

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
«O»

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
«O»

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE
«O»

PROJET DE FIN D'ETUDES
«O»

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

THEME

Etude et experimentation d'un
prototype d'éclairage
photovoltaïque

Proposé par :

S. A. DARADJI

Etudié par :

HALIS Abderrahmane

SALEM Aïssa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
«O»

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
«O»

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
«O»

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE
«O»

PROJET DE FIN D'ETUDES
«O»

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

THEME

*Etude et experimentation d'un
prototype d'eclairage
photovoltaïque*

Proposé par :

S. A. DARADJI

Etudié par :

HALIS Abderrahmane

SALEM Aissa

Promotion Janvier 1985



DEDICACES

A ma mère
A mon père
A mes frères et sœurs
A toute ma famille
A tous mes amis



SALEM AISSA

A mon père
A ma mère
A mes frères et sœurs
A toute ma famille
A la mémoire de mon ami Abid Nour-Eddine
A tous mes amis

HALIS ABDERRAHMANE

REMERCIEMENT

Nous exprimons notre gratitude à Monsieur S.A. DARADJI, notre promoteur, de nous avoir suivi et corrigé dans notre travail.

Nos sincères remerciements à Monsieur BELHAMEL Directeur de la station de l'énergie solaire de Bouzaréah, de nous avoir autorisé à travailler à la station, et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens pour assurer notre travail, ainsi qu'à l'ensemble du personnel de cette station.

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

Resumé

Dans ce projet nous présentons une étude détaillée d'un prototype d'éclairage photovoltaïque.

Notre travail, consiste à vérifier expérimentalement les résultats donnés par la théorie du dimensionnement des centrales solaires pour l'éclairage .

Summary

In this project, we present a detailed study of prototype lighting photovoltaic.

Our work, consist to check experimentaly the results given by the dimensionnement's theory of solar centrals for lighting.

ملخص

نقدم في هذا المشروع دراسة مفصلة لنموذج للإضاءة بواسطة
الطرق الشمسية
يتلخص عملنا في التحقق تجريبيا من النتائج المعطاة نظريا
في تجهيز المعطيات الشمسية للإضاءة

Noms et Prénom : HALIS ABDERRAHMANE
SALEM AÏSSA
PROMOTEUR : SA DARADJI

TABLE DES MATIERES

	PAGE N°
Introduction	1
CHAPITRE I - DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION	
1.1 - Nécessité d'une approche système pour le calcul des générateurs photovoltaïques	3
1.2 - Etude du rayonnement solaire	
1.2.1 - Introduction	5
1.2.2 - Evaluation du rayonnement	5
1.3 - Méthode de calcul du nombre optimal de panneaux	19
1.4 - Dimensionnement	
1.4.1 - Calcul du nombre de panneaux	21
1.4.2 - Calcul de la capacité des batteries	22
CHAPITRE II - DESCRIPTION DES ELEMENTS	
2.1 - Les panneaux solaires à conversion photovoltaïques	23
2.2 - Les batteries d'accumulateurs	
2.2.1 - Constitution d'un accumulateur	34
2.2.2 - Caractéristiques des accumulateurs	35
2.2.3 - Présentation de quelques types d'accumulateurs	36
2.2.4 - Choix du type d'accumulateur	41
2.2.5 - Charge et décharge des accumulateurs au plomb	41
2.3 - Sources lumineuses	
2.3.1 - Lampes à incandescence	44
2.3.2 - Lampes à décharge	46
2.3.3 - Lampes fluorescentes	48
CHAPITRE III - ETUDE EXPERIMENTALE	
3.1 - Description de l'appareil	50
3.2 - Régulateur de charge	
3.2.1 - Les fonctions assurées par ce système	51

3.2.2 - Schéma de montage	52
3.2.3 - Principe de fonctionnement	52
3.3 - Instrumentation et mesures	
3.3.1 - Les appareils de mesure	56
3.3.2 - Les techniques de mesure des divers paramètres..	59
3.3.3 - Mesures	62
Conclusion	66
Annexe	67

INTRODUCTION

Les besoins mondiaux en énergie augmentent de jour en jour, alors que les énergies fossiles ne pourront peut être plus répondre à la demande dans un proche avenir.

Le soleil qui représente pour la terre la principale source d'énergie est inépuisable. Donc la conversion directe de l'énergie solaire en électricité est mieux adaptée aux diverses applications terrestres.

On a ainsi pensé à la conversion par effet photovoltaïque, en utilisant des panneaux solaires qui ne consomment aucun carburant et ne produisent ni bruit, ni déchet.

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

Ce travail a pour but d'étudier expérimentalement le dimensionnement d'une installation solaire à conversion photovoltaïque, de petite puissance, dans le cas d'une application à l'éclairage public.

L'intérêt de faire une telle étude est de résoudre des problèmes d'éclairage 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

DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION

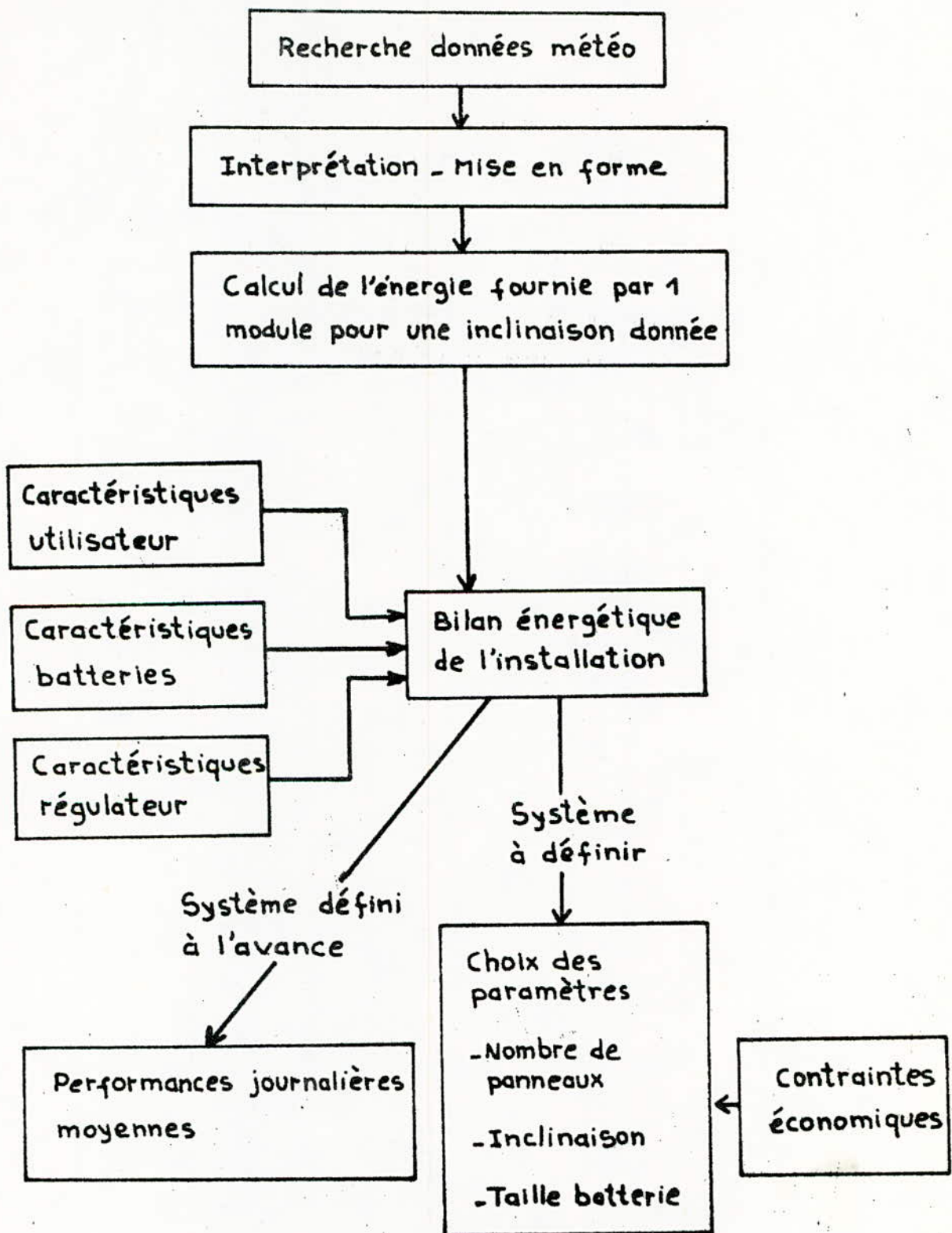
1.1 - Nécessité d'une approche « système » pour le calcul des générateurs photovoltaïques

La production d'énergie en toute sécurité, au coût minimum, par un générateur photovoltaïque suppose une optimisation complexe prenant en compte l'ensemble des mailles de la chaîne énergétique avec leurs coûts respectifs et l'ensemble des paramètres extérieurs :

niveau de l'ensoleillement et répartition dans le temps, températures extérieures, caractéristiques de la demande électrique, etc.

Une « approche système » nous paraît indispensable pour les générateurs d'une certaine importance ; en l'absence de cette approche, on peut être conduit soit à des surdimensionnements coûteux, soit à des ruptures d'approvisionnement en électricité.

Exemple de définition d'un système photovoltaïque



1.2 - Etude du rayonnement solaire

1.2.1 - Introduction

L'optimisation d'une installation solaire nécessite l'étude du gisement solaire et la situation géographique.

La somme des radiations solaires arrivant à la surface du sol varie en fonction du jour et de l'année.

Les variations journalières sont causées par la rotation de la terre, et les variations annuelles par la déclinaison du soleil, et dans une moindre mesure par la distance terre-soleil.

Elles dépendent aussi de la latitude géographique de la localité, des conditions atmosphériques (climat) et des conditions physiques (état et dimensions des capteurs).

1.2.2 - Evaluation du rayonnement

L'évaluation du rayonnement solaire pour un lieu donné, nécessite des mesures du flux solaire prises en ce lieu sur une longue période (de l'ordre d'une décennie).

Pour notre calcul, nous ne disposons que des relevés pris au cours des années 1979, 1980 et 1981 par l'observatoire de BOUZAREAH.

1 - Energie solaire reçue

L'énergie reçue au niveau du sol peut être considérée comme :

- * E_1 : transmise directement.
- * E_2 : diffusée par l'atmosphère et éventuellement par les objets environnant la surface réceptive.

a - Influence des conditions géographiques

Par beau temps, l'éclairement dépend du lieu et du jour pour les raisons suivantes :

- l'angle d'incidence U varie avec l'angle horaire H et la position du capteur (voir fig 1.1)
- l'épaisseur de la couche atmosphérique dépend de l'angle d'incidence (effet sensible durant le lever et coucher du soleil)
- la composition de l'atmosphère varie avec les saisons.

b - Energie reçue par une surface plane

On définit :

E_0 : éclairement reçu par une surface \perp aux rayons solaires.

ZOX : plan méridien.

XOY : plan équatorial.

Les paramètres n , L , δ , H et θ sont définis sur la (fig 1.1).

L'éclairement E est alors donné par :

$$E = E_0 \cos U$$

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

Donc :

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

C. Orientation optimale du capteur

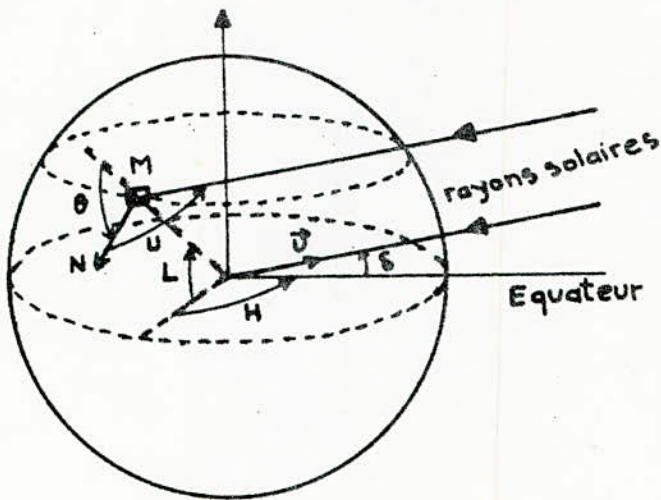
On étudie 3 façons de collecter l'énergie solaire à l'aide des panneaux solaires.

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 l'installation 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'œuvre 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 notre installation solaire, tout au long de l'année, sous de mêmes conditions d'ensoleillement moyen et d'utiliser des accumulateurs à capacité réduite.



- $\vec{n} = MN$: normale au plan du récepteur
- θ : angle d'orientation du capteur
- δ : déclinaison
- L : latitude du lieu
- H : angle horaire

Représentation de la position d'un capteur en fonction des paramètres L , δ , H et θ .

