

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CARACTERISATION

DES MODULES

PHOTOVOLTAIQUES

Proposé par :- M
MEFTAH

Etudié par :
BENAKMOUM
FAIDI

Dirigé par :- M
MEFTAH

الجامعة الوطنية للعلوم والتقنية
الجزائرية
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

PROMOTION : JANVIER - 85

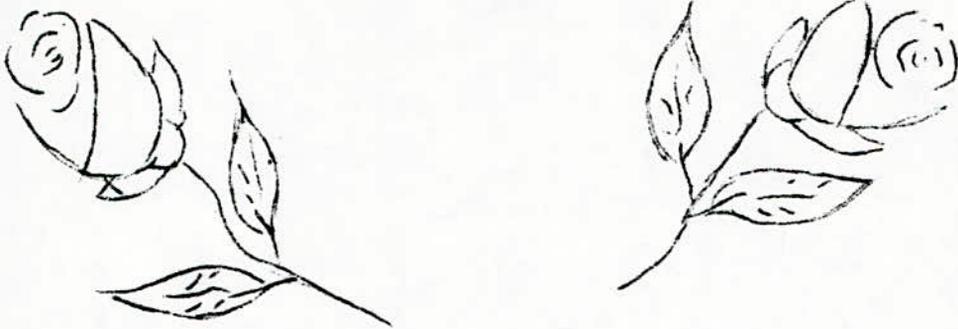
..O..D E D I C A C E ..O..

A. M O N P E R E , M A M E R E
A. M E S F R E R E S ? , M E S S O E U R S
A. M E G U E L L A T I L A K H D A R
A. M E G U E L L A T I Z O H R A
A. T O U S M E S A M I S

- B E N A K M O U M N O U R R E D I N E

A L A M E M O I R E D E M O N P E R E
A M A M E R E
A M E S S O E U R S
A M A F E M M E
A T O U S M E S A M I S

F A I D I E J A M E L



..O..REMERCIEMENT..O..

NOUS TENONS A EXPRIMER NOS VIFS REMERCIEMENTS A:

-MONSIEUR LEFTAH AHMED-Docteur ingénieur, Responsable du photovotaique à Bouzaréàh.

-MONSIEUR BELHAMEL Directeur de la station de Bouzaréàh.

- A TOUS LES TRAVAILLEURS DE LA STATION.

-A Tous qui ont collaboré directement où indirectement dans notre formation.

-ooOoo - S O M M A I R E - ooOoo-

(((A P I T R E : I
=====

1- <u>L'énergie photovoltaïque.</u>	1
1-1- Cellule photovoltaïque.	1
1-2- L'effet photovoltaïque.	1
2- <u>Etude Théorique de la Fonction PN.</u>	2
2-1- Jonction P.N à l'équilibre.	2
2-2- Jonction P.N à l'obscurité.	4
2-3- Jonction P;N sous-éclairage.	4
2-4- Densité maximale de courant.	6
2-5- Caractéristique d'une jonction P.N idéale.	6
3- <u>Schéma équivalent d'une cellule-photovoltaïque</u>	8
3-1- L'obscurité.	8
3-2- Sous-Eclairage.	8
3-3- Définition des différents paramètres.	10
4- <u>Rendement de conversion Théorique.</u>	11
4-1- Sans pertes.	12
4-2- Avec pertes.	16

(((A P I T R E : II
=====

1- Simplification de la caractéristique I (V)	16
2- L'influence de l'éclairage sur la caractéristique I (V)	17
2-1 - Courant de court-circuit.	17
2-2 - Tension en circuit ouvert.	17
2-3 - Puissance maximale.	17

3- Influence de la température. =====	18
3-1- Gap d'énergie au silicium.	18
3-2- Mobilités des électrons et des trous	18
3-3- Coefficient de diffusion des électrons et des trous.	18
3-4- Densité des états dans la bande de conduction et de valence.	19
3-5- Courant de saturation I_0	19
3-6- Le courant I_{cc} en fonction de la température.	20
3-7- La tension V_{CO} en fonction de la température.	20
3-8- La puissance maximale en fonction de la température.	20
4 - Modules photovoltaïques =====	21
4-1- Caractéristique d'un module photovoltaïque.	22
4-2- Protection des modules.	27
((((A P I T R E III	
=====	
1 - Matériel utilisé	28
1-1- Modules photovoltaïques utilisés.	28
1-2- Appareils de mesures.	30
1-3- Etude d'expérimentation.	30
2 - Descriptions des manipulations.	31
2-1 Caractérisation des modules en fonction de l'éclairement.	32
2-2 Caractéristique en fonction de la température.	32
2-3- Associations et Mixage.	32
3- <u>INTERPRETATIONS</u>	33
3-1- Caractérisation en fonction du rayonnement.	33
3-2- Caractérisation en fonction de la température?	48
3-3- Associations et Mixage.	64
- CONCLUSION GENERALE;	79

-ooOoo- I N T R O D U C T I O N -ooOoo-
=====

La terre reçoit annuellement du soleil 1,6 milliard de milliard de KWh dont 40% uniquement parviennent jusqu'à nous, le reste étant réfléchi par les hautes couches.

L'infime partie que nous pourrions capter et transformer en énergie utilisable pour l'homme, représente plusieurs centaines de fois la consommation énergétique mondiale.

De plus cette grande quantité d'énergie est énépuisable, non polluante, et ne demande aucun moyen de transport, elle se trouve partout dans l'univers et en particulier sur toute la surface terrestre.

Alors on a toujours pensé à utilisér cette énergie et avec un meilleur rendement possible. Et c'est dans les années 50 que les cellules solaire (ou photopiles) ont pris leur essor pour la premiere fois pour l'amimentation en énergie des satellites. Ces cellules fabriquées à partir du silicium transforment d'une manière directe l'énergie fournie par le soleil sous forme de lumière en énergie é élèctrique, c'est ce qu'on appelle la conversion photovoltaïque.

Mais le prix de cette énergie photovoltaïque reste très élevé si bien qu'il importe d'utiliser les générateurs photovoltaïque au voisinage de leur caractéristiques optimales. D'ou l'objet de notre travail et d'étudier les modules ~~les~~ photovoltaïques de la station solaire de Bouzaréah, afin de connaître le plus précisément possible leur caractéristiques ainsi que l'influence de quelques pamètres natùrels, tels que la température et le rayonnement solaire sur la variation de ces caractéristiques.

(((.A P I T R E / -----

1- L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE :

1-1 - CELLULE PHOTOVOLTAIQUE :

La conversion photovoltaïque est le seul moyen de transformer directement l'énergie fournie par le soleil sous forme de lumière en énergie électrique. Cette transformation est réalisée par des cellules photo-voltaïques (ou photopile) fabriquées par un matériau semi-conducteur dont le plus courant et le silicium.

La cellule photovoltaïque est constituée par une plaquette de silicium dopée différemment sur chacune des faces. Dont l'une est dopée positivement et l'autre dopée négativement, d'où formation d'une jonction P.N. Au voisinage de cette jonction, les charges positives et négatives créent un champ électrique.

1-2 - L'EFFET PHOTOVOLTAIQUE :

L'effet photovoltaïque apparaît lorsqu'un matériau semi conducteur éclairé par des radiations lumineuses de longueurs d'ondes assez courtes émet des électrons.

En effet, l'énergie d'un faisceau lumineux incident sur une jonction P.N. et plus particulièrement sur la couche (N) est transmise aux électrons de valences. Et lorsque l'énergie $h\nu$ d'un photon est supérieur à la longueur énergétique (ou gap d'énergie E_g) de la bande interdite, les électrons de valence pourront migrer dans le semi conducteur sous forme de paires d'électrons-trou.

Or l'hétérogénéité du semi-conducteur donne lieu à un champ local qui draine les charges, d'où il en résulte un courant I.

Il existe une longueur d'onde (seuil λ_s), au dessous de laquelle il n'y a pas création de paires électron-trous quelque soit l'intensité de la lumière incidente. Elle vaut 1,1 μ m pour le silicium, soit une énergie de 1,12 eV. Donc pour les valeurs de λ supérieur à λ_s , l'absorption est négligeable, alors que pour les valeurs de λ inférieur à λ_s , elle augmente rapidement.

-2- ETUDE THEORIQUE DE LA JONCTION P.N. :

Dans le but de mieux comprendre la conversion photovoltaïque, on va traiter la théorie de la jonction P.N.

Le fonctionnement de la cellule repose entièrement sur les propriétés électroniques différentes acquises par le silicium quand des atomes sont placés dans un réseau cristallin (dopage). Si ces atomes contiennent plus d'électrons que le silicium de base, l'ensemble ainsi formé contiendra des électrons libres en excès et sera dit du type N. A l'inverse, un dopage à l'aide d'atomes contenant moins d'électrons que le silicium de base, l'ensemble ainsi formé contiendra des trous en excès et sera dit du type P.

2-1 - JONCTION P.N. A L'EQUILIBRE :

Si une jonction P.N. est placée dans l'obscurité à température constante et en l'absence de différence de potentielle appliquée, il n'y aura aucun courant qui circule entre les deux régions N et P.

Dans ces conditions, on dit que la jonction P.N est à l'état d'équilibre. Cependant entre les deux régions les concentrations, d'équilibre n_0 des électrons, d'une part et P_0 des trous d'autre part sont très différentes.

Soient ND et NA les concentrations respectives des donneurs et des accepteurs. Alors si elles sont à la fois grandes devant la concentration intrinsèque n_i dans le semi conducteur et petites devant les concentrations effectives N_c et N_v des états possibles pour les électrons dans les bandes de conduction et de valence, on aura alors :

-Région N ; (donneurs)

$$n_{on} = ND \quad (\text{majoritaires}) \quad (1)$$

$$p_{on} = \frac{n_i^2}{NA} \quad (\text{minoritaires}) \quad (2)$$

- Région P : (accepteurs)

$$n_{op} = \frac{n_i^2}{ND} \quad (\text{minoritaires}) \quad (3)$$

$$p_{op} = NA \quad (\text{majoritaires}) \quad (4)$$

A l'état d'équilibre, les charges majoritaires ne peuvent plus diffuser dans la région voisine à cause de la barrière de potentielle qui s'oppose à leur mouvement. Cette barrière est donnée par l'équation suivante :

$$V_N - V_P = V_d \quad (5)$$

A l'état d'équilibre le flux W_n^- , des électrons minoritaires dans la région P, qui passe dans la région n, (voir fig 1a) va juste compenser le flux W_n^+ des électrons majoritaires dans la région n, qui diffusent dans le sens inverse.

De même les flux des trous W_p^+ et W_p^- se compensent aussi, si bien qu'aucun courant n'est perceptible dans le circuit extérieur.

2-2- JONCTION P.N POLARISEE DANS L'OBSCURITE :

=====

Si la jonction P.N est polarisée , elle est placée dans l'obscurité , la tension de polarisation s'ajoute on valeur algebrique à la barriere de potentielle V_d , soit :

$$V_N - V_P = V_d - V \quad (6)$$

suivant que V (tension de polarisation) est positive ou negative , elle favorise les flux W_n^+ , W_p^+ par rapport au flux W_n^- et W_p^- qui restent inchangés .

2-3- JONCTION P-N SOUS-ECLAIREMENT (voir fig 1b)

=====

Si la jonction est placée sous eclairement , à chaque fois qu'un photon (particule de lumiere), d'énergie $h\nu$ superieur à E_g heurte un atome ; il arrache un electron, en laissant à sa place un trou , d'ou la formation d'une paire d'électron-trous . Prés de la jonction , l'électron sera accéléré par le champ électrique et pourra parvenir dans la zone de type N de même que la charge positive (trou) acquise par l'atome se propogera vers la zone de type P . Une tension électrique apparait donc des deux cotés de la jonction ; la collecte du courant se fait en face avant par une grille conductrice (partie non masquée laissant passer de la lumiere) et en face arriere sur toute la surface de la jonction (ou la cellule) . Si ces collecteurs sont reliés à un circuit exterieur un courant circulera.

L'énergie des photons est ainsi convertie en énergie électrique notons que la probabilitée , qu'une charge négative ou positive passe d'une région à une autre , est d'autant plus grande que la paire d'électron-trou et crée à une distance, de la jonction , petite devant la longueur de diffusion L_D . cette longueur L_D est donnée par la relation:

$$L_D = \frac{\sqrt{D \tau}}{q}$$

(7)

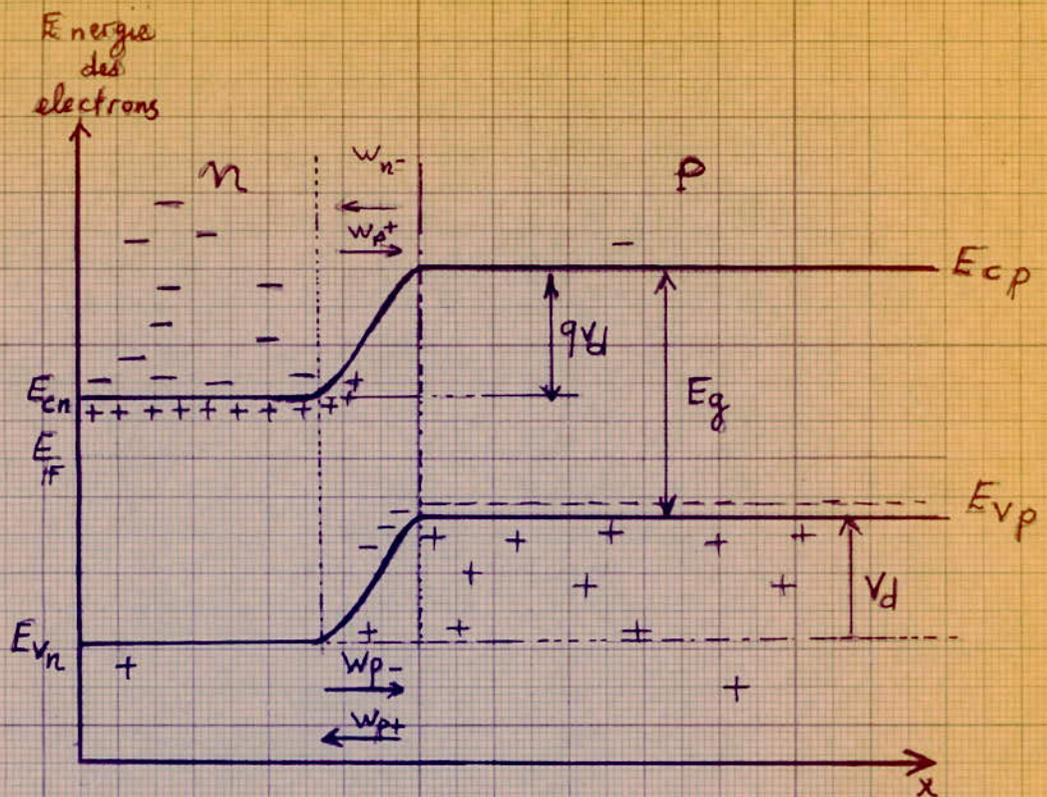


Fig 1.a: Niveau d'energie d'une jonction à l'etat d'equilibre.

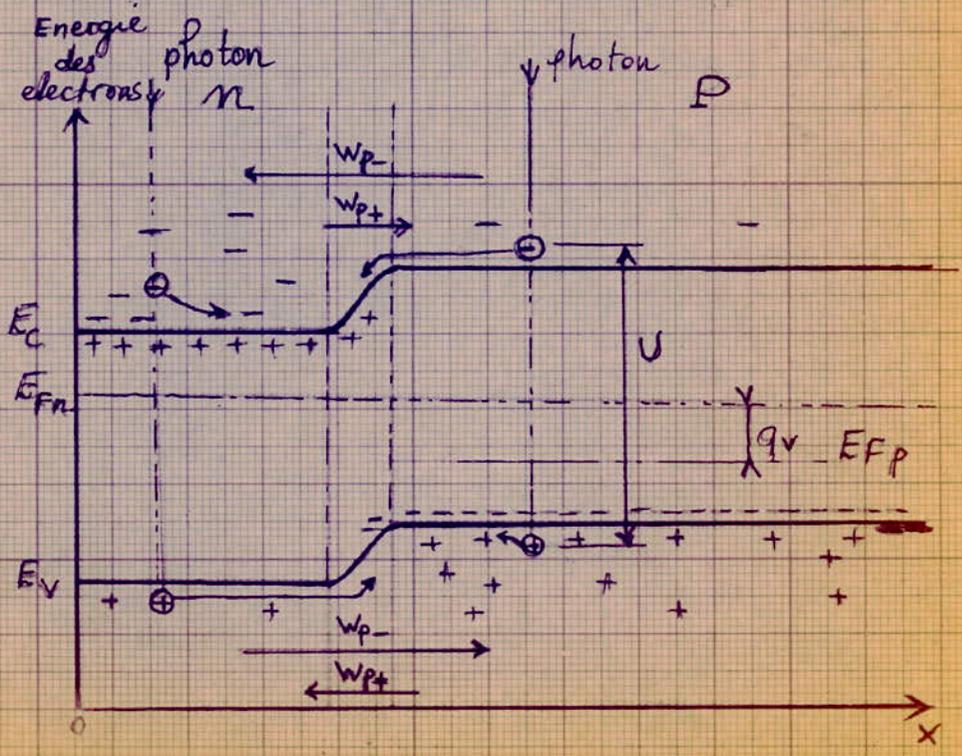


Fig 1.b: Niveau d'energie d'une cellule eclairee debitant dans une charge.

Où K : est la constante de Boltzman.

T : la température absolue.

q : la charge élémentaire.

u : mobilité (ou vitesse par unité de champ électrique)

z : durée de vie du porteur de charge avant sa recombinaison.

2-4 - DENSITE MAXIMALE DU COURANT :

Si on néglige les pertes, et si on admet que tous les photons absorbés donnent naissance à une paire d'électron-trou, alors le courant photovoltaïque aura l'expression suivante :

$$I_p = I_{cc} = q \int_{E_g}^{\infty} \left(\frac{dF}{du} \right) du \quad (8)$$

D'où la densité du courant est :

$$J_p = \frac{I_p}{S} = \frac{I_{cc}}{S} \quad (9)$$

Avec I_p (courant photovoltaïque) = I_{cc} (courant de court-circuit).

2 - 5 CARACTERISTIQUES D'UNE JONCTION P.N. IDEALE :

a- L'OBSCURITE :

La caractéristique d'une jonction P.N idéale non éclairée à l'expression suivante :

$$I_D = I_0 \left(e^{-\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (10)$$

où I_0 : est le courant de saturation.

b- SOUS-ECLAIREMENT :

La forme générale de la courbe sous, éclairément est la même que celle à l'obscurité, seulement la première est déplacée suivant l'axe des courants vers les I négatifs (voir fig 2).

D'après cette figure, on peut écrire que :

$$I = I_D - I_p = I_D - I_{cc} \quad (11)$$

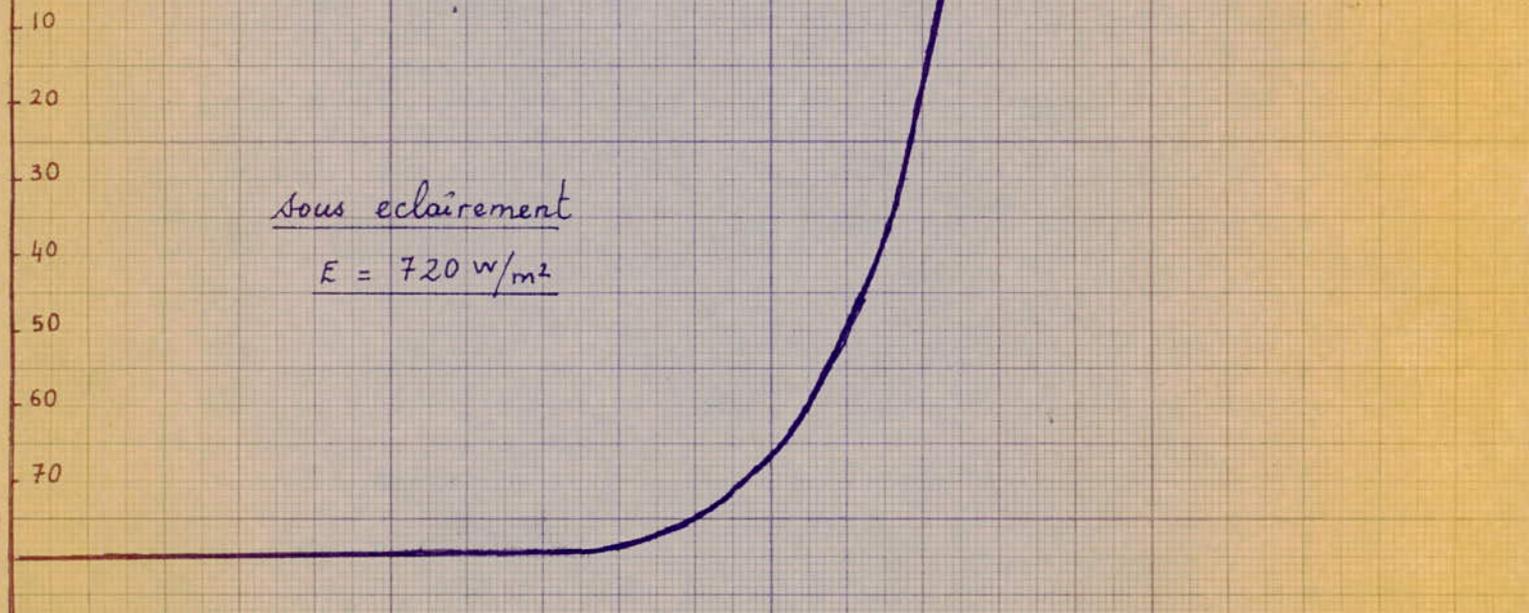
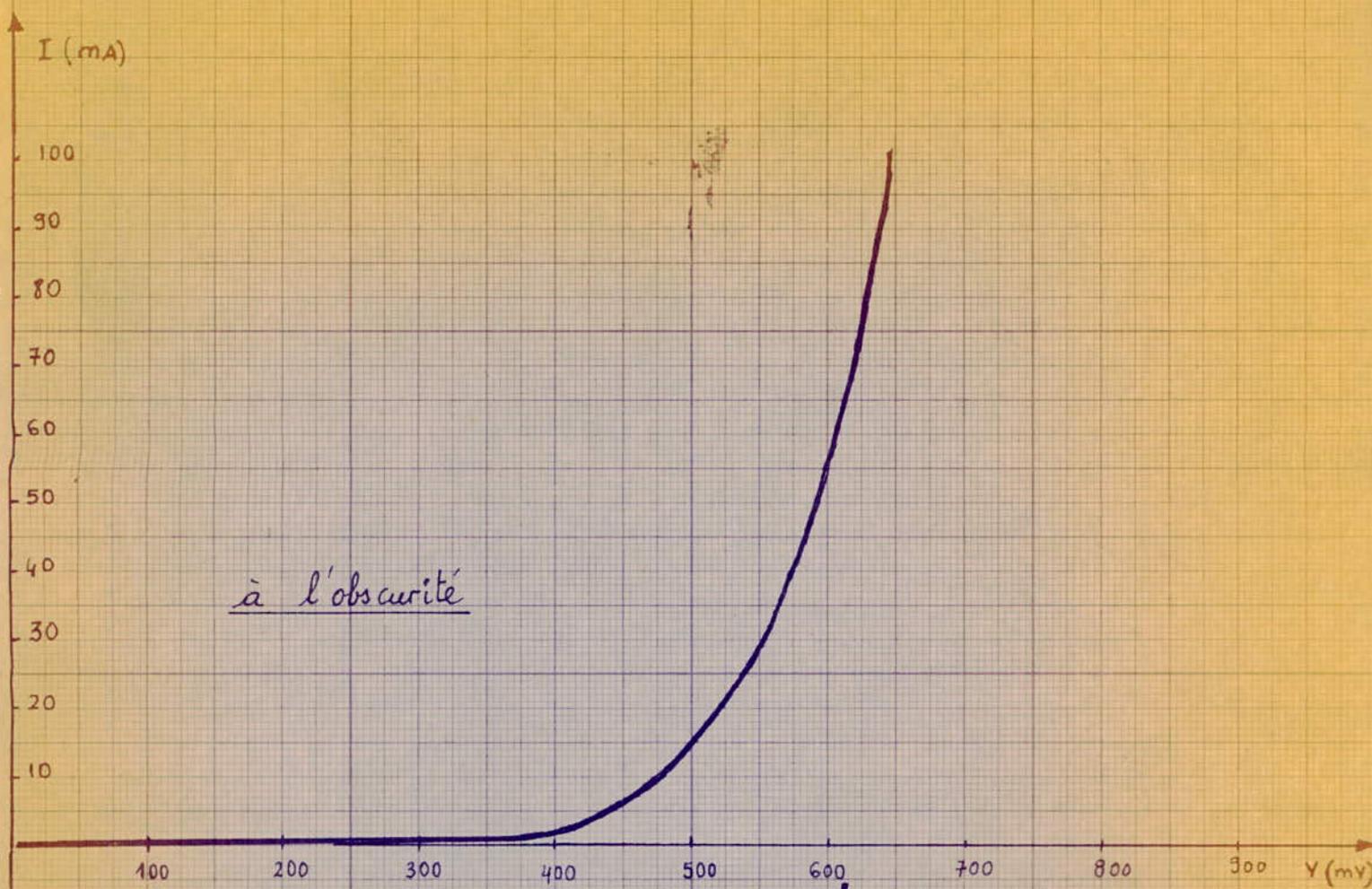


Fig : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque
à l'obscurité et sous éclairement.

(décalage de la caractéristique suivant l'axe des I)

Mais seulement pour que I et V soient positifs dans le premier quadrant, on passera :

$$I = I_{cc} - I_D \quad (12)$$

D'où la caractéristique d'une jonction PN idéale sous éclaircissement.

$$I = I_{cc} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (13)$$

3- SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE :

Pour rendre compte du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque à l'obscurité ou sous éclaircissement, on doit tenir compte de tous les phénomènes physiques qui y contribuent et ceux qui limitent ses performances.

3-1- A L'OBSCURITE :

À l'obscurité où le flux lumineux est nul et par conséquent le courant photovoltaïque et aussi nul, la cellule se comporte comme une diode en série avec une résistance R_s (résistance série) et en parallèle avec une résistance R_{sh} (résistance shunt). voir fig 3).

D'où la caractéristique réelle à l'obscurité :

$$I = I_0 \left(\exp \left[q \left(\frac{V - R_s I_D}{n k T} \right) - 1 \right] + \frac{V}{R_{sh}} \right) \quad (14)$$

n : est appelé facteur d'idéalité.

3-2- SOUS-ECLAIREMENT :

Exposée à un flux de photons, une cellule photovoltaïque peut être considérée comme une source de courant variable et tension fixe.

Au plan électrique, une cellule se comporte comme un générateur de courant monté en parallèle avec une diode D et une résistance R_{sh} en série avec une autre R_s . Donc même schéma à l'obscurité plus un générateur de courant en parallèle avec la diode (voir fig 4).

Fig 3 schema equivalent d'une cellule
solaire à l'obscurité

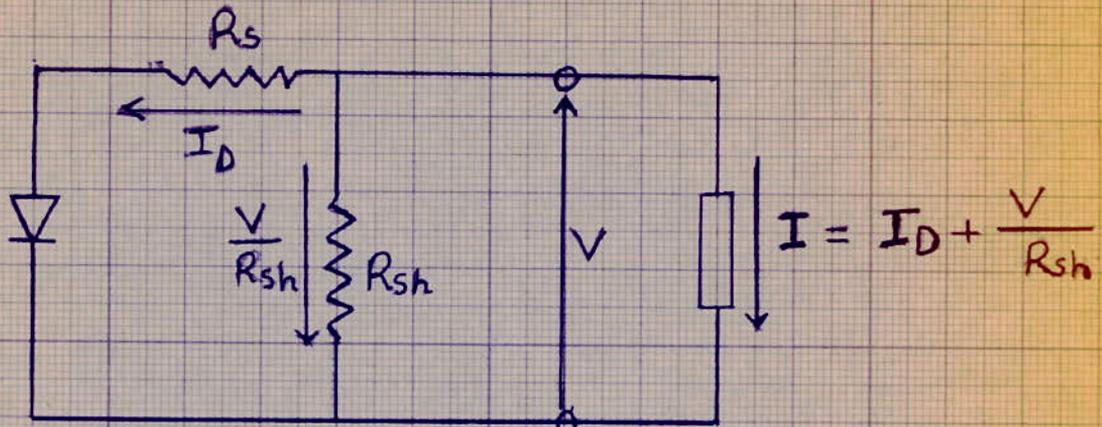
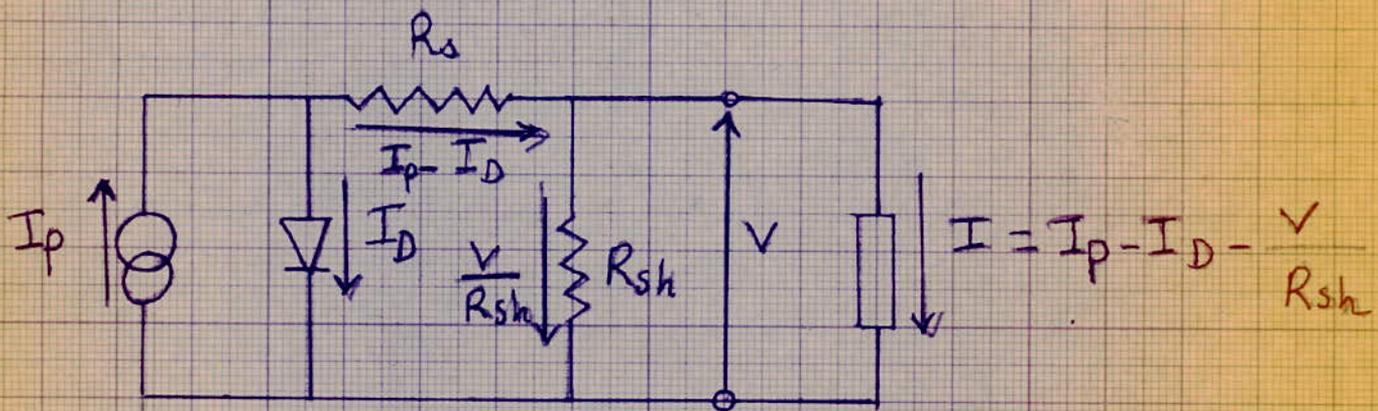


Fig 4 : schéma equivalent d'une cellule
solaire sous eclaircement.



Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule, en particulier la courbe tension-courant ($I = f(v)$). Dans des conditions d'éclairement et de température spécifiques, trois points de cette courbe définissent les caractéristiques normalisées des cellules.

- Le point de fonctionnement optimal, pour lequel une cellule délivre sa puissance maximale (P_{max}). A ce point correspondant des valeurs de tension (tension nominale V) et de courant (courant nominal I).

- Le point où la tension est nulle est la valeur de courant maximale (courant de court-circuit I_{cc}).

- Le point où le courant est nul et la valeur de tension maximale (tension en circuit-ouvert V_{co}).

- 3-3 - DEFINITION DES DIFFERENTS PARAMETRES :

a - RESISTANCE SERIE :

Cette résistance est due aux contacts localisés aux surfaces de séparation semi-conducteur- électrode et la résistance interne de celui-ci.

Elle influe sur le rendement (voir fig 6) puisqu'elle est en série avec la charge aux bornes de la photopile.

La puissance optimale $P_m = V_m \cdot I_m$ est aussi conditionnée par cette résistance.

On remarque que la diminution de cette puissance modifie la caractéristique $I = f(V)$.

La résistance série diminue avec l'éclairement et augmente avec la température.

Pour la faire diminuer, on dispose des contacts sous forme de grilles en parallèle sur la face antérieure de la cellule.

Ainsi la cellule se ramène à grand nombre de cellules en parallèles, ce qui diminue la résistance série équivalente et par conséquent la puissance optimale augmente, mais la grille de contacte fait, d'autre part, diminuer la surface active d'où la diminution du courant de court-circuit.

-b- RESISTANCE SHUNT :

Cette résistance est due aux effets de surface de la cellule (voir fig 6). En effet s'il existe des fissures sur la surface, elle devient le siège de phénomènes physiques assimilables à une résistance.

Notons que ce phénomène est nuisible au niveau de la jonction et que la résistance augmente lorsque la cellule fonctionne sous-éclairage.

-c- FACTEUR D'IDEALITE :

Pour que le courant traverse une diode, qui a l'expression ;

$$I_D = I_0 \left(\exp q \left(\frac{V - R_s I_D}{kT} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_{sh}} \quad (15)$$

correspond bien au courant qui traverse une diode réelle au silicium, on doit introduire un terme correctif appelé facteur d'idéalité et note n.

Le courant réel devient alors :

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(q \left\{ \frac{V - R_s I_D}{nkT} \right\} - 1 \right) + \frac{V}{R_{sk}} \right) \quad (16)$$

Le facteur d'idéalité dépend des interfaces et des propriétés physiques et technologiques de la cellule photovoltaïque.

-4- RENDEMENT DE CONVERSION THEORIQUE :

-4-1- SANS PERTES :

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

$$R = \frac{E_g \int_0^\infty u \left(\frac{dE}{du} \right) du}{E_g \int_0^\infty \left(\frac{dR}{du} \right) du} \quad (17)$$

-4-2 AVEC PERTES :

Puisque le transport d'énergie lumineuse en énergie électrique est fortement lié à la bande interdite E_g du semi-conducteur alors le rendement est limité par différentes pertes d'énergie électrique et thermique.

La Fig. 7, donne le rendement en fonction du gap d'énergie pour une lumière conventionnelle, qui est celle d'un corps à la température de 5760°-K, car cette lumière est assimilable au spectre solaire au niveau de la mer.

Les principaux facteurs responsables des pertes sont :

a-ABSORPTION INCOMPLETE DES PHOTONS :

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

b-EXCES D'ENERGIE ($h\nu - E_g$) :

Les photons, dont l'énergie $h\nu$ est supérieur à l'énergie nécessaire pour faire passer l'électron à la bande de conduction, cède leur énergie excédentaire sous forme d'énergie cinétique aux électrons qui la perdent rapidement par collisions avec les atomes du réseau, élevant ainsi la température du semi-conducteur.

c-REFLEXION A LA SURFACE :

Les photons incidents qui ne sont pas transmis à la cellule sont, évidemment, réfléchis au niveau de sa surface, donc ils ne participent pas à la création de paires d'électron-trous et par conséquent, l'énergie qu'ils transportent est considérée comme une énergie perdue.

On définit ainsi un coefficient de transmission égal au rapport du flux transmis au flux incident. Le Coefficient dépend de l'état de la surface de la cellule.

d-COLLECTE DES PORTEURS :

Lorsque la paire électron-trous est créée à une distance d , non petite devant la longueur moyenne de diffusion des porteurs minoritaires, alors la probabilité de passage des charges d'une région à une autre est faible et par conséquent le nombre de charges collectées est faible au profit de la recombinaison qui limite le courant photovoltaïque.

On définit ainsi les rendements de collectage, comme étant le rapport Q du nombre de porteurs collectés Noté (N) au nombre de porteurs créés note ϕ^0 :

$$Q = \frac{N}{\phi^0}$$

Donc le rendement de collectage est, d'autant plus bon que le rapport Q s'approche de l'unité ; soit encore ϕ^0 : s'approche de N .

Le rendement de conversion dépend de plusieurs facteurs tels que la longueur d'onde du rayonnement, la longueur de diffusion, la durée de vie des porteurs de charges, la vitesse de recombinaison en surface, le coefficient d'absorption etc...

e-FACTEUR DE TENSION :

Le facteur de tension noté (F.V.) est défini comme étant le rapport de la tension à vide sur la valeur maximale de E_g/q .

$$F.V. = \frac{V_0}{E_g/q}$$

Le rendement de conversion est d'autant meilleur que le Facteur de Tension est grand. Donc on est obligé d'augmenter V_o et de diminuer E_g .

f- FACTEUR DE FORME :

Le facteur de forme noté (FF) est un coefficient liant la puissance maximale au produit $I_{cc} \cdot V_{oc}$ avec I_{cc} (courant de court-circuit) et V_{oc} (tension à vide)

$$\text{soit } P_m = (F.F) I_{cc} V_{oc} \quad (20)$$

Une photopile est d'autant plus performante que le facteur de forme s'approche de l'unité.

g- RESISTANCE SERIE :

Elle est définie précédemment .

Le rendement de conversion qui tient compte de toute ces pertes est donné sur la fig 7-b.

On remarque que la valeur du rendement réel, (Fig 7-b) à chuté par rapport au rendement théorique (Fig 7-a), mais il y a un déplacement de l'énergie d'activation optimale (correspondant au rendement max.)

Fig 6 : Effet des resistances serie et shunt sur la caracteristique I(V) d'une cellule solaire

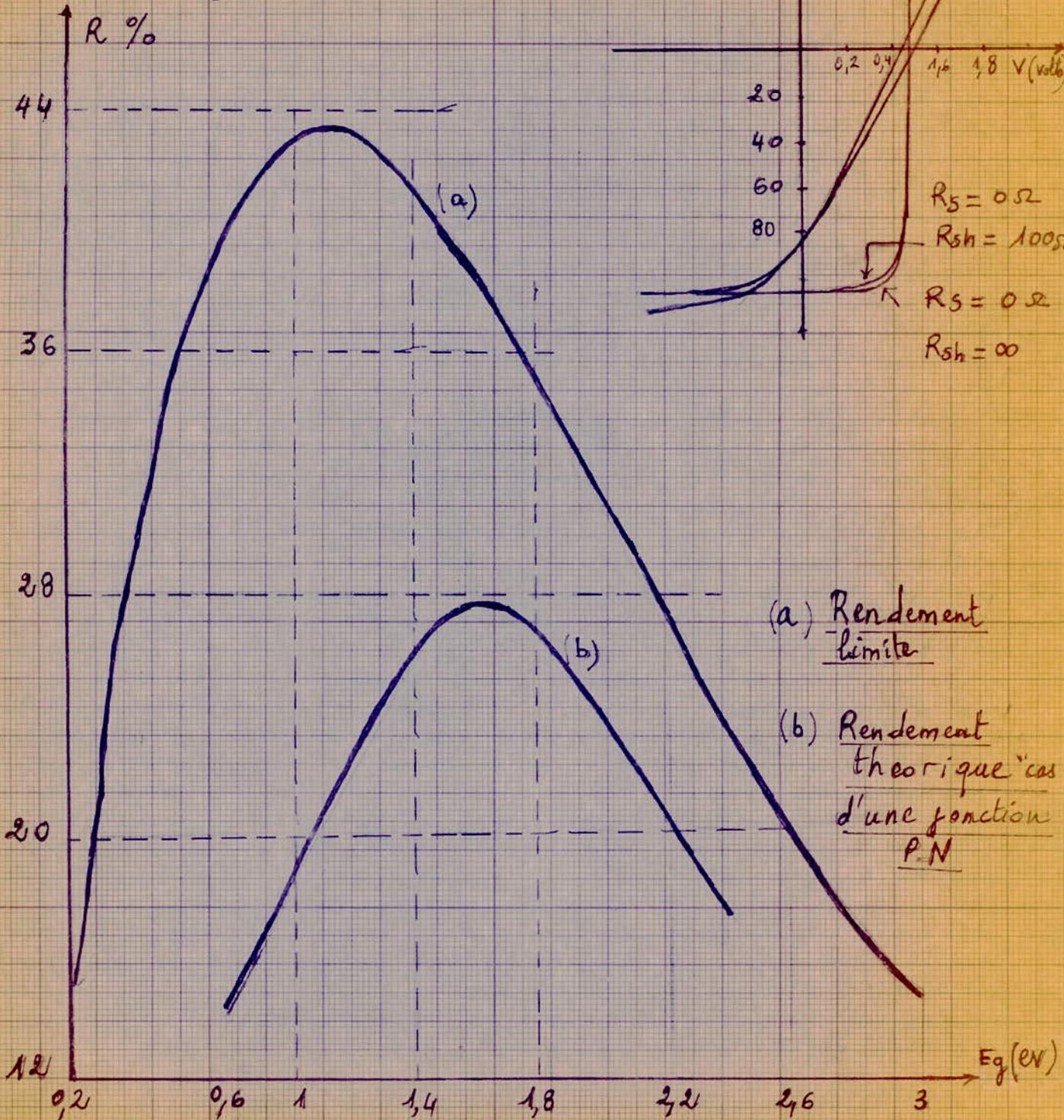


Fig 7 : Rendement (R) en fonction du gap d'energie (E_g)

CHAPITRE

1- SIMPLIFICATION DE LA CARACTERISTIQUE I (V) :

Sur la fig 6, on voit que lorsque la résistance shunt ~~voit~~ de la valeur 100Ω à l'infini, la caractéristique $I(V)$ reste inchangée, par contre lorsque ~~la~~ lorsque la résistance série varie entre 0 et 5Ω , la caractéristique change complètement.

D'Enc l'effet de la résistance série sur la caractéristique est très important. Sa valeur est de quelques centaines de milli ohms. Alors que l'ordre de la résistance shunt est de quelques dizaines de mégohms, son effet est négligeable.

