

18/02

2-2

Département d'Electronique et d'Electrotechnique

Projet de Fin d'Etudes



DIPLOME D'INGENIORAT

Etude Experimentale du Dimensionnement
d'une Centrale Solaire à Conversion Photovoltaïque
de Petite Puissance dans le cas d'une Application
à l'Eclairage.

Proposé par :

A. ADANE Docteur - Ingénieur

Etudié par : Abdelbaki MAAFI

Janvier 1982

REMERCIEMENTS

Je remercie mon promoteur, Monsieur A. ADANE, docteur ingénieur et chef du département électricité pour m'avoir proposé ce sujet, encouragé et aidé dans mon travail.

Ce travail a été effectué au Centre des Sciences et Technologie Nucleaire d'Alger. Je remercie le personnel du Laboratoire Cristaux et Couches Minces pour son accueil chaleureux.

Je tiens à remercier Monsieur M. HADDADI professeur à l'ENP et chargé de recherche au CSTN pour son aide et son soutien moral.

Je suis heureux, aujourd'hui, d'exprimer ma profonde gratitude à tous les professeurs qui ont contribué à ma formation et à tous ceux qui m'ont aidé dans l'élaboration de cette étude.

Table des matières

Introduction	I
CHAPITRE I	
<u>Les problèmes posés par le dimensionnement d'une centrale solaire à conversion photo- voltaïque.</u>	
1.1 Introduction	2
1.2 Théorie sommaire de rayonnement	7
1.3 Présentation des données de rayonnement	12
1.4 Estimation de la courbe à fluctuation minimale	15
1.5 Introduction à la théorie du dimensionnement	20
CHAPITRE II	
<u>Présentation et choix des éléments</u>	
2.1 Les panneaux solaires à conversion photovoltaïque	25
2.2 La source d'éclairage	34
2.3 Les batteries d'accumulateurs	43
CHAPITRE III	
<u>Réalisation expérimentale</u>	
3.1 Description de l'installation	49
3.2 Le système de protection et de distribution d'énergie	50
CHAPITRE IV	
<u>Instrumentation et mesures</u>	
4.1 Les appareils de mesure	56
4.2 Les techniques de mesure des divers paramètres	58
4.3 Mesures	61
Conclusion	65

INTRODUCTION

L'objet de ce travail est d'étudier expérimentalement, le dimensionnement d'une centrale solaire à conversion photovoltaïque, de petite puissance, dans le cas d'une application à l'éclairage.

La résolution d'un tel problème, se fait, en général à partir des paramètres qui interviennent dans la consommation en énergie, des données d'ensoleillement du lieu de l'expérience et de sa position géographique.

En réalité, nous avons abordé ce problème de dimensionnement en partant d'une situation pour laquelle le nombre de panneaux solaires a été fixé à cinq modules BPX 47A qui délivrent 50 W au maximum quand l'ensoleillement atteint 1 KW/m^2 et nous nous sommes servis des données d'ensoleillement de l'année 1979 prises à Alger.

Notre travail a, donc, consisté à réaliser la manipulation qui doit permettre la vérification expérimentale des résultats donnés par la théorie du dimensionnement des centrales solaires.

L'intérêt de faire une telle étude est de résoudre des problèmes d'éclairage urbain ou domestique posés par les sites isolés tels que les régions désertiques, les régions montagneuses ou autres.

L'application de la conversion photovoltaïque à l'éclairage public permet, entre autre, de faire l'économie des investissements des réseaux électriques.

CHAPITRE-I

LES PROBLEMES POSES PAR LE DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE SOLAIRE A CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

I.I. Introduction.

La centrale que nous devons étudier, utilise des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie convertie. Son schéma de principe est donné par la figure. I.

Pour que cette centrale travaille avec un rendement maximal, il faut optimiser les dimensions des panneaux solaires des accumulateurs et du récepteur.

Cette opération nécessite la connaissance des caractéristiques d'ensoleillement de l'endroit considéré et des données de consommation en énergie .C'est-à-dire, dans notre cas, il faut déterminer les données d'ensoleillement pour la région d'Alger. Nous disposons, pour cela, des mesures faites par la Station Energie Solaire de Bouzaréah en 1979 et le C.S.T.N en 1981 (voir les tableaux I et 2 et les figures 7a, 7b, 8 et 9).

En outre, nous devons également connaître la courbe de charge. Celle ci représente les besoins en énergie à chaque instant.

La courbe de charge journalière permet d'évaluer la consommation moyenne en énergie, chaque jour, et sa durée. Sa forme dépend du type de besoin en énergie.

D'une façon générale, l'énergie électrique est utilisée, pour des usages domestiques ou l'alimentation d'équipements à usage professionnel.

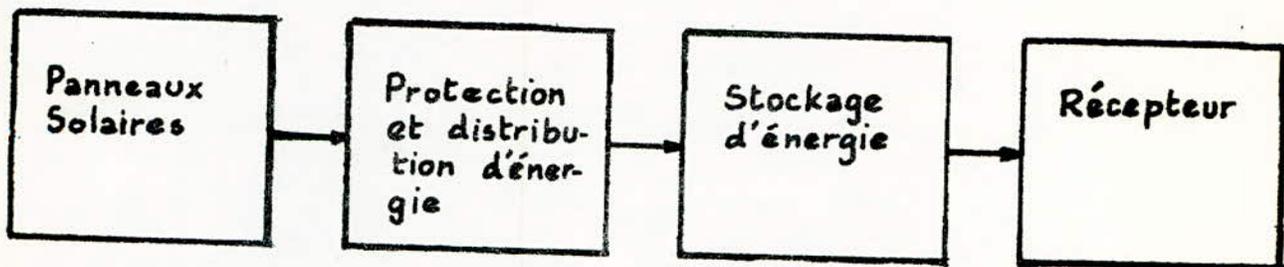


Figure 1.

Organisation d'une centrale électro-solaire
utilisant des batteries d'accumulateurs.

Si, on s'intéresse aux besoins domestiques en électricité, on trouve que la consommation en énergie présente un pic vers le soir. Celui-ci est dû à l'éclairage, et à l'utilisation d'appareils tels que la télévision, la radio ou autres, la nuit. La courbe de charge dans ce cas, est une fonction aléatoire, car l'utilisation des divers appareils électriques, à usage domestique peut avoir lieu à n'importe quelle heure de la journée. Néanmoins, elle présente une certaine périodicité, car les différentes tâches du foyer se répètent chaque jour (figure. 2a).

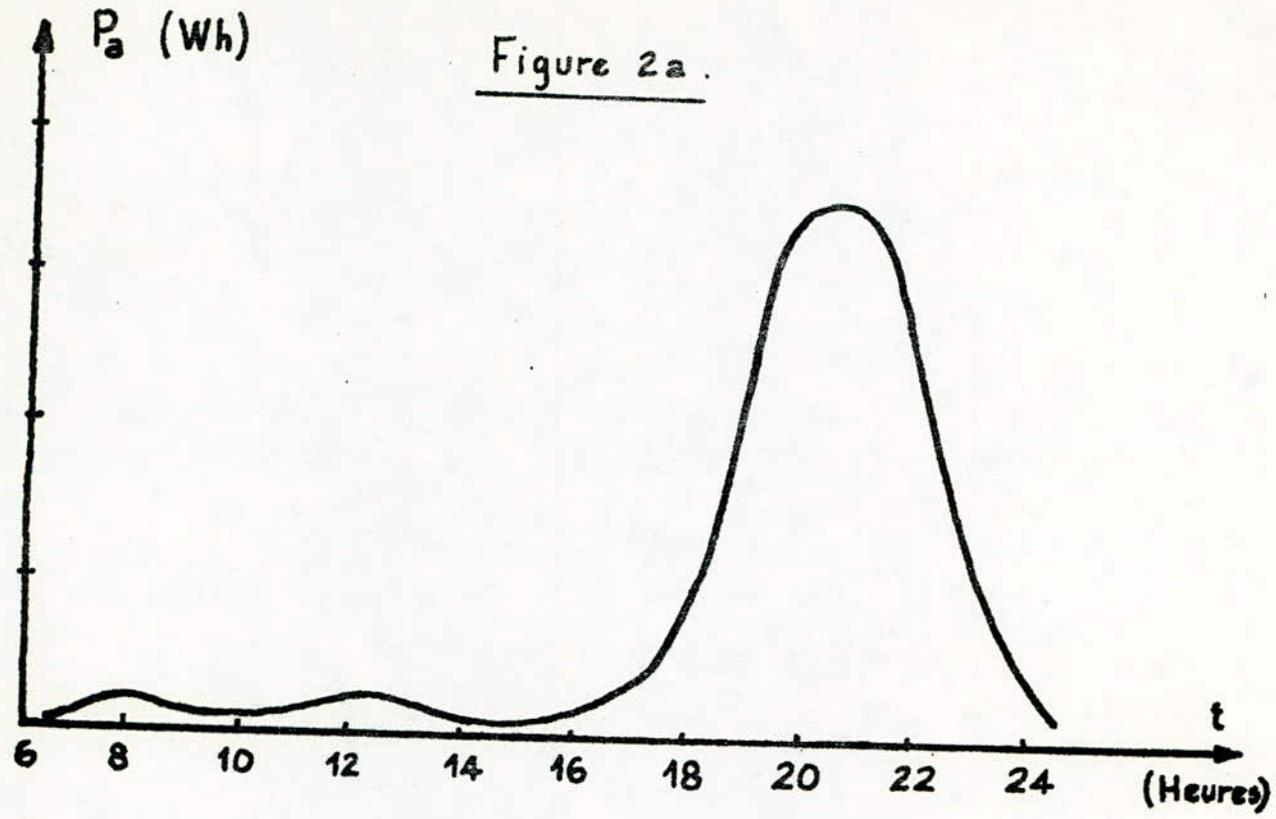
Dans le domaine professionnel, les installations (balisage d'aéroport, balisage radio-électrique, système de sécurité, éclairage des édifices publics, ...) doivent fonctionner sans interruption en permanence ou durant un laps de temps déterminé. Leurs besoins en énergie électrique sont constants dans le temps. La courbe de charge, dans ce cas, peut avoir l'une des formes représentées par la figure. 2b.

Pour simplifier le problème, nous supposons que notre centrale doit assurer un éclairage constant, pendant un intervalle de temps donné.

Le jour, les panneaux solaires chargent des batteries. Celles-ci alimentent une lampe le soir. La consommation en énergie électrique représente en moyenne journalière une valeur constante. Cette valeur est invariable au cours de l'année. La courbe de charge, relative à cette situation est donnée par la figure. 3.

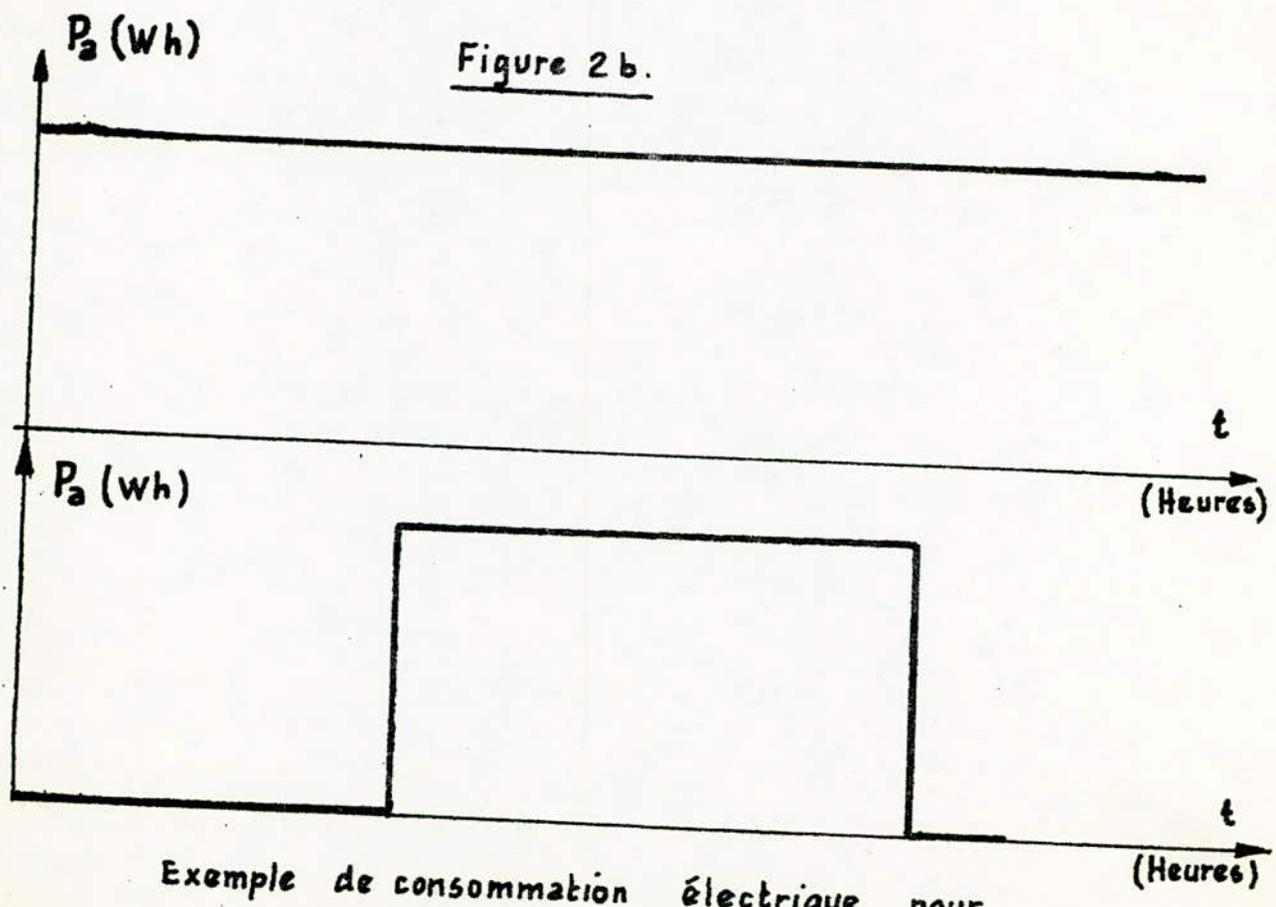
Les données d'ensoleillement dont nous disposons ne sont pas adaptées à notre expérience. En effet, ces mesures ont été faites avec un capteur plan horizontal ($\theta = 0$). θ est l'angle entre la normale à la surface des panneaux et la verticale du lieu. Cette orientation ne correspond pas forcément à la bonne orientation des capteurs pour notre centrale. Pour déterminer l'orientation optimale des panneaux solaires, il faudrait considérer toutes les courbes d'ensoleillement obtenues pour différentes orientations du capteur

Figure 2a.



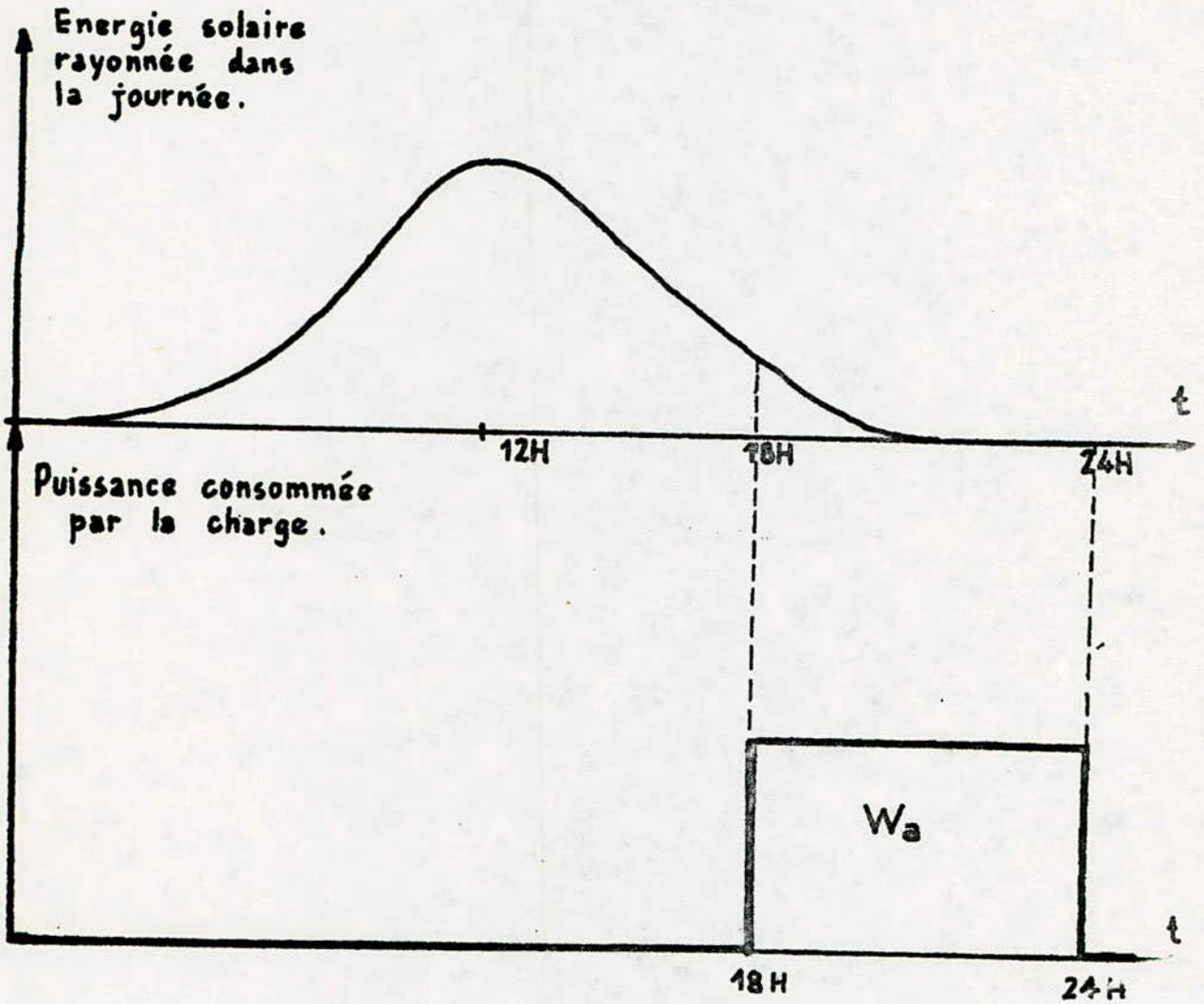
Exemple de consommation électrique pour des besoins domestiques

Figure 2b.