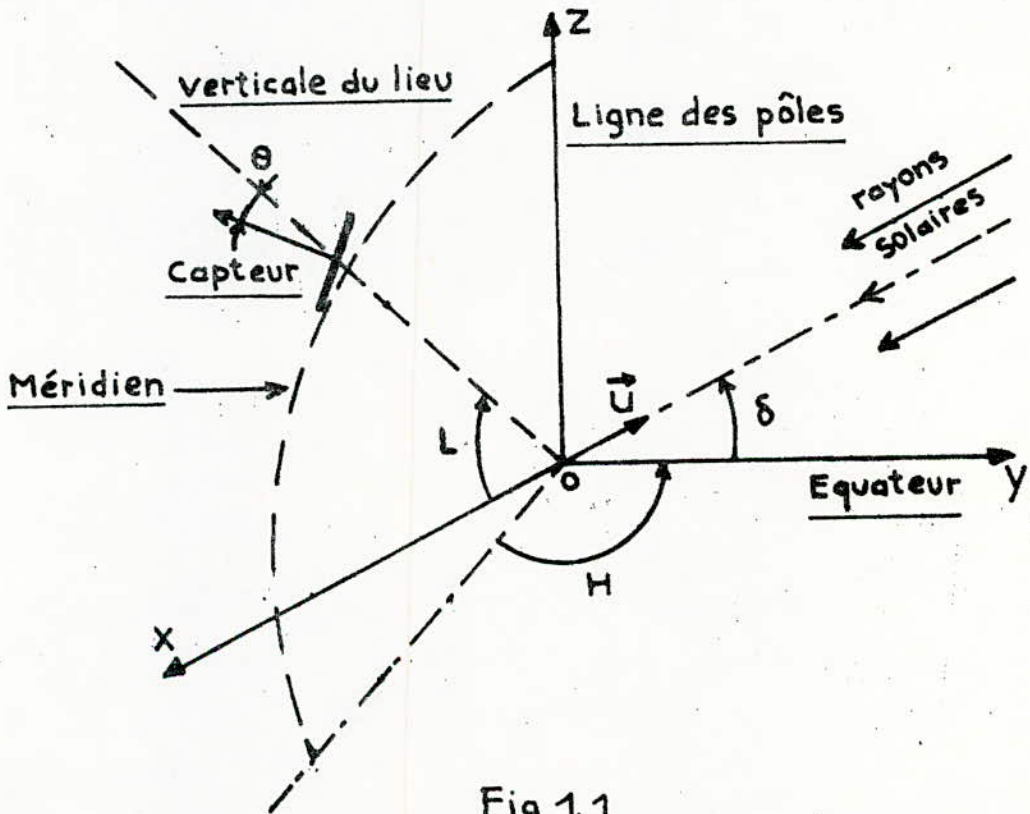


Fig 1.1

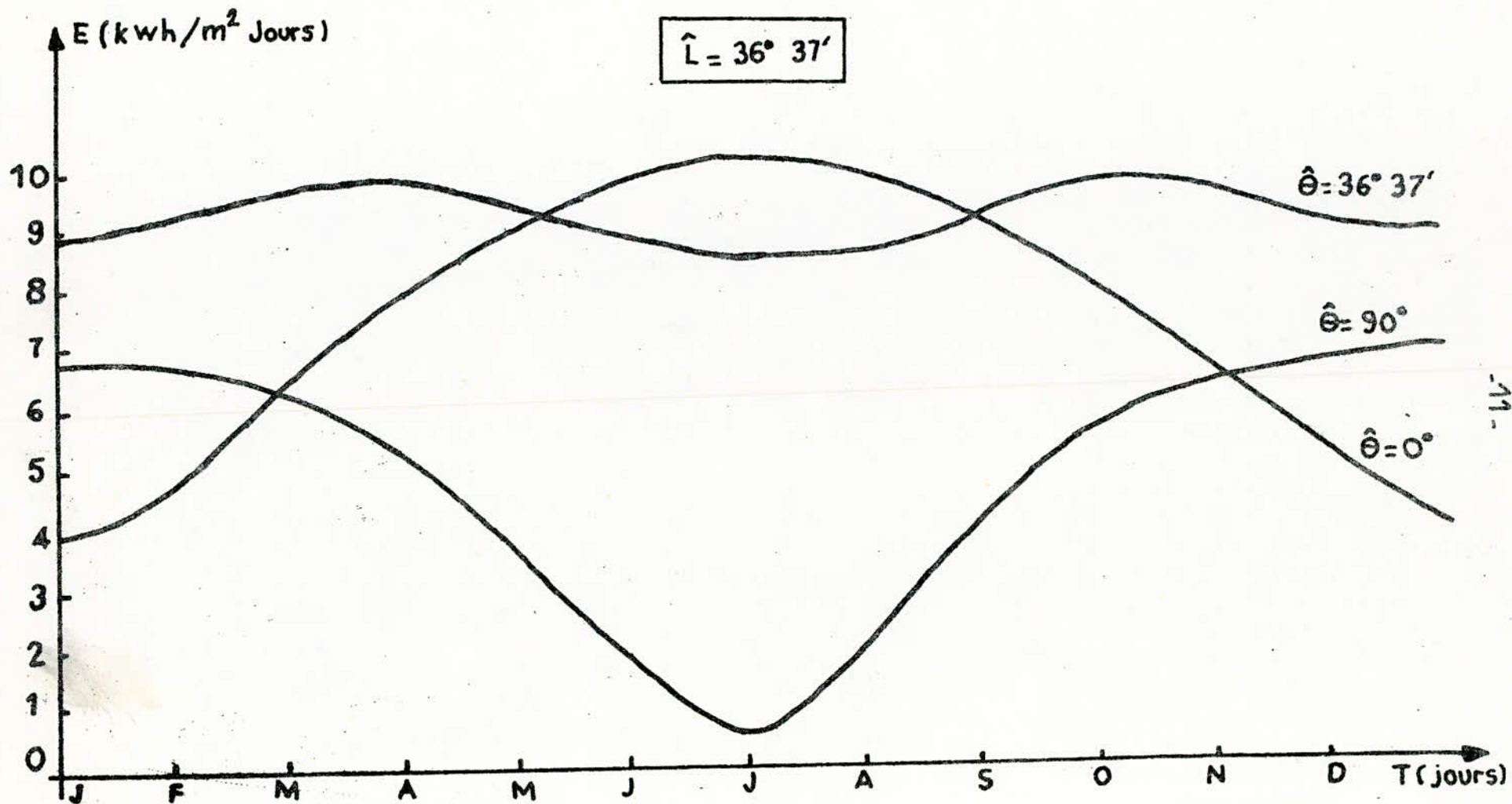
Une approche théorique consiste à prendre pour durée du jour la valeur :

$$D = 12 - \frac{24}{\pi} \arcsin(\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} L)$$

L'énergie journalière sera calculée par :

$$U_j = \int_{-T_0}^{T_0} E dt \quad \text{avec } 2T_0 \leq D.$$

A partir de la courbe d'ensoleillement moyenne du rayonnement global annuel ($\theta=0$) pour la région d'Alger donnée par la figure 1.4 et la relation I, 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 (Fig 1.2). 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 ($L=\theta$).



-11-

Fig 12 - Variations Saisonnières de l'énergie journalière reçue à Alger pour diverses valeurs de θ

2- Collection des données

La station solaire de Bouzaréah a enregistré, durant les années 1979, 1980 et 1981, les valeurs de rayonnement global qui sont données en moyennes décadales dans les tableaux I, 2 et 3.

Ces données nous ont permis de tracer les courbes des moyennes décadales du rayonnement global et par suite les courbes annuelles moyennes (Fig 1.3 et fig 1.4).

A partir de ces dernières nous pouvons tracer la courbe à ondulation minimale dont l'expression analytique est donnée approximativement par :

$$E(t) = E_0 - E_M \cos \frac{U}{T} t$$

E_M = amplitude de la fluctuation

E_0 = valeur moyenne de $E(t)$

T = période d'une année en jours

(voir fig 1.5).

Tableau No I

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	8673
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	9300
Décembre	7160	7530	6820	7170

Valeurs du rayonnement global prises à Bouzar'eh en 1979

Tableau No 2

rayonnement journalier moyen en kj/m ² /jour	du 1 au 10	du 10 au 20	du 20 au 30	moyenne journalière
Janvier	7909	3694	9058	6887
Février	13425	9611	7536	10190
Mars	14532	14676	22658	17288
Avril	14306	18728	19996	17676
Mai	15113	23217	25115	21148
Juin	28291	25784	17501	23858
Juillet	16225	21921	22855	20333
Août	24333	22441	18641	21805
Septembre	19330	20120	8641	16050
Octobre	13055	9863	14281	12399
Novembre	6109	8378	8351	7612
Décembre	6701	7063	7853	7205

Valeurs du rayonnement global prises à Bouzeréah (1980)

Tableau No 3

rayonnement journalier moyen en kj/m ² /jour	du 1 au 10	du 10 au 20	du 20 au 30	moyenne journalière
Janvier	8888	8926	11917	9910
Février	13541	7025	11587	10717
Mars	16927	13387	19128	16480
Avril	17495	13104	14799	15133
Mai	19978	25445	23130	22851
Juin	26438	28401	20743	25194
Juillet	18679	27782	29194	25218
Août	22499	19527	20578	20868
Septembre	20143	17787	15578	17836
Octobre	12835	15521	10978	13111
Novembre	12706	11457	9279	11147
Décembre	7260	4518	6031	5936

Valeurs du rayonnement global prises à Bouzaréah en 1981

Fig 1.3_Courbe des moyennes décadaires du rayonnement global.

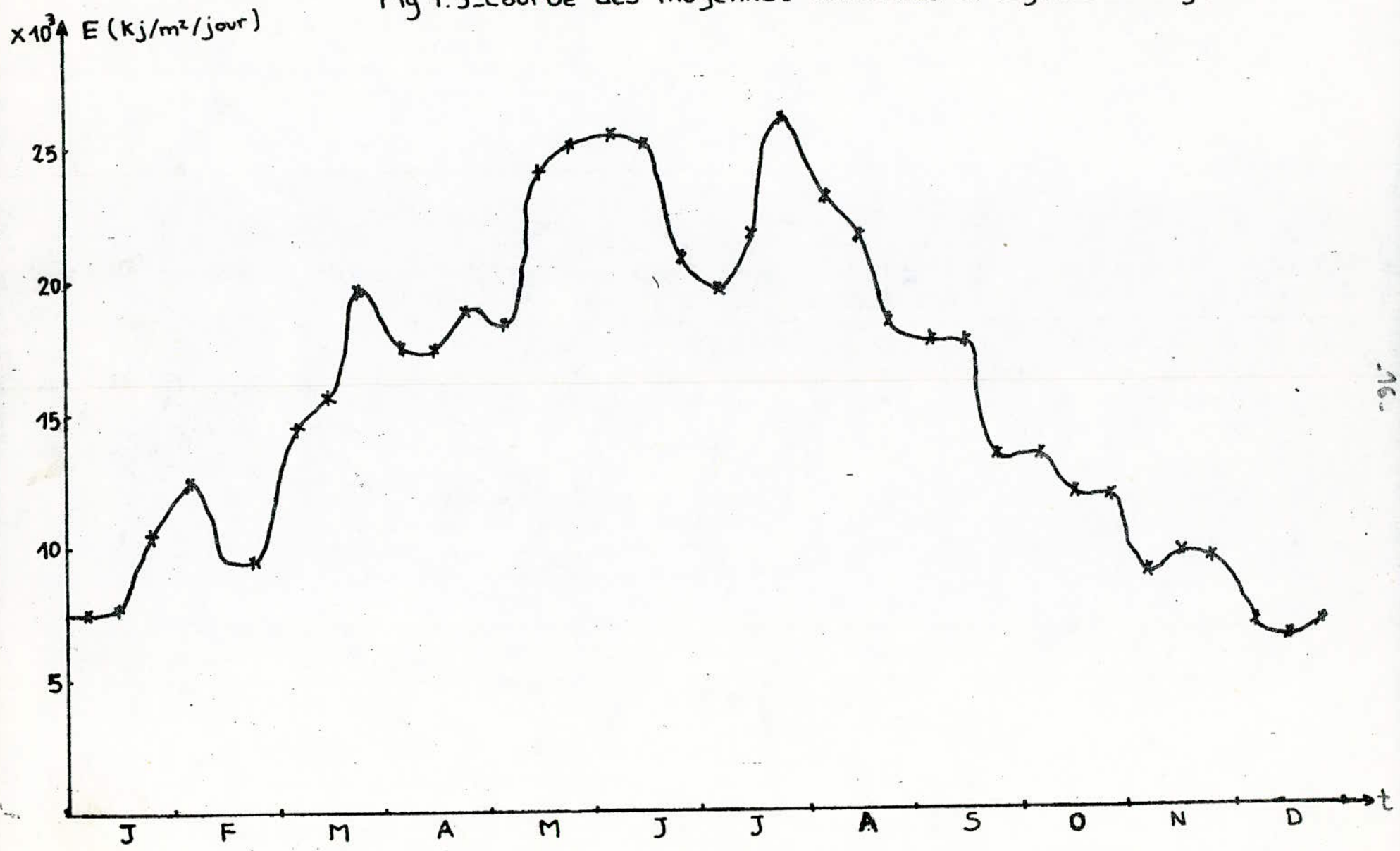
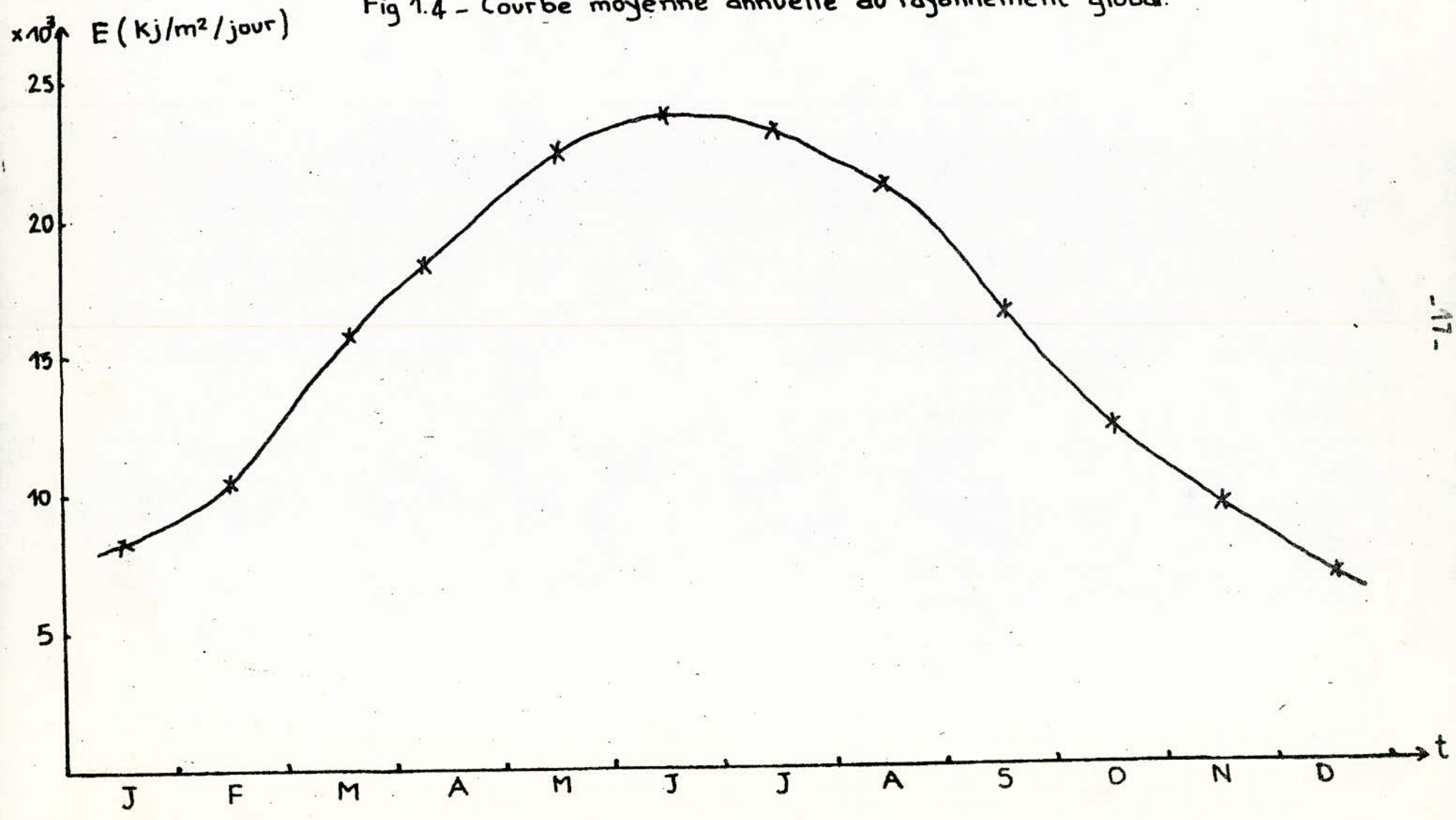


Fig 1.4 - Courbe moyenne annuelle du rayonnement global.



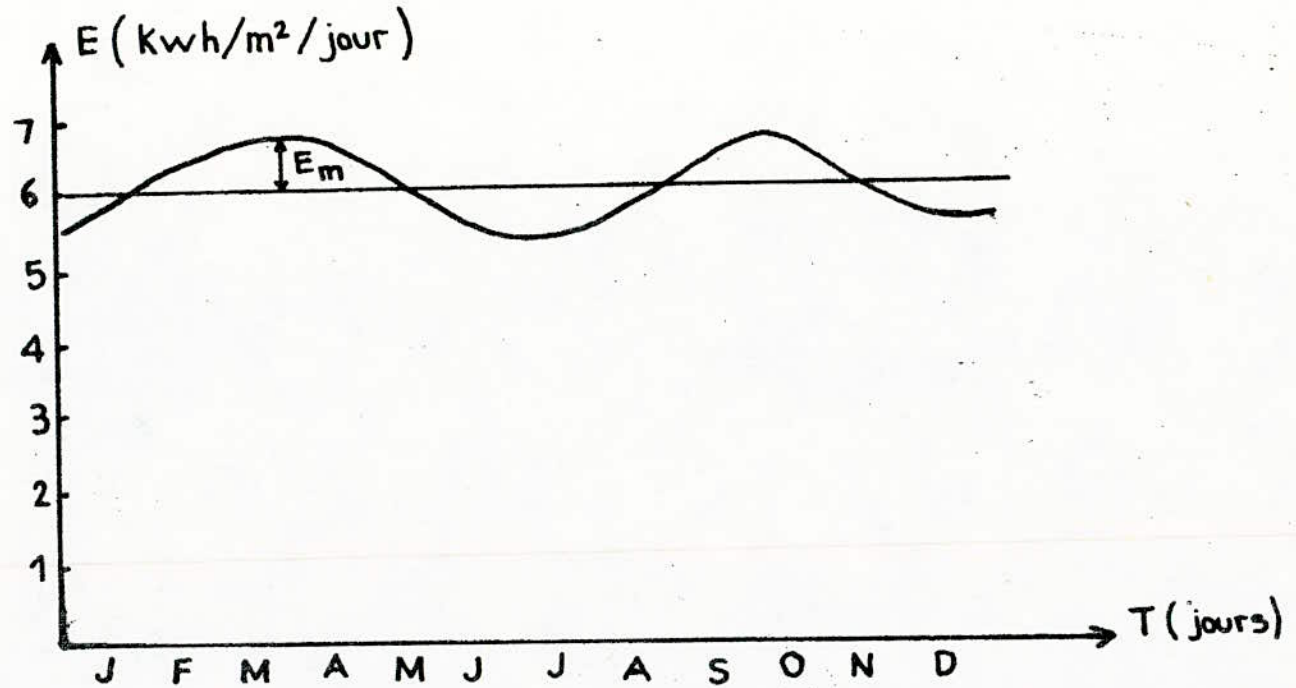


Fig 1.5 - Courbe d'ensoleillement pour laquelle l'ondulation est minimale au cours des saisons.

1.3 - Méthode de calcul du nombre optimal de panneaux

Dans le calcul du dimensionnement, l'estimation du nombre optimal de panneaux solaires est l'opération la plus importante. En effet le prix d'une installation solaire, est pratiquement imposé par celui des photopiles.

Soient S et η_p respectivement la surface et le rendement des panneaux.

Le rendement d'une cellule solaire est de 15% mais celui des panneaux n'est que de 10% à cause du coefficient de remplissage de la surface de ces panneaux.

L'énergie convertie chaque jour est de :

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

L'installation d'un système d'éclairage public doit permettre, durant la nuit, un éclairage constant. Ceci nécessite le stockage de l'énergie le jour pour la réserver 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.

Si W_a représente la moyenne de consommation journalière on doit avoir :

$$W_a \leq \eta_p \cdot \eta_a \cdot S \cdot E_0$$

ou η_a : rendement des accumulateurs.

Ainsi la surface des panneaux sera donnée par:

$$S \geq \frac{W_a}{\eta_p \cdot \eta_a \cdot E_0}$$

Connaissant la surface S_0 d'un panneau, on peut en calculer le nombre N .

$$N \geq \frac{S}{S_0}$$

$S_0 = 0,322 \text{ m}^2$ pour les modules "sharp".

1.4 - Dimensionnement

1.4.1 - Calcul du nombre de panneaux

Le nombre de panneaux se calcule à partir de la formule donnée au paragraphe 1.3 et la courbe de la fig 1.5.

Soit P la puissance d'une charge fonctionnant pendant t heures par jour. La consommation de cette charge sera :

$$W_a = P \cdot t.$$

Nous avons choisi pour notre étude une puissance de 10 watts fonctionnant 9 heures / jour (éclairage public par tubes fluorescents).

$$W_a = 10 \cdot 9 = 90 \text{ wh/jour}$$

Le rendement des batteries est $\eta_a \approx 70\%$

Ceci nous donne une surface de panneaux :

$$S \gg \frac{90}{0,1 \cdot 0,7 \cdot 6 \cdot 10^3} = 0,214 \text{ m}^2$$

Panneaux "sharp" $S_0 = 0,322 \text{ m}^2$ et

$$N \gg \frac{0,214}{0,322} \approx 0,67 \quad N = 1 \text{ panneau.}$$

1.4.2.-Calcul de la capacité des batteries

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 Δw^+ collecté au printemps et en automne pour compenser le manque d'énergie Δw^- en été et en hiver.

Ainsi, l'excès d'énergie au printemps a pour expression:

$$\Delta w^+ = \eta_a \cdot \eta_p \cdot S \int_{T/8}^{3T/8} (E(t) - E_0) dt = 58 \cdot \eta_a \cdot \eta_p \cdot S \cdot E_M$$

Les accumulateurs doivent garder puis restituer au moins l'énergie $w_s \gg w_a + \Delta w$

$$\text{D'où } w_s \gg \eta_a \cdot \eta_p \cdot S \cdot (E_0 + 58 E_M)$$

Si U est la tension nominale des accumulateurs, leur capacité s'écrira :

$$C \gg \frac{\eta_a \cdot \eta_p \cdot S}{U} (E_0 + 58 E_M)$$

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

$$\text{On aura } C \gg \frac{0,7 \cdot 0,1 \cdot 0,322 \cdot 10^3}{12} (6 + 58 \cdot 0,7) = 88 \text{ Ah.}$$

CHAPITRE II

DESCRIPTION DES ELEMENTS

2.1. Les panneaux solaires à conversion photovoltaïque

La conversion directe en électricité de l'énergie contenue dans la lumière du soleil, connue sous le nom de conversion photovoltaïque.

Cette conversion, est basée sur le phénomène suivant: la lumière, du point de vue énergétique, est constituée de grains appelés photons; chaque photon, d'énergie suffisante, tombant sur un atome, peut fournir son énergie à un électron qui échappe à l'attraction électrostatique des noyaux et devient libre.

Les photopiles

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).

Principe de fonctionnement d'une photopile au silicium.

C'est le type de photopile le plus répandu à l'heure actuelle et c'est pourquoi nous l'utilisons pour expliquer le phénomène.

Une telle photopile est constituée par une « jonction », c'est-à-dire la juxtaposition de deux lames minces de silicium dopées différemment (voir fig 2.1). La lame avant est dopée négativement (région N) par du phosphore ; ceci lui confère un excès d'électrons. La lame arrière est dopée positivement (région P) par du bore il en résulte dans cette lame un manque d'électrons. Ce voisinage provoque la diffusion d'électrons de la zone N vers la zone P. Il en résulte un déséquilibre électrique : la région N a une charge positive au voisinage de la jonction, tandis que la région P se charge négativement de l'autre côté de la jonction. Ceci provoque l'apparition d'un champ électrique de jonction qui compense la diffusion des électrons et stabilise le phénomène.

Lorsque la lumière tombe sur la jonction, elle libère des électrons, certains retombent dans la zone d'attraction des noyaux, mais d'autres sont entraînés par le champ électrique de jonction et s'accumulent dans la région N. En même temps, la région P s'appauvrit en électrons.

Il apparaît donc une différence de potentiel entre P et N qui se maintient tant que la jonction est éclairée.

Si on relie alors par deux fils la région N d'une part et la région P d'autre part aux deux bornes d'un moteur de faible puissance, celui-ci se met à tourner, sous l'effet d'un courant électrique allant de P vers N et peut fournir une certaine puissance variant, entre autres, avec l'énergie lumineuse reçue par la photopile. Par exemple, une photopile de 102 mm de diamètre recevant l'éclairement de référence de 1 Kw/m^2 peut fournir une puissance électrique de 1 watt.

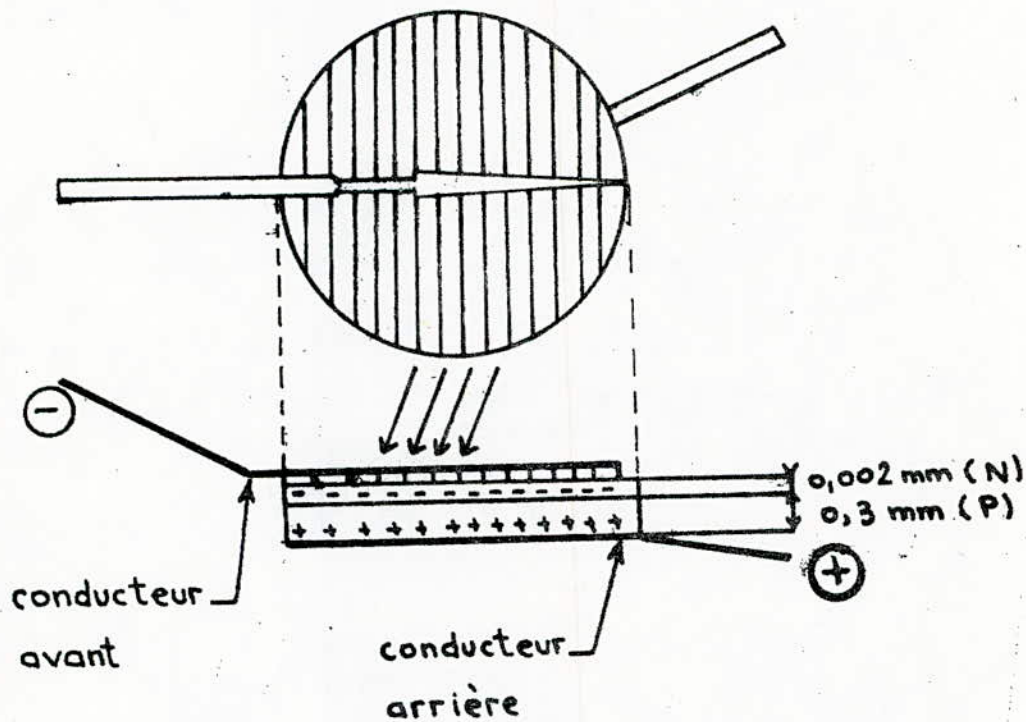


Fig 2.1

Association des photopiles ou panneaux solaires

L'utilisation demande des puissances plus importantes que celles délivrées par une photopile, alors on est amené à utiliser les photopiles en association mise série, en parallèle ; ou en combinant les deux types d'associations.

Cependant, pour éviter les défaillances dues à une inhomogénéité de l'éclairement sur l'ensemble, on est limité par le nombre de cellules qu'on peut mettre en série.

Il faut veiller avec soin à disposer de caractéristiques électriques équivalentes pour les cellules qui vont être connectées.

En règle générale, toutes les cellules qui vont être couplées en parallèle devraient avoir la même tension en circuit ouvert et, ce qui est encore plus important, la même tension pour le point de puissance maximale. Les cellules qui vont fonctionner en série devraient avoir le même courant de court-circuit et le même courant pour le point de puissance maximale. Si ces caractéristiques ne sont pas identiques, on obtient des panneaux « dégradés » car les photopiles qui possèdent les photocourants et phototensions les plus élevés dissipent leur excès de puissance dans les photopiles de performances électriques moindres. En conséquence, les

performances globales du panneau de photopile sont limitées par les photopiles dont les caractéristiques sont les plus faibles. La puissance de sortie est alors réduite par un accroissement de la température du panneau dû à la dissipation interne de puissance.

Ces problèmes deviennent très épineux quand il s'agit de convertisseurs photovoltaïques de forte puissance, auquel cas on est amené à regrouper non plus des cellules mais panneaux.

Comment améliorer le rendement ?

Le rendement d'une photopile est défini comme le rapport entre l'énergie électrique fournie par la photopile et l'énergie solaire qu'elle reçoit dans le même temps. Il varie de 8 à 15% selon les fabricants et selon les conditions de fonctionnement. Par exemple la photopile de 102 mm a une surface de 82 cm², elle reçoit par ciel clair et soleil au zénith 8,2 W, son rendement maximum est de $1/8,2 = 12,2\%$.

Afin que la lumière arrive jusqu'à la jonction, la région N choisie comme face avant doit être extrêmement fine, par exemple d'épaisseur égale à 2 micromètres (0,002 mm) et peut être revêtue d'un dépôt antireflet de 0,07 micromètre ou être dépolie par attaque chimique.

Pour collecter au mieux le courant électrique, la face arrière est entièrement métallisée et la face avant est revêtue d'un réseau métallique couvrant par exemple 8% de la surface totale (voir fig 2.1).

Le rendement dépend de la température de la photopile: par exemple, il passe de 13,8% pour 0°C à 12,6% pour 25°C et à 11% pour 60°C. Il est donc important d'assurer une ventilation et d'assurer un bon contact thermique entre la cellule et son support (voir fig 2.2).

Par contre, le rendement varie assez peu avec l'éclairage, du moins en lumière ambiante; par exemple, la puissance crête d'un ensemble de 34 cellules placées en série et maintenues à température constante varie de 10W à 5W quand l'éclairement du soleil passe de 1Kw/m² à 500W/m²: le rendement n'a pas varié (voir fig 2.3).

Dans le cas d'un ensemble constitué par l'association de photopiles élémentaires, le rendement du panneau varie en fonction de son remplissage: des cellules carrées donneront un remplissage voisin de 100%, au contraire des cellules circulaires ne remplissant la surface du panneau qu'à moins de 75%. Le rendement global baisse d'autant.

L'influence de l'angle d'inclinaison du panneau par rapport au soleil est importante. le rendement est maximum lorsque la direction du soleil est perpendiculaire à la photopile.

Il faut optimiser cette inclinaison, par exemple si on veut une production peu variable en cours d'année l'inclinaison sera égale à la latitude plus 10° .

Pour les photopiles actuellement commercialisées, on peut retenir une valeur moyenne du rendement de 10% à 25%.

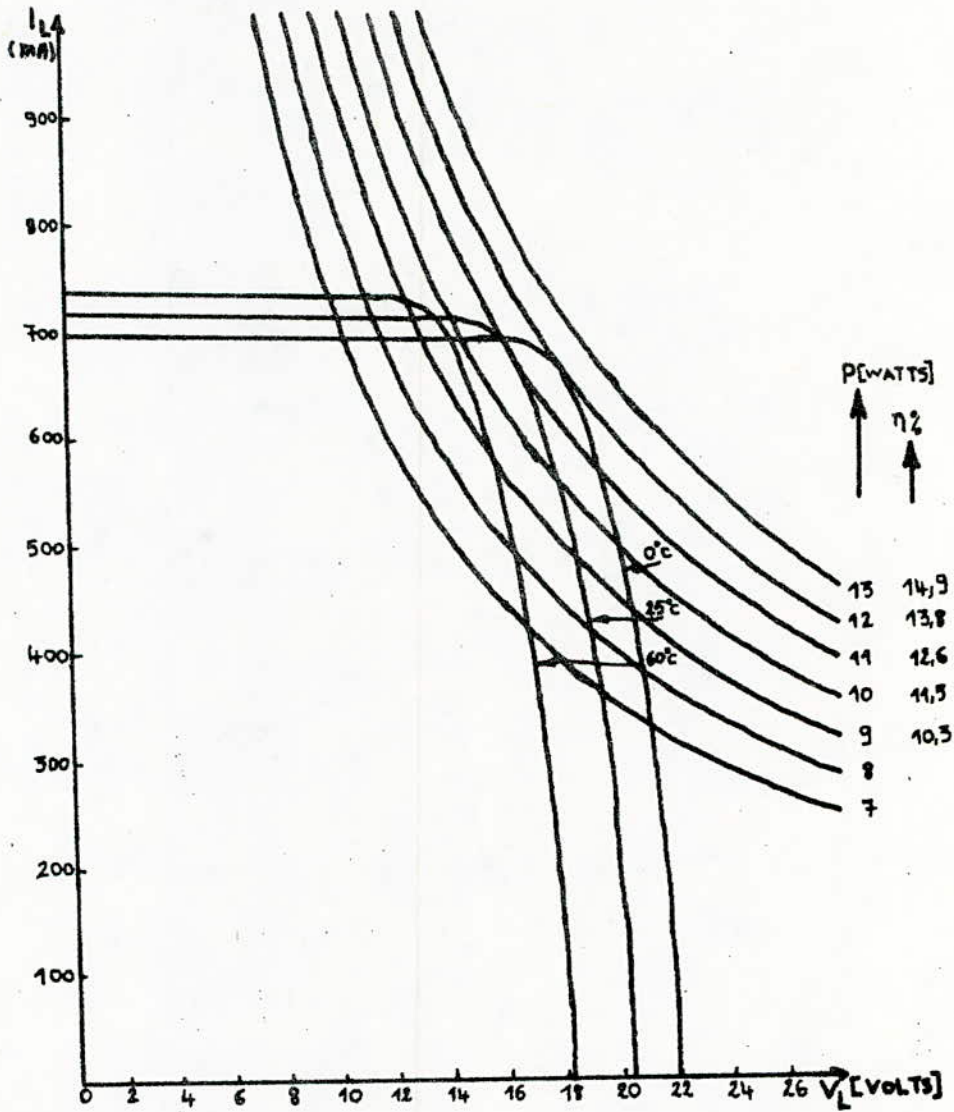
Comment utiliser les photopiles ?

Examinons les caractéristiques d'une photopile donnant les variations du courant en fonction de la tension lorsque la photopile débite sur une charge de résistance R et cela pour différents ensoleillements (Fig 2.4).

Pour chaque ensoleillement, on trouve un point de fonctionnement optimum : Les points $M_1 M_2 M_3 M_4$, pour lesquels la puissance fournie par la photopile est maximum. Il est clair que si la photopile est adaptée à la charge R pour l'éclairement maximum (on obtient le point de fonctionnement M_1 sur la « droite de charge » OM_1 de R), elle n'est pas adaptée lorsque l'éclairement diminue ; le point de fonctionnement devient M'_2, M'_3 ou M'_4 quand l'éclairement passe à 750 w/m^2 puis 500 w/m^2 ou 250 w/m^2 . Il est flagrant dans le dernier cas qu'on ne tire pas le meilleur parti de la photopile. En effet, la photopile est capable de fournir $7,5 \text{ w}$ (au point M_4) alors qu'on ne lui demande que $3,1 \text{ w}$ (point M'_4).

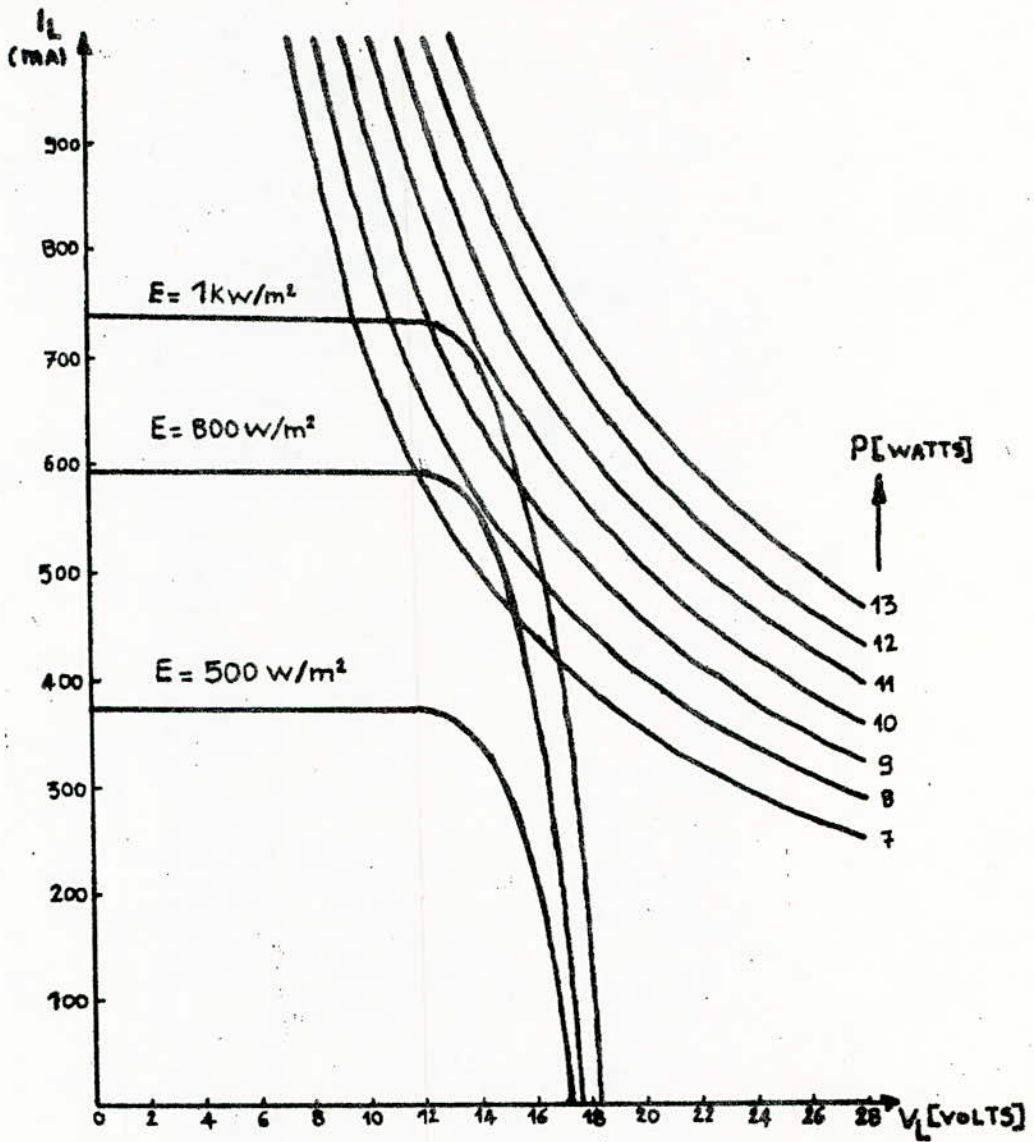
Or, l'ensoleillement varie d'une heure à l'autre, d'une saison à l'autre ; il ya donc une optimisation à faire. Dans la pratique, la meilleure solution consiste à utiliser une batterie d'accumulateurs en tampon entre la photopile et la charge. Il faut choisir une photopile de tension en circuit ouvert supérieure à celle de la batterie, par exemple 18V pour une batterie de 12V. Le montage de la Fig 2.5 comporte un régulateur de tension qui limite la tension de charge de la batterie et une diode qui empêche l'inversion du courant lorsque la photopile par manque d'ensoleillement n'est plus capable d'assurer une tension minimum. Sans la diode D, la batterie se déchargerait dans la photopile et en outre pourrait détériorer celle-ci.

En plus son rôle de tampon, assurant au mieux l'adaptation de la photopile, la batterie sert à stocker l'électricité produite pour pallier l'absence d'ensoleillement la nuit ou par temps couvert.



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

Fig 2.2 - Caractéristiques courant-tension
du panneau BPX147A



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

Fig 2.3 - Caractéristiques courant-tension
du panneau BPX47A

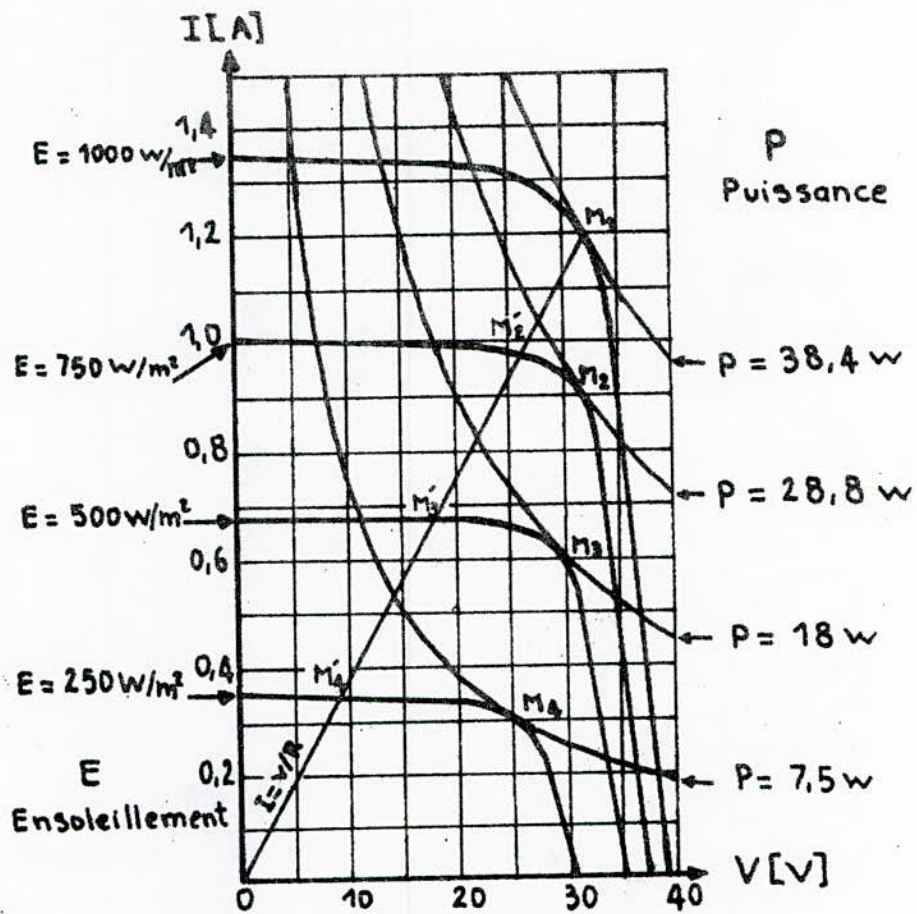


Fig 2.4 - Caractéristiques courant-tension d'un panneau FP72

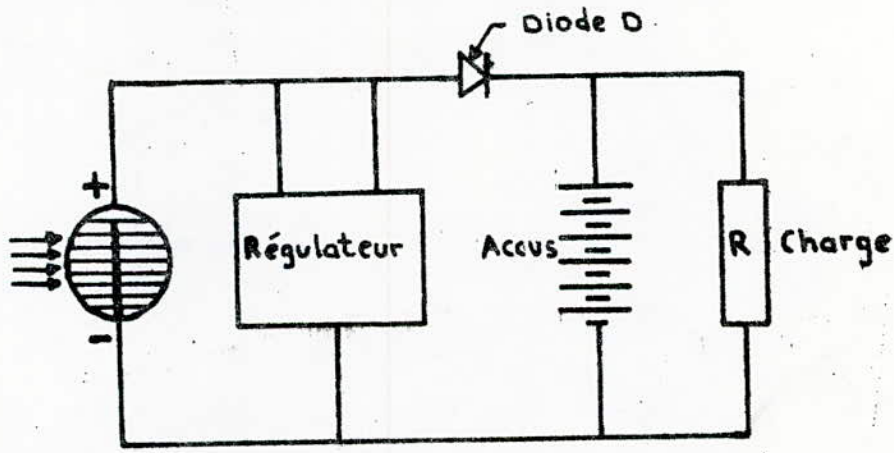


Fig 2.5 - Système de régulation associé à un panneau de photopiles

2.2 - Les batteries d'accumulateurs

Le but des accumulateurs, est d'accumuler de l'énergie électrique et de la restituer ensuite de façon régulière et pendant un temps aussi long que possible. Il y a une double conversion qui part de l'énergie électrique pour aller à l'énergie chimique, forme de stockage pour retourner ensuite à l'énergie électrique.

La première phase est appelée charge de l'accumulateur, la seconde est la décharge.

2.2.1 - Constitution d'un accumulateur

Un élément est constitué par un jeu d'électrodes en plaques positives et négatives alternées, plongeant dans l'électrolyte liquide contenu dans un bac isolant. Des baguettes ou diaphragmes isolants maintiennent l'écartement entre les plaques. Toutes les plaques positives sont soudées à une barrette reliée à la borne positive de l'élément. Les plaques négatives sont reliées de même à la borne négative.

2.2.2 - Caractéristiques des accumulateurs

a- Capacité d'un accumulateur

C'est la quantité d'électricité qu'il peut fournir pendant la décharge ; cette capacité se mesure en ampères-heures. La capacité augmente avec la température de l'électrolyte, mais on doit veiller à ce qu'elle ne dépasse jamais 45°C. (voir fig 2.6).

b- Rendement en quantité d'un accumulateur

Le rendement en quantité d'un accumulateur est le rapport :

$$\eta_q = \frac{\text{quantité d'électricité restituée à la décharge}}{\text{quantité d'électricité fournie à la charge}}$$

Ce rendement peut atteindre 0,9 dans un accumulateur en bon état. Pour un élément donné, ce rendement est meilleur avec un régime lent de charge et de décharge.

c- Rendement en énergie d'un accumulateur

Le rendement en énergie est le rapport :

$$\eta_w = \frac{\text{énergie restituée à la décharge}}{\text{énergie fournie à la charge}}$$

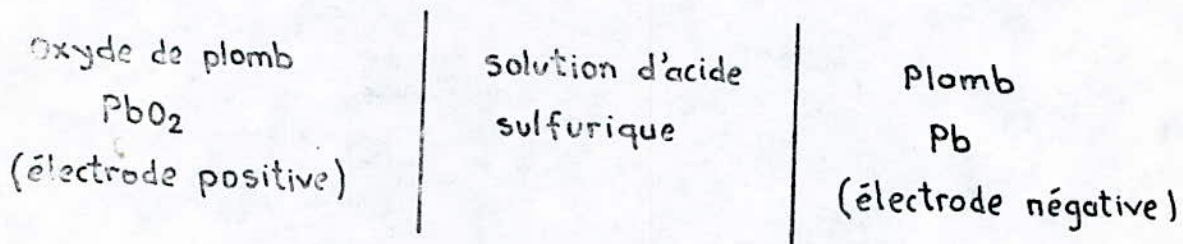
Il varie en général, entre 0,7 et 0,8.

2.2.3 - Présentation de quelques types d'accumulateurs

a - Accumulateur au plomb

Ce modèle, le plus ancien, est constitué de plaques positives en peroxyde de plomb PbO_2 et les négatives en plomb spongieux Pb . L'électrolyte étant de l'acide sulfurique additionné d'eau, de masse volumique égale à $1,2 \text{ Kg/dm}^3$.

Ces accumulateurs correspondent à la chaîne dissymétrique suivante :

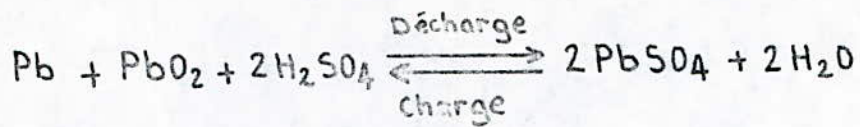


Lors de la décharge, l'hydrogène se dégage sur l'électrode positive et réduit l'oxyde de plomb en sulfate, tandis que les ions sulfate SO_4^{2-} produisent l'oxydation de l'électrode négative en sulfate de plomb également.

Pendant la charge les électrodes initiales se reconstituent en effet les réactions chimiques qui se produisent dans l'accumulateur sont réversibles.

La concentration de l'électrolyte diminue au cours de la décharge de l'accumulateur et augmente au cours de la charge. Pour cette raison il est facile de vérifier qu'un accumulateur est chargé : il suffit de mesurer la densité de l'électrolyte.

Son fonctionnement se représente par l'équation suivante:



Caractéristiques des accumulateurs au plomb

Le rendement énergétique d'un accumulateur au plomb est, en général, compris entre 0,7 et 0,8.

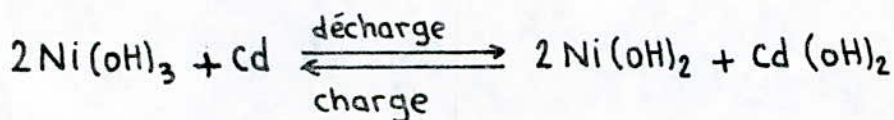
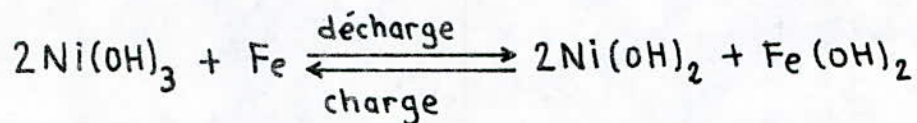
La résistance interne d'un accumulateur au plomb est très faible : voisine du centième d'ohm pour les accumulateurs habituels, elle peut être inférieure au millième d'ohm pour les gros accumulateurs.

La capacité d'un accumulateur au plomb est proportionnelle à la masse des plaques et est comprise entre 10 et 15 Ah par kilogramme de plaques. La capacité en énergie qui représente l'énergie que peut restituer un accumulateur au cours d'une décharge complète a une valeur comprise entre 22 et 33 Wh/Kg.

Les accumulateurs au plomb sont cependant lourds et fragiles et leur entretien nécessite beaucoup de soins.

b- Accumulateurs alcalins

Ils sont ainsi désignés par suite de la composition de leur électrolyte : une solution de potasse caustique à environ 25% de concentration. La matière active positive est constituée d'oxyde de nickel additionné de paillettes de nickel ou de graphite pour la rendre plus conductrice. La matière active négative est constituée par du fer réduit, ou par un mélange de cadmium et d'une petite quantité de fer.



On soulignera que, contrairement à ce qui se passe dans l'élément au plomb, l'électrolyte n'intervient pas dans cette réaction ; sa composition et sa densité restent donc constantes pendant toutes les charges et les décharges, et on ne peut pas apprécier l'état de charge d'un élément alcalin par une mesure de sa densité comme on peut le faire avec un élément au plomb.

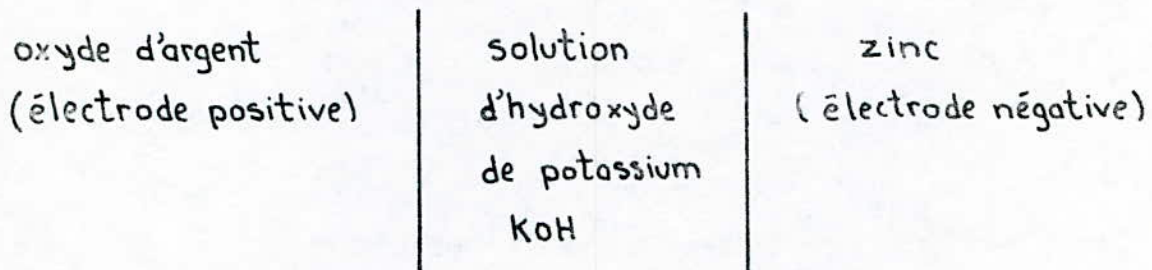
Chaque élément cadmium-nickel, présente une f.e.m de 1,2 volt (voir fig 2.7).

Les accumulateurs alcalins sont robustes, légers. Ils ont une longue durée de vie, mais un rendement relativement faible.

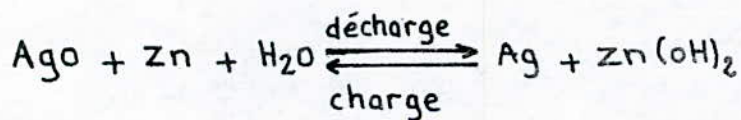
Cependant, ces accumulateurs restent d'un coût relativement élevé.

C- Accumulateurs argent-zinc

L'accumulateur argent-zinc, représenté par la chaîne suivante :



Pendant la décharge, sur la plaque positive se forme de l'argent, et sur la plaque négative de l'hydroxyde de zinc $Zn(OH)_2$.



La f.e.m d'un élément d'accumulateur argent-zinc est sensiblement égale à 1,5 v (Fig 2.8).

Le principal avantage de cet accumulateur est sa grande capacité en énergie par unité de masse ou de volume : 130 wh/kg et 300 wh/dm³, 4 à 6 fois supérieure à celle des batteries à électrolytes acides. En revanche son prix est élevé, à cause de l'emploi de l'argent.

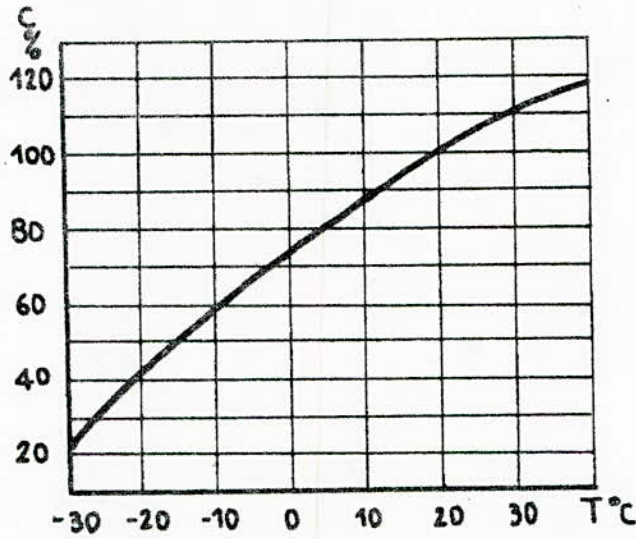


Fig 2.6 - Capacité en fonction de la température (batterie au Pb).

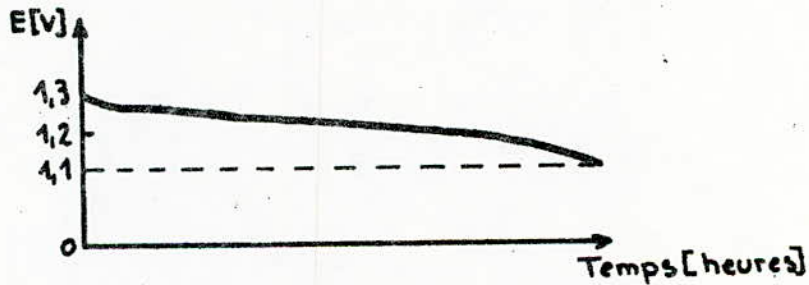


Fig 2.7 - Courbe de décharge d'un élément cadmium-nickel.

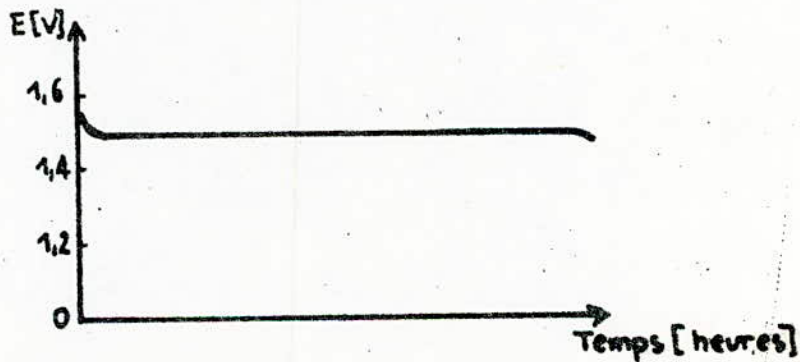


Fig 2.8 - Courbe de décharge d'un élément argent-zinc.

2.2.4 - Choix du type d'accumulateur

Une installation à conversion photovoltaïque doit toujours comporter le minimum de panneaux solaires, pour cela, le rendement de tout élément interposé entre ces derniers et la charge doit être le plus élevé possible. De plus on recherche une réduction maximale du prix de la liaison panneaux-utilisation.

Les accumulateurs à l'argent reviennent très cher et nécessitent beaucoup de précautions. Les éléments alcalins ont un rendement énergétique médiocre. Seules les batteries au plomb offrent un rapport rendement/prix intéressant et sont par ce fait les plus utilisés.

2.2.5 - Charge et décharge des accumulateurs au plomb

a - Variation de la tension d'un élément au cours de la charge

Pendant la charge, la tension de l'élément s'élève progressivement, lorsque cette tension atteint 2,35 à 2,40 V, on constate son accroissement rapide et en même temps les électrodes sont le siège d'un dégagement abondant de gaz (Fig 2.9).

Ce phénomène est dû à ce que la tension atteignant une valeur supérieure à la surtension de l'oxygène et de l'hydrogène, le dégagement de ces gaz devient possible et il y a alors décomposition de l'eau contenue dans l'électrolyte. Dans la pratique il faut à ce moment réduire l'intensité du courant de charge pour que le dégagement gazeux susceptible d'ébranler la matière

active diminue de violence.

La densité de l'électrolyte est en fin de charge de l'ordre de 1,24.

b - Variation de la tension au cours de la décharge

Pendant toute la décharge, la f.e.m reste pratiquement constante et voisine de 2 v (Fig 2.10).

A la fin de la décharge se produit une brusque chute de f.e.m. L'élément est pratiquement déchargé lorsque sa f.e.m atteint 1,8 v ; continuer la décharge serait nuisible (risque de sulfatation, qui empêche toute recharge).

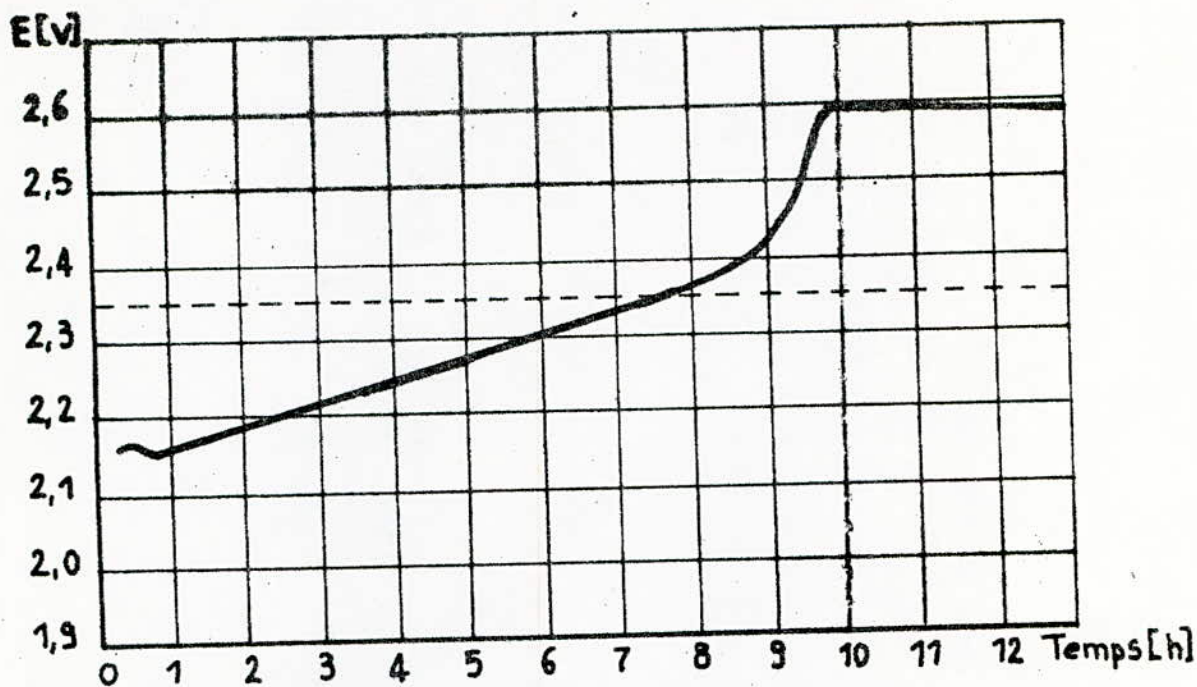


Fig 2.9 - Variation de la tension au cours de la charge d'un accumulateur au plomb.

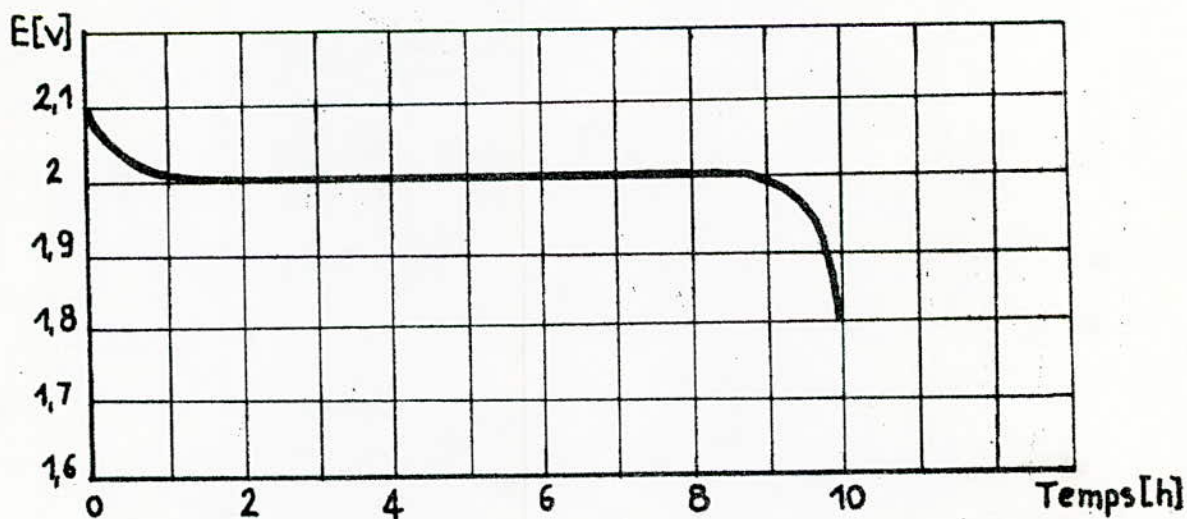


Fig 2.10 - Courbe de décharge d'un élément au plomb.

2.3. Sources lumineuses

Il est possible de distinguer trois sortes de lampes électriques :

- Les lampes à incandescence.
- Les lampes à décharge à travers les gaz.
- Les lampes fluorescentes qui sont le résultat de la combinaison de la décharge électrique et du phénomène de fluorescence.

Les lampes électriques transforment l'énergie électrique en énergie rayonnante.

2.3.1. Lampes à incandescence

a- Principe

Le principe de fonctionnement des lampes à incandescence est des plus simples. Un corps conducteur, en général en forme de filament, est porté à une certaine température par suite de l'effet joule, lorsqu'il est traversé par un courant. La résistance de ce conducteur et la tension d'alimentation sont choisies de telle façon que la température atteinte provoque une émission lumineuse dans le domaine visible. Afin d'éviter l'oxydation du filament, ce dernier est placé à l'intérieur d'une enveloppe de verre dans laquelle on a fait le vide ou que l'on remplit, actuellement, pour la plupart des lampes, d'un gaz chimiquement neutre (le plus souvent azote ou argon).

b- Lampes d'éclairage

La première lampe a été inventée par Edison. Elle se

compose d'un filament de carbone placé dans une ampoule vide d'air pour éviter la combustion du filament. La température de ce dernier, en fonctionnement normal, est de 1800°C environ. Mais la résistance du carbone diminuant lorsque sa température augmente, la consommation spécifique est très élevée et l'emploi de ces lampes est très onéreux. Elles ont un mauvais rendement: 3 à 4 % de l'énergie électrique sont transformés en énergie lumineuse, le reste est perdu sous forme de chaleur.

On a donc remplacé le filament de carbone par un filament de tungstène, en forme de spirale, que l'on a placé dans une ampoule contenant de l'azote ou de l'argon. Le rendement est triplé et la lumière est moins jaune. On a encore perfectionné ces lampes en remplaçant l'argon par un autre gaz, le krypton. La lumière obtenue est beaucoup plus blanche et le rendement est amélioré.

La durée de vie de ces lampes est de l'ordre de 1000 heures.

C - Efficacité lumineuse des lampes à incandescence

L'efficacité lumineuse représente le rendement lumineux d'une source. C'est le rapport entre le flux émis par une source de lumière, exprimé en lumens et la puissance électrique consommée en watts. L'efficacité lumineuse se mesure donc en lumens par watt.

Dans le tableau ci dessous, nous indiquons quelques

valeurs relatives à différentes constitutions de lampes :

Constitution	Température du filament	Efficacité en lumens Par watt
Filament de carbone	1800	2,6
Filament de tungstène dans le vide (40w)	2200	10,9
Filament de tungstène en atmosphère gazeuse (100w)	2460	12,9
Filament de tungstène dans le Krypton (100w)	2820	16,5

2.3.2 Lampes à décharge

a- Principe

Une lampe à décharge consiste essentiellement en une enveloppe (en général tubulaire) emplies d'un gaz ou d'une vapeur métallique ou encore un mélange des deux, sous des valeurs diverses de pression ; elles comportent, placées le plus souvent chacune à une extrémité, deux électrodes entre lesquelles on établit un arc. L'émission de lumière est due aux chocs entre les électrons libérés par la cathode et les atomes du gaz ou de la vapeur.

b- Lampes à vapeur de sodium.

Les lampes actuelles comportent un tube en verre spécial, inattaquable par la vapeur de sodium. A chaque extrémité se

trouve une électrode spiralee en tungstène, enduite d'oxydes de terres rares. Le tube est rempli de néon, mélangé en faible proportion avec de l'argon et, à la température ordinaire, il contient quelques parcelles de sodium solide condensées sur le verre. Pour son bon fonctionnement, la lampe exige une tension de vapeur relativement faible, $4 \cdot 10^{-3}$ mm de mercure, correspondant à une température du sodium de 280°C environ. Il est important de maintenir cette température aussi constante que possible afin que l'émission lumineuse ne subisse pas de fluctuations sensibles.

Pour limiter les pertes de chaleur par convection et conduction et pour établir l'équilibre thermique à sa valeur optimale quelles que soient les variations de la température extérieure, le tube à décharge est enfermé dans une cloche à vide à double enveloppe.

La tension d'allumage, est obtenue au moyen d'un transformateur. La décharge se produit d'abord grâce au néon et la lumière émise a la couleur rouge caractéristique de ce gaz. Lorsque la température de paroi atteint 200°C environ, les atomes de la vapeur de sodium sont alors excités et ils sont à l'origine du rayonnement. Il faut une dizaine de minutes pour la mise en régime complète.

Ces lampes sont remarquables par leur efficacité élevée et leur longue durée.

2.3.3 Les lampes fluorescentes

La lampe fluorescente basse tension est constituée par un tube de verre muni à chaque extrémité d'une électrode, à l'intérieur duquel existe une très faible pression de vapeur de mercure. La paroi interne est, en outre, recouverte de substances fluorescentes.

La lumière de ces lampes est principalement produite par une couche de poudre fluorescente tapissant l'intérieur de l'enveloppe tubulaire de la lampe. Cette poudre est excitée par le rayonnement ultraviolet de faible longueur d'onde émis par une décharge électrique dans la vapeur de mercure à basse pression que contient la lampe.

L'allumage de la lampe est facilité par un chauffage des électrodes avant l'amorçage de la décharge. Le circuit de préchauffage des électrodes comporte un dispositif appelé « starter », qui provoque automatiquement la fermeture de ce circuit à la mise sous tension de la lampe et son ouverture au moment opportun. La durée moyenne du préchauffage est de deux secondes environ.

Certains tubes sont à allumage immédiat, sans starter ni préchauffage, un arc auxiliaire étant établi pour procurer l'ionisation préalable.

Qualités des sources fluorescentes

L'éclairage par fluorescence, par les avantages qu'il procure, connaît un succès sans cesse croissant. Ses conditions d'emploi sont dictées par la connaissance des qualités de ces sources de lumière.

— Très faible luminance — de l'ordre de 0,4 à 0,7 candela par centimètre carré, ce qui diminue le risque d'éblouissement.

— Faible dégagement de chaleur — environ la moitié de celle dégagée par une lampe à incandescence, pour un même flux lumineux.

— Rendement lumineux élevé — environ trois fois supérieur à celui d'une lampe à incandescence de mêmes caractéristiques. Cela signifie que, à consommation égale, la source fluorescente donne un flux lumineux trois fois plus élevé.

— Lumière de meilleure qualité.

— Longue durée de vie — environ 3000 heures, donc trois fois celle d'une lampe à incandescence.

— Grande surface de la source — ce qui réduit le risque d'ombres et donne une lumière diffuse.

CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE

Pour vérifier expérimentalement nos calculs, nous avons procédé à une série de mesures sur un lampadaire solaire de faible puissance, implanté à la station solaire de Bouzaréah.

3.1. Description de l'appareil

- Un poteau en acier galvanisé résistant à des vents de 180 Km/h.
- Un luminaire étanche muni d'un tube fluorescent de 10 watts.
- Un coffre à batteries.
- Un panneau solaire photovoltaïque "Sharp", orienté vers le sud et la normale à sa surface se trouve dans le plan méridien et fait un angle de 45° par rapport à la verticale du lieu.
(voir fig 3.1)

Principe de fonctionnement

Durant le jour, l'énergie solaire est convertie à l'aide du panneau solaire en énergie électrique qui sera stockée

dans les batteries, pour être utilisée pendant la nuit.

Le régulateur de charge assure la protection de la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est muni d'un commutateur qui a trois positions : une manuelle qu'on utilise pour tester la lampe fluorescente, une autre pour séparer les batteries de la lampe, et la troisième position correspond au fonctionnement normal, c'est-à-dire la lampe s'allume et s'éteint automatiquement.

Le convertisseur DC/AC convertit le courant continu de la batterie en un courant alternatif de haute fréquence. Ce convertisseur a un haut rendement et faible consommation.

La lampe est allumée lorsque l'éclairage tombe au dessous de 20 ~ 50 lux.

3.2 - Régulateur de charge

3.2.1 - Les fonctions assurées par ce système.

Il assure les fonctions suivantes :

- a) Protection de la batterie contre les surcharges.
- b) Protection de la batterie contre une décharge profonde.
- c) Couplage des panneaux solaires à la batterie le jour.
- d) Coupure de la liaison panneaux-batterie la nuit.
- e) Couplage de la batterie à la lampe la nuit.

3.2.2- Schéma de montage

Il est donné à la fig 3.2 sous forme de schéma bloc.

3.2.3- Principe de fonctionnement.

D'après le schéma bloc du régulateur de charge, on voit qu'il est constitué de quatre circuits :

a)- Circuit de protection contre la surcharge

Pendant le jour, lorsque la tension de la batterie atteint un seuil maximum pré-réglé à l'aide du panneau solaire, ce circuit assure le blocage de la liaison panneau - batterie.

b)- Circuit du fonctionnement automatique.

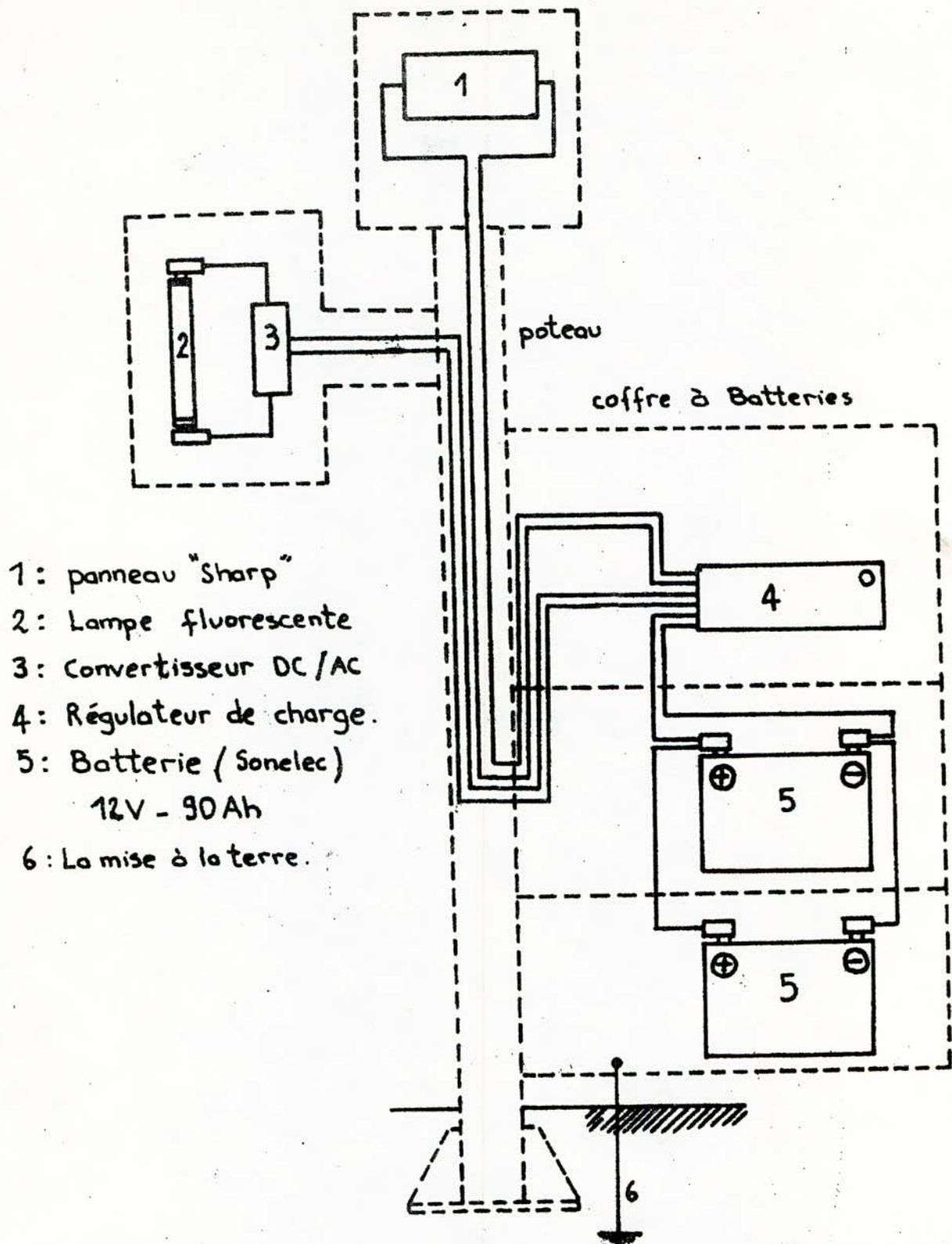
Après le coucher du soleil, l'intensité du flux solaire diminue, ce qui entraîne la décroissance de la tension du panneau solaire, lorsque celle-ci atteint un certain niveau pré-réglé, ce circuit agit sur le relais temporisé qui fait allumer la lampe pendant une période de 9 heures à compter de la fermeture du relais.

c)- Circuit de protection contre une décharge profonde.

Lorsque la tension de la batterie descend en dessous d'un seuil pré-réglé pendant sa décharge dans la lampe, ce circuit éteint la lampe, même si les neuf heures ne sont pas encore écoulées.

d) - Circuit de protection contre l'inversion du courant.

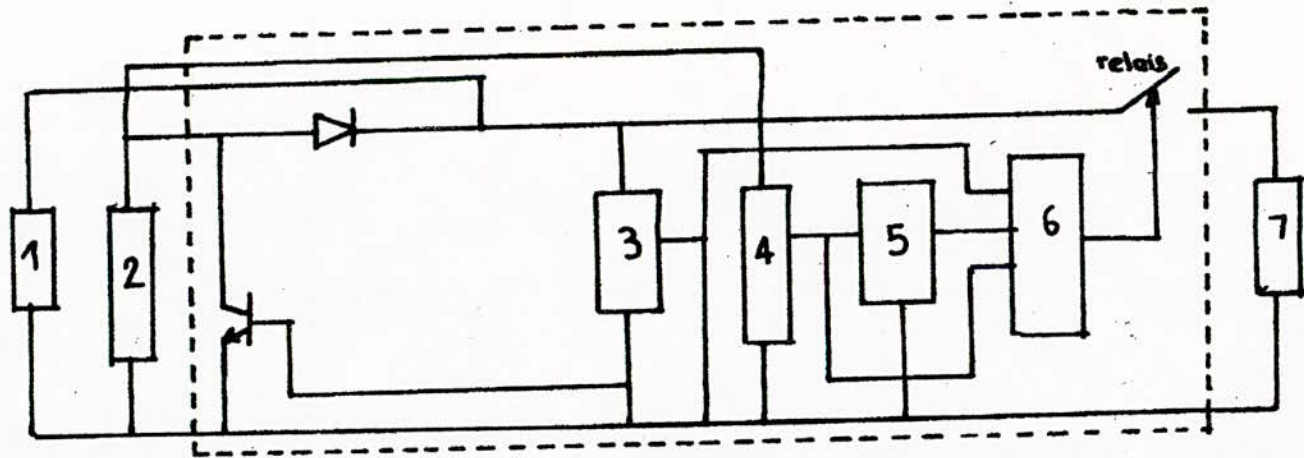
Pendant les périodes de non illumination, la tension du panneau solaire est inférieure à celle de la batterie, ce qui provoque un courant inverse de la batterie vers le panneau, qui risque de détériorer le panneau. Une diode de protection est connectée entre le panneau et la batterie empêche l'inversion du courant.



- 1: panneau "Sharp"
- 2: Lampe fluorescente
- 3: Convertisseur DC/AC
- 4: Régulateur de charge.
- 5: Batterie (Sonelec)
12V - 90Ah
- 6: La mise à la terre.

Fig 3. 1. Diagramme des connexions du lampadaire solaire.

Fig 3.2 - Schéma bloc du régulateur de charge



- 1- Batterie de stockage
- 2- Panneau solaire
- 3- Circuit de protection contre les surcharges.

- 4- Circuit sensible à la variation de l'intensité du flux solaire.
- 5. Circuit de protection contre une décharge profonde

- 6- Circuit de commande du relais temporisé
- 7- Lampe fluorescente.

* La ligne discontinue délimite le régulateur de charge

3.3- Instrumentation et mesures

On a effectué nos mesures sur les paramètres suivants

- Relevé des caractéristiques courant-tension du panneau Sharp.
- Le flux solaire reçu par le panneau solaire.
- La température du panneau.
- Le courant débité par le panneau.
- Le courant absorbé par le récepteur.
- La tension aux bornes de la batterie.

Le schéma synoptique de l'installation est donné par la fig 3.3.

3.3.1- Les appareils de mesure

a- L'enregistreur à pointés

Cet enregistreur a la possibilité de traiter six signaux sur six voies distinctes, l'enregistrement s'effectuant sur une bande de papier par l'intermédiaire d'une tête rotative comprenant six stylets de couleurs différentes. Un système automatique permet le balayage périodique de toutes les voies, la tête n'inscrit sur le papier que les signaux correspondant aux pistes utilisées. La vitesse de défilement du papier correspond aux gammes suivantes :

0,5, 1, 2,5, 5, 10, 25, 50, 100, 250 mm/mn.

Le choix étant effectué à l'aide d'un commutateur de position. L'indépendance des six voies l'une par rapport à l'autre, nous permet de choisir pour chacune des entrées, une fonction et un calibre bien déterminé. Les valeurs possibles de l'échelle des ordonnées correspondent aux calibres :

1 - 2,5 - 5 - 10 - 25 - 50 - 100 - 250 - 500 - 1000 $\times 1\text{mV}$ ou $\times 100\text{mV}$.

Pour nos mesures, nous avons pris une unité de base de temps de 0,5 mm/mn.

b - Pyranomètre

L'irradiation globale est enregistrée à l'aide de cet appareil qui reçoit l'énergie solaire provenant de tout l'hémisphère céleste, c'est-à-dire d'un horizon à l'autre dans toutes les directions. Le spectre de longueur d'onde mesuré par un pyranomètre se situe approximativement entre $0,3\ \mu\text{m}$ et $3\ \mu\text{m}$ (lumière visible et proche infrarouge). La surface réceptrice se compose de deux anneaux concentriques en argent; l'anneau intérieur est recouvert de noir, l'anneau extérieur recouvert de blanc. La différence de température entre les anneaux est mesurée par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces inférieures des anneaux, mais qui en sont électriquement isolées. L'ensemble est hermétiquement scellé à l'intérieur d'un hémisphère de verre. Le temps de réponse est d'environ 30 secondes.

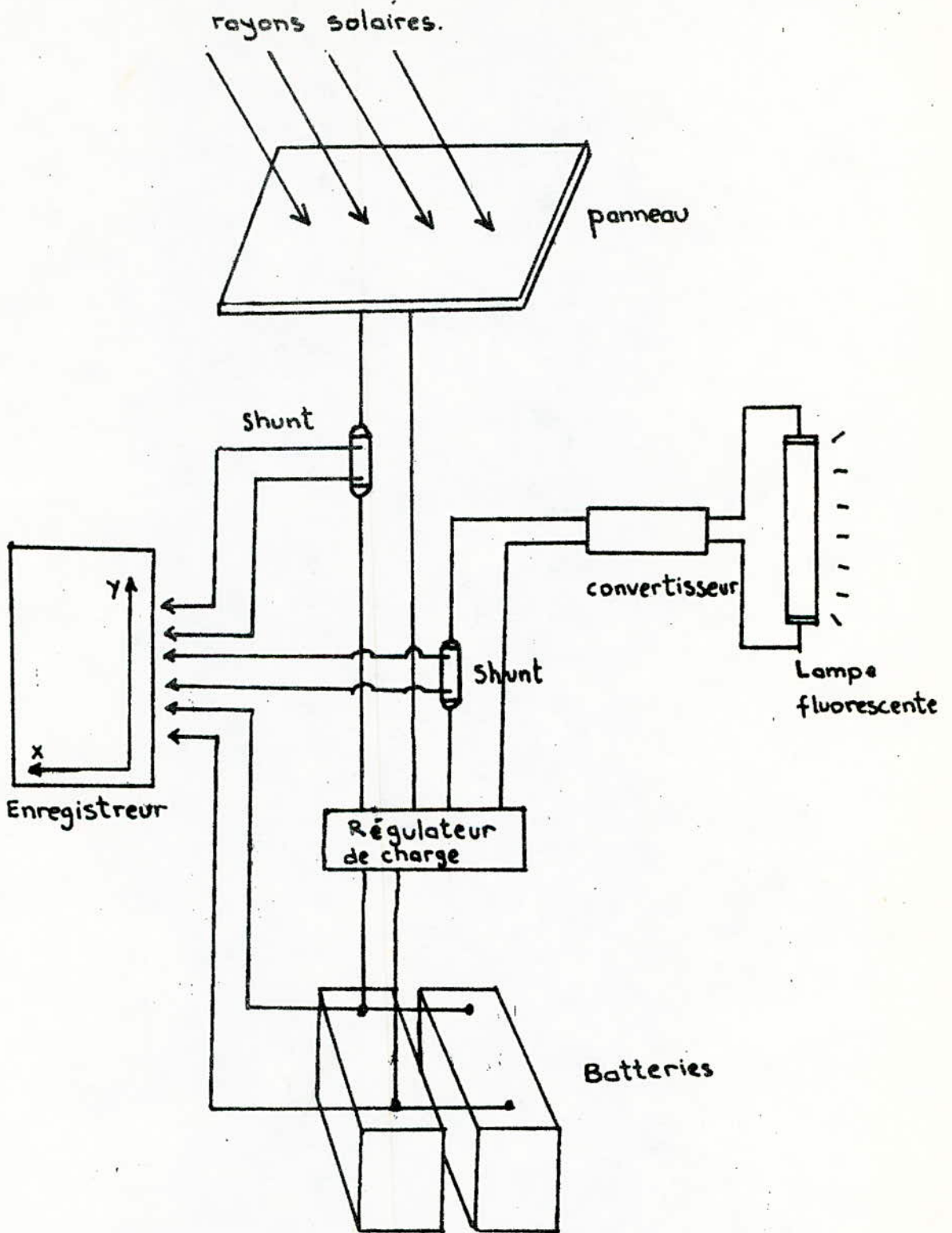


Fig 3.3 Schéma synoptique de l'installation.

3.3.2-Les techniques de mesure des divers paramètres

a- Relevé des caractéristiques I-V du panneau sharp.

Nous avons relevé ces caractéristiques à l'aide d'un appareil constitué d'un système de voltmètre et d'ampèremètre et une résistance variable.

La fig 3.4 indique le réseau de courbes obtenu à différents éclairagements et différentes températures. Nous remarquons que la tension à vide V_0 est voisine de 20v et le courant de court circuit I_{cc} est pratiquement proportionnel à l'éclairément.

Pour $E = 920 \text{ W/m}^2$ et $t = 33,6^\circ\text{C}$ on a :

V_0 (V)	I_{cc} (A)	V_m (V)	I_m (A)	P_m (w)
20	2,2	15	2	30

b- Mesure du flux solaire

Le rayonnement solaire global reçu par le panneau est enregistrée à l'aide du pyranomètre.

c- Mesure de la température.

Les mesures de températures sont faites à l'aide

d'une sonde de platine, que nous l'avons collé sur la face arrière du panneau.

d- Mesure du courant débité par le panneau

Nous mesurons le courant débité par le panneau grâce à un shunt placé en série avec ce panneau. Aux bornes de ce shunt nous prélevons une tension proportionnelle au courant le traversant. Cette tension est injectée dans le canal de l'enregistreur.

Le calibre utilisé est 100 mv. Connaissant la valeur de la résistance du shunt (0,1V, 5A)

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

nous déduisons l'échelle graduée en ampères

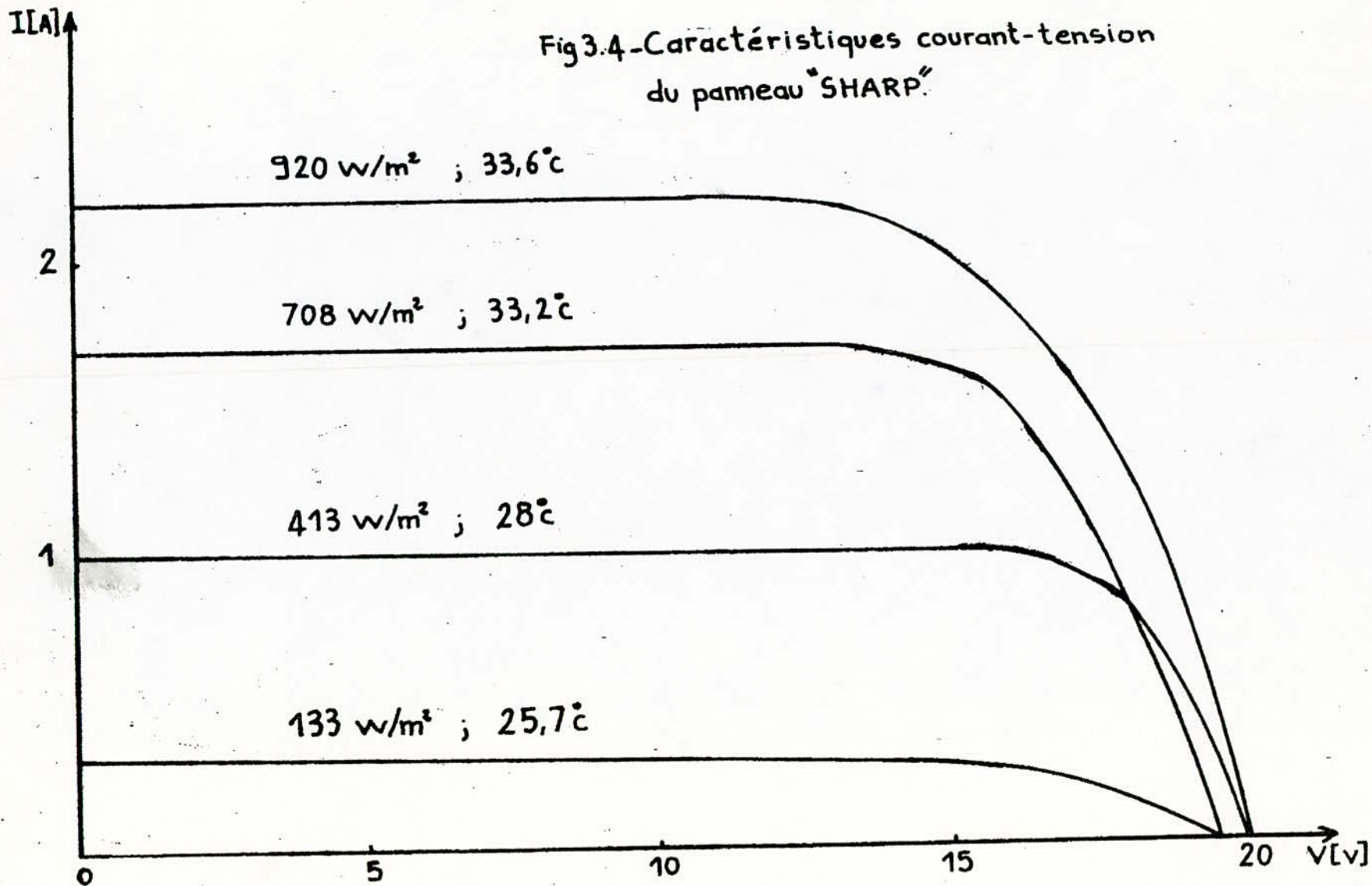
$$I = \frac{U}{R_{sh}} = \frac{100 \text{ mV}}{0,02 \Omega} = 5A$$

Soit 1A/5cm

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

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

Fig 3.4 - Caractéristiques courant-tension
du panneau "SHARP".



e. Mesure du courant dans le récepteur

Nous procédons de la même façon que pour la mesure du courant débité par le panneau. Le shunt (0,1V, 5A) est placé en série avec la charge. Le calibre utilisé est 50mV.

$$I = \frac{50\text{mV}}{0,02\Omega} = 2,5\text{A}$$

soit 1A/10 cm.

f- Mesure de la tension aux bornes de la batterie

Celle-ci est directement enregistrée. Le calibre utilisé est 25 V, soit 1V/1cm.

3.3.3-Mesures

Nous avons mesuré les paramètres précédents pendant deux semaines. La figure 3.5 donne un exemple des enregistrements faits le 24 novembre 1984.

Il convient de remarquer que la plupart des courbes obtenues n'ont pas la même régularité d'allure que celle des caractéristiques de la fig 3.5. Ainsi par temps nuageux, les fluctuations obtenues sont très importantes et on ne peut exploiter facilement les résultats.

Résultats des mesures

Calcul de W_{ϕ}

L'énergie solaire E reçue par unité de surface est représentée par l'aire limitée par la courbe (1). L'intégrale de cette courbe, évaluée au planimètre donne une surface de 152 cm^2 .

Sachant que 3 cm^2 correspondent à 100 wh/m^2 d'après l'échelle adoptée, d'où $E = 5066 \text{ wh/m}^2$.
soit $W_{\phi} = E.S = 5066 \cdot 0,322 = 1631 \text{ wh}$.

Calcul de W_c

Le courant débité par le panneau dans la journée du 24 novembre 1984 est représenté par l'aire limitée par la courbe (2). L'intégrale de cette courbe, évaluée au planimètre, donne une surface de 133 cm^2 .

Sachant que 15 cm^2 correspondent à 1 Ah d'après l'échelle adoptée, on déduit la valeur de :

$$I = \int I(t) dt \text{ en A.H, soit } I = 8,87 \text{ Ah}$$

Théoriquement, pour calculer l'énergie convertie par le panneau le 24 novembre 1984, il faut faire le produit $V.I$, point par point des deux courbes $V(t)$ et $I(t)$, c'est-à-dire les courbes (4) et (2) de la figure 3.5. 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 $V(t) \sim V_{\text{moy}} = 13,2 \text{ V}$.

L'énergie convertie par le panneau solaire le 24.11.84 sera $W_c = 8,87 \cdot 13,2 = 117 \text{ Wh}$.

Calcul du rendement de conversion η_p

Si W_ϕ est l'énergie solaire reçue par le système et W_c l'énergie convertie par le panneau solaire, le rendement de conversion η_p sera défini par la relation :

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

Dans notre cas $\eta_p = \frac{117}{1631} \approx 0,072$

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 (4) en régime de décharge et (5) de la fig 3.5. Ensuite, il faudra évaluer l'aire limitée par la courbe $V.I(t)$. Celle-ci représente W_a qui vaut dans ce cas 88 Wh.

Calcul du rendement de la batterie d'accumulateurs

Si W_a est l'énergie consommée par le récepteur et W_c l'énergie convertie par le panneau solaire, on définit le rendement η_a de la batterie par la relation suivante :

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

Par conséquent dans notre cas :

$$\eta_a = \frac{88}{117} = 0,75$$

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 :

$$\eta_a \cdot \eta_p = \frac{88}{1631} = 0,054$$

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

	Panneau	Batterie	Système
	η_p	η_a	$\eta_p \cdot \eta_a$
Valeurs théoriques	0,1	0,7	0,07
Valeurs expérimentales	0,072	0,75	0,054

CONCLUSION

L'utilisation de l'énergie solaire par conversion photovoltaïque pour l'éclairage extérieur dans des lieux isolés, devient de nos jours économiquement justifiée.

Pour qu'un système électrique photovoltaïque de faible puissance travaille avec un rendement maximal, il faut optimiser les dimensions des panneaux solaires et des accumulateurs. Cette opération nécessite la connaissance des données météorologiques du site considéré et des données de consommation en énergie.

L'éclairage extérieur par effet photovoltaïque présente des avantages assez séduisants tels que :

* Facilité d'installation :

pas de tranchées d'accès, réduction du génie civil.

* Entretien minimum :

batteries rechargées en permanence grâce à la lumière du jour.

* Eclairage autonome :

moindre coût pour les services publics, pas de raccordement au réseau électrique.

* Sécurité :

basse tension évitant les risques d'électrocution.

Les expériences et les résultats auxquels nous avons abouti, nous confirment sur l'intérêt grandissant de telles installations photovoltaïques.

ANNEXE

L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Le phénomène physique de l'effet photovoltaïque

La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire de piles solaires, constituées de cellules solaires, selon un processus appelé couramment effet photovoltaïque.

Par définition l'effet photovoltaïque est un effet photoélectrique qui ne peut se produire que s'il existe les deux phénomènes suivants :

- 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.

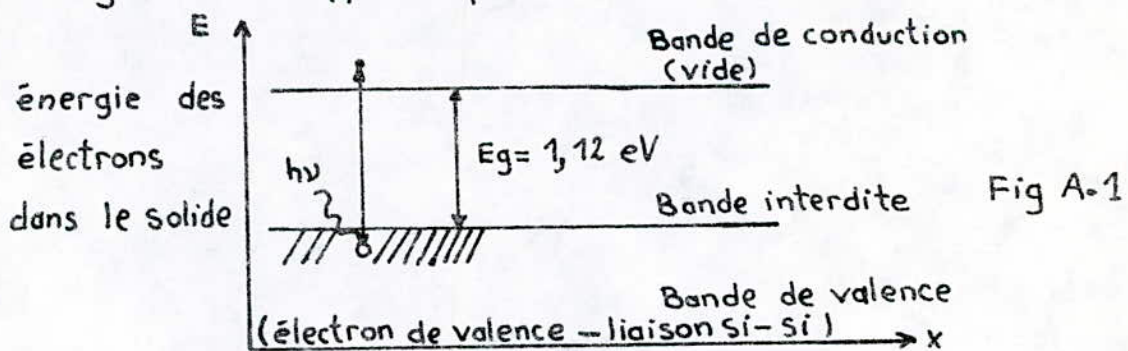
Absorption du rayonnement solaire

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 charges excités avant de revenir à leur état stable. Cette possibilité de migration va nous permettre d'utiliser les charges libres ainsi créées.

La génération des porteurs libres 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 A.1). 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 appelés paires électron-trou.



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 Planck 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 $1,12 \text{ eV}$.

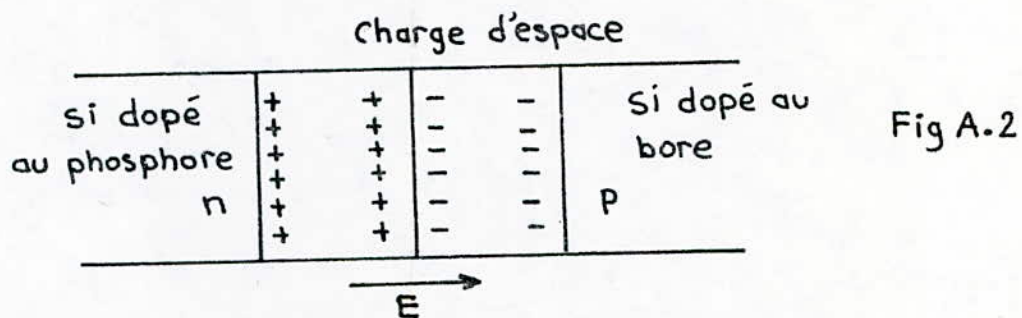
Physiquement, ce seuil d'énergie correspond à l'énergie nécessaire pour arracher un électron d'une liaison de valence Si-Si; cet électron devient alors libre de se mouvoir dans le matériau. Le mouvement d'un trou correspond à la compensation, par un autre électron de valence, de la lacune ainsi créée.

Séparation des charges

La deuxième condition pour l'obtention d'un courant photo-électrique 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 (électron 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 A.2).



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 et on peut écrire le courant I fourni à la charge :

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

L'expression mathématique du courant I délivré par la photopile en fonction de la tension à ses bornes est :

$$I = I_{ph} - I_s \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{kT} - 1\right)$$

avec $I_{ph} = K'E$ photocourant.

E : éclairement.

I_s : courant de saturation.

R_s : résistance série.

q : charge d'un électron.

k : constante de Boltzman.

T : température en degré Kelvin.

Nos relevés expérimentaux nous confirment l'approche théorique. En effet (voir fig 2.5), on remarque que pour un éclairement faible variant entre 0 et 360 w/m^2 , ce qui correspond au fonctionnement entre 7h 30 mn et 8h 55 mn, l'intensité de sortie du panneau est négligeable (0,08A).

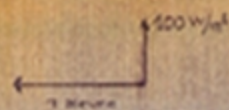
D'autre part on remarque toujours d'après la fig 2.5 lorsque l'éclairément atteint une certaine valeur de seuil équivalente à 380 w/m^2 ce qui correspond à 9h, l'intensité de sortie du panneau accuse une brusque augmentation (point B à C). Par contre, on remarque que l'intensité de sortie du panneau accuse une brusque chute (Point D) lorsque l'éclairément atternt 700 w/m^2 , ce qui correspond à 14h 20 mn.

BIBLIOGRAPHIE

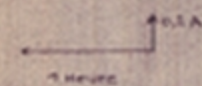
- 1/_ Evaluation des énergies renouvelables pour les pays en développement. [commissariat à l'énergie solaire (COMES)]. 1980.
- 2/_ M. Barrabé - J. Luc Chevalier "Energies nouvelles - Energie pour la vie"
- 3/_ W. PALZ "L'électricité solaire"
Dunod - UNESCO. 1981.
- 4/_ EMILE BONNAFOUS "Installations électriques et domestiques" 1979.
- 5/_ Encyclopedie des sciences industrielles.
QUILLET (Electricité - Electronique) 1973.
- 6/_ Technique de l'ingénieur.
Electricité - Electrotechnique.
- 7/_ Aide mémoire "Electrotechnique appliquée"
Dunod 1979
- 8/_ A. ADDANE "Etude expérimentale du dimensionnement d'une centrale solaire à conversion photovoltaïque"
- 9/_ M. HADDADI "Etude de quelques systèmes photovoltaïques"
- 10/_ EL HENDISS N°6

Echelles

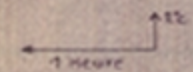
1- Flux solaire



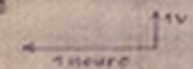
2- Courant débité par le panneau



3- Température du panneau



4- Tension aux bornes de la batterie



5- Courant dans le récepteur

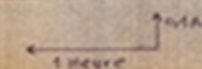


FIGURE 3.5

MESURE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE L'INSTALLATION

Enregistrement effectué le 24 novembre 1984