On peut ainsi simplifier la caractéristique $I (V)$ en posant $V/R_{sh} = 0$

D'où la caractéristique à l'obscurité et sous éclaircissement :

A L'OBSCURITE :

$$I_D = I_0 \left(\exp q \left\{ \frac{V - R_s I_D}{n k T} \right\} - 1 \right) \quad (1)$$

SOUS ECLAIREMENT :

$$I = I_{cc} - I_0 \left(\exp q \left\{ \frac{V + R_s I}{n k T} \right\} - 1 \right) \quad (2)$$

ORDRE DE GRANDEUR DE I_0 ET n .

-La densité du courant de saturation (I_0/S) varie pour chaque échantillon elle est en moyenne de quelques dizaines de monoampères par cm^2 à la température ambiante.

-Le facteur d'idéalité (n) vaut, dans le cas d'une jonction P.N au silicium 1(un) pour les faibles débits et 2 (deux) pour les forts débits de courants.

2-L'INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT SUR LA CARACTÉRISTIQUE I(V)

2-1- COURANT DE COURT-CIRCUIT: (I_u)

Le courant de court-circuit ou courant photovoltaïque est directement proportionnel à l'énergie solaire incidente. Donc lorsque l'éclairement augmente, le courant photovoltaïque augmente.

2-2- TENSION EN CIRCUIT OUVERT: (V_{co})

D'après l'équation (2) et en sachant qu'en circuit ouvert le courant est nul, alors on a :

$$0 = I_{cc} - I_0 \left(\exp q \left(\frac{V_{co}}{nKT} \right) - 1 \right)$$

$$\text{d'où } I_{cc} = I_0 \left(\exp q \left(\frac{V_{co}}{nKT} \right) - 1 \right)$$

$$\text{on tire: } V_{co} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc} + I_0}{I_0} \right)$$

$$\text{or } I_{cc} \gg I_0$$

$$\text{Donc } V_{co} \approx \frac{nKT}{q} \ln \frac{I_{cc}}{I_0} \quad (3)$$

Pour une cellule solaire, lorsque l'éclairement varie de 100W/m² à 1,5Kw/m², le courant I_{cc} varie entre quelques dizaines de mA à quelques centaines de mA. Mais d'après l'équation (3), cette variation du courant I_{cc} NE CHANGE PRATIQUÉMENT PAS la tension V_{co}

D'où lorsque l'éclairement augmente, la tension du circuit ouvert reste pratiquement constante.

2-3- PUISSANCE MAXIMALE

La puissance max est donnée par le produit de la tension optimale par le courant optimum.

Dans la puissance est directement proportionnelle au courant qui est lui même directement proportionnel à l'éclairement et par conséquent, la puissance est directement proportionnelle à l'éclairement.

3-L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE :

La variation de la caractéristique I (V) en fonction de la température dépend des différents facteurs, qui sont sensibles à la température comme :
Gap d'énergie E_g , mobilité μ_n et μ_p , coefficients de diffusion des électrons et des trous.....

3-1-GAP D'ENERGIE AU SILICIUM :

Le gap d'énergie en fonction de la température est donné par l'expression suivante :

$$E_g = (1,205 - 2,8 \times 10^{-4} T) \quad (4)$$

Ce qui montre que lorsque T augmente, E_g diminue.

à $T = 300^\circ \text{K}$ on a $E_g = 1,12 \text{ ev}$.

3-2 MOBILITES DES ELECTRONS ET DES TROUS :

$$n = \mu_{no} \left(\frac{T}{300} \right)^{-2,5} \quad (5)$$

$$p = \mu_{po} \left(\frac{T}{300} \right)^{-2,7} \quad (6)$$

Donc n et p diminuent lorsque la température augmente.

3-3 COEFFICIENT DE DIFFUSION DES ELECTRONS ET DES TROUS :

$$D_n = \mu_n \left(\frac{KT}{q} \right) \quad (7)$$

$$D_p = \mu_p \left(\frac{KT}{q} \right) \quad (8)$$

Si on remplace n et p par leurs expression on aura :

$$D_n = \mu_{no} \left(\frac{K}{q} \right) (300)^{2,5} (T)^{-3/2} \quad (9)$$

$$D_p = \mu_{po} \left(\frac{K}{q} \right) (300)^{2,7} (T)^{-1,7} \quad (10)$$

Donc lorsque la température augmente Dn et Dp diminuent .

3-4- DENSITE DES ETATS DANS LA BANDE DE CONDUCTION ET DE VALENCE :

$$N_c = 2,72 \cdot 10^{19} (T)^{1,5} \quad (11)$$

$$N_v = 1,215 \cdot 10^{19} (T)^{1,5} \quad (12)$$

On voit que lorsque T augmente, alors Nc et Nv augmentent aussi.

3-5- COURANT DE SATURATION I₀ :

Le courant de saturation est donné par la relation suivante :

$$I_0 = q n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (13)$$

On tenant compte des variations de tous les paramètres en fonction de

de la température on aura :

$$I_0 = q C_1 \exp \left(\frac{-E_g}{KT} \right) \left\{ \frac{C_2}{N_A} + \frac{C_3}{N_D} \frac{(300)^{0,1}}{T} \right\} \quad (14)$$

$$\text{Avec } C_1 = 3,3 \cdot 10^{38}$$

$$C_2 = (\mu_{no})^{1/2} \left(\frac{K}{2} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{300} \right)^{-5/4} \left(\frac{1}{\tau_n} \right)^{1/2}$$

$$C_3 = (\mu_{po})^{1/2} \left(\frac{K}{2} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{300} \right)^{-5/4} \left(\frac{1}{\tau_p} \right)^{1/2}$$

Dans une première approximation, on a considéré que N_A et N_D, sont des constantes.

Si la température diminue, alors la décroissance du terme $\exp \left(\frac{-E_g}{KT} \right)$ est plus rapide que la croissance du terme $\frac{1}{(T)^{0,1}}$. Aussi lorsque la température croit, le terme en exponentielle augmente plus vite que le terme $\frac{1}{(T)^{0,1}}$ ne décroît. .../...

On déduit que I_0 varie dans le même sens que la température.

3-6 LE COURANT I_{cc} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE :

On sait que le courant I_{cc} est lié directement au nombre de photons incidents dont l'énergie $h\nu \gg E_g$. Or $\nu = \frac{c}{\lambda}$, donc $h \frac{c}{\lambda} \gg E_g$ ou encore

$$\lambda \ll \frac{hc}{E_g} = \lambda_0 \quad (15)$$

Or d'après l'équation (4), E_g est une fonction de la température. Cette équation montre que lorsque la température augmente, E_g diminue. Et d'après la relation (15), lorsque E_g diminue alors λ_0 augmente. Donc tous les photons dont la longueur d'onde $\lambda < \lambda_0$ peuvent créer des paires d'électrons trous. Et par conséquent lorsque λ_0 augmente, le nombre de photons qui participent à la formation de paire électron-trous augmente aussi; D'où, le courant I_{cc} augmente lorsque la température croît.

3-7 LA TENSION V_{oc} EN FONCTION DE LA TEMPERATURE :

D'après l'équation (3), on remarque que la tension en circuit-ouvert est une fonction de I_0 qui augmente en exponentielle avec la température (D'après la relation (14)). Et par conséquent le rapport $\frac{I_{cc}}{I_0}$ décroît fortement, ce qui entraîne une diminution du terme $\log \left(\frac{I_{cc}}{I_0} \right)$ plus rapide qu'une augmentation du terme $\frac{kT}{q}$. D'où une décroissance de V_{oc} pour une croissance de température.

3-8 LA PUISSANCE MAXIMALE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE :

$$\begin{aligned} P_{max} &= V_m I_m & (16) \\ &= V_m \left[I_{cc} - I_0 \left(\exp \frac{V_m - R_S I_m}{nkT/q} - 1 \right) \right] \end{aligned}$$

$$= V_m (I_{cc} + I_0) - V_m I_0 \exp \left(\frac{V_m - R_s I_m}{\frac{nkT}{q}} \right)$$

On circuit ouvert on a :

$$I_{cc} + I_0 = I_0 \exp \left(\frac{V_{oc}}{\frac{nkT}{q}} \right)$$

$$D'où P_{max} = V_m I_0 \left[\exp \left(\frac{-V_{oc}}{\frac{nkT}{q}} \right) - \exp \left(\frac{-V_m - R_s I_m}{\frac{nkT}{q}} \right) \right] \quad (17)$$

Lorsque la température croit, on voit bien que les deux termes en exponentielle décroissent plus vite et l'emporte sur le produit $V_m I_0$. D'où lorsque la température augmente la puissance maximale diminue.

4-MODULES PHOTOVOLTAIQUES :

La cellule est le composant essentiel d'un système photovoltaïque; mais rares sont les applications directes sous cette forme.

En effet, les caractéristiques mécaniques d'une cellule (fragilité) et de résistance à l'humidité ne pourraient lui garantir la longévité de ses performances.

D'autre part, les caractéristiques d'une seule cellule (tension unitaire voisine de 0,5 volt, puissance faible) ne permettent généralement pas d'alimenter directement un équipement électrique dont les tensions de fonctionnement sont normalisées (12 ; 24 ; 48 volts. C'est pour quoi les cellules sont connectées électriquement (montage en série) et assemblées en module pour constituer des systèmes résistants, hermétiques et de tensions conventionnelles.

.../...

Et pour éviter tous problèmes d'emballément thermique et de destruction de de cellules, ces dernières sont choisies de manière que leurs caractéristiques soient pratiquement identiques (surtout en courant).

4-1 CARACTERISTIQUE D'UN MODULE PHOTOVOLTAIQUE :

Un module photovoltaïque est l'association, en série ou en parallèle ou en série parallèle d'un certain nombre de cellule photovoltaïques .

a - MODULE CONSTITUE PAR DES CELLULES EN SERIE :

D'après le schéma équivalent de la cellule (fig 1), on peut de terminer celui d'un module

La fig 1, représente n cellules photovoltaïques en série. D'après cette figure on peut écrire les équations suivantes :

$$V_A - V_B = V = R_{ch} I = V_{D_1} + V_{D_2} + \dots + V_{D_n} - (R_{S_1} + R_{S_2} + \dots + R_{S_n}) I$$

$$\text{ET } I = I_{P_1} - I_{D_1} = I_{P_2} - I_{D_2} = \dots = I_{P_n} - I_{D_n}$$

Si on considère que toutes les cellules sont identiques, alors on aura :

$$V_{D_1} = V_{D_2} = \dots = V_{D_n} = V_D$$

$$I_{P_1} = I_{P_2} = \dots = I_{P_n} = I_P$$

$$\text{ET } I_{D_1} = I_{D_2} = \dots = I_{D_n} = I_D$$

Donc on aura.

$$V = R_{ch} I = n (V_D - R_S I) \tag{18}$$

$$\text{ET } I = I_P - I_D. \tag{19}$$

- COURANT DE COURT-CIRCUIT (I_{cc}) :

En Court-Circuit on a :

$$R_{ch} = 0 \implies I_{cc} = \frac{V_D}{R_s} \quad (20)$$

On remarque bien que le courant de court-circuit est limité par la résistance série (R_s).

Pour les cellules au silicium : V_D est de l'ordre de 0,5 V et R_s a quelque centaine de milliohms.

D'où I_{cc} est de l'ordre de 1 A à 2 A.

TENSION A VIDE (V_{co}) :

EN CIRCUIT OUVERT ON A :

$$R_{ch} = \infty \implies I = 0 \implies V_{co} = n V_D \quad (21)$$

Or le nombre n des cellules en série est en moyenne de 35 cellules.

D'où V_{co} est de l'ordre de 20V.

PUISSANCE :

La puissance dissipée dans la charge est donnée par le produit :VI.

$$\text{Soit } P = VI = n (V_D - R_s I) I \quad (22)$$

$$\text{ou encore } P = n V_D I - n R_s I^2 \quad (23)$$

Où il apparait la puissance active égale à la somme des puissances dans chaque cellule et la puissance dissipée sous forme d'effet Joule dans les n résistances.

.../...

b-MODULE CONSTITUE PAR DES CELLULES EN PARALLELES :

D'après le schéma de la fig 2, on peut écrire :

$$V_A - V_B = V_{Rch} = (I_t) = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

$$\text{avec } I_t = I_1 + I_2 + \dots + I_n = I$$

Si les cellules sont identiques on aura :

$$V = R_{ch} (nI_1) \text{ et } I_t = nI_1 = I \quad (24)$$

$$\text{Avec } I_1 = I_{P1} - I_{D1} = I_p - I_d \quad (25)$$

$$\text{Et } V = V_D - R_s I_1 \quad (26)$$

-COURANT DE COURT-CIRCUIT (I_{cc}):

Dans ce cas on a :

$$R_{ch} = 0 \implies V = 0 \implies I_{cc1} = \frac{V_D}{R_s} \quad (27)$$

Cette expression (27) représente le courant de court-circuit d'une seule branche. Et par conséquent le courant de court-circuit total est n fois plus grand.

$$I_{cc} = n I_{cc1} \quad (28)$$

$$\text{ou encore } I_{cc} = n \frac{V_D}{R_s} = \frac{V_D}{(R_s/n)} \quad (29)$$

L'expression (29) montre que la résistance série équivalente est n fois plus petite que dans le cas des cellules en série. Ce qui fait augmenter le courant de court-circuit de n fois. Donc c'est une méthode pour avoir de fort courant.

- TENSION A VIDE (V_{co}):

A vide la charge est infinie

$$\text{D'où } I = 0 \text{ et en remplaçant } I \text{ dans (26) on aura } V_{co} = V_D \quad (30)$$

Donc, dans ce cas, la tension de circuit-ouvert est très faible. De

l'ordre de 0,5V.

.../...

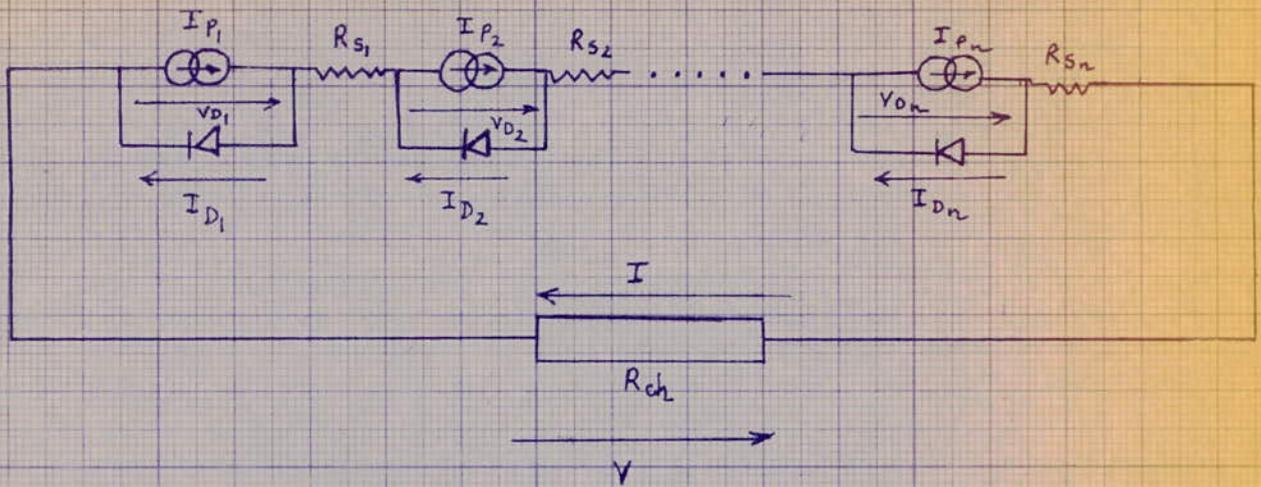


Fig 1 : Association des cellules photovoltaïque en série

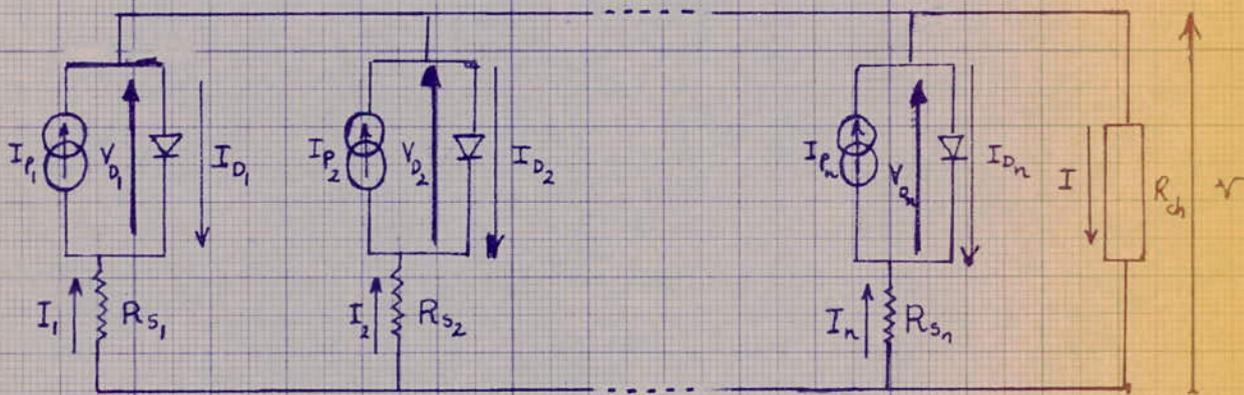


Fig 2 : Associations des cellules photovoltaïque en parallèle

- PUISSANCE :

$$P = VI$$

D'après les équations (24) et (26) on a :

$$P = (V_D - R_S I_1) (n I_1)$$

$$\text{ou encore } P = V_D I_1 - n R_S I_1^2 \quad (31).$$

Le courant I_1 dans l'expression (31) est le même que le courant I de l'expression (19).

Donc on peut dire que la puissance dissipée dans la charge dans les 2 cas est exactement la même.

CHOIX DE L'ASSOCIATION :

Généralement les modules sont constitués par des cellules en série. Et ceci malgré que la puissance est exactement la même dans les deux cas.

Mais, généralement, les équipements électriques exigent des alimentations de grandes tensions.

Mais, généralement, la tension très faible due à l'association parallèle ne permet pas d'alimenter des équipements électriques qui ont des tensions de fonctionnement normalisées (12, 24 V.....).

De même dans le cas de l'association en parallèle, si une cellule s'arrête de fonctionner (placée sous un objet qui fait diminuer les flux lumineux), elle devient receptrice et tous les courants des autres cellules la traverse (sur-tout si la charge est relativement grande.) Et par conséquent ce fort courant risque de la détériorer, s'il atteint le courant de saturation de cette cellule.

C'est ainsi qu'on choisit généralement le montage série qui donne la même puissance mais avec une tension plus grande.

4-2 PROTECTION DES MODULES

Le raccordement électrique des modules entre eux et aux autres constituants d'un générateur photovoltaïque (régulateur de charge, batterie...) nécessite une protection contre certaines détériorations éventuelles.

2-a- DIODE ANTI-RETOUR

Ce type de diode protège les cellules contre la décharge de la batterie au travers les modules en périodes de nuits et contre la circulation de courant inverse dans la branche de module de plus faible puissance en cas de déséquilibre de tension. Le tableau ci-dessous indique le type de diode à utiliser (code universel) en fonction de la tension et de l'intensité maximale débitée par chaque branche du générateur

Tension (V)	0	24
Intensité I 15 A	8CS045	BYW98100
I 20A		BYV 77100

2-b- DIODE BY-PASSE

Ce type de diode protège les cellules contre les phénomènes d'échauffement destructifs pouvant d'un masquage accidentel d'une part partie de module (ombre, feuilles d'arbre, salissures...).
en fonction du type du module, la protection s'effectuera sur des groupes de cellules à l'intérieur de chaque module dont la connectique permet d'assurer cette protection.

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

Avant de présenter les résultats et de tirer les interprétations, on va présenter le matériel utilisée et la description des manipulations.

1- MATERIEL UTILISE :

1-1 MODULES PHOTOVOLTAIQUES UTILISES :

a- BELGOSOLAR : (BELGIQUE)

Ce module est formé de 36 cellules rondes montées en série et placées sur quatre rangées de neuf cellules chacune. Les cellules sont fabriquées à partir du silicium monocristallin. Le diamètre de chaque cellule fait 100 mm.

Dimension de module :

Longueur = 1045 mm , épaisseur = 50 mm

Largeur = 420 mm ,

b- ARCSOLAR : (U.S.A.)

Il est formé de 35 cellules rondes montées en série et placées sur trois lignes de (12-11-12) cellules. Les cellules sont fabriquées à partir du silicium monocristallin et chacune a un diamètre de 100 mm.

Ses dimensions sont :

L = Longueur = 1220 mm , épaisseur = e = 35 mm

l = Largeur = 305 mm ,

C- SOLAREX :

C'est un ensemble de 40 cellules carrées montées en série et placées sur quatre rangées de 10 cellules.

Les cellules sont de type silicium polycristallin et de dimension 100 mm x 100 mm.

Les dimensions du module sont :

$L = 1070 \text{ mm}$, $e = 55 \text{ mm}$

$l = 445 \text{ mm}$,

d- S H A R P :

Il est constitué de 36 cellules rondes, montées en série sur quatre rangées de 9 cellules. Chaque cellule a un diamètre de 100mm.

Dimension du module :

$L = 980 \text{ mm}$, $e = 35$

$l = 390 \text{ mm}$,

e- P H O W A T T P W -P 400 :

Il est formé de 34 cellules rondes, montées en série, et placées sur quatre rangées de (9-8-9-8). Type de cellules monocristallin et de diamètre 100mm ?

Dimension du module :

$L = 1042 \text{ mm}$, $e = 46 \text{ mm}$

$l = 415 \text{ mm}$,

f- P H O T O W A T T B P X - 47.400 :

Il est formé de 36 cellules rondes, montées en série et placées sur quatre rangées de 9 cellules. Les cellules ont un diamètre de 100 mm chacune .

Dimension du module :

$L = 1042 \text{ mm}$, $e = 46 \text{ mm}$

$l = 415 \text{ mm}$,

g- P H O T O W A T T B P X 47 401

Il est constitué de 36 cellules carrées montées en série, sur quatre rangées de 9 cellules. Ces cellules sont de type polycristallin et de dimension 100 m m.

L = 1000 m m e = 45 m m

l = 460 m m

1-2- APPAREILS DE MESURES :

Pour relever les caractéristiques de modules photovoltaïques en fonction de l'éclairement et de la température, on a utilisé des appareils nécessaires à la mesure de toutes les grandeurs qui participent à la détermination de ces caractéristiques.

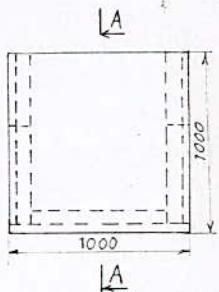
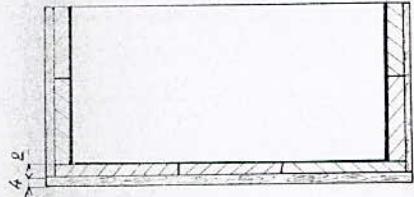
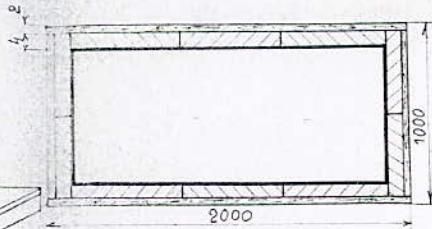
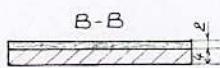
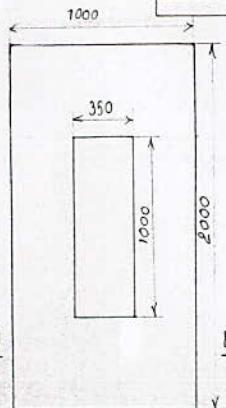
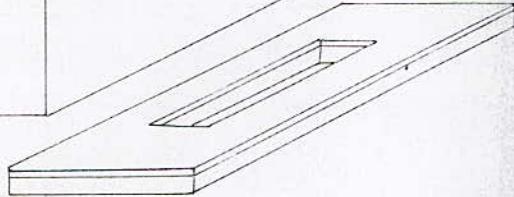
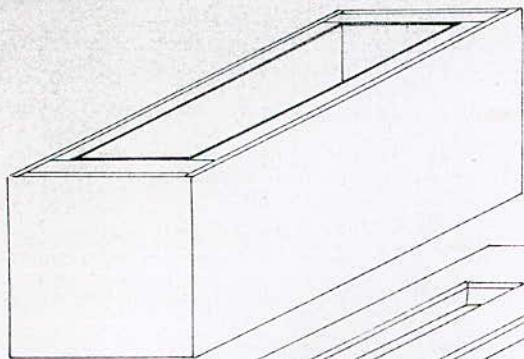
En effet, pour la mesure de l'éclairement, on a utilisé un sincitrace, sur lequel on relève des valeurs de conversion (10 m m donne 118 w/m²).

La température est mesurée directement par un thermomètre numérique à sonde.

Pour la mesure de la caractéristique I en fonction de V, dans le cas de faible courant (jusqu'à 3A), on a utilisé un pareil appelé PHOTOWATT conçu pour cet effet, en donnant directement I en fonction de V. Mais dans le cas de fort courant, on est obligé d'utiliser un ampèremètre avec shunt de 20A évidemment un voltmètre et un réostat supportant les forts courants.

1-3- ETUDE D'EXPERIMENTATION :

Pour étudier l'effet de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ des modules photovoltaïques, on est emmené à construire une grande étuve d'expérimentation de dimensions 2 m X 1 m X m, capable de garder de températures constantes et assez élevées pendant plusieurs heures, et assez solide afin qu'elle puisse supporter tout le poids des accessoires qui participent dans cette expérience.



	Ecole nationale - Polytechnique
ECHELLE: 1/20	~ Etuve d'experimentation ~
BENAKMOUM	
FAIDI	projet de Fin de etude - JANVIER - 85 -

1- DESCRIPTION DE L'ETUVE :

L'étuve est constituée par des feuilles en bois, des tolles galvanisées et un isolateur thermique en liège (voir fig)

Les feuilles en bois sont très dures, leur épaisseur fait 2cm. Chaque feuille est coupé par une scie circulaire suivant les diventions extérieur de la caisse.

A l'intérieur de la caisse en bois on a mis un isolant thermique en matière de liège d'épaisseur 6cm.

L'intérieur de l'étuve est fait par des tolles galvanisées, capables de supporter les grandes températures sans s'endommager. Les tolles ont une épaisseur 4 mm.

Le dessus de l'étuve est couvert par une scie santeuse suivant les plus petite dimension des modules utilisés, afin que la chaleur qui régnera dans l'étuve puisse atteindre d'une manière uniforme toute la surface du module mis en test.

Le milieu interne de la caisse est chauffé par un simple chauffage électrique réglable. Alors que la température qui règne à l'intérieur et celle des cellules photovoltaïques sont mesurées par des thermomètres à sondes à travers, des petits trous de même diamètre que la sonde et, prévus auparavant.

2 - DESCRIPTION DES MANIPULATIONS :

La caractérisation des modules photovoltaïques se fait en fonction de l'éclairement et de la température et dans un autre cas on étudie l'association des modules de même type et le mixage de types différents.

Et par conséquent, on peut grouper nos manipulations en trois parties :

.../...

2- 1 2-1 - CARACTERISATION DES MODULES EN FONCTION DE L'ÉCLAIREMENT

Dans ce cas on expose les modules photovoltaïques au soleil sur un plan incliné, faisant un angle de 45° avec l'horizontal, afin qu'ils puissent capter maximum d'énergie solaire.

La température est celle du milieu ambiant; elle est pratiquement constante durant les manipulations.

Dé même l'éclairement est considéré aussi constant pendant la relevée d'une caractéristique, alors qu'il varie entre sa valeur minimale ou nulle (vers 7h30) et sa maximale (vers 14h00). D'où pour caractériser les modules en fonction de l'éclairement on profite de cette grande variation en relevant les caractéristiques à des éclairagements différents.

2-2 - CARACTERISTIQUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

On fixe le module horizontalement sur l'étuve d'expérimentation et on branche tout nos accessoires de mesure. On chauffe l'intérieur de l'étuve et on fait des mesures à des températures différentes.

Le module est exposé horizontalement, d'où l'énergie captée est faible, mais l'essentiel c'est qu'elle soit constante.

2-3- ASSOCIATIONS ET MIXAGE

On branche 2,3,4 modules de même type en série et en parallèle puis on relève la caractéristique I(V) et ceci pour une température constante et un rayonnement constant.

Et on fait le même travail pour des modules de type différents (MIXAGE).

3-INTERPRETATION :

3-1-CARACTERISATION DES PANNEAUX EN FONCTION DU RAYONNEMENT

a-L'OBSCURITE :

A l'obscurité la caractéristique $I = f(V)$ du panneau est identique à celle d'une diode, la seule différence réside dans l'ordre des grandeurs-
(voir fig on sait que pour une diode au silicium la tension de conduction correspond à 0,6V. (Vour fig (1-a) à (6-a))

Dans le cas du panneau on dresse le tableau suivant qui représente la tension de conduction de chaque type

A E G	SOLAREX	PHOTOWATT BPX-47-401	PHOTOWATT BPX-47-400	SHARP	BELGO -SOLAR
20V	19,25V	18V	20V	20V	18,25 V

On constate que les valeurs indiquées dans le tableau sont voisines, d'où on calcul la valeur moyenne.

$$\sqrt{M} = 19,25V$$

d'autre part on sait qu'une cellule solaire à l'obscurité se comporte comme une diode, et comme le panneau est constitué de plusieurs cellules solaires, donc on cherche à savoir le type de groupement de ces cellules.

Pour un panneau le nombre de cellule moyen est égale à 34, donc sion divise la tension moyenne sur le nombre moyen de cellules on trouve :

$$\frac{19,25}{34} = 0,560V \text{ (qui correspond à la tension de conduction d'une cellule)}$$

on peut conclure que toutes les cellules solaires dans un panneau ont un groupement série.

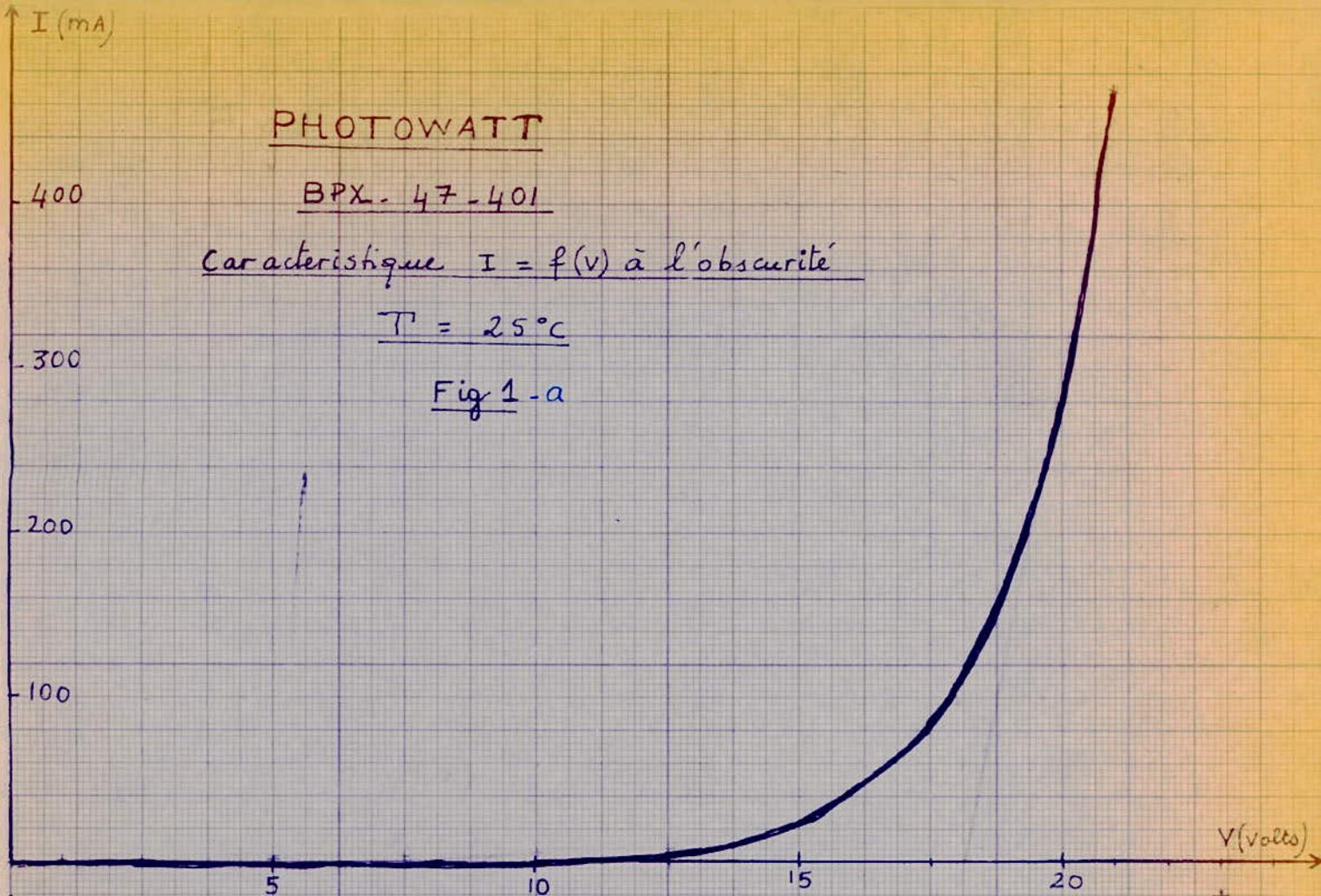
PHOTOWATT

BPX-47-401

Caractéristique $I = f(V)$ à l'obscurité

$T = 25^{\circ}C$

Fig 1-a



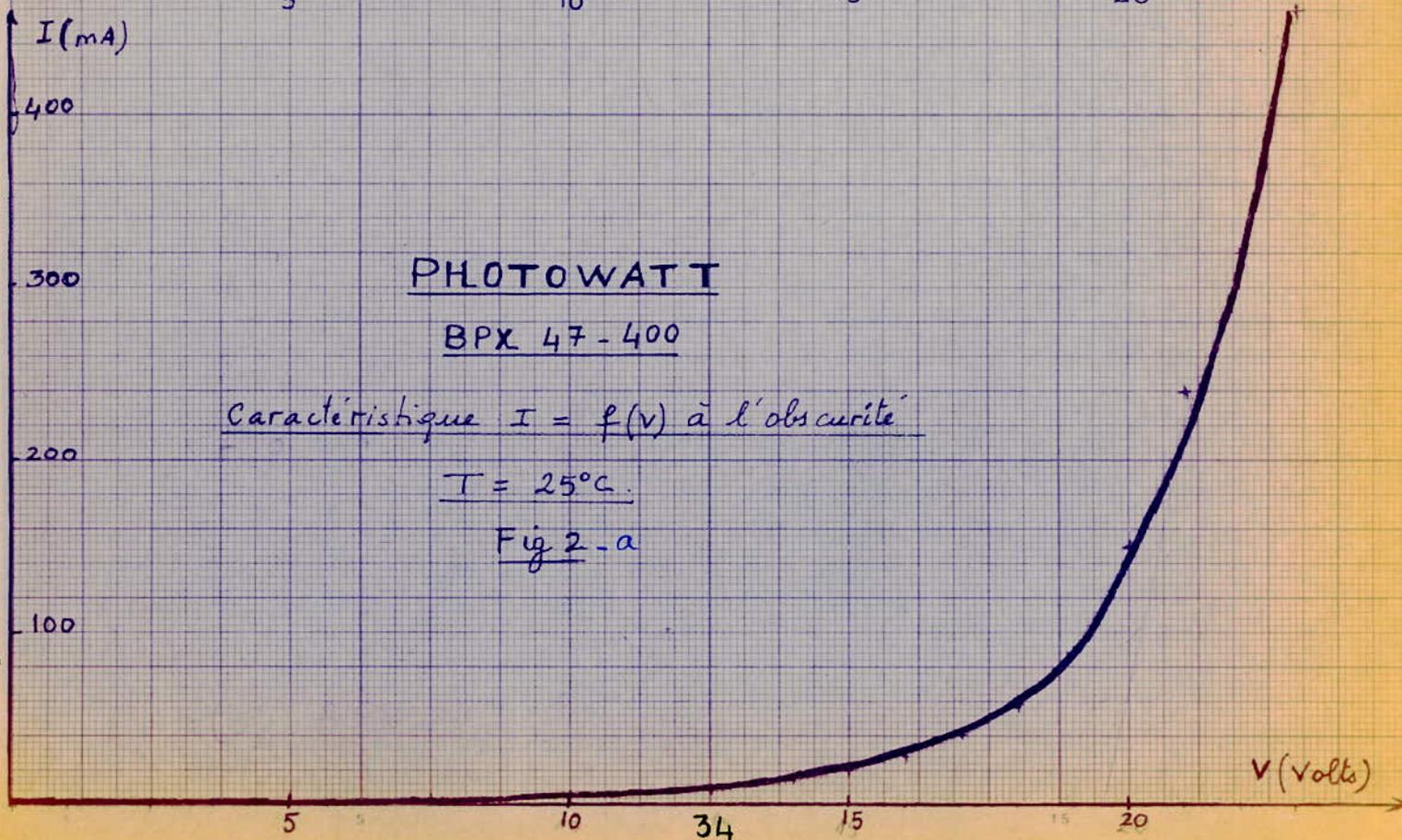
PHOTOWATT

BPX 47-400

Caractéristique $I = f(V)$ à l'obscurité

$T = 25^{\circ}C$

Fig 2-a



I (mA)

400

300

200

100

SHARP

Caractéristique $I = f(V)$ à l'obscurité.

$T = 25^\circ\text{C}$

Fig 3-a

SHARP

5

10

15

20

V (Volts)

I (mA)

400

300

200

100

BELGO - SOLAR

Caractéristique $I = f(V)$ à l'obscurité.