Exemple de consommation électrique pour des installations à usage professionnel.

Figure 3.



Courbe de charge.

plan, un exemple est donné à la figure. 4. Comme nous ne disposons pas de telles données, il faudrait trouver comment on pourrait transférer les résultats expérimentaux à un modèle dans lequel l'orientation des panneaux solaires est quelconque. Pour répondre à cette question, on doit tracer les courbes d'ensoleillement à l'aide de la théorie du rayonnement ensuite on les ajustera avec les valeurs expérimentales.

I.2. Théorie sommaire du rayonnement.

I.2.I. Énergie solaire reçue sur une surface plane en fonction de son orientation.

Le flux d'énergie solaire reçu au niveau du sol par un capteur horizontal comprend deux composantes E_1 et E_2 . E_1 étant due au rayonnement direct du soleil et E_2 correspond au rayonnement diffus.

$$E = E_1 + E_2 \quad (I.I)$$

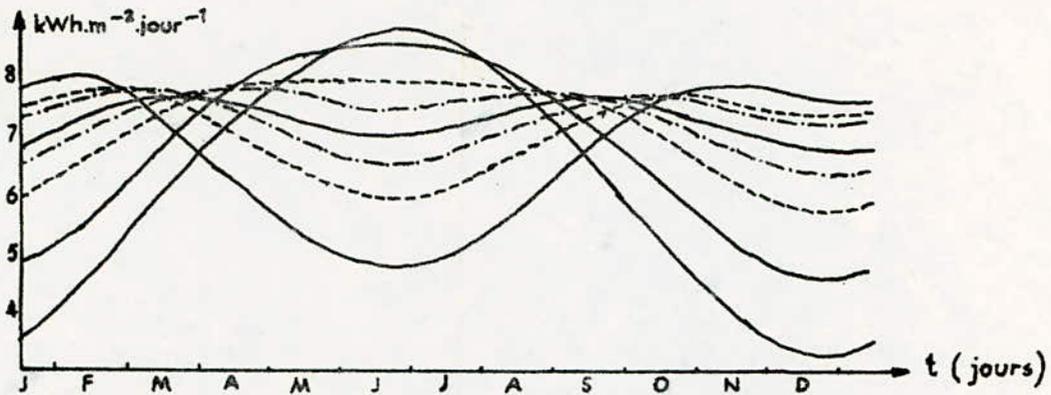
E représente le rayonnement global.

Pour voir quel est le flux de rayonnement solaire reçu en un point de la terre, on suppose que celle-ci est une sphère tournant autour de son axe et décrivant son orbite autour du soleil avec un mouvement uniforme, dans des conditions météorologiques idéales. C'est-à-dire, un ciel clair et sans nuages.

Le flux direct d'énergie solaire, reçu par un capteur plan, varie, alors en fonction de l'orientation selon la loi suivante :

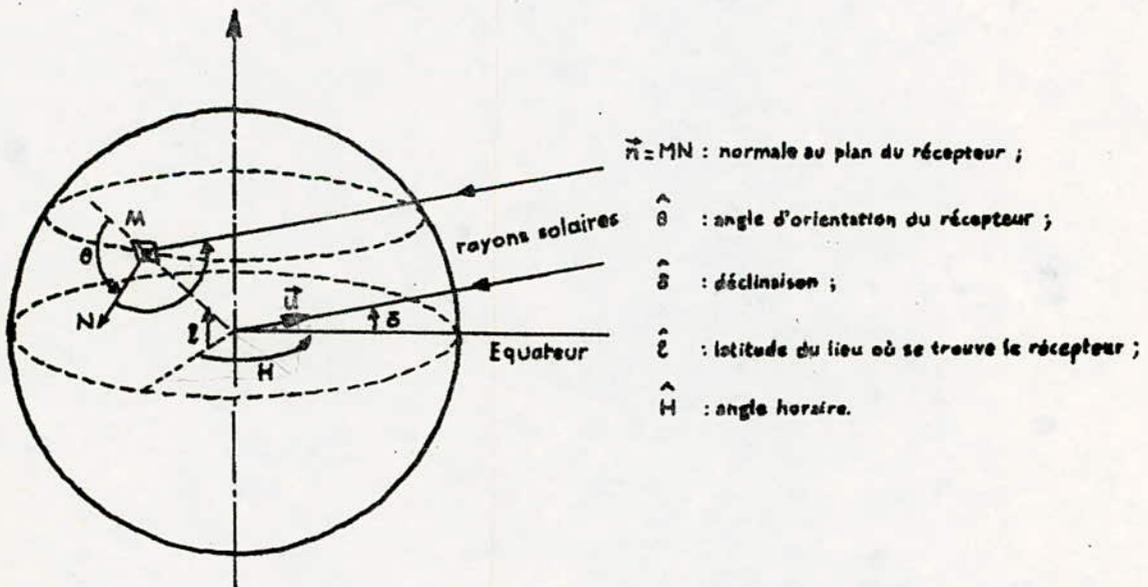
$$E = E_0 \cos u \quad (I.2)$$

Figure 4.



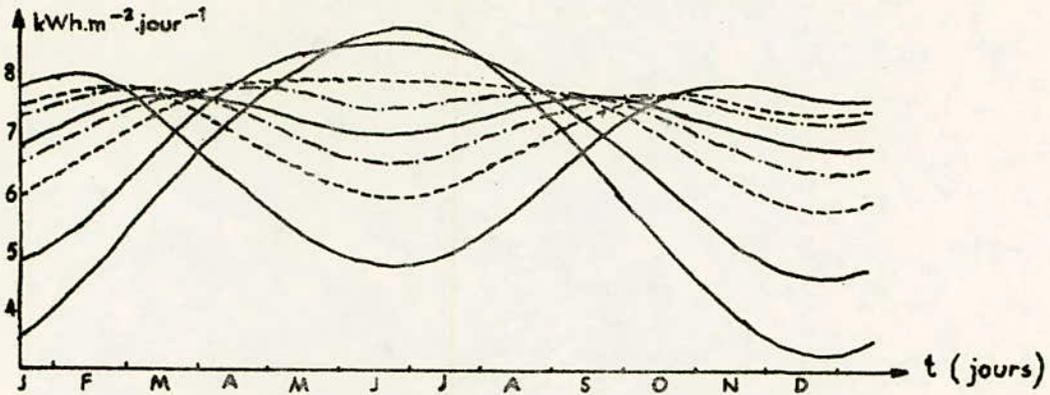
Exemple de courbes représentant les variations saisonnières de l'énergie journalière reçue par unité de surface pour diverses valeurs de $(l-\theta)$. $\hat{l} = 35^\circ$

Figure 5.



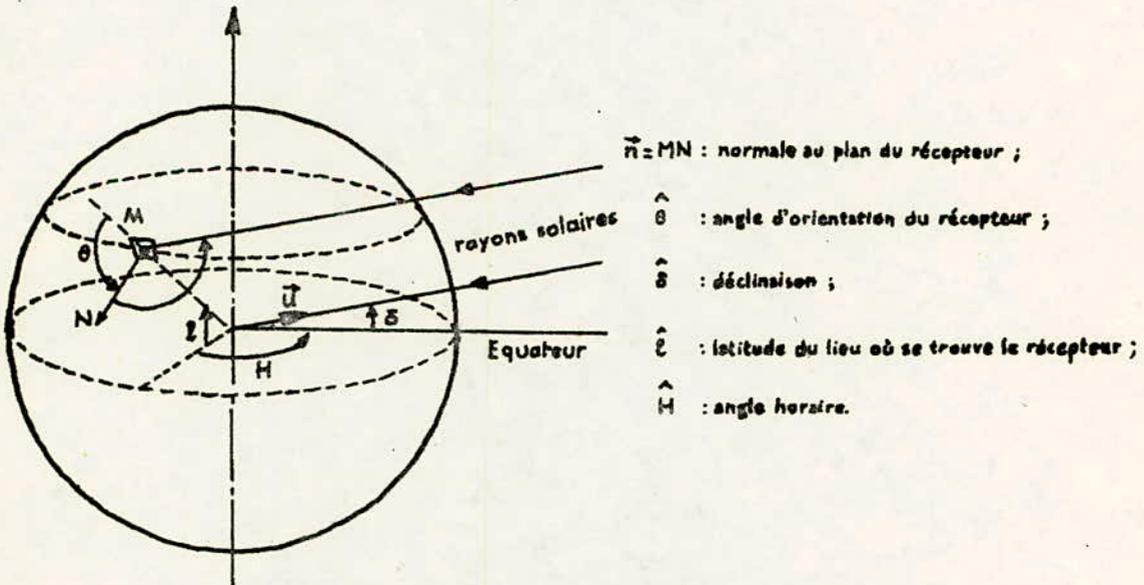
Représentation de la position d'un capteur plan en fonction des paramètres \hat{l} , $\hat{\delta}$, \hat{H} et $\hat{\theta}$.

Figure 4.



Exemple de courbes représentant les variations saisonnières de l'énergie journalière reçue par unité de surface pour diverses valeurs de $(l-\theta)$. $\hat{l} = 35^\circ$

Figure 5.



Représentation de la position d'un capteur plan en fonction des paramètres \hat{l} , $\hat{\delta}$, \hat{H} et $\hat{\theta}$.

$$\cos u = \vec{u} \cdot \vec{n} = \begin{bmatrix} \cos \delta \cdot \cos H \\ \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos (1-\theta) \\ 0 \\ \sin (1-\theta) \end{bmatrix}$$

donc.

$$E = E_0 \left[\cos (1-\theta) \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin (1-\theta) \sin \delta \right] \quad (I.3)$$

Les paramètres définissant la position géographique d'un capteur sont donnés par la figure. 5.

L'éclairement d'un capteur placé horizontalement est donné par la même loi dans laquelle l'angle θ est nul $[1]$.

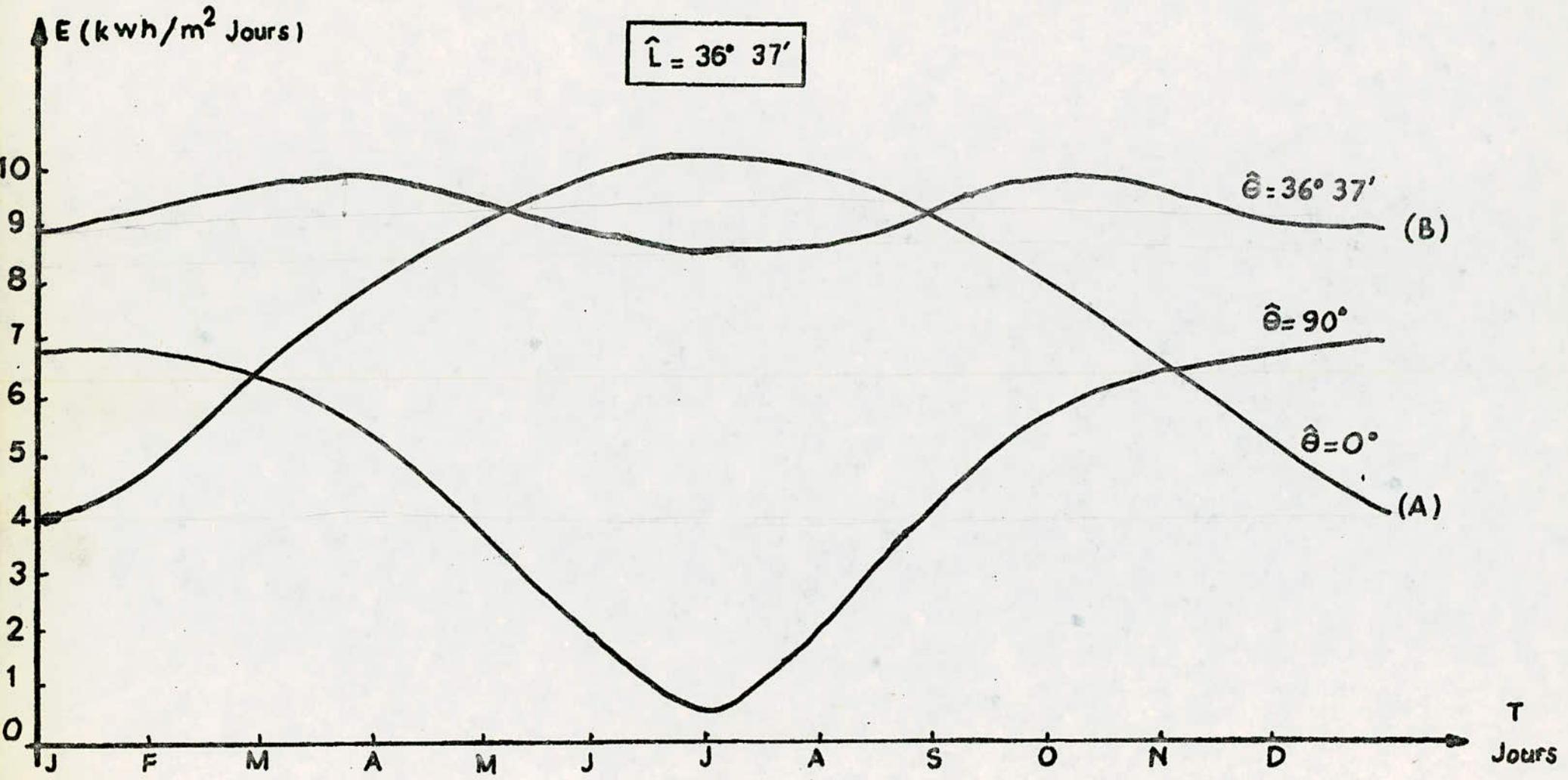
$$E = E_0 \left[\cos l \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin l \sin \delta \right] \quad (I.4)$$

La durée du jour solaire D , exprimée en heures est fournie par la relation .

$$D = I_2 - \frac{24}{\pi} \text{Arc sin} (tg \delta \cdot tg l) \quad (I.5)$$

A partir de la courbe d'ensoleillement moyenne du rayonnement global annuel ($\theta = 0$) pour la région d'Alger donnée par la figure. 9 et la relation (I.3), on peut calculer le flux global d'énergie solaire, reçu chaque jour à Alger par un capteur plan dont la normale fait un angle θ avec la verticale du lieu. Le réseau de caractéristiques obtenu, montre qu'il existe des valeurs de θ pour lesquelles l'écart du flux solaire entre les saisons est minimum (figure. 6). Une telle caractéristique est intéressante, car si les fluctuations saisonnières sont minimales, les conditions de stockage seront optimales. On remarque que la courbe d'ensoleillement pour laquelle l'ondulation est minimale correspond à une orientation du capteur telle que l'énergie reçue au milieu de l'été ait la même valeur que celle captée au milieu de l'hiver. L'angle θ correspondant à cette situation est pratiquement égal à la latitude du lieu ($l \approx \theta$).

Figure 6.



VARIATIONS SAISONNIERES DE L'ENERGIE JOURNALIERE REÇUE A ALGER
POUR DIVERSES VALEURS DE θ

I.2.2. Etude de l'énergie collectée en fonction de l'orientation des panneaux solaires.

On étudie 3 façons de collecter l'énergie solaire à l'aide des panneaux solaires.

La première méthode consiste à les orienter perpendiculairement aux rayons solaires, à l'aide d'un système de poursuite automatique du soleil. Il faudrait, alors, tenir compte de la consommation de ce système qui est loin d'être négligeable. Une partie de l'énergie convertie doit être utilisée à son alimentation. On pourrait imaginer une commande échantillonnée des servo-mécanismes, pour réduire la consommation des moteurs. Dans ce cas, la réalisation de cette commande nécessite des montages électroniques complexes et elle augmente les risques de défaillance de la centrale électro-solaire.

Une autre idée, serait d'orienter les panneaux manuellement à chaque saison, vers une direction où l'intensité du rayonnement serait maximale. Cette façon d'utiliser les panneaux solaires est intéressante. Mais elle nécessite l'intervention d'une main d'oeuvre spécialisée à des moments précis de l'année. C'est une solution rentable, mais inadaptée pour les zones arides où ces spécialistes sont rares.

On pourrait envisager une autre solution qui consiste à orienter les panneaux, définitivement, vers une direction pour laquelle l'énergie collectée dans l'année est maximale. Pour cela il faut orienter les panneaux vers le sud et les incliner d'un angle θ voisin de celui de la latitude du lieu. Pour Alger $\theta = 36^{\circ} 37'$. L'énergie convertie quotidiennement ne s'écarte pas trop de sa moyenne annuelle. Ceci permet, dans une première approche de faire travailler la centrale électro-solaire, tout au long de l'année, sous de mêmes conditions d'ensoleillement moyen et d'utiliser des accumulateurs à capacité réduite.

I.3. Présentation des données de rayonnement.

I.3.I. Les données journalières.

Pour illustrer la notion de rayonnement global et direct, nous donnons un exemple de courbes d'ensoleillement prises le 8 et 10 Juillet 1981 au C.S.T.N par un panneau orienté perpendiculairement aux rayons solaires, à l'aide d'un système de poursuite automatique du soleil (figures. 7a et 7b).

Les valeurs des rayonnements global et direct peuvent être connues en calculant les aires des courbes d'ensoleillement. Cette opération a été effectuée au planimètre. Les résultats obtenus permettent de calculer à l'aide de la relation (I.I) de la théorie du rayonnement, la valeur moyenne journalière du rayonnement diffus. C'est ainsi qu'on trouve les résultats donnés par le tableau No I en considérant :

- 1,3 cm² correspond approximativement à 100 W h/m² (échelle).
- 1 W h = 3,6 K joules

Date	Aire en cm ² de la courbe W G H	Aire en cm ² de la courbe WD	E(moyen) en joules/cm ² / jour	E _T (moyen) en joules /cm ² /jour	E ₂ (moyen) en joules /cm ² /jour	$\frac{E_2}{E_1}$
8/7/81	56	25	1550	690	860	1,2
10/7/81	66	60	1830	1660	170	0,1

Nous remarquons que le rayonnement diffus pour la journée du 8/7/ 81 est plus important que le rayonnement direct. C'est le contraire qui se produit la journée du 10/7/81. Ceci peut s'expliquer

Figure 7a.

