :

Température (°C)	0	25	60
Puissance optimale (W)	12	11	9.7
Tension optimale (V)	18	15.5	14.3
Courant optimal (mA)	665	700	680
V_{co} (V)	22.2	20.5	18.2
I_{cc} (mA)	700	720	740

b. Détermination des paramètres α, β, γ :

Pour pouvoir simuler le fonctionnement d'un panneau solaire, il faut tout d'abord simuler le fonctionnement d'une cellule et pour cela déterminer trois paramètres décrivant l'équation correspondant

à la courbe caractéristique de la cellule - en polarité direct -

En effet pour représenter la courbe caractéristique d'une cellule, il faut deux équations relativement complexes qui correspondent aux deux polarisations directe et inverse de la jonction.

b.1 Polarité directe :

$$I = \alpha \phi s - \beta s (\exp \delta (V + \delta I) - 1) \quad V > \delta I \quad (\text{II.1})$$

s : surface de la cellule .

α : caractérise l'apparition du photocourant (influence de la couche anti-reflet comprise)

β, δ : traduisent les phénomènes de courant de recombinaison dans la zone de la charge d'espace, (phénomène prédominant dans la jonction p.n de grande surface)

δ : résistance série de la plaquette et des contacts .

b.2 Polarité inverse :

$$I = \alpha \phi s + \lambda s (|V + \delta I|)^2 \quad V < \delta I \quad (\text{II.2})$$

λ : est lié aux courants de recombinaison (en polarité inverse).

b.3 Détermination de α :

$$\alpha(T) = 2.5 \times 10^{-4} \times T + 0.224 \quad (\text{A.W}^{-1})$$

b.4 Détermination de γ :

Contrairement à la théorie classique des jonctions p.n qui propose, pour un courant direct de diode une loi de variation en $\frac{eV}{kT}$, cette dernière correspond en réalité à une expression de la forme $\frac{eV}{2kT}$. Physiquement cette loi correspond à une prédominance des phénomènes de génération recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction d'où.

$$\gamma(T) = \frac{5800}{T} \quad (\text{V}^{-1})$$

b.5 Détermination de β :

L'expression du courant direct de la diode

$$I_D(V_j) = \beta S (\exp \gamma(V + \delta I) - 1)$$

donne - après approximation -

$$\text{Log} \left(\frac{I}{\beta S} \right) = \gamma V$$

d'où

$$\beta(T) = \exp(T \times 7.42 \times 10^{-2} - 28.28) \quad (\text{A.m}^2)$$

Tous ces paramètres sont caractéristiques, entre autre du matériau utilisé pour réaliser la cellule, du type de jonction et de la nature des contacts electrode-jonction.

c. Présentation du programme:

Le programme (page 34) permet de visualiser sur écran ou sur table traçante, l'influence de la température ou celle du flux sur le fonctionnement d'une cellule ou d'un panneau. Le programme permet de donner aussi la caractéristique avec le point de fonctionnement optimal. Voir les différentes courbes.)

fig 10 caractéristique d'une cellule BPX47A avec le point de fonctionnement optimal.

fig 11 influence de la température sur le fonctionnement d'un panneau $\Phi = 1000 \text{ W/m}^2$

fig 13 influence du flux sur le fonctionnement d'un panneau. $T = 60^\circ$

fig 15 idem pour $T = 0^\circ$

Une comparaison des courbes obtenues avec ceux du constructeur montre une bonne concordance quant aux valeurs de circuits-ouvert mais un écart pour les valeurs de ~~circuit~~ court-circuit, et c'est dû au choix de la résistance série R qui est prise égale à 0.2Ω dans ce programme.

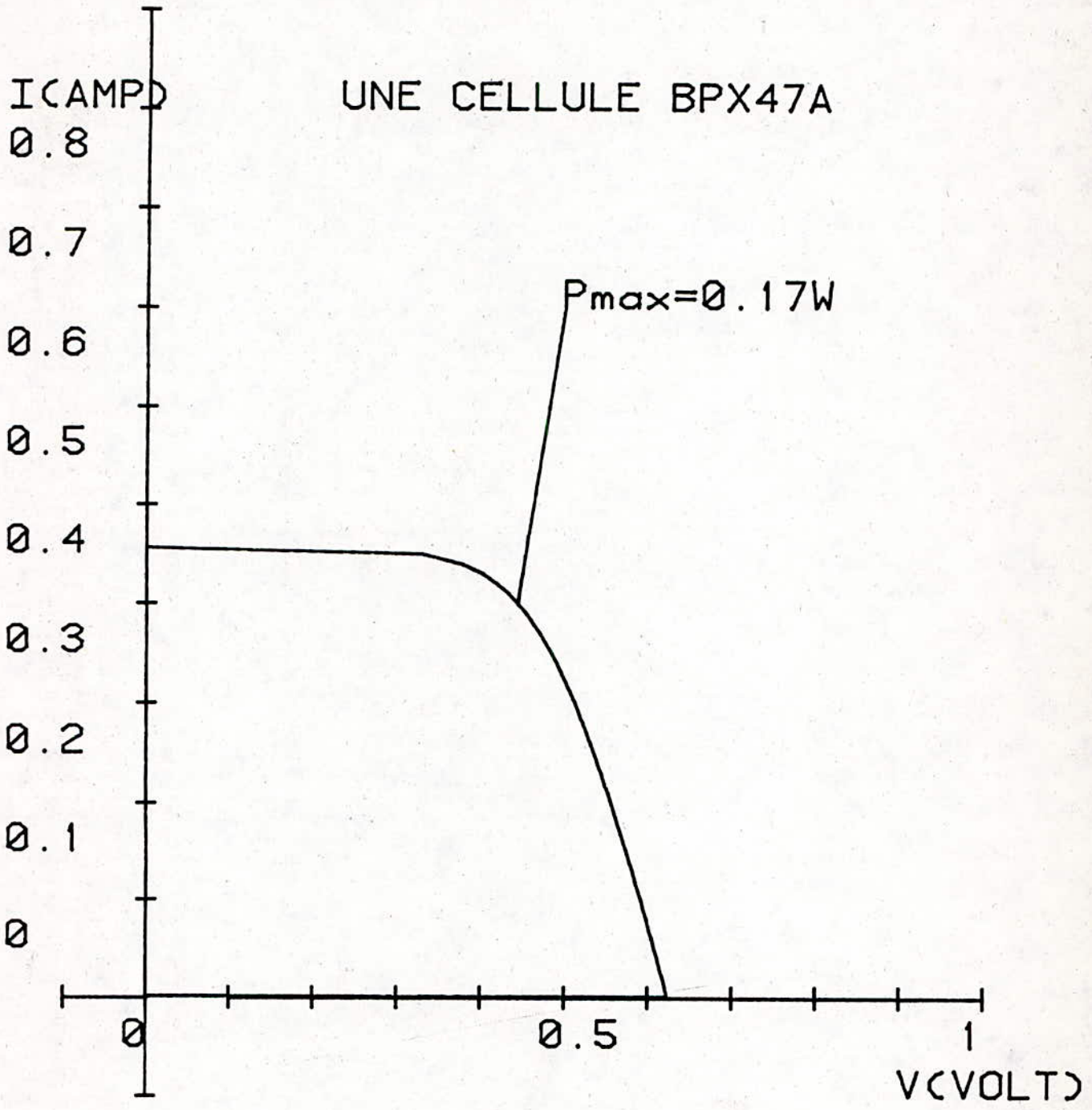
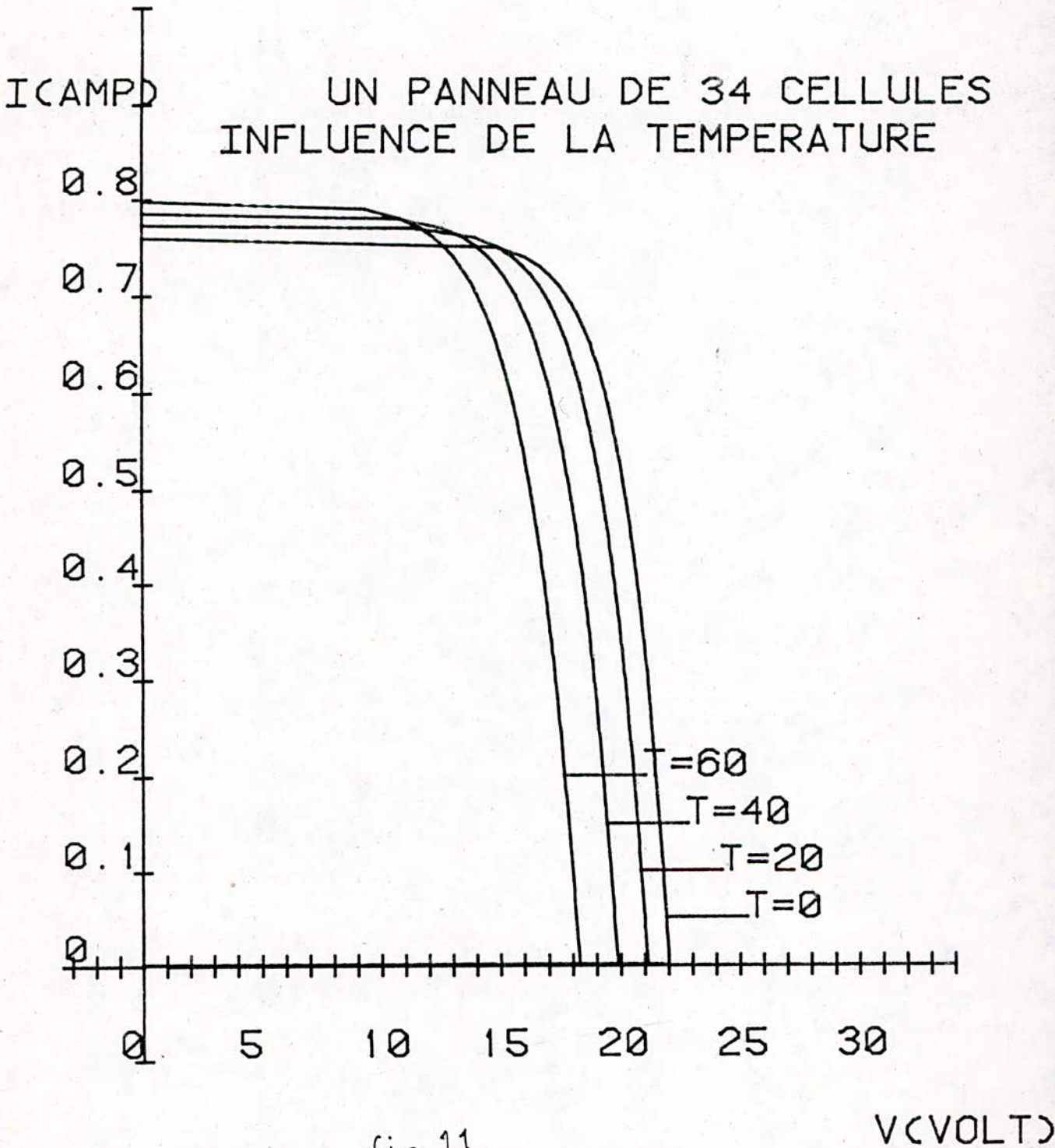