$T = 25^\circ\text{C}$

Fig 4-a

5

10

35

15

20

V (V)

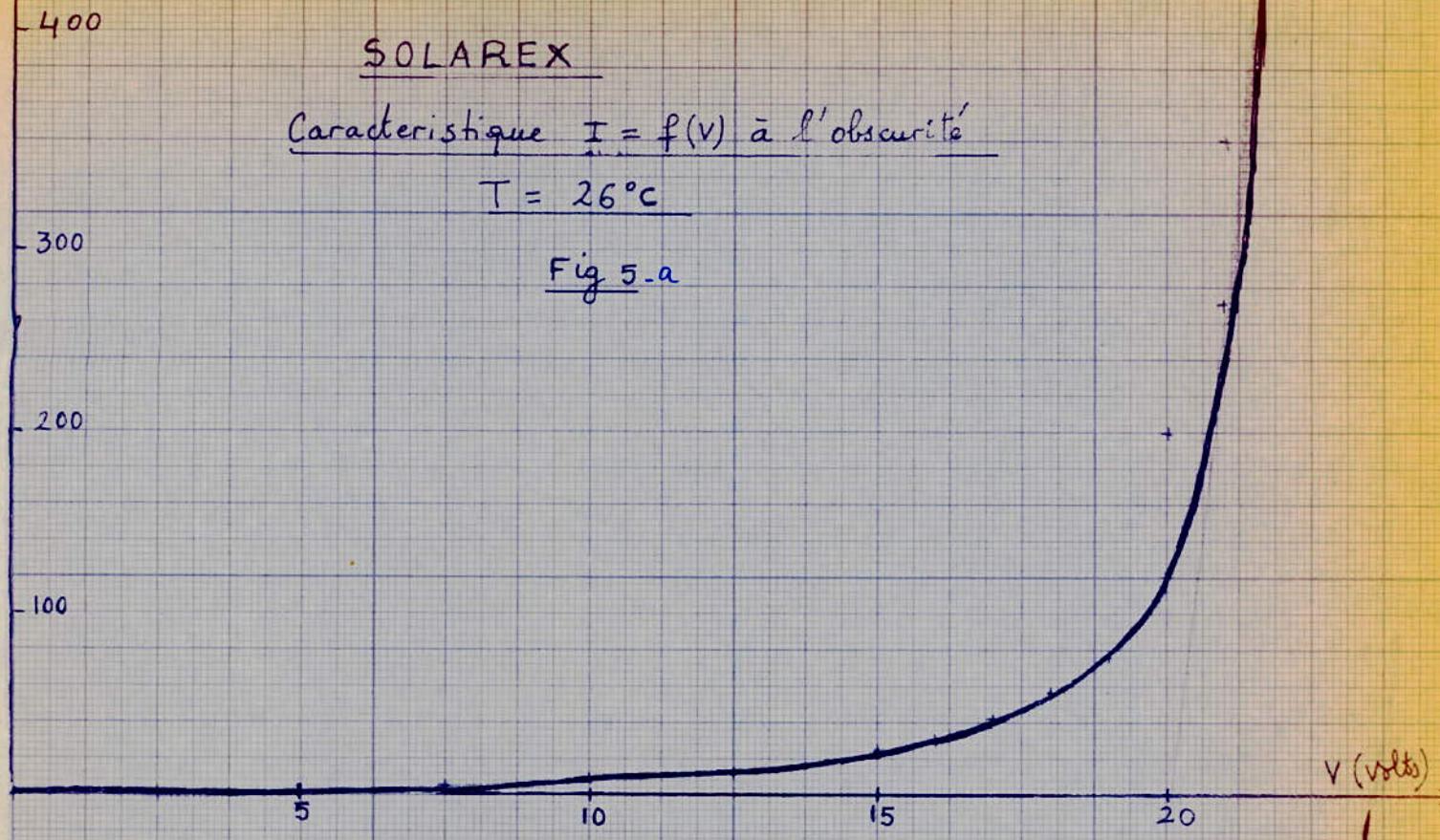
I (mA)

SOLAREX

Caracteristique $I = f(V)$ à l'obscurité

$T = 26^{\circ}C$

Fig 5-a



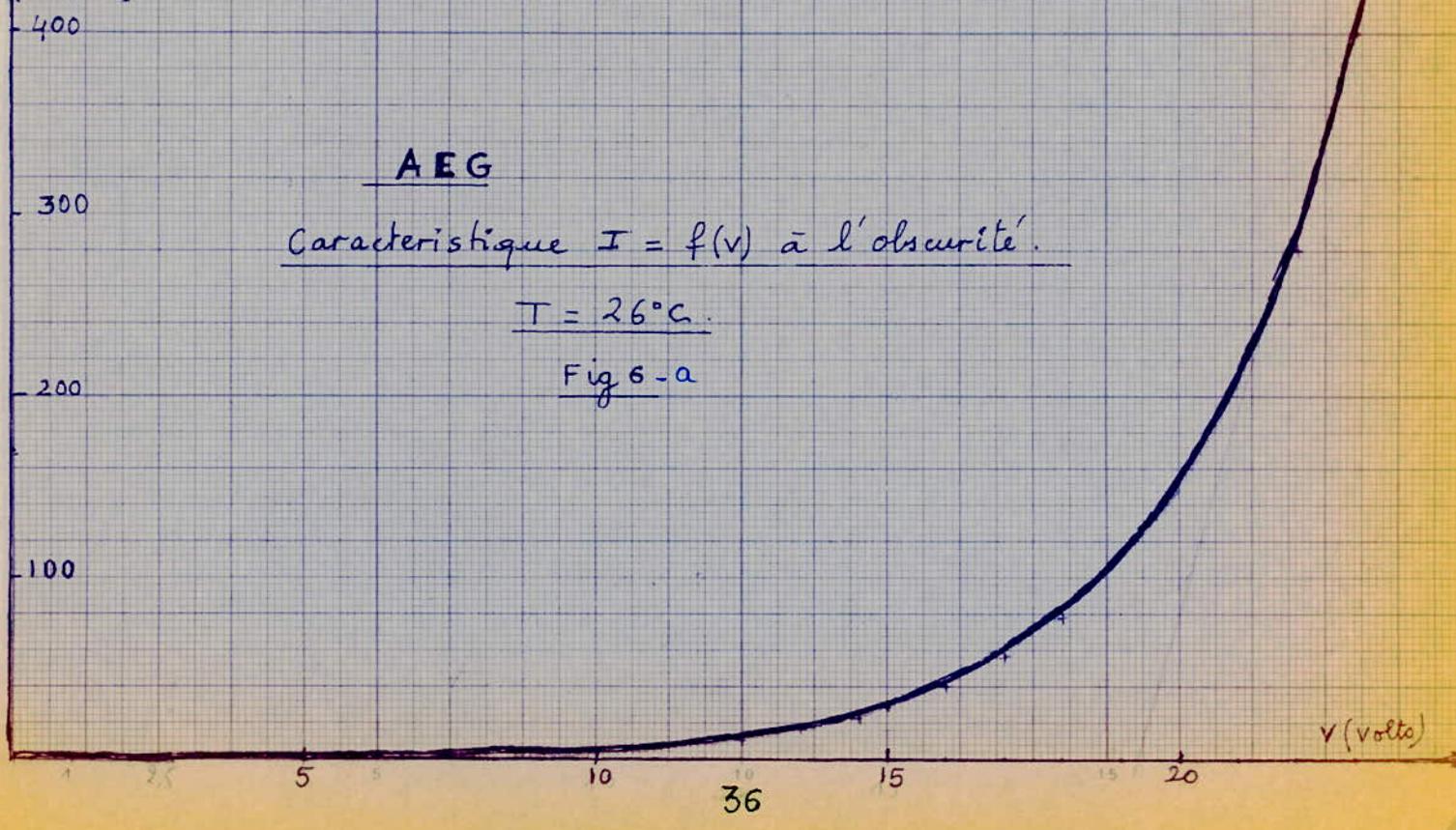
I (mA)

AEG

Caracteristique $I = f(V)$ à l'obscurité.

$T = 26^{\circ}C$

Fig 6-a



b) à éclairement : (voir fig (7-a) à (12-a))

on remarque que pratiquement pour tous les panneaux, lorsque l'éclairement augmente le courant de court circuit (I_{cc}) augmente aussi, par contre la tension en circuit ouvert (V_{co}) reste constante.

Seulement pour les panneaux (ARCO-SOLAR, SOLAREX) on observe un écartement de la tension V_{co} , cela est dû au vieillissement de ces deux panneaux; car ils existent depuis longtemps dans la station de Bouzaréah, et leurs intense utilisation ont modifié les performances de leurs caractéristiques.

Il est important de voir la variation I_{cc} en fonction de l'éclairement, de même pour la puissance maximale.

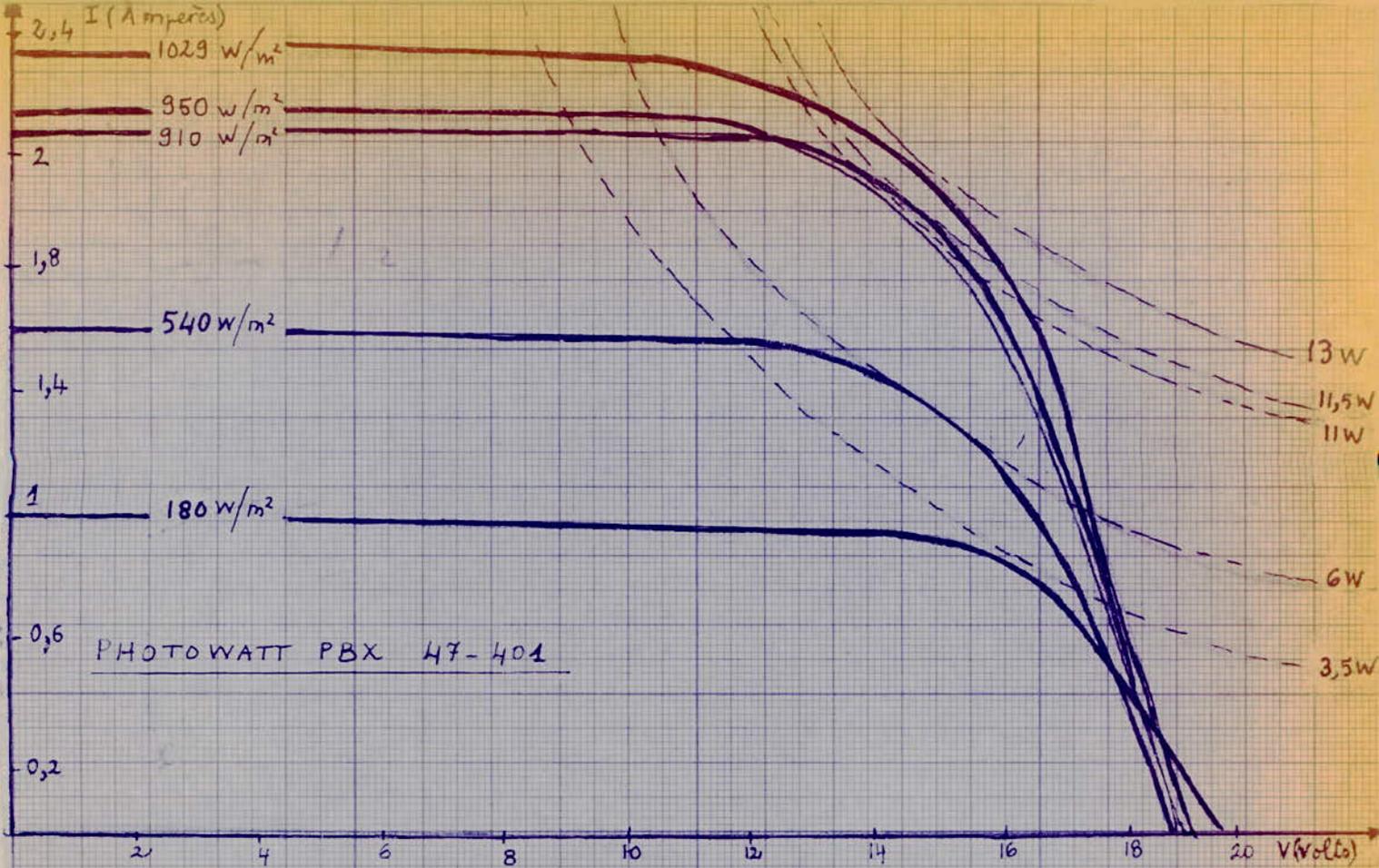
Pour cela on dresse le tableau suivant : (voir fig : (13-a) à (18-a))

SOLAREX	PHOTOWATT BPX-47-401	BELGO-SOLAR	PHOTOWATT P400	PHOTOWATT BPX47-400	ARCO-SOLAR
2,22mA/(w/m ²)	2,42mA/(w/m ²)	2,77mA/(w/m ²)	2,42mA/(w/m ²)	2,42mA/(w/m ²)	2,22mA/(w/m ²)

On remarque que la sensibilité du courant I_{cc} en fonction de l'éclairement est pratiquement constante pour tous les panneaux, pour cela on calcul la valeur moyenne.

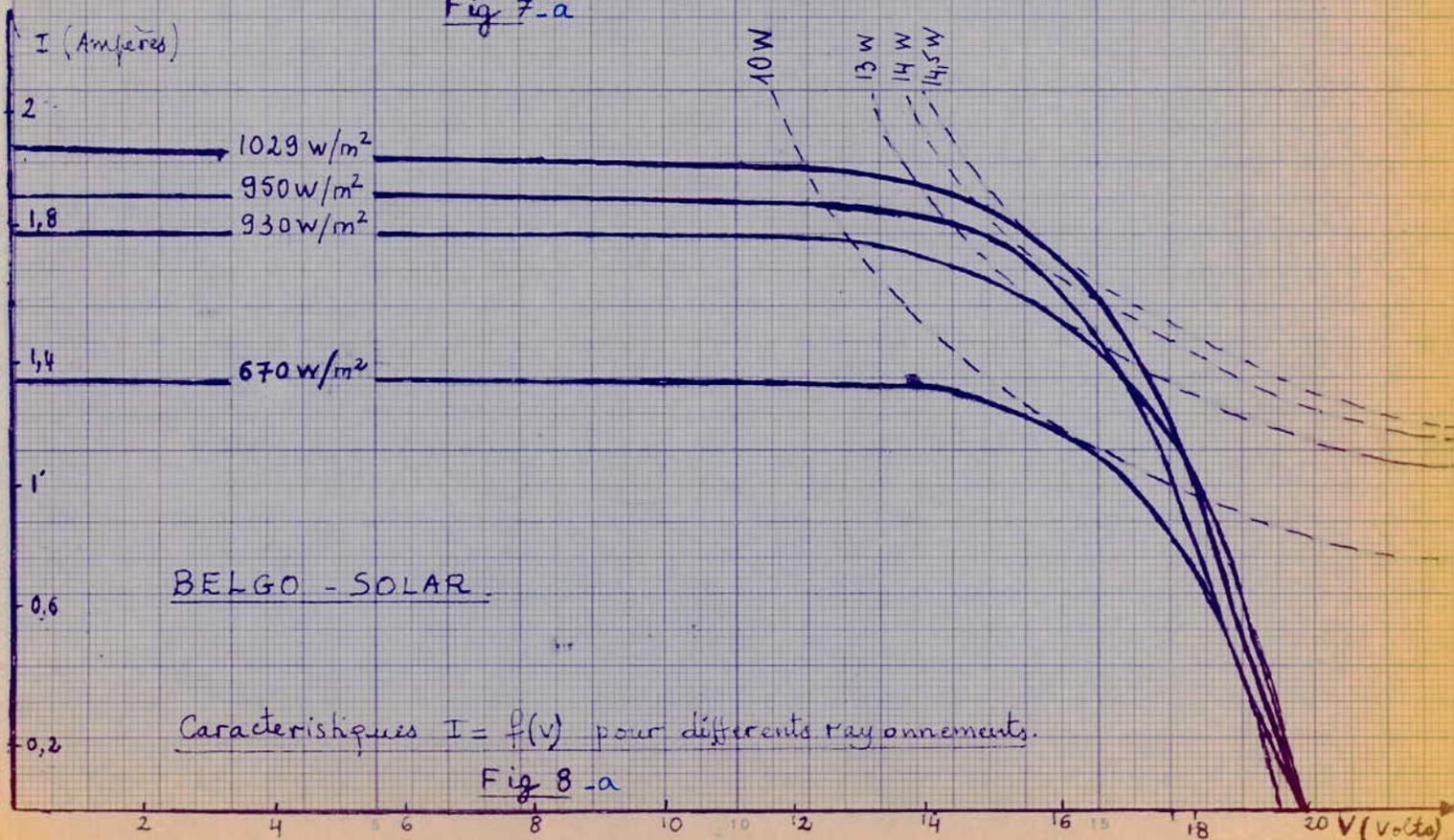
$$\left(\frac{\Delta I_{cc}}{\Delta W} \right) = 2,37 \text{ mA / (w/m}^2 \text{)}$$

autrement dit une variation de 1w/m² de rayonnement correspond à une variation du courant de 2,37mA. Le résultat montre l'influence majeure du rayonnement sur le panneau solaire.



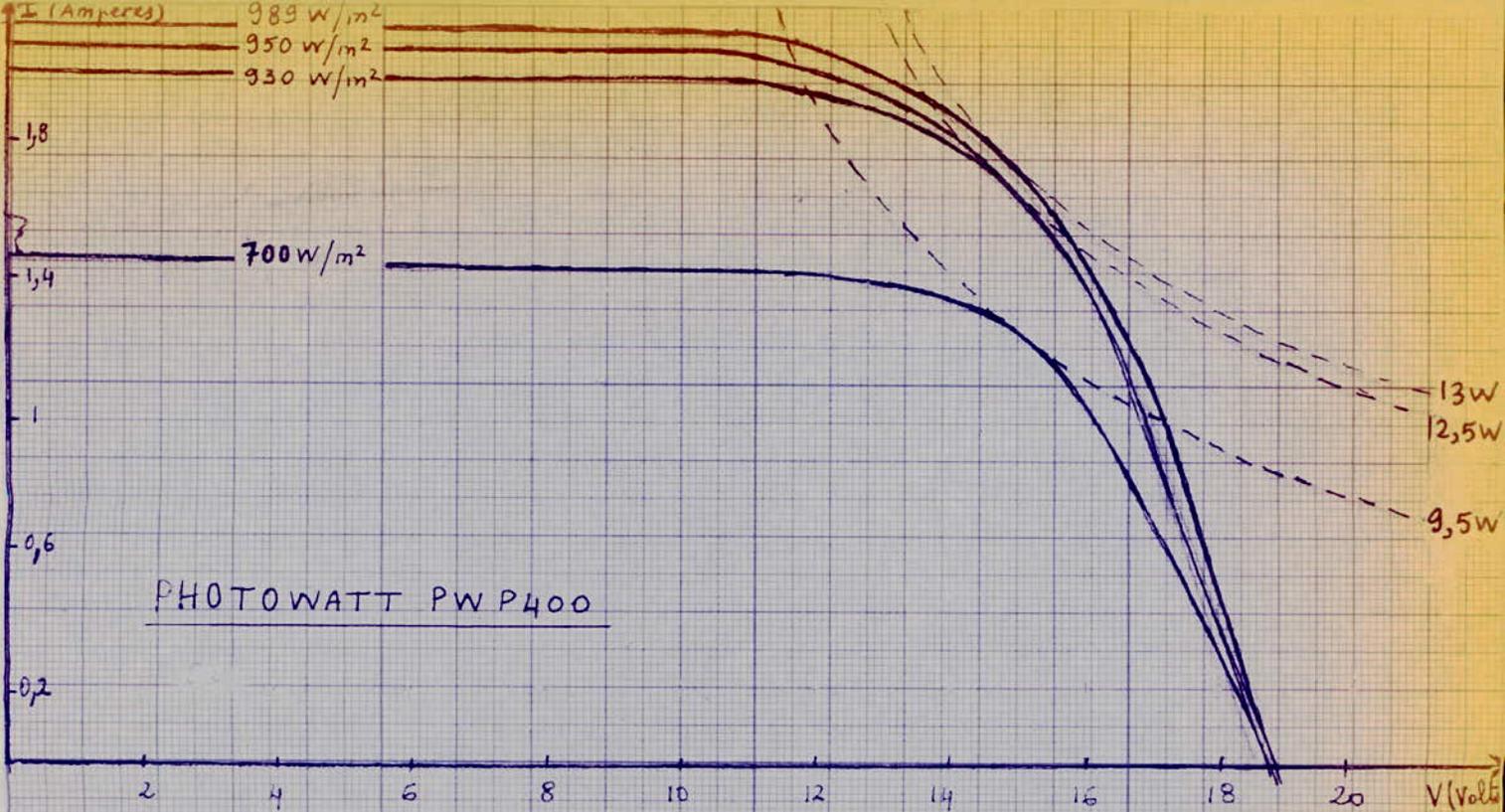
Caractéristique $I = f(V)$ pour différents éclairagements

Fig 7-a



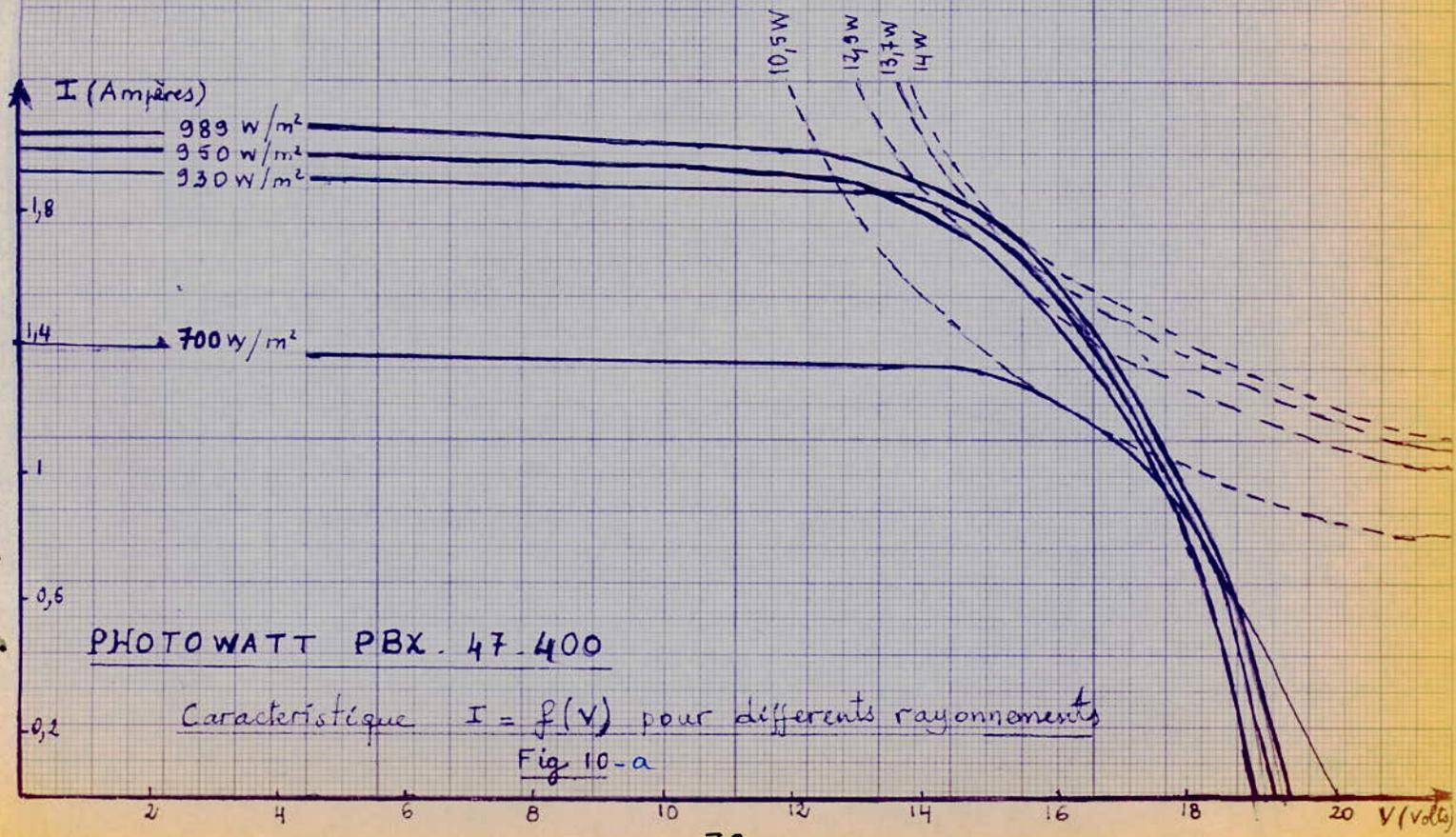
Caractéristiques $I = f(V)$ pour différents rayonnements.

Fig 8-a



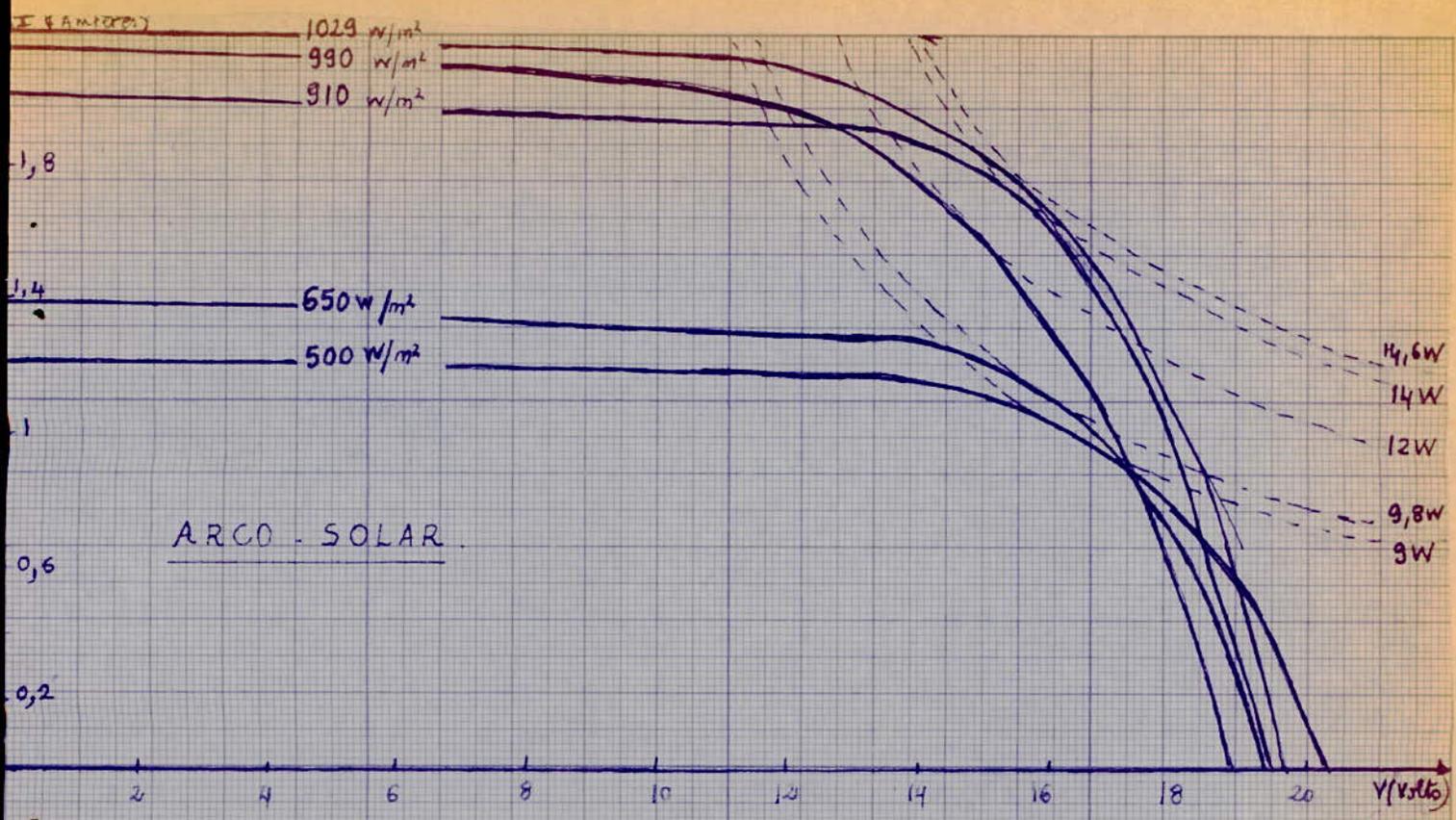
Caractéristique $I = f(V)$ pour différents rayonnements.

Fig 9-a

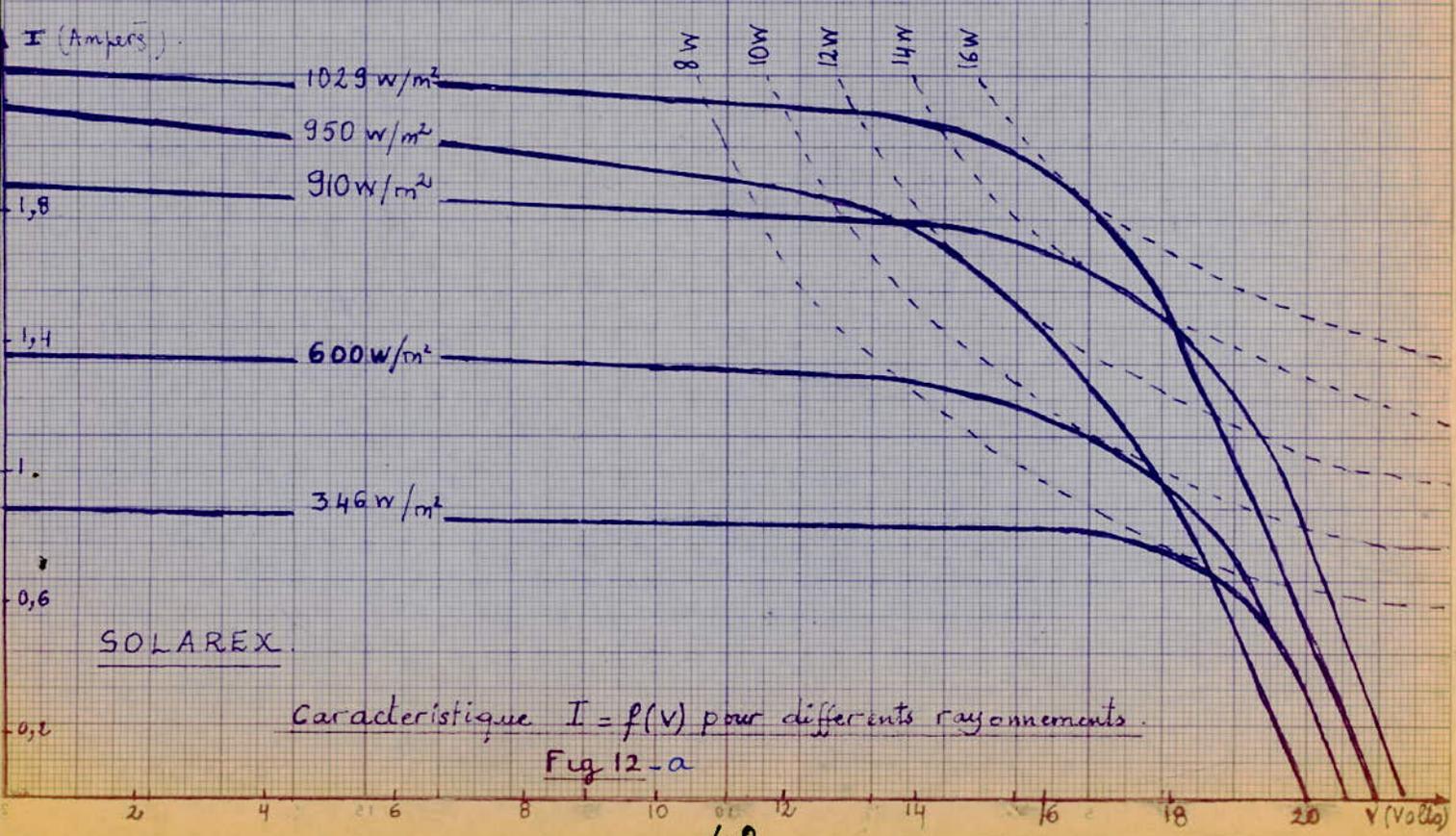


Caractéristique $I = f(V)$ pour différents rayonnements.

Fig 10-a



Caracteristique $I = f(V)$ pour differents rayonnements
 Fig 11-a



Caracteristique $I = f(V)$ pour differents rayonnements.
 Fig 12-a

Si on utilise ces panneaux dans le désert (Sahara Algérien) où le rayonnement dépasse facilement 1300 W/m^2 , donc on aura un courant de court-circuit qui dépasse facilement. $I_{cc} = 2,37 \times 1300 \approx 3 \text{ A}$.

De même pour la puissance $P = VI$, $V = \text{cste}$

Il croît fortement avec l'éclairement donc de même la puissance augmente avec le rayonnement. (voir fig (19-a) à (24-a))

On dresse un tableau qui donne la variation de puissance maximale en fonction de l'éclairement.

SOLAREX	ARCO SOLAR	PHOTOWATT PW -P400	PHOTOWATT BPX47-400	PHOTOWATT BPX47-401	BELGO-SOLAR
$300 \text{ W/(W/cm}^2)$	$270 \text{ W/(W/cm}^2)$	$250 \text{ W/(W/cm}^2)$	$270 \text{ W/(W/cm}^2)$	$254 \text{ W/(W/cm}^2)$	$272 \text{ W/(W/cm}^2)$

On remarque une chose très importante, c'est que $\frac{[\Delta P]}{[\Delta W]} = \frac{W}{W/\text{cm}^2} \text{ cm}^2 \text{ (surface)}$.

le rapport $\frac{\Delta P}{\Delta W}$ donne la surface effective, autrement dit la surface utile qui donne naissance à un courant photovoltaïque.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta W} \right) \text{ moyen} \approx 275 \text{ cm}^2.$$

Si on cherche la surface moyenne des cellules d'un panneau

$$S = n \cdot \pi \cdot R^2.$$

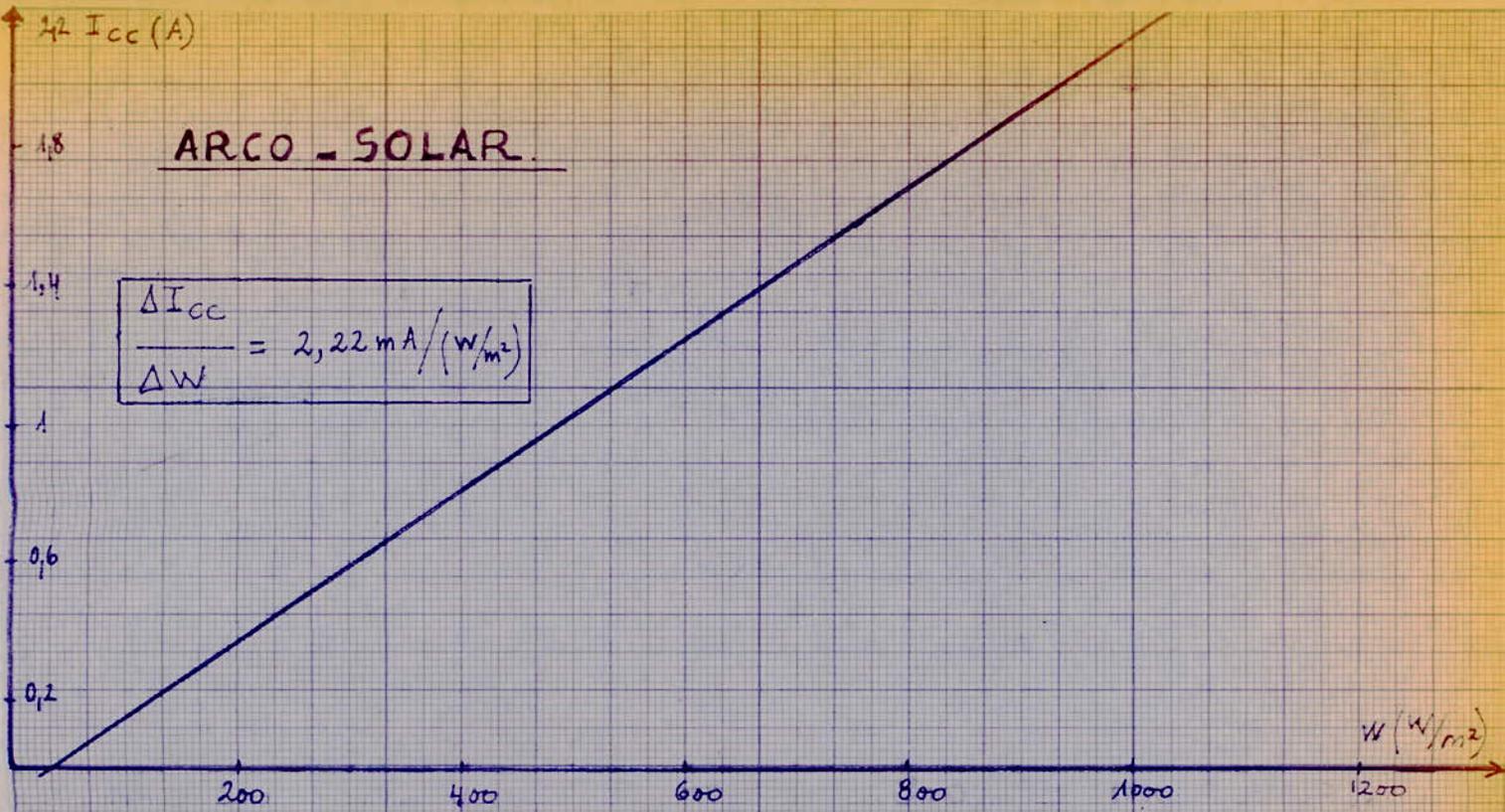
$n = 34$ (nombre moyen des cellules dans un panneau).

$R = 50 \text{ mm}$ (rayon d'une cellule).

$$S = 34 \cdot \pi \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 = 2669 \text{ cm}^2.$$

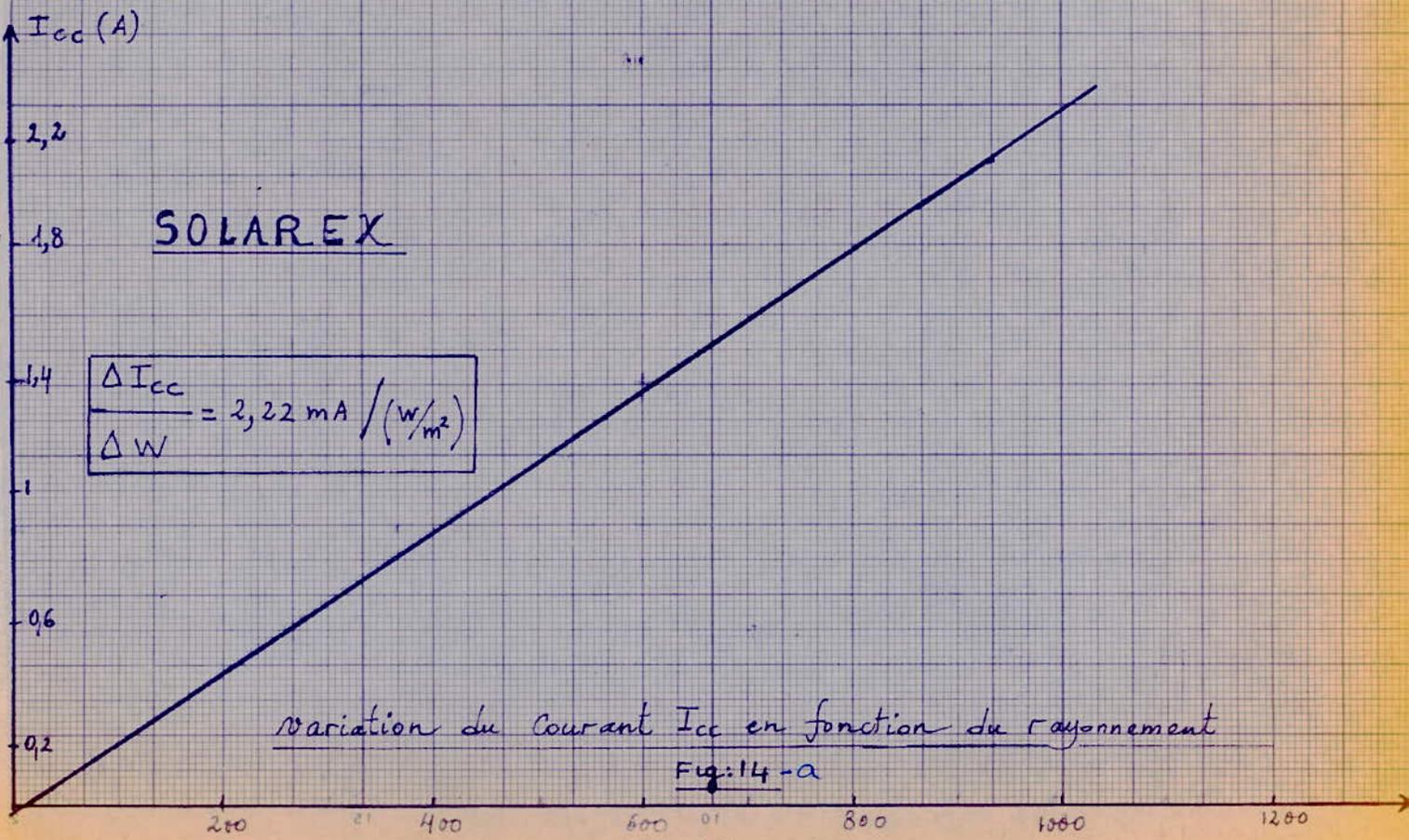
sur 2669 cm^2 de surface on a seulement 275 cm^2 qui participent à la conversion photovoltaïque d'où le rendement surfacique :

$$\eta_s = \frac{275}{2669} \times 100 \approx 10\%$$



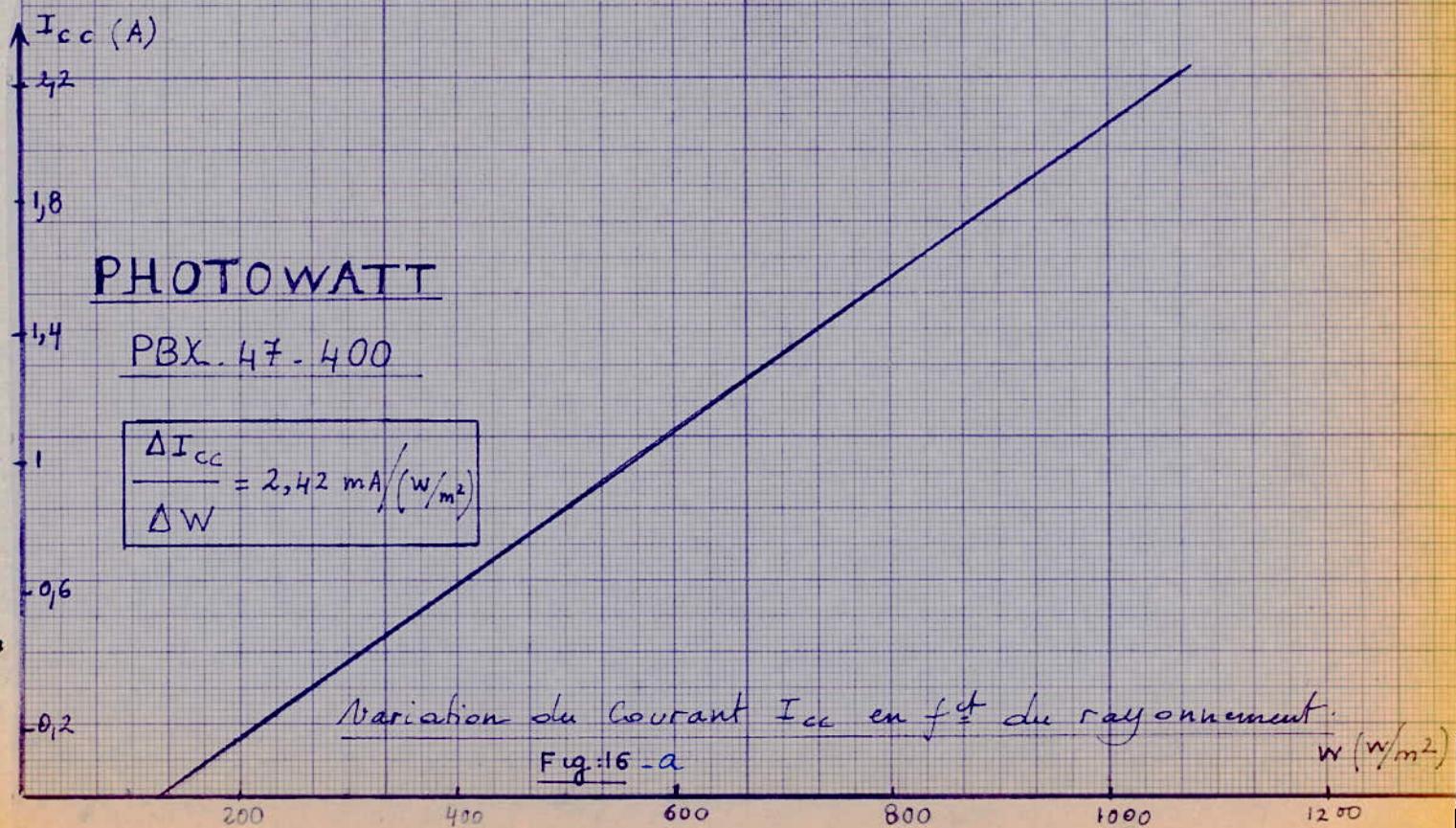
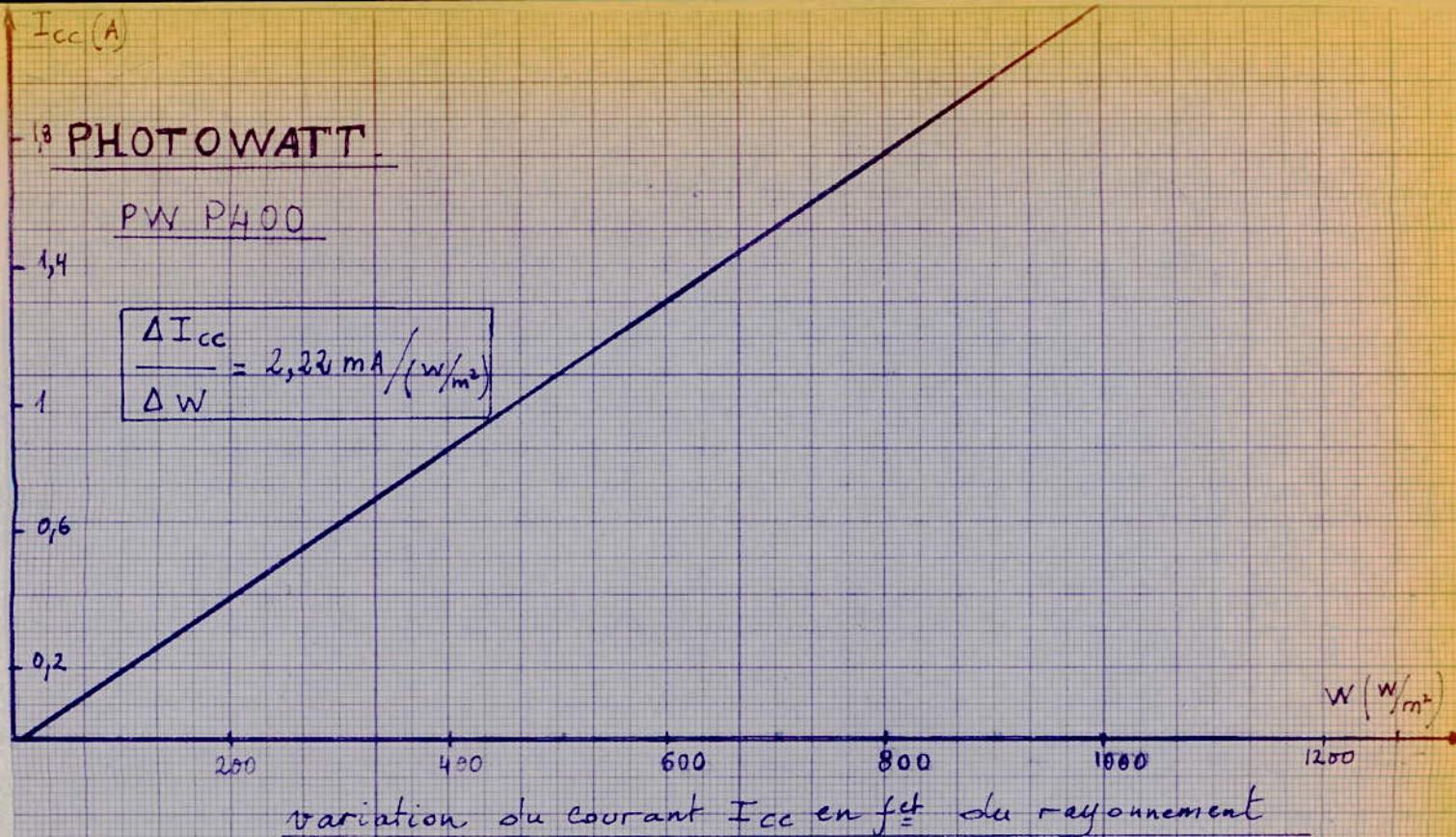
variation du courant I_{cc} en fonction du rayonnement.