COURBES D'ENSOLEILLEMENT
—WGH —WD

LIEU-DES-MESURES:ALGER

DATE=8/7/1981

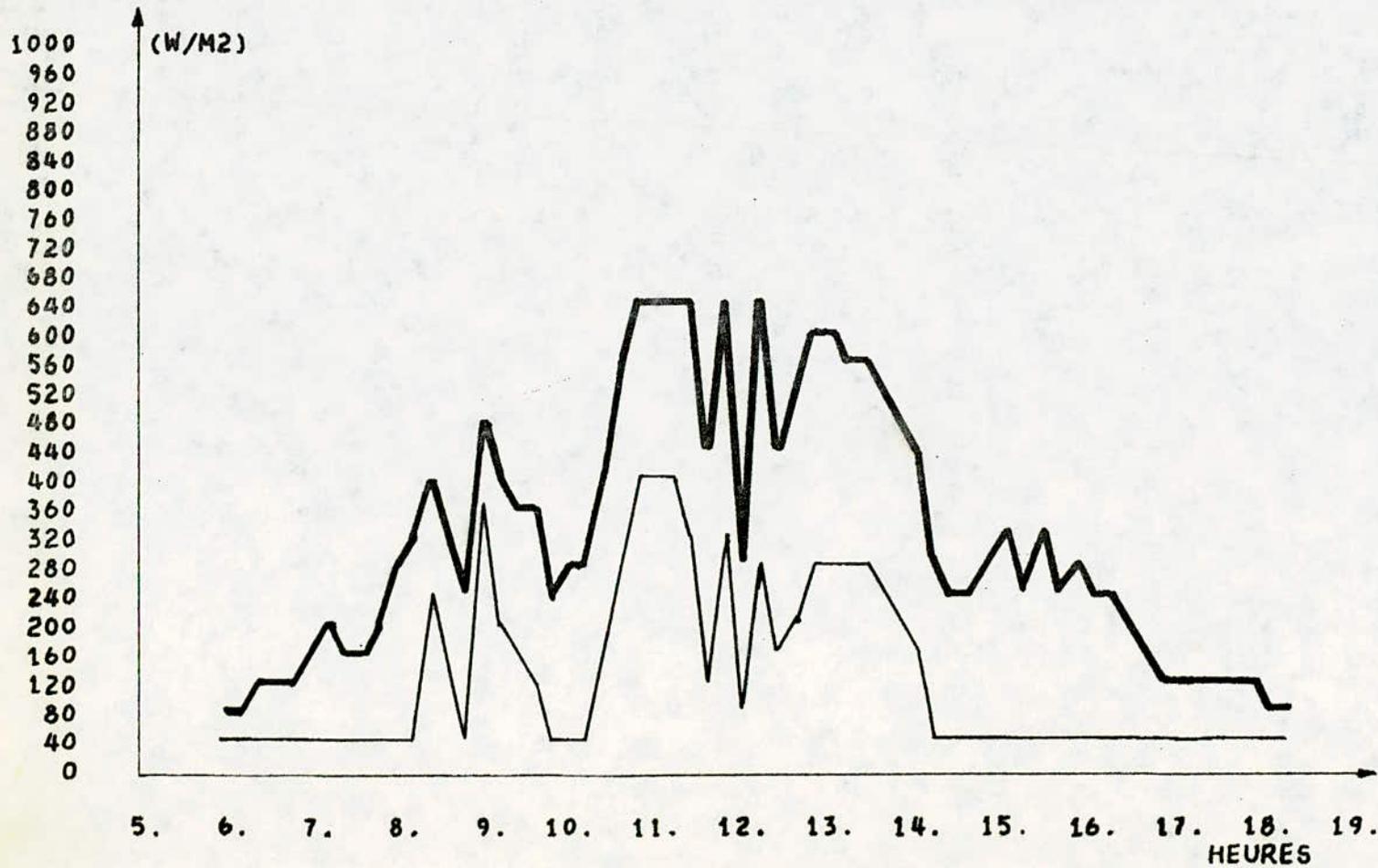
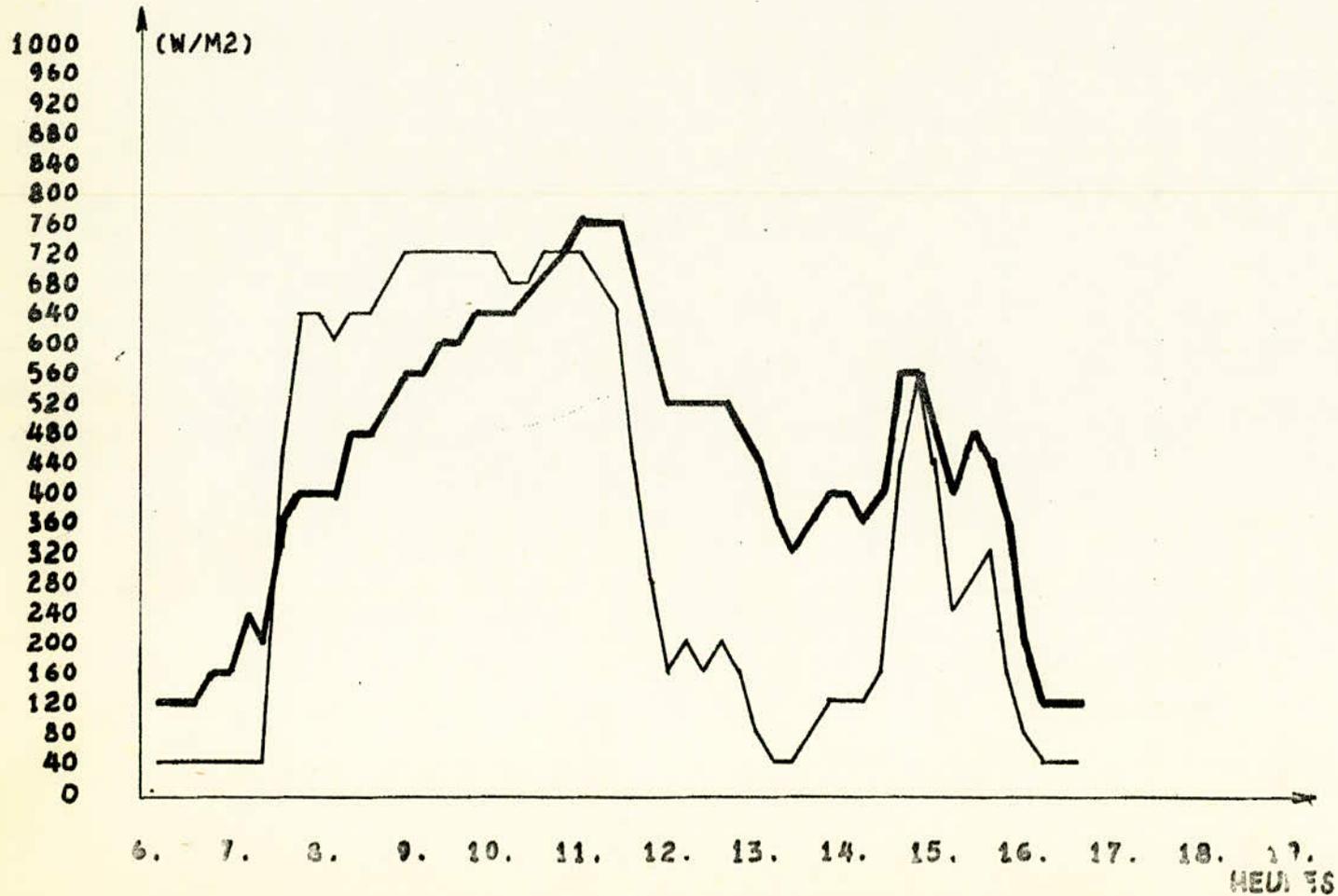


Figure 7 b

COURBES D'ENSOLEILLEMENT
—WGH —WD

LIEU-DES-MESURES: ALGER

DATE=10/7/1981



par le fait que les conditions météorologiques étaient meilleures la journée du 10/7/81 que la journée du 8/7/81.

3.2. Les données annuelles.

Nous donnons dans le tableau No 2, les valeurs du rayonnement global, en moyennes décadaires, pour l'année 1979. Nous avons traduit ces données par une courbe (figure. 8). Celle-ci présente des fluctuations. Une bonne exploitation de ces données n'est possible qu'en traçant la courbe annuelle moyenne du rayonnement global (figure. 9). Celle-ci a été relevée avec un capteur plan horizontal. Elle présente un maximum en été de l'ordre de $24000 \text{ Kj/m}^2/\text{jour}$ et un minimum en hiver de l'ordre $8000 \text{ Kj/m}^2/\text{jour}$. Nous avons tiré de ces données un éclaircissement moyen journalier de $16000 \text{ Kj/m}^2/\text{jour}$ pour cette année 1979.

I.4. Estimation de la courbe à fluctuation minimale.

I.4.1. Présentation de la méthode.

Il s'agit d'extrapoler la courbe réelle de la figure. 9 à la courbe de moindres fluctuations saisonnières.

Pour cela on doit :

- Calculer l'aire de la courbe théorique (A) correspondant à $\theta = 0$ (figure.6). Cette aire représente l'énergie moyenne collectée durant l'année.
- Calculer l'aire de la courbe théorique (B) (figure.6). Cette courbe correspond à l'angle θ optimal donnant une fluctuation minimale au cours de l'année.

A partir des données expérimentales représentant la valeur moyenne de l'énergie journalière convertie par un capteur horizontal, on déduit la valeur moyenne de l'énergie journalière convertie par un capteur incliné d'un angle $\theta \approx 1$.

rayonnement journalier moyen en Kj/m ² /jour	du 1 au 10	du 10 au 20	du 20 au 30	moyenne journalière
Janvier	5810	9940	10270	8390
Février	10280	12080	9380	10570
Mars	11950	18880	16970	15930
Avril	20480	20240	21810	20840
Mai	19750	23800	26920	23500
Juin	21370	21070	24010	23150
Juillet	24400	20890		22650
Août	22400	22870	15400	20200
Septembre	13650	14970	15380	14630
Octobre	13880	9920	9980	11260
Novembre	7940	9330	10630	9000
Décembre	7160	7530	6820	7170

Tableau No 2

Valeurs du rayonnement global prises à Bouzaréah en 1979.

Figure 8.

Courbe des moyennes décennales du rayonnement global (1979)

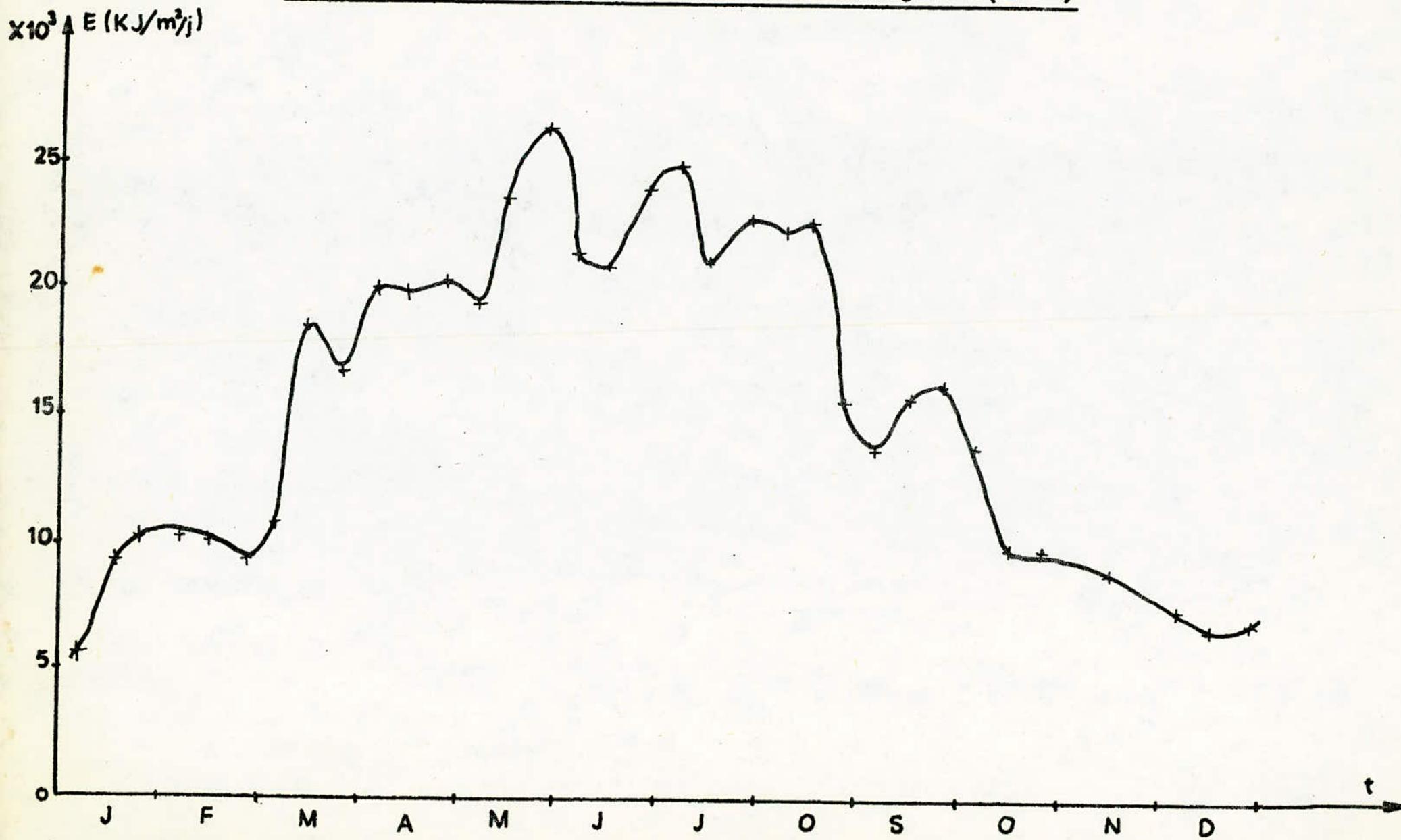
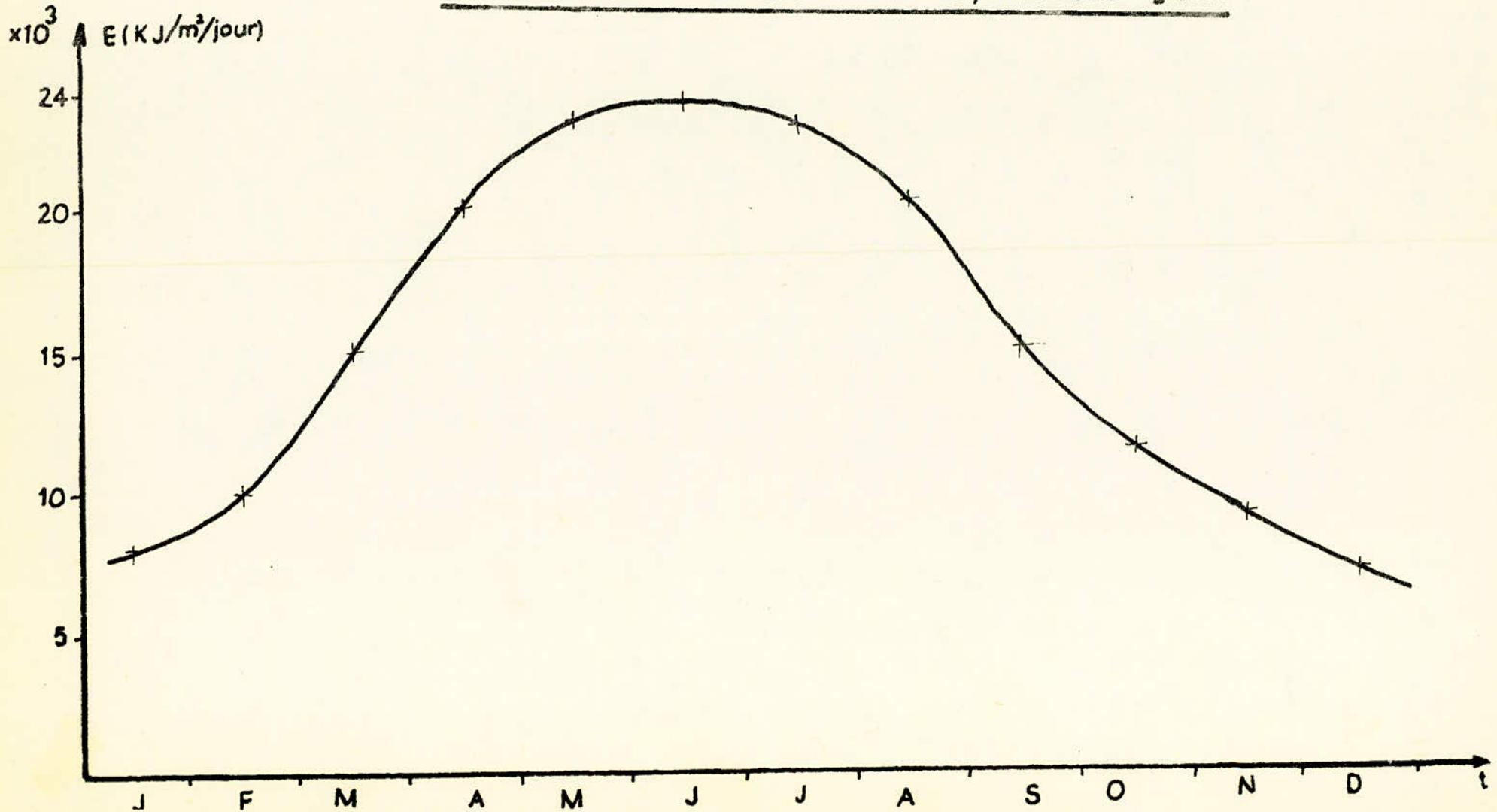


Figure 9.