fig 10



- fig 11 -

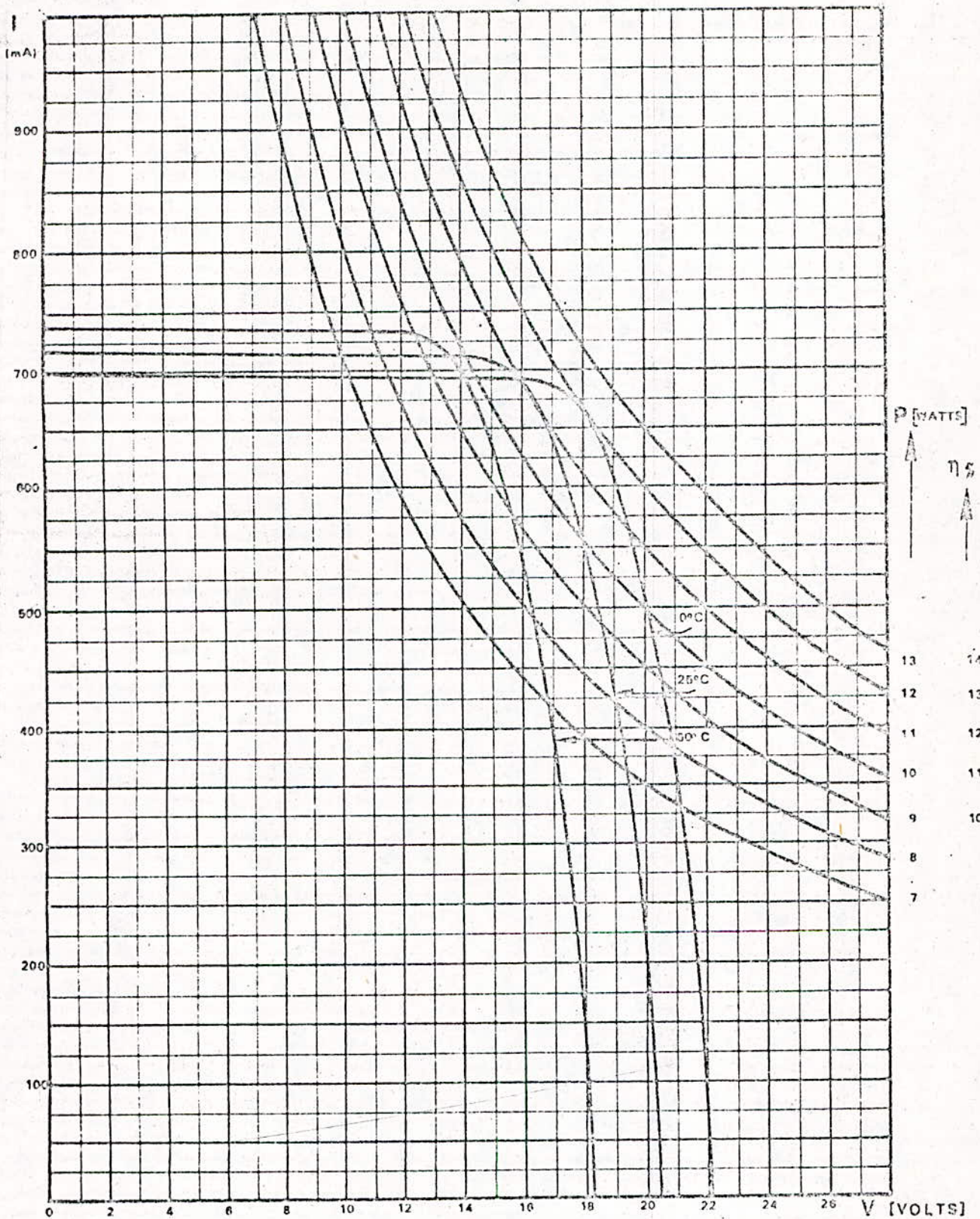
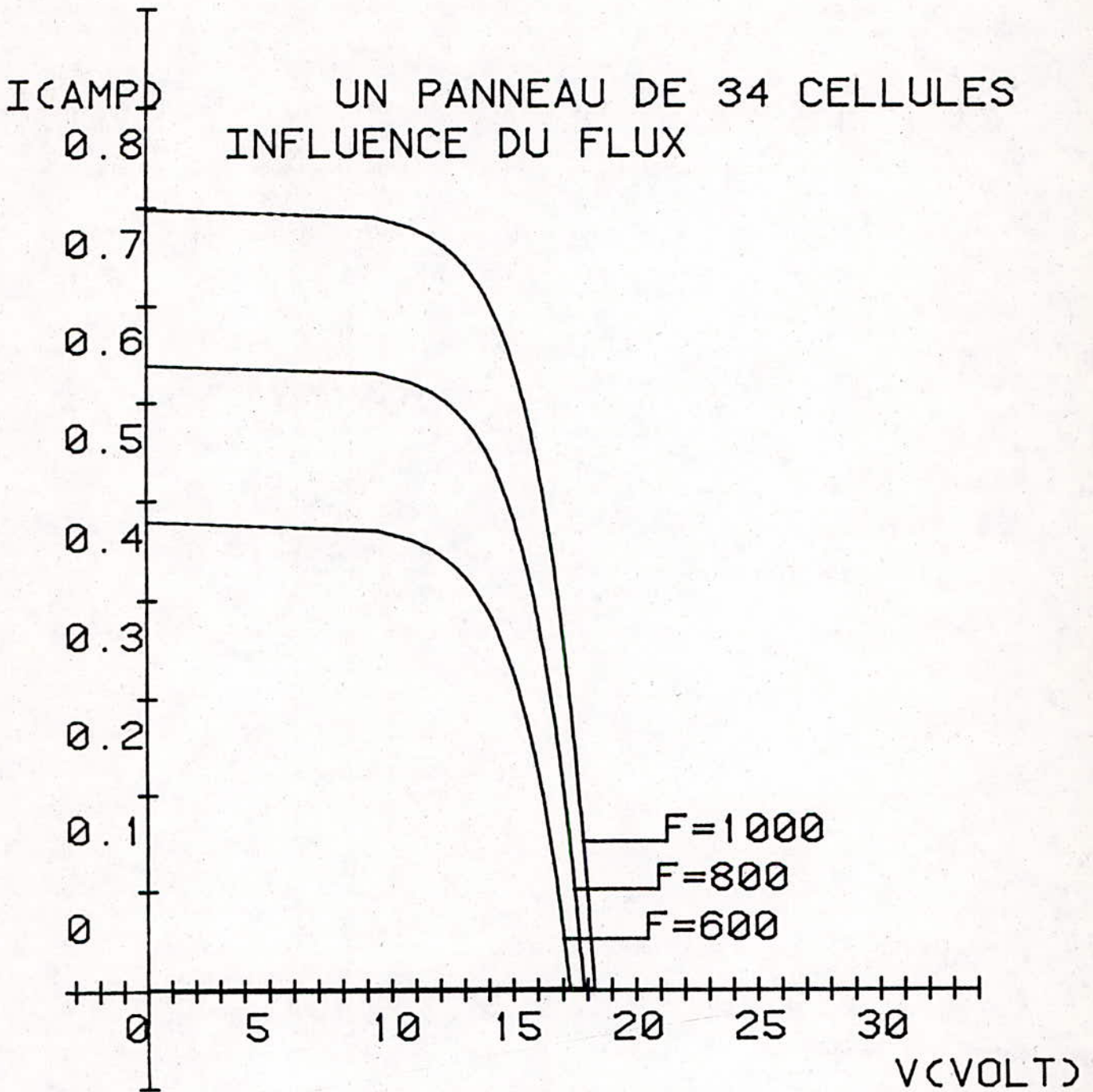