Fig: 13-a



variation du courant I_{cc} en fonction du rayonnement

Fig: 14-a

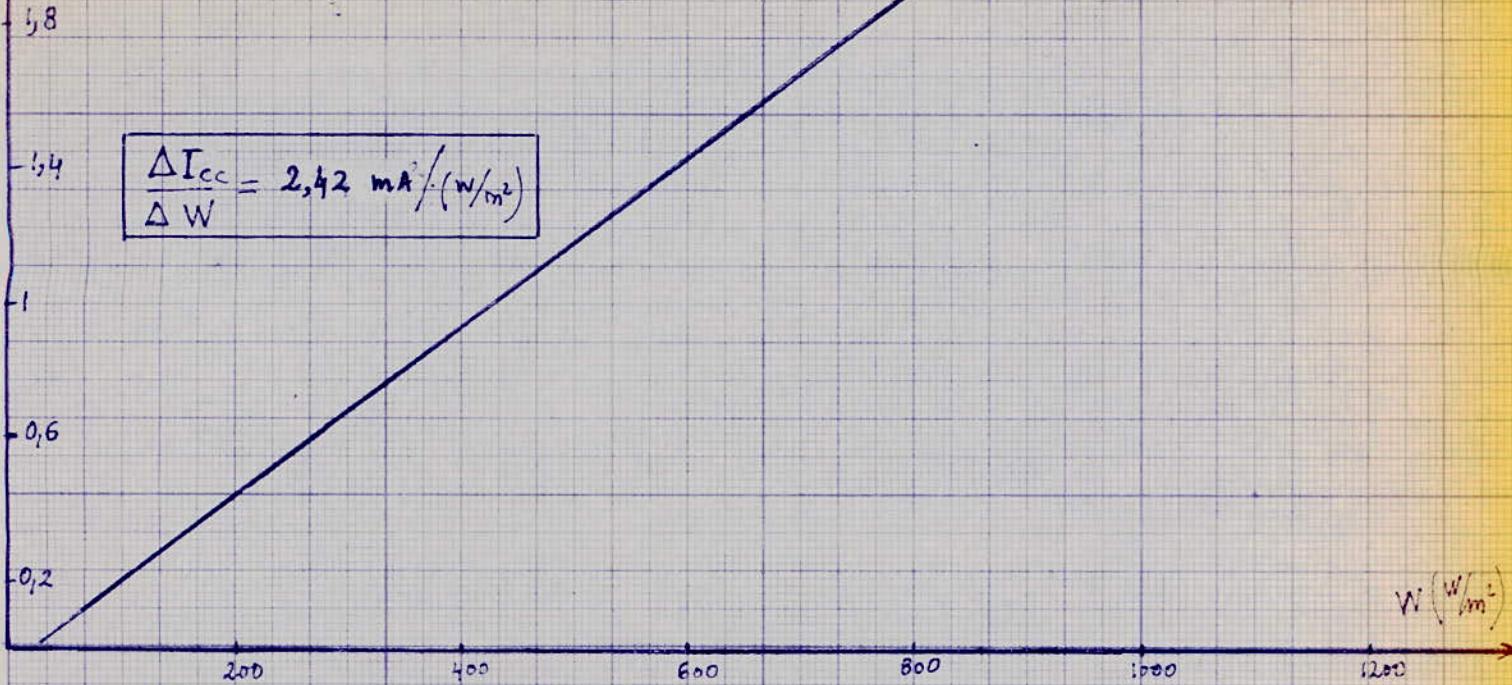


I_{cc} (A)

PHOTOWATT

PBX 47-401

$$\frac{\Delta I_{cc}}{\Delta W} = 2,42 \text{ mA}/(\text{W}/\text{m}^2)$$



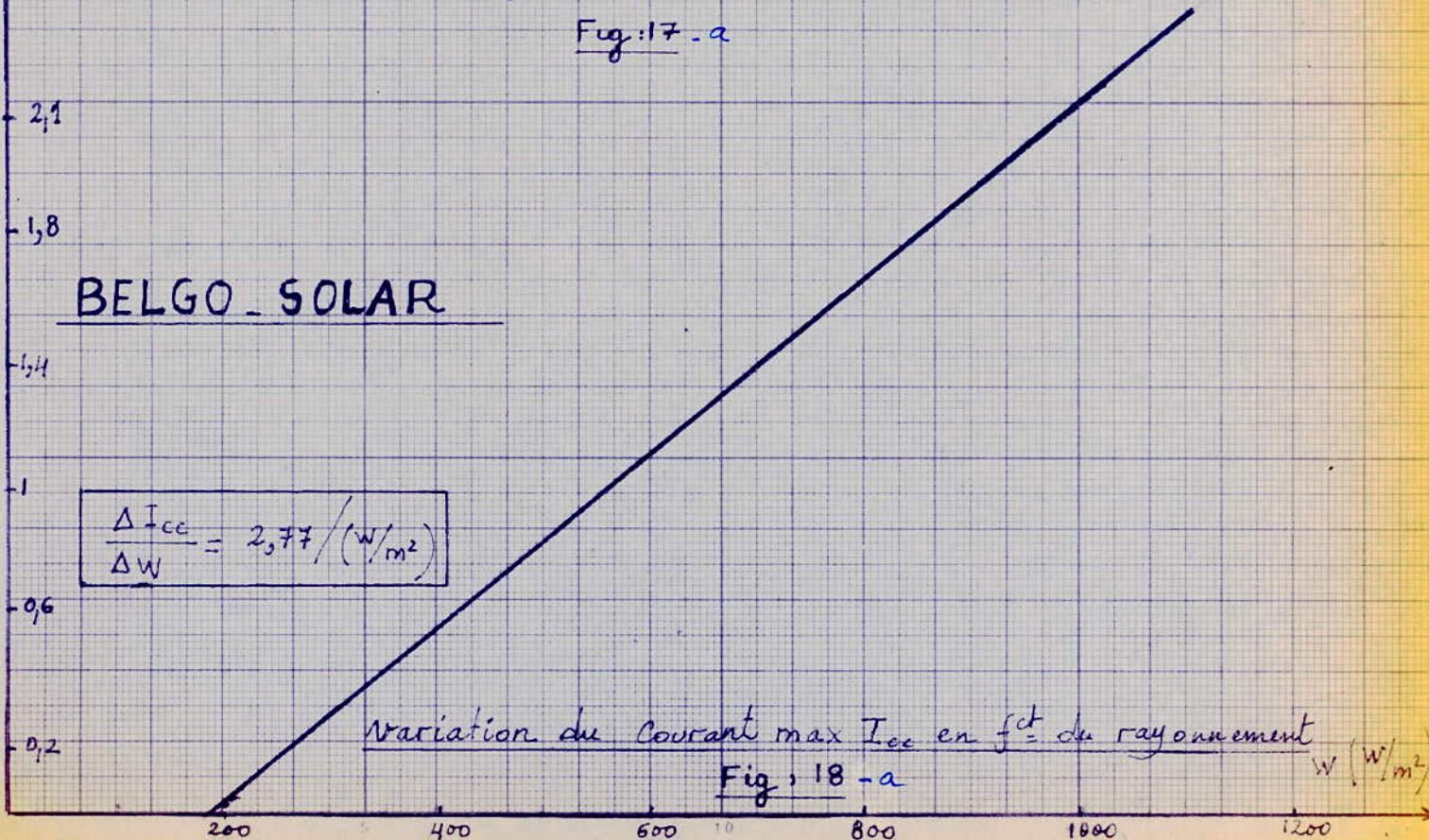
I_{cc} (A)

Variation du Courant max I_{cc} en fct du rayonnement.

Fig: 17-a

BELGO-SOLAR

$$\frac{\Delta I_{cc}}{\Delta W} = 2,77 / (\text{W}/\text{m}^2)$$



Variation du Courant max I_{cc} en fct du rayonnement

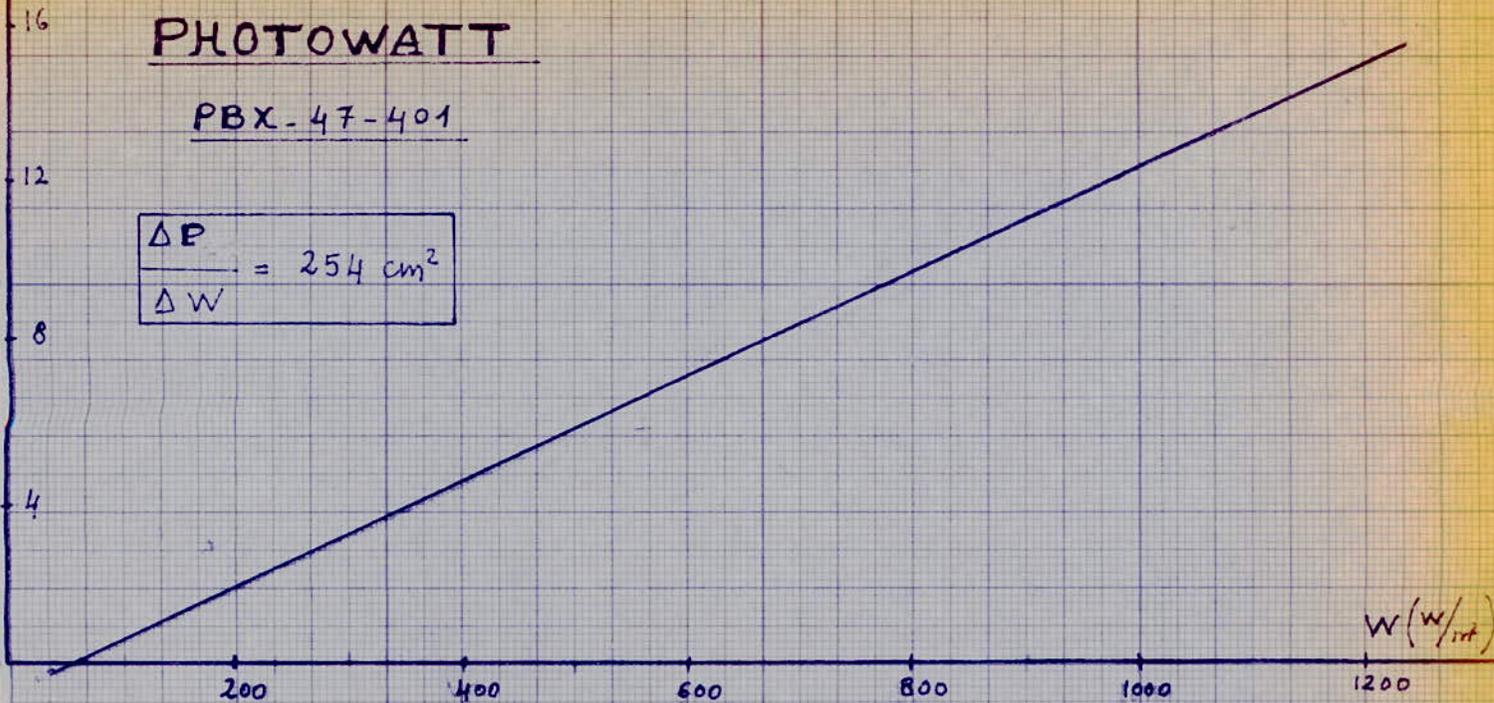
Fig: 18-a

19 P(w)

PHOTOWATT

PBX-47-401

$$\frac{\Delta P}{\Delta W} = 254 \text{ cm}^2$$



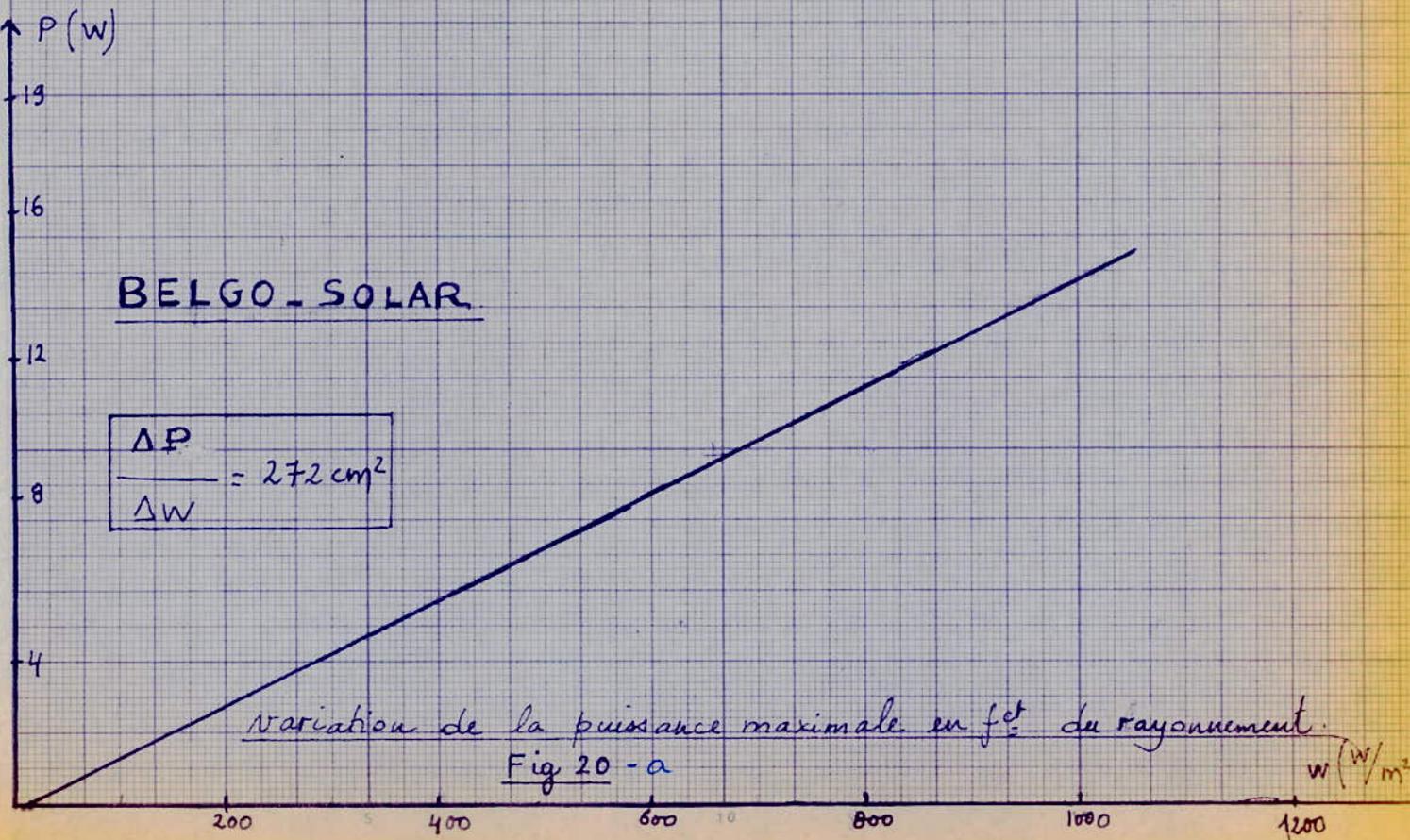
Variation de la puissance maximale en fct du rayonnement.

Fig:19-a

P(w)

BELGO-SOLAR

$$\frac{\Delta P}{\Delta W} = 272 \text{ cm}^2$$



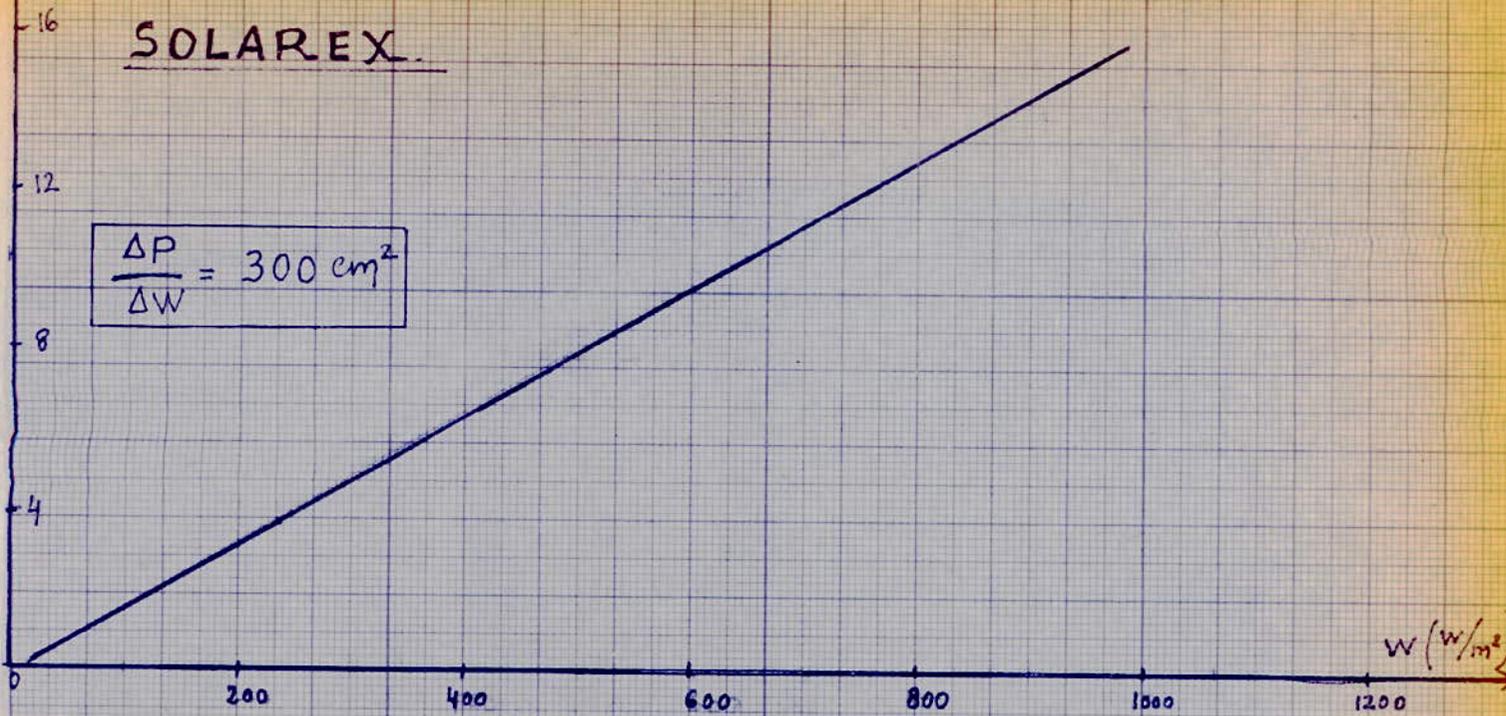
Variation de la puissance maximale en fct du rayonnement.

Fig 20-a

15 P(w)

SOLAREX

$$\frac{\Delta P}{\Delta W} = 300 \text{ cm}^2$$



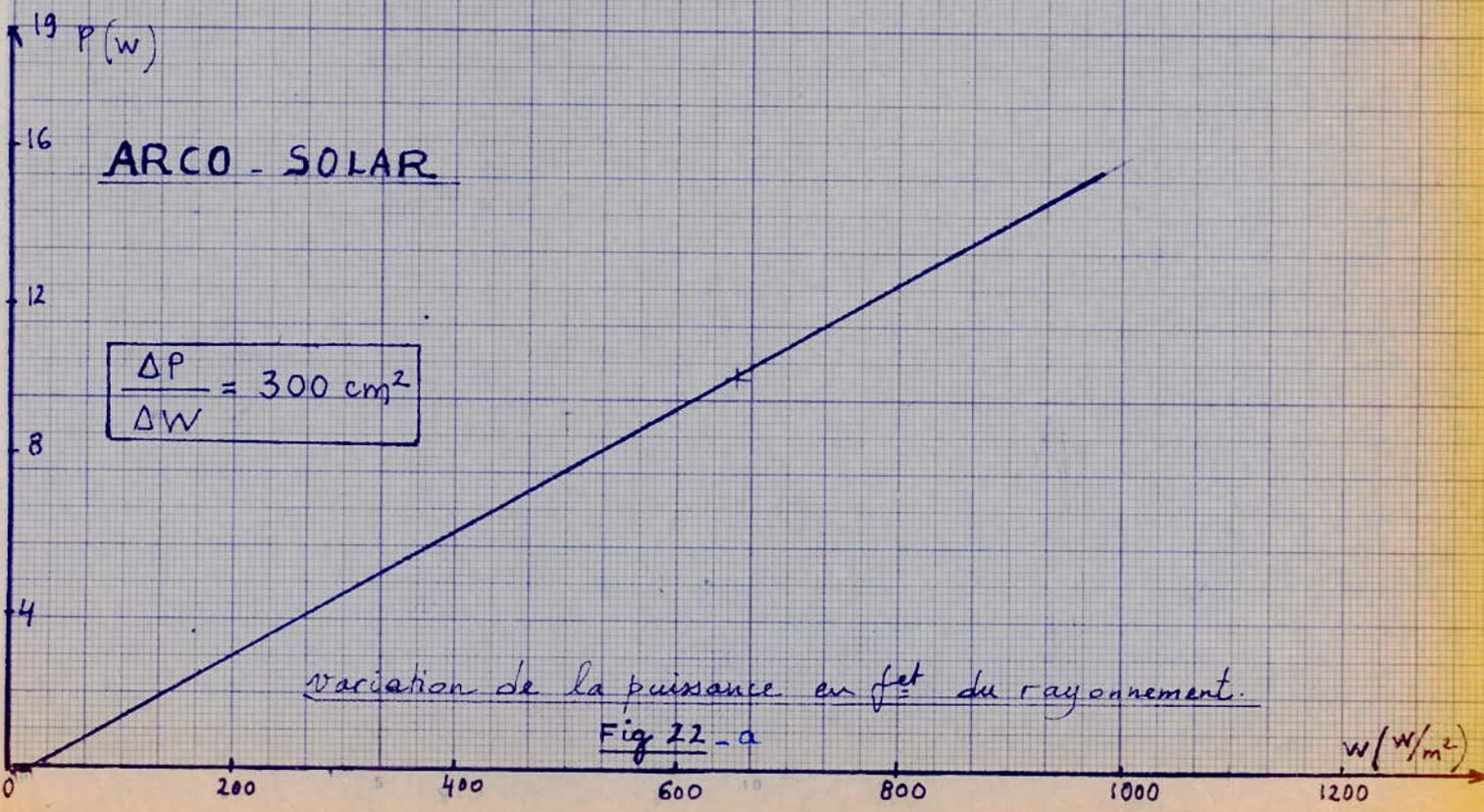
Variation de la puissance maximale en fct du rayonnement.

Fig:21-a

19 P(w)

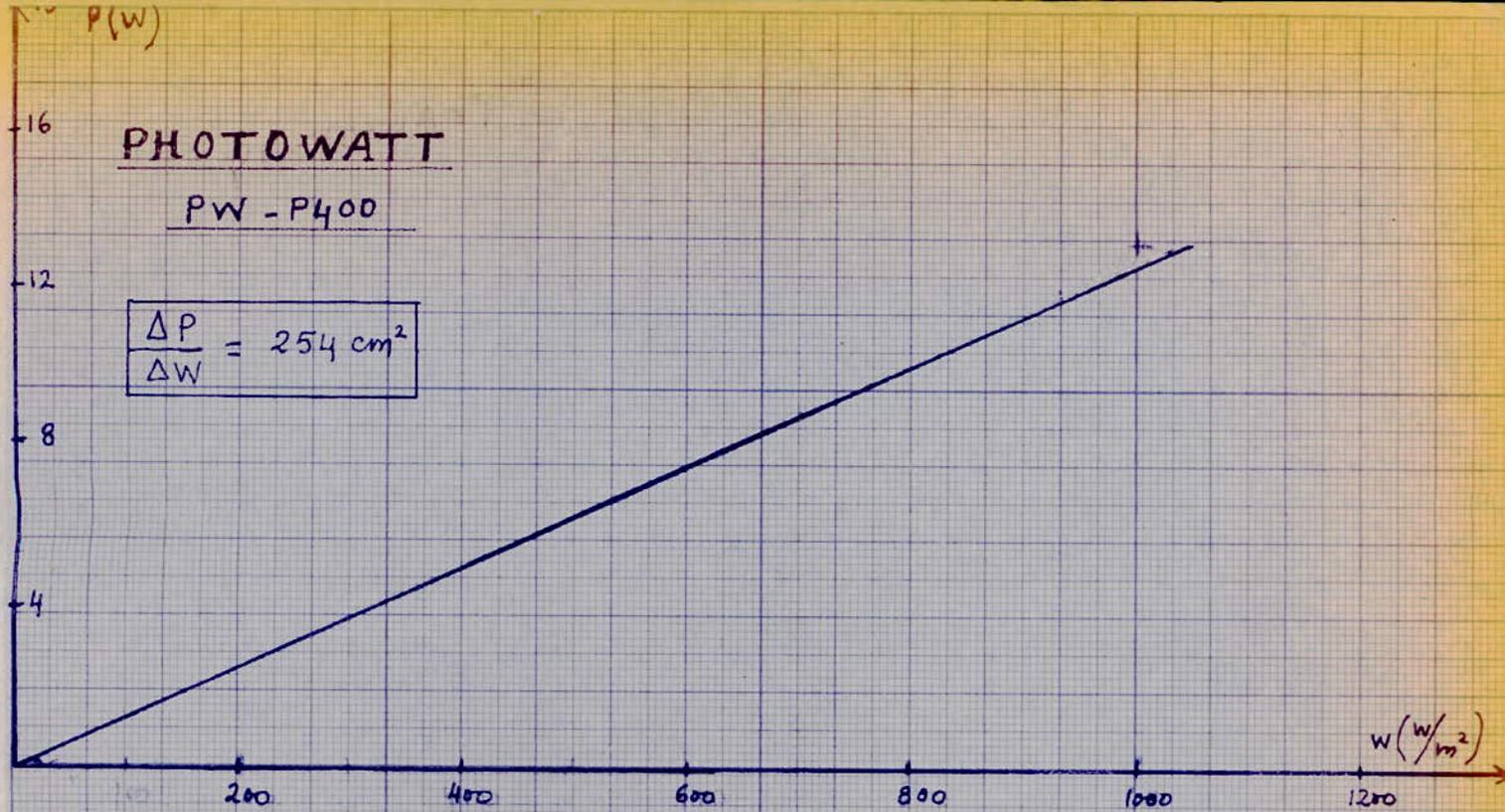
ARCO - SOLAR

$$\frac{\Delta P}{\Delta W} = 300 \text{ cm}^2$$



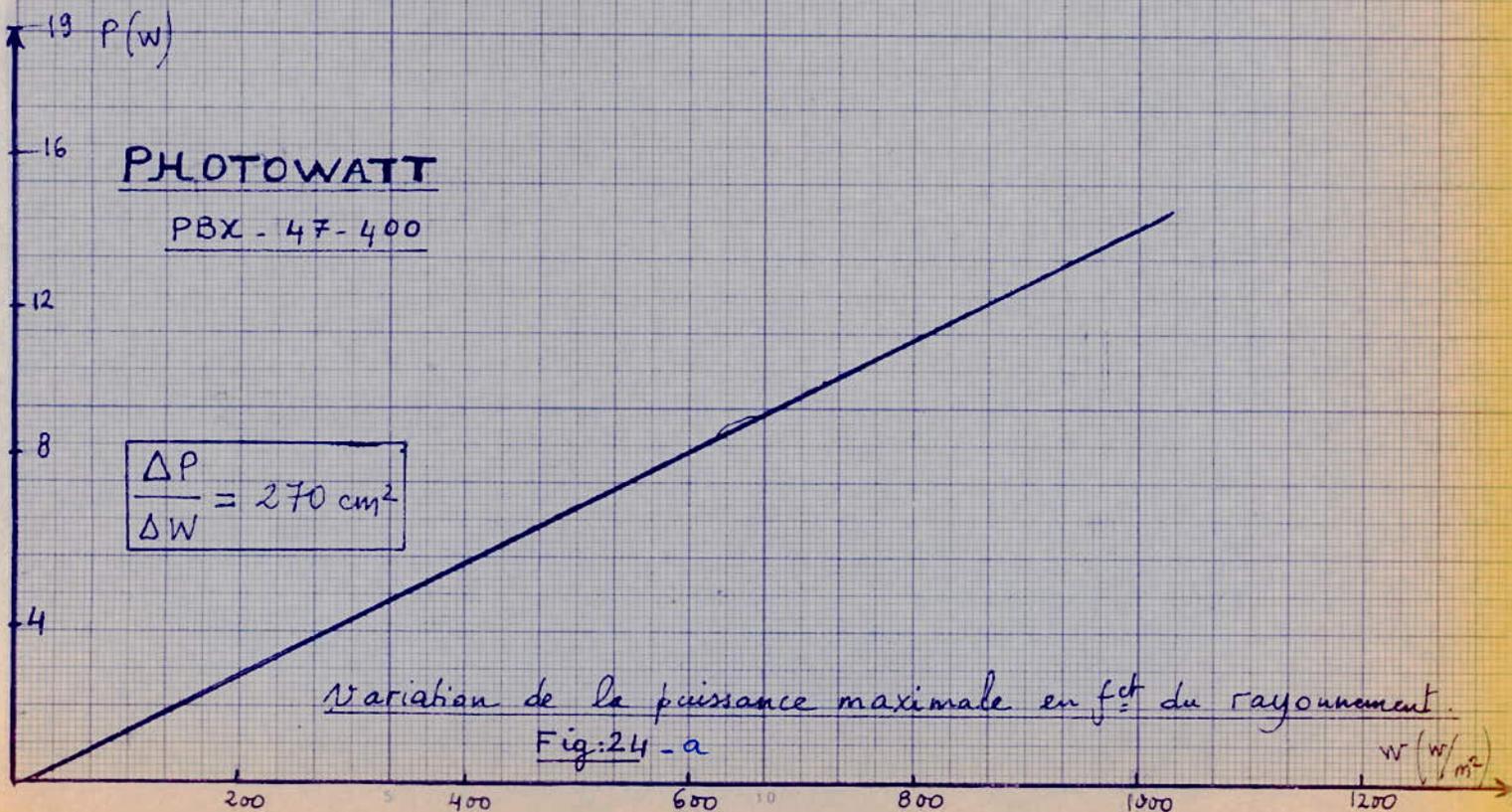
variation de la puissance en fct du rayonnement.

Fig 22-a



Variation de la puissance maximale en fct du rayonnement.

Fig:23-a



Variation de la puissance maximale en fct du rayonnement.

Fig:24-a

3-2 CARACTERISATION DES PANNEAUX EN FONCTION DE LA TEMPERATURE :

On a prit 6 valeurs discrètes de température, de 30°C jusqu'à 70° (30°, 40°, 50°, 60°, 70°), on à essayer au maximum d'avoir exactement ces valeurs, mais malheureusement en réalité en s'écartere toujours de la valeur voulue de quelques degrés.

INTERPRETATION DES RESULTATS : (voir fig : (1-b) à (7-b))

D'après les courbes on constate que lorsque la température augmente la puissance maximale diminue, ce qui constitue un inconvénient pour l'utilisation du panneau solaire dans une région chaude (ex : Sahara Algérien).

Mais cette diminution varie d'un panneau à un autre, c'est pour cela pour une bonne utilisation, il faut faire le bon choix du panneau.

Pour cela on dresse un tableau qui donne pour chaque type la sensibilité en puissance en fonction de la température. (voir fig : (10-b) à (14-b)).

PHOTOWATT BPX47-400	PHOTOWATT BPX47-401	SHARP	PHOTOWATT PW-P400	A E G	SOLAREW	BELGO SOLAR
-76mW/°C	-99mW/°C	95mW/°C	-100mW/°C	-130mW/°C	-190mW/°C	-79mW/°C

D'après ce tableau on constate que la série photowatt. Présente une sensibilité en $\frac{\Delta W}{\Delta T}$ de la température plus faible que les autres soit une valeur moyenne :

$$-\frac{\Delta W}{\Delta T} = - \frac{76 + 79 + 100}{3} = - 85 \text{ mW/}^\circ\text{C}$$

C'est à dire une de 1°C (entraîne) une diminution de puissance de 85 mW.

De même on constate que lorsque la température augmente le courant de court circuit augmente, et la tension en circuit ouvert diminue.

.../...

Pour materialiser ces variations on dresse les tableaux suivants :

voir fig (15-b) ā (21-b)).

PHOTOWATT PBX47-400	PHOTOWATT PBX47-401	SOLAREY	PHOTOWATT PW P400	SHARP	BELGO SOLAR	AEG
-30mV/°C	-35mV/°C	-35mV/°C	-40mV/°C	-44mV/°C	-53mV/°C	-60mV/°C

D'après ce tableau la sensibilité de la série photowatt est toujours meilleur soit en valeur moyenne.

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta T}\right)_{\text{moyenne}} = -\frac{30 + 35 + 40}{3} = -35 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

une augmentation de 1°C entraine une diminution de 35mV de la tension V_{co}.