Courbe moyenne annuelle du rayonnement global



4.2. Application.

L'énergie totale reçue par unité de surface est :

$$W_{\text{tot}} = \int_0^{365} E(t) dt \quad (I.6)$$

On pourra approcher la courbe théorique (A) par l'expression :

$$E(t) = E_{\text{min}} + (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \sin \frac{\pi}{365} \cdot t \quad (I.7)$$

L'énergie totale annuelle est pratiquement égale à :

$$W_{\text{tot}}^{(A)} = \int_0^{365} \left[E_{\text{min}} + (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \sin \frac{\pi}{365} \cdot t \right] dt$$

$$W_{\text{tot}}^{(A)} = 365 E_{\text{min}} - (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \frac{365}{\pi} \left[\cos \frac{\pi}{365} \cdot t \right]_0^{365}$$

$$W_{\text{tot}}^{(A)} = 365 E_{\text{min}} + 2 \cdot \frac{365}{\pi} (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \quad (I.8)$$

D'où l'énergie moyenne journalière, par an, reçue par unité de surface :

$$W_{\text{moy}}^{(A)} / \text{m}^2 / \text{jour} = \frac{W_{\text{tot}}^{(A)}}{365} = E_{\text{min}} + \frac{2}{\pi} (E_{\text{max}} - E_{\text{min}})$$

$$\text{donc } W_{\text{moy}}^{(A)} / \text{m}^2 / \text{jour} \simeq 0,63 E_{\text{max}} + 0,37 E_{\text{min}} \quad (I.9)$$

Par conséquent, pour Alger on aura :

- $E_{\text{max}} = 10,5 \text{ kWh/m}^2 / \text{jour}$
- $E_{\text{min}} = 4 \text{ kWh/m}^2 / \text{jour}$

$$W_{\text{moy}}^{(A)} / \text{m}^2 / \text{jour} = 0,63 \cdot 10,5 + 0,37 \cdot 4 \simeq 8 \text{ kWh/m}^2 / \text{jour}$$

On approchera également la courbe théorique (B) par l'expression :

$$E_{\text{moy}}^{(B)} = E'_{\text{min}} + \left(\frac{E'_{\text{max}} - E'_{\text{min}}}{2} \right) \quad (I.10)$$

Le même calcul que le précédent conduit au résultat suivant :

$$W_{\text{moy}}^{(B)} / \text{m}^2 / \text{jour} = \frac{E'_{\text{max}} + E'_{\text{min}}}{2} \quad (I.11)$$

Pour la région d'Alger, on trouve :

$$- E_{\text{max}} = 10 \text{ kWh/m}^2 / \text{jour}$$

$$- E_{\text{min}} = 9 \text{ kWh/m}^2 / \text{jour}$$

$$W_{\text{moy}}^{(B)} = \frac{10 + 9}{2} = 9,5 \text{ kWh/m}^2 / \text{jour}$$

On remarque que $W_{\text{moy}}^{(B)} > W_{\text{moy}}^{(A)}$.

Ces résultats nous permettent d'estimer ce que vaudrait l'énergie journalière, en moyenne annuelle, si les mesures avaient été faites, à Alger, avec un angle $\theta = \theta_M \approx 1$.

$$\text{soit } W_{\text{moy}}^{\theta_M} = \frac{9,5}{8} \cdot 16000 \text{ Kj/m}^2 / \text{jour} = 19000 \text{ Kj/m}^2 / \text{jour}$$

$$W_{\text{moy}}^{\theta_M} / \text{m}^2 / \text{jour} = 19000 \text{ Kj/m}^2 / \text{jour}.$$

L'énergie totale collectée dans l'année est donnée par l'aire limitée par la courbe d'ensoleillement pour laquelle $\theta \approx 1$

$$W_{\text{tot}}^{\theta_M} / \text{m}^2 / \text{jour} = 365 \cdot W_{\text{moy}}^{\theta_M} / \text{m}^2 / \text{jour} \quad (I.12)$$

1.5. Introduction à la théorie du dimensionnement.

Dans le calcul des dimensions d'une centrale électro-solaire, l'estimation du nombre optimal de panneaux solaires est

l'opération la plus importante. En effet, le prix de la centrale est pratiquement imposé par celui des photopiles.

Dans cette étude, nous avons abordé le dimensionnement de la centrale en fixant le nombre de panneaux solaires à cinq modules BPX 47A. L'énergie convertie chaque jour par des panneaux solaires de surface S et de rendement η_p est :

$$W_c(t) = \eta_p \cdot S \cdot E(t) \quad (I.13)$$

La centrale solaire doit permettre, durant une partie de la nuit, un éclairage constant. Ceci nécessite le stockage de l'énergie le jour pour la resservir la nuit. Si on utilise des batteries d'accumulateurs ne comportant pas des pertes par auto-décharge, on peut supposer que l'énergie moyenne annuelle convertie par effet photovoltaïque soit au moins égale à l'énergie consommée quotidiennement durant toute l'année [2]. Le choix de ces conditions de fonctionnement a pour but de donner à la centrale solaire une certaine autonomie en période de mauvais temps. Le rendement des accumulateurs étant η_a , on a alors :

$$W_a \leq \eta_a \cdot \eta_p \cdot S \cdot E_0 \quad (I.14)$$

I.5.1. Définition des caractéristiques du récepteur.

W_a représente l'énergie absorbée par le récepteur électrique. Le rendement des batteries utilisées est $\eta_a = 0,8$. Celui des panneaux BPX 47A est $\eta_p = 0,06$. La surface d'un panneau vaut $0,2 \text{ m}^2$. Le flux moyen d'énergie solaire, en moyenne annuelle, est de : $E_0 = 16000 \text{ Kj}$

$$\text{D'où } W_a \leq 0,8 \cdot 0,06 \cdot 0,2 \cdot 5 \cdot 16000 = 768 \text{ Kj}$$

Si on choisit une durée de fonctionnement de 6 heures, la puissance

.../...

dissipée par source d'éclairage sera :

$$P_a = \frac{768000}{6 \cdot 3600} \approx 36 \text{ Watts}$$

La tension nominale de la lampe sera imposée par la batterie d'accumulateurs utilisée.

I.5.2. Définition des caractéristiques de la batterie d'accumulateurs.

Le rôle des batteries d'accumulateurs est de :

- 1°) stocker l'énergie convertie le jour et alimenter la source d'éclairage la nuit.
- 2°) stocker l'excès d'énergie convertie ΔW^+ au printemps ou à l'automne et resservir celui-ci, quand il y a un creux d'énergie ΔW^- , l'été et l'hiver. Quand il y a compensation des variations saisonnières on a :

$$\Delta W_0^+ = -\Delta W_0^- = \Delta W_0 \quad (\text{I.15})$$

L'excès d'énergie au printemps a pour expression

$$\Delta W_0 = \eta_a \cdot \eta_p \cdot S \cdot \int_{T/8}^{3T/8} (E(t) - E_0) dt$$

où $E(t) = E_0 - E_M \cos \frac{4\pi}{T} t$ est une bonne approche de la fonction qui décrit la courbe d'ensoleillement à ondulation minimale [2]. E_0 est la valeur moyenne de cette courbe. E_M est l'amplitude de la fluctuation de l'énergie solaire durant l'année. T est la durée d'une année comptée en jours.

Après intégration on a :

$$\Delta W_0 = 58 \cdot \eta_a \cdot \eta_p \cdot S \cdot E_M \quad (\text{I.16})$$

Les accumulateurs doivent garder puis restituer au moins l'énergie

$$W_s \geq W_a + \Delta W$$

$$\text{D'où } W_s \geq \eta_a \cdot \eta_p \cdot S \cdot (E_0 + 58 E_M) \quad (\text{I.17})$$

Si la tension des accumulateurs est U_0 leur capacité s'écrit :

$$c \geq \frac{\eta_a \cdot \eta_p \cdot S}{U_0} (E_0 + 58 E_M) \quad (\text{I.18})$$

Nous disposons de batteries d'accumulateurs ayant une tension nominale $U_0 = 12 \text{ V}$.

$$\text{On aura } c \geq \frac{0,8 \cdot 0,06 \cdot 10^4}{12 \cdot 3,6} (1,6 + 0,16 \cdot 58)$$

$$c \geq 120 \text{ Ampères heures}$$

La batterie d'accumulateurs utilisée ($U_0 = 12 \text{ V}$) n'est pas forcément bien adaptée à cette manipulation (figure. 10). L'idéal serait d'utiliser une batterie d'accumulateurs de tension nominale $U_0 = 18 \text{ V}$. Celle-ci permet d'avoir le point de fonctionnement de la centrale au voisinage de la zone de puissance optimale de la caractéristique $I = f(V)$ des cinq panneaux associés en parallèle et de travailler à capacité réduite. En effet, on aura

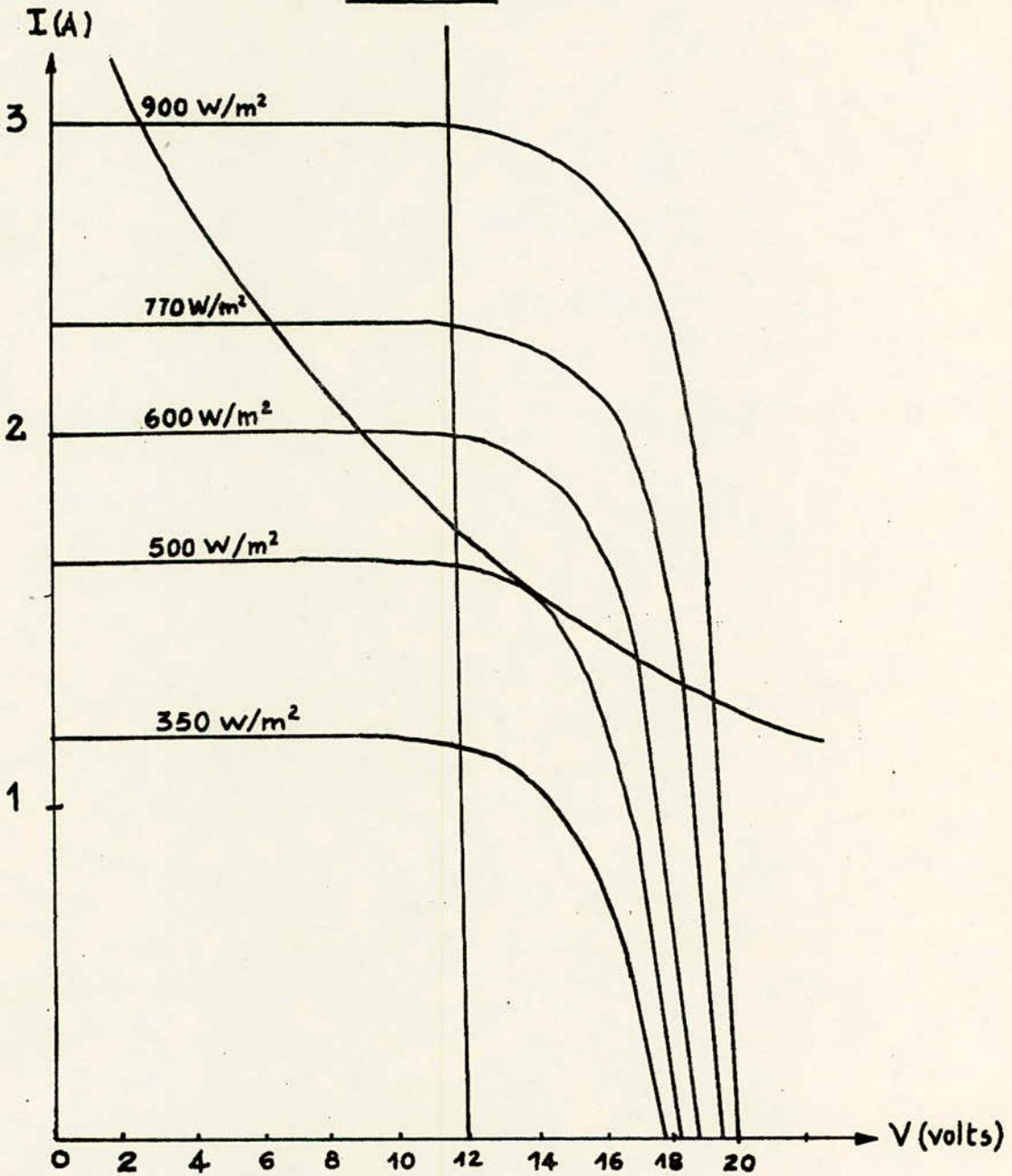
$$c \geq \frac{0,8 \cdot 0,06 \cdot 10^4 (1,6 + 0,16 \cdot 58)}{18 \cdot 3,6} \simeq 80 \text{ Ampères heures}$$

$$c \geq 80 \text{ Ampères heures}$$

Conclusion : La centrale solaire à conversion photovoltaïque que nous devons étudier doit comprendre :

- 5 panneaux solaires BPX 47A
- Une batterie d'accumulateurs (12 V, 120 Ampères heures)
- Une lampe (12 V, 36 W)

Figure 10.



Couplage direct panneaux-batterie.

CHAPITRE II

PRESENTATION ET CHOIX DES ELEMENTS

2.I. Les panneaux solaires à conversion photovoltaïque.

2.I.1. Présentation du panneau solaire BPX 47A.

Les panneaux solaires qu'on doit utiliser pour notre centrale sont des panneaux BPX 47A.

Le module BPX 47A est constitué de 34 cellules solaires au silicium, d'un diamètre de 57 mm, montées en série et disposées entre deux plaques de verre. Celle-ci sont entourées d'un joint en caoutchouc et d'une armature métallique formant ainsi un boîtier de protection pour les photopiles. Les 34 photopiles et leurs connexions sont enrobées dans la résine transparente qui, améliore ainsi leur protection contre les agents atmosphériques [3].

Les caractéristiques mécaniques du module BPX 47A sont les suivantes :

Hauteur	468 mm
Largeur	365 mm
Epaisseur	15 mm
Poids	2,4 Kg

2.I.2. Les photopiles.

a.I. Définition.

Une photopile est un générateur statique, simple et fiable. Elle transforme directement en électricité l'énergie lumineuse reçue. Elle peut être constituée soit par la jonction d'un métal et d'un semi-conducteur, soit par deux semi-conducteurs de type opposé, c'est le cas des photopiles au silicium (Si).

a.2. Principe de fonctionnement d'une photopile au silicium.

Il est basé sur l'effet photovoltaïque.

Impératifs liés à 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.

Nous allons préciser ces deux points ci-dessous .

Absorption du rayonnement solaire.

De façon générale, l'interaction de la lumière et d'un matériau fait qu'une partie de l'énergie 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 charge excités avant de revenir à leur état stable. Cette possibilité de migration va nous permettre d'utiliser les charge libres ainsi créées.

La génération des porteurs libres peut être 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 (figure. II.a). En effet, si nous fournissons 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.

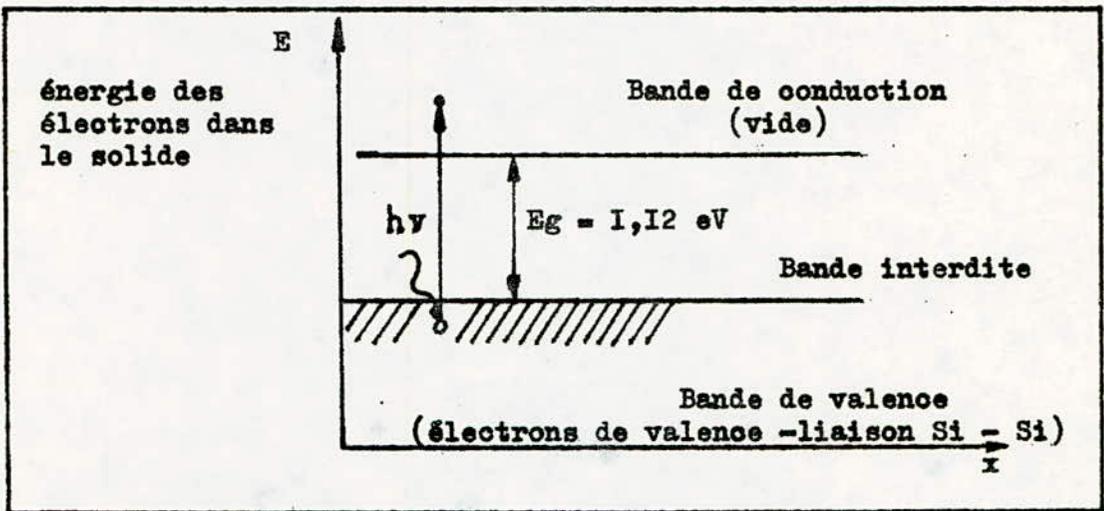


figure. II.a

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 $E = h \frac{c}{\lambda}$ où h est la constante de Plank et c la vitesse de la lumière. Cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement, les fortes énergies correspondant aux faibles longueurs d'ondes et vice-versa. Nous pouvons définir une longueur d'onde seuil λ_s déterminée par la largeur de la bande interdite du semi-conducteur considéré. En ce qui nous concerne, la longueur d'onde seuil pour le silicium est de $1,1/\mu\text{m}$, l'énergie correspondante étant de $1,12 \text{ eV}$.

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 le matériau. Le mouvement d'un trou correspond à la compensation, par un autre électron de valence, de la lacune ainsi créée.

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, mais nous ne considérerons dans ce qui suit que le cas des jonctions p.n de grande surface dont nous rappellerons brièvement le principe.

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 supérieure 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 (électrons pour type n, trous pour type p) d'un côté à l'autre sous l'influence des gradients 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 (figure. II.b).

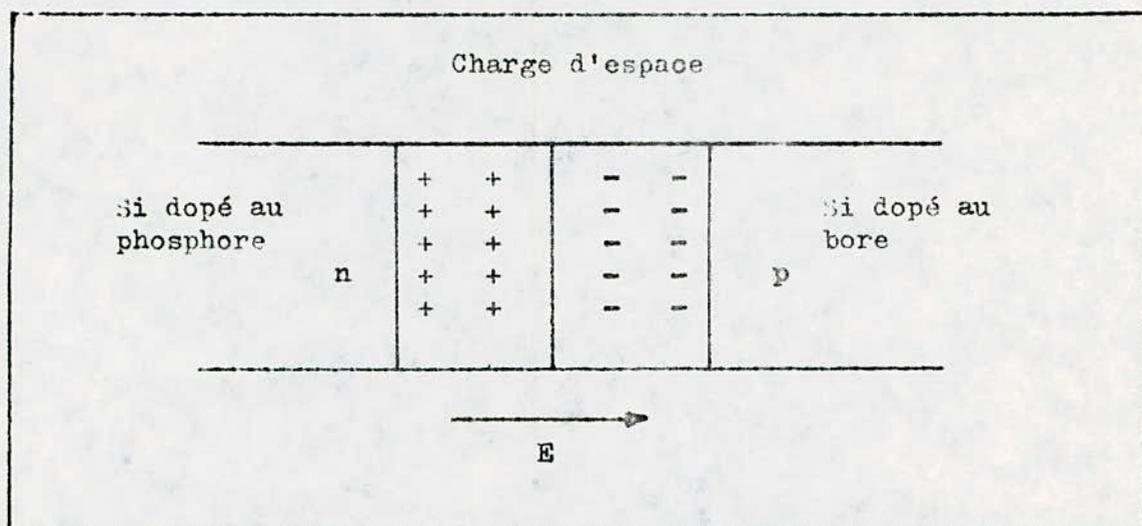


figure. II.b

C'est donc ce champ interne qui pourra dissocier les porteurs de charge, créés par absorption de la lumière dans le silicium, avant leur recombinaison, à condition qu'ils aient été créés à une distance de la zone de champ 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 accumulation de part et d'autre de la structure.