Figure III. 12.

Caractéristiques d'un panneau RTC
à flux lumineux constant ($\phi_S = 1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) pour
différentes températures (courbes constructeur)



$T = 60^\circ$

- fig 3 -

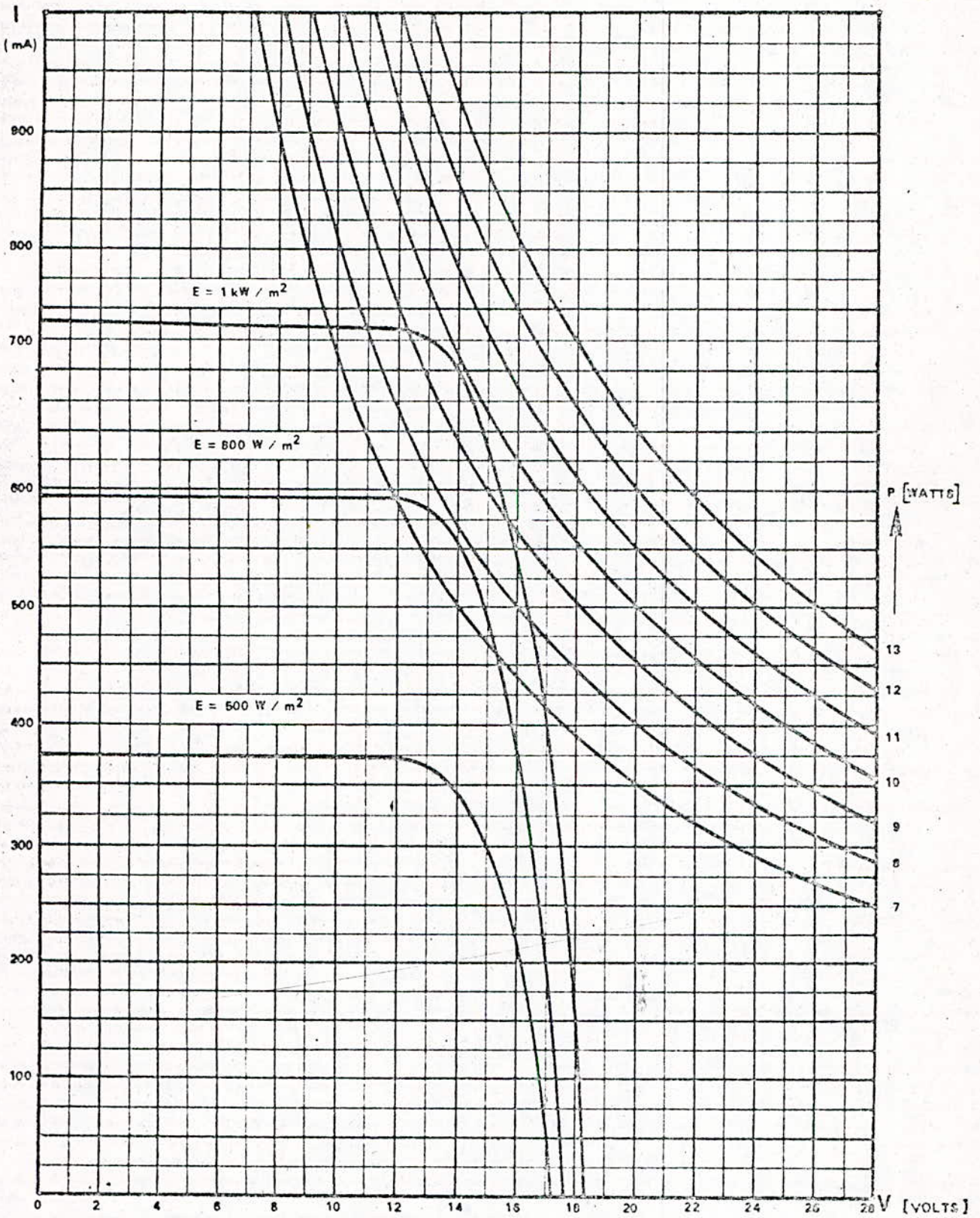
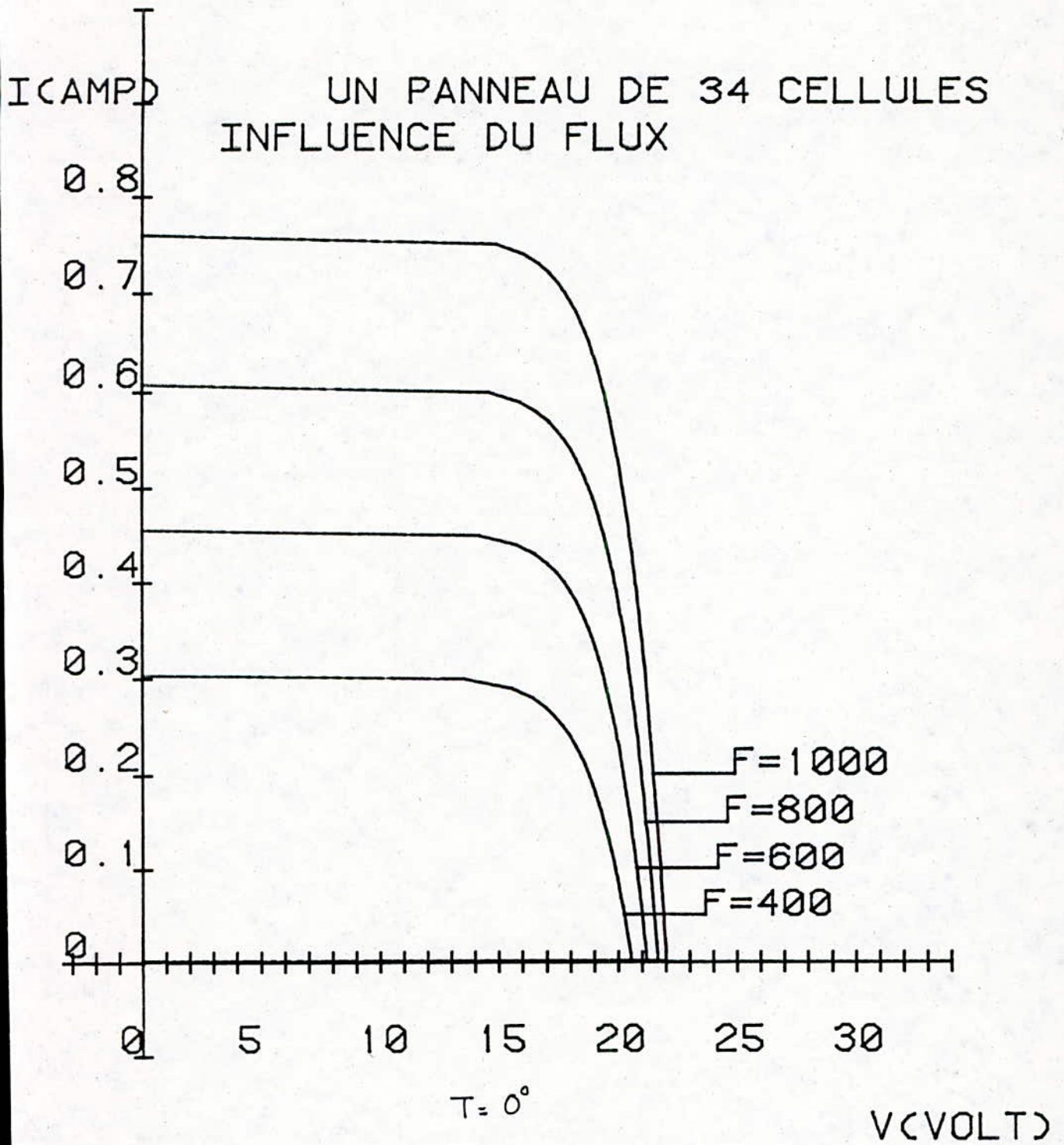


Figure ~~III~~.10.