La même chose pour le courant, on dresse le tableau suivant :

(voir fig (22-b) ā (28-b))

PHOTOWATT PWP 400	PHOTOWATT PBX-47-400	PHOTOWATT PBX 47-401	BELGO-SOLAR	SOLAREX	AEG
1,7mA/°C	2mA/°C	2,5mA/°C	2,5mA/°C	2,8mA/°C	3,5mA/°C

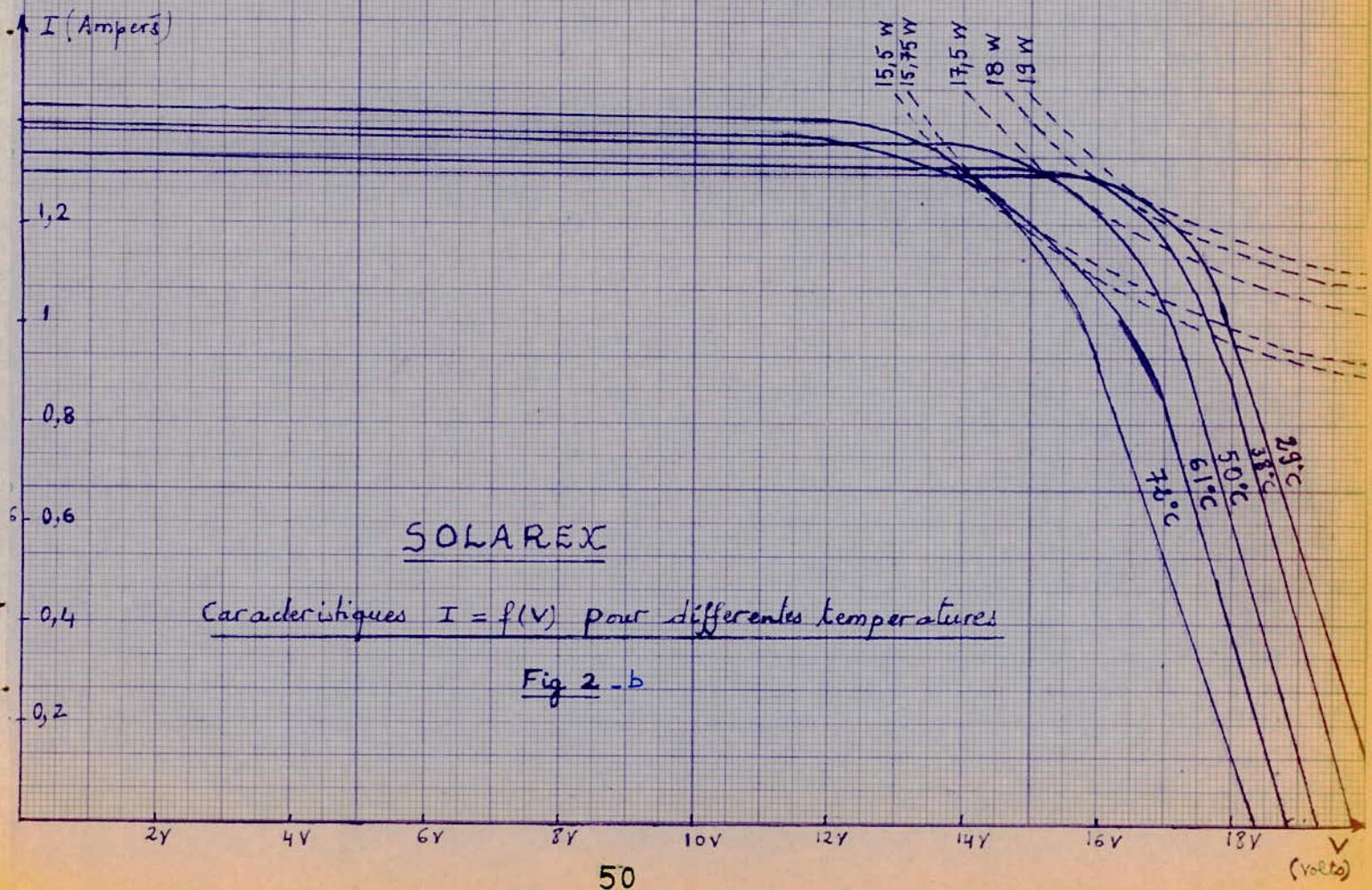
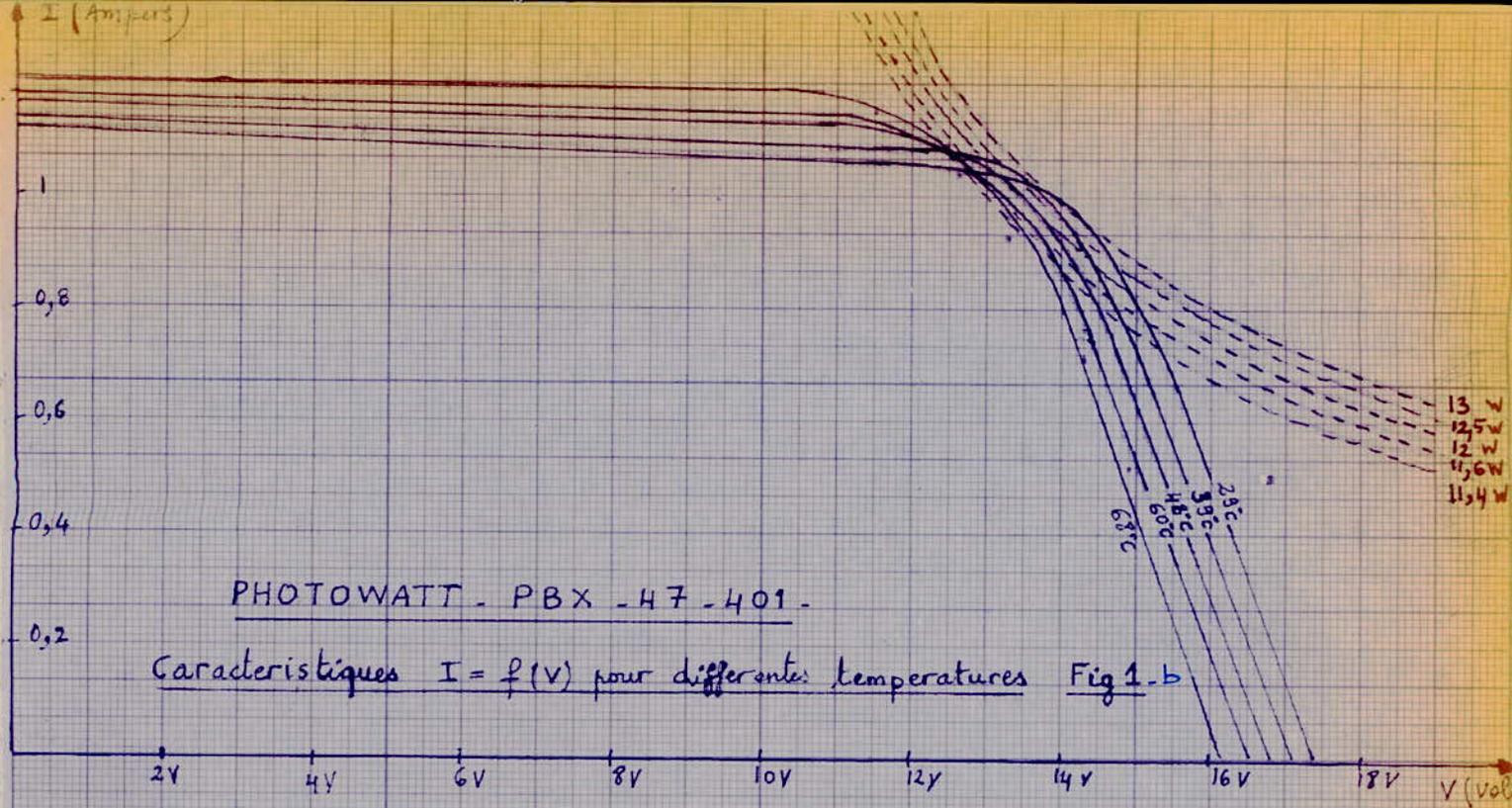
S H A R P
5 mA/°C

On constate que la sensibilité de la série PHOTOWATT est toujours meilleur soit en valeur moyenne :

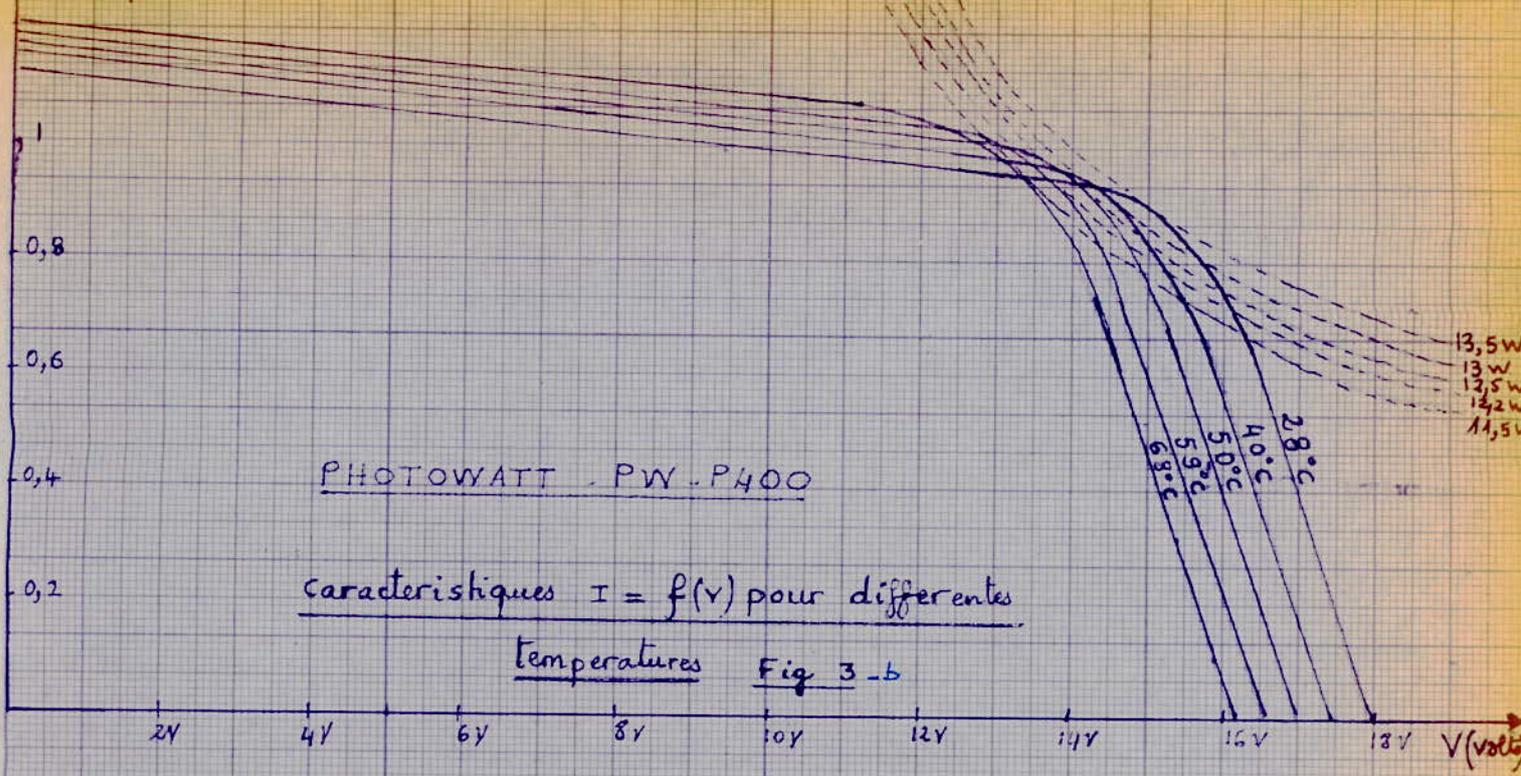
$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{1,7 + 2 + 2,5}{3} = 2 \text{ mA/}^\circ\text{C}$$

Une augmentation de 1°C correspond à une augmentation du courant de 2mA.

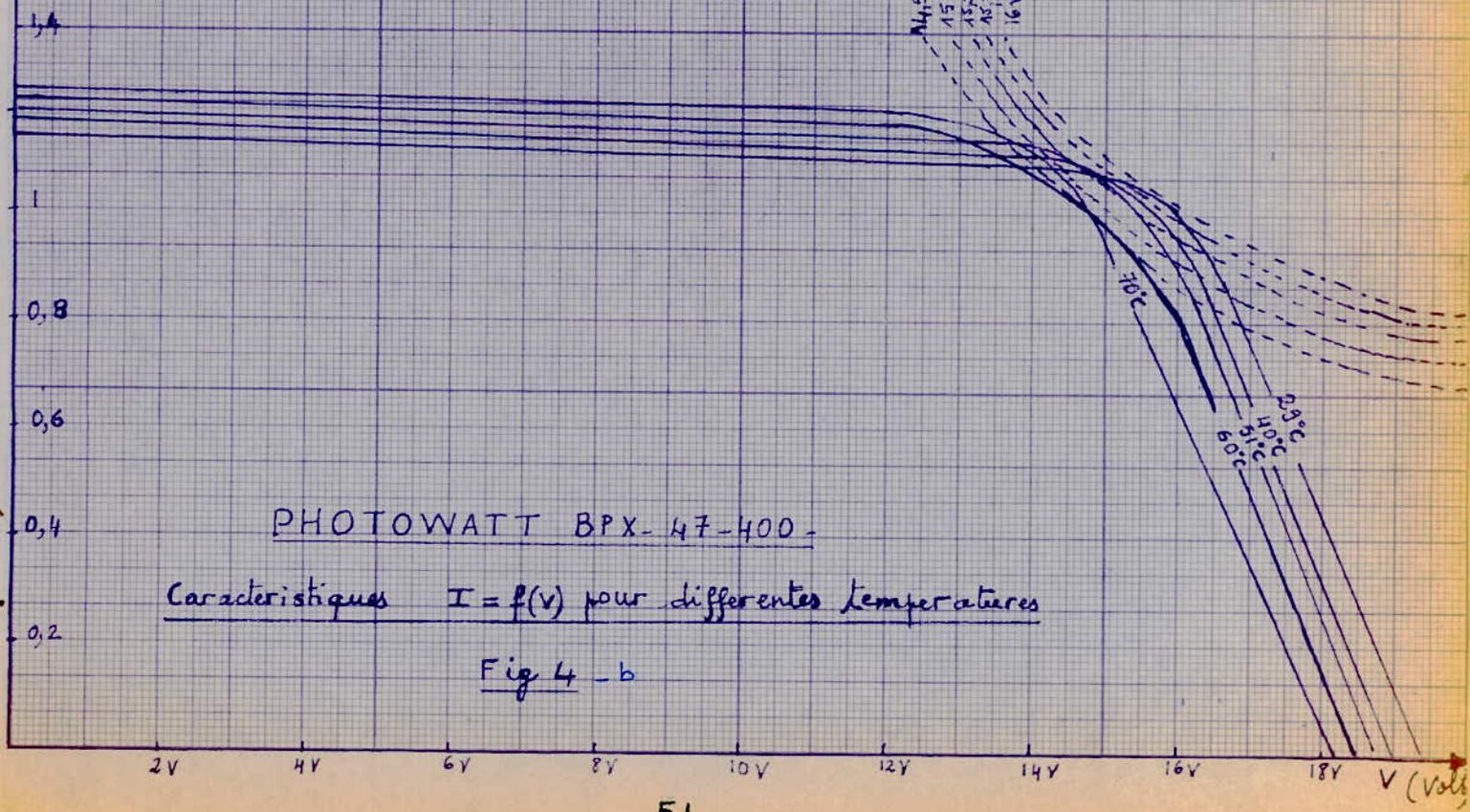
.../...

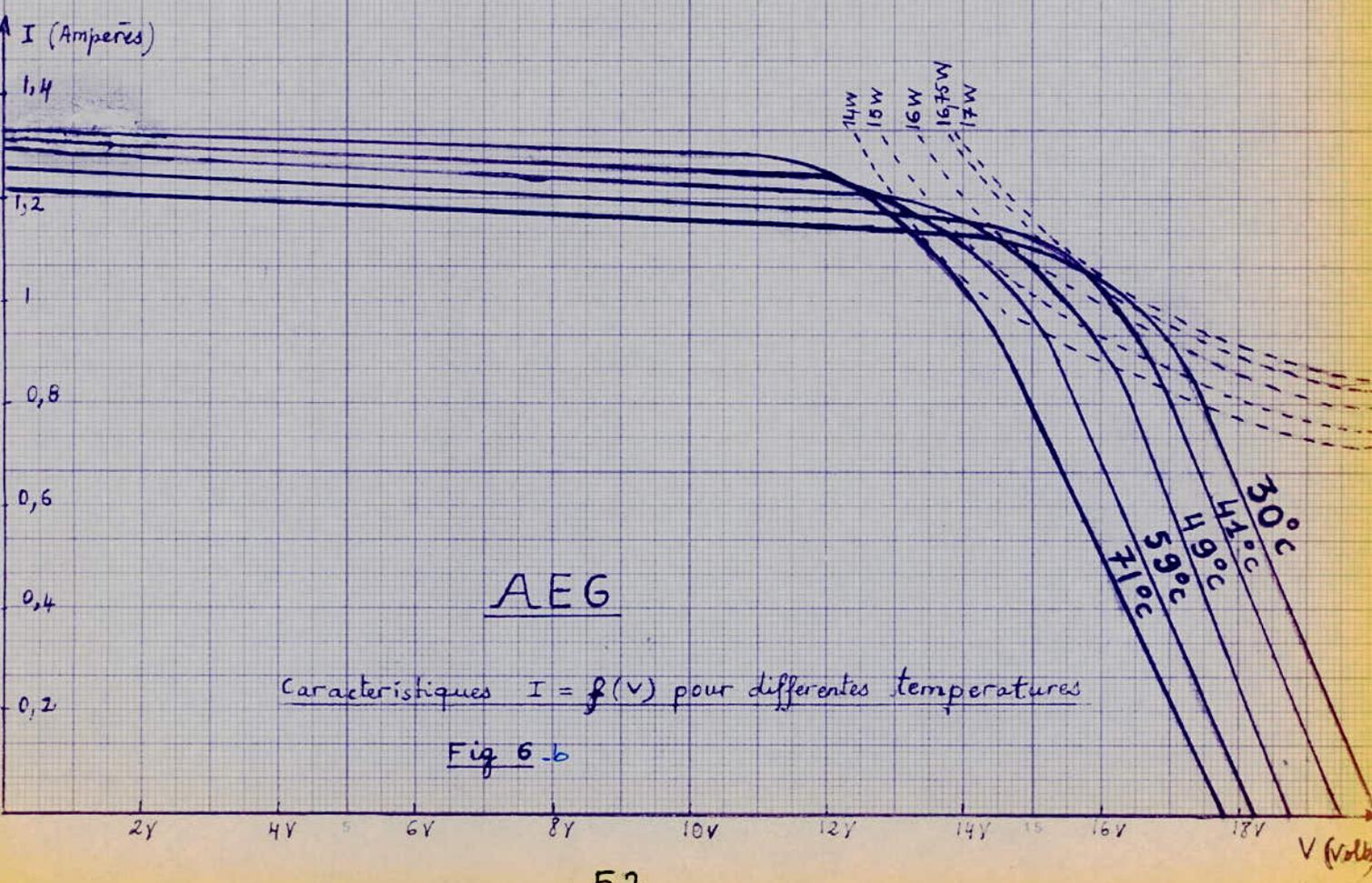
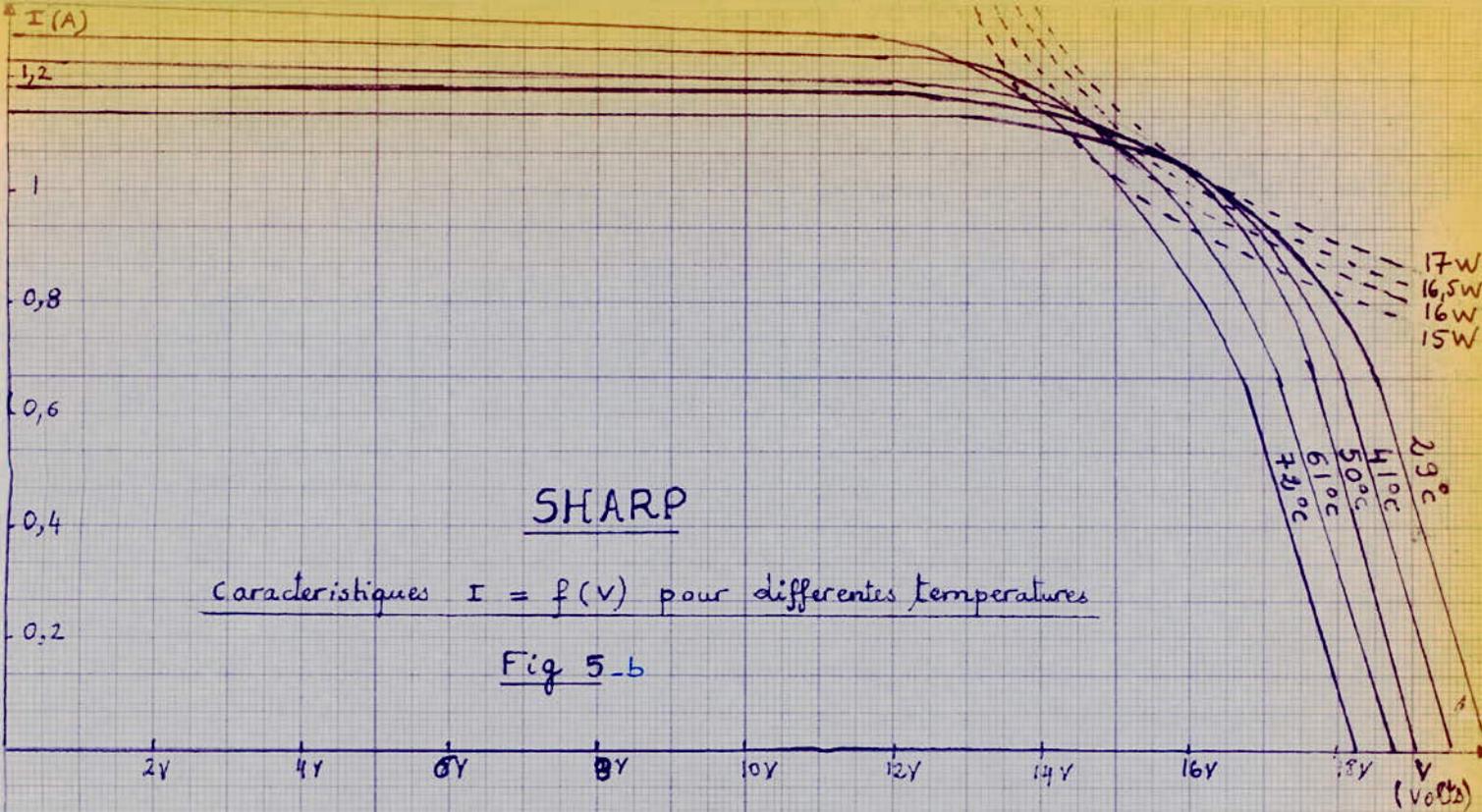


I (Amperes)



I (Amperes)





19 P(W)

16

12

8

BELGO-SOLAR:

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = -0,079 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

4

T(°C)

28 39 51 60 70

variation de la puissance maximale en fonction de la température.

Fig 8-b

1,2

1

0,8

0,6

0,4

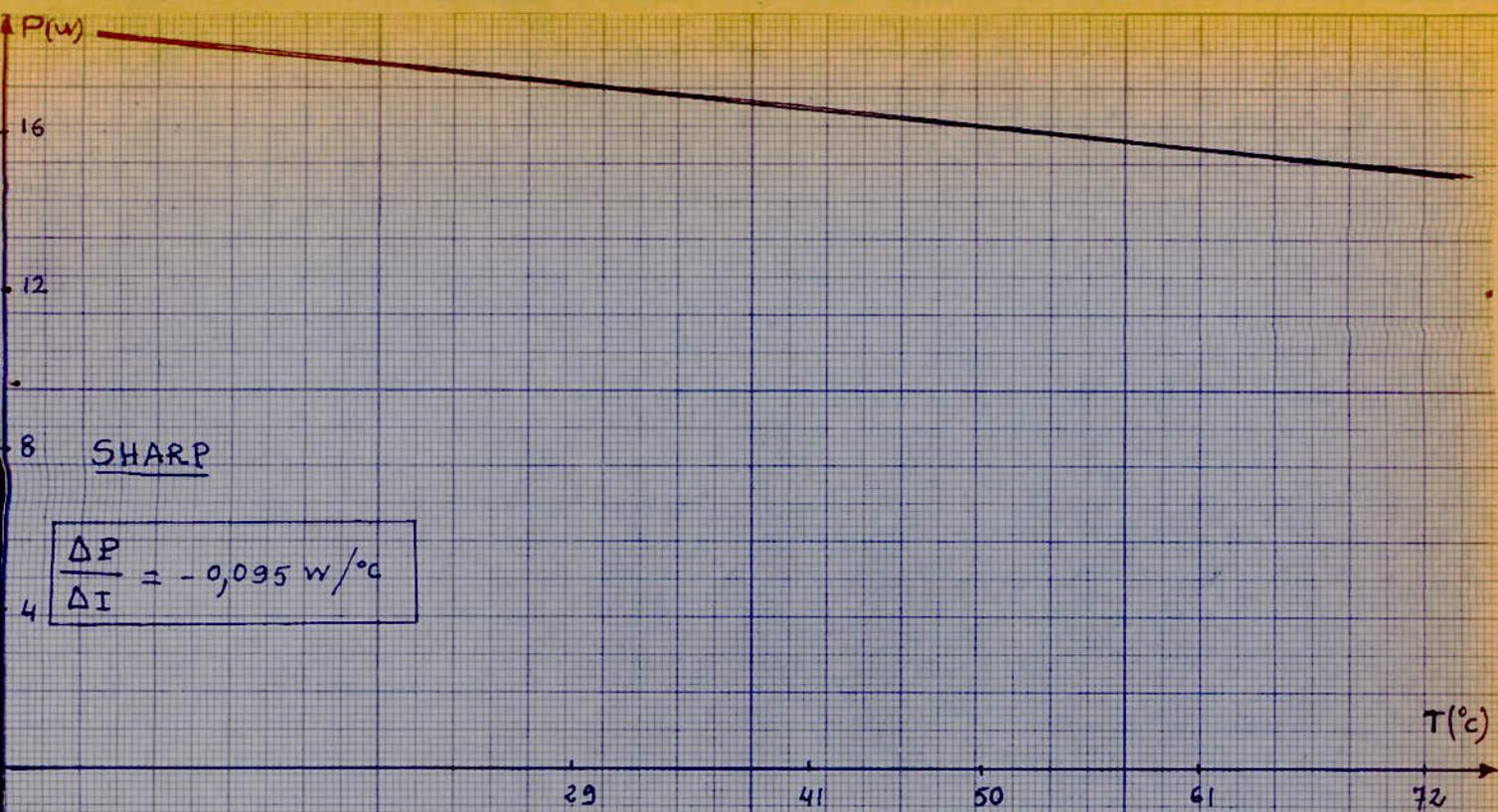
0,2

Caracteristiques I = f(V) pour différentes températures.

BELGO-SOLAR

Fig 7-b

2V 4V 6V 8V 10V 12V 14V 16V 18V V (Volts)



Variation de la puissance maximale en fct de la temperature

Fig 9-b

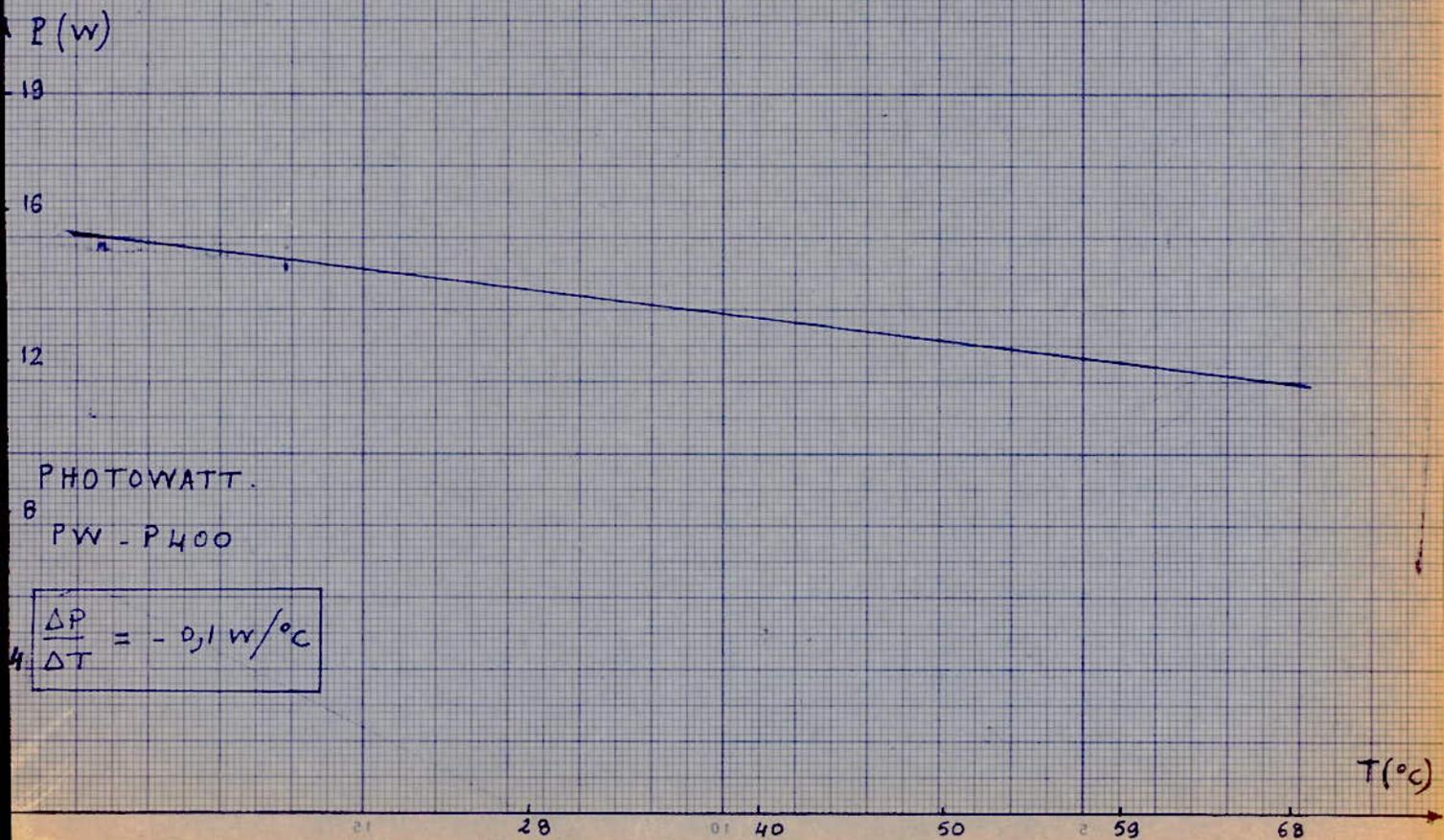
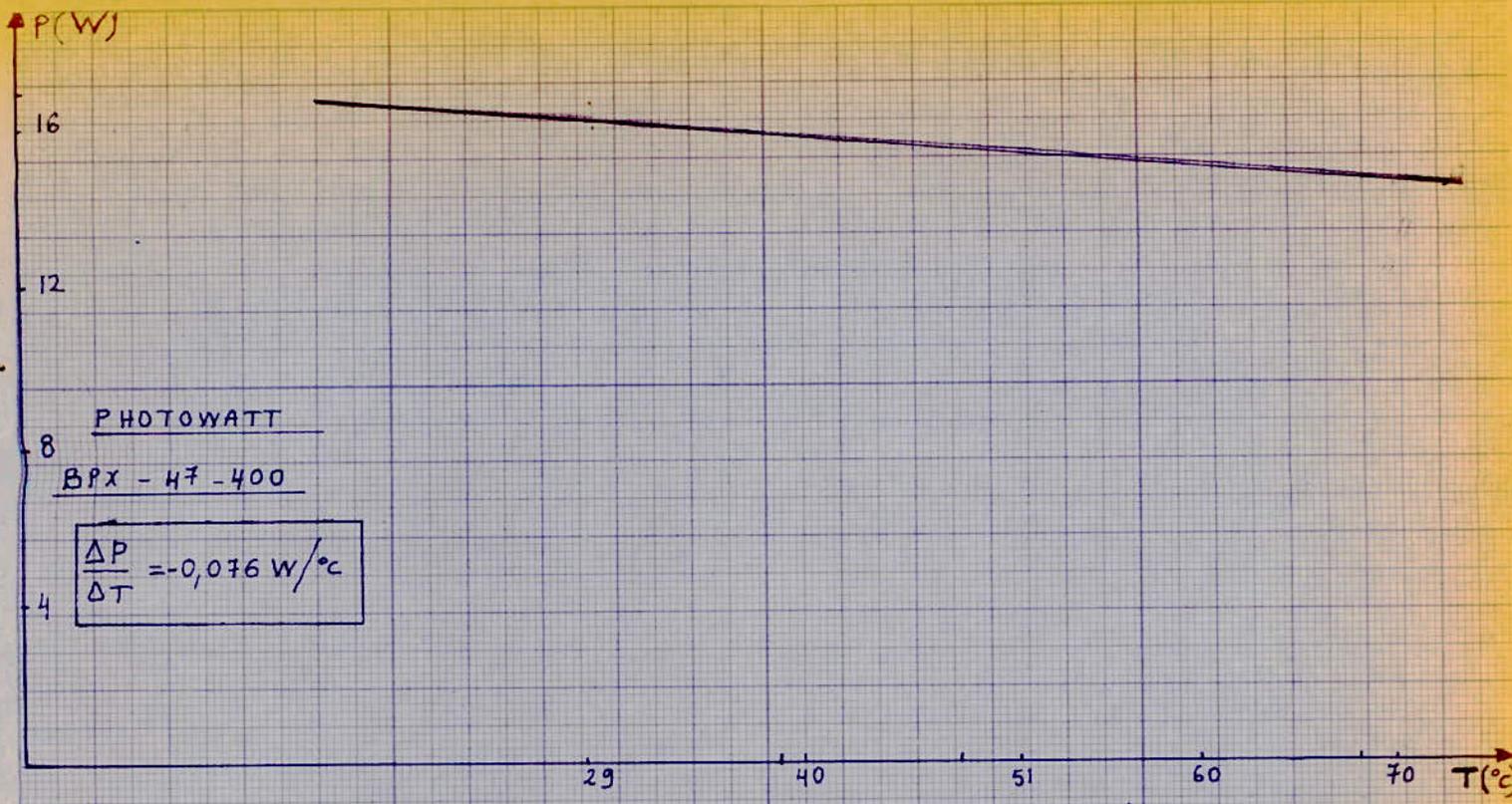


Fig: 10-b variation de la puissance maximale en fct de la temperature



variation de la puissance maximale en fct de la temperature

Fig: 11-b

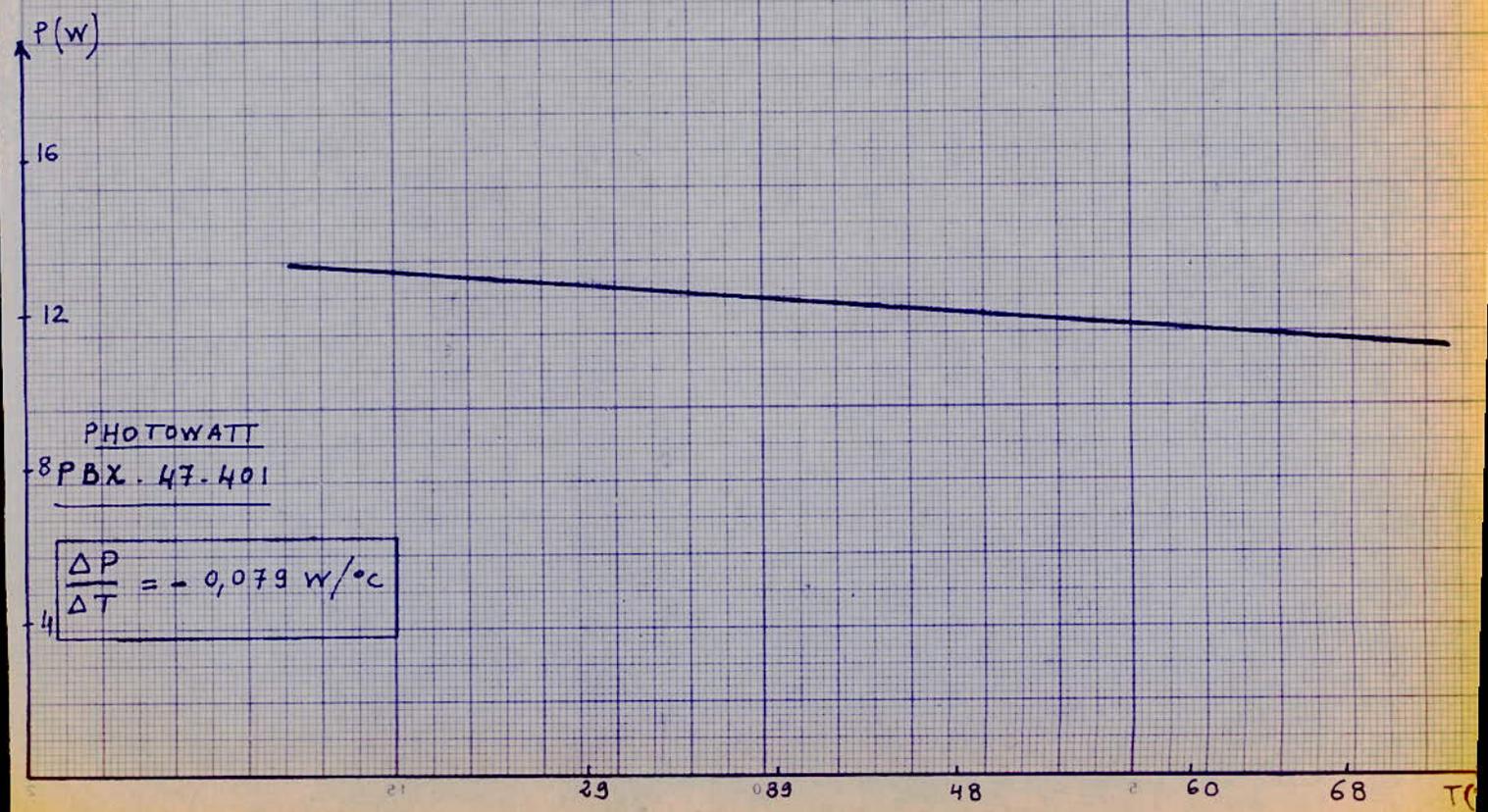


Fig: 12-b variation de la puissance maximale en fct de la temperature

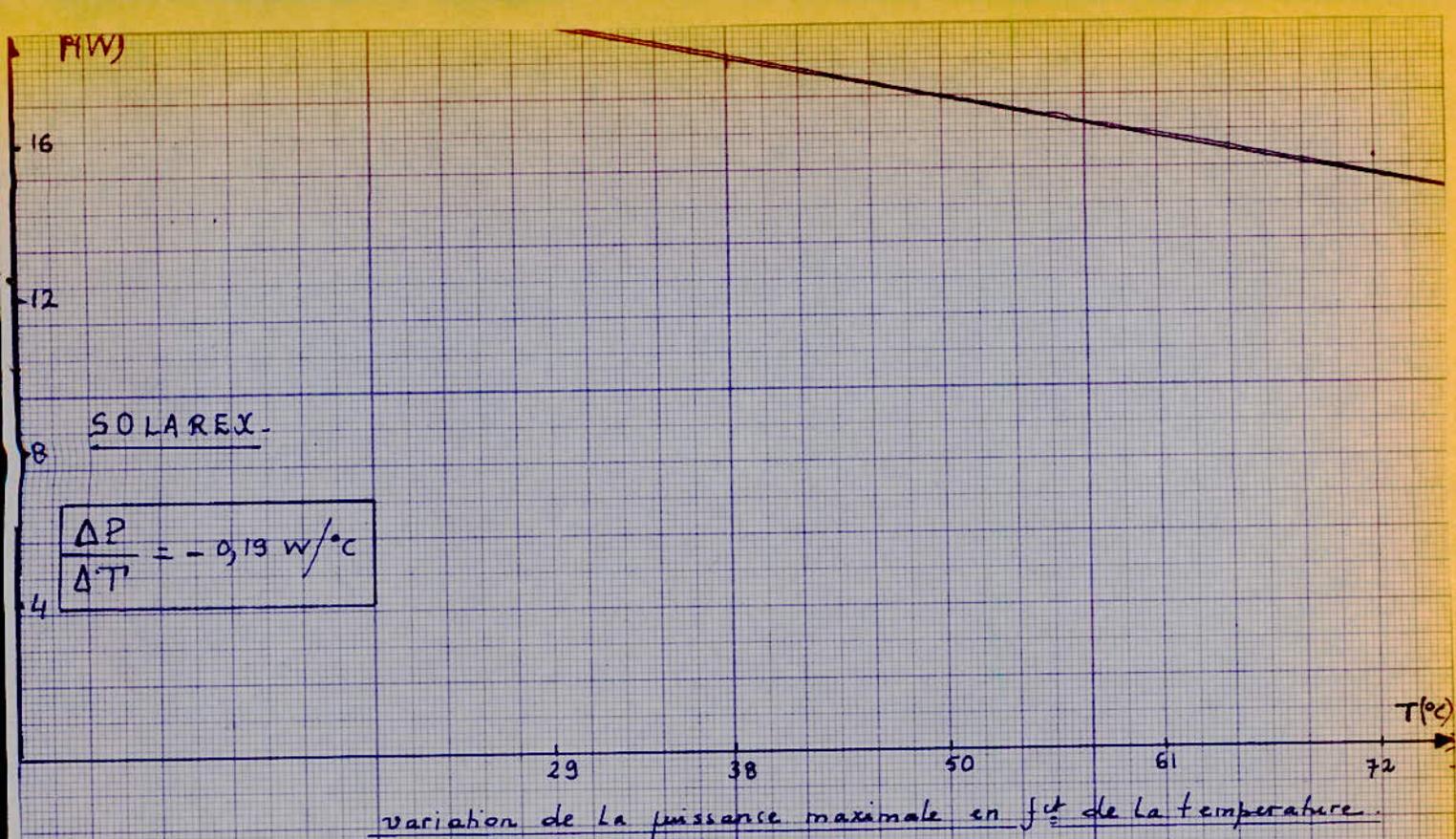


Fig: 13-b

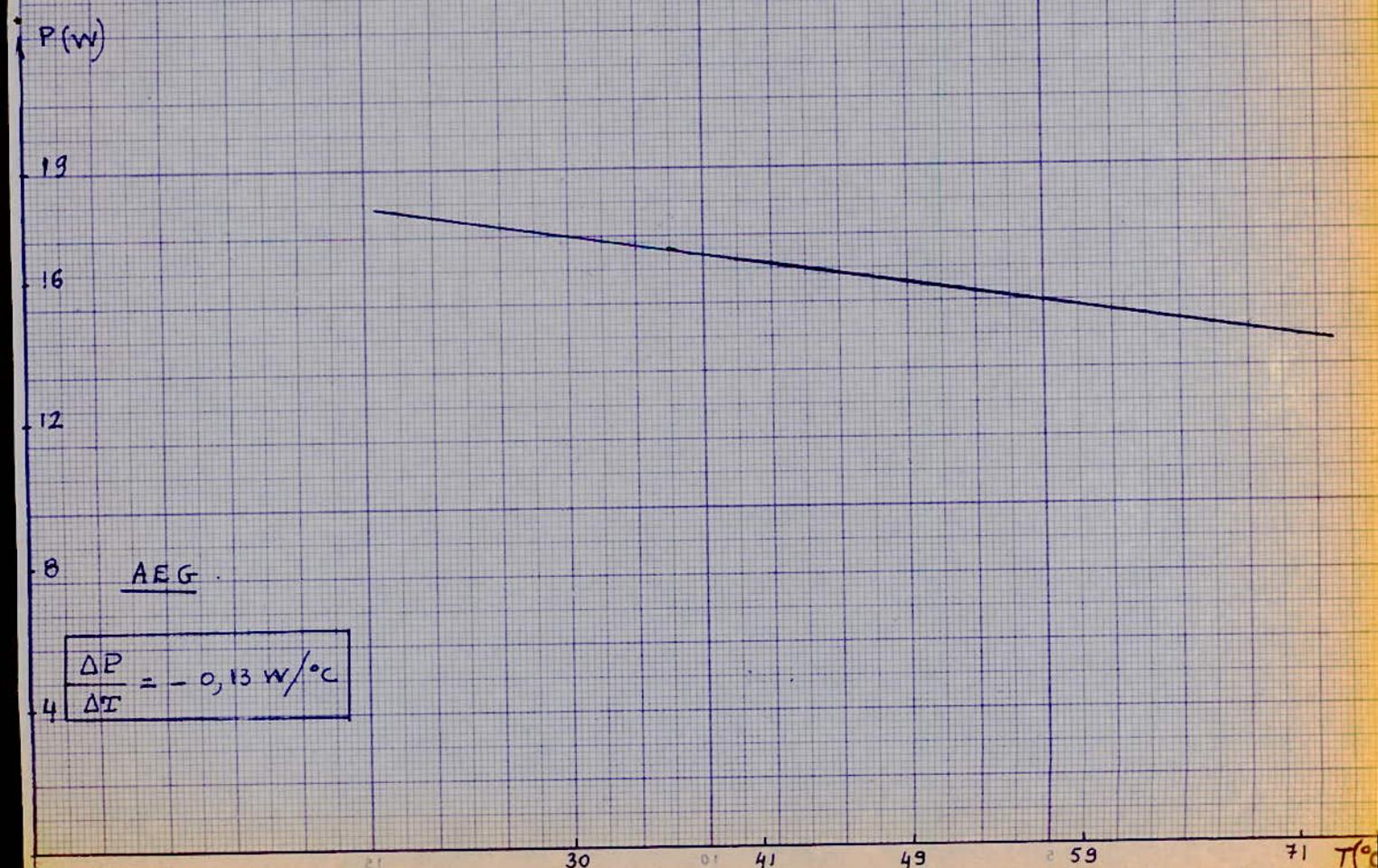
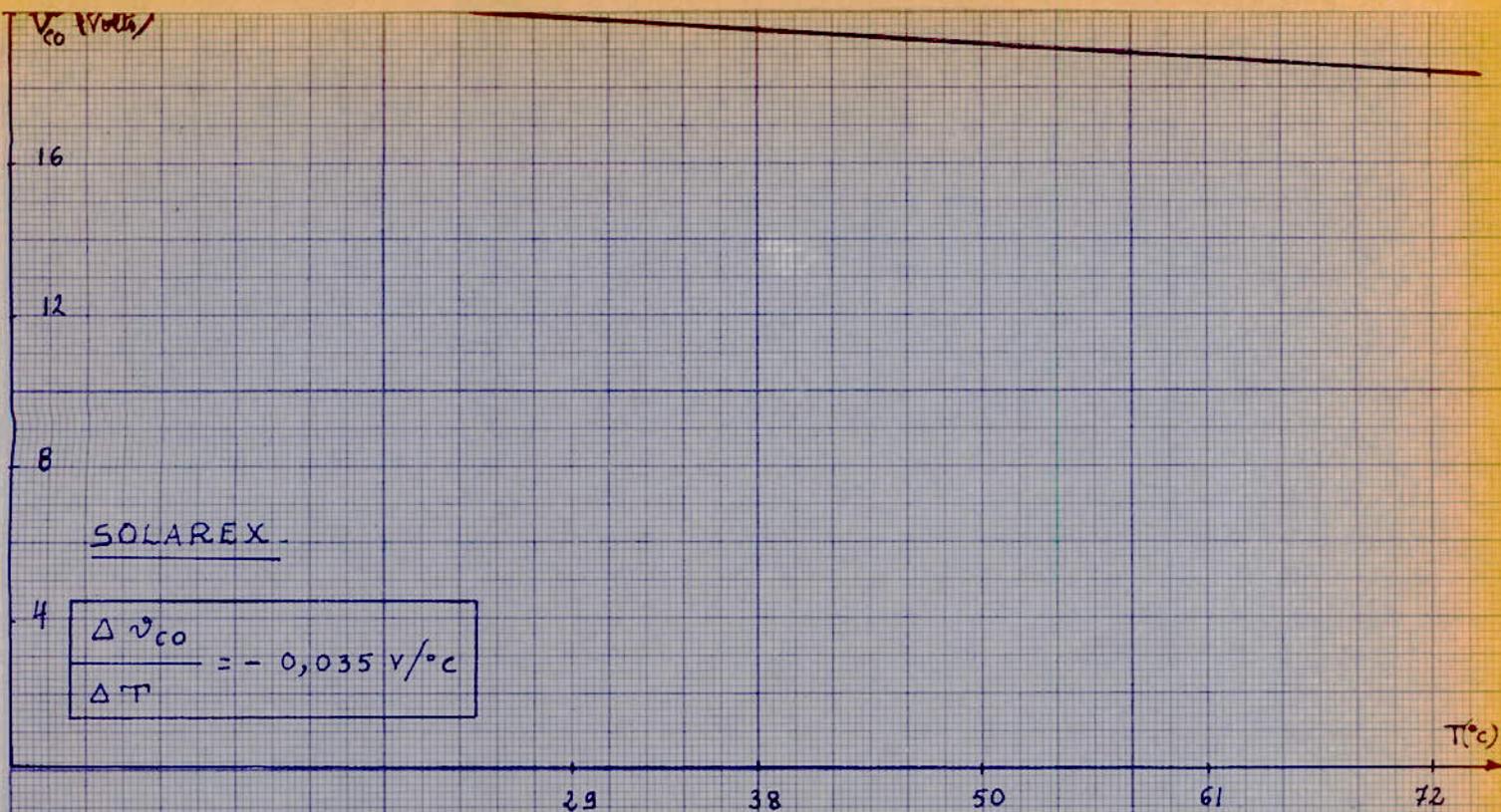


Fig: 14-b variation de la puissance maximale en fct de la temperature.



Variation de V_{co} en fonction de la temperature.

Fig: 15_b

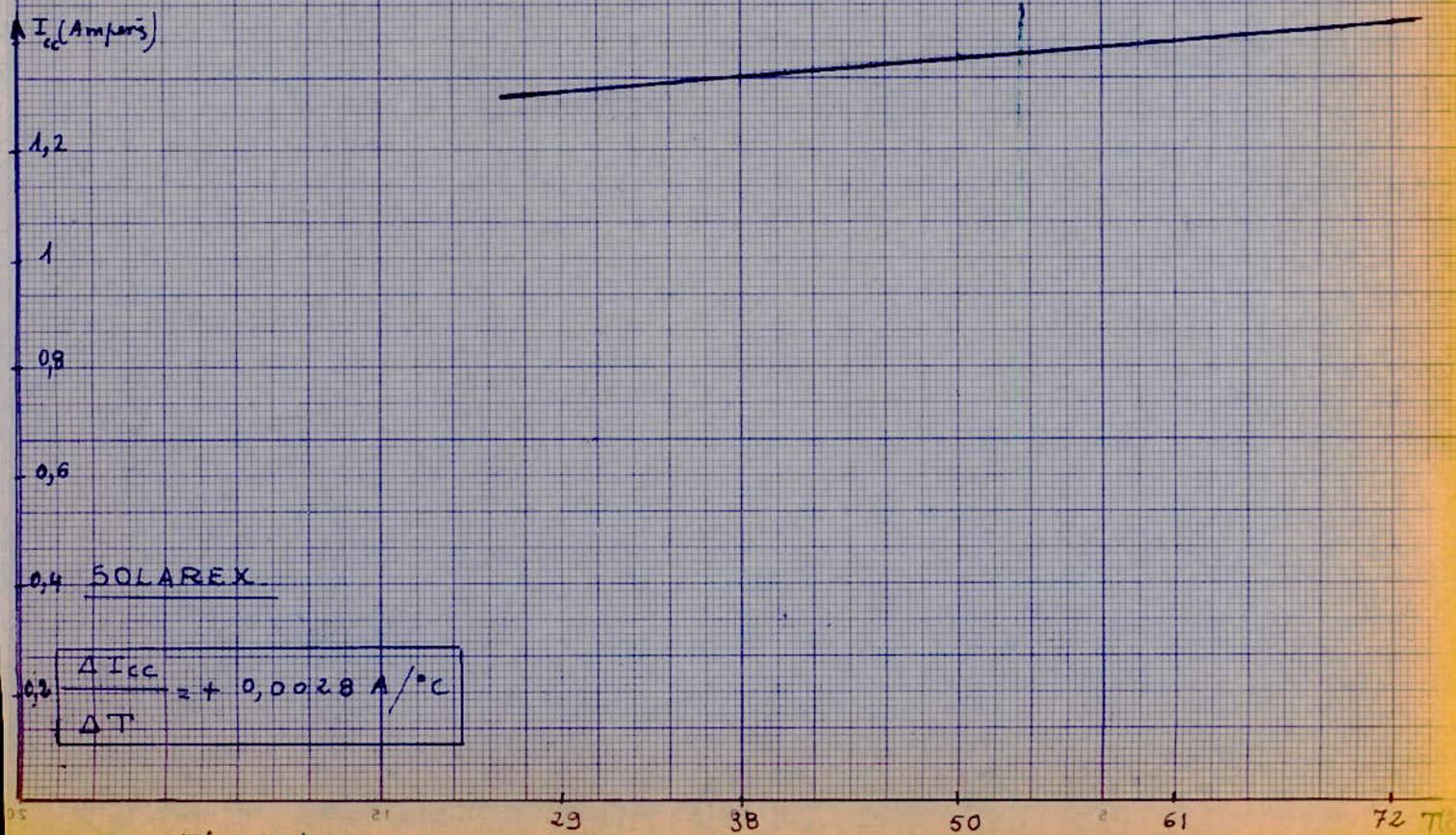
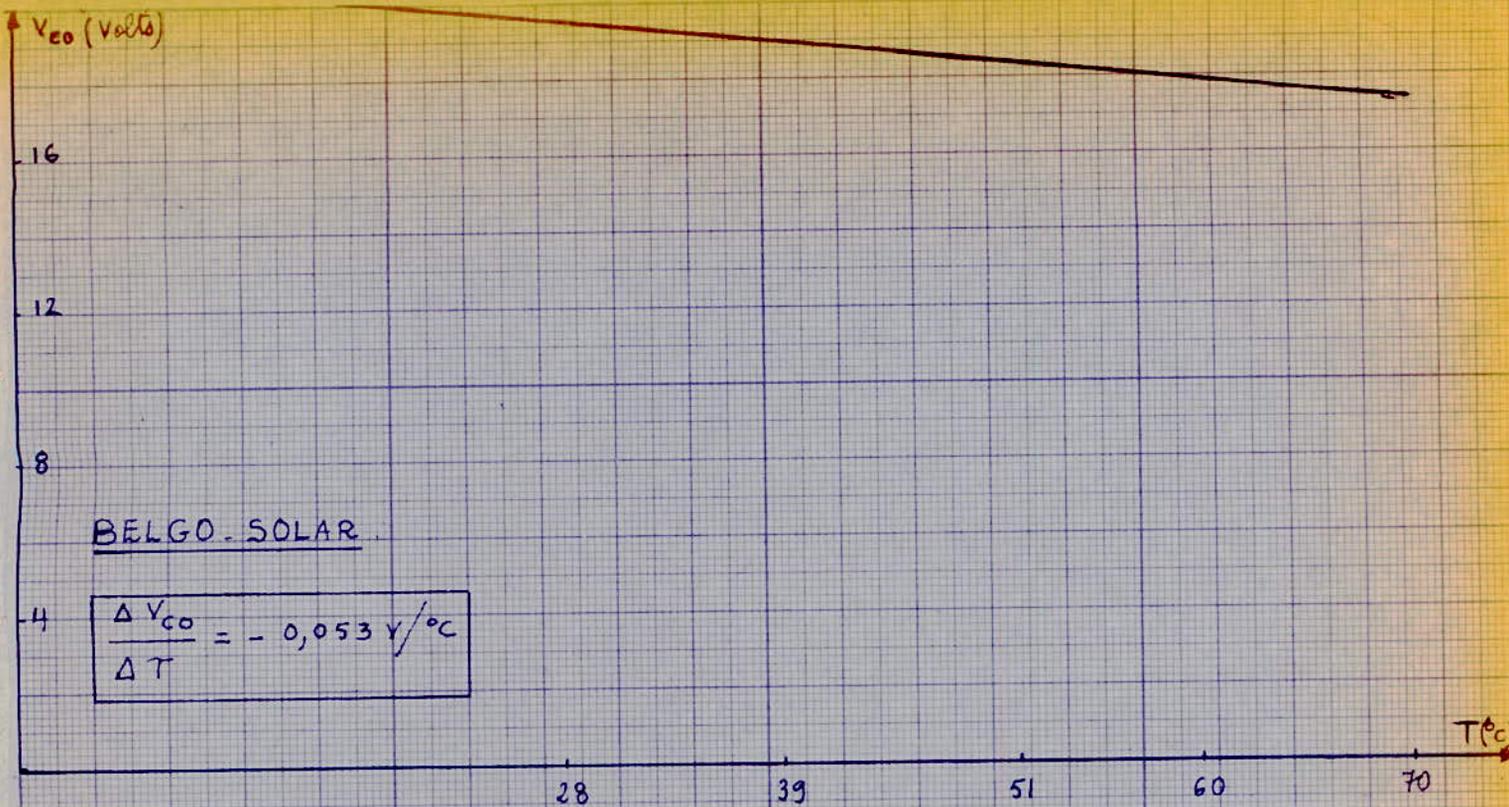


Fig: 15-b variation de I_{cc} en fct de la temperature. 57



Variation de V_{co} en fct de la temperature.
Fig 16-b

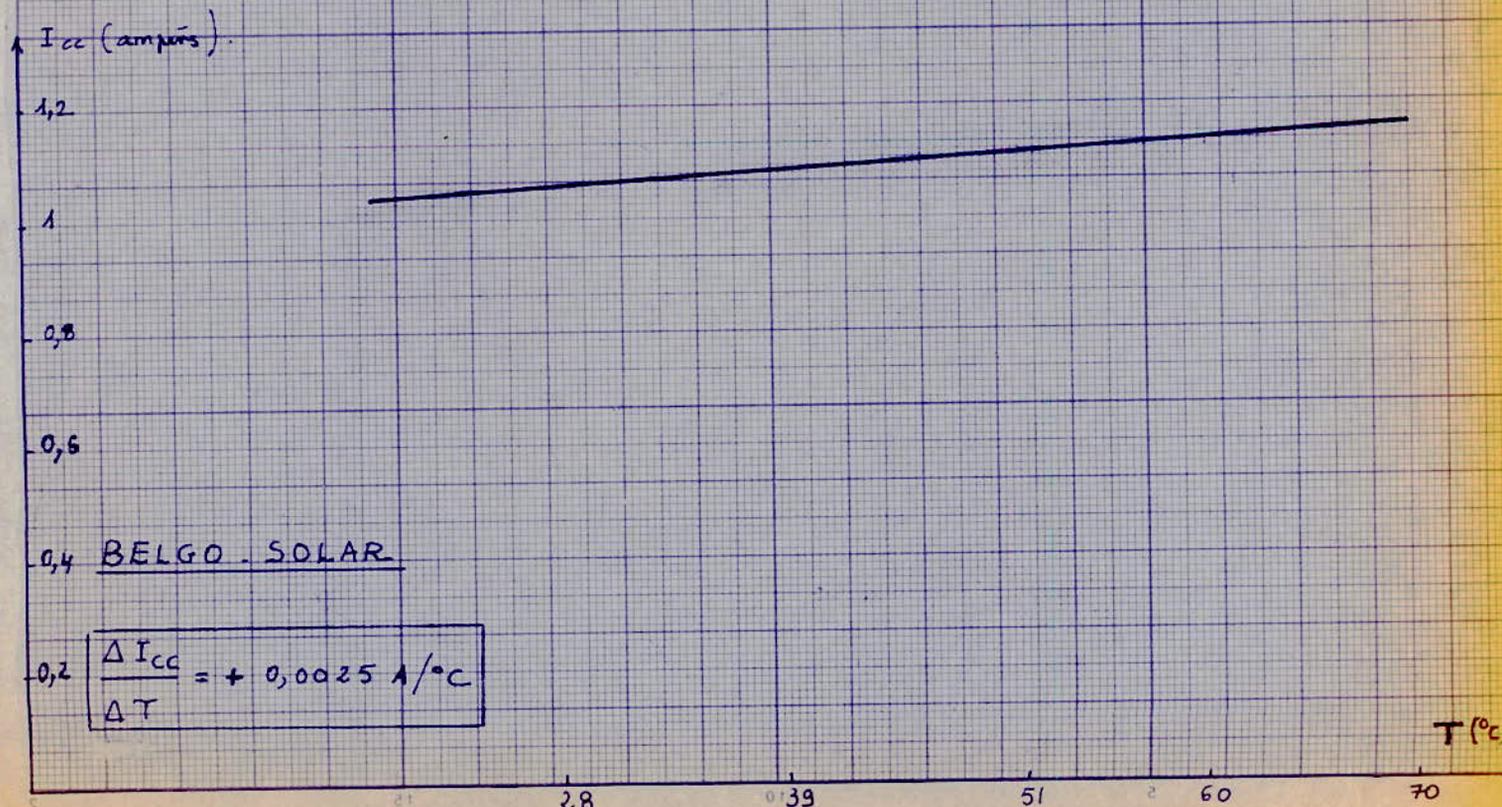
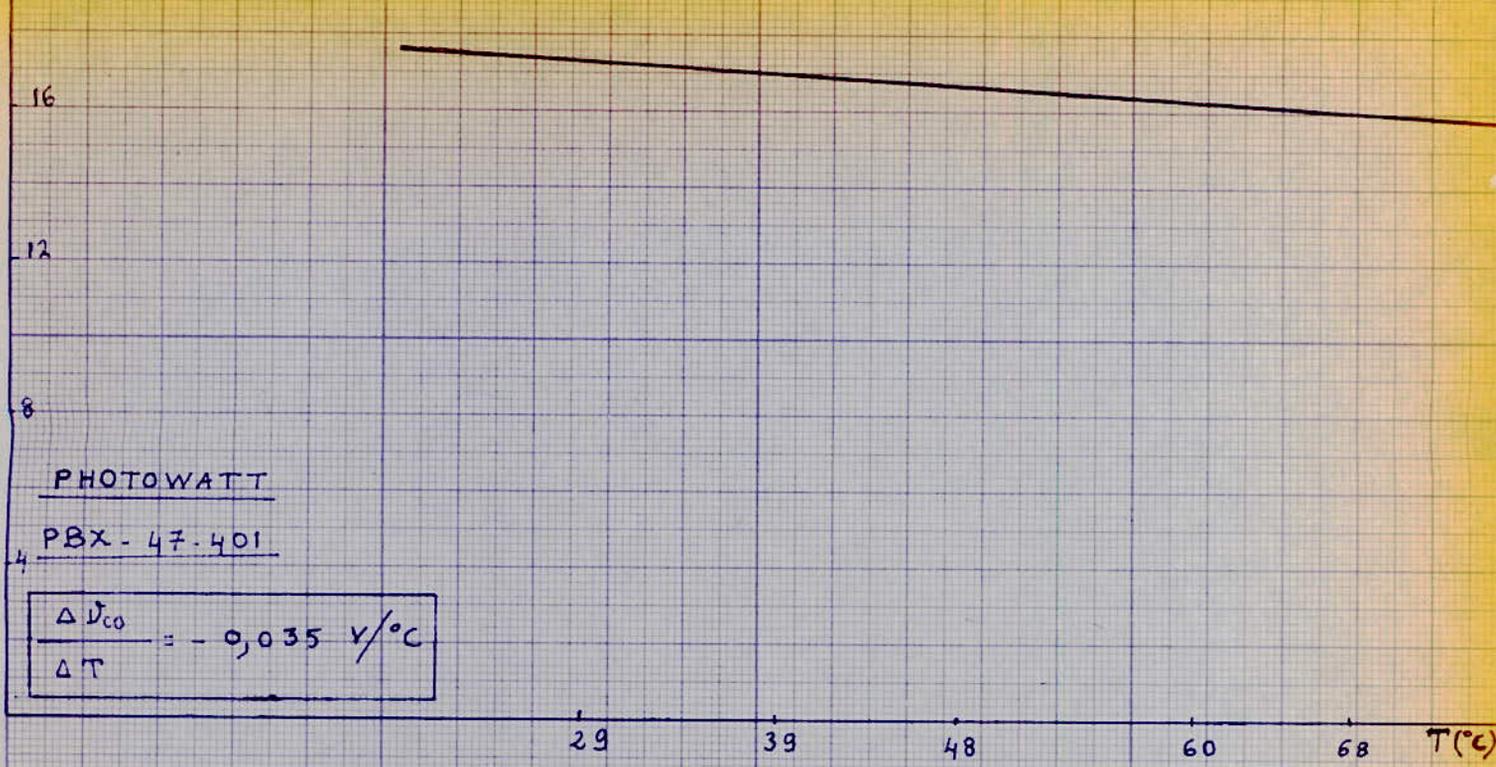


Fig:23-b variation de I_{cc} en fct de la temperature. 58

V_{co} (Volts)



Variation de V_{co} en fct de la temperature.

Fig:17-b

I_{cc} (Amperes)

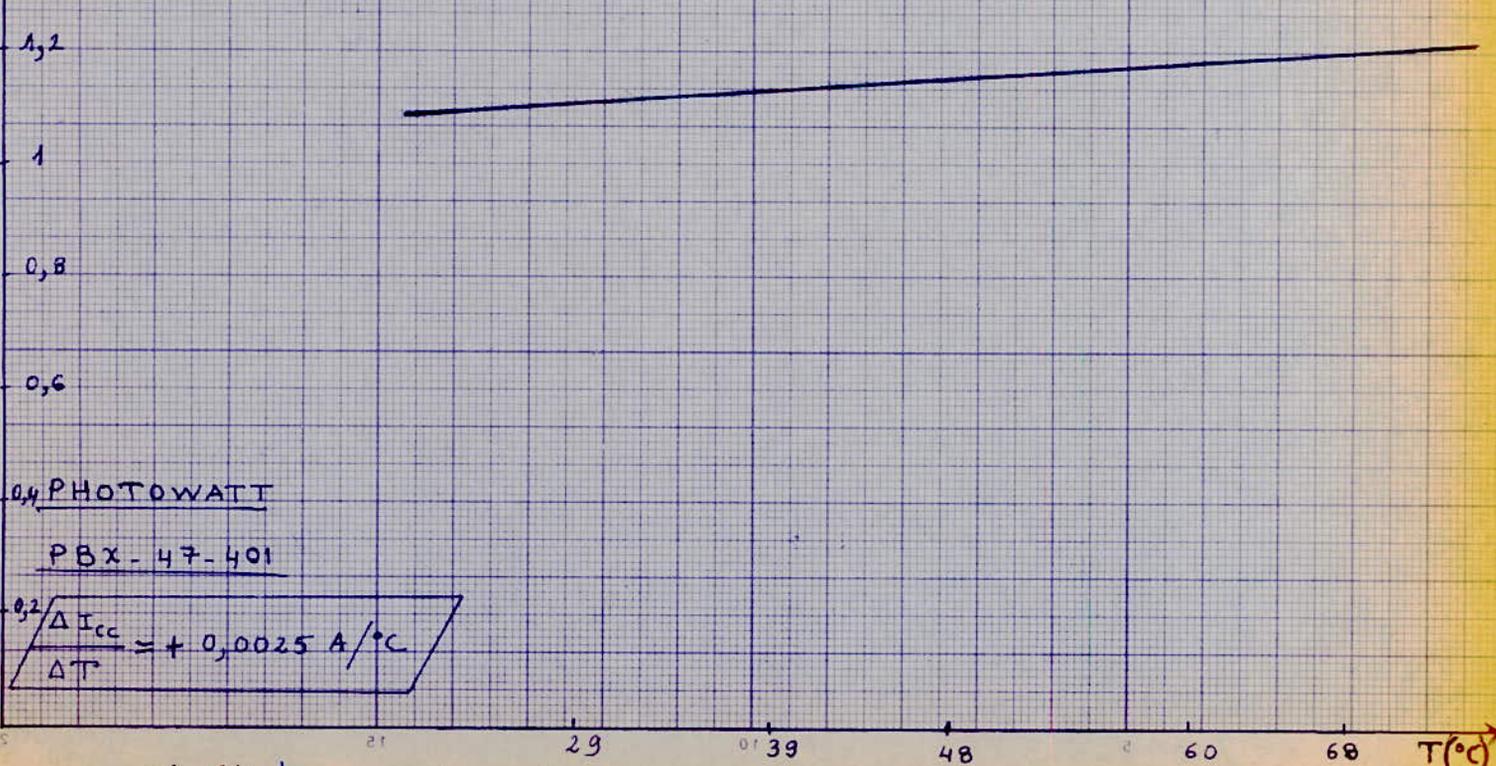
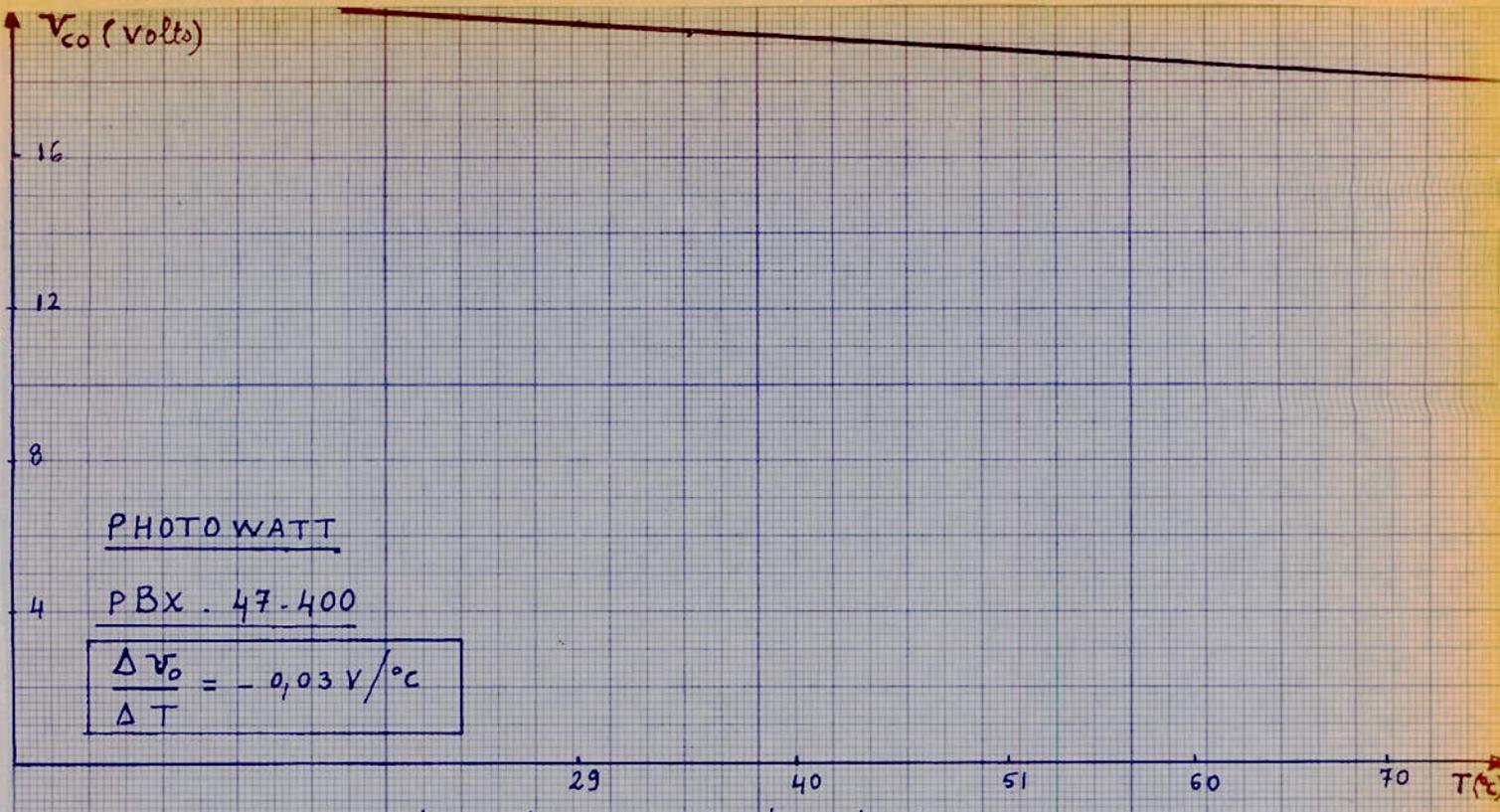


Fig:24-b variation de I_{cc} en fct de La temperature.



variation de V_o en fonction de la temperature

Fig:18-b

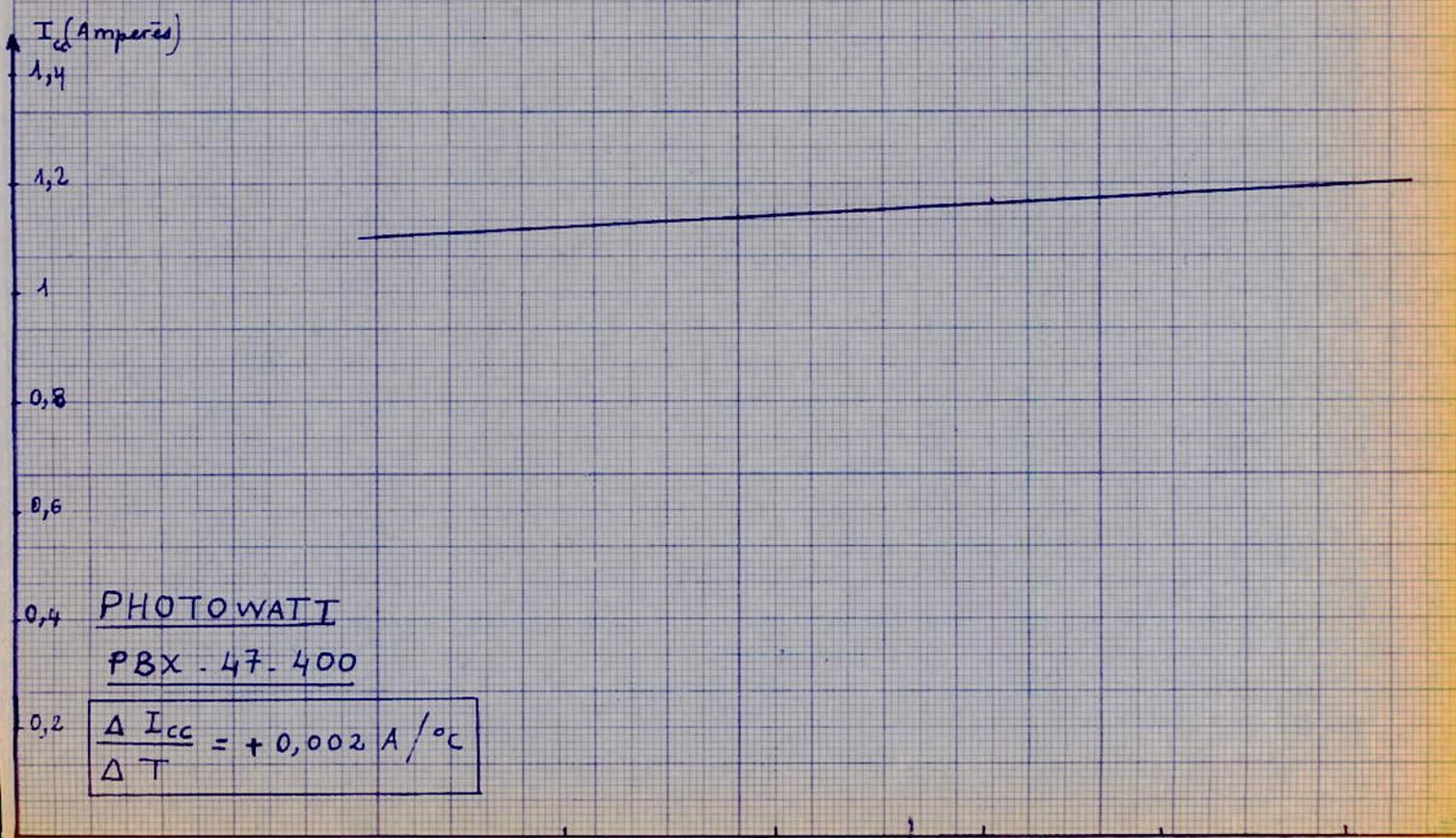
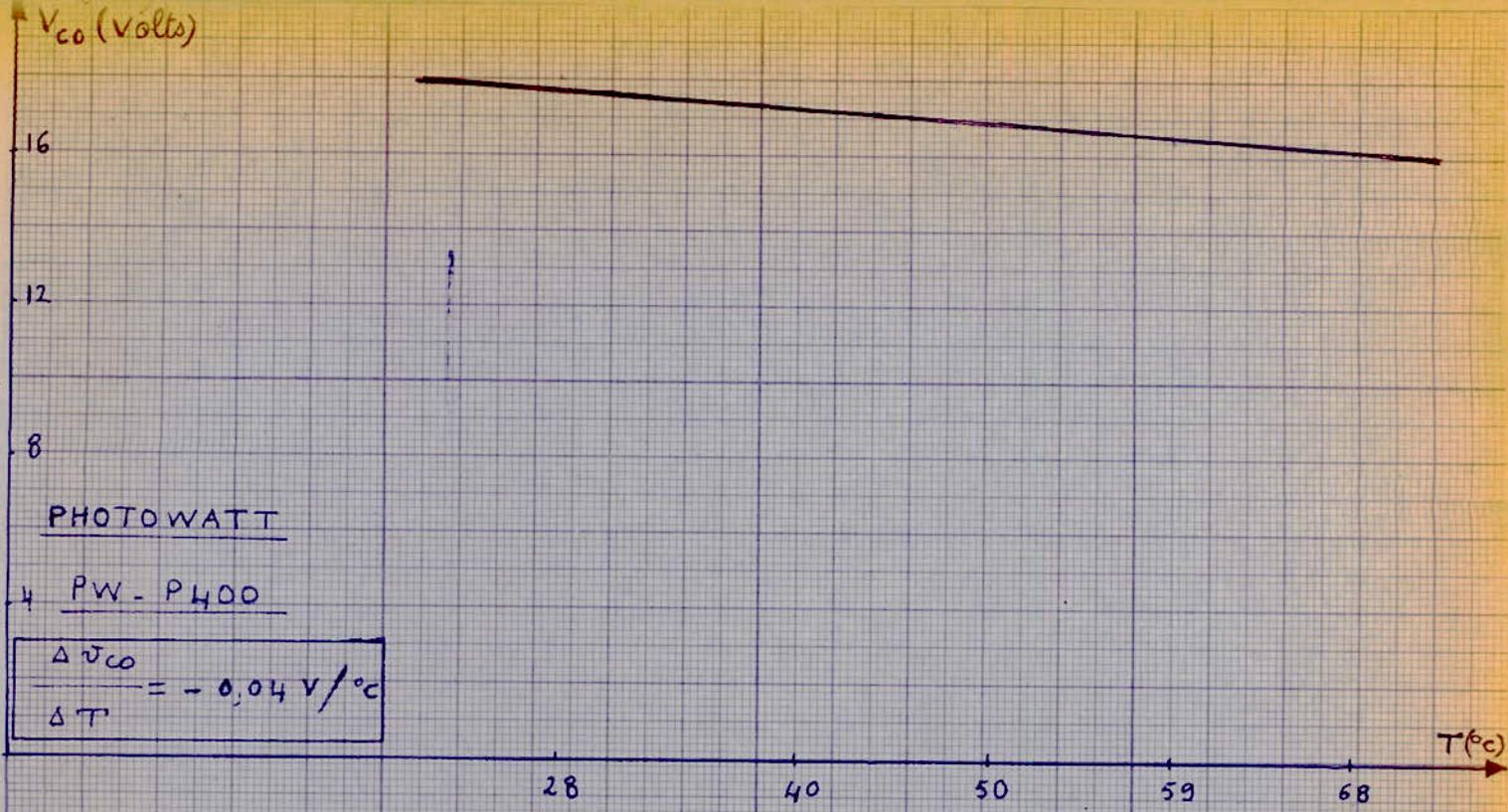


Fig:28-b variation de I_{cc} en fonction de la temperature



Variation de V_{CO} en fonction de la température.

Fig:19-b

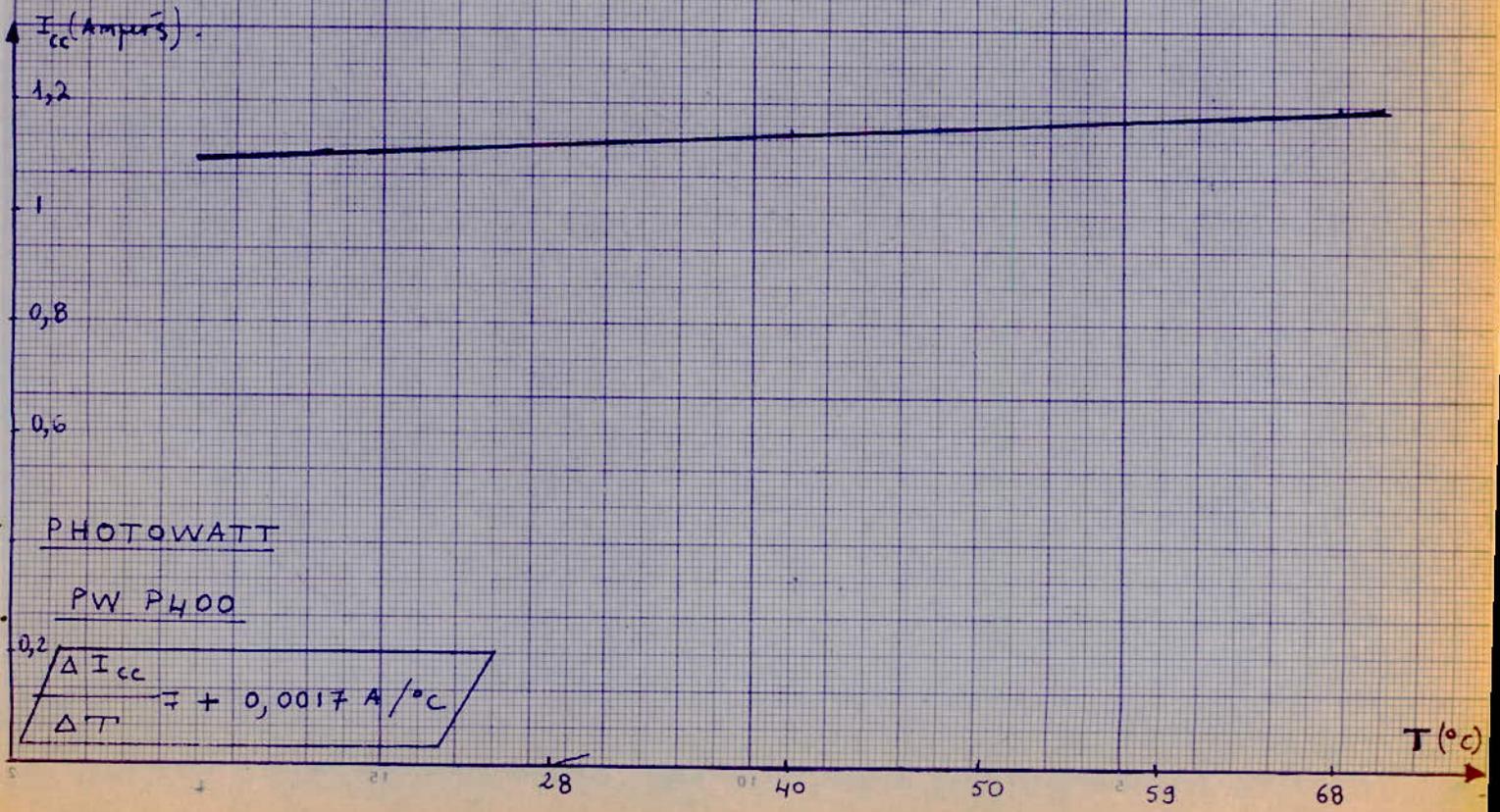
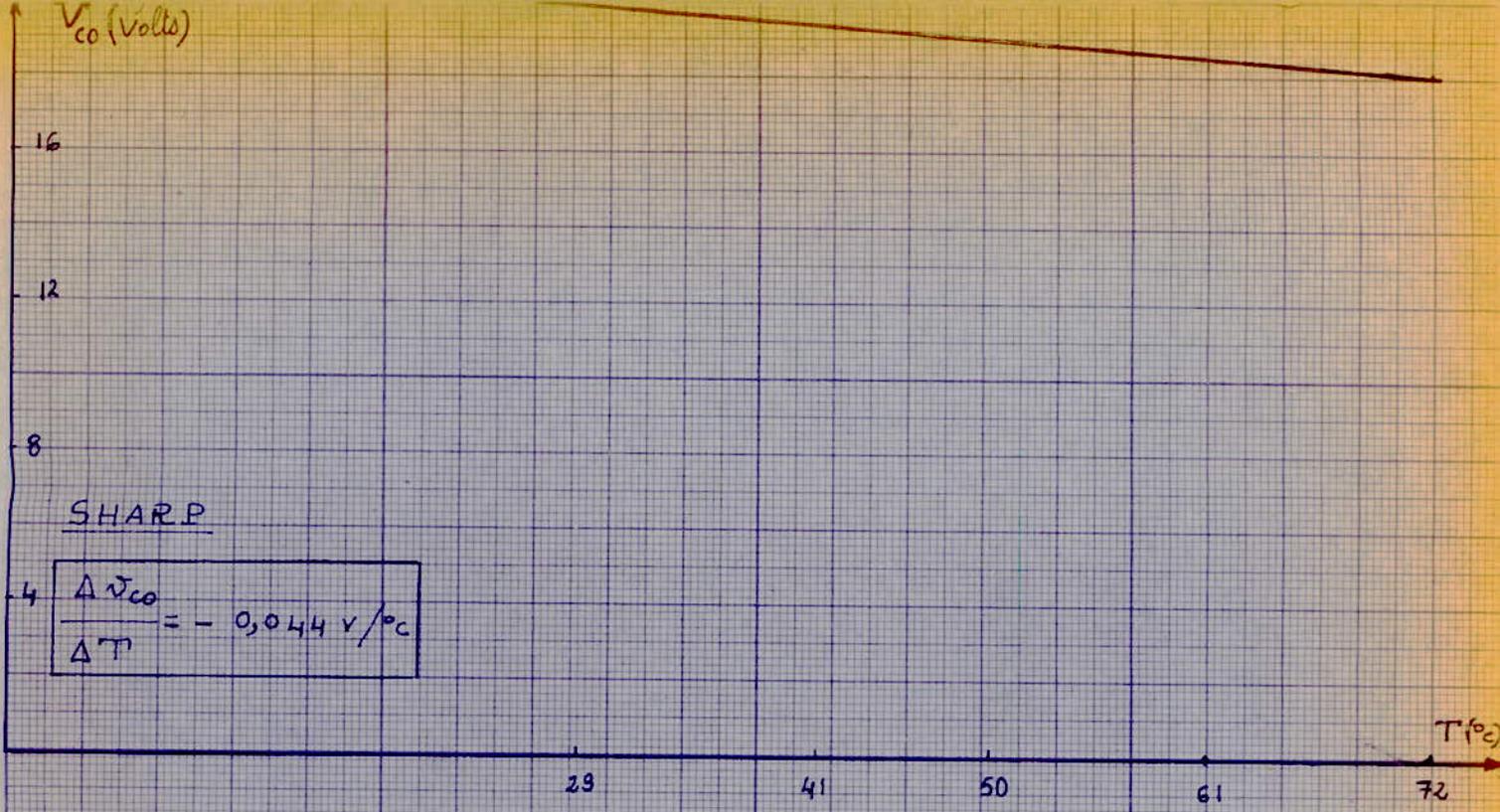


Fig:26-b variation de I_{CC} en fonction de la température. 61



Variation de V_{co} en fonction de la temperature.
Fig:20-b

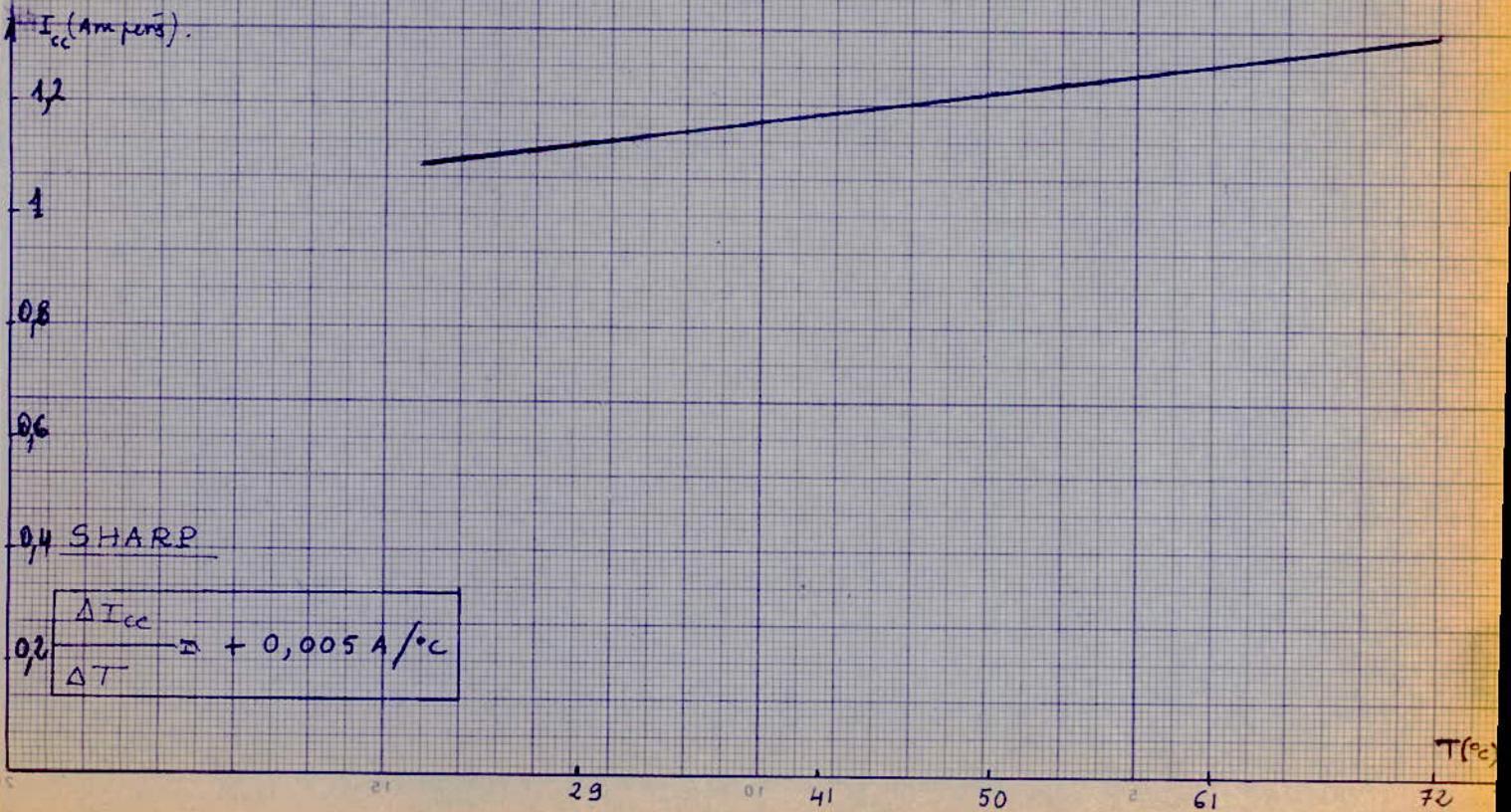
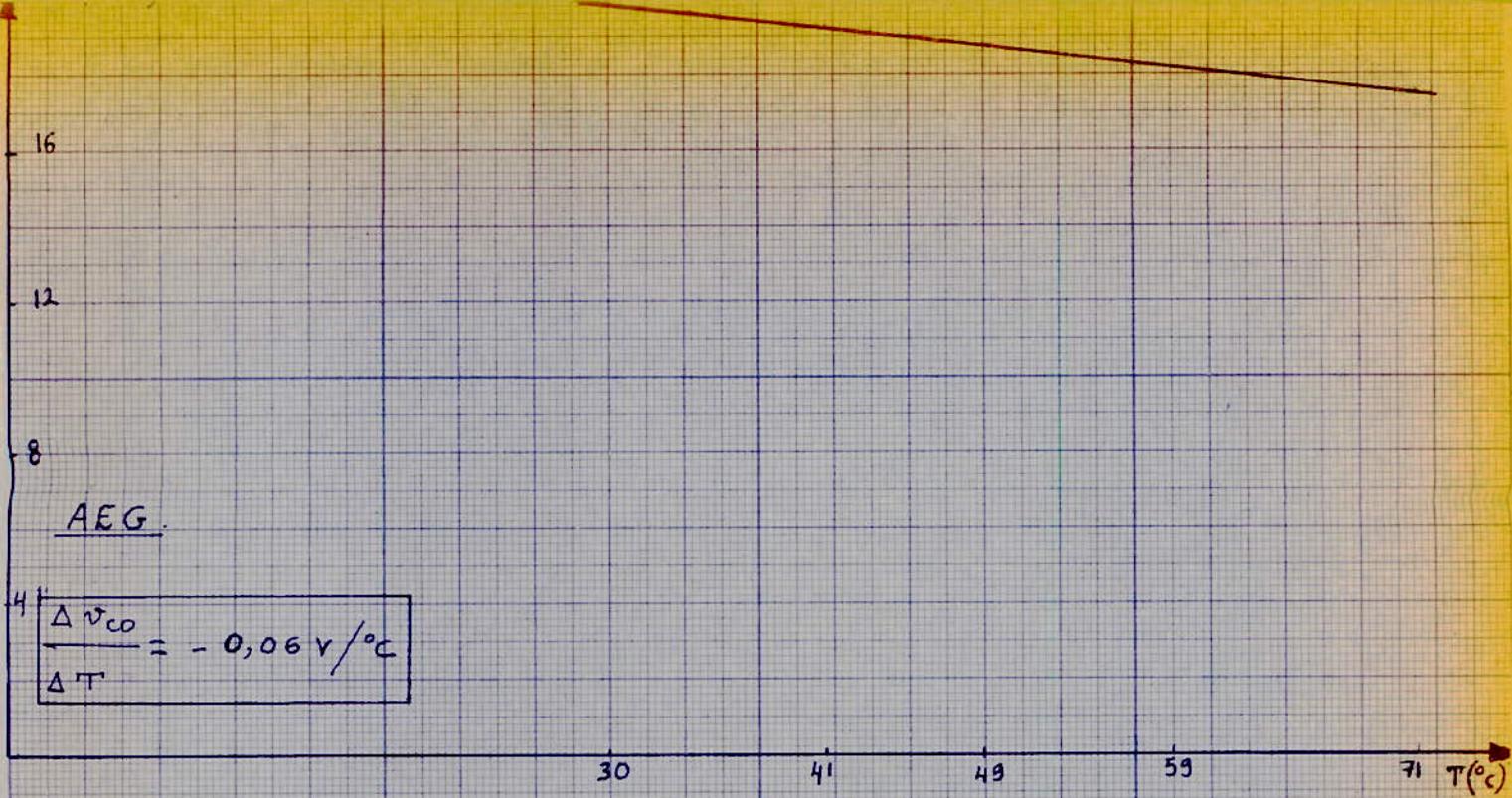


Fig:27-b variation de I_{cc} en fonction de la temperature.



variation de V_{CO} en fonction de la temperature.

Fig:21-b

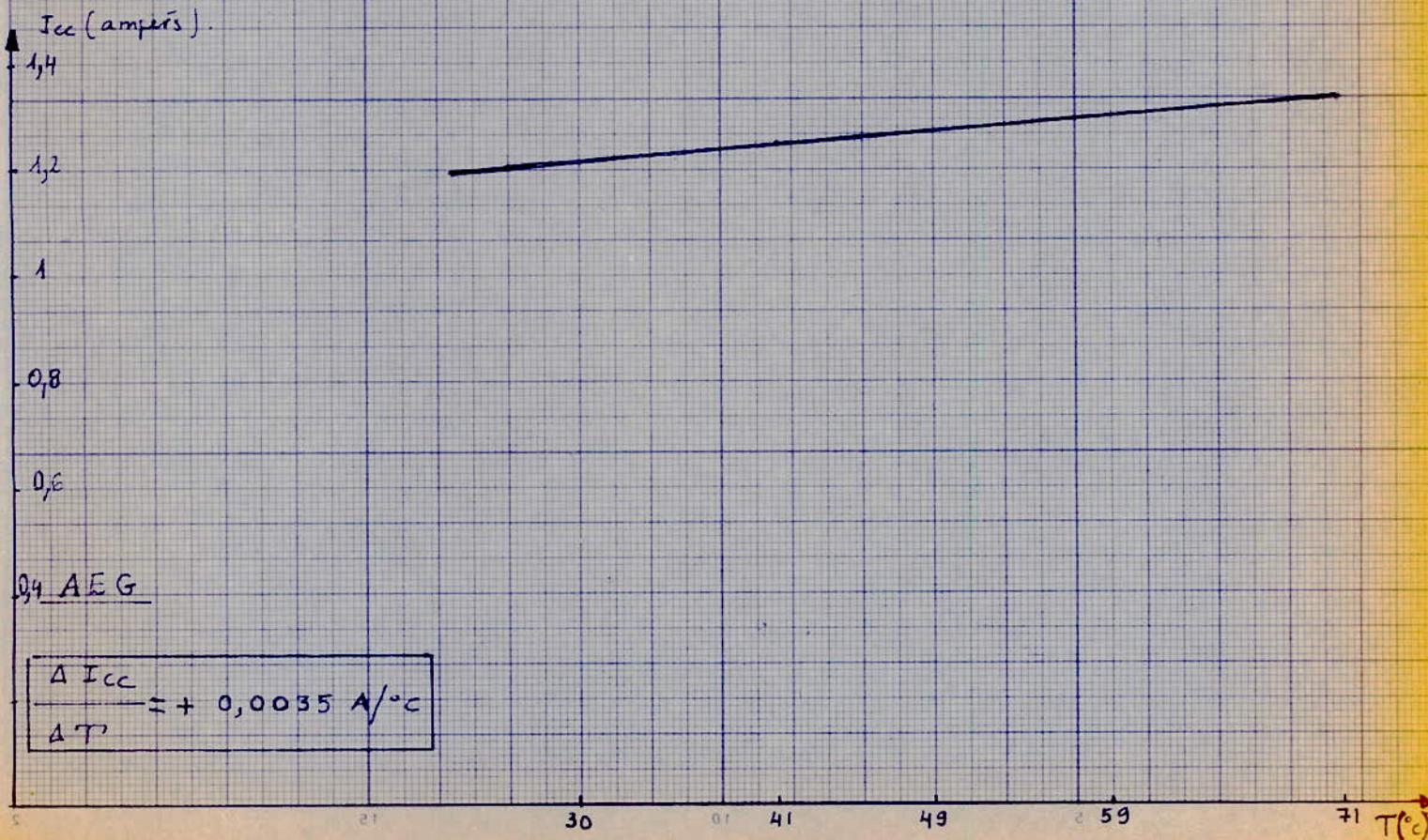


Fig 22-b variation de I_{CC} en fct de la temperature.

3-3 - A S C O C I A T I O N S

-Une association de panneaux nécessite un cablage bien soigné, car un cablage en combrant risque de nous induire dans des erreurs refasles. Alors nous avons proposer un montage très pratique, moins encombrant :
(voir fig 17C)

Ce montage à été utiliser dans les équipement solaire de B A T N A .

-E T U D E D E L'ASSOCIATION

a/ Association série :

d'après les courbes (fig - (1c) à 3c)

On peut tirer une formule très importante.

$$V_{co} = n V_{co}$$

$$I_{cc} = cste$$

V_{co} : tension en circuit ouvert de panneaux.

v_{co} : tension en circuit ouvert d'un seul panneau.

n : c'est le nombre de panneaux en série.

b/ ASSOCIATION PARALLELE :

D'après les courbes (fig (4-c) - (6c))

on peut tirer de même une autre formule .

$$I_{co} = n i_{co}$$

$$V_{co} = cste$$

I_{co} : courant de court circuit de n panneaux

i_{co} : courant de court circuit d'un seul panneau

n : nombre de panneaux en parallèles.

.../...

C/ Etude En Puissance : voit fig ()

Une association serie o -ou- parallèles de n panneaux délivrer la même puissance, mais dans notre cas on observe un léger écartement cela est due au rayonnement qui n'est pas identique dans les deux cas (serie -parallèles).

-Puisque la puissance est la même dans les deux cas alors pourquoi et quand on utilise l'association serie où parallèle ?

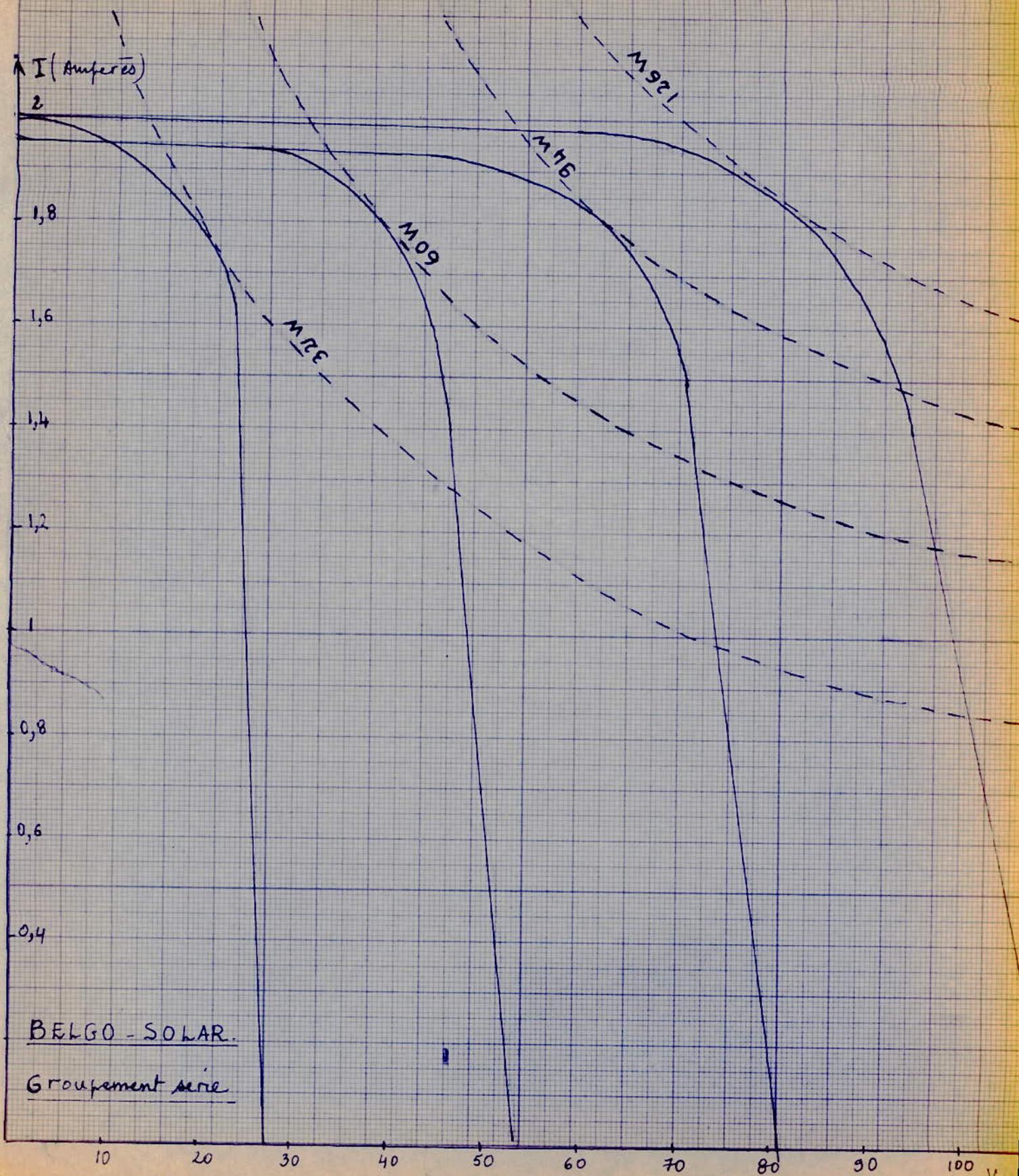
La réponse et la suivante :

Si on veut un débit de courant intense alors on tension on utilise l'association parallèle, et si on veut une forte tension on utilise l'association série, et si on veut une tension forte et un courant fort on utilise des branches en parallèles chaque brache contient un certain nombre de panneaux.

M I X A G E :

Le MIXAGE consiste à associer des panneaux de types différents.

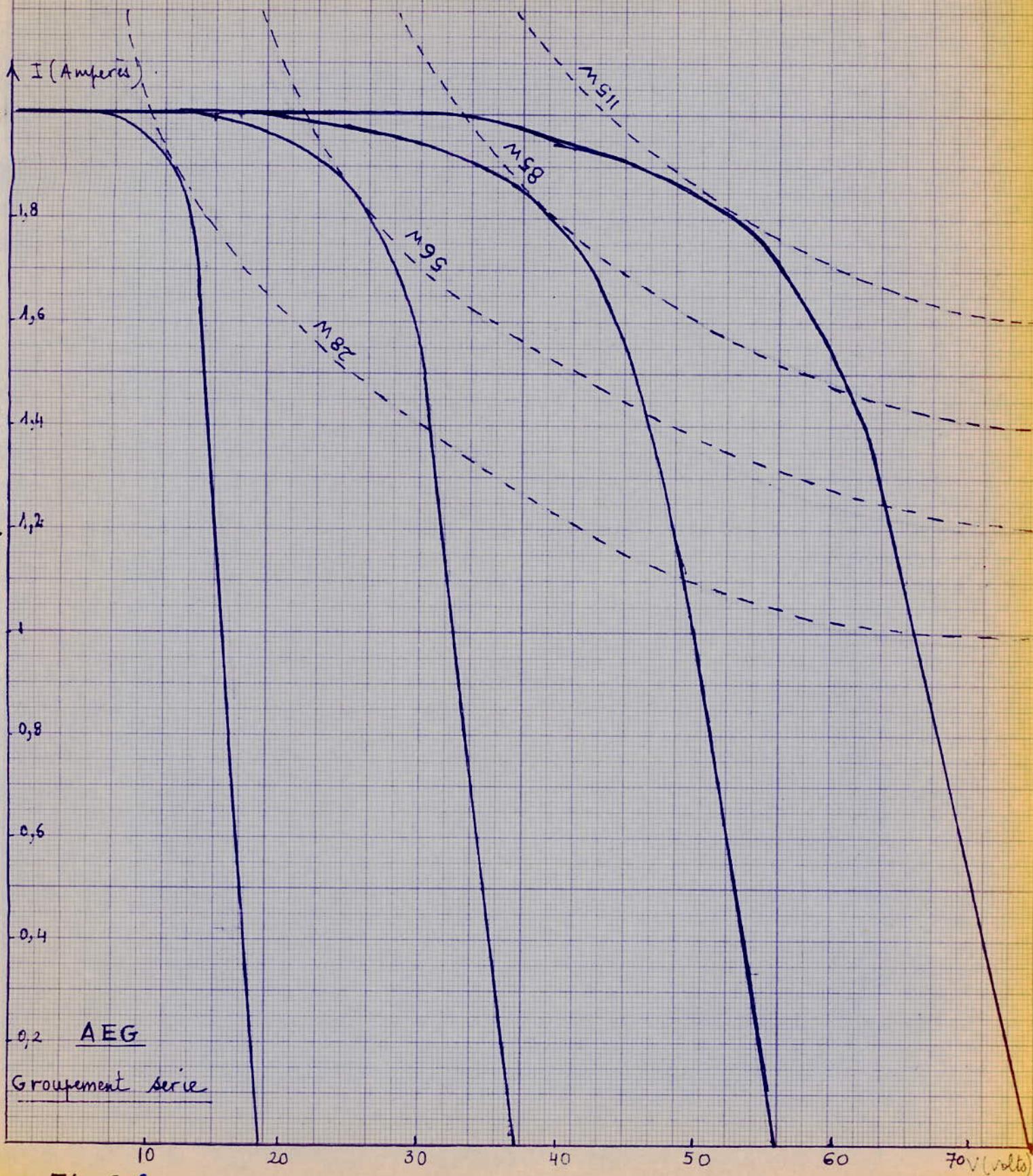
On constate d'après les courbes (voir fig 13c à 16c). que le MIXAGE série ou parallèles donne le même résultat. Que celle d'une association normale, la seule différence c'est que le courant de court-circuit correspond à celui du panneau de faible valeur, et de même la tension en circuit ouvert correspond à celle du panneau de faible tension en circuit ouvert.



BELGO - SOLAR.

Groupement serie

Fig. 1-c



0,2 AEG
Groupement serie

Fig 2.C

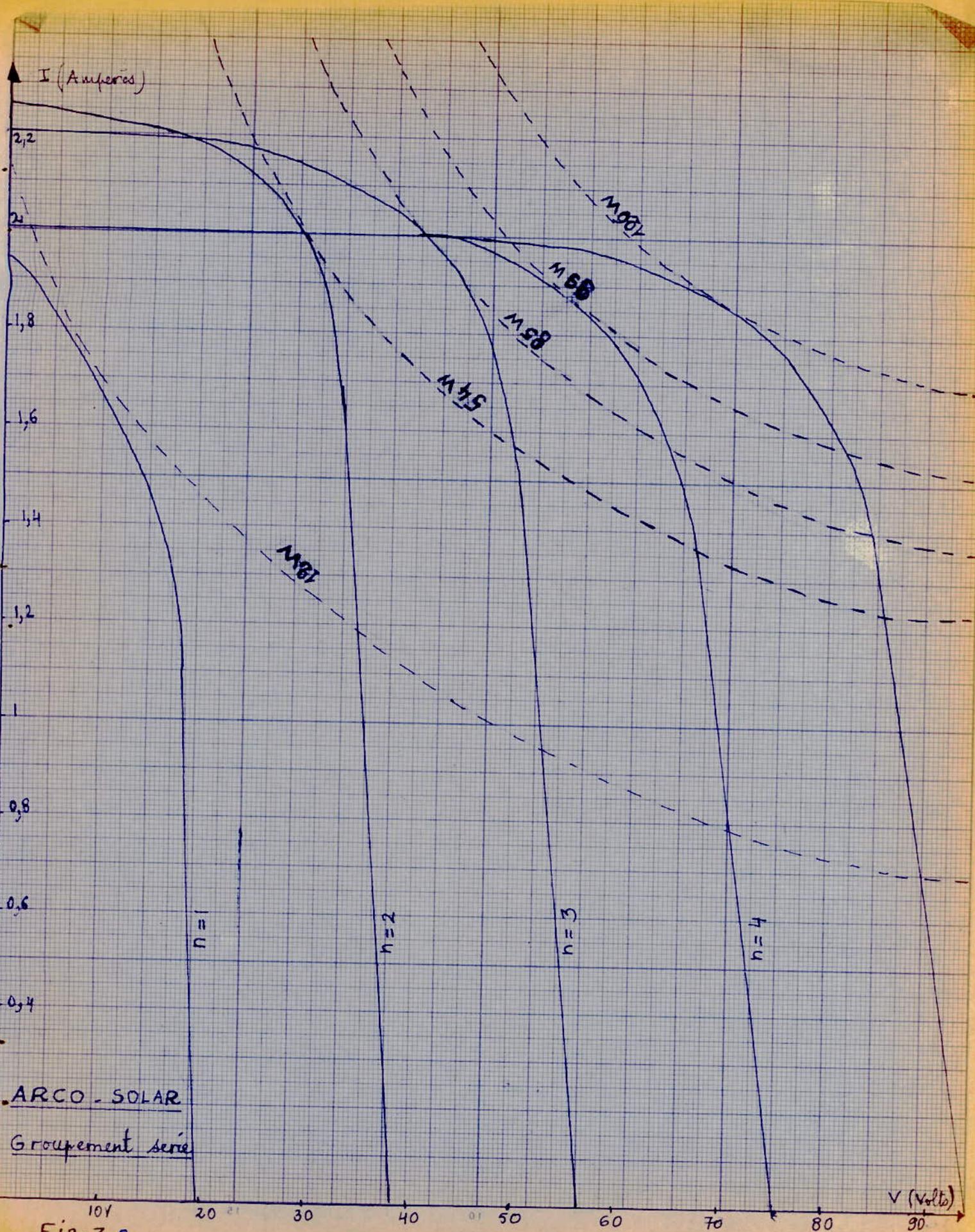
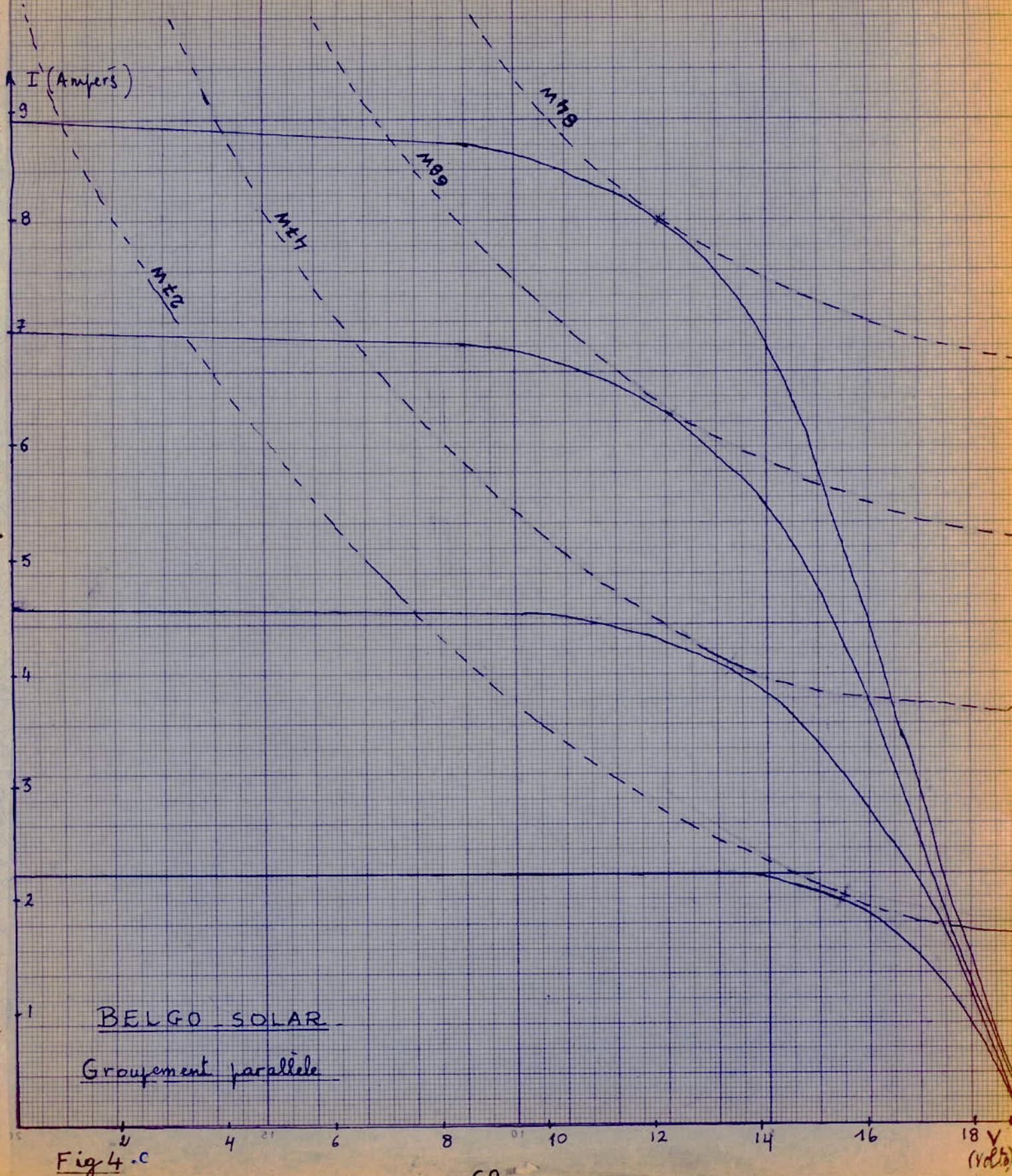


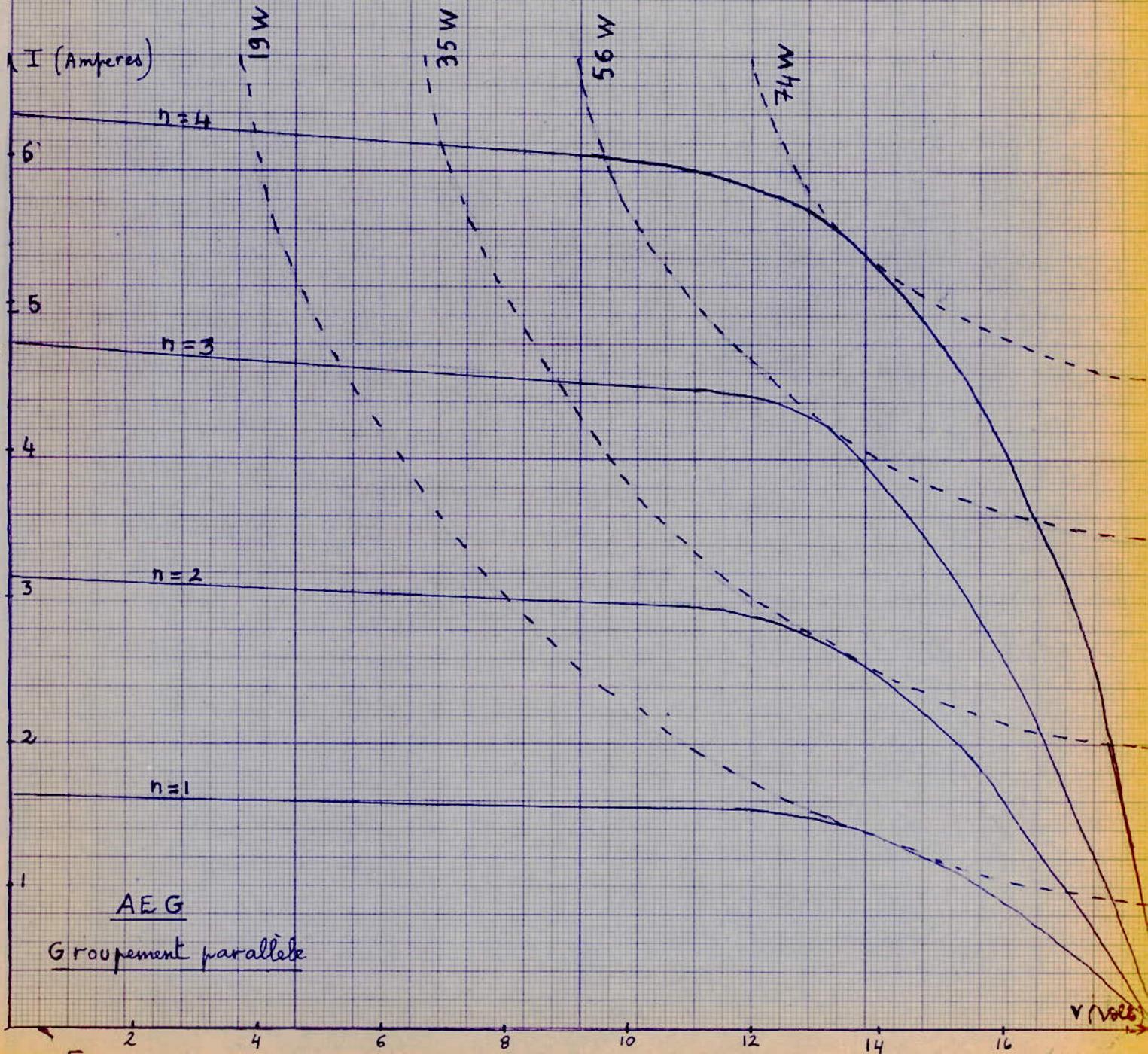
Fig. 3.c



BELGO SOLAR

Grouperment parallele

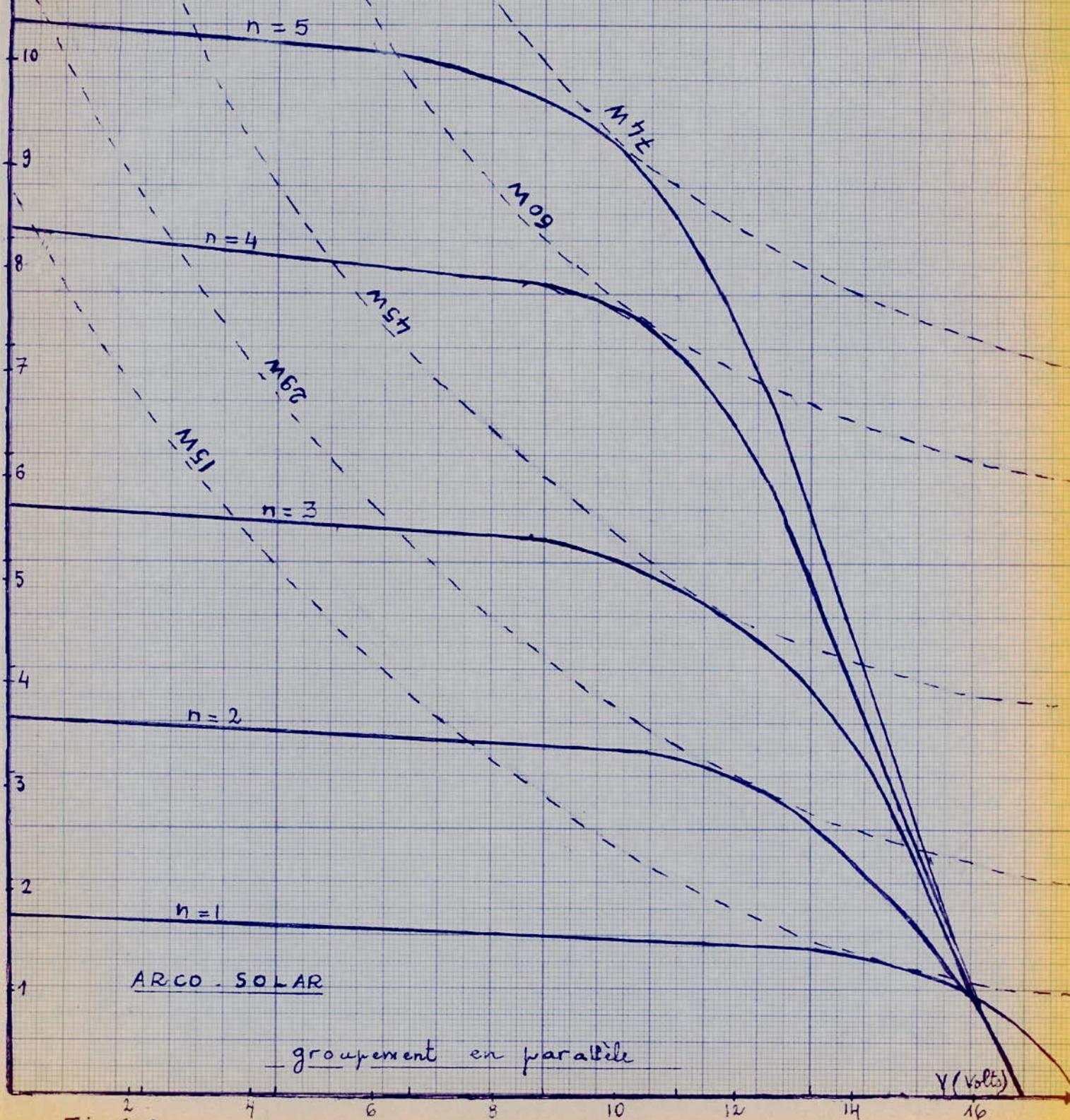
Fig 4.c



AEG
 Groupement parallele

Fig: 5-C

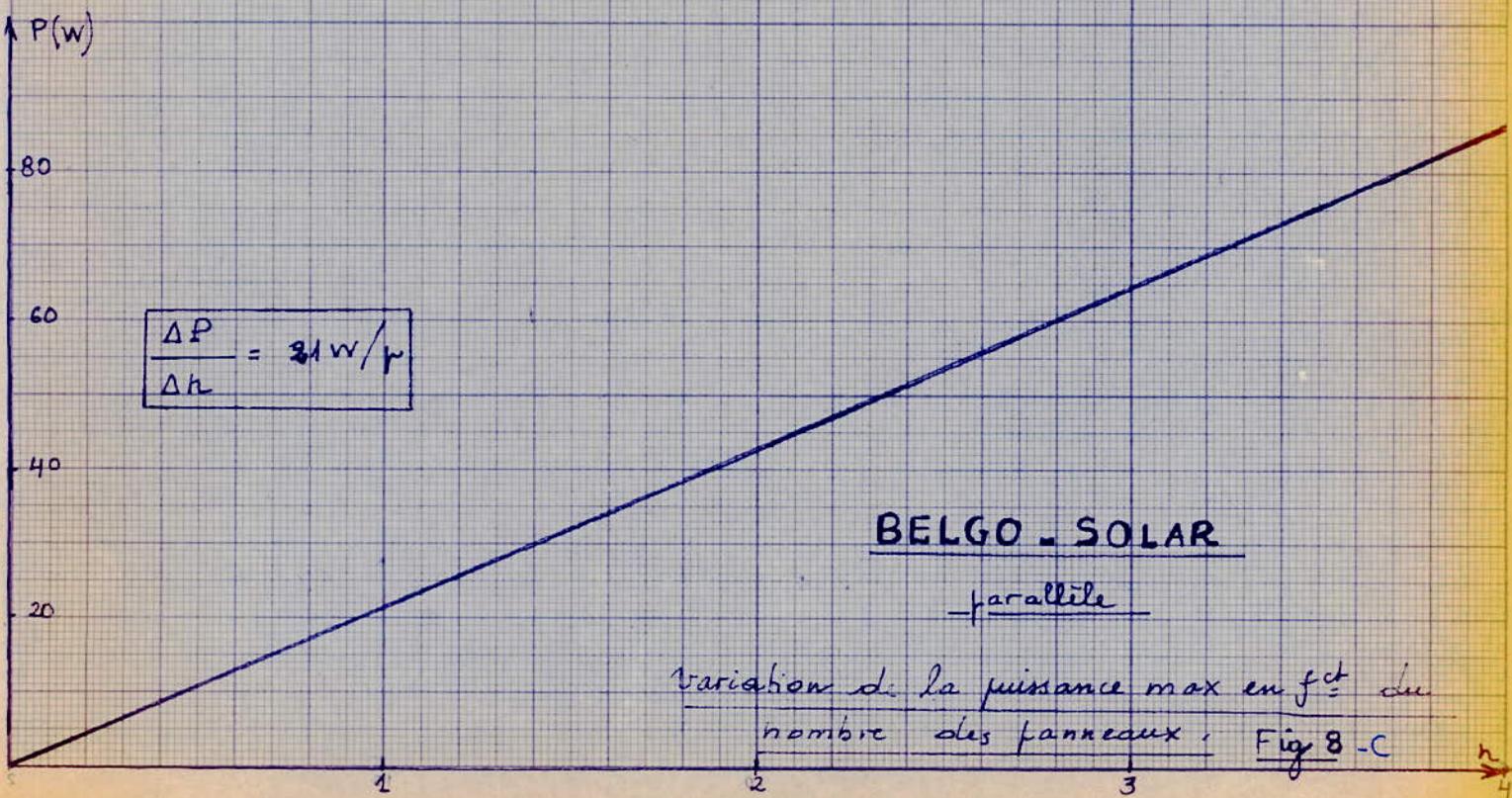
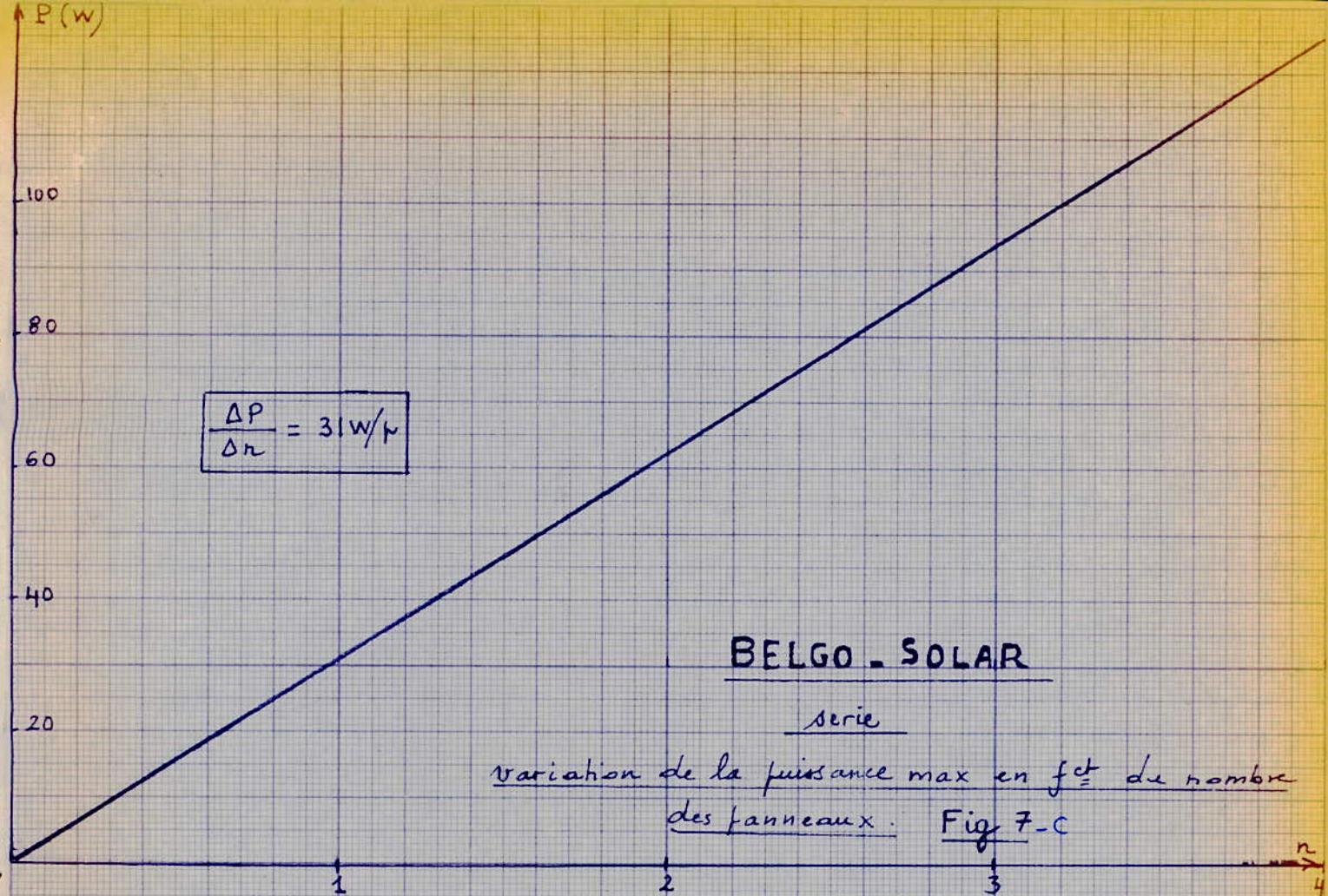
I (Amperes)

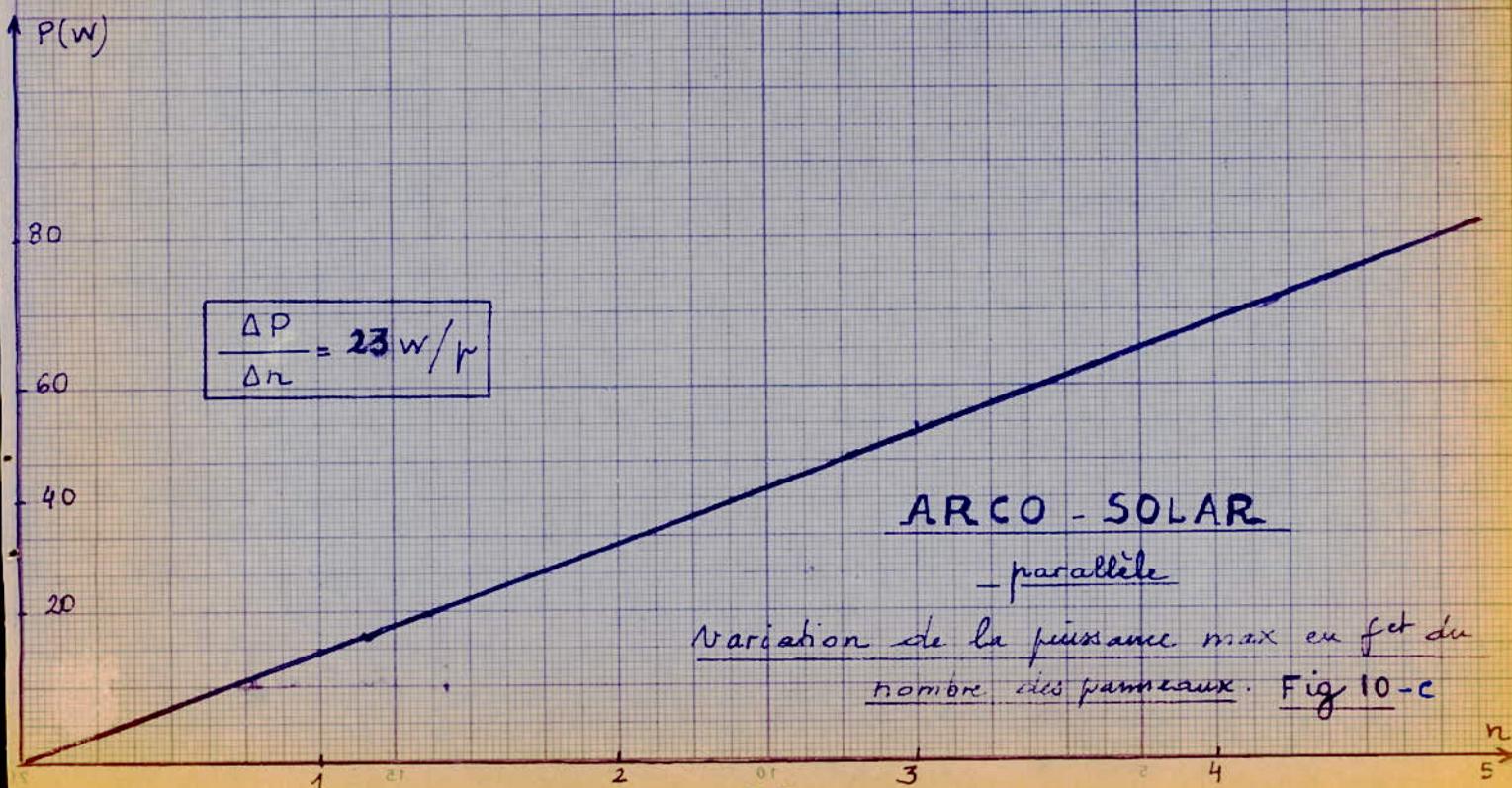
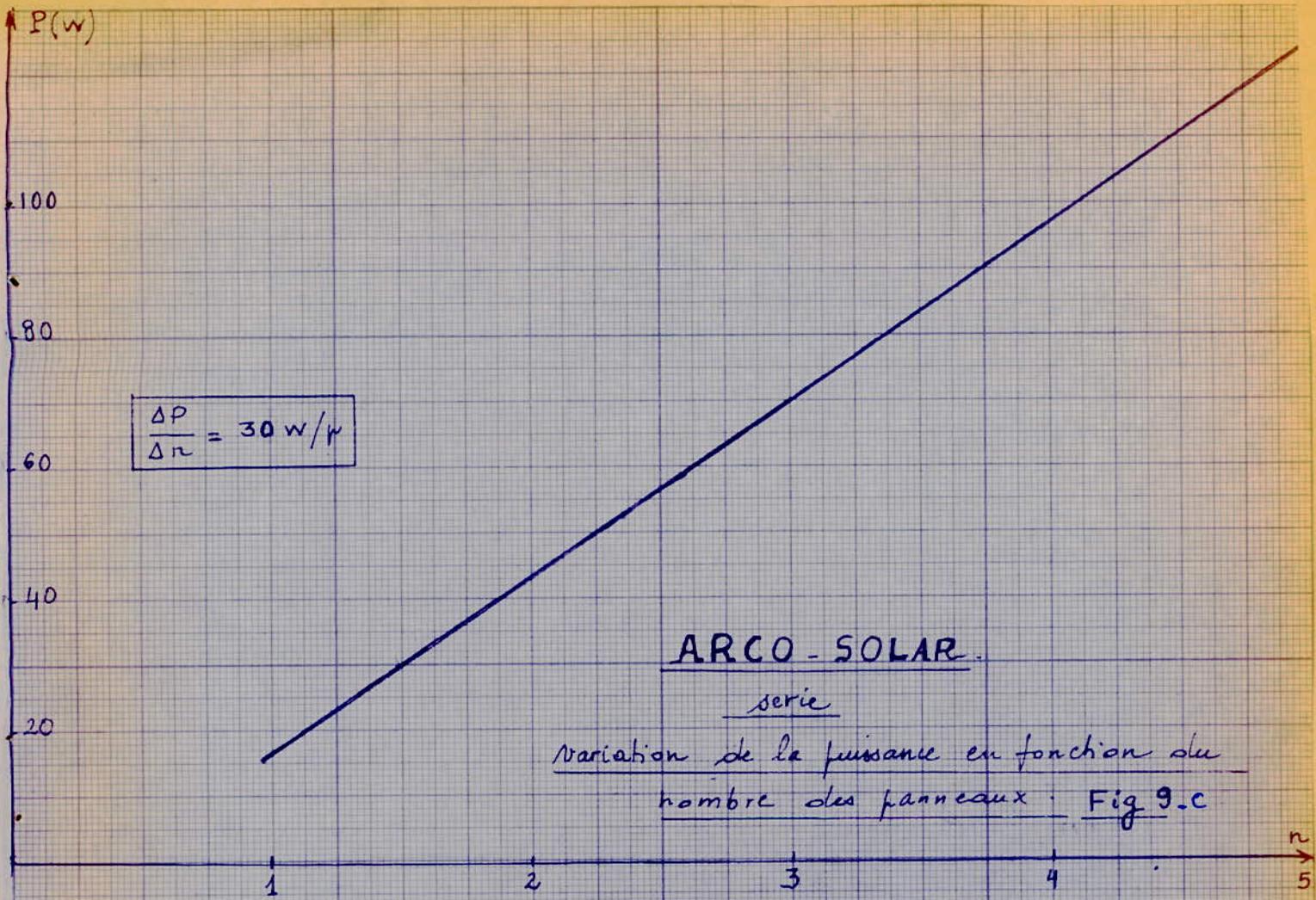


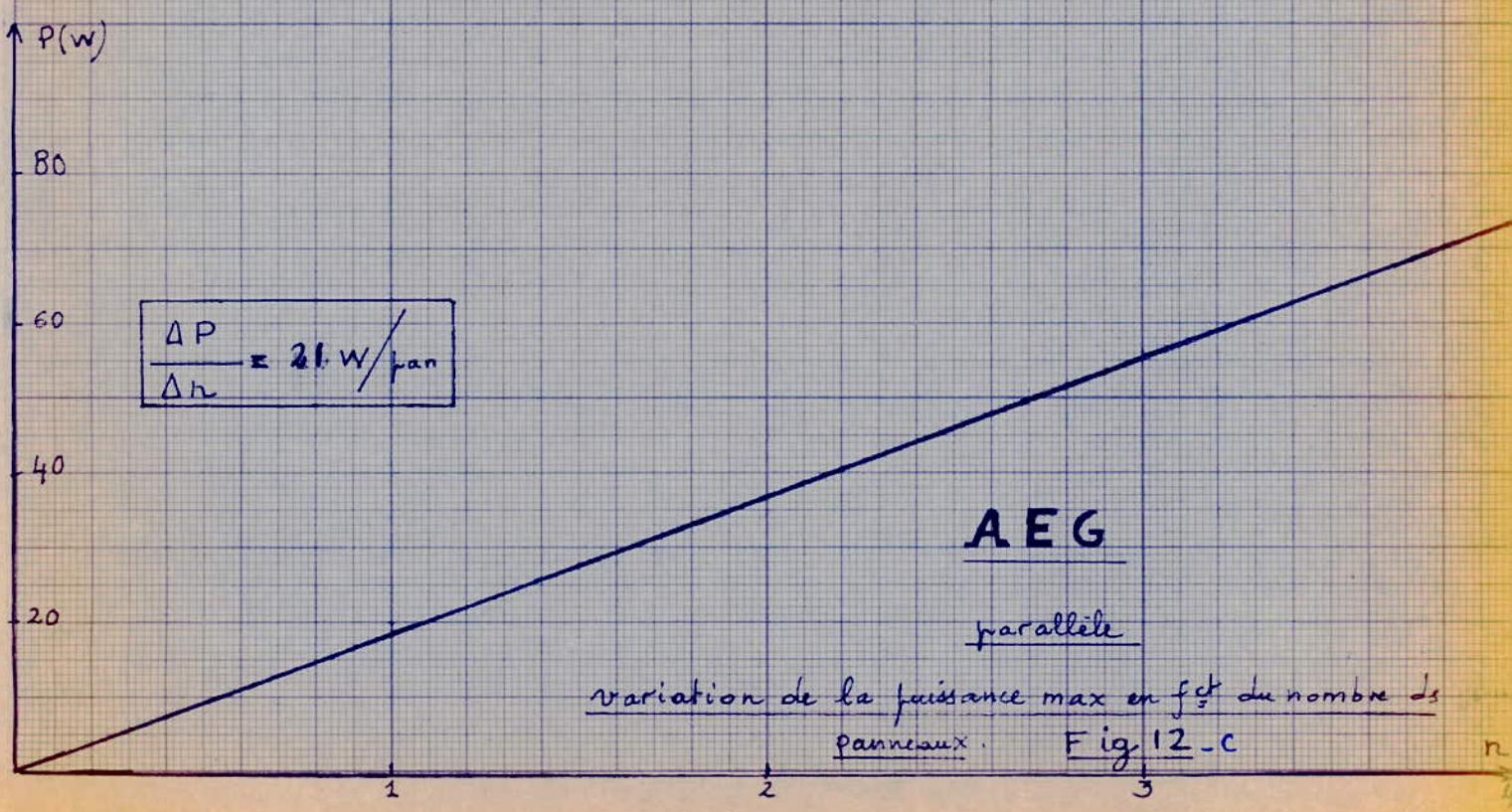
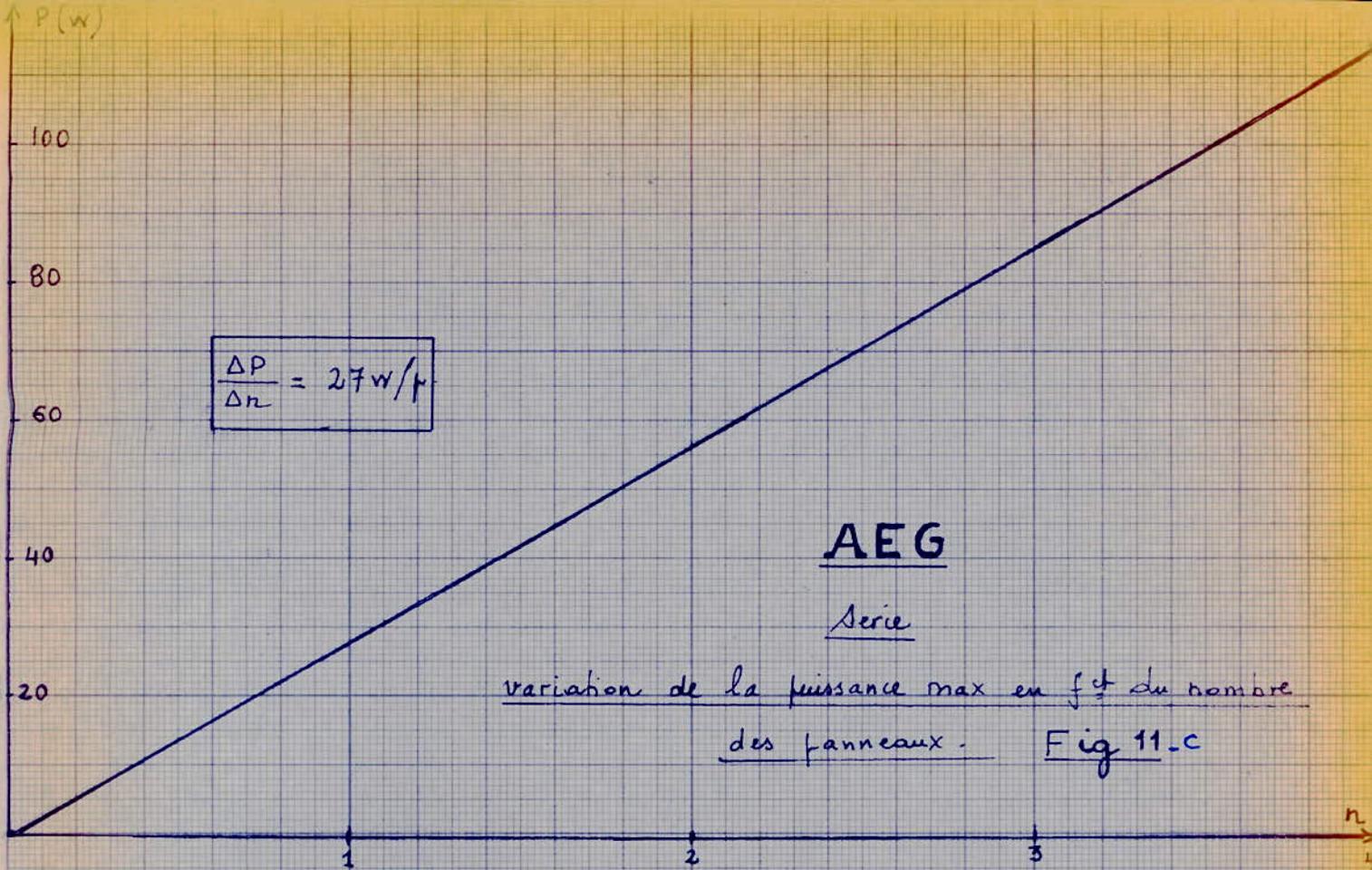
ARCO - SOLAR

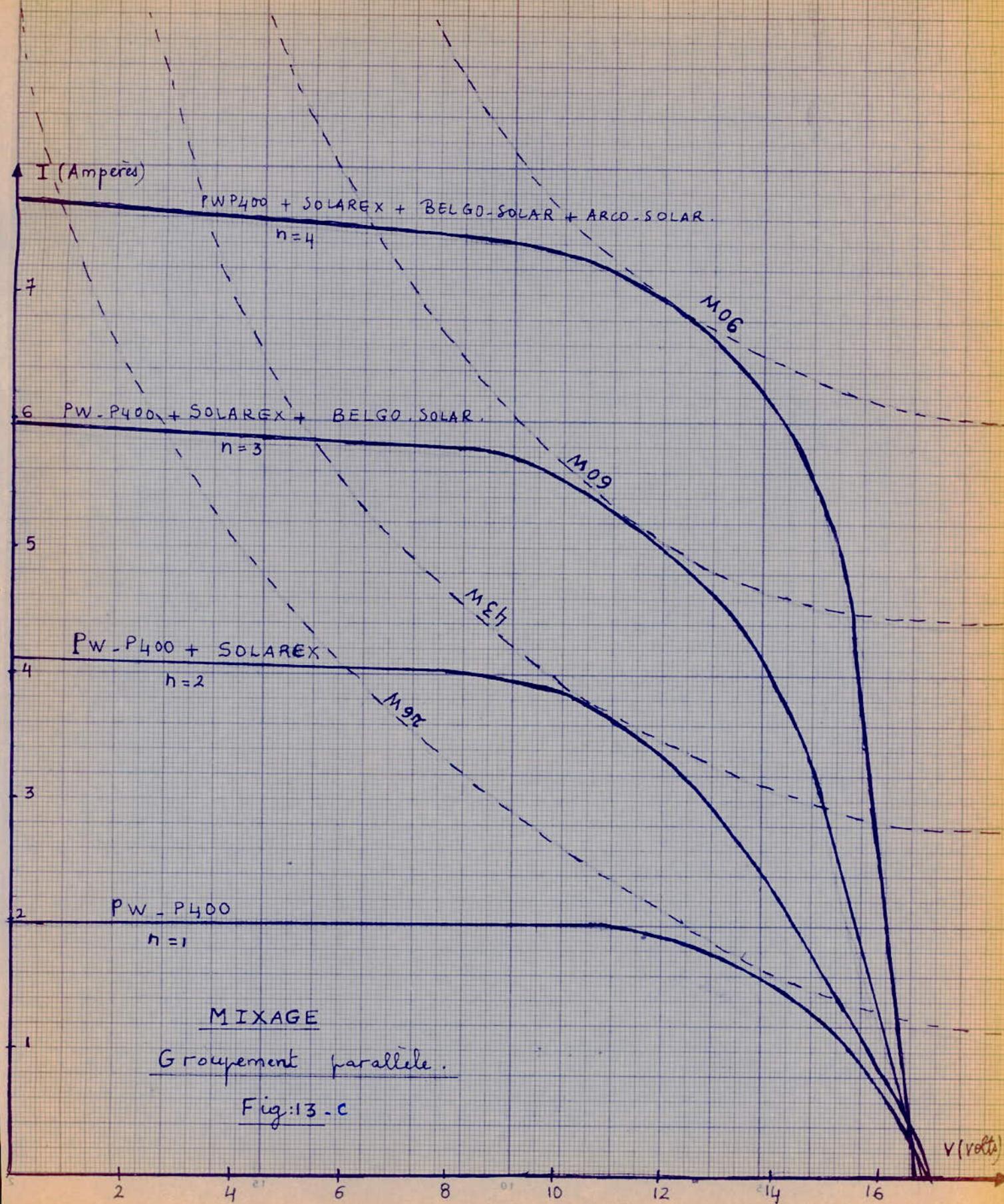
groupement en parallèle

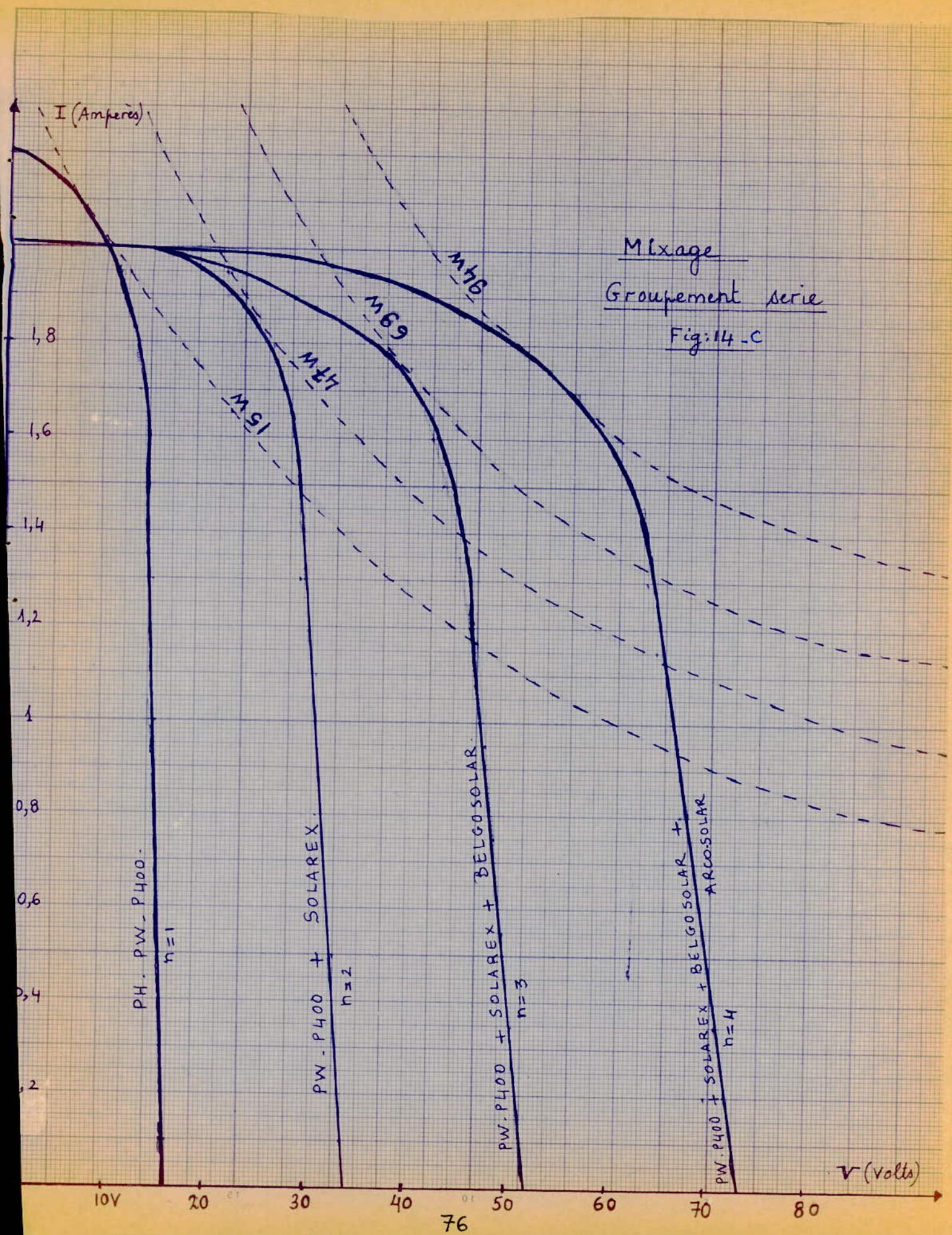
Fig. 6-c

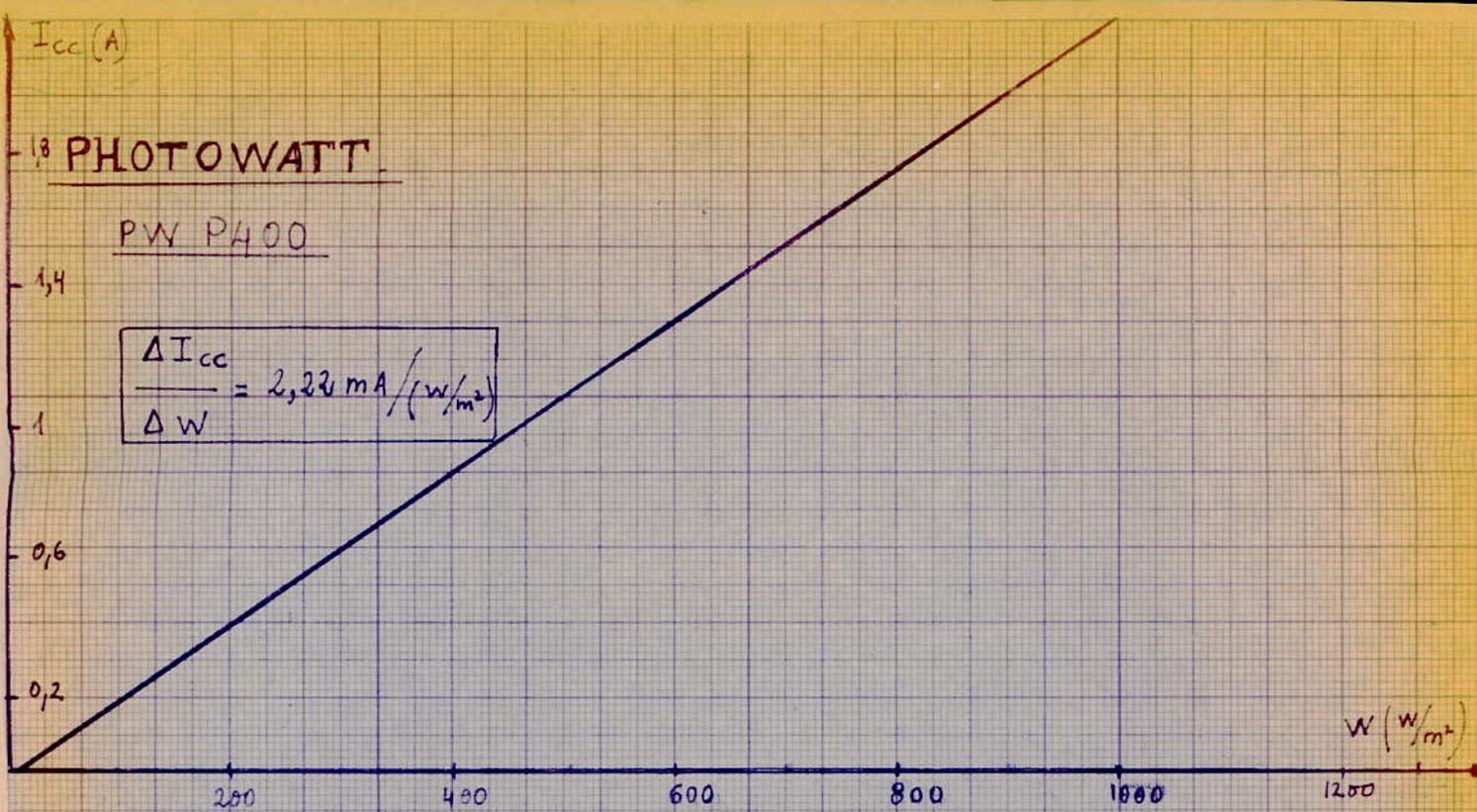






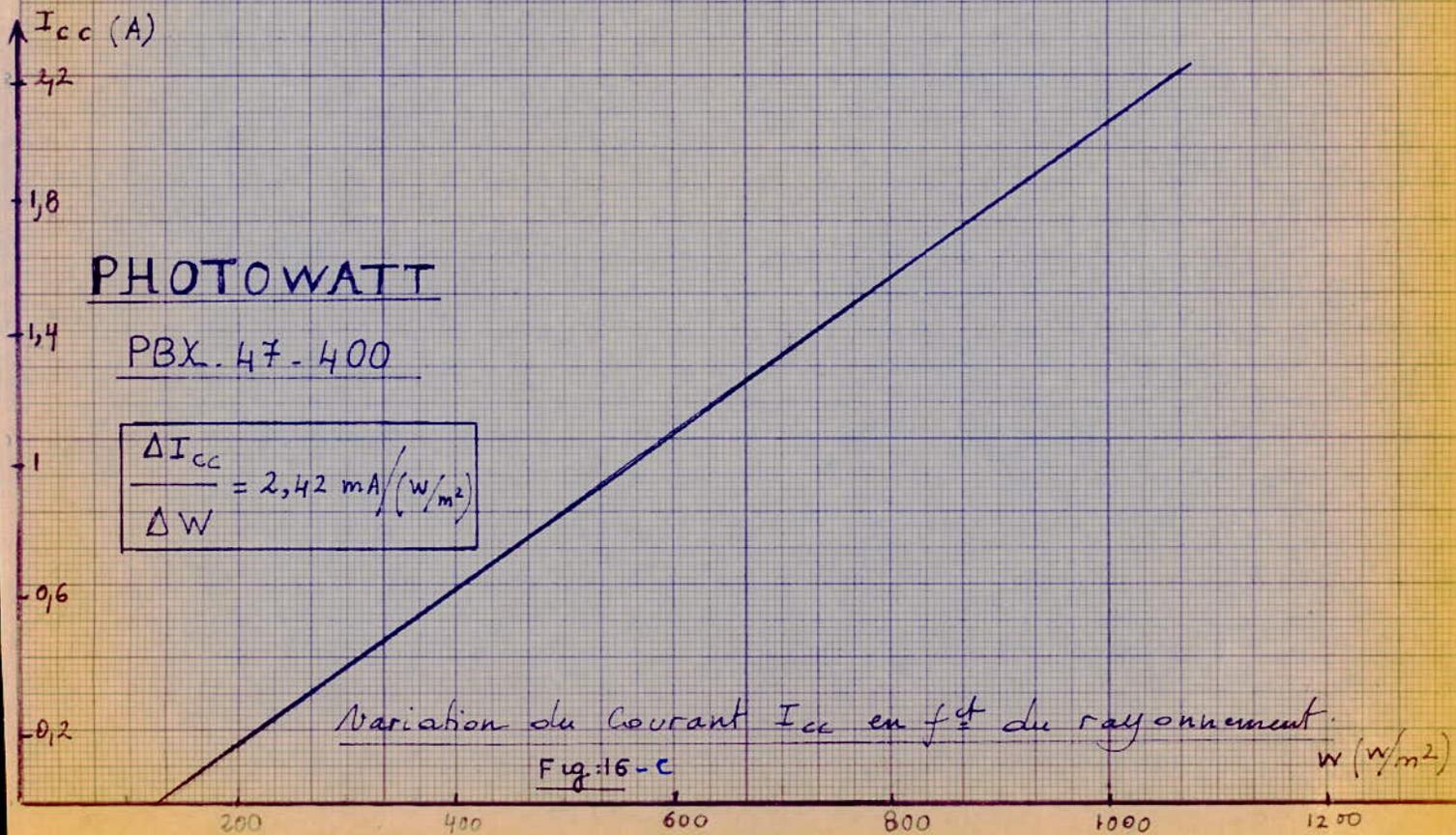






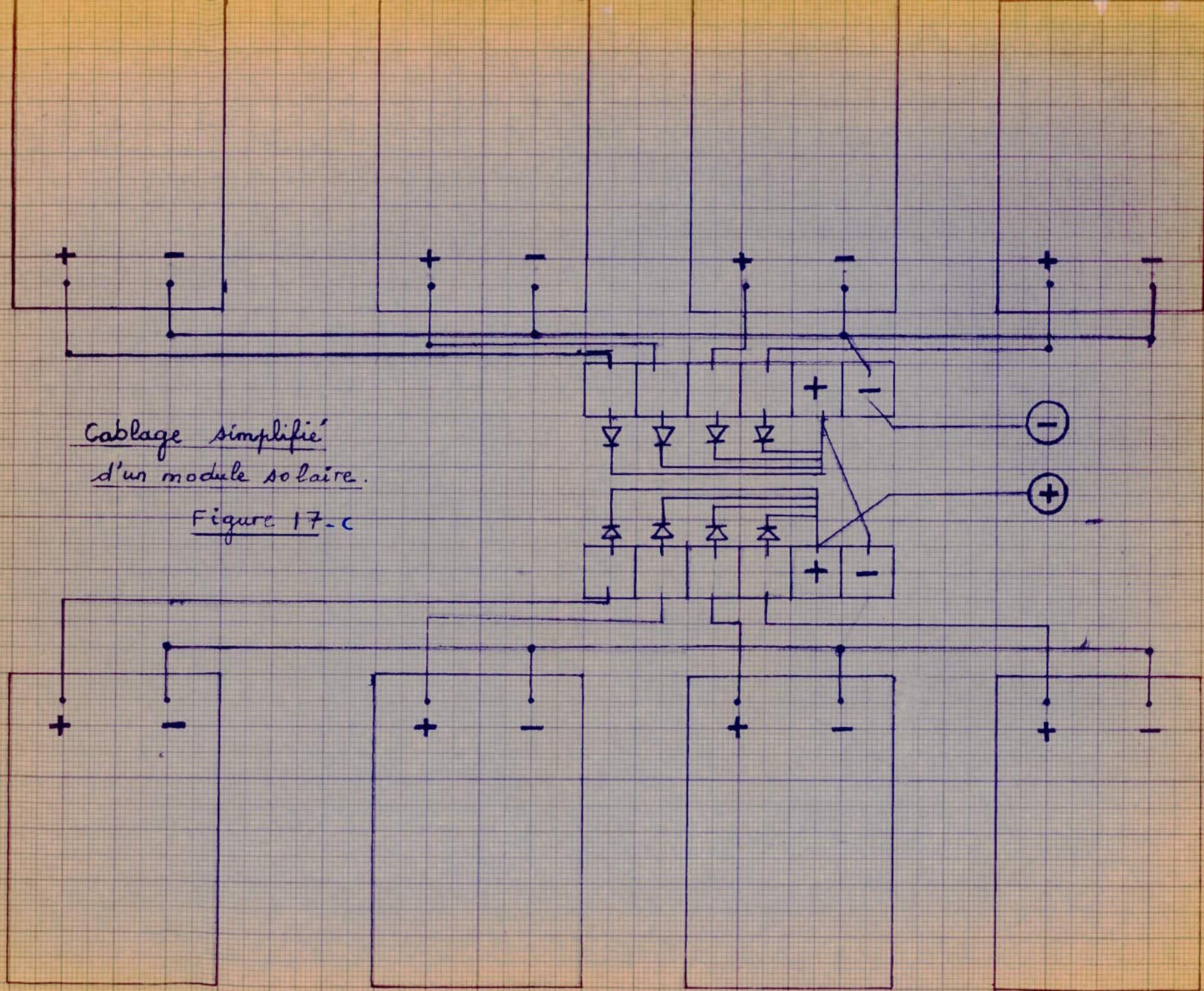
variation du courant I_{cc} en fct du rayonnement

Fig:15-c



Variation du courant I_{cc} en fct du rayonnement.

Fig:16-c



*Cablage simplifié
d'un module solaire.
Figure 17-c*

C O N C L U S I O N G E N E R A L E

Le travail effectué dans le cadre de ce memoire a permis d'apporter une contribution sensible quant à l'exploitation optimale des panneaux solaires.

les paramètres clés définitifs dans ce memoire: ($\frac{\Delta P}{\Delta W}$ -et $\frac{\Delta P}{\Delta T}$ -) CONSTITUENT un élément d'information important dans tout projet d'installation et de dimensionnement d'une structure de captation d'énergie solaire.

Enparteculier la cartographie sur la température et le rayonnement en Algerie elustrent clairement les predispositions naturelles énormes du sud pour une exploitation énergétique de ce rayonnement à grande echelle ,neecessitant des grands investissements financier , techniques et humains. a cet effect l'influence négative de la sensibilité entemperature dont les variations positives entraînent une chute de puissance,est heureusement largement compensé par le comportement favorable de la sensibilité en rayonnement . on peut ameliorer encore le rendement en prevoyant un systeme de refroidissement automatique ;Un autre aspectdes resultats atteints dans le cadredece travail et l'homologation technique des panneaux solaires importes par l'algerie;

Il semble d'apres lesresultats de l'Homologation que la serie phatowatt presente les meilleurs caracteristiques d'utilisation.Enfin ilest confirmé dans ce travail le comportement du panneau solaire en generateur electrique classique. Nous soulignons en conclusion;à travers cette modestecontrebuton toute l'importance pour notre pays à appuyer l'utilisation generalisé du panneau solaire et à intensifier la recherche appliquee sur leterrain ;en l'occurence dans les regions du sud.

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

- ENERGIE SOLAIRE (G. CHASSAGNE, C. DUPUY-MULEVY).
Conversion et applications.
Edition du C.N.R.S. Année : 1978.
- ACTA-ELECTRONICA:
Volume: 20, numéro: 2, Année 1977.
- CARACTERISATION DES CELLULES SOLAIRES:
Projet de fin d'études.
Promotion: Juin 1980.
- ACTA-ELECTRONICA:
Volume:18, N° 4, Année 1975.
- ACTA-ELECTRONICA:
Volume: 5, numéro: 3, Année 1961.
- RADIO-PLANS:
Numéro: 381, Août 1979.

=====