Ce phénomène a pour conséquence de polariser la jonction et de créer un nouveau champ interne E' opposé à celui de jonction qui va donc lui aussi faire diffuser des charges dans le solide mais en sens inverse. Le courant ainsi créé s'oppose à chaque instant au photocourant et il correspond au courant direct de diode I_D . I_D est donc fonction de la tension développée aux bornes de la cellule ($V = RI$) et on peut écrire le courant I fourni à la charge R :

$$I = I_{ph} - I_D(V_j) \quad (2.1)$$

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 et qui peut conduire dans le cas de semi-conducteurs à la création de paires "électron-trou" et à la séparation de ces porteurs de charge si la structure présente un champ interne (obtenu par exemple par une jonction p.n) ;
- Le fait qu'une telle jonction, lorsqu'elle est polarisée dans le sens direct, est le siège d'un courant électrique important.

Il va y avoir compétition entre ces deux phénomènes et, à chaque instant, c'est la valeur de la charge sur laquelle est fermée la cellule qui va déterminer le point de fonctionnement de l'ensemble.

a-3. Caractéristiques électriques du panneau solaire BPX 47A.

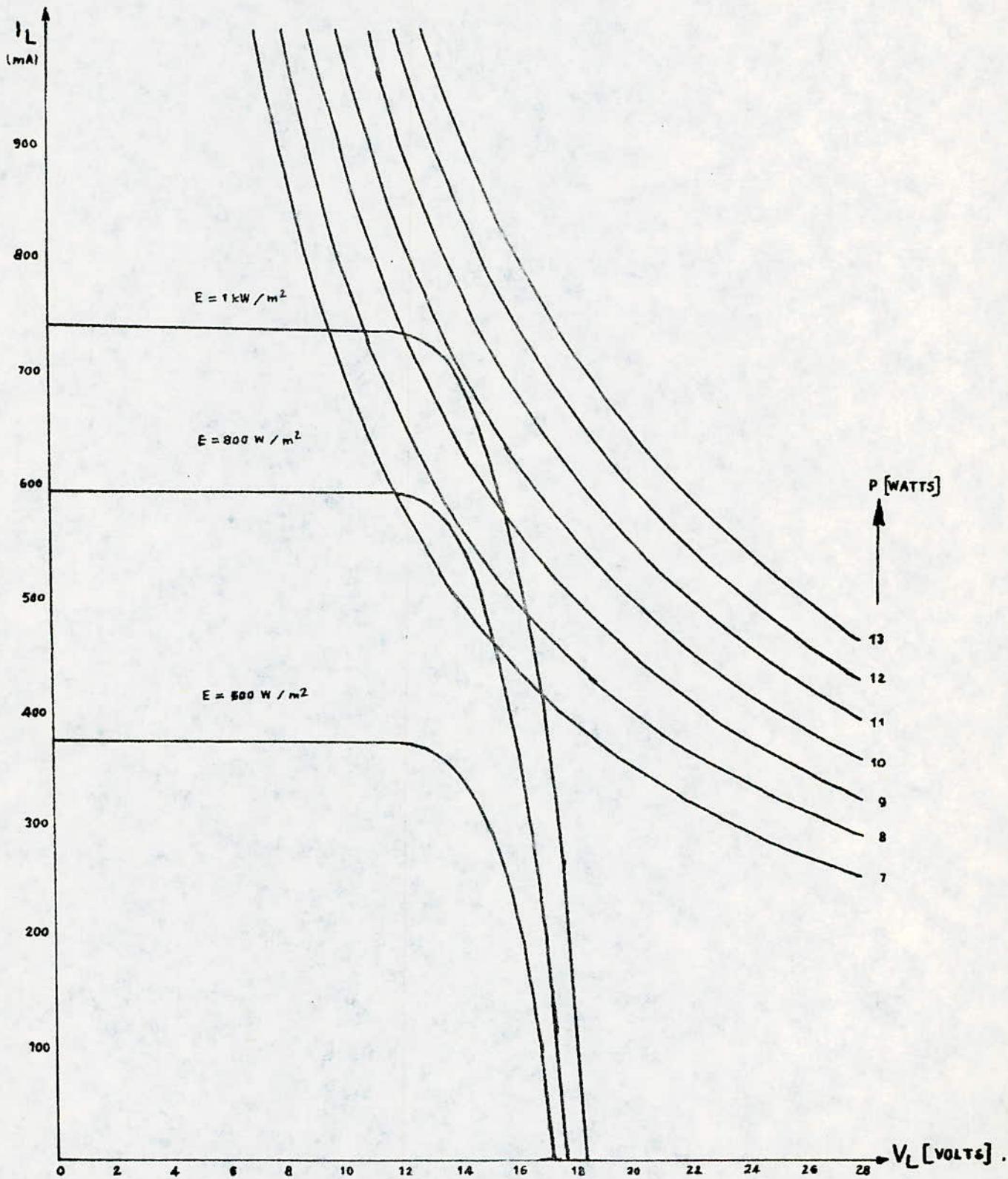
La figure. I2 indique le réseau de courbe $I = f(V)$ à différents éclairements et à températures constantes d'un module BPX 47A [3] .

Nous remarquons que la tension à vide V_0 est voisine de 18 V et le courant de court circuit I_{cc} est pratiquement proportionnel à l'éclairement .

La figure. I3 donne les courbes $I = f(V)$, pour l'éclairement $E = I \text{ kW/m}^2$ et pour différentes valeurs de la température de jonction T_j . Elle montre aussi que le rendement de conversion de la jonction décroît quand la température augmente .

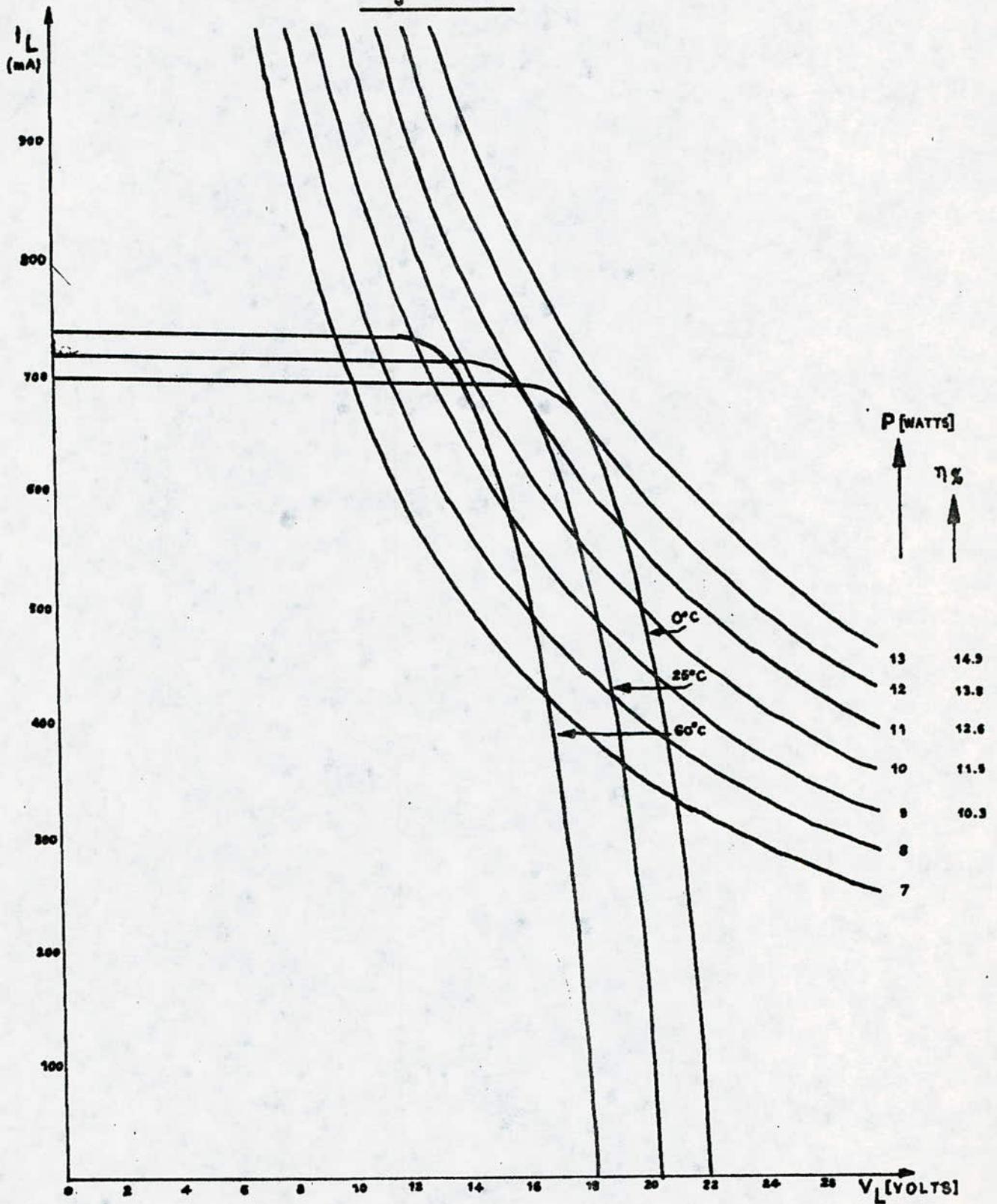
La température de jonction T_j est plus élevée que la température ambiante parce qu'il y a un échauffement par absorption de rayonnements infra-rouges à la surface des cellules qui créent un effet de serre dans le boîtier de protection .

Figure 12.



$I_L = f(V_L)$ à différents éclairagements E
pour $T_j = 60^\circ\text{C}$.

Figure 13.



$I_L = f(V_L)$ à différentes températures T_j
pour $E = 1 \text{ KW/m}^2$.

On peut tirer de ces caractéristiques les performances du BPX 47A.

En particulier pour l'éclairement $E = 1 \text{ kW/m}^2$ et pour la température $T = 25^\circ\text{C}$, on trouve que la puissance maximale délivrée par un panneau est $P = 11 \text{ Watts}$; ce qui correspond à un point de fonctionnement $V = 15,5 \text{ V}$ et $I = 700 \text{ mA}$.

Le constructeur donne une relation permettant de calculer la température de jonction à partir de la température ambiante, T_{amb} soit :

$$T_j - T_{\text{amb}} = 15^\circ\text{C}$$

2.2. La source d'éclairage.

Introduction.

Il existe plusieurs variétés de sources d'éclairage. Les plus importantes sont les lampes à incandescence et les lampes à décharge électrique dans les gaz. Dans les lampes à incandescence, l'émission de lumière est due à l'échauffement du filament sous l'action du courant. Elle émettent beaucoup plus d'infra-rouge que de lumière. Ce sont avant tout des radiateurs de chaleur. Dans les lampes à décharge, l'émission lumineuse est due, à l'excitation des atomes du gaz traversé par un flux électrique. Ce résultat est obtenu avec un dégagement de chaleur qui peut être très faible. On dit qu'il y a luminescence. Dans des conditions normales, les vapeurs métalliques ou les gaz ne sont pas conducteurs. S'ils sont soumis à certaines conditions, ils deviennent conducteurs en émettant une lumière caractéristique de leur nature.

Présentation de quelques types de sources d'éclairage.

a.I. Les lampes à incandescence à filament de tungstène.

Le passage d'un courant électrique suffisamment intense, dans un conducteur ayant un point de fusion assez élevé, le porte à l'incandescence. D'abord rouge sombre, il devient jaune, puis blanc éblouissant. On fabriqua des lampes à incandescence à filament de carbone puis des lampes à filament d'osmium ensuite on utilisa le tantale, mais c'est le tungstène qui devait s'imposer.

Les caractéristiques physiques du tungstène.

Radiance énergétique du tungstène.

De tous les corps, le tungstène est celui qui a donné lieu au plus grand nombre de mesures de rayonnement. Les différences qu'il présente avec le "corps noir" ont été minutieusement étudiées.

La figure. 14 indique la variation de la radiance énergétique A du tungstène (rayonnement émis par unité de surface) en fonction de la température. Elle est exprimée en Watts par cm^2 .

Rappelons que le rapport des radiances du tungstène et du corps noir définit le "pouvoir émissif total" pour chaque température.

A titre d'exemple, indiquons pour quelques températures la radiance du tungstène et son pouvoir émissif total :

Température	Radiance du tungstène	Pouvoir émissif total
2500°K	68 W/cm^2	0,30
3000°K	154 W/cm^2	0,33
3650°K	360 W/cm^2	0,35

La radiance augmente très rapidement. Aux environs de 2.700°K, température moyenne de fonctionnement des lampes, elle varie sensiblement comme $T^{4,5}$. Le pouvoir émissif total croît lentement.

Répartition spectrale énergétique.

La figure. 15.a indique la répartition de l'énergie entre les longueurs d'onde pour des températures croissantes, l'énergie totale rayonnée étant supposée identique.

Le rayonnement s'étend sur trois domaines de radiations : celui de l'ultra-violet, celui du visible et celui de l'infrarouge. Le domaine des radiations visibles n'occupe qu'une petite partie de l'ensemble, entre 4.000 et 7.500 Å.

Figure 14.

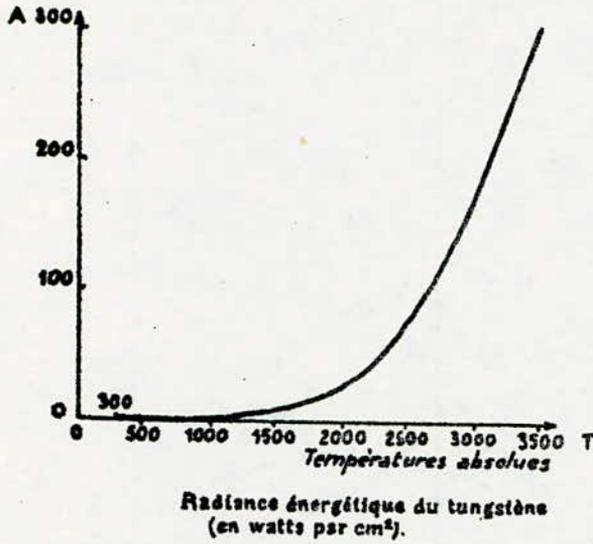


Figure 16.

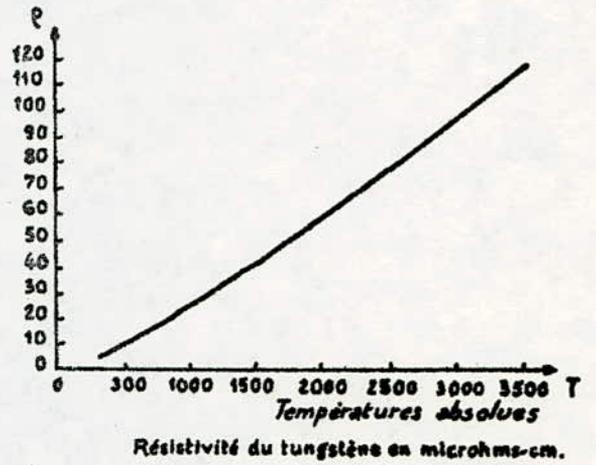


Figure 15 a.

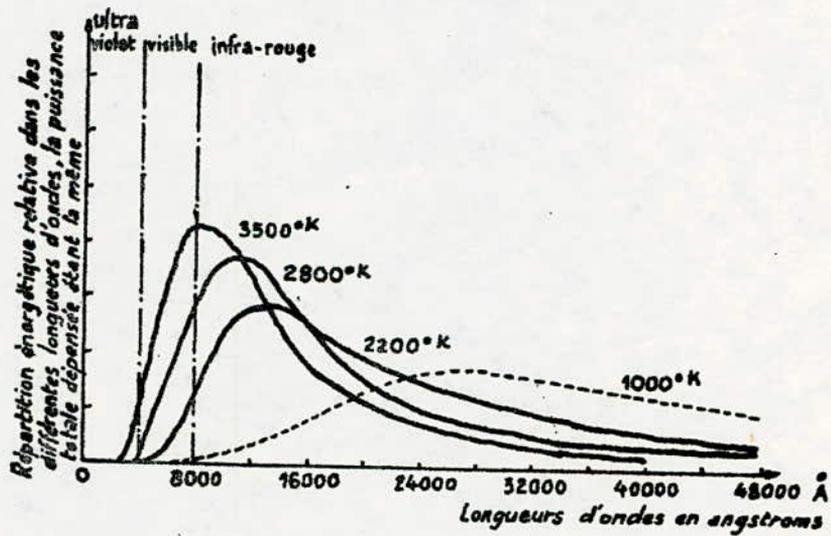
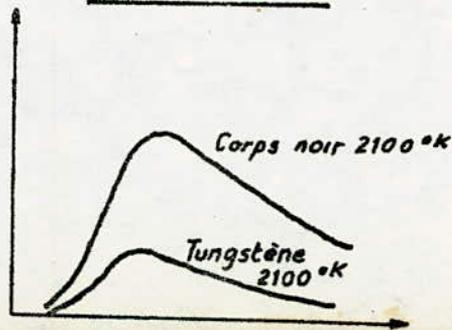


Figure 15 b.



Les courbes de répartition sont analogues à celles du corps noir. On remarque le déplacement du maximum vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température augmente. On voit par exemple que:

- A 1000°K, l'émission a lieu presque entièrement dans l'infra-rouge;
- A 3500°K, l'émission s'étend jusque dans l'ultra-violet, mais le maximum est encore dans l'infra-rouge.