Caractéristiques d'un panneau RTC à température constante ($T = 60^{\circ} \text{C}$) pour différents ensoleillements (courbes constructeur)



- Fig 15 -

```

1  ! PROGRAMME DE SIMULATION D'UN PANNEAU BPX47A
5  PAGE
10 Pmax=0
20 Vmax=0
30 Iax=0
40 R=0.2
45 Ecr=0
50 DIM Z(3)
60 DIM R$(3)
65 DIM L$(32)
100 PRINT " VOUS VOULEZ VISUALISER SUR ECRAN           32  "
105 PRINT " OU UTILISER LA TABLE TRACANTE           1  "
110 INPUT Per
115 IF Per<>32 AND Per<>1 THEN 110
120 PRINT
121 PRINT
123 PRINT "AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA"
127 PRINT
128 PRINT
129 PRINT " LA CARACTERISTIQUE      D'UNE CELLULE   BPX47A   1"
130 PRINT "OU   CELLE D'UN PANNEAU                               34"
135 INPUT C
137 IF C<>1 AND C<>34 THEN 135
140 S=0.0026
145 PRINT "VOUS VOULEZ ETUDIER L'INFLUENCE DE: "
150 PRINT " LA TEMPERATURE           1"
155 PRINT " LE FLUX                   2"
160 PRINT " AUCUN                     3"
165 INPUT L
170 IF L=0 OR L>3 THEN 165
175 IF L=3 THEN 200
178 PRINT "LE PAS DE VOTRE ETUDE"
180 INPUT P
182 Z(L)=P
200 PRINT "AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA"
205 PRINT "AAAA INTRODUISEZ VOS DONNEES      S.V.P      AAAAAAAAAAAAA"
210 PRINT "AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA"
215 PRINT
217 PRINT
218 PRINT
220 PRINT "LA TEMPERATURE           (Dg Celsius)";
225 INPUT T

```



```
228 T=T+273
230 PRINT "LE FLUX (W/M2) ";
235 INPUT F
236 PAGE
237 VIEWPORT 10,70,15,85
240 WINDOW -0.1*C,C,-0.1,1
242 IF C=34 THEN
243     Pas=1
245 ELSE
246     Pas=0.1
248 END IF
250 AXIS @Per:Pas,0.1
255 GOSUB 900
260 ! LABEL DE L'AXE HORIZONTAL
270 H$="V(VOLT)"
280 MOVE @Per:C,-0.1
290 PRINT @Per:"JJ";
300 FOR I=1 TO LEN(H$)/2
310     PRINT @Per:"H";
320 NEXT I
330 PRINT @Per:H$;
340 ! LABEL DE L'AXE VERTICAL
350 V$=" I(AMP)"
360 MOVE @Per:-0.1*C,0.9
365 FOR I=1 TO LEN(V$)/2
370     PRINT @Per:"H";
380 NEXT I
390 PRINT @Per:V$;
395 GOSUB 3000
400 ! GRADUATION DE L'AXE DES X
410 FOR I=0 TO C STEP Pas*5
420     MOVE @Per:I+0.04*C,-0.05
430     PRINT @Per:"HHJ";I;
440 NEXT I
450 ! GRADUATION DE L'AXE DES Y
460 FOR I=0 TO 0.8 STEP Pas 0.1
470     MOVE @Per:-Pas,I+0.05
480     PRINT @Per:"HHJ";I;
490 NEXT I
495 HOME
500 ! FIN DE LA PRESENTATION
510 A=T*2.5E-4+0.224
520 B=EXP(T*0.074-28.28)
530 G=5800/T
540 GOSUB 1000
550 DEF FNV(I)=(A*F*S-I)/(B*S)-1
```



```
600      !                S.P GRAPHIQUE
605 MOVE @Per:0,0
610 FOR Q=0 TO 2 STEP 0.01
620     GO TO 2000
635     DRAW @Per:Y,Q
640 NEXT Q
660 DRAW @Per:0,X3
689 HOME
699 IF L<>3 THEN 800
700 MOVE @Per:Vmax,Iax

710 DRAW @Per:0.5*C,0.7
730 PRINT @Per:"Pmax=";INT(Pmax);"W"
735 HOME
740 PRINT "SI VOUS VOULEZ LES PARAMETRES : ALPHA, BETA, GAMMA 1"
750 PRINT "SI NON 0"
755 INPUT Es
760 IF Es=0 THEN 780
770 GOSUB 9000
780 STOP
800      !*** SUITE
830 Ecr=Ecr+0.05
835 O=FNV(Ecr)
840 Ecrv=C*LOG(O)/B-R*Ecr
845 MOVE Ecrv,Ecr
850 DRAW @Per:Ecrv+C*0.1,Ecr
855 PRINT @Per:R#;Pat
860 Pat=Pat+Z(L)
865 IF L=1 THEN
866     T=T+Z(1)
867 ELSE
868     F=Pat
869 END IF
870 HOME
875 PRINT "VOUS VOULEZ CONTINUER 1 "
880 PRINT "          OU ARRETER 0 "
885 INPUT Suit
890 IF Suit=1 THEN 500
895 STOP
900 IF L=1 THEN      ! TITRE
910     L#="INFLUENCE DE LA TEMPERATURE"
920     R#="T="
930     Pat=T-273
940 ELSE
950     L#="INFLUENCE DU FLUX"
960     R#="F="
970     Pat=F
```



```
990 RETURN
9800END!IF
1013 DEF FNY(I)=A*F*S-B*S*(EXP(G*R*I)-1)
1015 X1=0
1020 X2=FNY(X1)
1030 Dt=(FNY(X2)-X2)/(X2-X1)
1040 At=1/(1-Dt)
1050 X3=X2-At*(FNY(X2)-X2)
1060 IF ABS(X3-X2)<1.0E-8 THEN 1100
1070 X1=X2
1080 X2=X3
1090 GO TO 1020
1100 RETURN
```

S.P CALCUL DE ICC

```
1990 !
2000 Q=FNV(Q)
2010 IF Q<0 THEN 660
2020 Y=C*LOG(Q)/G-R*Q
2025 IF Y<0 THEN 660
2030 P=Q*Y
2032 IF P<Pmax THEN 2100
2035 Iax=Q
2038 Vmax=Y
2040 Pmax=P
2100 GO TO 635
2505 FOR I=1 TO 3
2510 P(I)=0
2520 NEXT I
2530 RETURN
```

S.P DETERMINANT LES COORDONNEES

```
3000 !
3005 MOVE @Per:C*0.2,0.9
3007 IF C=1 THEN
3010 PRINT @Per:" UNE CELLULE BPX47A"
3020 ELSE
3030 PRINT @Per:" UN PANNEAU DE 34 CELLULES"
3040 END IF
3050 MOVE @Per:C*0.1,0.85
3060 PRINT @Per:L$
3070 RETURN
```

TITRE

2. SIMULATION D'UN PANNEAU.

Dans cette deuxième partie, les paramètres α , β et δ sont déterminés à partir de trois points pris des courbes, tirées d'études précédentes. (/ 2.3 /)

A partir de l'équation (II.1), on tire trois équations respectivement pour les points.

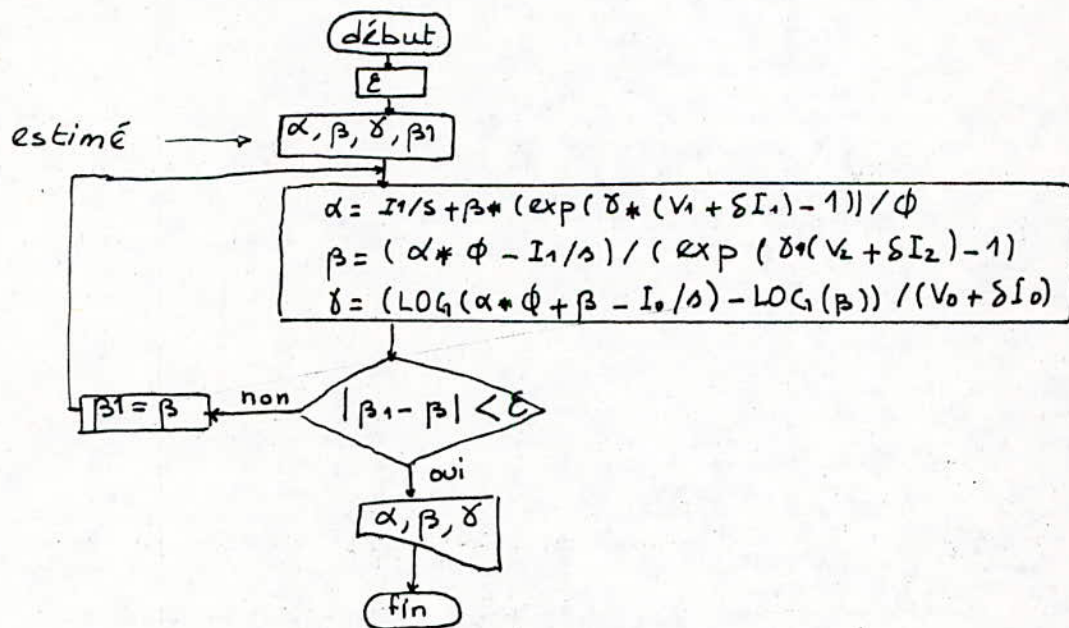
- circuit ouvert : $(V_2, I_2=0)$
- court-circuit : $(V_1=0; I_1=I_{cc})$
- point quelconque : $(V_0; I_0)$

$$\alpha = (I_1/s + \beta * (\exp(\delta * (V_1 + \delta I_1)) - 1)) / \phi$$

$$\beta = (\alpha * \phi - I_2/s) / (\exp(\delta * (V_2 + \delta I_2)) - 1)$$

$$\delta = (\text{LOG}(\alpha * \phi + \beta - I_0/s) - \text{LOG}(\beta)) / (V_0 + \delta I_0)$$

a. méthode de résolution du système (d'équations)



Organigramme de la méthode de Gauss-Seidel

Pour notre cas la méthode de Gauss-Seidel est absolument convergente à condition de respecter le choix des points (V_0, I_0) , (V_1, I_1) et (V_2, I_2) .

Dans le programme elle est représentée par le sous-programme 9000

b. Présentation du panneau :

C'est un module de trente six (36) cellules carrés de 9 cm² de surface chacune. Le constructeur donne pour $T = 45^\circ \text{C}$ et $\phi = 1000 \text{ W/m}^2$

Puissance optimale : $P_{\text{max}} = 43 \text{ W}$

Courant de court-circuit : $I_{\text{cc}} = 2.7 \text{ A}$

Tension de circuit-ouvert : $V_{\text{co}} = 21 \text{ V}$

c. Présentation du programme :

Le programme permet de tracer la caractéristique de n_p groupements en parallèle de n_s panneaux en série en donnant le point de fonctionnement optimal.

Les figures 16 et 17 donnent un aperçu sur ces caractéristiques.

Il faut remarquer que du fait que les paramètres α , β et γ sont déterminés à partir d'une caractéristique à une température donnée, on ne peut varier dans ce programme que le facteur flux

Une étude plus poussée sur le panneau ARCO-SOLA permettra de donner les paramètres α , β , γ variant en fonction de la température.

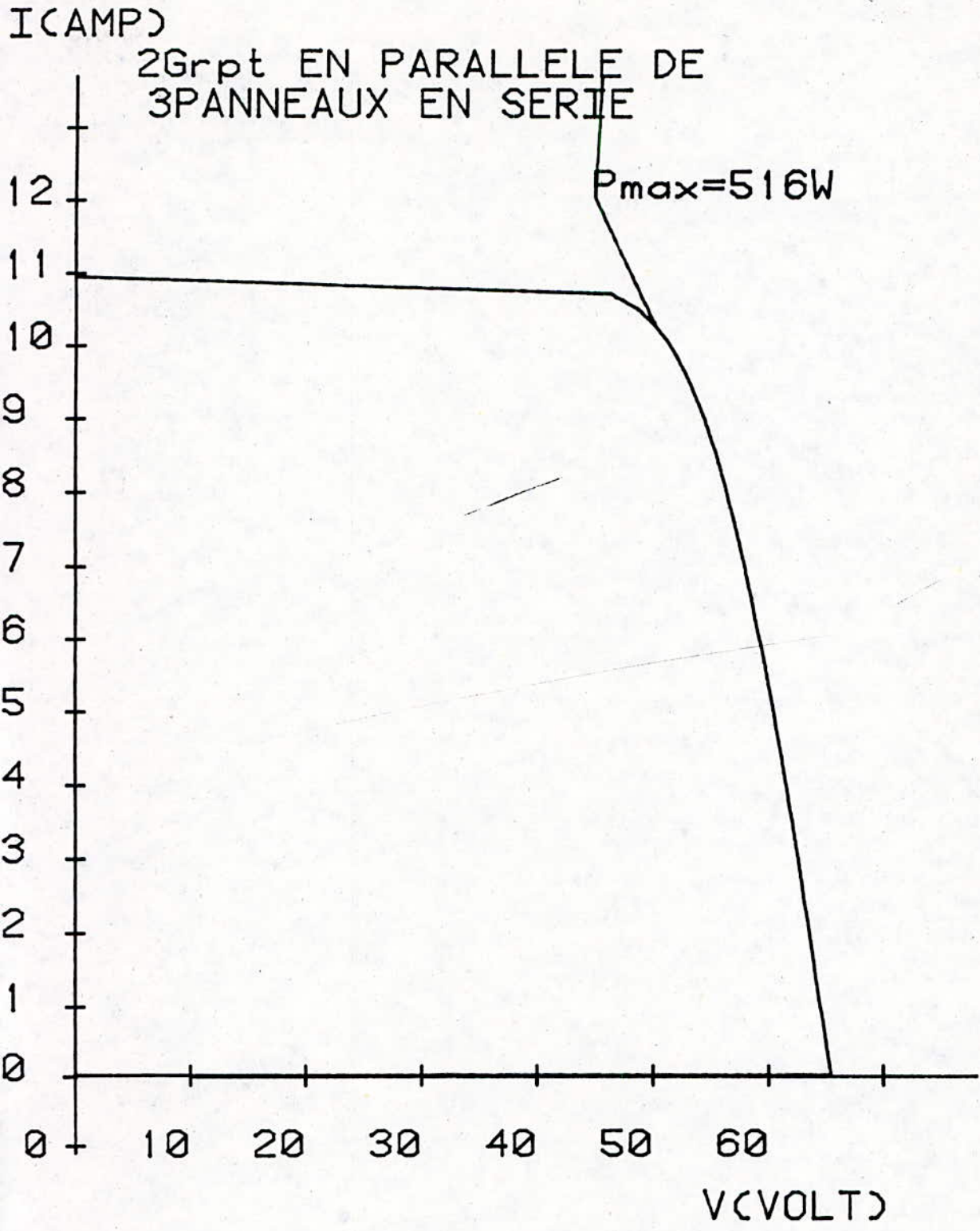


fig 16

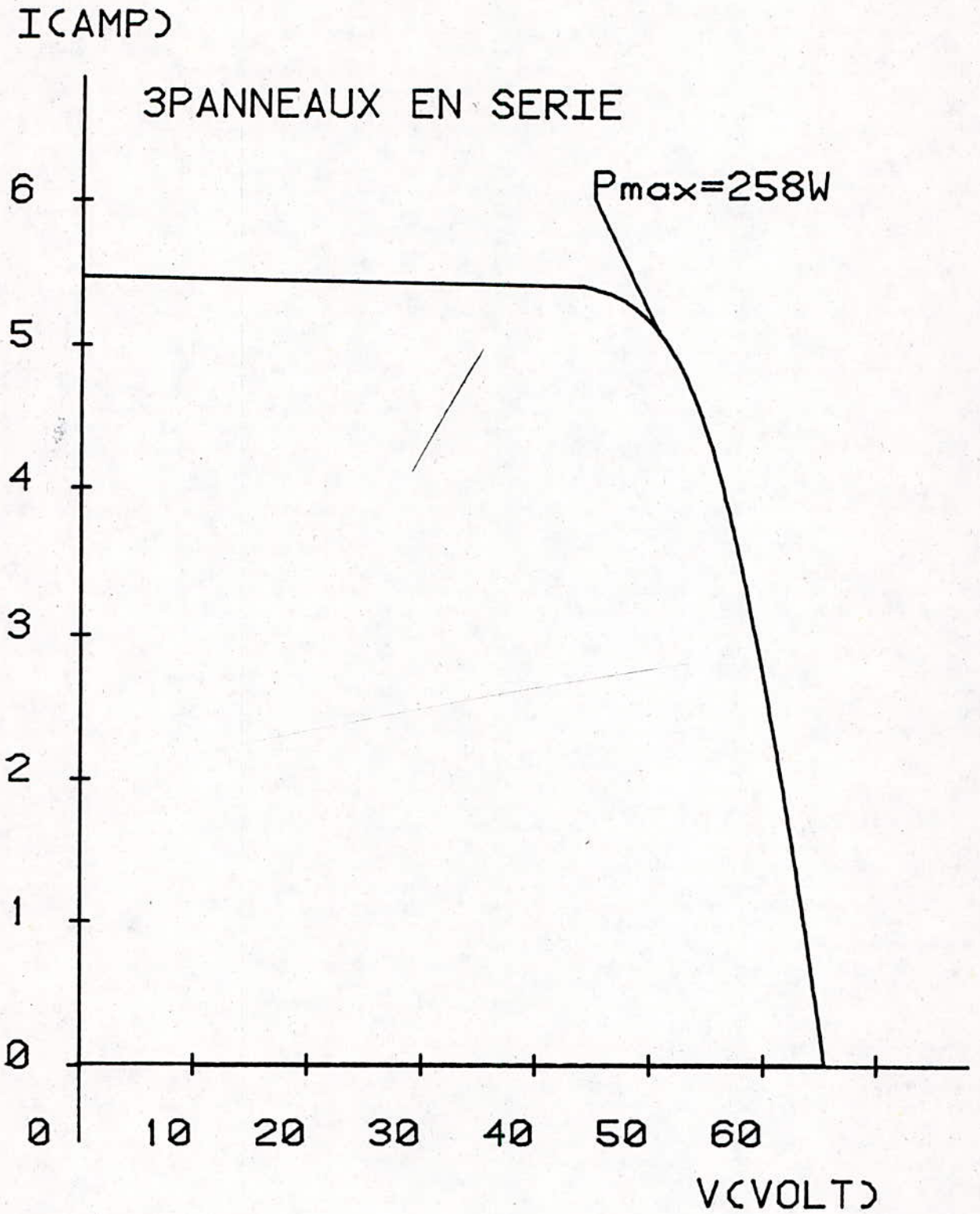


fig 17

```
10 Fmax=0
20 Vmax=0
30 Iax=0
40 R=0.4
50 S=0.33
119 PRINT "AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA"
120 PRINT "AAAAAAA  INTRODUISEZ VOS DONNEES S.V.P          AAAAAAA"
123 PRINT "AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA"
125 PRINT
127 PRINT
128 PRINT
130 PRINT " LA TEMPERATURE                               (Dg Celsius)";
135 INPUT T
140 T=T+273
150 PRINT " LE FLUX                                     (W/M2)          ";
155 INPUT F
160 PRINT " LE COURANT DE COURT-CIRCUIT                (V)              ";
165 INPUT Icc
170 PRINT " LA TENSION A VIDE                                (V)              ";
175 INPUT Vco
180 PRINT " NOMBRE DE PANNEAU EN SERIE                          ";
185 INPUT Ns
190 PRINT " NOMBRE DE GROUPEMENT (EN PARALLELE)                ";
195 INPUT Np
200 !PRESENTATION DE L'ECRAN
210 PAGE
220 GOSUB 1000
225 X3=X3*Np
230 VIEWPORT 10,70,15,85
240 WINDOW -1,Ns*(Vco+6),-0.1*X3,X3*1.25
242 IF X3>1 THEN
243   Pas=1
245 ELSE
246   Pas=0.1
248 END IF
250 AXIS @1:10,Pas
260 ! LABEL DE L'AXE HORIZONTAL
270 H#="V(VOLT)"
280 MOVE @1:Ns*(Vco+0.5),X3*-0.075
290 PRINT @1:"JJ";
300 FOR I=1 TO LEN(H#)/2
```



```
300 FOR I=1 TO LEN(H#)/2
310   PRINT @1:"H";
320 NEXT I
330 PRINT @1:H#;
340   ! LABEL DE L'AXE VERTICAL
350 V#=" I(AMP)"
360 MOVE @1:-1,X3*1.3
365 FOR I=1 TO LEN(V#)/2
370   PRINT @1:"H";
380 NEXT I
390 PRINT @1:V#;
395 GOSUB 3000
400   ! GRADUATION DE L'AXE DES X
410 FOR I=0 TO Ns*(Vco+3) STEP 10
420   MOVE @1:I+0.4,-X3*0.05
430   PRINT @1:"HHJ";I;
440 NEXT I
450   ! GRADUATION DE L'AXE DES Y
460 FOR I=0 TO X3*1.1 STEP Pas
470   MOVE @1:-1.5,I+0.05*X3
480   PRINT @1:"HHJ";I;
490 NEXT I
495 HOME
500   ! FIN DE LA PRESENTATION
550 DEF FNV(I)=(A*F*S-I)/(B*S)-1
600   ! S.P GRAPHIQUE
605 MOVE @1:0,0
610 FOR Q=0 TO X3*2 STEP X3*0.01
620   GO TO 2000
635   DRAW @1:Y,Q1
640 NEXT Q
660 DRAW @1:0,X3
689 HOME
700 MOVE @1:Vmax,Iax
710 DRAW @1:Ns*(Vco-5),X3*1.1
730 PRINT @1:"Pmax=";INT(Pmax);"W"
740 PRINT "SI VOUS VOULEZ LES PARAMETRES : ALPHA, BETA, GAMMA 1"
750 PRINT "SI NON 0"
755 INPUT L
760 IF L=0 THEN 780
770 GOSUB 9000
780 STOP
```

1000 ! S.P CALCUL DE ICC

1002 A=0.0083
1003 B=2.6E-8
1004 G=0.93
1013 DEF FNY(X)=A*F*S-B*S*(EXP(G*R*X)-1)
1015 X1=0
1020 X2=FNY(X1)
1030 Dt=(FNY(X2)-X2)/(X2-X1)
1040 At=1/(1-Dt)
1050 X3=X2-At*(FNY(X2)-X2)
1060 IF ABS(X3-X2)<1.0E-8 THEN 1100
1070 X1=X2
1080 X2=X3
1090 GO TO 1020
1100 RETURN

1990 ! S.P DETERMINANT LES COORDONNEES

2000 O=FNV(Q)
2005 Q1=Q*Np
2010 IF O<0 THEN 660
2020 Y=N5*(LOG(O)/G-R*Q)
2025 IF Y<0 THEN 660
2030 P=Q1*Y
2032 IF P<Pmax THEN 2100
2035 Iax=Q1
2038 Vmax=Y
2040 Pmax=P
2100 GO TO 635

3000 ! TITRE

3005 MOVE @1:3,X3*1.25
3007 IF Np=1 THEN 3020
3010 PRINT @1:Np;"Grpt EN PARALLELE DE";
3015 MOVE @1:4,X3*1.2
3020 IF N5=1 THEN 3040
3030 PRINT @1:N5;"PANNEAUX EN SERIE";
3040 RETURN
3050 PRINT @1:"1 PANNEAU"
3060 RETURN


```
8999      !                               S.P DE CALCUL DE ALPHA,BETA,GAMMA
9000 I1=X3
9005 PAGE
9010 Eps=1.0E-100
9020 V1=0
9030 I2=0
9040 V20=FNV(0)
9045 V2=Ns*LOG(V20)/G
9050 PRINT "DONNER UNE VALEUR NON PARTICULIERE "
9060 PRINT " LE COURANT ";
9070 INPUT IO
9080 PRINT " LA TENSION ";
9090 INPUT VO
9100 Beta=1.0E-5
9110 Alpha=0.5
9120 Gamma=1
9130 Beta1=Beta
9140 Cst1=V1+R*I1
9150 Cst2=V2+R*I2
9160 Cst0=VO+R*IO
9200 Alpha=(I1/S+Beta*(EXP(Gamma*Cst1)-1))/F
9210 Beta=(Alpha*F-IO/S)/(EXP(Gamma*Cst0)-1)
9220 Gamma=(LOG(Alpha*F+Beta-I2/S)-LOG(Beta))/Cst2
9225 IF ABS(Beta-Beta1)<Eps THEN 9260
9230 Eps=Eps*10
9240 Beta1=Beta
9250 GO TO 9200
9260 PRINT "ALPHA= ";Alpha
9270 PRINT "BETA = ";Beta
9275 PRINT "GAMMA= ";Gamma
9300 Fmax=0
```

CHAPITRE 3

Application

Dans ce troisième chapitre, la charge à simuler est un moteur à courant continu (pompe), mais la difficulté majeure rencontrée était la modélisation de cette charge, vu que la caractéristique $I = f(V)$ est rarement mentionnée dans les ouvrages.

Une étude expérimentale (18) faite sur moteur à courant continu (à moteur à aimant modèle CEM-MF19) a permis le tracé de la caractéristique $I = f(V)$ - fig 18 - à différentes vitesses de rotation (N étant pris comme paramètre)

N (t/mn)	600	900	1200	1500	1800	2100	2280
N (t/s)	10	15	20	25	30	35	38
I (A)	2.3	3.0	3.8	5.0	6.5	8.0	8.9
V (V)	10.7	20.7	30.4	40.2	50.1	60.0	65.7

N (t/mn)	2400	2520	2640	2700	2760	2820	2880
N (t/s)	40	42	44	45	46	47	48
I (A)	9.6	11.2	13.5	14.8	16.4	18.0	20.0
V (V)	69.3	73.3	77.6	79.9	82.2	84.6	87.1

Courbe de fonctionnement theorique
du groupe moteur-pompe

- points obtenus par eq.3.79
- ⊙ points obtenus par eq.2.74

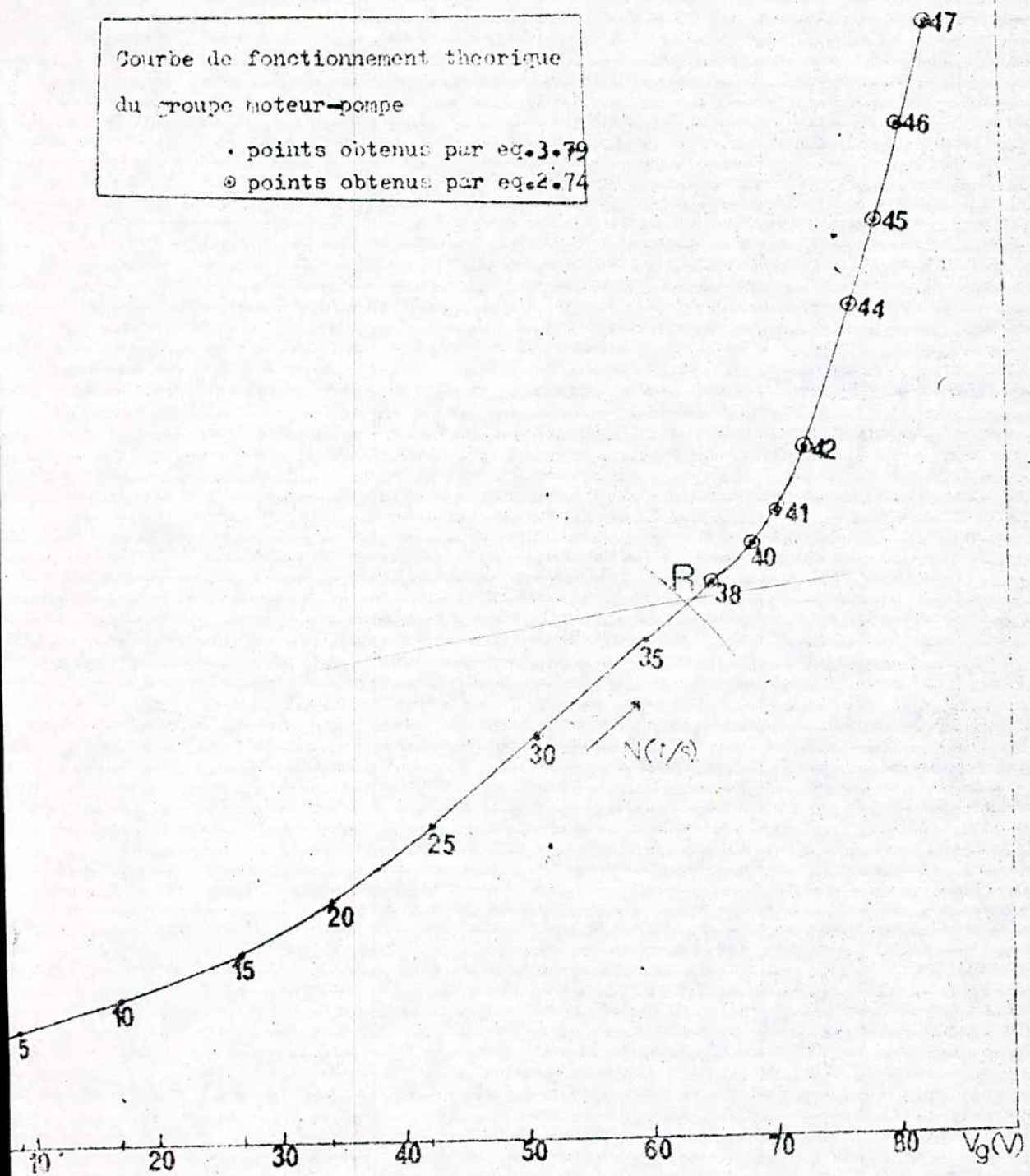
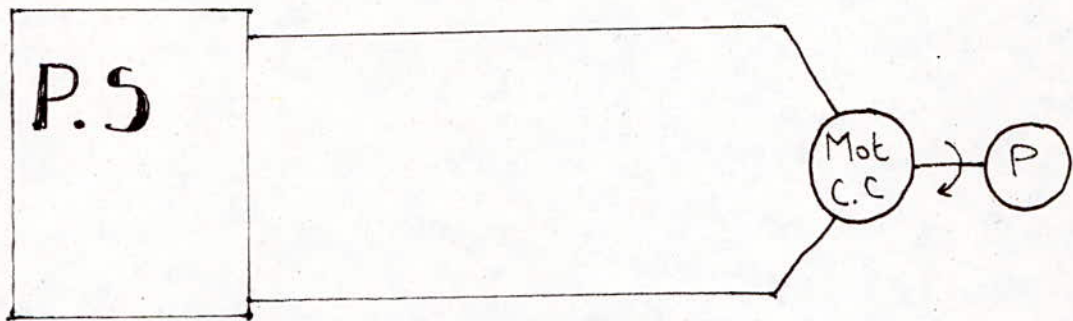


Figure 18

a. Caractéristique du groupe moteur-pompe :

Le moteur à aimant permanent utilisé est un modèle CEM-MF19 de tension nominale 90v et courant nominal 14.5 A pour une vitesse de rotation de 3000 t/mn



b. Présentation du programme :

Le programme trace en premier lieu la caractéristique $I_a = f(V_a)$ du moteur avec les différentes valeurs de vitesse de rotation. Puis il trace les caractéristiques des différents groupements - groupement de n_p en parallèle de n_s panneau en série - pour pouvoir choisir celui optimal.

Les groupements les plus intéressants - ie ceux dont les points de fonctionnement optimaux se rapprochant le plus de la caractéristique $I_a = f(V_g)$ de la charge - sont :

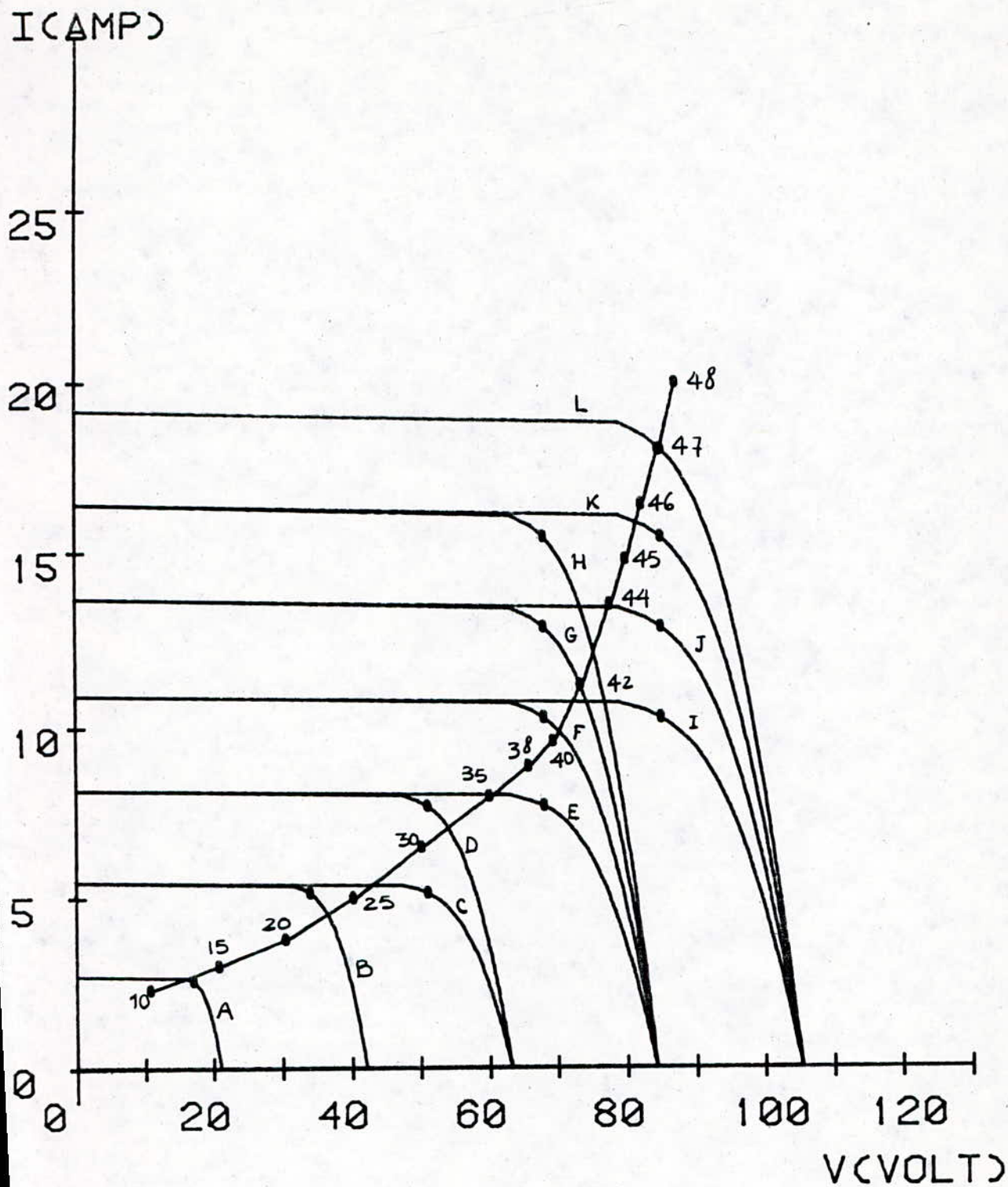


fig 19

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
N_s	1	2	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5
N_p	1	2	2	3	3	4	5	6	4	5	6	7

La courbe (fig 19) est une illustration de ce qui précède. On distingue la caractéristique $I_a = f(V_a)$ de la charge, avec les différentes vitesses de rotation, et les caractéristiques des différents groupements.

Exemples d'applications:

pour $N = 10$ t/s Le meilleur groupement est A.

pour $N = 30$ t/s Le meilleur est D

pour $N = 47$ t/s Le meilleur groupement est L.

N.B: Les caractéristiques de ces groupements sont prises pour un flux égal à 1000 W/m^2 et pour une température égale à 30°C .

Une étude plus complète pourra prendre en considération les variations des facteurs flux et température.

```
Vmax=0
FAR#0
R=0.4
S=0.33
F=1000
DIM Pui(8,8)
O !PRESENTATION DE L'ECRAN
O PAGE
O VIEWPORT 10,70,15,85
O WINDOW -1,130,-1,30
O AXIS @1:10,5
O ! LABEL DE L'AXE HORIZONTAL
O H#="V(VOLT)"
O MOVE @1:120,-1
O PRINT @1:"JJ";
O FOR I=1 TO LEN(H#)/2
O PRINT @1:"H";
O NEXT I
O PRINT @1:H#;
O ! LABEL DE L'AXE VERTICAL
O V#=" I(AMP)"
O MOVE @1:-1,30
O FOR I=1 TO LEN(V#)/2
O PRINT @1:"H";
O NEXT I
O PRINT @1:V#;
O ! GRADUATION DE L'AXE DES X
O FOR I=0 TO 120 STEP 20
O MOVE @1:I+3,-0.5
O PRINT @1:"HHJ";I;
O NEXT I
O ! GRADUATION DE L'AXE DES Y
O FOR I=0 TO 25 STEP 5
O MOVE @1:-1.5,I+0.5
O PRINT @1:"HHJ";I;
O NEXT I
O HOME
O ! FIN DE LA PRESENTATION
O DATA 10.7,2.3,20.7,3,30.4,3.8,40.2,5,50.1,6.5,60,8,65.7,8.87
O DATA 69.3,9.6,73.3,11.2,77.6,13.5,79.9,14.8,82.2,16.4,84.6,18
O DATA 87.1,20
O RESTORE 510
O MOVE @1:10.7,2.3
O FOR Alg=1 TO 14
O READ Z1,Z2
```



```
540 DRAW @1:Z1,Z2
542 Y1=Z1
543 Y2=Z2
544 GOSUB 4000
545 NEXT Alg
550 DATA 1,1,2,2,3,2,3,3,4,3,4,4,4,5,4,6,5,4,5,5,5,6,5,7,5,8
553 RESTORE 550
555 FOR Lect=1 TO 13
558 READ Ns,Np
560 GOSUB 1000
565 X3=X3*Np
590 Pmax=0
595 DEF FNV(I)=(A*F*S-I)/(B*S)-1
600 ! S.F GRAPHIQUE
605 MOVE @1:0,0
610 FOR Q=0 TO X3*2 STEP X3*0.02/Np
620 GO TO 2000
635 DRAW @1:Y,Q1
640 NEXT Q
660 DRAW @1:0,X3
689 HOME
700 MOVE @1:Vmax,Iax
710 Y1=Vmax
715 Y2=Iax
720 GOSUB 4000
730 Pui(Ns,Np)=INT(Pmax*10)/10
740 NEXT Lect
750 PAGE
755 PRINT "VOUS VOULEZ LA PUISSANCE MAXIMALE DE "
760 PRINT "Np GROUPEMENTS EN PARALLELE ";
765 INPUT Np
770 PRINT "DE Ns PANNEAUX EN SERIE ";
775 INPUT Ns
780 PRINT Pui(Ns,Np);"Watts"
790 STOP
807 INPUT IO
1000 ! S.F CALCUL DE ICC
1002 A=0.0083
1003 B=2.6E-8
1004 G=0.93
1013 DEF FNY(X)=A*F*S-B*S*(EXP(G*R*X)-1)
1015 X1=0
1020 X2=FNY(X1)
1030 Dt=(FNY(X2)-X2)/(X2-X1)
1040 At=1/(1-Dt)
1050 X3=X2-At*(FNY(X2)-X2)
1060 IF ABS(X3-X2)<1.0E-8 THEN 1100
```

```
1070 X1=X2
1080 X2=X3
1090 GO TO 1020
1100 RETURN
1990 !
2000 Q=FNV(Q)
2005 Q1=Q*Np
2010 IF Q<0 THEN 660
2020 Y=Ns*(LOG(Q)/B-R*Q)
2025 IF Y<0 THEN 660
2030 P=Q1*Y
2032 IF P<Pmax THEN 2100
2035 Iax=Q1
2038 Vmax=I
2040 Pmax=P
2100 GO TO 635
4000 FOR Om=0 TO 360 STEP 10
4010 Tun=PI*Om/180
4020 DRAW @1:0.35*COS(Tun)+Y1,0.15*SIN(Tun)+Y2
4030 NEXT Om
4040 RETURN
```

S.P DETERMINANT LES COORDONNEES

conclusion

L'objet de cette étude est la simulation du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. Et pour ce faire on a été amené à simuler le fonctionnement d'une cellule après détermination des paramètres α, β, γ - caractérisant la cellule en polarité directe - .

L'intérêt essentiel de cette étude est de permettre d'optimiser le fonctionnement d'une charge en visualisant le point de fonctionnement correspondant au groupement le plus approprié. L'exemple pris dans le chapitre trois (3) illustre bien cette utilisation.

Elle peut servir aussi comme référence entre autre aux étudiants de l'école pour appréhender le fonctionnement d'une cellule* ou d'un groupement de cellules, vu les conditions climatiques.

Bien que les caractéristiques simulées représentent bien le fonctionnement d'un panneau une étude plus complète pourra simuler non plus une cellule idéale mais une cellule en considérant les contraintes posées par le groupement .

Bibliographie

- (I) { Approche des problèmes posés par les groupements de panneaux solaires. }
(P. DI MAIO , C. BEDROSSIAN) Juillet 79
- (II) { Etude expérimentale du comportement d'un générateur photovoltaïque couplé à une charge. }
Projet de Fin d'Etude Janv 86
- (III) { Caractérisation des modules photovoltaïques }
Projet de Fin d'Etude Janv 85
- (IV) { Electrotechnique industrielle }
G. SEQUIER
- (V) { Methode numérique appliquées }
(M. BOUMAHIRAT , A. GOURDIN) 83
- (VI) { Approche analytique des caractéristiques de fonctionnement d'un système photovoltaïque de pompage d'eau }
(B. REMKI) Juin 83