Si l'on compare une de ces courbes avec celle de l'émission du corps noir pour la même température (figure. 15.b), on constate un léger décalage vers le visible, c'est-à-dire que le " pouvoir émissif monochromatique" (rapport entre l'énergie rayonnée par le tungstène et par le corps noir pour une longueur d'onde déterminée) est un peu plus grand dans le visible que dans l'infra-rouge. Ce déplacement de la courbe est favorable à l'efficacité lumineuse.

C'est ainsi qu'à 2.700°K le tungstène émet 16,6 lumens pour un Watt d'énergie totale, rayonnée, alors que pour la même température le corps noir ne fournit que 11,5 lumens par Watt.

Radiance lumineuse et couleur de la lumière (température de couleur).

Comme il ressort de la figure.15, la radiance lumineuse du tungstène (flux lumineux rayonné par centimètre carré de surface) ou sa brillance augmente beaucoup plus rapidement avec la température que la radiance énergétique. Vers 2.700°K, par exemple, la radiance lumineuse augmente avec $T^{3,2}$.

Température	Radiance lumineuse
2.000°K	66 lumens/cm ²
2.500°K	790 lumens/cm ²
3.000°K	4160 lumens/cm ²
3.650°K	19100 lumens/cm ²

L'émission visible est toujours beaucoup plus riche en radiations de grandes longueurs d'onde (rouges) qu'en radiations de courtes longueurs d'onde (violette et bleues). Il en résulte que la lumière résultante est jaunâtre. L'oeil l'accepte néanmoins comme blanche lorsqu'il manque de points de référence.

Considérons la courbe d'émission du tungstène dans le visible pour une température déterminée. On ne peut la faire coïncider avec celle du corps noir pour la même température, mais on peut l'amener en coïncidence à 21% près avec la courbe du corps noir, pour une autre température.

Les limites de l'éclairage par incandescence.

Les courbes de répartition nous font toucher le point faible de l'éclairage par incandescence du tungstène :

- L'importance de l'émission visible dépasse difficilement 10% de l'émission totale.
- Pour que le maximum de l'émission soit situé dans la partie centrale de la région visible, ce qui donnerait de la lumière blanche, il faudrait atteindre 5.200°K, température de couleur du soleil.

A 3.650°K, température de fusion du tungstène, l'efficacité lumineuse d'une lampe fonctionnant sans pertes (c'est le rapport entre la radiance lumineuse et la radiance énergétique) serait de 53 lu/W. Ce chiffre constitue un maximum inaccessible.

Pratiquement, on ne dépasse guère 3.000°K pour les lampes de durée de vie normale et, compte tenu des pertes de chaleur, l'efficacité lumineuse plafonne aux environs de 20 lu/W.

Résistivité du tungstène.

La résistivité du tungstène augmente assez rapidement avec la température comme le montre la figure. 16.

Elle croît sensiblement comme $T^{1,2}$

Rappelons que la résistance R d'un filament est telle que

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

ρ étant la résistivité du tungstène, l la longueur du fil et S sa section. En fonctionnement, la résistance, comme la résistivité, est environ quinze fois plus grande qu'à froid. Il en résulte un appel de courant à l'allumage des lampes dont il peut être nécessaire de tenir compte [4] .

a.2. Les lampes à décharge électrique dans les gaz.

Les lampes à vapeur de sodium.

Ce sont des lampes dont les tubes en verre spécial renferment du néon et du sodium. Les électrodes sont des filaments spiralés et activés. Ces lampes fonctionnent au régime d'arc. En régime stationnaire, la vapeur de sodium doit atteindre la température de 270°C. La décharge a d'abord lieu dans le néon qui donne une lueur rouge. Il faut plusieurs minutes pour que le sodium se vaporise complètement. La décharge s'établit progressivement dans le sodium, et la lumière devient alors jaune orangé [5] .

Caractéristiques des lampes à vapeur de sodium.

Elles fournissent une lumière monochromatique. Elles émettent uniquement une radiation jaune orangé dont la longueur d'onde est 5890 Å . C'est la raie de résonance du sodium. Elles possèdent une grande efficacité lumineuse, une longue durée de vie et de bonnes qualités visuelles c'est-à-dire grande vitesse de perception, amélioration de l'acuité visuelle, ...

Les lampes à vapeur de mercure.

La décharge dans la vapeur de mercure joue un rôle de plus en plus important dans la technique de l'éclairage. Suivant la pression de la vapeur de mercure, les lampes ont des propriétés très différentes.

La décharge dans le mercure à très basse pression est à la base de la lampe tubulaire fluorescente. C'est alors la radiation de 2537 Å située dans l'ultra-violet qui joue le rôle prédominant. Dans la décharge à haute pression, l'intensité relative de cette radiation est faible mais celle d'autres radiations, visibles, devient importante.

Les lampes à très faible pression restent presque froides. Par contre, la température des tubes à décharge à haute pression atteint plusieurs centaines de degrés et l'emploi du quartz comme tube de décharge devient nécessaire.

Les lampes à haute pression.

Le tube à décharge contient de l'argon et un peu de mercure. L'ampoule de verre joue un rôle de protection indispensable, étant donné la haute température et la nécessité d'arrêter les radiations ultra-violettes que le tube de quartz laisse passer.

L'argon est nécessaire pour l'amorçage de la décharge. Par la chaleur dégagée, le mercure est vaporisé en quantité croissante. La température et la pression s'élèvent. L'équilibre n'est atteint pratiquement qu'au bout de 2 à 4 minutes. L'argon ne joue alors plus de rôle dans l'émission de lumière.

Pour faciliter l'amorçage, le tube présente, en plus des électrodes principales, une électrode auxiliaire reliée à l'électrode principale opposée par l'intermédiaire d'une forte résistance en graphite, placée dans l'ampoule. L'espace entre l'électrode principale

et l'électrode auxiliaire est si faible qu'à la mise sous tension une décharge jaillit, entre elles, instantanément. Cette première décharge suffit à ioniser l'atmosphère du tube et permet l'amorçage de la lampe.

Caractéristiques des lampes à haute pression.

Elles ont une efficacité lumineuse élevée 40 à 50 lumens par Watt, soit deux à trois fois celle des lampes à incandescence.

Le spectre de mercure est essentiellement caractérisé par cinq radiations visibles dont les longueurs d'onde sont les suivantes :

- 4047 Å^o dans le violet
- 4358 Å^o dans le bleu
- 5461 Å^o dans le vert
- 5570 et 5790 Å^o dans le jaune

Il n'y a pas de radiations rouges, et la lumière de mercure a, par suite, un aspect bleu verdâtre qui la rend impropre à l'éclairage général .

Les lampes à haute pression ne peuvent se réallumer instantanément lorsqu'on vient de les éteindre car la pression **interne** influence la tension d'amorçage qui est alors trop élevée .

Les lampes tubulaires fluorescentes.

Les lampes tubulaires fluorescentes sont des lampes à décharge dans la vapeur de mercure à très basse pression. On obtient ainsi l'émission privilégiée de la radiation ultra-violette de 2537 Å^o. C'est une radiation de résonance du mercure. Cette radiation excite la fluorescence d'un mélange de poudres qui tapissent intérieurement les tubes.

Ces lampes ont des électrodes constituées par des filaments de tungstène doublement ou triplement boudinés qui retiennent entre leurs spires une matière activante. Elles fonctionnent en régime d'arc, c'est-à-dire que les électrodes sont maintenues incandescentes par le passage de la décharge. Les tubes fluorescents sont remplis d'argon à basse pression et contiennent une goutte de mercure. Ils sont calculés pour atteindre en fonctionnement une température de 45°C, la tension vapeur du mercure à cette température étant la pression optimale pour l'émission de la radiation de résonance de 2537 Å. Cela fixe la puissance d'un tube de dimensions données.

Caractéristiques des lampes tubulaires fluorescentes.

L'efficacité lumineuse des tubes fluorescents courants dépasse 60 lumens par Watt, soit quatre à cinq fois l'efficacité lumineuse des lampes à incandescence. Ceci est dû à l'émission de la radiation 2537 Å, radiation de résonance du mercure, qui a lieu avec un rendement exceptionnel.

Par fluorescence, on obtient uniquement des radiations visibles, sans ultra-violet ni infra-rouge

Choix de la source d'éclairage.

Puisque nous travaillons à basse tension, nous avons choisi pour notre manipulation une lampe à incandescence (12 V, 36 W) du type phare de voiture. L'intérêt d'utiliser une telle lampe réside dans le fait qu'elle supporte bien les variations de l'alimentation.

2.3. Les batteries d'accumulateurs.

Cette manipulation nécessite l'utilisation des accumulateurs. Ils permettent le fonctionnement en permanence du système de protection et alimentent le récepteur. Un bon choix de ces éléments est nécessaire pour leur exploitation optimale.

2.3.I. Présentation de quelques types d'accumulateurs.

a. Les accumulateurs au plomb.

a.I. Principe de fonctionnement.

Un bac en matière isolante contient de l'acide sulfurique dilué ($H_2SO_4 + H_2O$). Deux plaques de plomb (Pb) plongent dans cet électrolyte. Une couche superficielle de sulfate de plomb ($PbSO_4$) se forme à la surface de ces électrodes. La nature des deux électrodes étant la même il n'y a aucune tension entre elles.

a.2. Charge d'un élément d'accumulateur au plomb.

L'électrolyse résultant du passage d'un courant continu transforme la surface de la plaque positive en bioxyde de plomb (PbO_2) et celle de la plaque négative en plomb pur (Pb). D'autres réactions provoquent la naissance d'acide sulfurique; c'est pourquoi la densité de l'électrolyte augmente. Si l'on déclenche le courant de charge, on peut mesurer une f.e.m d'environ 2 V aux bornes des électrodes. [6]

a.3. Décharge d'un élément d'accumulateur au plomb.

Une plaque de bioxyde de plomb et une plaque de plomb plongées dans de l'acide sulfurique dilué constituent une pile. Un courant circule si l'on y raccorde une résistance; il est en sens inverse du courant de charge. Le courant de décharge produit un processus chimique tel qu'à la fin de la décharge la surface des deux électrodes est à nouveau constituée par du sulfate de plomb. En outre, il se forme de l'eau, ce qui diminue la densité de l'électrolyte.

a.4. Processus chimique dans les accumulateurs au plomb.

Les réactions qui ont lieu pendant la charge et la décharge sont résumées par l'équation chimique ci-dessous.

PbO_2	+	Pb	+	$2H_2SO_4$	Charge	$PbSO_4$	+	$PbSO_4$	+	H_2O
					←					
Bioxyde de Plomb	+	Plomb	+	Acide Sulfurique	Décharge	Sulfate de Plomb	+	Sulfate de Plomb	+	Eau
					→					
Plaque Positive		Plaque Négative		Electrolyte		Plaque Positive		Plaque Négative		Electrolyte
Chargé						Déchargé				

a.5. Caractéristiques des accumulateurs au plomb.

Les accumulateurs sont caractérisés par :

- Une force électromotrice de 2 V par élément à l'état de repos (circuit ouvert).
- Une capacité qui va de quelques à plusieurs milliers d'Am-pères heures. (Capacité = quantité totale d'électricité que l'accumulateur peut emmagasiner.)
- Une faible résistance interne.
- Un rendement énergétique (η_{Wh}) de 75 % .

$$\eta_{Wh} = \frac{\text{énergie restitué à la charge}}{\text{énergie fournie à la charge}}$$

- Un coefficient de décharge de l'ordre de 3 à 5 % si le plomb ne contient pas d'antimoine.
- Une bonne efficacité de charge (jusqu'à 95 %).
- Une bonne résistance mécanique.

Les accumulateurs au plomb sont peu coûteux, peu encombrants et prévus pour fonctionner à des températures allant de 0°C à 30°C. Ils nécessitent une maintenance régulière.

b. Les accumulateurs alcalins.

L'électrolyte des accumulateurs alcalins est une solution de potasse caustique. Il permet uniquement le passage du courant sans prendre part aux réactions chimiques. Ceci fait que sa densité reste constante.

Il existe deux types d'accumulateurs alcalins : les accumulateurs au Fer-Nickel et au Cadmium-Nickel.

b.I. Processus chimique dans les accumulateurs alcalins.

Il est schématisé dans le tableau ci-dessous.

	Fer-Nickel		Cadmium -Nickel	
Plaque Chargée	(+) hydroxyde de Nickel III $Ni(OH)_3$ (en flocons)	(-) Fer Fe (en poudre)	(+) hydroxyde de Nickel III $Ni(OH)_3$	(-) Cadmium Cd
Déchar- gée.	hydroxyde de Nickel II $Ni(OH)_2$	hydroxyde de Fer $Fe(OH)_2$	hydroxyde de Nickel II $Ni(OH)_2$	hydroxyde de Cadmium $Ca(OH)_2$

b.2. Les caractéristiques des accumulateurs alcalins.

Ces accumulateurs sont caractérisés par :

- Une f.e.m par élément plus petite que celle d'un élément d'accumulateur au plomb.
- Une résistance interne importante.
- Des pertes par auto-décharge importantes
- Une mauvaise efficacité de charge.

Les accumulateurs alcalins supportent bien les accidents et se remettent d'une décharge complète jusqu'à 0 V. Ils tolèrent une charge excessive, seulement il faudrait remplacer l'eau perdue par l'électrolyte. Ils sont peu encombrants mais très coûteux.

c. Les accumulateurs à argent.

C'est un troisième type d'accumulateurs dont les matières actives sont constituées de zinc à l'électrode négative et d'oxyde d'argent à l'électrode positive. Leurs caractéristiques sont intéressantes mais leur prix est très élevé et leur utilisation nécessite beaucoup de précautions.

2.3.2. Choix des accumulateurs.

Le choix des batteries d'accumulateurs s'effectue selon trois critères.

- Le type.
- Le nombre d'éléments.
- La capacité.

a. Le type.

Pour des raisons de moindres pertes par auto-décharge, le type d'accumulateurs adopté est celui au plomb doux.

b. Le nombre d'éléments.

Cet accumulateur doit alimenter un récepteur ayant les caractéristiques suivantes :

- Tension nominale 12 V.
- Puissance nominale 36 W.

Sachant qu'un élément d'accumulateur au plomb a une f.e.m. E de 2 V à l'état de repos, on peut déduire le nombre d'éléments (n) de la batterie en appliquant la relation suivante $n = \frac{V}{E}$ où V est la tension à l'état de repos de la batterie d'accumulateurs.

Dans notre cas
$$n = \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ V}} = 6$$

c. La capacité.

La batterie d'accumulateurs adoptée doit avoir une capacité au moins égale à 120 Ampères heures (voir Chapitre I).

2.3.3. Charge et décharge de la batterie d'accumulateurs utilisée.

a. Charge de la batterie d'accumulateurs à partir des panneaux solaires.

La charge de la batterie au plomb nécessite une source d'énergie dont la tension est supérieure à sa tension en circuit ouvert. La charge s'effectue à partir des panneaux. La batterie possède un système d'auto-régulation; ainsi le courant délivré par les panneaux décroît quand sa tension s'élève.

Pendant la charge, la f.e.m par élément croît lentement jusqu'à 2,3 V (Fig.17a). Après l'arrêt de la charge, elle baisse très vite jusqu'à 2 V.

Les indices de fin de charge sont :

- La f.e.m par élément atteint environ 2,3 V.
- La densité de l'électrolyte augmente.
- Le dégagement gazeux est abondant sur les plaques.

b. Décharge de la batterie d'accumulateurs dans le récepteur.

La f.e.m est de 2 V ou plus par élément. Elle diminue progressivement à la décharge (Fig.17b). L'élément est pratiquement déchargé lorsque sa f.e.m atteint 1,8 V; continuer la décharge serait nuisible (risque de sulfatation.).

Les indices de la fin de décharge sont :

- La diminution de la f.e.m jusqu'à 1,8 V par élément.
- La densité de l'électrolyte diminue.

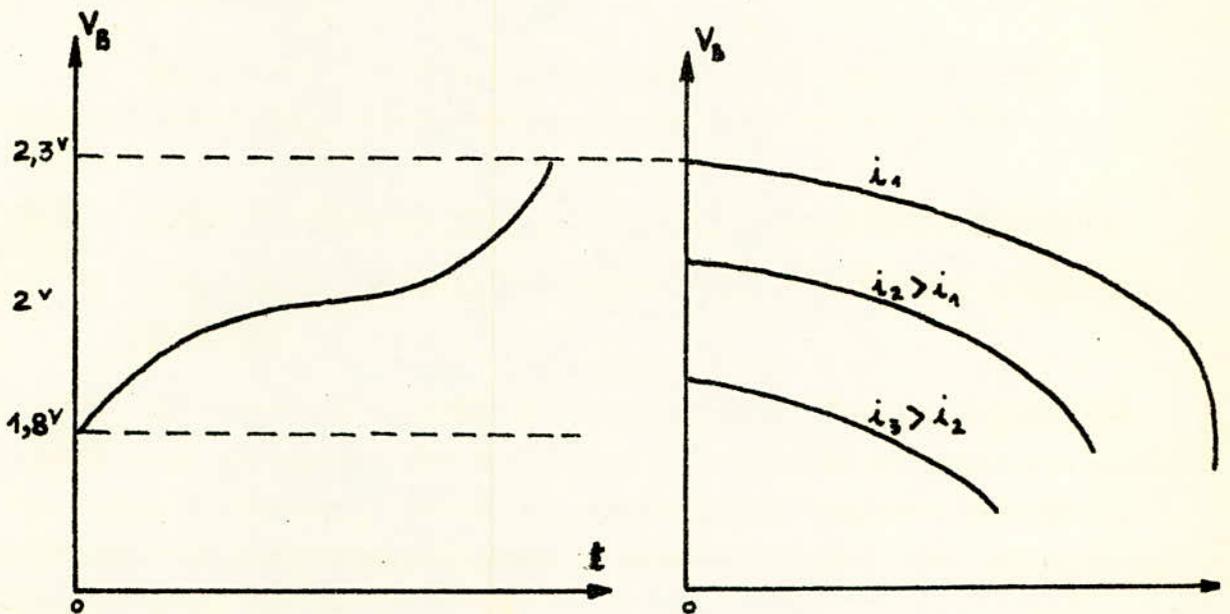


Figure 17-a Courbe de charge d'un élément de batterie au plomb.

Figure 17-b Courbe de décharge à diverses intensités.

CHAPITRE III

REALISATION EXPERIMENTALE

Pour vérifier si la taille de la centrale solaire à conversion photovoltaïque a été calculée correctement, nous avons été amené à la réaliser expérimentalement. Ensuite, nous avons procédé sur celle-ci, à une série de mesures.

3.1. Description de l'installation.

La centrale solaire comprend un générateur solaire qui est un ensemble de cinq modules BPX 47A montés en parallèle. Les panneaux sont dirigés vers le sud. La normale à leur surface se trouve dans le plan méridien et fait un angle de 39° par rapport à la verticale du lieu.

Sur le châssis des panneaux, nous avons fixé un thermomètre un fluxmètre permettant la mesure du flux solaire global et une photorésistance dont le rôle est d'apprécier la différence d'état entre le jour et la nuit. La sonde de platine a été collée sur l'arrière des panneaux.

Les panneaux ont été placés à la terrasse du C.S.T.N. Les différents appareils de mesure ont été regroupés dans une salle. Les différentes liaisons vers les panneaux se faisant par câble de grosse section. La batterie d'accumulateurs, la lampe, l'enregistreur à pointés et le système de protection et de distribution d'énergie se trouvent également dans la salle de mesure. Le système de protection et de distribution d'énergie permet d'effectuer les différentes liaisons; entre les panneaux et la batterie d'une part et la batterie et la lampe d'autre part. Le fluxmètre et la photorésistance sont reliés à la salle de mesure par des fils fins, du type téléphonique protégés dans de la gaine plastique. Pour améliorer la protection de l'installation

contre les agents atmosphériques, toutes les connexions ont été enrobées dans de la résine. Le schéma synoptique de l'installation est donné par la figure. 18.

3.2. Le système de protection et de distribution d'énergie.

3.2.1. Les fonctions assurées par ce système.

Il assure les fonctions suivantes :

- 1°) Protection de la batterie d'accumulateurs contre les surcharges. En effet, il doit arrêter la charge de la batterie qui s'effectue à partir des panneaux solaires si la tension à ses bornes dépasse 13,8 V. Ceci se réalise par la coupure de la liaison panneaux-batterie.
- 2°) Protection de la batterie contre une décharge complète. En effet ce système doit arrêter la décharge de la batterie dans la lampe si la tension à ses bornes descend au dessous de 11 V. Ceci se réalise par la coupure de la liaison batterie-lampe.
- 3°) Couplage des panneaux solaires à la batterie le jour.
- 4°) Coupure de la liaison panneaux-batterie la nuit.
- 5°) Couplage de la batterie à la lampe la nuit.

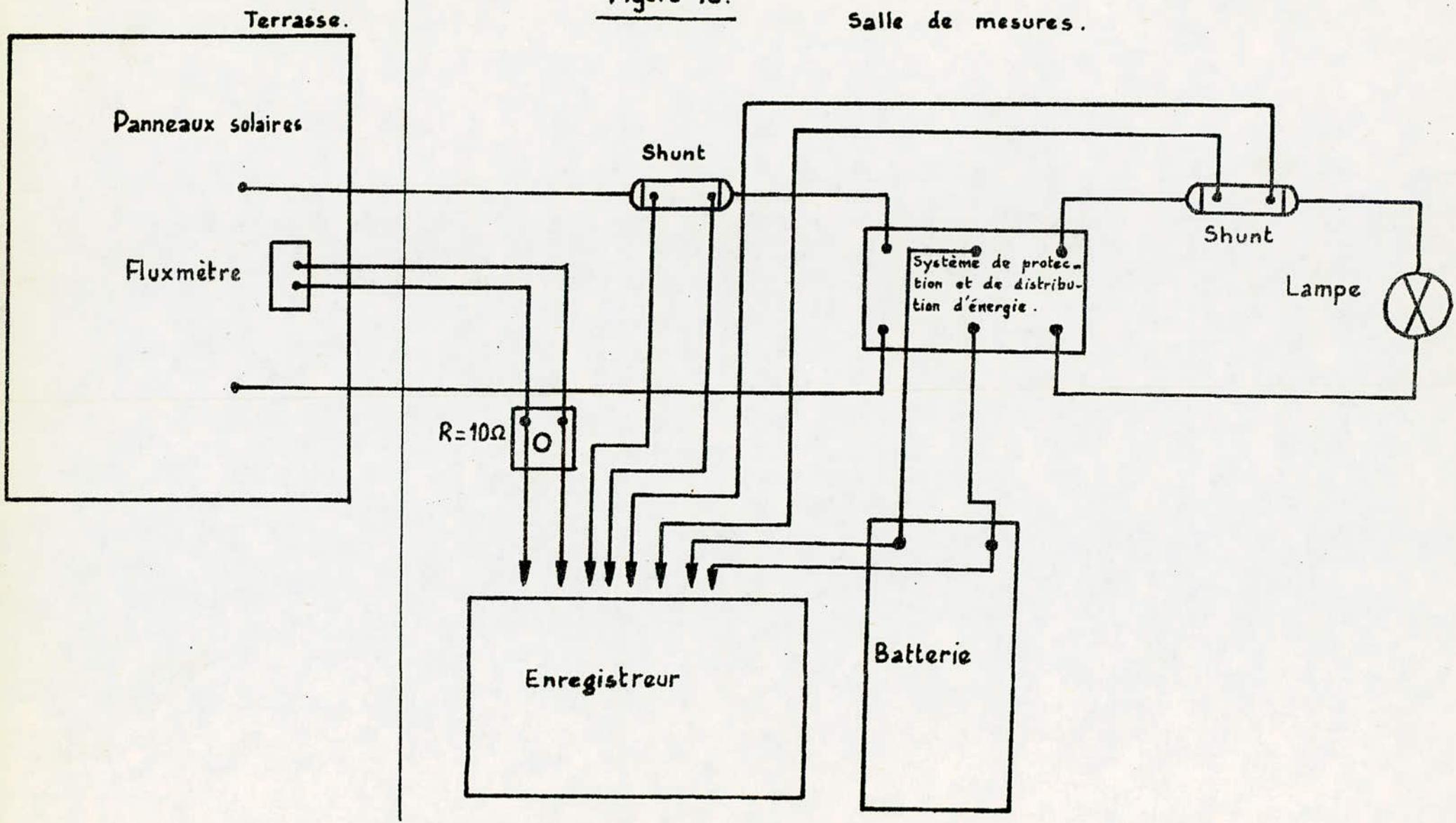
3.2.2. Schéma du montage.

Il est donné à la figure. 19

3.2.3. Principe de fonctionnement.

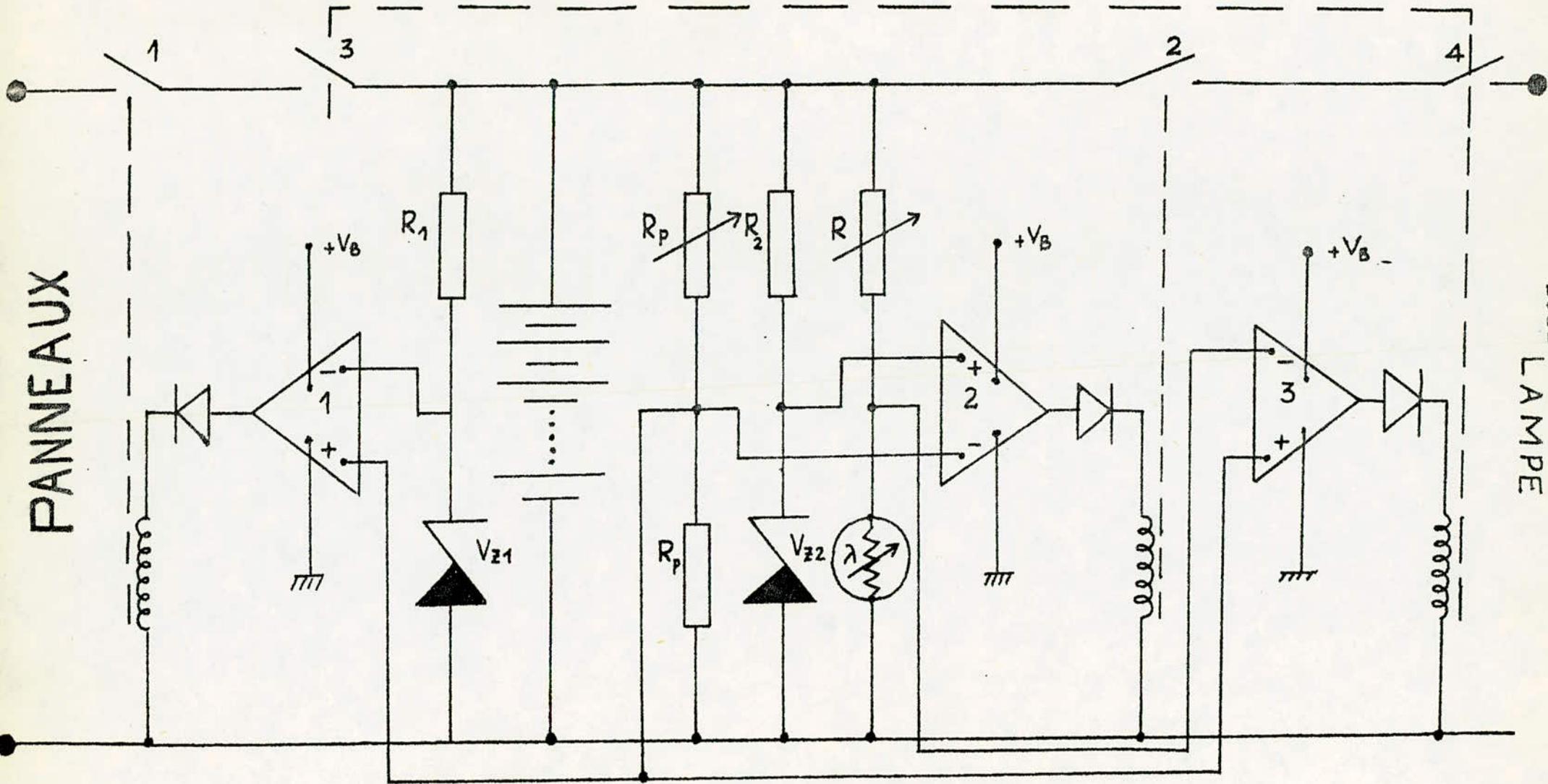
Ce montage est composé de 3 comparateurs. Chacun d'eux assure une fonction bien déterminée.

Figure 18.



Shéma synoptique de l'installation.

Figure 19.



Systeme de protection et de distribution d'énergie.

Le seuil supérieur.

La tension V_B aux bornes de la batterie est prélevée à l'aide d'un pont diviseur de tension dont les résistances sont égales. Celui-ci permet d'avoir une tension égale à $V_B/2$. Celle-ci est injectée à l'entrée (+) du premier comparateur tandis que la tension de référence 6,8 V prise sur la diode zener V_{Z1} est injectée à son entrée (-). Si la tension aux bornes de la batterie dépasse le seuil supérieur de 13,8 V; la tension de la borne positive de l'amplificateur opérationnel est au dessus de celle de la borne négative ce qui porte le $\mu A 741$ à l'état I. Le relais qui se trouve directement à sa sortie est excité. Le contact I initialement fermé s'ouvre. La liaison panneaux-batterie est coupée.

Le seuil inférieur.

La tension $V_B/2$ est injectée à l'entrée (-) du deuxième comparateur tandis que la tension, de référence 5,6 V prise sur la diode zener V_{Z2} est injectée à son entrée (+). Si la tension aux bornes de la batterie décroît au dessous de 11 V, la tension de la borne positive est au dessus de celle de la borne négative ce qui porte le $\mu A 741$ à l'état I. Le relais qui se trouve directement à sa sortie est excité. Le contact 2 initialement fermé s'ouvre. La liaison batterie-lampe est coupée.

La commutation jour-nuit.

L'élément principal de la troisième partie est une photorésistance. Celle-ci présente une faible résistance quand la lumière est vive et une résistance élevée si la lumière est faible. Le potentiomètre R permet le réglage du seuil lumineux à partir duquel la liaison panneaux-batterie doit être coupée. Ceci s'accompagne de l'établissement de la liaison batterie-lampe. Ainsi, le jour la

tension à la borne négative de l'amplificateur opérationnel 3 est elle au dessous de celle de la borne positive, ce qui porte le $\mu A 741$ à l'état 1. Le relais qui se trouve à sa sortie est excité. Le contact 3 est fermé tandis que le contact 4 est ouvert. La nuit c'est le contraire qui se produit c'est -à- dire le contact 3 s'ouvre et le contact 4 se ferme le $\mu A 741$ est alors à l'état 0.

Les relais :

Ils simulent les fonctions logiques ET dans ce cas.

table de vérité

x	y	S
0	0	0
0	1	0
1	1	1
1	0	0

On voit bien qu'une liaison n'est bien établie que si les deux contacts correspondant sont fermés. Pour que la liaison panneaux-batterie soit établie, par exemple, il faut qu'il fasse jour et que le seuil supérieur de 13,8 V ne soit pas atteint.

3.2.4. Calcul des éléments.

Nous calculons d'abord les résistances du pont . Pour cela, nous fixons le courant qui passe dans le pont à $I_p = 6 \text{ mA}$

nous aurons $2R_p = \frac{U}{I} = \frac{12 \text{ V}}{6 \text{ mA}} = 2 \text{ K}\Omega$

soit $R_p = 1 \text{ K}\Omega$

Nous calculons, maintenant, la résistance R_1 . Pour cela, nous prenons le courant circulant dans la diode zener V_{Z1} égal à 4 mA. La chute de tension que doit assurer R_1 vaut :

$$U_1 = 12 - 6,8 = 5,2 \text{ V}$$

$$\text{d'où } R_1 = \frac{5,2 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 1,3 \text{ K}\Omega$$

Nous calculons, enfin, la résistance R_2 . Pour cela nous prenons le courant circulant dans la diode zener V_{Z2} égal à 4 mA. La chute de tension que doit assurer R_2 vaut :

$$U_2 = 12 - 5,6 = 6,4 \text{ V}$$

$$\text{d'où } R_2 = \frac{6,4 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 1,6 \text{ K}\Omega$$

$$\text{soit } R_2 = 1,6 \text{ K}\Omega$$

3.2.5. Choir de la technologie.

Pour des raisons de faible consommation, nous avons choisi de travailler avec des relais ces éléments ont une résistance de contact inférieure à $0,05\Omega$.

Nous avons évité d'utiliser une diode sur la ligne panneaux-batterie. Celle-ci dissiperait une puissance maximale de $0,6 \times 3 \text{ A} = 1,8 \text{ W}$, soit près de 4% de la puissance, en valeur crête, convertie de l'ensemble des panneaux.

Il ne faut pas perdre de vue que notre centrale est de petite puissance et de telles pertes d'énergie deviennent très significatives.

CHAPITRE IV

INSTRUMENTATION ET MESURES

Les grandeurs remarquables caractérisant notre centrale électrosolaire sont :

- Le flux solaire reçu par le système photovoltaïque.
- La température des panneaux.
- Le courant débité par l'ensemble des cinq panneaux.
- Le courant circulant dans la lampe.
- La tension aux bornes de la batterie.

Un fluxmètre, une sonde de platine, un thermomètre et un enregistreur X - t 12 voies à pointés permettent d'effectuer les différentes mesures.

4.1. Les appareils de mesure.

4.1.1. L'enregistreur à pointés.

Cet enregistreur a la possibilité de traiter douze signaux sur douze voies distinctes, l'enregistrement s'effectuant sur une bande de papier par l'intermédiaire d'une tête rotative comprenant douze stylets de couleurs différentes. Un système automatique permet le balayage périodique de toutes les voies. La vitesse de pointage est sélectionnée à l'aide d'un indicateur lumineux; les possibilités s'étendent de 1 à 99 secondes variant en progression arithmétique de raison 1. Il est à noter que lors du balayage des voies, la tête n'inscrit sur le papier que les signaux correspondant aux pistes utilisées. L'unité de base de temps du déroulement du papier est aussi réglée par un indicateur lumineux. La vitesse de défilement du papier correspond aux gammes suivantes :

0,1 - 0,2, - 0,5 - 1 - 2, - 5 - 10 - 20 - 50 - 100 cm/mn ou cm/h, le choix étant effectué à l'aide d'un commutateur de position.

L'indépendance des 12 voies l'une par rapport à l'autre, nous permet de choisir pour chacune des entrées, une fonction et un calibre bien déterminé (mesure de V, I ou T de valeurs différentes d'une voie à l'autre). Les valeurs possibles de l'échelle des ordonnées correspondent aux calibres :

1 - 2 - 5 - 10 - 20 - 50 - 100 - 200 - 500 mV ou V. Le réglage du zéro de chaque piste s'effectue à l'aide d'une résistance ajustable. On peut, ainsi, choisir l'origine des grandeurs mesurées en n'importe quel point de l'ordonnée du papier d'enregistrement.

Pour nos mesures, nous avons pris une vitesse de pointage de 3 secondes et une unité de base de temps de 2 cm/h. Ce qui revient à tracer un diagramme dont la longueur est de 48 cm au bout de 24 heures.

4.I.2. Le fluxmètre.

Pour mesurer le flux d'énergie solaire, nous avons utilisé 16 photodiodes BPX 42A, travaillant en photopiles et montées en série. Le courant de court-circuit étant proportionnel à l'éclairement reçu, il suffit d'étalonner la valeur lue en Watts/m².

4.I.3. La sonde de platine.

Les mesures de température ont été faites en utilisant une sonde de platine de 100Ω et admettant un courant maximum de 3 mA.

Le schéma de principe du circuit de mesure est donné par la figure suivante .

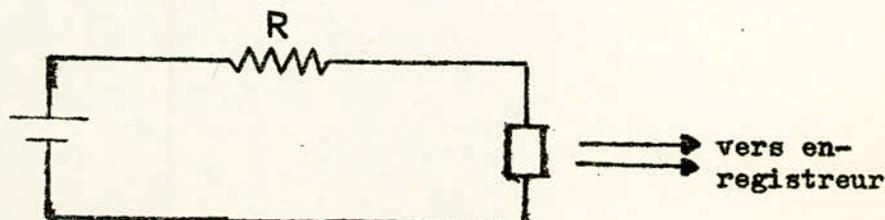


figure. 20

Les fils de mesure sont distincts des fils reliant la sonde de platine à la source de courant continu, pour éviter l'incertitude due à la chute de tension au niveau des contacts ohmiques.

4.2. Les techniques de mesure des divers paramètres.

4.2.1. Mesure du flux solaire.

Pour la mesure du flux solaire, nous utilisons un fluxmètre qui nous donne le rayonnement solaire global. Sous l'effet du rayonnement solaire une différence de potentiel apparaît à ses bornes. Celle-ci est prélevée aux bornes d'une résistance $R = 10\Omega$. Cette tension est injectée dans le canal quatre de l'enregistreur. Le calibre utilisé est 20 mV soit 1 mV/carreau.

Pour pouvoir exploiter les courbes données par l'enregistreur, il faut étalonner le fluxmètre.

Etalonnage du fluxmètre.

Cette opération a été effectuée à partir d'une cellule de référence. Celle-ci produit 131 mV dans des conditions d'éclairage standard; plein soleil (1 kW/m^2), à 25°C ; ces données ont été établies au niveau de la mer. La tension est mesurée aux bornes d'une résistance d'un Ohm placée dans une boîte en aluminium. Cette tension exprimée en mV est donc directement proportionnelle au courant de court circuit exprimé en mA. Celui-ci varie linéairement avec l'intensité de la lumière pour des niveaux normaux de lumière naturelle. On obtient les résultats suivants :

10,2 mV	.....	0,52	kW/m^2
9,6 mV	.....	0,47	kW/m^2
8,8 mV	.....	0,43	kW/m^2
7 mV	.....	0,34	kW/m^2
4,6 mV	.....	0,21	kW/m^2

Sachant que $U = IO I_{cc}$ on aura

$$I_{cc} = \frac{U \text{ mV}}{IO \Omega}$$

d'où la courbe d'étalonnage du fluxmètre donnée par la figure. 2I.

4.2.2. Mesure de la température.

Les mesures de température sont faites à l'aide de la sonde de platine et d'un thermomètre servant à son étalonnage.

4.2.3. Mesure du courant débité par les panneaux.

Nous mesurons le courant débité par les panneaux grâce à un shunt placé en série avec ces panneaux. Aux bornes de ce shunt nous prélevons une tension proportionnelle au courant le traversant. Cette tension est injectée dans le canal I de l'enregistreur. Le calibre utilisé est 100 mV. Connaissant la valeur de la résistance du shunt (0,1 V, 5 A)

$$R_{sh} = \frac{U}{I} = \frac{0,1 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 0,02 \Omega$$

nous déduisons l'échelle graduée en ampères.

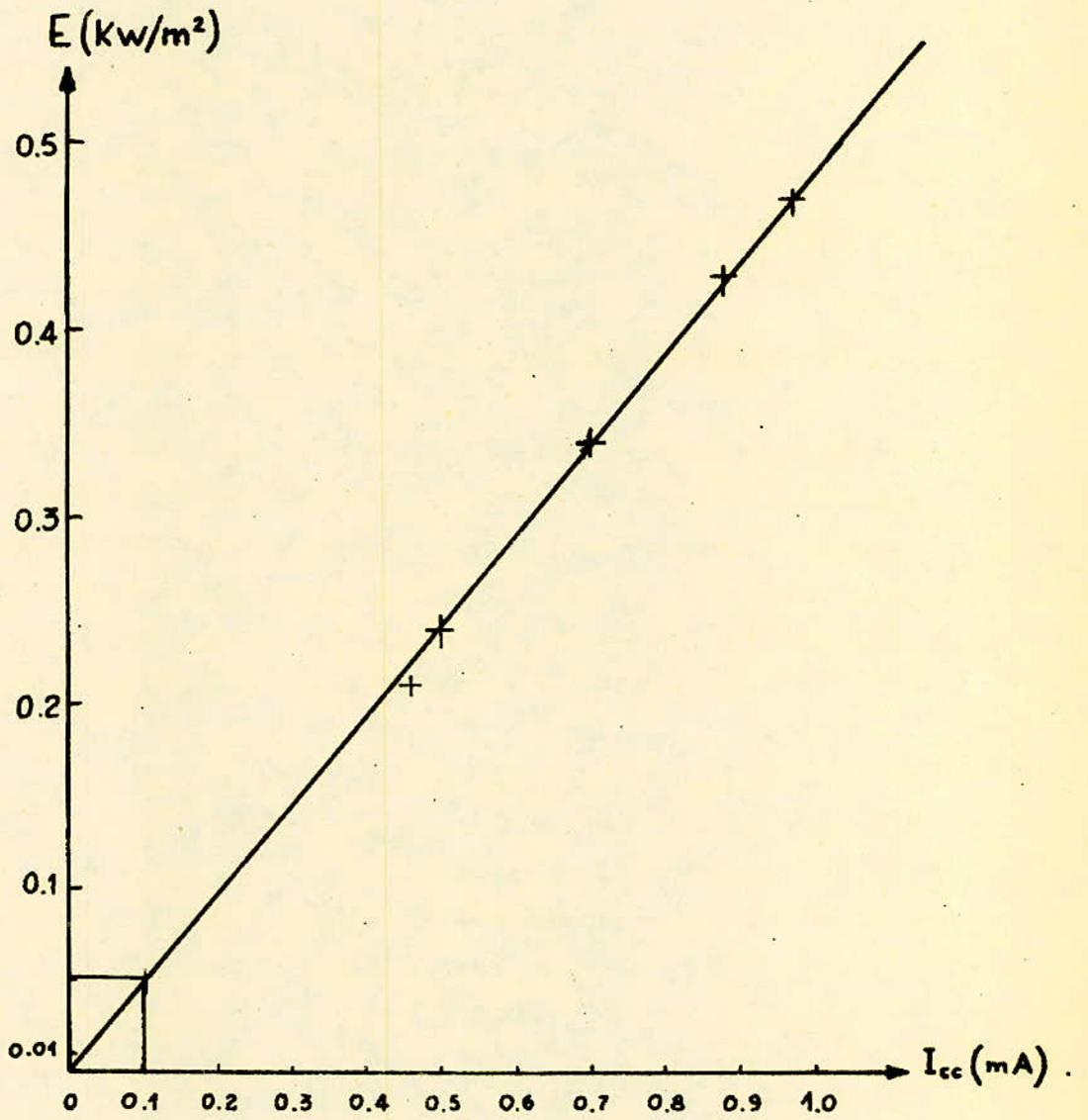
$$I = \frac{U}{R_{sh}} = \frac{100 \text{ mV}}{0,02 \Omega} = 5 \text{ A}$$

soit 1 A/4 carreaux.

Il faut remarquer que les pertes dues aux cables sont négligeables. Dans le cas contraire on aurait .

$$I' = \frac{U}{R_{sh} + R_{fil}}$$

Figure 21.



Courbe d'étalonnage du fluxmètre.

4.2.4. Mesure du courant dans la lampe.

Nous procédons de la même façon que pour la mesure du courant débité par les panneaux. Le shunt (0,1 V, 5 A) est placé en série avec la lampe. Nous utilisons le canal.3. Le calibre utilisé est 200 mV.

$$I = \frac{200 \text{ mV}}{0,02 \Omega} = 10 \text{ A}$$

soit 1 A/2 carreaux.

4.2.5. Mesure de la tension aux bornes de la batterie.

Celle-ci est directement enregistrée. Le calibre utilisé est 20 V, soit 1 V/carreau.

4.3. Mesures.

Nous avons mesuré les paramètres précédents pendant une semaine. La figure. 22 donne un exemple des enregistrements faits le 3 Janvier 1982.

Il convient de remarquer que la plupart des courbes obtenues n'ont pas la même régularité d'allure que celle des caractéristiques de la figure. 22. Ainsi par temps nuageux, les fluctuations obtenues sont très importantes et on ne peut exploiter facilement les résultats.

4.3.1. Résultats des mesures.

Calcul de W_{ϕ} .

L'énergie solaire W_{ϕ} reçue par les panneaux dans la journée du 3 Janvier 1982 est représentée par l'aire limitée par

.../...

la courbe (une). L'intégrale de cette courbe, évaluée au planimètre, donne une surface de 113 cm².

Sachant que 2,6 cm² correspondent à 50 W.h/m² d'après l'échelle adoptée, on déduit la valeur de W_{ϕ} en W.h/m², soit $W_{\phi} = 2173 \text{ W.h/m}^2$

Calcul de W_c .

Le courant débité par l'ensemble des cinq panneaux $I(t)$ dans la journée du 3 Janvier 1982 est représenté par l'aire limitée par la courbe (deux). L'intégrale de cette courbe, évaluée au planimètre, donne une surface de 140 cm².

Sachant que 10 cm² correspondent à 1 A.H d'après l'échelle adoptée, on déduit la valeur de :

$$I_{\text{tot}} = \int I(t) dt \quad \text{en A.H, soit } I_{\text{tot}} = 14 \text{ A.H}$$

Théoriquement, pour calculer l'énergie convertie par l'ensemble des cinq panneaux le 3 Janvier 1982, il faut faire le produit $V.I$, point par point des deux courbes $V(t)$ et $I(t)$, c'est-à-dire, les courbes (deux) et (quatre) de la figure. 22. Puis, il faudra évaluer l'aire limitée par la courbe $V.I(t)$.

Pratiquement, $V(t)$ est très lentement variable par rapport à $I(t)$. Donc, on peut se contenter de dire que $V(t) \sim V_{\text{moy}} = 12,3 \text{ V}$

L'énergie convertie par les panneaux solaires le 3 Janvier sera $W_c = 14 \cdot 12,3 = 172 \text{ W.h}$

Calcul du rendement de conversion η_p .

Si W_{ϕ} est l'énergie solaire reçue par le système et W_o l'énergie convertie par les panneaux solaires, le rendement de conversion η_p sera défini par la relation :

$$\eta_p = \frac{W_o}{W_{\phi}}$$

Dans notre cas $\eta_p = \frac{172}{2173} = 0,079$

Calcul de l'énergie consommée par le récepteur.

Pour calculer l'énergie W_a absorbée par le récepteur, il faut faire le produit des courbes $V(t)$ et $I(t)$, c'est-à-dire, les courbes (quatre) en régime de décharge et (cinq) de la figure. 22. Ensuite, il faudra évaluer l'aire limitée par la courbe $V.I(t)$. Celle-ci représente W_a qui vaut dans ce cas 135 W.h.

Calcul du rendement de la batterie d'accumulateurs.

Si W_a est l'énergie consommée par la lampe et W_o l'énergie convertie par les panneaux solaires, on définit le rendement η_a de la batterie par la relation suivante :

$$\eta_a = \frac{W_a}{W_o}$$

Par conséquent dans notre cas :

$$\eta_a = \frac{135}{172} = 0,78$$

Calcul du rendement global de l'installation.

Il est défini par la relation suivante :

$$\eta_a \cdot \eta_p \approx \frac{W_a}{W_\phi}$$

Dans notre cas, on a :

$$\eta_a \cdot \eta_p = \frac{135}{2173} = 0,06$$

Conclusion.

Le tableau suivant permet de comparer les valeurs théoriques aux valeurs expérimentales.

	valeurs théoriques	valeurs expérimentales
η_a	0,8	0,78
η_p	0,06	0,07
$\eta_a \cdot \eta_p$	0,04	0,06

nous remarquerons que les valeurs expérimentales et théoriques ont le même ordre de grandeur.

CONCLUSION

Ainsi, nous avons examiné au cours de cette étude les problèmes posés par le dimensionnement d'une centrale solaire à conversion photovoltaïque et par sa réalisation expérimentale.

Pour vérifier si la taille de la centrale solaire a été calculée correctement, il faudrait procéder à des mesures, au moins, toute une année. Ceci permet de tester si la centrale possède une certaine autonomie en hiver et aux périodes de mauvais temps.

Nous avons pensé faire travailler cette centrale dans des conditions d'adaptation de ses éléments. L'utilisation d'un adaptateur n'est pas bénéfique dans le cas des centrales de petite puissance. En effet, les pertes dans l'adaptateur sont de l'ordre de 20% de la puissance convertie par les panneaux solaires soit 10 W, en valeur de crête, dans le cas où la centrale délivre 50 W crête, ce qui représente des pertes énormes pour une telle structure.

Si l'on choisit de travailler avec un adaptateur, dans le cas où la centrale est de forte puissance, l'utilisation du transistor présente de multiples avantages par rapport au thyristor, essentiellement en raison de la simplicité de sa commande et de sa faible chute de tension directe. En outre, on a intérêt à travailler à forte tension et à courant réduit pour minimiser les pertes de puissance dans les conducteurs de liaisons.

Cependant, bien que la technologie des transistors de puissance soit en constante évolution, ils restent tout de même limités surtout par la tension maximum admissible qui est de l'ordre d'une centaine de volts et ne pourront être employés dans tous les cas.

Le thyristor permet de travailler sous fortes tensions et fort courant, avec un circuit de déclenchement simple. En effet, sa tension inverse de pointe peut atteindre 1200 V et il peut supporter un courant de 40 A. Il nécessitera un circuit d'extinction (nous travaillons sous tension continue).

Si on veut utiliser un adaptateur à découpage, la fréquence de travail d'un thyristor est limitée à quelques centaines de Hz alors que celle d'un transistor peut être poussée jusqu'à quelques dizaines de kHz.

BIBLIOGRAPHIE

1. F. DESVIGNES
Conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique
Acta Electronica - Volume 5 No 3.

2. A. ADANE
Dimensionnement d'une centrale solaire à conversion photovoltaïque.

3. R.T.C.
Notice du constructeur BPX 47A (1975).

4. M. LA TOISON
Les lampes à incandescence Eyrolles.

5. M. LA TOISON.
Manuel d'éclairage PHILIPS - Radio.

6. M. JEANRENAUD
Electrotechnique - Lois générales et machines DUNOD (1973).

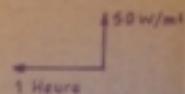
FIGURE 22.

MESURE DES PARAMETRES CARACTERISANT LA CENTRALE.

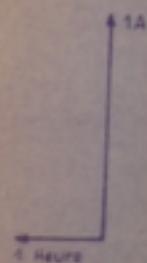
Enregistrement effectué le 05 janvier 1982.

ECHELLES

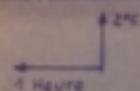
1. Flux solaire.



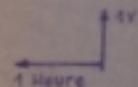
2. Courant débité par les panneaux.



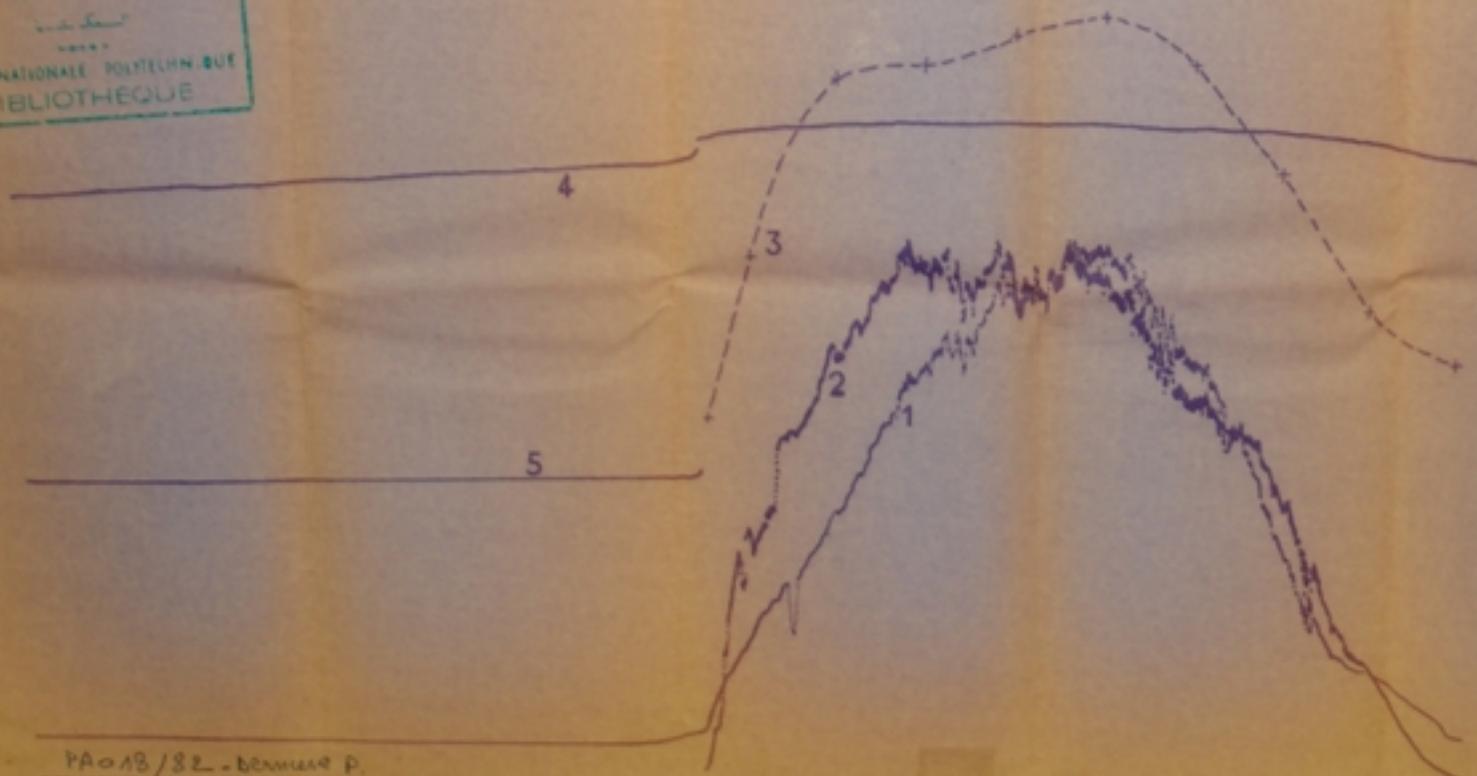
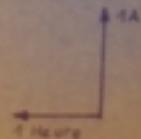
3. Température des panneaux.



4. Tension aux bornes de la batterie.



5. Courant dans la lampe.



LIBRAIRIE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE