

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES
(INGENIORAT EN ELECTRONIQUE)

ETUDE DE LA FAISABILITE D'UNE INSTALLATION
D'UNE BALISE RADIOELECTRIQUE A L'AEROPORT
HASSI MESSAOUD ALIMENTEE PAR CONVERSION
PHOTOVOLTAIQUE



PROPOSE PAR
M^r A. ADANE

ETUDIE PAR
AREZKI ABBAS
ABDELHAMID OUNISSI

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENNE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES
(Ingeniorat en électronique)

ETUDE DE LA FAISABILITE D'UNE INSTALLATION D'UNE BALISE
RADIOELECTRIQUE A L'AEROPORT DE HASSI MESSAOUD
ALIMENTEE PAR CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

PROPOSE PAR :

M^r ADANE

ETUDIE PAR :

AREZKI ABBAS
ABDELHAMID OUNISSI

PROMOTION : JANVIER 83

Remerciements

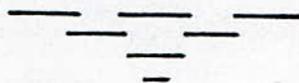
Le présent travail a été effectué sous la direction de Monsieur A. ADANE docteur-ingénieur, chef du département électronique à L'ENPA

Qu'il veuille bien trouver ici le témoignage de gratitude et de nos sincères remerciements pour son dévouement et la profonde amitié dont il nous a entourés.

Nous tenons de même à remercier vivement nos chers amis Djaffer - Khodja Ahmed, Chabani Lakhdar et tous leurs collègues de travail pour nous avoir apporté leur aide précieuse à l'élaboration de cette thèse.

Nous adressons également nos vifs remerciements au Directeur de l'ENEMA et tout le personnel des départements électronique et électricité pour leur accueil chaleureux.

Toute notre sympathie à tous ceux qui directement ou indirectement ont contribué à notre formation.



Dedicaces

A toute ma famille
A tous mes amis

Arezki ABBAS

A toute ma famille
Abdelhamid OUNISSI

Table des Matières

Chapitre I

- I Introduction (1)
- I.2. Balisage Lumineux
 - I.2.1. Balisage d'approche
 - I.2.2. Balisage à flash stroboscopique
 - I.2.3. Balisage d'angle d'approche
 - I.2.4. Balisage des pistes d'envol et d'atterrissage
 - I.2.4.1 Montage sur sol
 - I.2.4.2. Montage encastré
 - I.2.5. Balisage des pistes de roulement. Eclairage d'aires de stationnement
 - I.2.6. Phares et appareils indicateurs
 - I.2.7. Feux d'obstacle et de danger
- I.3. Alimentation électrique d'un aéroport (5)
- I.4. Problèmes liés à la radionavigation (9)
 - I.4.1. le radioguidage
- I.5. Classifications géométriques des systèmes
 - I.5.1. les systèmes angulaires ou radiaux
 - I.5.2. les systèmes hyperboliques
 - I.5.3. les systèmes circulaires
- I.6. Tableau résumant l'ensemble des systèmes de radionavigation et de radioguidage
- I.7. Etude sommaire de quelques systèmes de radionavigation
 - I.7.1. les procédés de grandes distances (11)
 - I.7.1.1. le système LORAN
 - I.7.2. La Navigation courtes distances
 - I.7.2.1. Le D.M.E
 - I.7.2.2. Le V.O.R.
- I.8. le Radioatterrissage (15)
 - I.8.1. le radioalignement à enchevêtrement des champs HF
 - I.8.2. le radioalignement à enchevêtrement de modulation
 - I.8.3. le système I.L.S (18)

- I.8.4. Les radiobornes
- I.9. Choix de la charge (21)
- I.9.1. Alimentation de la balise radioélectrique
- I.10. Les photopiles (23)
- I.10.1. Définition
- I.10.2. Constitution
- I.10.3. Production de l'effet photovoltaïque
- I.10.4. Absorption du rayonnement solaire
- I.10.5. Séparation des charges
- I.10.6. Caractérisation du module ARCO 16.200
- I.11. Stockage de l'électricité (29)
- I.11.1. Les accumulateurs au plomb
- I.11.1.1. Constitution
- I.11.1.2. Charge d'un élément d'accumulateur au plomb
- I.11.1.3. décharge d'un élément d'accumulateur au plomb
- I.11.1.4. Caractéristiques des accumulateurs au Plomb
- I.11.2. Charge des batteries à l'aide de panneaux solaires

Chapitre II

Dimensionnement de la balise Solaire

- II.1. Introduction (32)
- II.2. Généralités sur le rayonnement solaire (34)
- II.2.1. Energie solaire reçue sur une surface plane en fonction de son orientation
- II.2.2. orientation optimale du capteur
- II.2.3. Calcul de la durée d'un jour
- II.2.4. Evolution de la durée d'ensoleillement dans l'année
- II.2.5. Evaluation des fluctuations d'énergie
- II.3. Cas de l'installation de la balise dans la zone d'Alger (42)
- II.3.1. Courbe d'ensoleillement
- II.3.2. Recherche de l'optimum de l'énergie reçue en fonction de l'orientation θ des panneaux
- II.4. Courbe de charge (44)
- II.5. Exploitation des données solaires mesurées à Alger

- II.5.1. Estimation de la courbe à ondulations minimales et détermination de l'ensoleillement moyen journalier annuel
- II.6. Détermination du nombre de panneaux solaires (52)
- II.7. Calcul de la capacité des accumulateurs (56)
 - II.7.1. Stockage de l'excès saisonnier
 - II.7.2. Stockage de la consommation quotidienne
 - II.7.3. Stockage des fluctuations mensuelles
 - II.7.3.1. Calcul de l'énergie convertie perdue dans un creux d'énergie
- II.8. Conclusion (59)
- II.9. Cas d'implantation de la radiobalise à Hassi-Messaoud
 - II.9.1. Extension du calcul à Hassi-Messaoud (59)
 - II.9.1.1. Cas où $\Delta W^+ = \Delta W^-$
 - II.9.1.1.1. Calcul du nombre de panneaux solaires (63)
 - II.9.1.1.2. Calcul de la capacité des accumulateurs
 - II.9.1.2. Cas $\Delta W = 0$
- II.10. Conclusion (65)

Chapitre III

- III. Réalisation expérimentale (66)
 - III.1. Simulation de l'installation
 - III.2. Schéma du montage (67)
 - III.3. Conception du coupleur électronique associé à la radiobalise
 - III.4. Schéma du montage (68)
 - III.4.1. Principe de fonctionnement
 - III.5. Adaptation des panneaux à la radiobalise (71)
 - III.6. Association et protection des panneaux solaires (73)
 - III.7. installation sur le terrain des panneaux solaires
 - III.8. Considérations économiques (74)
 - III.8.1. Calcul du coût du Watt. installé

Conclusion

légende des abréviations

Bibliographie

Introduction

La croissance de la demande énergétique dans le monde a largement stimulé la recherche de nouvelles sources d'énergie et l'énergie solaire est une des sources la plus prometteuse qui offre la perspective d'un approvisionnement illimité en énergie non polluante. De par ses possibilités, le champ d'application de l'énergie solaire ne cesse de s'agrandir et des réalisations de plus en plus performantes ont vu le jour. Bien que le prix des cellules solaires reste encore assez élevé, l'utilisation de la conversion photovoltaïque pour des systèmes de petites puissances dans les zones isolées devient de nos jours économiquement justifié.

Parmi ces utilisations, l'alimentation d'équipements radioélectriques par l'énergie solaire est l'une des plus intéressantes.

L'objet de notre travail est de calculer la taille d'une installation solaire destinée à alimenter en électricité une balise radioélectrique ILS de puissance absorbée 24W et fonctionnant sur la fréquence centrale de 75 MHz. La radiobalise a pour rôle de guider les avions à leur atterrissage à l'aéroport de Hassi-Messaoud.

Ce travail se décompose en trois principaux chapitres se présentant comme suit :

1. le premier chapitre consiste en une analyse générale du balisage d'aéroport suivi d'un bref aperçu des principes généraux de la conversion photovoltaïque.
2. le chapitre deux traite quant à lui du dimensionnement proprement dit de la balise solaire. Cette étude a été précédée par une introduction au rayonnement solaire, étude nécessaire pour l'optimisation de toute installation photovoltaïque.
3. la troisième partie traite de la conception du circuit électronique du système d'alimentation par conversion photovoltaïque ainsi que d'une ébauche d'étude économique du système.

Chapitre I

I - INTRODUCTION

Le balisage et la signalisation des routes aériennes et des aérodrômes sont destinés à faciliter aux navigateurs aériens aux moyens d'aides visuels et radios les diverses manœuvres que comportent aussi bien la circulation en vol et au sol que l'atterrissage et l'envol.

Ce chapitre est consacré à l'étude générale du balisage lumineux et du balisage radio.

I.2. Balisage Lumineux

Pour remédier aux problèmes de navigation que pose la circulation aérienne au décollage et à l'atterrissage, dans la nuit et dans des conditions de visibilité limitée, des dispositifs optiques ont été créés. Ce sont notamment

- Le balisage d'approche
- Le balisage à flash stroboscopique.
- Le balisage d'angle d'approche (VASI)
- Le balisage des pistes d'envol et d'atterrissage
- Le balisage des pistes de roulements, éclairage et aire de stationnement
- Phares et appareils indicateurs
- Feux d'obstacle.

Nous indiquons dans ce qui suit leur rôle et leur lieu d'implantation dans l'aéroport considéré.

I.2.1 Balisage d'approche

C'est un système de feux de guidage avec lequel toutes les pistes d'envol et d'atterrissage doivent être équipées pour les services aériens de nuit et par mauvais temps. La longueur du balisage est fixée à 900 m à partir du feu le plus éloigné jusqu'au seuil de la piste.

Selon la disposition des feux, on distingue essentiellement deux systèmes

- système de balisage d'approche CALVERT (figure 1)
- système de balisage d'approche ALPA-ATA (figure 2)

On utilise comme feux d'approche des projecteurs à hautes intensités avec ouverture de sortie de la lumière d'un seul côté.

Ils sont orientés dans le système d'approche de telle sorte qu'ils éclairent

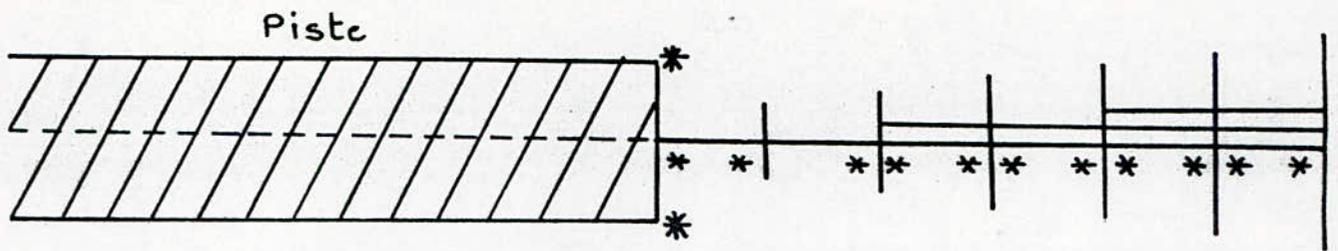


Figure 1

balisage à flash stroboscopique du système d'approche en ligne CALVERT

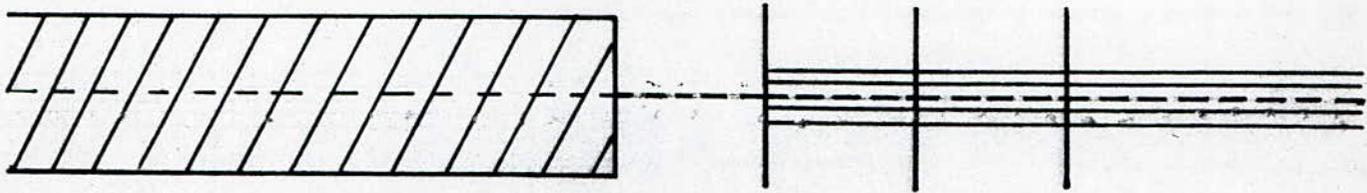


Figure 2

balisage d'approche ALPA-ATA

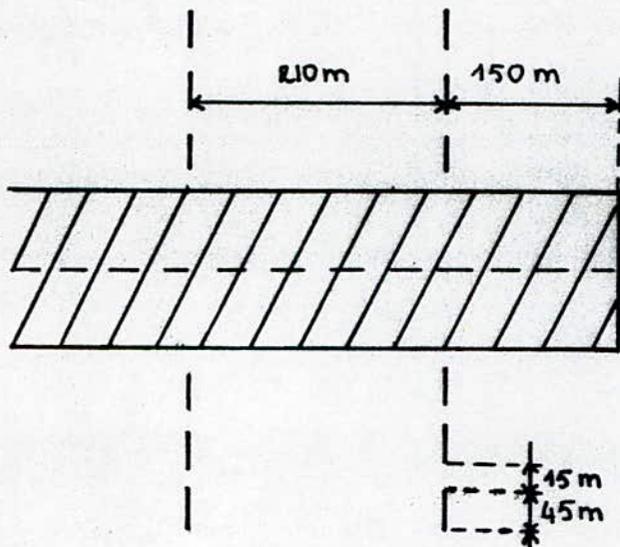


Figure 3

balisage d'angle d'approche

l'espace délimité par l'angle d'approche et les tolérances du système (ILS)
la clarté des feux à hautes intensités peut être adaptée aux conditions de visibilité
En plus du balisage à haute intensité, on prévoit souvent un balisage d'approche à basse intensité équipé de feux rouges omnidirectionnels

I.2.2 Balisage à flash stroboscopique

Pour augmenter davantage la sécurité de la navigation dans la zone d'approche, le balisage d'approche est complété en plus par des flashes stroboscopiques. Ils sont caractérisés par une forte intensité lumineuse et grâce au mouvement périodique du flash, l'approche est reconnaissable à grandes distances et possibles dans des conditions de visibilité réduites. Il se compose de 30 feux installés sur l'axe central d'approche à côté des feux fixes (fig 1). Il est prévu de plus 2 feux stroboscopiques au seuil de la piste. La commande des feux est en général électronique

I.2.3 Balisage d'angle d'approche (VASI)

Le VASI est un auxiliaire d'atterrissage qui marque l'angle d'approche correcte et indique optiquement au pilote d'un avion en fin de vol d'approche la voie de descente jusqu'au point d'atterrissage. Le VASI comporte 12 feux disposés derrière le seuil des deux côtés de la piste d'atterrissage comme l'indique la figure 3. Chaque feu comprend 3 projecteurs à miroir elliptique.

Quand le vol d'approche est effectué normalement sur la voie d'approche la chaîne de feux avant paraît blanche, la chaîne arrière rouge.

Si le vol d'approche est trop haut, en dessus de la voie d'approche les 2 chaînes de feux paraissent blanches

Si le vol d'approche est trop bas, les 2 chaînes de feux paraissent rouges

I.2.4 Balisage des pistes d'envol et d'atterrissage

I.2.4.1 Montage sur sol

Les installations de balisage pour les pistes d'envol et d'atterrissage comprennent

- le balisage du seuil
- le balisage des bords
- le balisage de l'axe central

- le balisage de la zone d'atterrissage

Les feux peuvent être montés sur le sol ou encastrés

Pour le balisage des bords de pistes et une partie au moins du balisage du seuil on utilise des feux montés sur le sol.

Un balisage des bords de la piste d'envol est installé pour les vols de nuit. Il se compose de deux rangées de feux parallèles à l'axe central et montés à distances régulières. On utilise des feux fixes blancs dont l'intensité lumineuse peut être réglable de la tour de contrôle. Les feux sont des projecteurs émettant dans la direction d'envol et d'atterrissage et dans la direction opposée.

Les feux de piste d'envol sont en général alimentés avec de la basse tension (6 à 30)V et sont équipés de lampes à incandescence de (100 à 200)W ou de lampes à halogènes de même puissance et selon l'intensité lumineuse exigée.

I.2.4.2 Montage encastré

Les pistes d'envol et d'atterrissage pour le trafic aérien international doivent avoir un marquage de l'axe central qui s'étend sur toute la longueur de la piste et forme ainsi le prolongement optique de la ligne de base d'approche. Par mauvais temps et pour les vols de nuit, le marquage est constitué par un système de feux à haute intensité encastrés. Ils ne constituent aucun obstacle pour les avions qui décollent, atterrissent ou roulent. Lorsque la piste est utilisée dans les 2 sens, les feux rayonnent dans les 2 directions. Les feux (Lampes à halogènes 100W) peuvent être allumés séparément et adaptés aux conditions de visibilité.

I.2.5 Balisage des pistes de roulement - Eclairage d'aires de stationnement

Les pistes de roulements ou voies de dégagements rapides ont pour but d'accélérer le dégagement de pistes pour les avions qui viennent d'atterrir. Elles sont donc nécessaires pour assurer un trafic rapide entre la piste d'envol et d'atterrissage et l'aire de stationnement. Elles doivent être équipées d'installations de balisage pour les vols de nuit et par mauvaise visibilité. Des feux de balisage des bords et des axes centraux sont prévus à cet effet.

Le balisage des bords de la piste de roulement comporte des feux fixes équipés de lampes à incandescence émettant de la lumière bleue dans toutes les directions. L'axe central comporte des feux encastrés à moyenne ou basse intensité qui émettent de la lumière verte dans toutes les directions.

En plus des pistes de roulement, les aires de stationnement sont aussi éclairées

Des projecteurs à jets de lumière en diverses exécutions ont été conçus dans ce but. Des feux encastrés roulables à caractéristiques omnidirectionnelles servent au marquage des terrains de garage.

I.2.6. Phares et appareils indicateurs

Selon les directives de l'OACI chaque aéroport destiné aux services de nuit doit être équipé d'un phare. Ce phare doit être installé sur l'aéroport ou dans le voisinage immédiat. Les phares d'aéroport sont des feux tournants. Les aéroports qui ne peuvent être reconnus sans ambiguïté la nuit en l'air par d'autres moyens optiques doivent être en outre équipés d'un feu de repérage vert. Sur tous les aéroports, il doit au moins y avoir un indicateur de direction du vent ^{visible} aussi bien de l'avion en vol qu'au sol.

I.2.7. Feux d'obstacles et de danger

Tous les objets se trouvant dans le voisinage des aéroports doivent être équipés d'un balisage d'obstacle dans leur espace d'attente et secteur d'approche s'ils peuvent mettre en danger le trafic aérien. Ce balisage doit signaler la nuit et dans de mauvaises conditions de visibilité l'étendue des obstacles en surface et en hauteur et contribuer ainsi à la sécurité de la circulation aérienne. Les feux d'obstacles sont disposés isolément ou en groupes sur la pointe de l'obstacle. Ils sont parfois doublés pour parer à une éventuelle panne. Les feux d'obstacles sont des feux fixes qui émettent une lumière rouge omnidirectionnelle. Les obstacles de grandes surfaces ou très élevés sont signalés en plus par des feux de danger. Ce sont des feux clignotants qui émettent également de la lumière rouge dans toutes les directions.

Pour compléter l'exposé sur le balisage lumineux, nous donnons en figure 4 un plan schématique représentant la disposition des feux d'un aéroport de classe internationale.

I.3. Alimentation électrique d'un aéroport

L'alimentation en courant d'un aéroport avec toutes ses installations s'effectue normalement depuis le réseau public. Le système d'alimentation des stations et des sous stations, des divers centres de consommation sont munis de groupes de secours à démarrage automatique qui prennent en charge l'alimentation des parties principales de l'installation en cas de défaillance du réseau. Les systèmes de balisage radio font partie des principaux éléments d'installations et constituent des centres de consommations importants.

Si pour les balises lumineuses, l'alimentation se fait presque toujours à partir du réseau public, les radiobalises sont parfois appelées à être installées sur des sites isolés ou l'utilisation de l'énergie électrique demanderait des dépenses considérables. L'idée est donc de se servir de l'énergie solaire pour alimenter la balise

Cette étude qui sera développée plus loin constituera d'ailleurs le principal sujet de notre projet de fin d'études.

Ceci dit, revenons à l'alimentation des balises lumineuses et disons tout de suite qu'il existe deux modes de raccordement pour alimenter les feux de balisage disposés le long d'une piste.

- En parallèle ou en série

Dans le montage en parallèle des feux, la chute de tension à l'extrémité du câble conduit à une intensité lumineuse décroissante qui peut tromper le pilote d'un avion s'appêtant à atterrir.

Pour obtenir une intensité lumineuse uniforme, on a pour cette raison adopté le montage série. Pour éviter que le circuit soit interrompu quand une lampe saute, les lampes ne sont pas insérées directement dans le circuit série mais branchées aux enroulements secondaires des transformateurs d'isolement dont les enroulements primaires sont insérés dans le câble d'alimentation

Les transformateurs d'isolements sont logés dans des pots accolés ou associés aux feux ou bien ils sont posés directement dans la terre comme les transformateurs à la résine ou au néoprène.

L'alimentation série (la plus généralement utilisée) nécessite l'utilisation d'un régulateur à courant constant et de lampes spécialement conçues pour un courant nominal de 6.6A. L'intensité lumineuse des feux (brillance) peut être contrôlée soit sur le régulateur, soit par télécommande à partir de la tour de contrôle

Le plan schématique de la figure 4 représente les dispositions générales du balisage lumineux d'un aéroport de classe internationale ; la piste de 3600 m est utilisable dans les deux sens (N) et (S) ; pour les aéroports de classe inférieure, les pistes ne dépassent pas en général 2000 m et un balisage moins complet est retenu.

1- Approches de seuil : Feux de moyenne ou haute intensité pour le système CALVERT

Feux de haute intensité uniquement pour L'ALPA-ATA

2- Entrée de piste : En plus du balisage du bord de piste, l'entrée de piste comporte un balisage de voie étroite et sur le côté de la piste.

- un dispositif d'angle d'approche pour les avions atterrissant
- un dispositif de barrettes signalant la fin de piste pour les décollages

3- Dégagements rapides

4- partie centrale de piste : le balisage ne comporte que

- le balisage latéral de bord de piste
- le balisage axial.

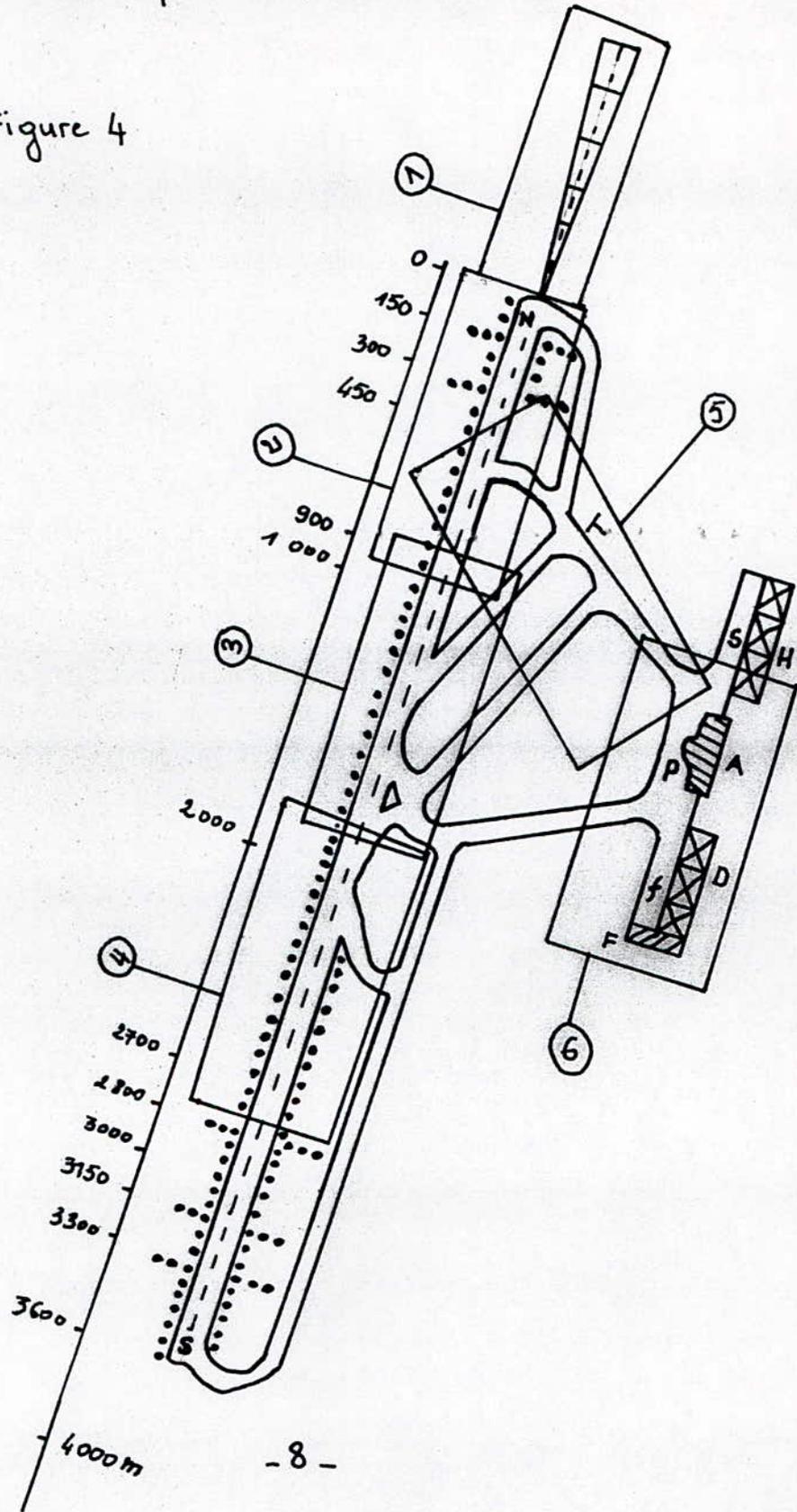
5- Annexes - services : Ce sont les voies de circulations, les aires d'embarquement et la tour de contrôle

- 6-
- A - aéroport passagers
 - F - Gare de fret
 - P - aires d'embarquement
 - S - aires de services

- D: docks de douanes - Magazins
- H: Hangars (entretien des avions)
- f: aire de mouvement de fret

Disposition générale du balisage
Lumineux d'un aéroport de classe internationale

Figure 4



I.4. Problèmes Liés à La radionavigation

La radionavigation est un ensemble de techniques et procédés permettant de définir la position d'un mobile par de moyens radioélectriques. Ces moyens définissent dans l'espace des lignes de positions, lieux géométriques de points représentant une propriété caractéristique des signaux reçus tels que : amplitude, phase, différence de taux de modulation... Son rôle est donc de fournir au pilote de façon continue ou au moins de temps à autre, les coordonnées géographiques de l'avion, son altitude, sa route, sa vitesse à partir de repères fixes identifiés.

I.4.1. Le radioguidage

C'est un ensemble de techniques permettant de matérialiser dans l'espace des trajectoires par des moyens radioélectriques.

I.5. Classifications géométriques des systèmes

Suivant la nature géométrique des lignes de position (Fig 5) on peut distinguer

I.5.1 les systèmes angulaires ou radiaux

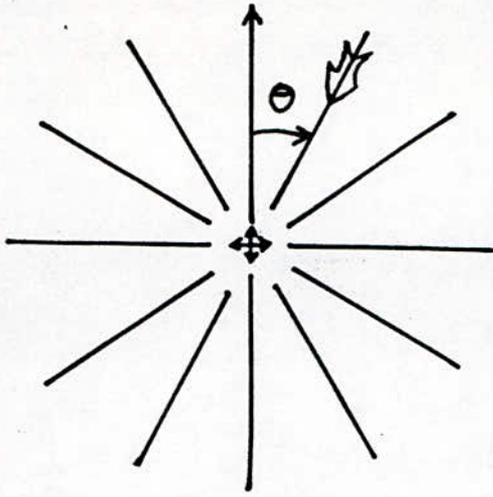
La position du mobile est déterminée par rapport à une direction de référence (Nord magnétique). Ce procédé est surtout adapté aux courtes distances, à l'approche et à l'atterrissage.

I.5.2 les systèmes hyperboliques

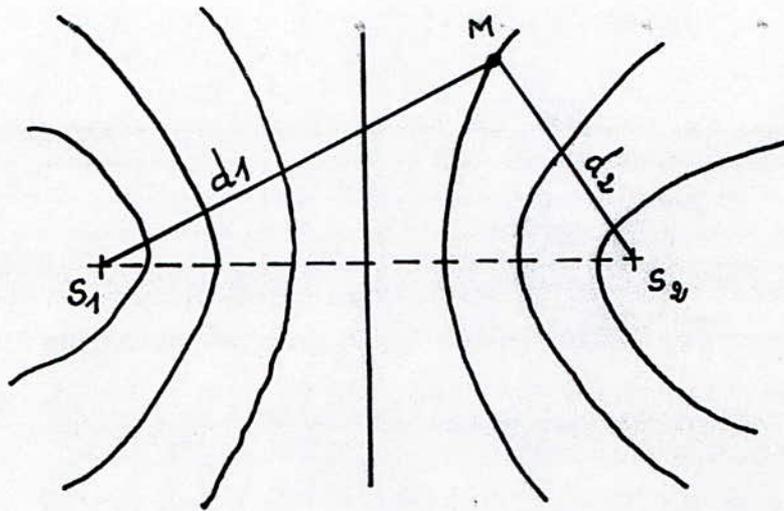
Ils sont basés sur la réception de deux émissions synchronisées (en différence de phase ou en différence de temps) émanantes de deux stations données. Ils sont utilisés en moyennes ou grandes distances.

I.5.3. Les systèmes circulaires (ou de mesure de distance)

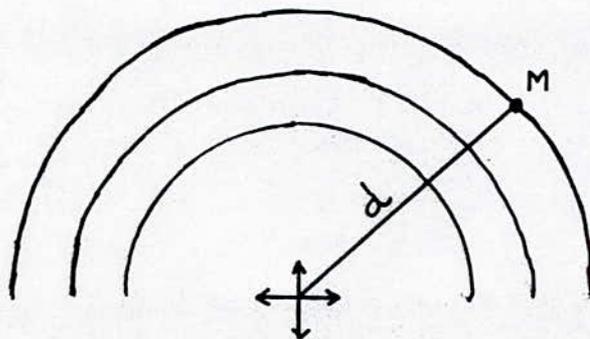
Les lignes de position sont des cercles centrés sur la station. C'est la famille des radars.



a- SYSTEME ANGULAIRE
 $\theta = \text{cste}$



b- SYSTEME HYPERBOLIQUE
 $d_1 - d_2 = \text{cste}$



c- SYSTEME circulaire
 $d = \text{cste}$

Figure 5

I.6 Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des systèmes de radionavigation et de radioguidage

gamme de fréquences	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
	10K	30K	300K	3M	30M	300M	3G	30G
propagation { onde directe onde de ciel onde de sol	•	•	•	•	•	•	•	•
	•	•	de nuit	•	•	•	•	•
	•	•	•	•	•	•	•	•
grandes et moyennes distances	OMEGA	LORAN C DECCA	CONSOL LORANA RADIOCOMPAS		VOR	TACAN DME	SATELLITES RADARS DE SURVEILLANCE	
Approche Atterrissage			RADIOCOMPAS RADIOBALISES		VOR DME ILS		GCA RADARS D'AERODROMES	

I.7. Etude sommaire de quelques systèmes de radionavigation

I.7.1. Les procédés de grandes distances

Ils permettent aux avions

- de connaître leur position de façon continue
- le guidage continu suivant tout itinéraire désirable
- le guidage automatique au vol
- Un fonctionnement indépendant des perturbations atmosphériques
- L'utilisation simultanée par un nombre illimité d'avions
- L'avertissement à bord de tout défaut de fonctionnement.

I.7.1.1. Le Système Loran

C'est un procédé de radionavigation de la famille des systèmes hyperboliques dont les lignes de position sont des hyperboles homofocales (fig 5b)

obtenues par comparaison des signaux en provenance de deux stations éloignées

a - Principe général

Il consiste à mesurer l'intervalle de temps qui sépare l'arrivée des impulsions provenant de deux émetteurs éloignés l'un de l'autre de plusieurs kilomètres. Cet intervalle est le chiffre inscrit sur l'hyperbole qui passe par la position de l'avion. Etant donné que les stations au sol sont fixes, les hyperboles lieux des points d'égalité de différences de distances peuvent être surimprimées sur des cartes de navigation.

Il existe trois variantes de Loran

- Standard Loran
- SS. Loran
- Loran C

b - caractéristiques principales

Les chaînes Loran comportent 3 à 4 émetteurs suivant la zone à couvrir et les possibilités géographiques d'implantations.

Toutes les stations rayonnent sur une même fréquence : 100 KHz

Les émetteurs actuellement en service rayonnent des impulsions de 100 Kw environ et leur portée au dessus de la mer et de jour atteint parfois 1000 Km. la portée sur terre est rarement supérieure à 400 Km.

I.7.2. Navigation courtes distances

Les procédés de navigation à courte distance sont utilisés

- pour donner au pilote des indications visuelles continues de la distance et de l'azimut par rapport à tout point choisi à l'intérieur de la zone couverte par le système
- permettre au pilote de suivre toute route désirée et de calculer l'heure estimée d'arrivée

- Pour le vol automatique

- Pour permettre un fonctionnement indépendant des conditions atmosphériques

Pour cela plusieurs procédés radio-électriques sont élaborés pour répondre à ces besoins (voir tableau I.6).

I.7.2.1. Le DME (équipement de mesure de distance)

a. But Il s'agit de donner en lecture directe et permanente l'indication de la distance oblique entre l'avion et une station au sol déterminée

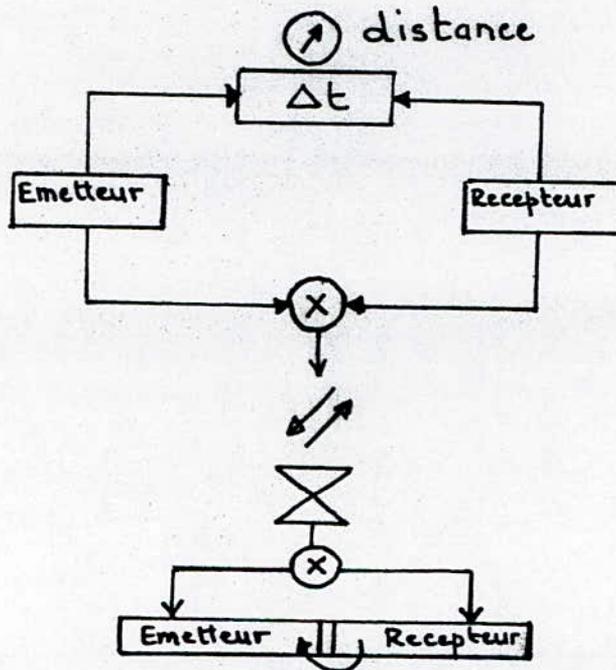
b. Principe : La distance est calculée d'après la mesure du temps de propagation aller-retour d'impulsions émises à bord et renvoyées par la station au sol appelée "transpondeur". Ce dernier présente un temps de rémission normalisé à 50 μ s et donc si l'intervalle de temps (μ s) entre émission et réception vaut Δt , la distance s'en déduit :

$$d_m = 150 (\Delta t - 50)$$

puisque l'onde électromagnétique parcourt 300 m/ μ s

le DME est prévu de manière à desservir plusieurs avions simultanément

La figure ci-dessous représente le schéma d'acheminement de l'information



c. Transpondeur au sol : Il est caractérisé par son antenne à rayonnement omnidirectionnel en polarisation verticale. La puissance de l'émetteur varie de 1 à 10 kW crête. Sa portée est fixée en fonction des besoins opérationnels

I.7.2.2 Le VOR ou radiophare omnidirectionnel VHF

a. But Le VOR permet à un avion de déterminer son relevement par rapport au radiophare dans toutes les directions. Il corrige les inconvénients des radiophares à rotation lente qui ne donnaient pas des indications continues et instantanées de l'azimut de l'avion.

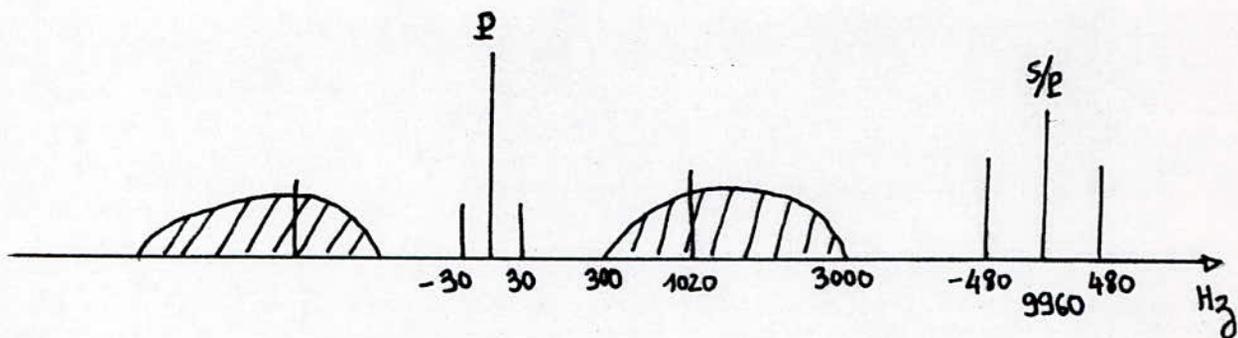
b. Son principe : Il consiste à créer un champ radioélectrique modulé à 30 Hz dans lequel la phase de la modulation soit caractéristique du relevement de l'observateur.

c. Caractéristiques principales

Le VOR rayonne une porteuse VHF établie dans la bande de fréquence (108 - 118) MHz en polarisation horizontale. La porteuse est modulée simultanément par deux signaux de navigation à 30 Hz et une modulation d'amplitude par :

- Une sous porteuse d'amplitude constante mais de fréquence variable 30 fois par seconde (modulation de fréquence)
- Un signal 30 Hz dont la phase par rapport au 30 Hz est égal à l'azimut magnétique dans lequel le signal est rayonné
- Un signal audible 1020 Hz émis à la cadence des 2 ou 3 lettres morses de l'indicatif (3 fois par minute).
- Eventuellement un signal de radiotéléphonie de spectre (300-3000) Hz

Le spectre du signal VOR est donné par la figure suivante.



I-8. Le Radioatterrissage

Le problème du radioatterrissage consiste à donner au pilote des indications de bords, des signaux de guidage précis sur la trajectoire de descente vers la piste à mesure qu'il approche.

Plusieurs systèmes ont été mis au point pour rendre aisé l'atterrissage des avions. Parmi ceux utilisés actuellement, L'ILS est l'aide à l'approche normalisée par l'OACI.

Avant de voir la structure de L'ILS, rappelons les principes généraux qui régissent les radio-alignements.

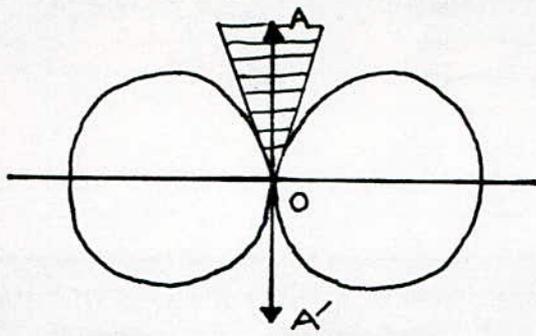
On distingue deux modes de radio-alignements

- Les radio-alignements à enchevêtrement de champs HF
- Les radio-alignements à enchevêtrement de modulation...

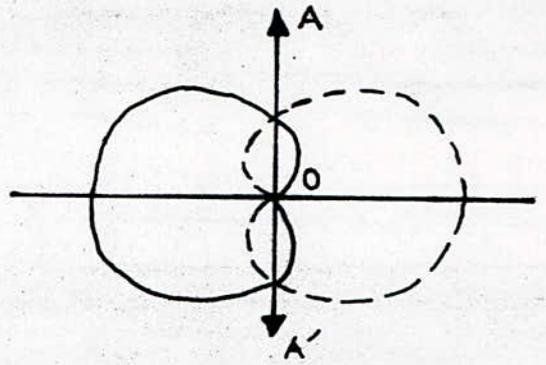
I-8.1. Le radio-alignement à enchevêtrement des champs HF

Le diagramme de rayonnement d'un cadre émettant en ondes pures figure 6a constitue un exemple de radio-alignement. Dans le plan vertical qui contient OA et OA', on observe une annulation du champ émis mais le minimum observé dans le récepteur est flou. c.à.d. dire qu'au lieu d'avoir un axe fin, on obtient une large zone de champ nul. Pour affiner davantage l'axe, on dispose une antenne au centre du cadre, on obtient ainsi une caractéristique en forme de cardioïde (figure 6b) placée symétriquement de part et d'autre de l'axe OAA' suivant la phase des courants dans l'antenne et dans le cadre. Donc en inversant périodiquement la phase de l'antenne (ou cadre), on obtiendra un alignement suivant l'axe OAA' ou les signaux auront la même intensité quelque soit la phase. L'espace se trouve alors divisé en deux régions par le plan vertical et l'on perçoit à l'aide d'un récepteur accordé sur la longueur d'onde émise un trait continu constitué par l'enchevêtrement de deux signaux Morse complémentaires d'égale intensité et de part et d'autre de l'axe l'un seulement des deux signaux (figure 7) qui caractérise le côté où se trouve l'avion. Le dispositif qui donne un tel alignement est représenté par l'émetteur de la figure 8

zone de minimum flou



a - Diagramme de rayonnement d'un cadre



b - Diagramme d'un cadre et d'une antenne

Figure: 6 a, b

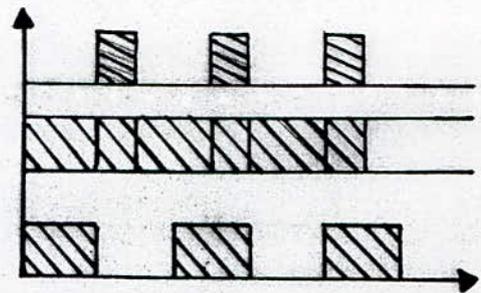
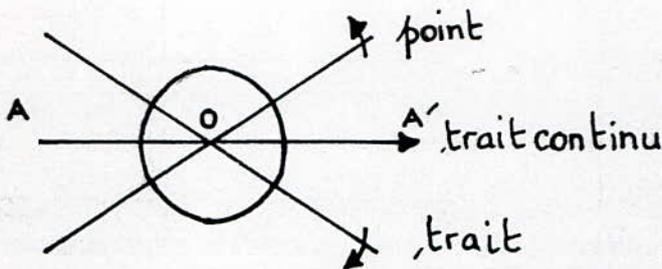


Figure: 7

principe d'enchevêtrement des signaux complémentaires

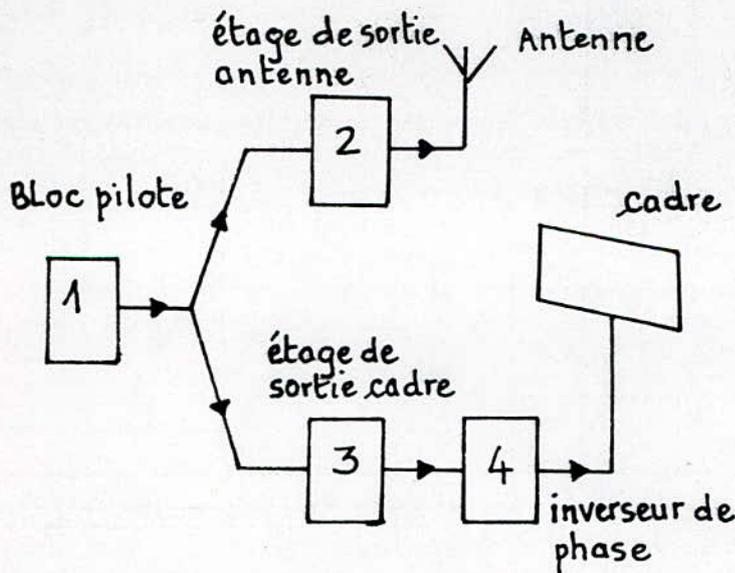


Figure 8 : Emetteur pour signaux enchevêtrés

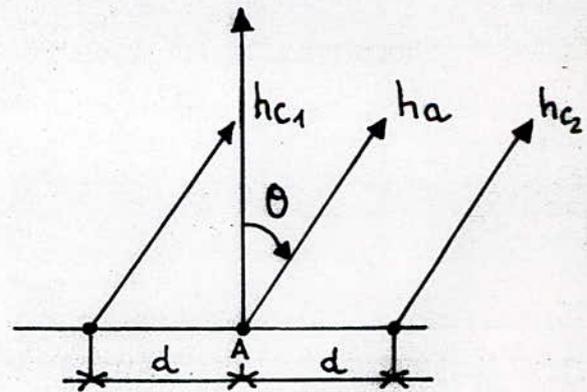


Figure 9: champs rayonnés par les aëriens antenne et cadre dans l'enchevêtrement de modulation

I.8.2 Le Radioalignement à enchevêtrement de modulation

Les radio-alignements à enchevêtrement de champs ne procurent pas un axe fixe et une portée importante de l'émission à cause de la variation du champ résultant (somme ou différence des champs cadre et antenne) - les radioalignements à enchevêtrement de modulation corrigent cet inconvénient. On remplace à cet effet le champ cadre par un champ modulé totalement avec suppression de l'onde porteuse et on module partiellement le champ antenne alternativement en phase et en opposition de phase avec la modulation du cadre à la cadence des signaux enchevêtrés. Ce dispositif permet ainsi d'affiner l'axe et augmente la portée du champ.

Pour saisir davantage cela, examinons le fonctionnement du radioalignement L'aérien est le système cadre-antenne comportant 3 brins verticaux. Pour que les champs produits par le cadre et l'antenne se trouvent en phase, il est nécessaire que leurs tensions d'excitations soient déphasées de $\pi/2$. Le champ résultant sera alors la somme algébrique des champs.

Si de plus, avec un artifice quelconque, la phase du cadre se trouve inversée à la fréquence de modulation, en absence de toute modulation de l'étage antenne, le champ qu'il produit peut être considéré comme un champ porteur modulé par le champ du cadre privé de porteuse qui lui apporte ses deux bandes latérales.

Considérons les champs rayonnés par les aériens de la figure 9, nous avons dans la direction θ

$$- h_a = A (1 + K \cos \Omega t) \cos \omega t$$

$$- h_c = h_{c1} + h_{c2} = C \cos \Omega t [\sin(\omega t - \alpha d \sin \theta) + \sin(\omega t + \alpha d \sin \theta)]$$

$$- h_c = C \cos \Omega t (\sin \alpha d \sin \theta) \cos \omega t$$

$\alpha d \sin \theta$ est la différence de marche entre les rayons émis

$\alpha = 2\pi/\lambda$ est le coefficient de propagation.

K est le taux de modulation de l'antenne, ω la pulsation du champ porteur et Ω celle de la modulation

le champ total est donné par la relation

$$h = h_a + h_c = A \left[1 + \left\{ K + \frac{C}{A} \sin(\alpha d \sin \theta) \right\} \cos \Omega t \right] \cos \omega t$$

le taux de modulation global K' est donc

$$K' = K + \frac{c}{A} \sin(\alpha d \sin \theta)$$

et l'on voit immédiatement que ce taux composé varie avec l'azimut θ on a sur l'axe du radioalignement $\theta = 90^\circ$ et $K' = K$.

I.8.3. Le système ILS (système d'atterrissage aux instruments)

L'ILS est un système d'atterrissage complet qui comporte :

- Un radiophare d'alignement de piste (Localizer) pour le guidage en direction, qui définit le plan vertical passant par l'axe de piste.
- Un radiophare d'alignement de descente (Glide) pour le guidage en hauteur qui permet de définir le plan de descente de pente 3° environ.
- 3 radiobornes (markers) : repères de distance au seuil.

Les radiophares sont établis dans la bande (108-112) MHz et rayonnent en P.H. La figure 10 donne un plan schématique d'implantation des balises.

Le radiophare directionnel est basé sur le principe de l'enchevêtrement des diagrammes de modulations décrit précédemment. Toutefois, afin que l'indication soit visuelle, la manipulation par signaux Morse a été remplacée par une double modulation. On module donc simultanément en amplitude une porteuse (VHF ou UHF) par des signaux BF (90 et 150) Hz de telle façon que les taux de modulation de chacune de ces fréquences soient fonction de l'azimut. Sur l'axe du radio-alignement les taux sont égaux, de part et d'autre on crée la prépondérance de l'une ou l'autre fréquence. Le récepteur de bord comporte deux voies BF qui débitent après détection sur un microampèremètre à zéro central. L'aiguille de cet appareil reste au zéro quand les 2 composantes BF sont égales, elle dévie à droite ou à gauche quand elles sont inégales.

Les diagrammes de rayonnement correspondants aux deux modulations ont la forme générale de la figure 11

I.8.4. Les radiobornes

Ces sont des émetteurs VHF à diagramme de rayonnement très directif vers le zénith et donnant à bord des indications de distance restante par rapport au seuil

SYSTEME ILS

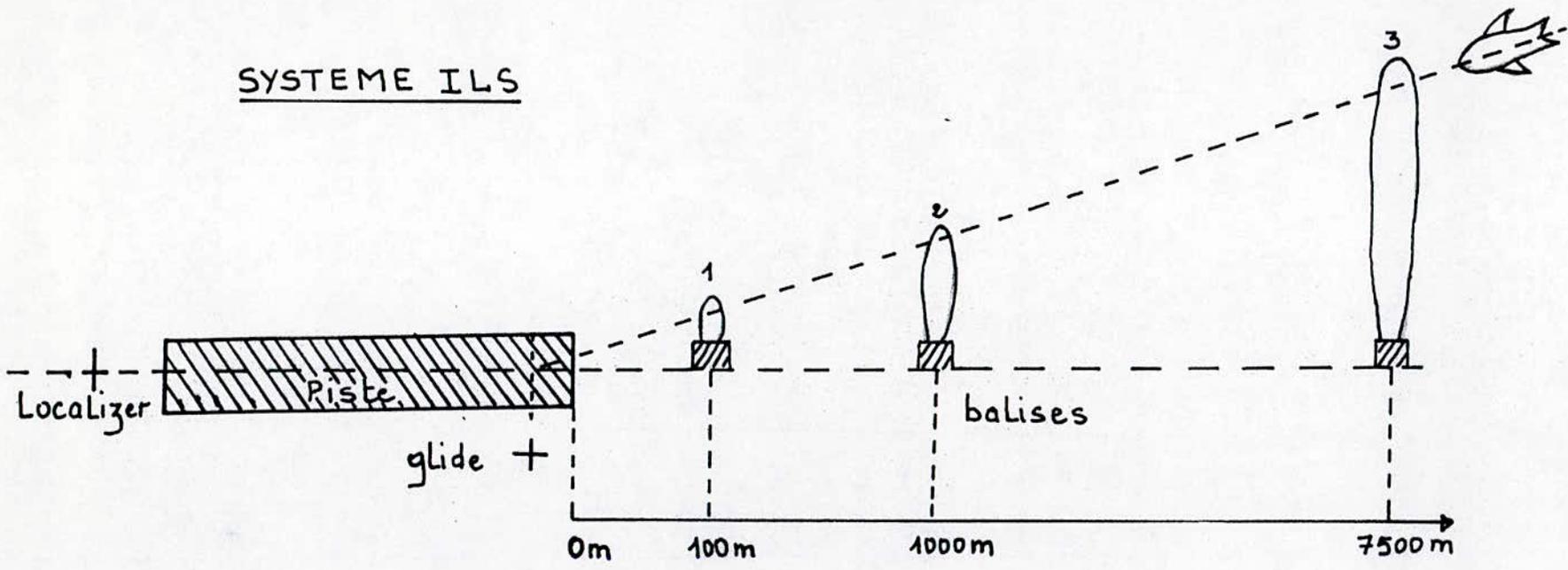


Figure 10 : schéma d'implantation des radiophares et des radiobalises

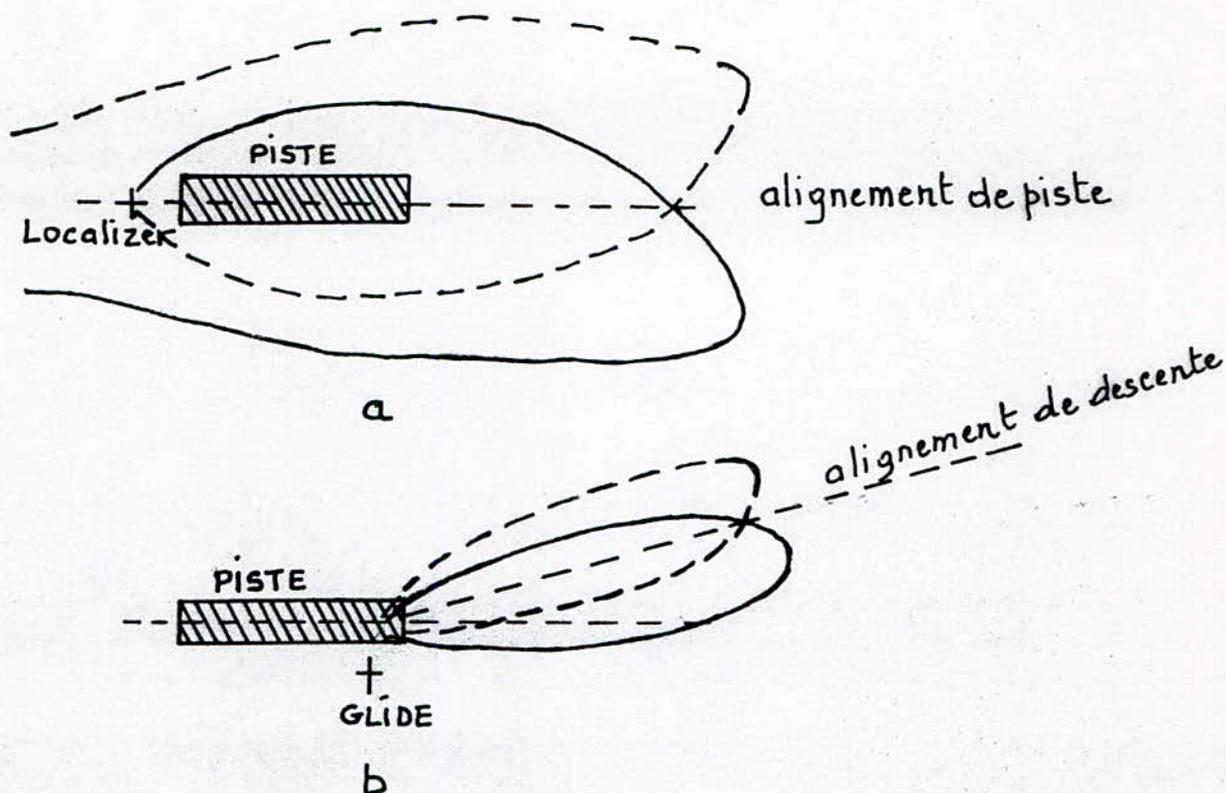


Figure : 11 a.b

Diagrammes de rayonnement des radiophares d'alignement

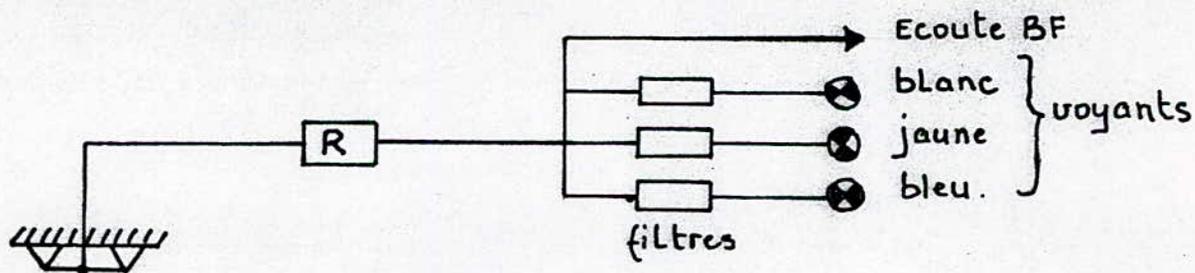


Figure 12

Dispositif de reception à bord de l'avion

a. But leur but est de marquer le passage de l'avion au dessus de la station par une indication à bord auditive et visuelle. Il existe généralement trois radiobalises disposées à des distances déterminées comme l'indique la figure 10

Ce sont des stations de petites puissances émettant sur 75 MHz en polarisation horizontale. le pilote les distingue les une des autres par les signaux auditifs et visuels qu'il reçoit (figure 12) - La consommation de chaque balise n'excède pas 50w

b. Caracteristiques pratiques

le tableau suivant donne les caracteristiques des balises associées aux ILS

	P (w)	Modulation Hz	Manipulation = point = trait	installation / piste	Distance à l'altitude du glide
balise exterieure (outer marker)	5	400	• - / -	7500 m	600 m
balise interieure (middle marker)	5	1300	2 fois • - / -	1000 m	300 m
balise d'entrée (boundary)	5	3000	6 • / -	100 m	50 m

I.9 Choix de La charge

Après ce bref aperçut sur les systèmes de radionavigation et de radio guidage nous, nous proposons d'alimenter une radiobalise en energie electrique par conversion photovoltaique - Il se trouve qu'à l'ENEMA, l'alimentation de l'outer marker (à installer à Hassi-Messaoud) à partir du reseau public pose de sérieux problèmes aux responsables de cet organisme. Ces complications qui sont dues essentiellement à l'éloignement (7500^m) et au site du lieu d'implantation de la balise, nous ont permis de developper l'idée d'utiliser l'energie solaire pour répondre aux besoins énergetiques qu'exige ce genre d'installation

Avant de rappeler les principes généraux de la conversion photovoltaïque nous donnons ci-dessous les caractéristiques principales de la radiobalise à installer

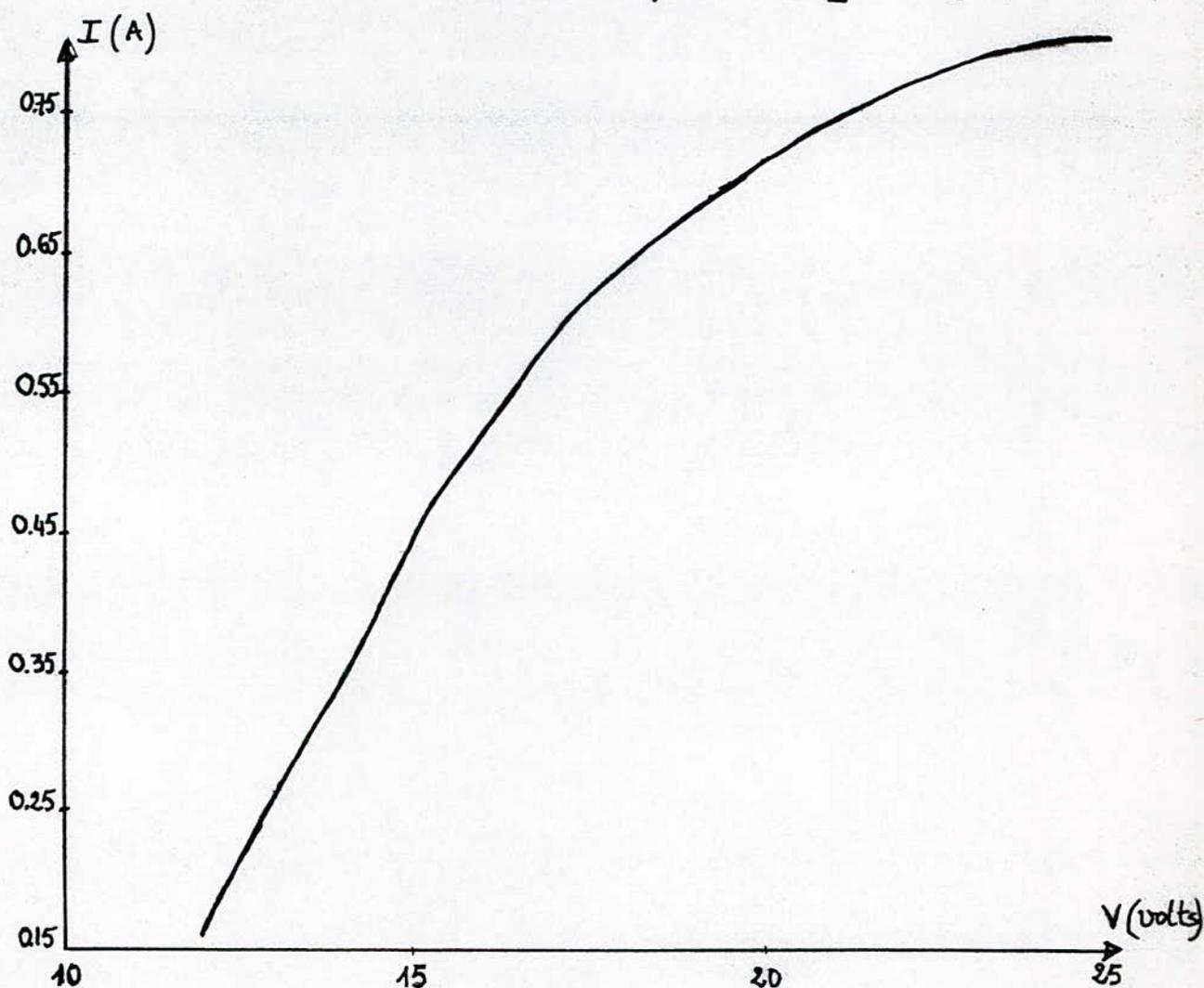
Le marker est du type N 318A de la firme NARDEUX. Elle est constituée par

- 2 chassis d'émission 2w à 75 MHz
- 1 chassis d'émission auxiliaire à 108 MHz pour télécontrôle
- 1 chassis d'émission de commande contrôle avec basculage automatique d'émetteur normal à émetteur de secours.

I. 9. 1 Alimentation de la radioborne

la radiobalise est alimentée en tension continue ($24V \pm 20\%$). En fonctionnement normal, sa consommation est d'un ampère approximatif.

La courbe suivante représente la caractéristique de charge $I=f(V)$ du marker



I.10 LES PHOTOPILES

I.10.1. Définition : Une photopile (ou cellule solaire) est une jonction PN de grande surface qui utilise l'effet photovoltaïque pour transformer directement l'énergie solaire en énergie électrique

I.10.2. Constitution

Une photopile est obtenue en prenant une pastille de silicium (Si) dopée P sur laquelle on crée par diffusion une couche très mince N ($0.5\mu\text{m}$) qui sera exposée à la lumière solaire. Ensuite on réalise sur les couches N et P des contacts ohmiques nécessairement de faible résistance de manière à réduire les chutes de tensions lors du fonctionnement de la cellule

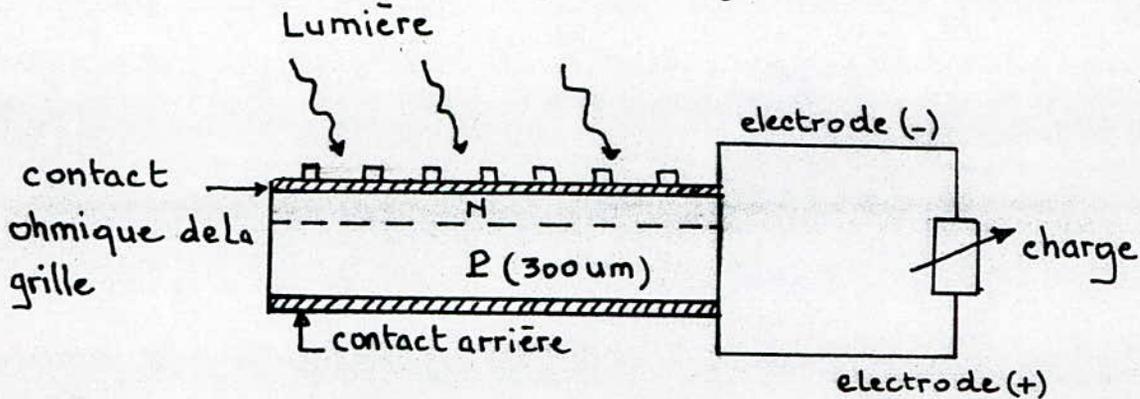


Schéma de Principe d'une photopile

I.10.3. Production de l'effet photovoltaïque

On peut définir l'effet photovoltaïque comme une production de l'énergie électrique résultant directement de l'interaction des photons qui composent la lumière avec les électrons d'une structure cristalline semi-conductrice. Cette énergie électrique est disponible aux bornes de la cellule par le fait qu'il y a :

- création de paires électron-trou par absorption du rayonnement solaire.
- séparation des charges ainsi créés par le champ électrique dû à la barrière de potentiel de la jonction PN.

I.10.4. Absorption du rayonnement solaire

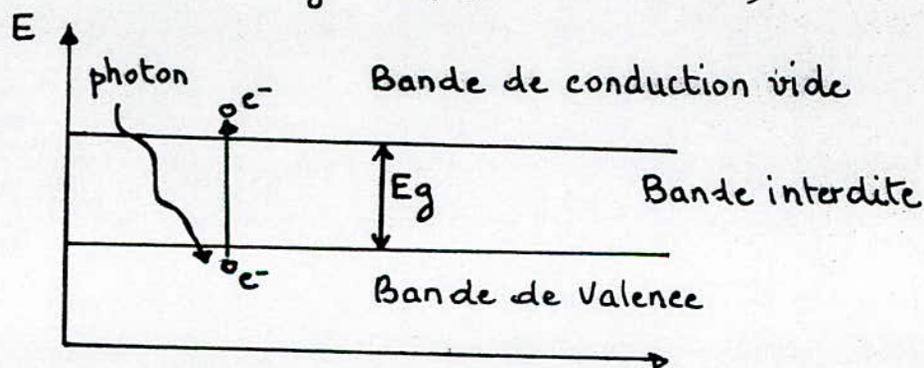
De façon générale, l'interaction de la lumière et d'un matériau fait qu'une partie de l'énergie du faisceau incident est transmise aux électrons du solide.

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 les métaux du fait que les semi-conducteurs possèdent une bande interdite.

Les porteurs libres vont pouvoir se déplacer dans le matériau selon une longueur moyenne appelée longueur de diffusion - Celle-ci caractérise statistiquement le parcours que peuvent effectuer ces porteurs de charge excités avant de revenir à leur état fondamental.

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 ci-dessous)



En effet si nous fournissons à un électron de la bande de valence (BV) d'un semi-conducteur une énergie supérieure ou égale à E_g , l'électron considéré passe de la BV à la bande de conduction (BC) laissant libre un "trou" dans la BV. On a ainsi formé des charges libres appelées 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 :

$$E = hc/\lambda$$

ou 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. Pour le silicium, λ_s est $1,1 \mu\text{m}$ correspondant à $E_g = 1.12 \text{ eV}$. Physiquement, ce seuil d'énergie correspond à l'énergie nécessaire pour arracher un électron d'une liaison de valence. Cet électron devient alors libre de se mouvoir dans le matériau. Le mouvement d'un trou correspond à la compensation par un autre électron-trou de valence de la lacune ainsi créée.

I.10.5 Séparation des charges

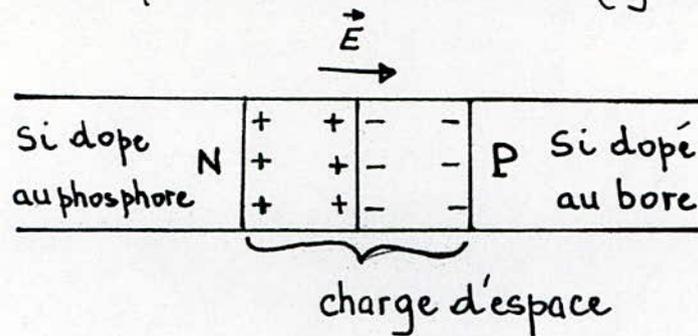
La deuxième condition pour l'obtention d'un courant photovoltaïque est que l'on puisse séparer et collecter les charges créées dans le matériau. Pour cela, il faut tout d'abord réaliser une structure présentant un champ électrique interne. Ce champ peut être obtenu de diverses façons mais nous ne considérons dans ce qui suit que le cas de la jonction PN dont nous rappelons brièvement le principe.

De manière générale, la résistivité d'un semi-conducteur est diminuée par dopage. Pour se faire, on introduit des impuretés dans le matériau et l'on obtient ainsi 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 Si pur. Le silicium de type p est dopé au bore d'où une densité de trous supérieure à celle du Si 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. Il y a alors création d'une barrière de potentiel au niveau de la jonction.

Celle-ci sera caractérisée par un champ interne \vec{E} orienté du matériau n vers le matériau p comme le montre la figure suivante.



C'est donc celui-ci qui pourra dissocier les porteurs de charges créés par absorption de la lumière dans le Si avant leur recombinaison. La condition de tri des porteurs par la barrière de potentiel est que ces porteurs puissent être créés à une distance de la zone de champ inférieure à la longueur de diffusion, ce qui explique pourquoi la couche supérieure de la photopile doit être très fine.

Il y a par la suite apparition d'un photocourant I_{ph} dans le semi-conducteur dû à la séparation des charges libres puis l'accumulation de celle-ci aux bornes de la jonction. 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 appelées porteurs minoritaires dans le cristal 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 ($V = R_s I$) et on peut écrire le courant I fourni à la charge R

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

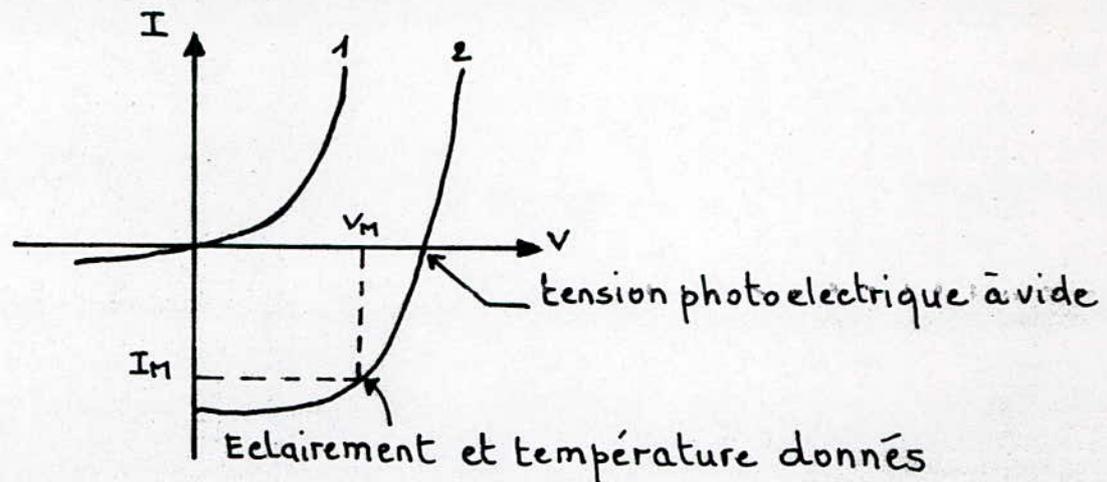
L'expression mathématique du courant I délivré par la photopile en fonction de la tension à ses bornes est :

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

avec $I_{ph} = K'E$: photocourant
 E : éclairement
 I_D : courant d'obscurité

- R_s : résistance serie
- q : charge d'un électron
- K : constante de Boltzman
- T : température en degrés Kelvin .

Cette équation nous permet de tracer le réseau de caractéristique d'une photopile $I = f(V, E, T)$
 Un exemple est donné par les courbes ci-dessous



- 1- caractéristique d'une diode
- 2- caractéristique d'une cellule solaire à éclaircement et température donnés .

Les paramètres caractéristiques de la courbe $I = f(V)$ sont :

- le courant de court-circuit I_{cc} obtenu pour $V=0$ qui est déduit de l'équation

$$I_{cc} = I_{ph} - I_D \exp\left(\frac{qV_0}{KT} - 1\right) \quad \text{ou } V_0 = R_s I$$

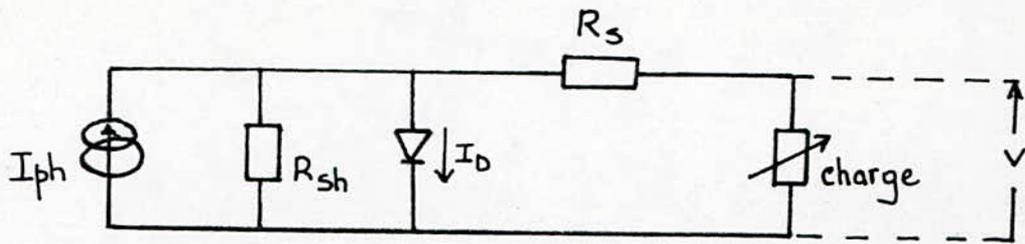
- la tension à vide V_0 obtenue lorsque $I=0$

$$I_{ph} - I_D \exp\left(\frac{qV_0}{KT} - 1\right) = 0 \Rightarrow V_0 = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_D} + 1\right)$$

- La tension V_M et le courant I_M optimaux correspondant à la puissance maximale P_m que peut délivrer la photopile pour un éclaircement et une température donnés.

$$P_m = V_M I_M = \frac{q I_{cc} V_M^2}{KT + qV_M}$$

La figure qui suit représente le schéma équivalent d'une photopile en fonctionnement.

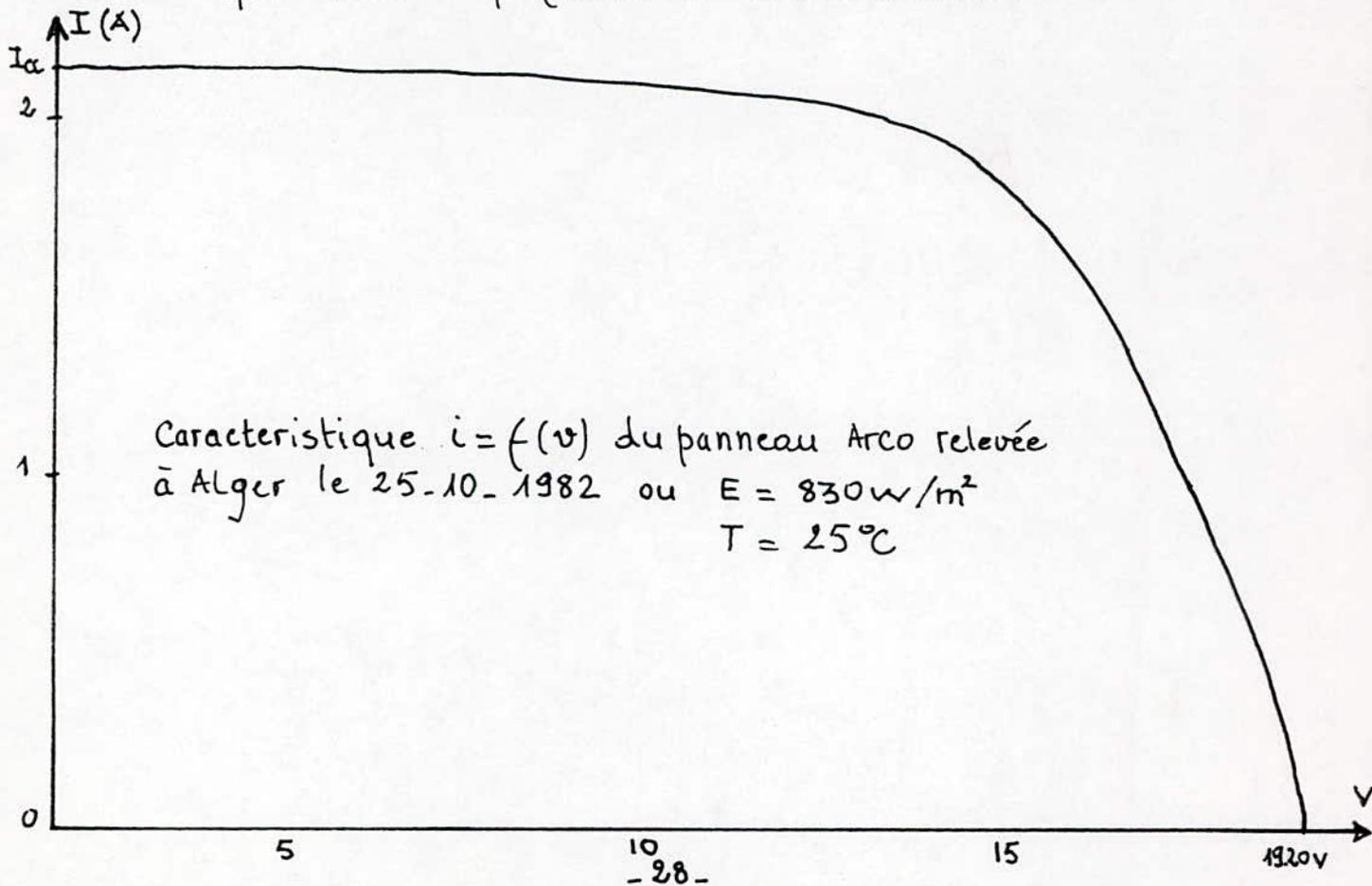


R_s caractérise les chutes de tension dues aux contacts ohmiques
 R_{sh} est la résistance shunt caractérisant le courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière - Elle est généralement supérieure à R_s

I.10.6 Caractérisation du module ARCO 16.2000

Le panneau solaire utilisé dans nos manipulations est du type ARCO 16.2000
 Pour vérifier si ses caractéristiques concordent avec celles indiquées par le constructeur nous y avons effectué quelques essais au CSTM.

La figure ci-dessous donne le tracé de la courbe obtenue pour $E = 830 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$
 Elle correspond bien aux performances du constructeur.



Caractéristiques de puissance

Explication des termes et des conditions d'essai:

Les caractéristiques du tableau 1 de droite ont été déterminées à deux températures distinctes. 28°C (82°F) est la température d'essai largement utilisée par l'industrie pour les essais en chaîne de production. Néanmoins, dans les dernières années, le Département de l'Énergie des États-Unis a recommandé que les essais soient effectués à une température plus élevée — la température moyenne annuelle dans les conditions d'exploitation. Nous présentons donc les spécifications de puissance obtenues à la température nominale d'exploitation des cellules (Nominal Operating Cell Temperature ou NOCT), soit 45°C pour nos modules. La NOCT se définit comme la température des cellules mesurée dans ces conditions:

- ☐ Flux lumineux = 80mW/cm²
- ☐ Température de l'air = 20°C
- ☐ Vitesse du vent = 1 mètre par seconde
- ☐ Montage = incliné, ouvert à l'arrière.

Une fois déterminée, la NOCT peut servir de température d'essai pour les mesures de puissance sous une intensité lumineuse de 100mW par cm² (équivalent au soleil de midi).

Toutes les caractéristiques figurant dans les tableaux 1 et 2 sont des valeurs nominales. Les modules de série peuvent présenter des variations de ± 10%.

Les résultats indiqués sur le tableau 2 "Performances des modules" sont fondés sur la moyenne annuelle en lumière solaire. L'énergie réellement obtenue sera normalement plus grande en été et plus faible en hiver.

Caractéristiques mécaniques

- Diapètre des cellules: 100mm
- Configuration des cellules:
 - 16-2000: 35 en série
 - 16-2000A: 34, en deux circuits de 17 cellules

- Longueur: 121,7cm
- Largeur: 30,2cm
- Épaisseur: 3,8cm
- Poids: 4,5kg

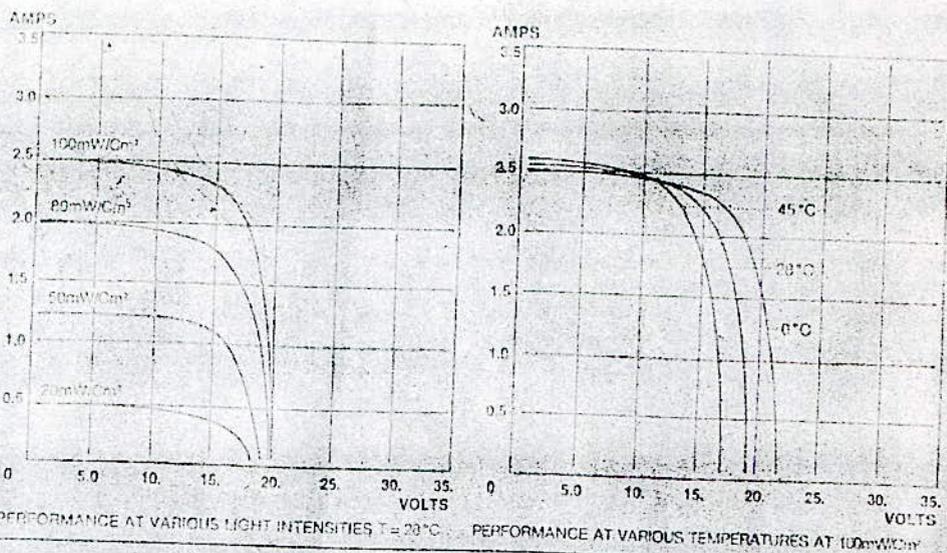


Tableau 1. Caractéristiques du module dans diverses conditions d'essai

	100mW/cm ² et 28°C			100mW/cm ² et 45°C (NOCT)		
	16-2000 12VCC	10-2000A 12VCC	6VCC	16-2000 12VCC	10-2000A 12VCC	6VCC
Tension en circuit ouvert	20,3	10,7	9,9	18,9	19,3	9,2
Courant de court-circuit	2,3	2,3	4,5	2,3	2,3	4,5
Tension à puissance maximale	16,1	15,6	7,8	14,6	14,2	7,1
Courant à puissance maximale	2,05	2,05	4,1	2,05	2,05	4,1
Puissance maximale en watts	33	32	32	30	29	29

Tableau 2. Performances des modules dans divers emplacements

Emplacements	Performances des modules (Ah par jour)		
	16-2000 12VCC	10-2000A 12VCC	6VCC
Albuquerque, Nouveau-Mexique, États-Unis	12	12	24
Caracas, Venezuela	11	11	22
Denver, Colorado, États-Unis	9	9	18
Djakarta, Indonésie	9	9	18
Nairobi, Kenya	12	12	24
Portland, Maine, États-Unis	9	9	18
Riad, Arabie Saoudite	12	12	24
St. Cloud, Minnesota, États-Unis	9	9	18

ARCO Solar, Inc.

Filiale de
Atlantic Richfield Company
20554 Plummer Street
Chatsworth, Californie 91311
U.S.A.
Telephone: 213 938 0667
Télex: 181 211

I.11. Stockage de l'électricité

L'énergie solaire trouve aujourd'hui des applications dans beaucoup de domaines autres que le balisage, télévision scolaire, pompage d'eau... On envisage même des projets de centraux téléphoniques alimentés par énergie solaire. De telles installations fonctionnent même la nuit et nécessitent donc un stockage d'énergie.

L'utilisation d'accumulateurs comme dispositif de stockage offre l'avantage de simplicité d'emploi et d'existence sur le marché. Mais l'inconvénient est qu'ils sont encombrants, peu fiables et nécessitent un entretien régulier. Il n'est pas possible de décrire ici en détail tous les types d'accumulateurs existants, il sera seulement présenté une brève revue des batteries au plomb puisque c'est elles qui offrent actuellement un rapport rendement/prix le plus intéressant et sont de ce fait les plus utilisées.

I.11.1 Les accumulateurs au plomb

Rappelons brièvement la constitution d'une batterie au plomb et son principe de fonctionnement.

I.11.1.1 Constitution

Dans un bac en matière isolante, on dispose d'une solution aqueuse d'acide sulfurique appelé électrolyte ($H_2SO_4 + H_2O$). Deux plaques de plomb (Pb) plongent dans cette électrolyte. Une couche superficielle de sulfate de Pb ($PbSO_4$) se forme à la surface de ces électrodes. La nature des deux électrodes étant la même il n'y a aucune tension entre elles.

I.11.1.2 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

2V aux bornes des électrodes

L'équation de charge se traduit de la manière suivante

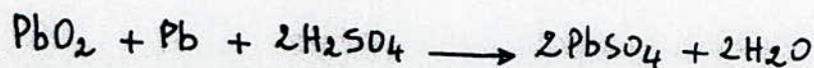


Si la f.e.m. dépasse 2.2V la batterie se surchargerait et donnerait des pertes importantes. la durée de vie des plaques de plomb diminuerait.

I.11.1.3 Décharge d'un élément d'accumulateur au plomb

Une plaque de bioxyde de plomb et une plaque de plomb pur plongées dans de l'acide sulfurique dilué constitue une pile. Un courant circule si l'on interpose une charge, il est en sens inverse du courant de charge. Le courant de la décharge produit un processus chimique tel qu'à la fin de la décharge la surface des 2 électrodes est à nouveau constituée par du sulfate de Pb. En outre il y a libération d'eau ce qui diminue la densité de l'électrolyte

la réaction électrochimique de décharge est donc



Plus la décharge est importante plus la sulfatation augmente et peut conduire rapidement à la destruction de l'accumulateur.

I.11.1.4 Caractéristiques des accumulateurs au Plomb

Les accumulateurs au Plomb sont caractérisés par :

- une f.e.m. max : 2.2 V
- une f.e.m. min : 1.8 V
- une f.e.m. en valeur nominale : 2V
- Une capacité qui va jusqu'à plusieurs milliers d'ampères heures
- Une faible résistance interne
- Un coefficient de décharge de l'ordre de 3 à 5%
- Un rendement énergétique η_{wh} d'environ 80%

$$\eta_{wh} = \frac{\text{énergie restituée à la charge}}{\text{énergie fournie à la batterie}}$$

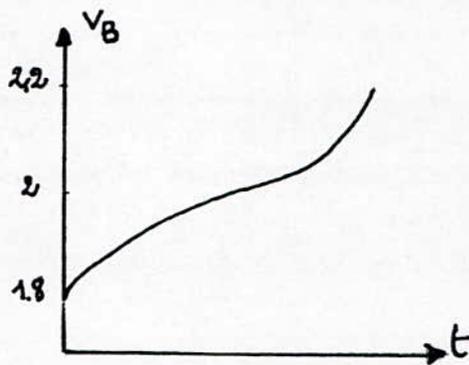
- Une bonne efficacité de charge (jusqu'à 95%)
- Une résistance mécanique acceptable

Ils sont peu coûteux et prévus pour fonctionner à des températures allant de -30°C à $+60^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de (3 à 5) ans dans le cas de notre installation.

I.11.2 Charge des batteries à l'aide de panneaux solaires

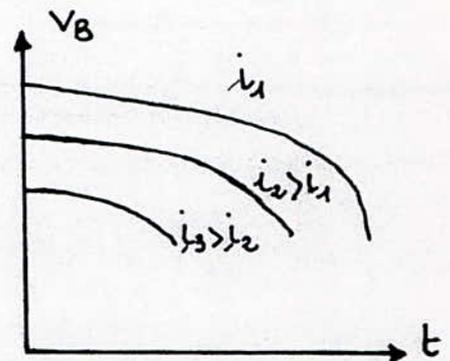
Pour charger une batterie, elle devra recevoir une tension plus élevée que celle qu'elle aura à fournir.

les figures a et b donnent les courbes de charge et de décharge d'un élément de batterie au Plomb.



a

courbe de charge d'un élément de batterie au plomb



b

courbe de décharge à diverses intensités

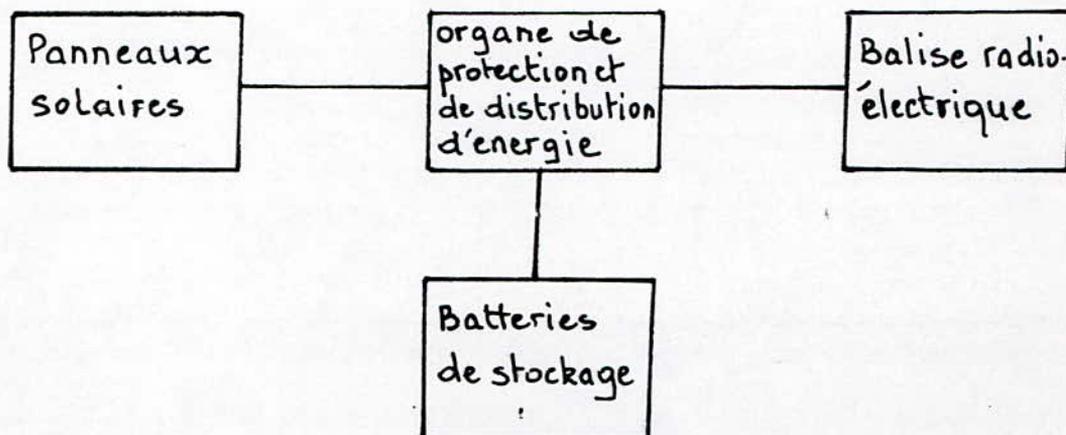
La batterie liée directement aux panneaux solaires risque de se surcharger ou se décharger totalement lors du fonctionnement du système. Un dispositif électronique est prévu à cet effet pour parer à toute éventuelle défaillance (voir chapitre dimensionnement).

Chapitre II

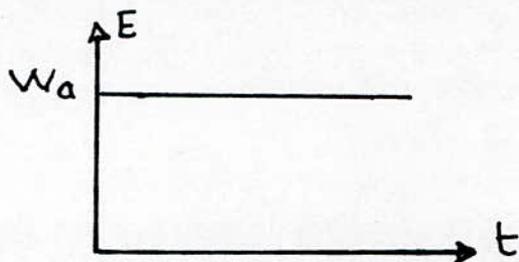
Dimensionnement de la balise solaire

II.1 Introduction

L'alimentation par conversion photovoltaïque d'une balise radio-électrique est décrite par le schéma synoptique suivant :



Pour calculer la taille d'une telle installation, il faut déterminer au préalable la demande en énergie de la balise, la quantité d'énergie convertie et l'énergie consommée dans le système de distribution d'électricité. Dans notre cas la demande est bien définie. En effet la balise radioélectrique est prévue pour fonctionner 24H sur 24H. La courbe de charge présente alors l'allure suivante :



L'apport énergétique solaire présente cependant des fluctuations par conséquent son estimation doit être faite sur la base de données expérimentales. Pour cela nous disposons de mesures faites par la station d'énergie solaire de Bouzaréah pour les années 79 et 81. Ces relevés nous ont permis de tracer les courbes d'ensoleillement en moyennes décadaires et mensuelles. En réalité ces données d'ensoleillement ont été effectuées par un capteur horizontal. Le calcul montre que la disposition optimale du capteur est de l'orienter

selon un angle θ égal à la latitude du lieu. θ étant l'angle entre la normale à la surface du capteur et la verticale du lieu. L'énergie collectée durant l'année est alors dans ce cas maximale et les fluctuations saisonnières minimales. Ce résultat est obtenu en utilisant un modèle galiléen ou la terre, décrivant son mouvement selon les lois de Kepler, bascule périodiquement par rapport aux rayons solaires selon son axe Nord-Sud.

A l'aide des données expérimentales de rayonnement solaire, il nous est possible d'ajuster les courbes obtenues et de choisir ainsi celle qui est solution de notre problème.

Dans le calcul des dimensions des éléments d'une installation solaire, l'évaluation du nombre de panneaux solaires est l'opération la plus importante. L'énergie convertie $W_c(t)$ chaque jour est proportionnelle à la surface des cellules solaires à leur rendement et à l'éclairement reçu au point considéré. Si η_p est le rendement d'un module solaire, S sa surface, pour l'éclairement $E(t)$ on aura

$$W_c(t) = \eta_p S E(t) \quad (\text{II.1})$$

la balise radioélectrique doit fonctionner sans interruption. Les besoins énergétiques nocturnes doivent être stockés le jour pour être resservis la nuit. W_a étant la consommation quotidienne, η_a le rendement des accumulateurs le nombre de panneaux sera calculé à partir de l'équation suivante

$$W_a \leq \eta_p S E_0 \quad (\text{II.2})$$

E_0 est le flux solaire moyen annuel exprimé en W/m^2 .

Notre installation nécessite obligatoirement des batteries d'accumulateurs. Pour optimiser le rendement de notre système, nous aborderons notre étude en s'appuyant sur deux critères :

- 1- L'un à caractère économique optimisant l'énergie transmise
- 2- L'autre mettant l'accent sur le fait qu'il faut réduire au maximum les risques de défaillance du système, dus aux conditions météorologiques défavorables.

II.2. Généralité sur le rayonnement solaire

le soleil est une sphère de plasma gazeux d'un diamètre de 1.391.000 Km situé à une distance moyenne de la terre $d = 149\,580\,000$ Km. le rayonnement solaire reçu au sol est modifié de façon importante par les constituants de l'atmosphère:

II.2.1. Energie solaire reçue sur une surface plane en fonction de son orientation

le flux global de rayonnement solaire est en général de la forme

$$E = E_1 + E_2 \quad (\text{II.3})$$

E_1 et E_2 sont respectivement les rayonnements direct et diffus.

En période de beau temps, la contribution du rayonnement direct est plus importante que celle du diffus.

le flux d'énergie solaire reçu au sol a alors pour expression

$$E(t) = E_1(t) = E_0 \cdot \vec{n} \cdot \vec{u} = E_0 \cos \nu \quad (\text{II.4})$$

ν est l'angle d'incidence entre la normale à la surface du capteur et la direction des rayons solaires

E_0 est l'éclairement reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires

La figure 13 représente les paramètres définissant la position géographique d'un capteur solaire.

le plan $zO\Delta$ définit le plan méridien et $\vec{n} \in zO\Delta$

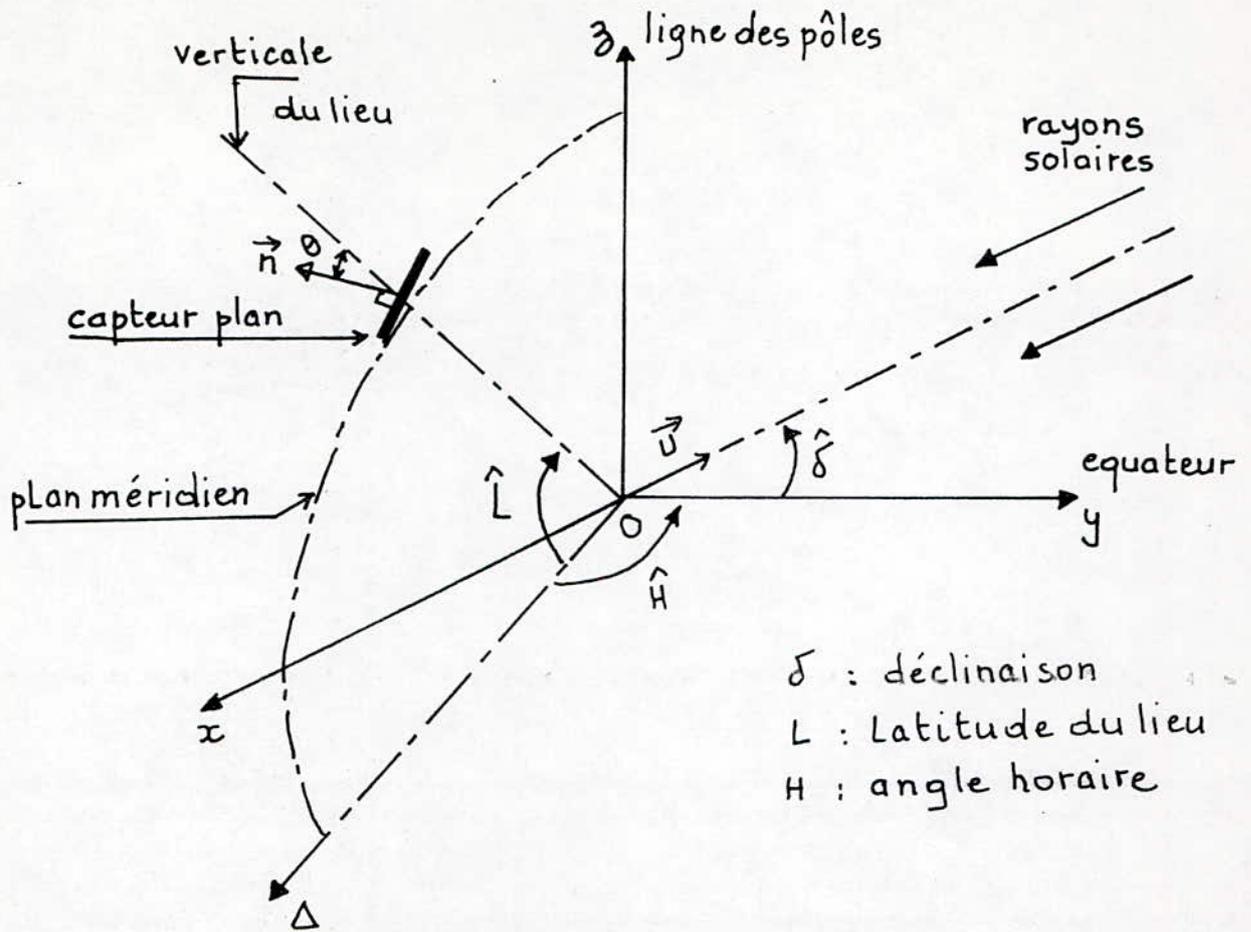
le plan équatorial est défini par le plan xOy et $\vec{O\Delta} \in xOy$

les rayons solaires arrivent parallèlement au plan xOy . leur direction faisant un angle $\hat{\delta}$ avec \vec{Oy} ($\hat{\delta}$ est la déclinaison de la terre). la latitude \hat{l} détermine la position de la verticale du lieu.

Dans le plan $zO\Delta$, on a donc :

$$\vec{n} \begin{cases} \cos(l - \theta) \\ \sin(l - \theta) \end{cases}$$

Dans le système de référence $Oxyz$, les composantes de \vec{n} et de \vec{u} seront



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

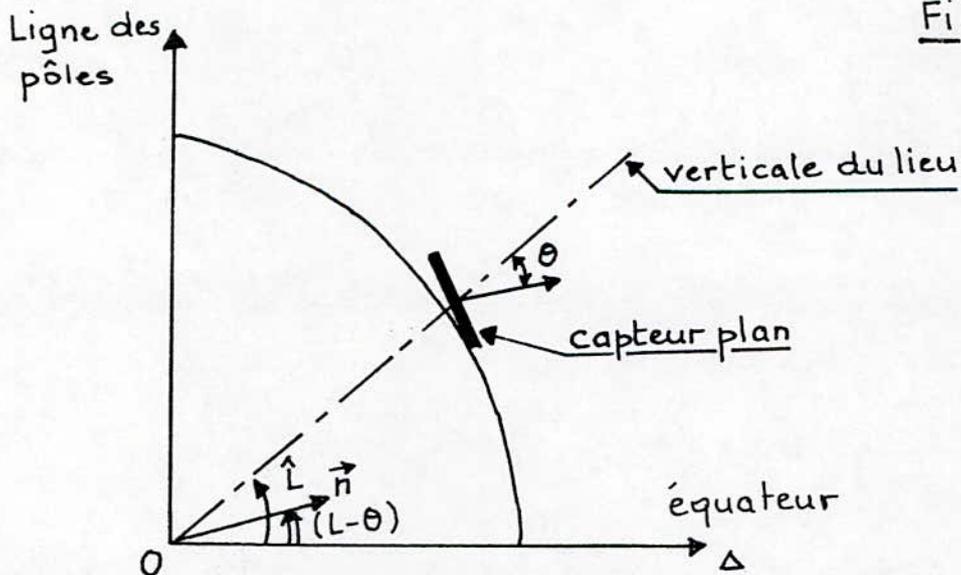


Figure 13

Représentation de la position du capteur plan dans le plan méridien

respectivement

$$\vec{n} \begin{cases} \cos(\pi/2 - H) \cos(L - \theta) \\ \cos H \cos(L - \theta) \\ \sin(L - \theta) \end{cases}$$

$$\vec{u} \begin{cases} 0 \\ \cos \delta \\ \sin \delta \end{cases}$$

d'où
$$E(t) = E_0 [\cos(L - \theta) \cos H \cos \delta + \sin(L - \theta) \sin \delta] \quad (\text{II.5})$$

II.2.2. Orientation optimale du capteur

La collecte de l'énergie à l'aide de panneaux peut se faire de plusieurs manières :

- le système de poursuite automatique du soleil qui permet de fixer le panneau normalement aux rayons solaires. Cependant il est facile de voir que l'énergie convertie par un tel système est absorbé par le dispositif d'asservissement.

- L'orientation manuelle du capteur à chaque saison vers une direction où l'intensité solaire serait maximale. Ce procédé nécessite l'intervention d'une main d'œuvre spécialisée à des moments précis de l'année.

- L'utilisation la plus simple consiste à orienter définitivement les panneaux vers la direction pour laquelle l'énergie collectée dans l'année est maximale. Cette orientation se fait vers le sud avec une inclinaison d'un angle θ voisin de la latitude du lieu.

Alger $\hat{L} = 36^\circ 48'$

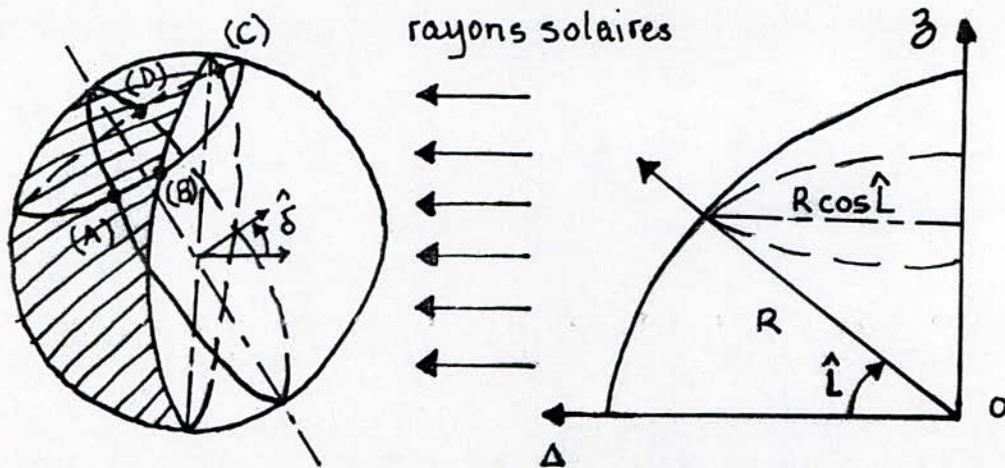
Hassi Messaoud $\hat{L} = 32^\circ$

l'énergie convertie quotidiennement ne s'écarte pas trop de sa moyenne annuelle - l'avantage de cette méthode est de faire fonctionner la balise sous de mêmes conditions d'ensoleillement et d'utiliser ainsi des accumu-

lateurs à capacité réduite.

Pour évaluer l'énergie totale collectée chaque jour, nous devons connaître la durée d'ensoleillement.

II.2.3. Calcul de la durée d'un jour



D'après les figures ci-dessus, le parallèle passant par les points considérés de la terre, est un cercle repéré par la latitude du lieu \hat{L} et de rayon de longueur $R \cos \hat{L}$
 la partie de ce cercle qui est éclairée correspond à un arc de cercle de longueur

$$p = \hat{AD} - \hat{AB} - \hat{CD} = \hat{AD} - 2\hat{AB} = \pi R \cos \hat{L} - 2R \hat{\delta}_j \quad (\text{II.6})$$

soit ω la vitesse angulaire de la terre. La durée d'un jour j sera donc :

$$\tau_j = \frac{\pi R \cos \hat{L} - 2R \hat{\delta}_j}{v} = \frac{\pi R \cos \hat{L} - 2R \hat{\delta}_j}{R \omega} = \frac{\pi \cos \hat{L} - 2 \hat{\delta}_j}{\omega} \quad (\text{II.7})$$

Etant donné que la terre fait un tour complet en 24h, on aura

$$\omega = \frac{2\pi}{24}$$

D'où

$$\tau_j = \frac{\pi \cos \hat{L} - 2 \hat{\delta}_j}{2\pi/24} = 12 \cos \hat{L} - \frac{24}{\pi} \hat{\delta}_j \quad (\text{II.8})$$

1978 TABLEAU des LEVERS et COUCHERS du SOLEIL et de la LUNE à PARIS 1978

LES HEURES CI-DESSOUS SONT DONNÉES EN TEMPS UNIVERSEL - POUR OBTENIR L'HEURE LÉGALE FRANÇAISE AJOUTER 1 HEURE AU T. U. (bien vouloir s'informer sur l'application des horaires d'été et d'hiver)

Tableau (I)

JANVIER 1					FÉVRIER 2					MARS 3					AVRIL 4					MAI 5					JUIN 6						
D.O. le 2 à 12 07 N.L. le 3 à 00 P.Q. le 16 à 3 03 P.L. le 2 à 7 56 D.O. le 31 à 23 51					N.L. le 7 à 14 54 P.Q. le 14 à 22 11 P.L. le 23 à 1 26					D.O. le 2 à 8 34 N.L. le 9 à 2 38 P.Q. le 10 à 18 21 P.L. le 24 à 16 20 D.O. le 31 à 15 11					N.L. le 7 à 15 15 P.Q. le 15 à 13 56 P.L. le 23 à 4 11 D.O. le 29 à 21 02					N.L. le 7 à 4 47 P.Q. le 15 à 7 40 P.L. le 22 à 13 17 D.O. le 29 à 3 30					N.L. le 5 à 19 02 P.Q. le 13 à 22 44 P.L. le 20 à 20 31 D.O. le 27 à 11 44						
DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE			
		LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER		
		h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m		
1	7 46	16 02	23 36	10 58	11 23	1	7 23	16 48	0 53	11 03	1	6 35	17 32	—	9 45	1	5 31	18 19	1 50	11 24	1	4 33	19 04	1 52	12 47	1	3 54	19 43	1 53	15 13	
2	7 46	16 03	23 36	11 23	11 48	2	7 22	16 48	2 03	11 48	2	6 33	17 32	1 01	10 31	2	5 29	18 21	2 36	12 34	2	4 31	19 05	2 23	13 58	2	3 53	19 44	2 21	16 18	
3	7 46	16 04	0 45	11 53	12 35	3	7 20	16 49	3 11	12 35	3	6 31	17 35	2 04	11 25	3	5 27	18 22	3 15	13 45	3	4 29	19 06	2 52	15 07	3	3 52	19 45	2 52	17 20	
4	7 46	16 05	3 08	12 26	13 34	4	7 19	16 51	4 15	13 34	4	6 29	17 37	3 02	12 26	4	5 25	18 24	3 49	14 57	4	4 28	19 08	3 20	16 15	4	3 52	19 46	3 25	18 20	
5	7 46	16 07	3 56	13 05	14 41	5	7 17	16 53	5 12	14 41	5	6 27	17 38	3 52	13 34	5	5 23	18 25	4 20	16 09	5	4 26	19 09	3 48	17 22	5	3 52	19 47	4 02	19 16	
6	7 45	16 08	4 21	13 52	15 54	6	7 16	16 54	6 02	15 54	6	6 25	17 40	4 37	14 47	6	5 21	18 27	4 49	17 19	6	4 25	19 11	4 18	18 27	6	3 51	19 48	4 44	20 07	
7	7 45	16 09	5 30	14 49	17 10	7	7 14	16 56	6 44	17 10	7	6 23	17 41	5 16	16 01	7	5 19	18 28	5 18	18 28	7	4 23	19 12	4 50	19 29	7	3 51	19 48	5 30	20 53	
8	7 45	16 10	6 33	15 55	18 26	8	7 13	16 58	7 21	18 26	8	6 21	17 43	5 49	17 15	8	5 17	18 30	5 47	19 35	8	4 21	19 14	5 25	20 28	8	3 50	19 49	6 21	21 34	
9	7 44	16 11	7 28	16 57	19 40	9	7 11	16 59	7 53	19 40	9	6 19	17 44	6 20	18 27	9	5 14	18 31	6 18	20 39	9	4 20	19 15	6 04	21 22	9	3 50	19 50	7 16	22 10	
10	7 44	16 13	8 14	17 07	20 51	10	7 10	17 01	8 23	20 51	10	6 17	17 46	6 50	19 38	10	5 12	18 33	6 51	21 40	10	4 18	19 16	6 48	22 11	10	3 50	19 51	8 13	22 42	
11	7 43	16 14	8 52	18 39	22 04	11	7 08	17 02	8 52	22 04	11	6 15	17 47	7 19	20 46	11	5 10	18 34	7 28	22 37	11	4 17	19 18	7 37	22 55	11	3 49	19 51	9 13	23 11	
12	7 43	16 15	9 26	19 53	23 06	12	7 06	17 04	9 20	23 06	12	6 13	17 49	7 49	21 52	12	5 08	18 36	8 10	23 30	12	4 16	19 19	8 29	23 34	12	3 49	19 52	10 14	23 38	
13	7 42	16 17	9 55	20 54	—	13	7 05	17 06	9 50	—	13	6 11	17 51	8 20	22 55	13	5 06	18 39	8 55	—	13	4 14	19 21	9 25	—	13	3 49	19 53	11 17	—	
14	7 42	16 18	10 23	22 12	0 09	14	7 03	17 07	10 22	0 09	14	6 09	17 52	8 55	23 53	14	5 04	18 39	9 45	0 16	14	4 13	19 22	10 23	0 08	14	3 49	19 53	12 22	0 04	
15	7 41	16 19	10 51	23 12	1 09	15	7 01	17 09	10 58	1 09	15	6 07	17 54	9 33	—	15	5 02	18 40	10 39	0 58	15	4 11	19 23	11 24	0 39	15	3 49	19 54	13 29	0 30	
16	7 40	16 21	11 19	0 18	2 05	16	7 00	17 11	11 37	2 05	16	6 05	17 55	10 16	0 48	16	5 00	18 41	11 37	1 35	16	4 10	19 25	12 27	1 07	16	3 49	19 54	14 38	0 58	
17	7 40	16 22	11 49	1 21	2 57	17	6 58	17 12	12 22	2 57	17	6 02	17 57	11 03	1 37	17	4 59	18 43	12 37	2 08	17	4 09	19 26	13 32	1 35	17	3 49	19 54	15 50	1 30	
18	7 39	16 24	12 22	2 21	3 44	18	6 56	17 14	13 11	3 44	18	6 00	17 58	11 55	2 22	18	4 57	18 44	13 39	2 38	18	4 08	19 27	14 40	2 01	18	3 49	19 55	17 03	2 05	
19	7 38	16 25	12 58	3 19	4 27	19	6 54	17 16	14 05	4 27	19	5 58	18 00	12 51	3 01	19	4 55	18 46	14 44	3 06	19	4 06	19 28	15 50	2 29	19	3 49	19 55	18 15	2 48	
20	7 37	16 27	13 40	4 13	5 05	20	6 52	17 17	15 02	5 05	20	5 56	18 01	13 50	3 37	20	4 53	18 47	15 52	3 34	20	4 05	19 30	17 02	3 00	20	3 49	19 55	19 22	3 40	
21	7 36	16 28	14 26	5 04	5 39	21	6 50	17 19	16 03	5 39	21	5 54	18 03	14 52	4 09	21	4 51	18 49	17 01	4 02	21	4 04	19 31	18 16	3 34	21	3 49	19 56	20 21	4 41	
22	7 35	16 30	15 17	5 49	6 10	22	6 49	17 21	17 06	6 10	22	5 52	18 04	15 57	4 39	22	4 49	18 50	18 13	4 31	22	4 03	19 32	19 29	4 14	22	3 49	19 56	21 11	5 50	
23	7 34	16 31	16 13	6 40	6 38	23	6 47	17 22	18 11	6 38	23	5 50	18 06	17 03	5 07	23	4 47	18 52	19 26	5 04	23	4 02	19 33	20 38	5 02	23	3 49	19 56	21 54	7 04	
24	7 33	16 33	17 12	7 08	7 06	24	6 45	17 24	19 18	7 06	24	5 48	18 07	18 11	5 35	24	4 45	18 53	20 39	5 41	24	4 01	19 35	21 39	5 58	24	3 50	19 56	22 30	8 20	
25	7 32	16 35	18 13	7 38	7 33	25	6 43	17 25	20 25	7 33	25	5 46	18 09	19 21	6 03	25	4 43	18 55	21 48	6 24	25	4 00	19 36	22 33	7 02	25	3 50	19 56	23 01	9 34	
26	7 31	16 38	19 16	8 08	8 01	26	6 41	17 27	21 34	8 01	26	5 44	18 10	20 32	6 33	26	4 42	18 56	22 52	7 12	26	3 59	19 37	23 17	8 12	26	3 50	19 56	23 30	10 47	
27	7 30	16 38	20 21	8 35	8 32	27	6 39	17 29	22 44	8 32	27	5 41	18 12	21 43	7 07	27	4 40	18 58	23 48	8 12	27	3 58	19 38	23 55	9 24	27	3 51	19 56	23 58	11 67	
28	7 28	16 39	21 27	9 02	—	28	6 37	17 30	23 53	9 06	—	28	5 39	18 13	22 53	7 45	28	4 38	18 59	—	9 16	28	3 57	19 39	—	10 37	28	3 51	19 56	—	13 05
29	7 27	16 41	22 34	9 29	—	29	6 36	17 31	25 02	—	—	29	5 37	18 15	23 58	8 29	29	4 36	19 01	0 36	10 25	29	3 56	19 40	0 28	11 49	29	3 52	19 56	0 26	14 10
30	7 26	16 43	23 43	9 57	—	30	6 35	18 16	—	9 21	—	30	5 35	18 16	—	9 21	30	4 35	19 02	1 17	11 36	30	3 55	19 41	0 57	12 59	30	3 52	19 56	0 56	15 13
31	7 25	16 44	—	—	—	31	6 33	18 18	0 58	10 19	—	31	5 33	18 18	—	0 58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

JUILLET 7					AOÛT 8					SEPTEMBRE 9					OCTOBRE 10					NOVEMBRE 11					DÉCEMBRE 12				
N.L. le 5 à 9 50 P.Q. le 13 à 0 49 P.L. le 20 à 3 05 D.O. le 25 à 22 31					N.L. le 4 à 1 01 P.Q. le 11 à 20 06 P.L. le 18 à 10 14 D.O. le 25 à 12 18					N.L. le 2 à 16 09 P.Q. le 10 à 3 20 P.L. le 16 à 19 01 D.O. le 24 à 5 08					N.L. le 2 à 6 41 P.Q. le 9 à 9 38 P.L. le 16 à 6 10 D.O. le 24 à 0 34 N.L. le 31 à 20 07					P.Q. le 7 à 16 18 P.L. le 14 à 20 00 D.O. le 22 à 21 24 N.L. le 30 à 8 19					P.Q. le 7 à 0 34 P.L. le 14 à 12 31 D.O. le 22 à 17 42 N.L. le 29 à 19 36				
DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE		DATE		SOLEIL		LUNE	
		LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER			LEVER	COUCHER	LEVER	COUCHER
		h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m			h m	h m	h m	h m
1	3 53	19 55	1 28	5 14	1	4 25	19 28	2 13	17 33	1	5 08	18 32	3 51	17 51	1	5 51	17 29	4 47	17 14	1	6 39	16 29	7 03	17 16	1	7 24	15 55	8 10	17 29
2	3 54	19 55	2 03	5 04	2	4 26	19 26	3 05	16 13	2	5 10	18 30	4 52	18 18	2	5 53	17 27	5 53	17 41	2	6 40	16 28	8 13	17 57	2	7 25	15 54	9 11	18 32
3	3 55	19 55	2 43	4 52	3	4 28	19 25	4 00	16 48	3	5 11	18 28	5 55	18 45	3	5 54	17 25	7 00	18 10	3	6 43	16 26	9 20	18 46	3	7 27	15 54	10 05	19 41
4	3 55	19 55	3 27	4 42	4	4 29	19 23	4 58	19 19	4	5 13	18 26	6 59	19 11	4	5 55	17 23	8 08	18 42	4	6 43	16 25	10 23	19 42	4	7 28	15 53	10 50	20 53
5	3 56	19 54	4 17	4 34	5	4 31	19 22	5 59	19 48																				

en valeur angulaire, cette durée vaudra

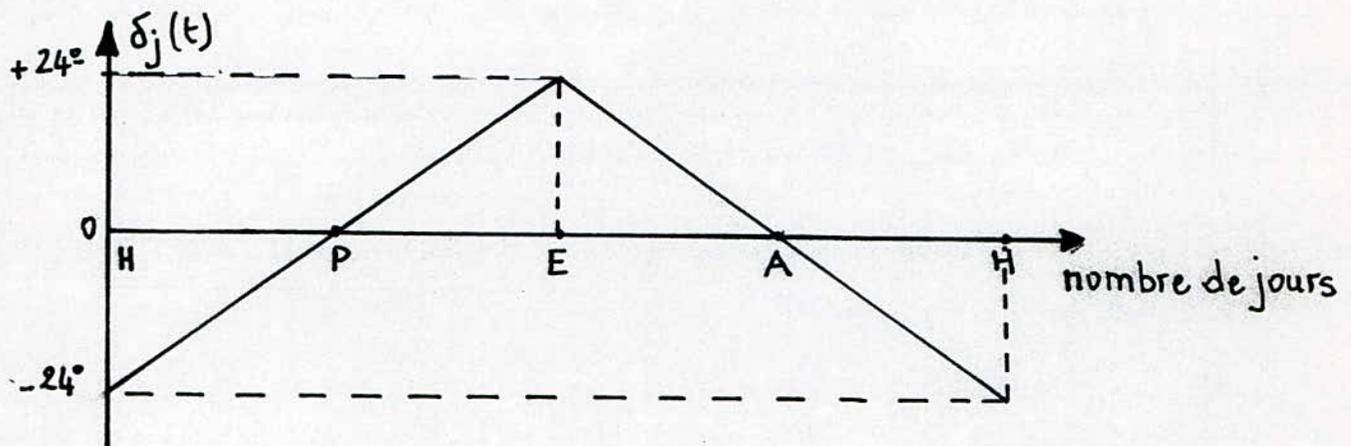
$$\Delta H_j = \omega \tau_j = \frac{2\pi}{24} \cdot \tau_j = \pi \cos \hat{L} - 2\hat{\delta}_j \quad (\text{II.9})$$

II.2.4 Evolution de la durée d'ensoleillement dans l'année

L'expression (II.9) montre que la durée du jour varie avec la déclinaison de la terre pour une latitude \hat{L} donnée.

Le maximum de la déclinaison de la terre $\hat{\delta}_j(t)$ a lieu en été et vaut sensiblement 24° . En hiver la déclinaison est minimale et elle est égale à près de -24° .

Comme dans le cas d'un pendule, la déclinaison $\delta_j(t)$ est approximativement une fonction linéaire du nombre de jours. Ceci est traduit par la figure suivante



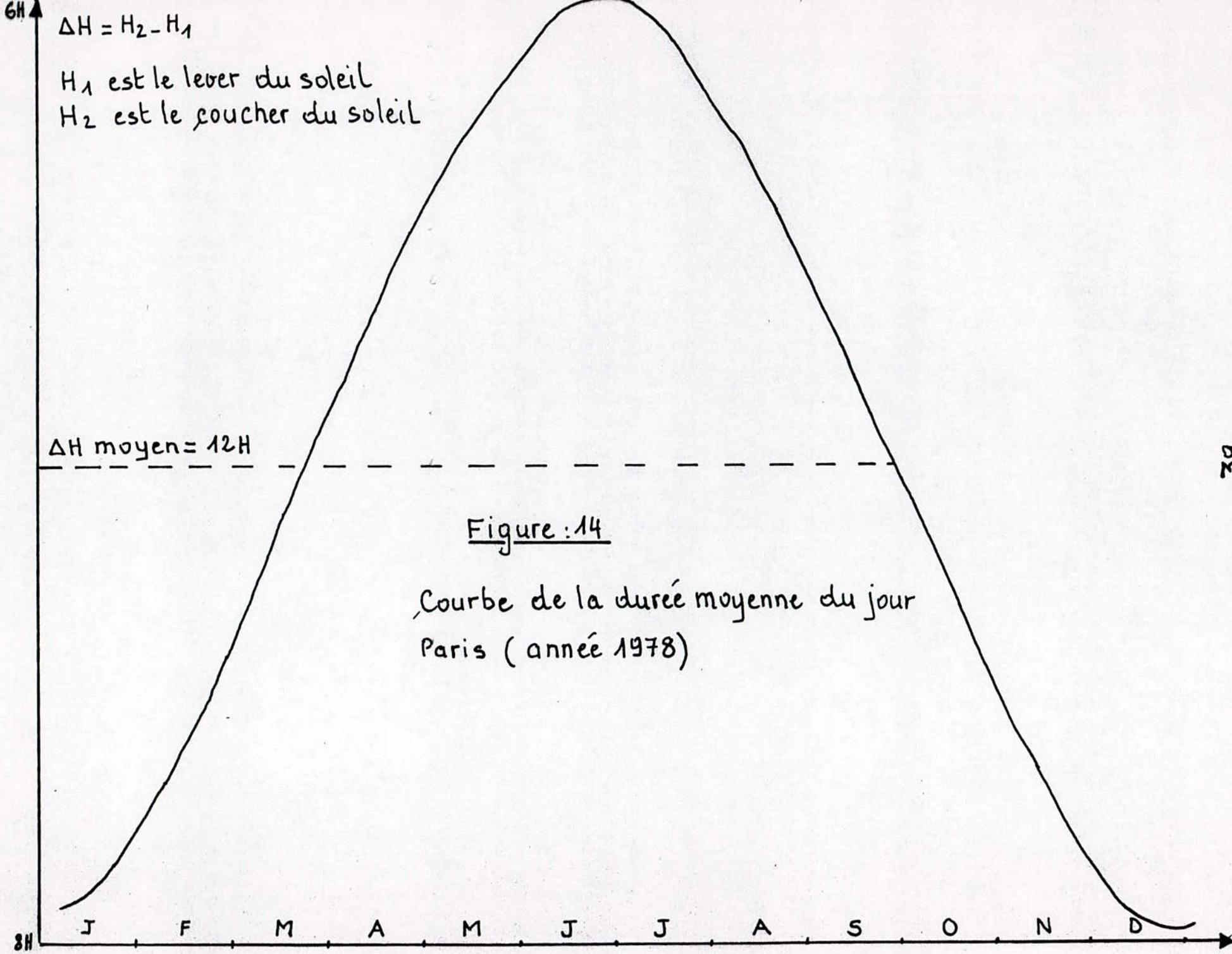
En fait, il faut tenir compte de l'inertie de la terre - le basculement de la terre durant les saisons ne se fait pas alors selon un point angulaire. A titre d'exemple, si on prend les relevés de lever et de coucher du soleil à Paris pour l'année 1978, on obtient une sinusoïde pour la durée d'ensoleillement $\Delta H = H_2 - H_1$ (tableau I et figure 14).

L'expression analytique vraie de $\delta_j(t)$ se traduit alors par l'équation

$$\delta_j(t) = -\delta_M \cos \frac{2\pi n_j}{T} \quad (\text{II.10})$$

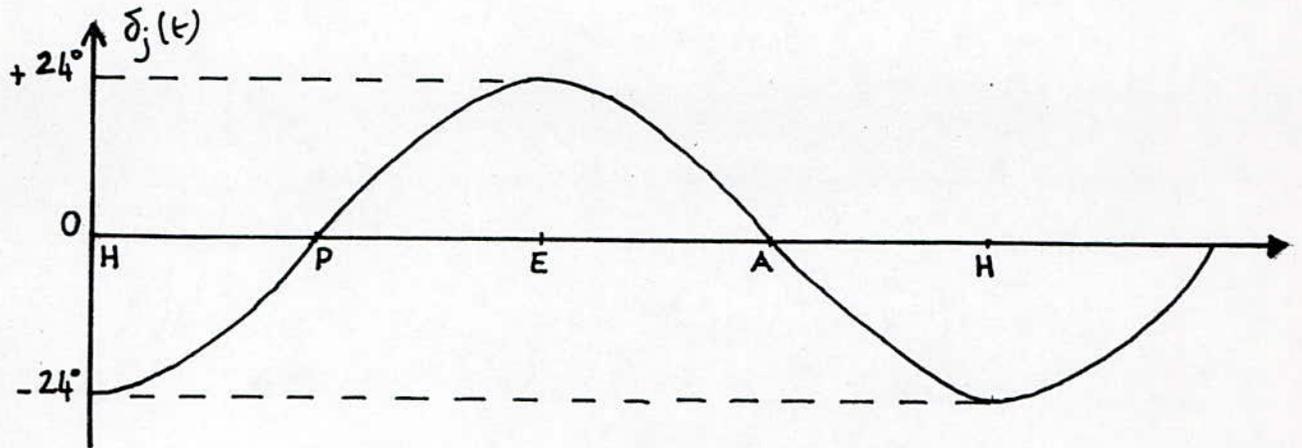
T est la période de l'année comptée en jours

n_j est le nombre de jour comptés à partir du début de l'hiver.



δ_M est la déclinaison maximale (24°)

la courbe correspondante à la variation de $\delta_j(t)$ dans l'année est donnée par la figure ci-dessous



Remarque : $\delta_j(t)$ et δ_M sont exprimés en valeurs d'angles (en degrés ou en radians)

le flux d'énergie solaire reçu par un capteur plan, à la latitude \hat{L} , la déclinaison $\hat{\delta}$ et orienté d'un angle θ par rapport à la verticale est par heures $h(\theta)$

$$E(t) = E_0 [\cos(L-\theta) \cos H \cos \delta + \sin(L-\theta) \sin \delta]$$

avec $H(H) = \frac{h}{24} \cdot 2\pi$ exprimé en radians.

la variation de la déclinaison au cours de la journée est négligeable. Ce qui se justifie par le fait que $\delta_M \approx \pm 24^\circ$ dans une demi-année est

$$\frac{\Delta \delta_M}{\Delta t} \approx \frac{2 \times 24}{6 \times 30 \times 24 \times 3600} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{s}$$

L'énergie collectée pendant un jour est :

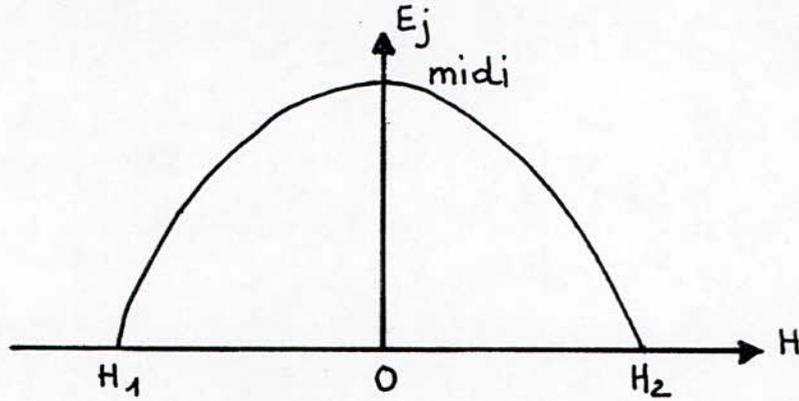
$$E_j = \int_{H_1}^{H_2} E(H) dt = \int_{H_1}^{H_2} \cos(L-\theta) \cos H \cos \delta dH + \int_{H_1}^{H_2} \sin(L-\theta) \sin \delta dH$$

$$E_j = E_0 [\cos(L-\theta) \cos \delta (\sin H_2 - \sin H_1) + \sin(L-\theta) \sin \delta (H_2 - H_1)] \quad (\text{II.11})$$

$$(\text{II.12})$$

H_1 et H_2 représentent respectivement le lever et le coucher du soleil. Ils sont exprimés en radians.

Dans la relation (II.12) si le plein ensoleillement (c.a. dire midi) a été pris comme origine, la caractéristique journalière de E_j aura alors l'allure indiquée par la figure suivante.



d'où $H_2 = -H_1 \Rightarrow \Delta H_j = H_2 - H_1 = 2H_2$
 en associant ce résultat à l'expression (II.9)

$$\Delta H_j = \pi \cos \hat{L} - 2\delta_j = 2H_2^j \quad (\text{II.13})$$

alors $E_j = 2E_0 [\cos(L-\theta) \cos \delta_j \sin H_2^j + \sin(L-\theta) \sin \delta_j \Delta H_j] \quad (\text{II.14})$

ou bien $E_j = E_0 [2 \cos(L-\theta) \cos \delta_j \sin(\frac{\pi}{2} \cos \hat{L} - \delta_j) + \sin(L-\theta) \sin \delta_j (\pi \cos \hat{L} - 2\delta_j)]$

avec $\delta_j = -\delta_M \cos \frac{2\pi n_j}{T} \quad (\text{II.15})$

Ces relations nous permettent de tracer $E_j = f(n_j)$

II.2.5. Evaluation des fluctuations d'énergie

Pour apprécier uniquement les fluctuations d'énergie, on peut se contenter de tracer la courbe $E(H) = f(n_j)$ pour des valeurs mesurées à midi. Dans ces conditions $H(H=0)$ et $\cos H = 1$. L'expression (II.5) devient plus simple et s'écrit

$$E(H) = E_0 \cos(L-\theta-\delta) \quad (\text{II.16})$$

Pour une latitude \hat{L} donnée : Alger : $\hat{L} \approx 37^\circ$

Hassi-Messaoud : $\hat{L} = 32^\circ$

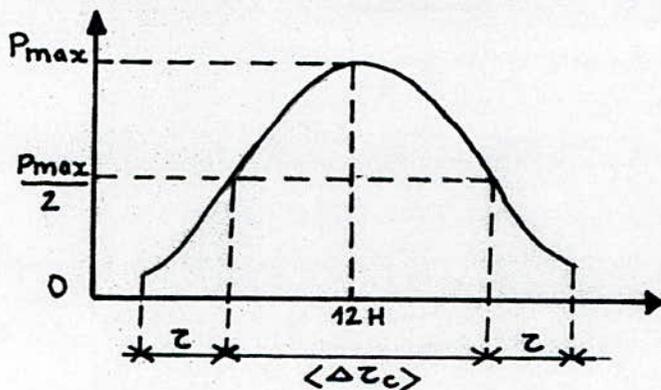
On peut tracer la variation de $E(H)$ pour diverses orientations θ du capteur les courbes de la figure 15 donnent les variations saisonnières de l'énergie reçue à Alger et Hassi-Messaoud pour différentes valeurs de θ

On constate que l'énergie fluctue au minimum lorsque $\theta = L$
Pour faire un bilan rigoureux des énergies, il faudrait tenir compte de la variation dans l'année de la durée d'ensoleillement, ce que nous allons voir dans le cas de l'implantation de la balise dans la région d'Alger

II.3. Cas de l'installation de la balise dans la zone d'Alger

II.3.1. Courbe d'ensoleillement

Par beau temps, la courbe journalière de la puissance convertie par effet photovoltaïque en fonction du temps présente la forme indiquée par la figure suivante



Un critère raisonnable de la durée utile $\langle \Delta \tau_c \rangle$ d'ensoleillement moyen journalier est de considérer le fonctionnement des panneaux à partir du moment où la puissance convertie vaut la moitié de la puissance maximale. Une détermination de $\langle \Delta \tau_c \rangle$ a été effectuée pour la journée du 23.11.82 elle donnait $\langle \Delta \tau_c \rangle = 6H$.

Pour la suite de nos calculs, nous avons extrapolé cette valeur aux autres moments de l'année et nous trouvons une valeur moyenne annuelle de $\langle \Delta \tau_c \rangle$ égale à 10H

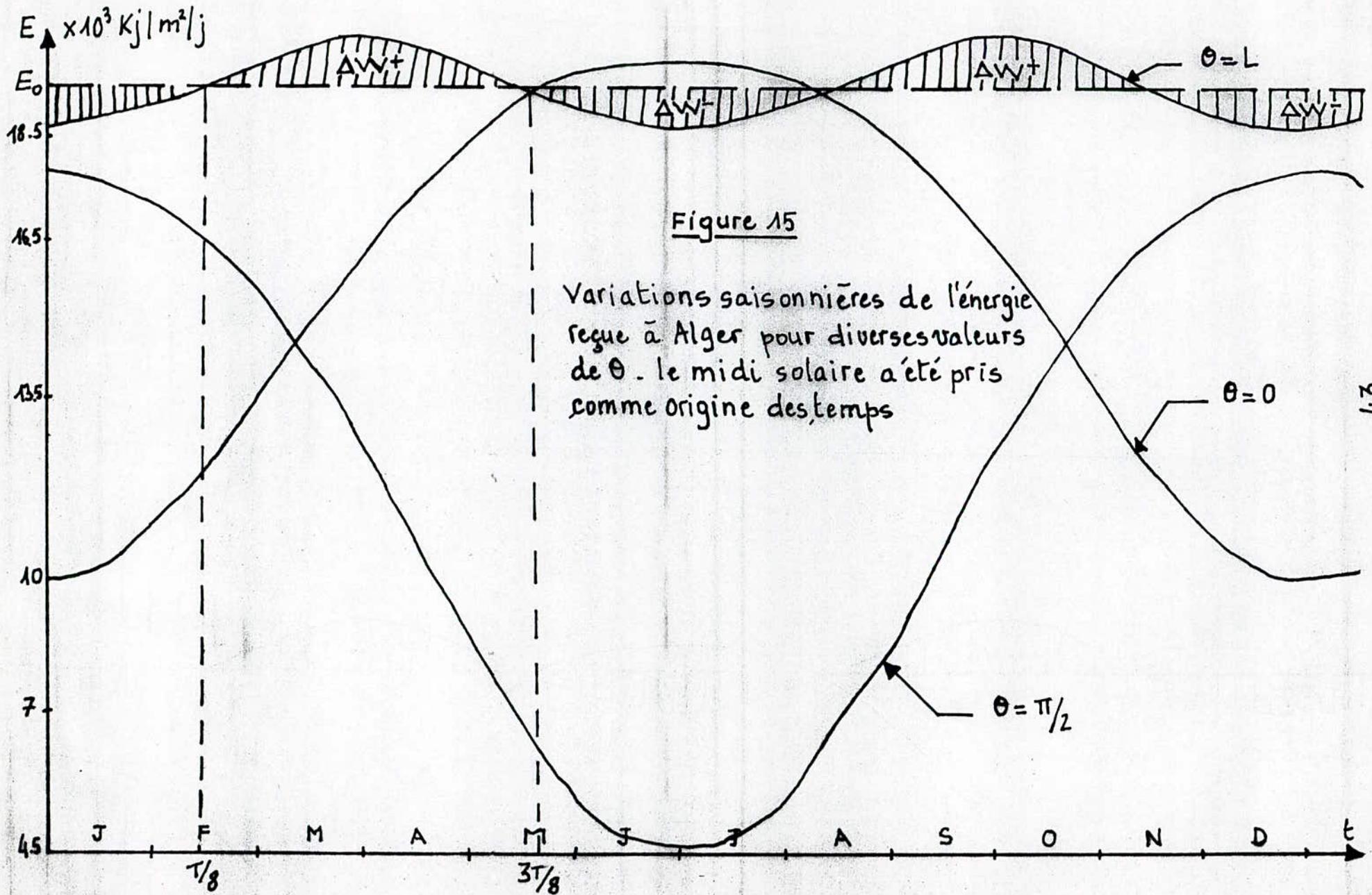


Figure 15

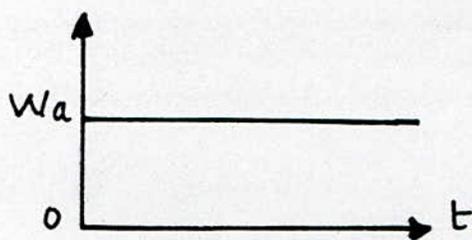
Variations saisonnières de l'énergie reçue à Alger pour diverses valeurs de θ . le midi solaire a été pris comme origine des temps

II.3.2. Recherche de l'optimum de l'énergie reçue en fonction de l'orientation θ des panneaux

les relations (II.10) et (II.15) associées nous permettent de tracer les courbes d'ensoleillement annuelles du rayonnement solaire à Alger pour diverses valeurs de θ . la figure 16 montre qu'il existe une valeur optimale de θ pour laquelle les fluctuations saisonnières sont minimales. Cette valeur correspond à $\theta = L = 37^\circ$. Une telle caractéristique est intéressante dans le cas d'un stockage d'énergie dans des accumulateurs. l'ondulation minimale de la courbe offre des conditions de stockage optimales

II.4. Courbe de charge

Notre installation utilise une balise radioélectrique comme dispositif de charge. Ses besoins en énergie électrique sont pratiquement constant dans le temps et se traduisent par la courbe de charge suivante

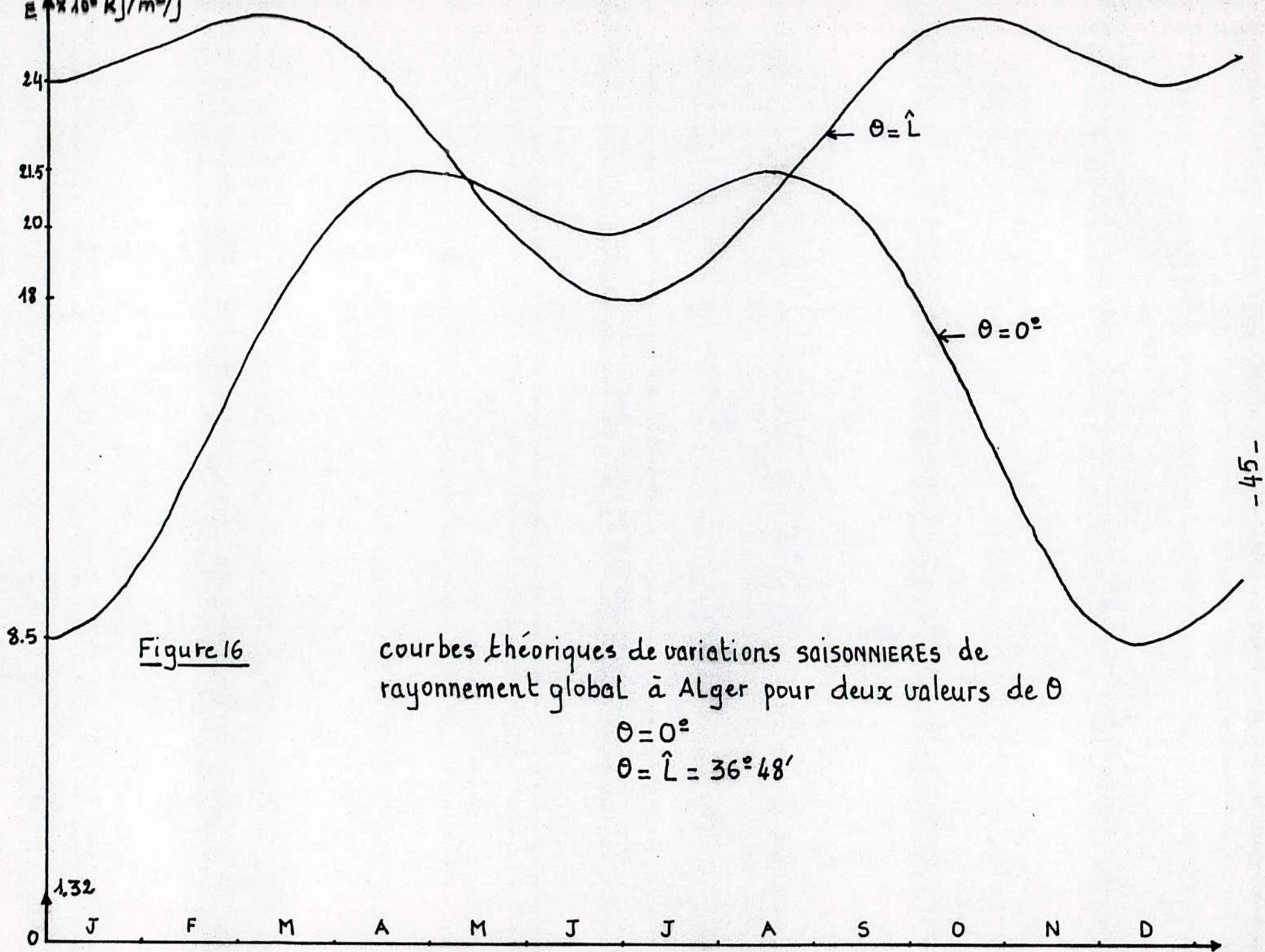


la caractéristique $I = f(V)$ du paragraphe (I.9.1) présente en réalité l'allure d'un "S". lorsque la tension d'alimentation atteint 24V, le courant se stabilise à environ 1Ampère.

la balise a pour rôle de guider les avions à l'atterrissage. Il est évident qu'un défaut de fonctionnement du système risque de nuire à la sécurité de la navigation aérienne. Nous devons donc éviter de voir arrêter notre balise par une alimentation insuffisante en énergie électrique c'est à dire, nous devons dimensionner correctement, pour cela, notre installation.

II.5. Exploitation des données solaires mesurées à Alger

les données de rayonnement solaire global pour les années 79 et 81 (tableaux)



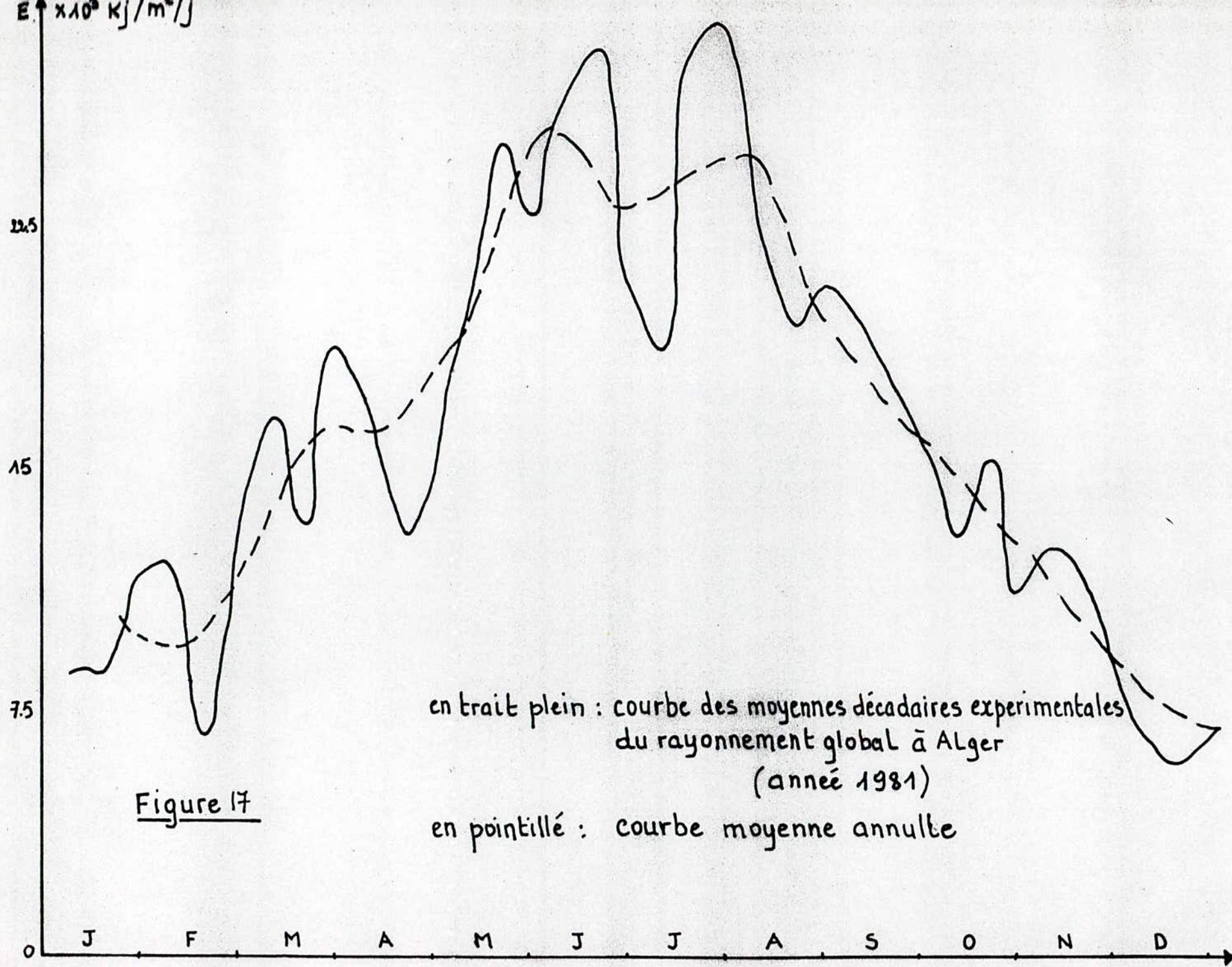


Figure 17

en trait plein : courbe des moyennes décadales expérimentales
du rayonnement global à Alger
(année 1981)

en pointillé : courbe moyenne annuelle

II et III, fournies par la station d'énergie solaire de Bouzaréah ont été traduites sous forme de courbes en moyennes décadaires et en moyennes mensuelles figures 17-18-19.

La courbe en moyennes décadaires nous permet d'apprécier les fluctuations mensuelles (voir calcul de capacité) tandis que la courbe mensuelle (ou Histogramme) nous permet d'étalonner la courbe théorique $E_j = f(n_j)$ que nous avons tracé pour $\theta = 0$.

Ces valeurs expérimentales nous permettront ainsi d'évaluer la courbe à ondulations minimales expérimentales pour le capteur incliné de $\theta = L$. L'examen des courbes obtenues pour les années 79 et 81 donne chacune une valeur moyenne annuelle de l'énergie reçue par le capteur horizontal égale à 450 W/m^2 .

II.5.1. Estimation de la courbe à ondulations minimales et détermination de l'ensoleillement moyen journalier annuel

Il s'agira pour nous d'extraire des courbes réelles tracées à partir des données de l'observatoire de Bouzaréah, la courbe de moindres fluctuations saisonnières expérimentale sur laquelle nous grefferons par la suite les fluctuations décadaires, la procédure ^{utilisée} est la suivante :

la première opération consiste à étalonner la courbe ($\theta = 0$) de la figure 16 à l'aide de la courbe expérimentale obtenue avec le capteur horizontal. Il suffit pour cela de superposer les deux courbes (voir figure 20). Dans une deuxième étape, nous relevons tous les rapports liant les courbes $\theta = 0$ et $\theta = L$ de la figure 16. Ce sont surtout les rapports entre les valeurs des différents maximums et minimums de l'énergie collectée durant l'année. Nous transférons ensuite tous les résultats obtenus aux courbes expérimentales (dont l'une est connue ($\theta = 0$), l'autre est celle à déterminer $\theta = L$). Ainsi, on aboutit au tracé de la courbe recherchée figure 21. Cette courbe représente la moyenne de l'énergie reçue par le capteur incliné $\theta = L$. On déduit alors facilement la valeur de l'ensoleillement moyen annuel qui donne

$$E_{\text{moy}} = 550 \text{ W/m}^2$$

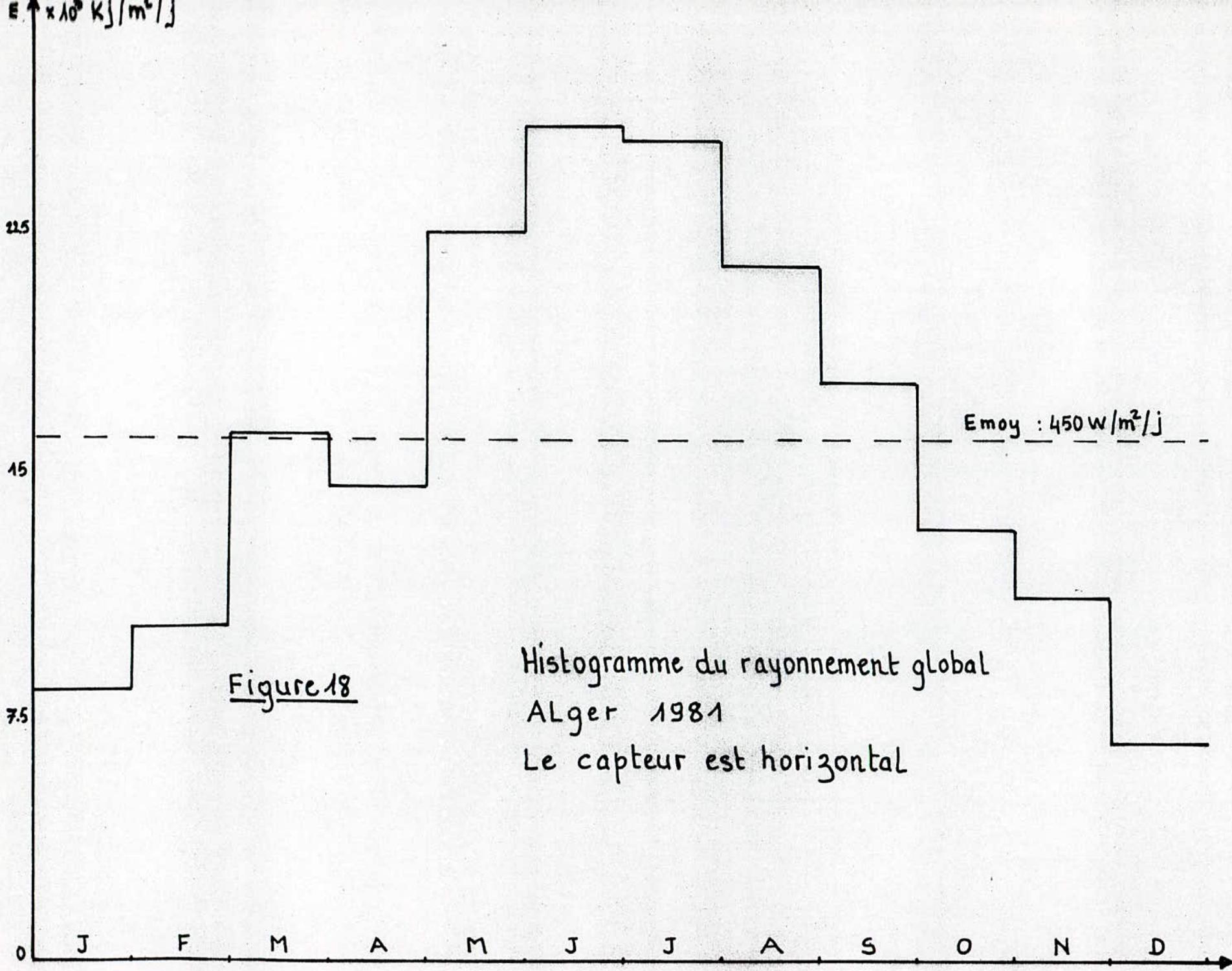


Figure 18

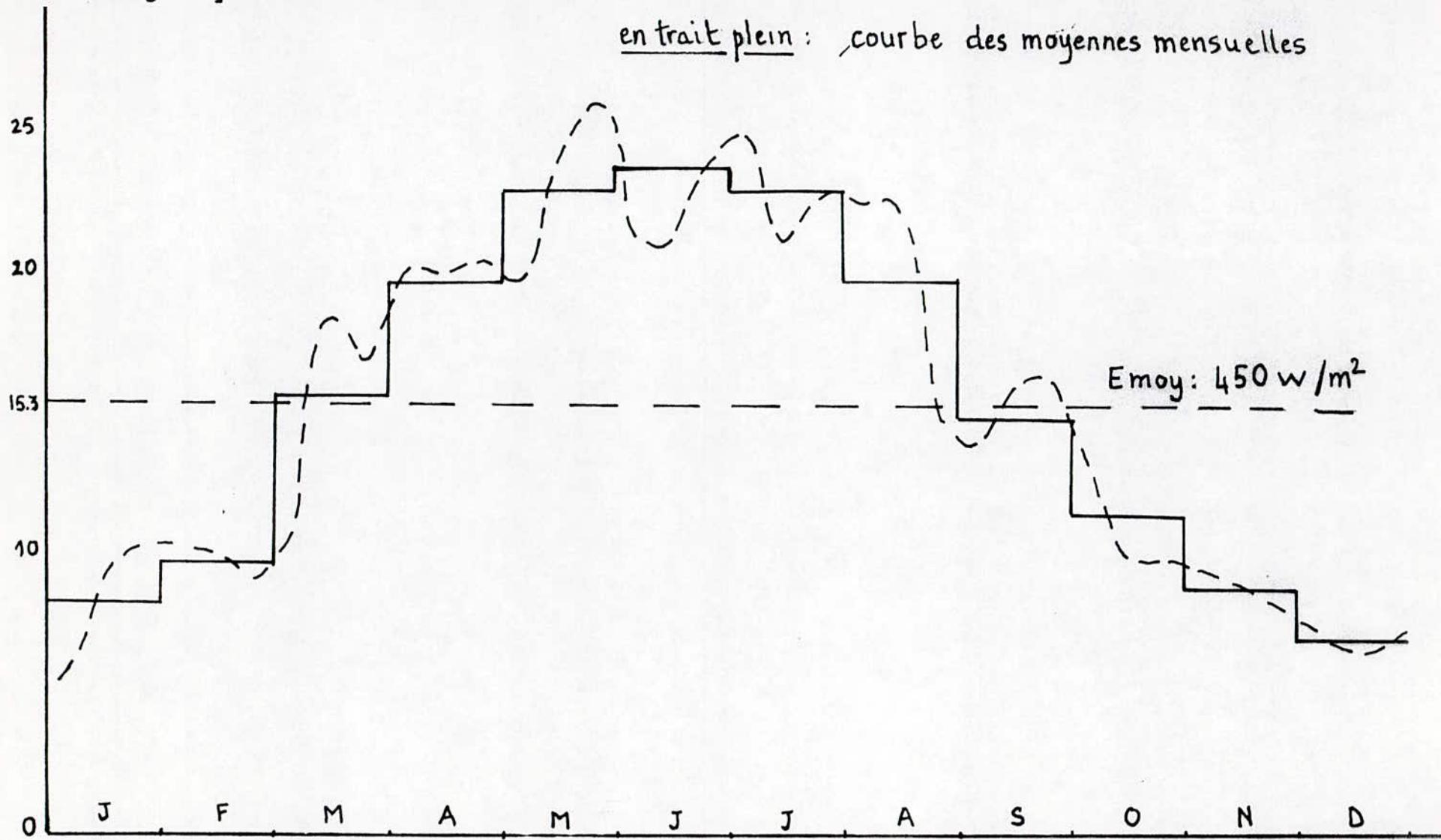
Histogramme du rayonnement global
 ALger 1981
 Le capteur est horizontal

Figure: 19

en pointillé : courbe des moyennes décadaires du rayonnement global de l'année 1979 prises à Bouzareah

en trait plein : courbe des moyennes mensuelles

$E \times 10^3 \text{ KJ/m}^2/\text{j}$



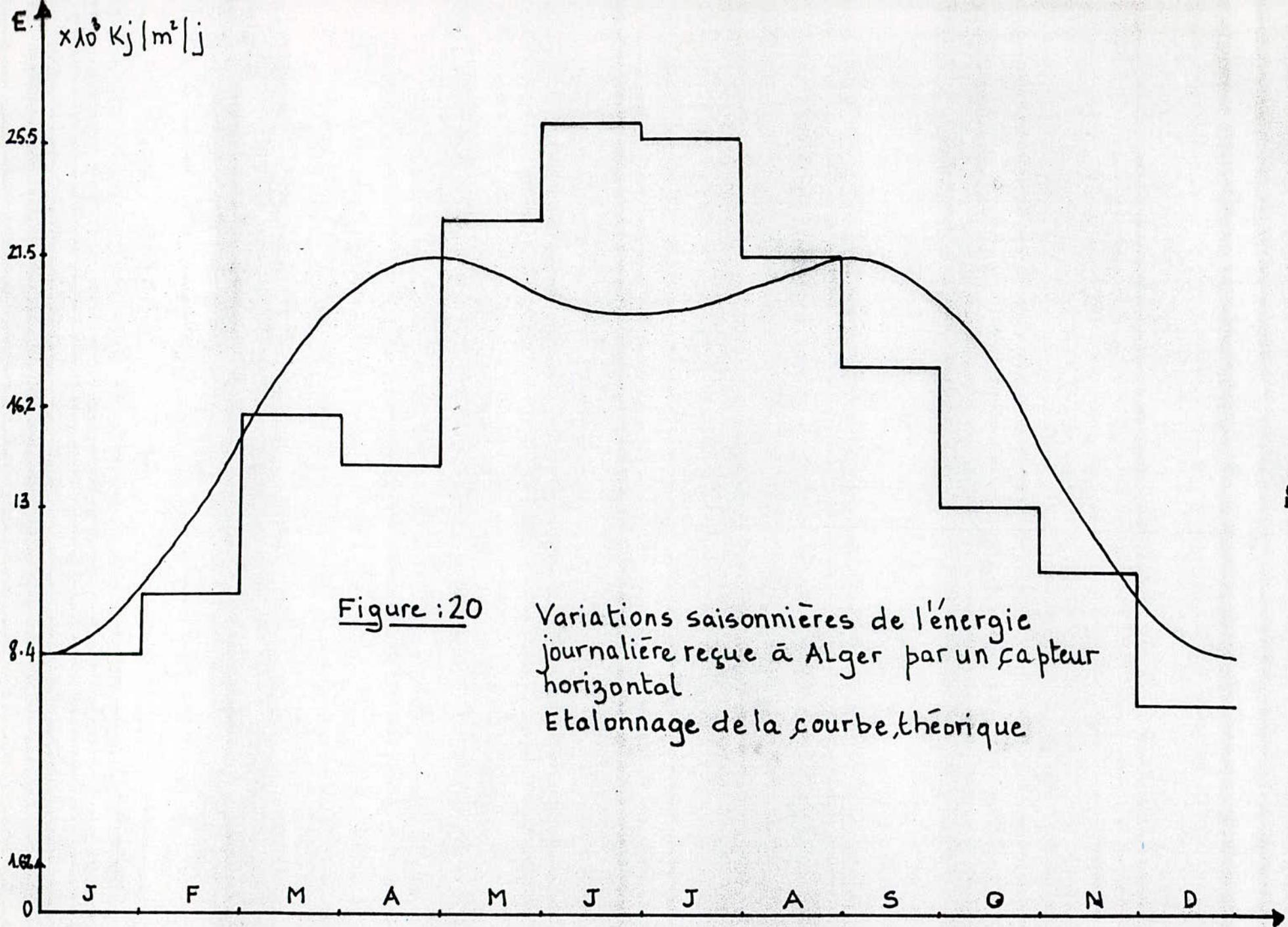


Figure : 20

Variations saisonnières de l'énergie journalière reçue à ALger par un capteur horizontal.
 Etalonnage de la courbe théorique

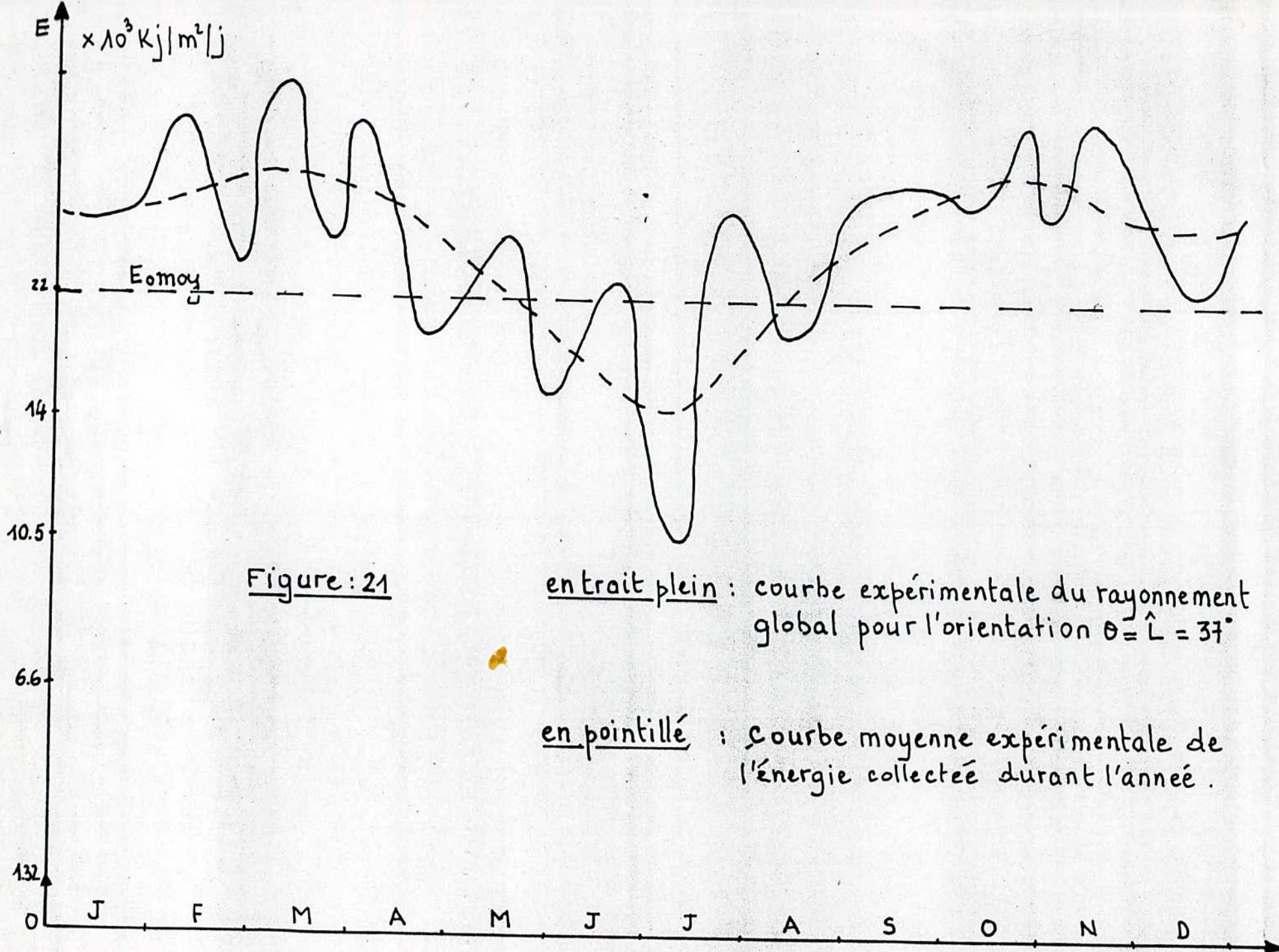


Figure : 21

en trait plein : courbe expérimentale du rayonnement global pour l'orientation $\theta = \hat{L} = 37^\circ$

en pointillé : courbe moyenne expérimentale de l'énergie collectée durant l'année.

II.6. Détermination du nombre de panneaux solaires

Dans le calcul des dimensions d'une installation solaire, l'estimation du nombre optimal de capteurs solaires à utiliser est l'opération la plus importante étant donné le coût encore trop élevé des photopiles (environ 50 DA le watt crête). L'énergie convertie chaque jour par les panneaux de surface totale S et de rendement n_p est donnée par l'expression (II.1)

$$W_c(t) = n_p S E(t)$$

Supposons dans une première approche que les conditions météorologiques soient idéales au cours de l'année et que les panneaux soient dirigés vers la position qui réduit les fluctuations d'énergie solaire d'une saison à l'autre. Ceci sera obtenu pour $\theta = \hat{L}$ et se traduira par une courbe à ondulations minimales dont l'expression analytique s'écrira approximativement figure 15

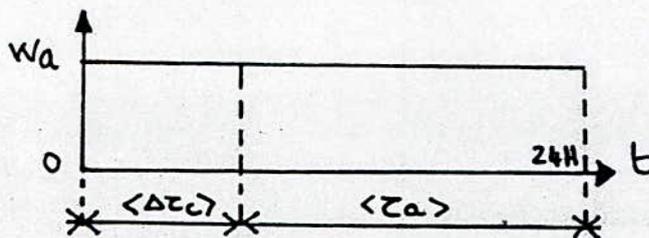
$$E(t) = E_0 - E_M \cos \frac{4\pi t}{T} \quad (\text{II.17}) \quad [1]$$

E_0 est la valeur moyenne de $E(t)$

E_M est l'amplitude de la fluctuation d'énergie

T est la durée de l'année comptée en jours.

Considérons la courbe de charge de la balise



$\langle \Delta z_c \rangle$ est le temps moyen d'ensoleillement utile

$\langle z_a \rangle$ est le temps moyen de la durée de non éclaircissement.

L'alimentation de la balise doit pouvoir se faire aussi bien la journée que la nuit. Il faudrait donc stocker une partie de l'énergie convertie dans des accumulateurs pour la resserrer la nuit.

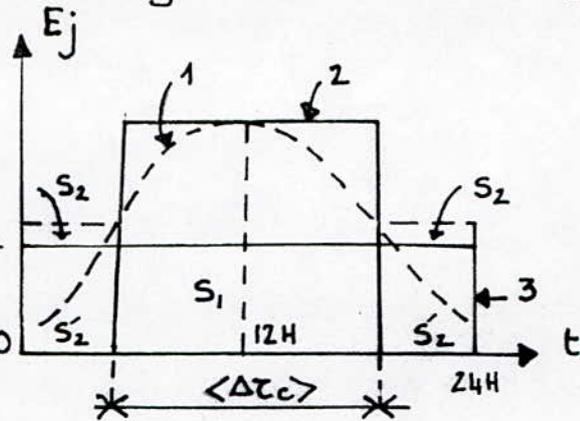
rayonnement journalier moyen en KJ/m ² /j	du 1 au 10	du 10 au 20	du 20 au 30	Moyenne journalière mensuelle en KJ/m ² /j
Janvier	5809	9936	10271	8390
Février	10279	12080	9380	10570
Mars	11952	18880	16969	15930
Avril	20480	20240	21806	20840
Mai	19750	23800	26920	23500
Juin	21370	21070	24010	23150
Juillet	24399	20890		22650
Aout	22400	22870	15400	20200
Septembre	13650	14970	15380	14630
Octobre	13880	9920	9980	11260
Novembre	7945	9325	10630	9000
Décembre	7160	7530	6820	7170

Tableau (II) de valeurs du rayonnement global pour la région d'Alger - Année 1979. (Mesures effectuées à la station d'énergie solaire de Bouzareah)

L'énergie convertie par les panneaux doit être égale à l'énergie consommée le jour, plus l'énergie convertie dans les accumulateurs puis consommée la nuit

Pour faciliter le calcul, étudions la courbe journalière de l'énergie convertie sous forme graphique. Pour cela nous assimilons la courbe correspondante à des rectangles d'énergie et l'on obtient la figure suivante

- 1- courbe de l'énergie convertie par beau temps
- 2- Approximation de la courbe 1 par une caractéristique rectangulaire
- 3- courbe de charge de la radiobalise



Soit η_a le rendement des accumulateurs

Si W_a représente la consommation quotidienne du système on doit avoir

$$W_a < \eta_p N S_0 E_0$$

Explicitons W_a

$$W_a = S_1 + 2S_2 \quad (\text{II.18})$$

S_1 est l'énergie consommée par la balise pendant la journée

$$S_1 = P_a \langle \Delta \tau_c \rangle \quad (\text{II.19})$$

S_2 est l'énergie convertie dans les accumulateurs

S'_2 est l'énergie que débitent les batteries dans la balise la nuit.

$$S'_2 = \eta_a S_2 \Rightarrow 2S'_2 = 2\eta_a S_2 = P_a (H - \langle \Delta \tau_c \rangle) \quad (\text{II.20})$$

ou $H = 24H$

$$W_a = P_a \langle \Delta \tau_c \rangle + \frac{P_a (H - \langle \Delta \tau_c \rangle)}{\eta_a} \quad (\text{II.21})$$

On veut donc avoir

$$W_a < \eta_p N S_0 E_0$$

ou

$$\eta_a \eta_p N S_0 E_0 > \eta_a P_a \langle \Delta \tau_c \rangle + P_a (H - \langle \Delta \tau_c \rangle) \quad (\text{II.22})$$

$$E_0 = P_0 \langle \Delta \tau_c \rangle \quad (\text{éclairage moyen annuel}) \quad (\text{II.23})$$

rayonnement journalier moyen en KJ/m ² /j	du 1 au 10	du 10 au 20	du 20 au 30	Moyenne jour- nalière mensuel- le en KJ/m ² /j
Janvier	8888	8926	11917	9910
Février	13541	7025	11587	10717
Mars	16927	13387	19128	16480
Avril	17495	13104	14799	15133
Mai	19978	25445	23130	22850
Juin	26438	28401	20743	25194
Juillet	18679	27782	29194	25210
Aout	22499	19527	20578	20868
Septembre	20143	17787	15578	17836
Octobre	12835	15521	10978	13110
Novembre	12706	11457	9279	11147
Décembre	7260	4518	6031	5936

Tableau (III) : Relevé annuel du rayonnement global pris à Bouzareah en 1981.

$$\text{Finalement } N > \frac{P_a}{P_0} \cdot \frac{1}{\eta_p S_0} + \frac{P_a \cdot (H - \langle \Delta T_c \rangle) \cdot 1}{P_0 \cdot \langle \Delta T_c \rangle \cdot \eta_a \eta_p S_0} \quad (\text{II.24})$$

le flux moyen d'énergie solaire reçu dans la zone d'Alger est égal \bar{a} : (voir paragraphe II.5.1)

$$P_0 = 550 \text{ W/m}^2$$

la puissance nominale de la balise utilisé est $P_a = 24 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 24 \text{ W}$
le rendement d'une cellule solaire est d'environ 12% mais celui des panneaux n'est que de 9% à cause du coefficient de remplissage de la surface de ces panneaux

la surface d'un panneau solaire (modèle Arco) est $S_0 = 0.37 \text{ m}^2$, le nombre de panneaux est alors égal \bar{a} :

$$\underline{N = 4 \text{ panneaux solaires}}$$

II.7. Calcul de la capacité des accumulateurs

le stockage a pour but de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure.

Nos batteries doivent garder une partie de l'énergie convertie le jour pour la restituer la nuit - Elles doivent aussi conserver les excès d'énergie saisonniers pour les resservir lors de creux saisonnier et stocker toutes les fluctuations mensuelles représentées dans la figure 15

II.7.1 Stockage de l'excès saisonnier

Comme les panneaux sont fixés une fois pour toutes vers une orientation $\theta = L$, on a un excès d'énergie ΔW^+ à l'époque du printemps ou de l'automne et un défaut d'énergie centré sur l'été et l'hiver figure 15 - Si on admet qu'il y a compensation des variations saisonnières on a :

$$\Delta W^+ = - \Delta W^- = \Delta W$$

Si les batteries ne comportent pas de pertes par auto décharge, l'excès d'énergie au printemps (ou automne) a pour expression alors :

$$\Delta W = \eta_a \eta_p S \int_{T/8}^{3T/8} (E(t) - E_0) dt \quad (\text{II.25})$$

après intégration on trouve :

$$\Delta W = 58 \eta_a \eta_p S E_M \quad (\text{II.26})$$

Remarque : l'amplitude de la fluctuation E_M est d'après la figure 15 égale à $0.15 E_0$

la tension nominale des accumulateurs est $U_0 = 24V$. La capacité des accumulateurs exprimée en Ampère-heures s'écrira.

$$C_1 \geq \frac{\Delta W}{U_0} \quad (\text{II.27})$$

$$C_1 \geq \frac{58 \times 0.8 \times 0.09 \times 1.48 \times 0.15 \times 550 \times 10}{24}$$

$$C_1 = 220 \text{ AH}$$

II.7.2. Stockage de la consommation quotidienne

Ce stockage concerne uniquement les besoins énergétiques de la balise en période nocturne

Dans l'expression (II.21), $\frac{P_a (H - \langle \Delta z_c \rangle)}{\eta_a}$ est l'énergie convertie

le jour pour la consommation la nuit.

la capacité des accumulateurs qui doit de plus réserver cette énergie s'écrira

$$C_2 \geq \frac{P_a (H - \langle \Delta z_c \rangle)}{\eta_a U_0} \quad (\text{II.28})$$

$$C_2 \geq \frac{24 (24 - 10)}{0.8 \times 24}$$

$$C_2 = 20 \text{ AH}$$

II.7.3 Stockage des fluctuations mensuelles

Dans le but d'assurer à notre système une autonomie de fonctionnement adéquate et le maximum de sécurité, il est nécessaire de tenir compte dans nos calculs des variations décadaires de l'ensoleillement

Pour évaluer correctement ces fluctuations, nous avons procédé à la détermination de leurs paramètres caractéristiques tels que: amplitude, fréquence et durée.

L'examen de la courbe en moyennes décadaires de l'année 1981 fait ressortir un nombre moyen de creux égal à 9. La fréquence de répétition moyenne est estimée à 30 jours tandis que l'amplitude varie autour de $2.5 \cdot 10^3 \text{ KJ/m}^2/\text{j}$. Ces creux d'énergie sont directement griffés sur la courbe à ondulations minimales de la figure 21

II.7.3.1. Calcul de l'énergie convertie perdue dans un creux d'énergie

Soient E_m l'amplitude moyenne du défaut d'énergie $E_m = 2.5 \cdot 10^3 \text{ KJ/m}^2/\text{j}$

T_0 la périodicité du creux d'énergie $T_0 = 30$ jours

$\langle \Delta z \rangle$ est la durée moyenne du creux d'énergie évaluée à 15 jours

Pour calculer l'énergie perdue, nous approchons l'allure du creux à une sinusoïde ainsi

$$E_p = n_a n_p S \int_0^{\langle \Delta z \rangle} E_m \sin \frac{2\pi t}{T_0} dt \quad (\text{II.29})$$

après intégration on obtient

$$E_p = n_a n_p S \frac{T_0}{\pi} E_m. \quad (\text{II.30})$$

la durée utile d'ensoleillement étant toujours $\langle \Delta z_c \rangle = 10\text{H}$ alors la valeur de E_p exprimée en $\text{Wh/m}^2/\text{j}$ est

$$E_p = 700 \text{ Wh/m}^2/\text{j}$$

les accumulateurs doivent ainsi stocker un excès d'énergie qui compen-

Serait le creux d'énergie que l'on vient de calculer. la capacité de la batterie correspondante s'écrira

$$C_3 \geq \frac{E_p}{U_0} \quad (\text{II.31})$$

$$C_3 \gg \frac{0.8 \times 0.09 \times 1.48 \times 30 \times 700}{24 \times \pi}$$

$$C_3 = 30 \text{ AH}$$

la capacité totale des accumulateurs est donc :

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3$$

$$\underline{C_t = 270 \text{ AH}}$$

II.8. Conclusion

Nous avons examiné au cours de ces calculs la condition économique de notre installation. Nous avons supposé que le défaut d'énergie est correctement compensé par tout excès d'énergie. Ceci nous a conduit à une valeur de capacité relativement grosse. la mission de notre installation est le guidage des avions, il est alors préférable de réduire au maximum la capacité trouvée C_t afin d'écartier tout risque de défaillance éventuelle. les aspects sécurité seront développés lorsque nous étudierons le cas où la balise est implantée à Hassi-Messaoud. L'étude que nous avons abordée en exploitant les données d'ensoleillement d'Alger nous a permis d'examiner comment calculer la taille d'une installation photovoltaïque si les conditions météorologiques sont défavorables

II.9. Cas d'implantation de la radiobalise à Hassi-Messaoud

II.9.1 Extension du calcul à Hassi-Messaoud

le manque de données précises d'ensoleillement pour la région de Hassi-Messaoud ne nous permet pas d'utiliser directement la procédure de

calcul précédente.

Cependant ; nous pouvons exploiter les données des cartes mondiales d'irradiation solaire [2] et [3]. En extrapolant, les valeurs de flux de rayonnement solaire à la zone de Hassi-Messaoud, on trouve, en moyenne annuelle

$$E'_0 = 800 \text{ W/m}^2$$

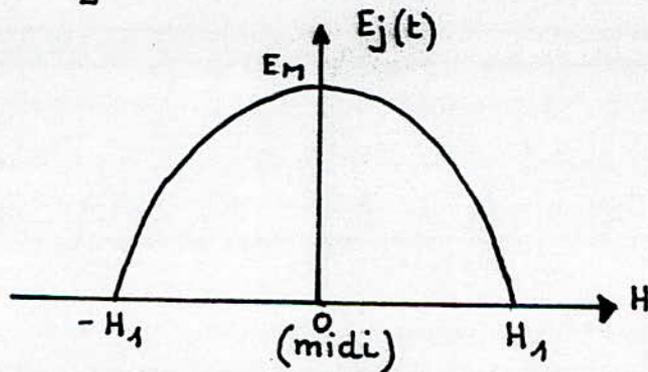
Afin de déterminer la durée utile d'ensoleillement $\langle \Delta \tau_u \rangle$, en valeur moyenne annuelle, nous faisons les remarques suivantes.

Par beau temps (ce qui est un cas fréquent pour les régions sahariennes) le flux d'énergie solaire $E(t)$ reçu par un capteur plan est donné par la relation (II.5) - La variation de la déclinaison au cours de la journée est pratiquement nulle et le flux d'énergie solaire capté par les panneaux solaires est de la forme.

$$E_j(t) = E_M^j \cos H \pm E_j \quad (\text{II.32})$$

avec $E_M^j = E_0 \cos(L-\theta)$ et $E_j = |\sin(L-\theta) \sin \delta|$

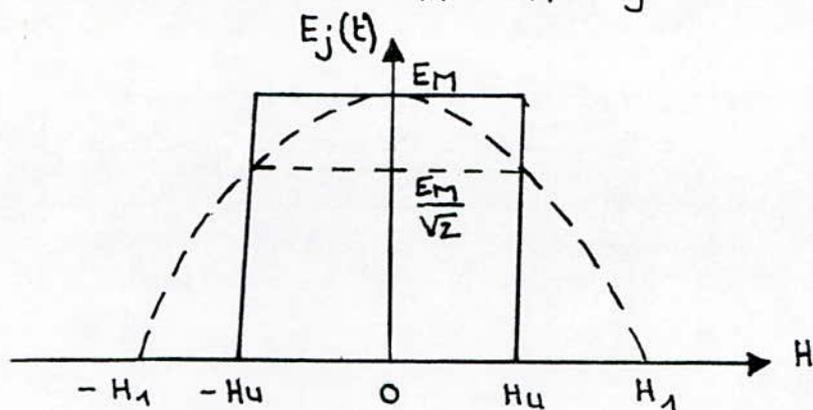
d'où la courbe journalière d'ensoleillement.



En réalité, le climat peut ne pas être aussi favorable au cours de l'année et cette courbe peut de ce fait être altérée par des fluctuations d'énergie dues à des passages nuageux. Mais dans le Sud algérien, on a rarement un temps couvert pendant toute la journée.

Afin de limiter l'effet de ces fluctuations d'énergie et garantir une sécurité d'alimentation en électricité de la balise radioélectrique, on suppose que la puissance convertie n'est significative que si elle vaut au moins 0.7 fois la puissance maximale. Ce qui revient à considérer une courbe journalière

d'ensoleillement ne variant pas pendant la durée utile d'ensoleillement et dont la valeur maximale est $E_M = E_M^j \pm E_j$ soit :



la durée d'ensoleillement vaut, en moyenne annuelle, $\Delta R = 2h_1 \approx 12$ heures avec $H = 2\pi/24$ h. On en déduit de cette valeur et de la courbe précédente que la durée utile d'ensoleillement $\Delta H_u = 2H_u$ est en moyenne annuelle de l'ordre de 6 heures (En effet, pour $\Delta h = 12$ h, on $E_j(t) = E_M \cos \frac{2\pi}{24} h$. Pour $E_j(t) = \frac{E_M}{\sqrt{2}}$ on trouve $h = 6$ heures.

Compte tenu de cette hypothèse, la loi de variation du flux total d'énergie solaire pendant l'année est alors :

$$E(t) = \int_{-H_u}^{H_u} E(H) dt \approx E_0 \langle \Delta \tau_u \rangle [\cos(L-\theta) \cos \delta + \sin(L-\theta) \sin \delta] \quad (\text{II.33})$$

$$E(t) = E_0 \langle \Delta \tau_u \rangle \cos(\delta(t) - L + \theta) \quad (\text{II.34})$$

Dans le cas où les panneaux solaires sont horizontaux, on a $\theta = 0$ et $E(t)$ devient

$$E(t) = E_0 \langle \Delta \tau_u \rangle \cos(\delta(t) - L) \quad (\text{II.35})$$

Par contre, s'ils sont dirigés vers le Sud et perpendiculaires au sol $\theta = \pi/2$ on obtient

$$E(t) = E_0 \langle \Delta \tau_u \rangle \sin(\delta(t) - L) \quad (\text{II.36})$$

Par dérivation, il est facile de voir que les fluctuations saisonnières de $E(t)$ sont minimales quand $\theta = L$. Dans ce cas on aura :

$$E(t) = E_0 \langle \Delta \tau_u \rangle \cos \delta(t) \quad (\text{II.37})$$

la figure 22 donne les courbes d'ensoleillement correspondantes respectivement à $\theta = 0, L$ et $\pi/2$ ($L = 32^\circ$)

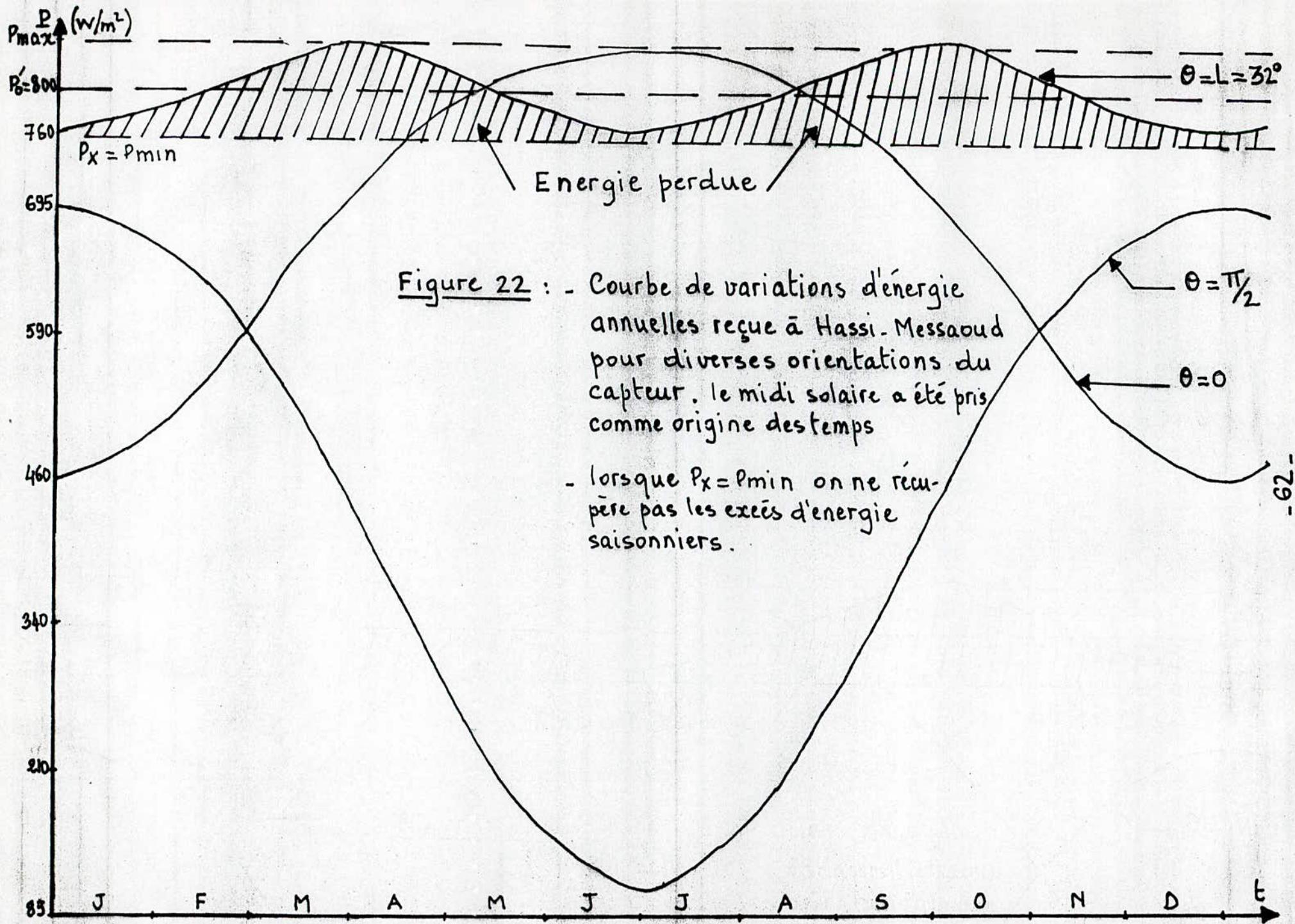
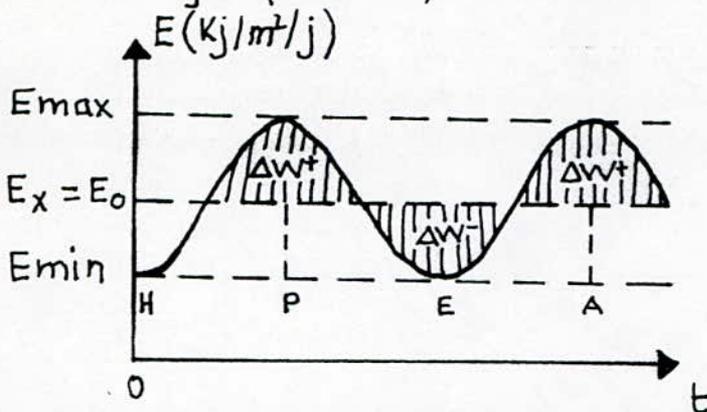


Figure 22 : - Courbe de variations d'énergie annuelles reçue à Hassi-Messaoud pour diverses orientations du capteur. le midi solaire a été pris comme origine des temps

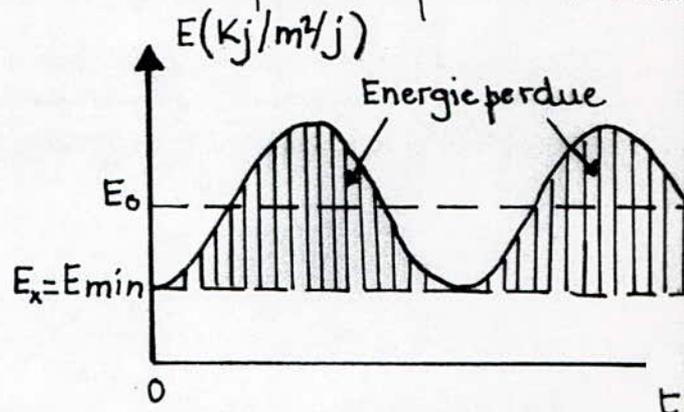
- lorsque $P_x = P_{min}$ on ne récupère pas les excès d'énergie saisonniers.

Si on se fixe la courbe de charge et les données d'ensoleillement, il est facile de voir que le nombre de panneaux solaires et la capacité des batteries dépendent du choix du point de fonctionnement E_x sur la courbe d'ensoleillement.

On distingue plusieurs cas mais nous n'aborderons ici que ceux qui nous intéressent



Cas : $\Delta W^+ = \Delta W^- = \Delta W$



Cas : $\Delta W = 0$

II.9.1.1 cas ou $\Delta W^+ = \Delta W^-$

la fluctuation d'énergie ΔW^+ compense exactement le défaut ΔW^- . Cette situation a été déjà étudiée dans le cas de l'implantation de la balise radio électrique à Alger - le calcul des éléments de l'installation dans le cas de Hassi-Messaoud s'obtient assez aisément. Il suffit de remplacer respectivement P_0 et $\langle \Delta z_u \rangle$ par $P'_0 = 800 \text{ w/m}^2$ et $\langle \Delta z_u \rangle = 6$ heures dans les expressions (II.24) (II.26) et (II.28)

II.9.1.1.1 Calcul du nombre de panneaux solaires

L'expression (II.24) donne

$$N' > \frac{P_a}{P'_0} \cdot \frac{1}{\eta_p S_0} + \frac{P_a}{P'_0} \cdot \frac{(H - \langle \Delta z_u \rangle)}{\langle \Delta z_u \rangle} \cdot \frac{1}{\eta_a \eta_p S_0}$$

$$\underline{N' = 5 \text{ panneaux solaires}}$$

II.9.1.1.2 Calcul de la capacité des accumulateurs

le calcul de capacité ne concerne ici que le stockage des excès d'énergie saison-

niers et de la consommation quotidienne de la balise radioélectrique ainsi l'expression (II.26) et (II.27) donnent

$$C'_1 \geq \frac{\Delta W'}{U_0}$$

ou $\Delta W' = 58 \eta_a \eta_p S' E'_M$ avec $E'_M = 0.15 E'_0$
 $S' = N' S_0$
 $E'_0 = P'_0 < \Delta \tau u >$

$$C'_1 = 240 \text{ AH}$$

et (II.28) donne

$$C'_2 \geq \frac{P_a (H - < \Delta \tau u >)}{\eta_a U_0}$$

$$C'_2 = 30 \text{ AH}$$

totale

la valeur de la capacité de stockage est donc

$$C'_t = C'_1 + C'_2$$

$$C'_t = 270 \text{ AH}$$

II.9.1.2 Cas $\Delta W = 0$

les fluctuations ΔW étant nulles, on ne récupère pas les excès d'énergie saisonniers. Dans ce cas il faut augmenter le nombre de panneaux solaires (qui sera d'ailleurs le plus élevé possible) pour fixer la consommation en énergie à P_a et placer un limiteur de charge pour protéger les batteries.

le nombre de panneaux étant inversement proportionnel au point de fonctionnement E_x (égal à E_{min} dans ce cas) on a d'après (II.24)

$$N_1 > \frac{P_a}{P_x} \cdot \frac{1}{\eta_p \eta_a S_0} + \frac{P_a (H - < \Delta \tau u >)}{P_x < \Delta \tau u >} \cdot \frac{1}{\eta_p \eta_a S_0}$$

ou $P_x = E_x / < \Delta \tau u >$

la courbe d'ensoleillement de la figure 22 donne $P_x = 760 \text{ W/m}^2$
 le nombre de panneaux solaires N_1 est alors :

$$\underline{N_1 = 5 \text{ panneaux solaires}}$$

Remarque : $N_1 = N'$ ceci n'est pas toujours le cas

la capacité des batteries est proportionnelle à P_x . Elle sera donc plus petite que celle indiquée par le calcul précédent. Elle est destinée uniquement pour le stockage quotidien - l'expression (II.28) permet de déterminer sa valeur on a:

$$C \geq \frac{P_a (H - \langle \Delta \tau u \rangle)}{\eta_a u_0}$$

$$\underline{C = 30 \text{ AH}}$$

II.10. Conclusion

le calcul que nous avons abordé dans le premier cas, c'est à dire $\Delta W^+ = \Delta W^-$ est identique à celui que nous avons effectué pour Alger sauf qu'ici on n'a pas tenu compte des fluctuations décennales, cependant on a été plus sévère dans le choix de la durée utile d'ensoleillement ceci pour limiter l'effet des variations de flux par période de mauvais temps.

Dans le deuxième cas, on accepte de perdre de l'énergie afin de garantir une meilleure sécurité de fonctionnement du système.

Chapitre III

III. Réalisation expérimentale

III.1. Simulation de l'installation

Pour vérifier expérimentalement nos calculs, nous avons travaillé sur une installation de taille réduite. En d'autres termes, nous disposons d'un panneau (modèle ARCO) de puissance crête 33W, d'une batterie 12V, d'un coupleur électronique qui assure la protection du montage et d'une charge R_x . Le choix de R_x doit s'effectuer en fonction de la caractéristique de charge de la balise radioélectrique (voir I.9.1). Nous avons pris en conséquence une résistance R de valeur 24Ω de puissance 6W en série avec une diode de puissance

III.2. Schéma du montage

Il est donné par la figure 23. Le coupleur électronique utilisé pour nos manipulations a été, déjà, réalisé dans le cadre d'un projet de fin d'études en janvier 82. Nous l'avons ajusté pour l'adapter à notre expérience. Les essais ont été effectués au CSTM dans le laboratoire des couches minces et cristaux. Nous avons fait fonctionner le système pendant près de 6h (entre 11h et 17h). Les premières constatations que l'on peut faire sont que le dispositif de protection électronique s'adapte très bien à notre montage et que la charge et la décharge de la batterie selon l'intensité de flux solaire reçu, semblent vérifier sommairement les règles résultant du calcul de la taille de l'installation. Il est certain que des essais sur une installation de taille réelle et pendant un laps de temps suffisamment long, nous diront si nous avons correctement calculé le nombre optimal de panneaux et la capacité de la batterie. Le transfert des premiers résultats que nous venons d'obtenir à une installation de taille réelle peut se faire en multipliant le courant de court-circuit par trois et la tension en circuit ouvert par deux. Ceci nous permet de concevoir le coupleur électronique qui pourra être utilisé avec la balise radioélectrique de 24W.

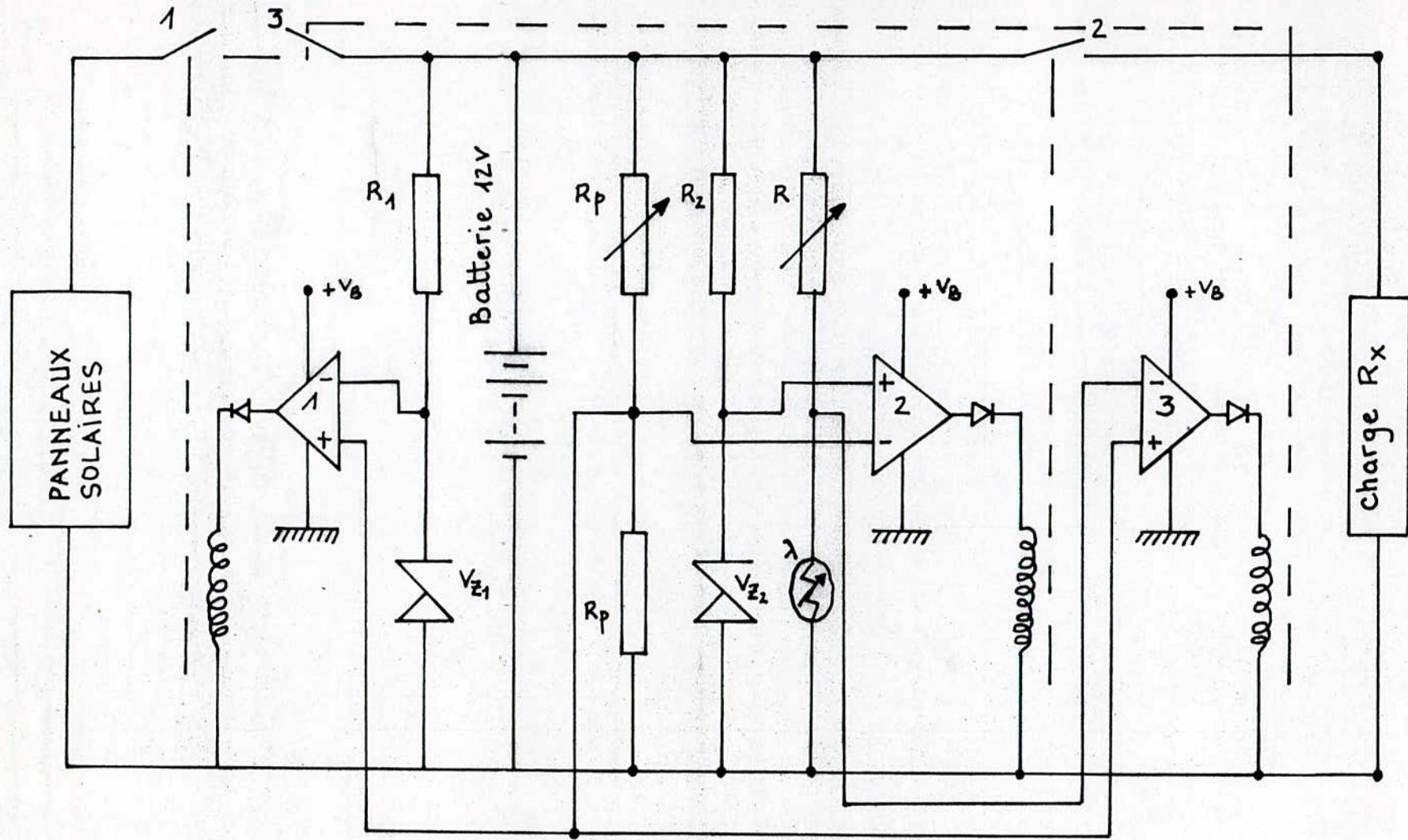


Figure 23: Système de protection et de distribution d'énergie

III.3 Conception du coupleur électronique associé à la balise radioélectrique

Dans le schéma de la figure 23, on peut remarquer l'existence de plusieurs relais électromécaniques. De tels éléments de commutation sont encombrants, dissipent de l'énergie et posent des problèmes de fiabilité en raison des contacts mécaniques. On leur préfère les commutateurs à semi-conducteur: Dans ce sens, nous avons conçu un circuit électronique presque entièrement transistorisé qui doit assurer les fonctions suivantes.

- 1- Protection de la batterie contre une décharge complète et contre les surcharges. Ceci augmenterait la longévité des accumulateurs.
- 2- Couplage de la batterie à la balise jour et nuit.
- 3- le bon fonctionnement de la balise le jour c'est à dire alimentation de celle-ci soit par les panneaux solaires (quand il y a beau temps) soit par les batteries

III.4. Schéma du montage

la figure 24 donne le schéma détaillé du dispositif électronique

III.4.1 Principe de fonctionnement

Notre montage est composé de deux parties essentielles

1- Un comparateur de tension formé d'un ampli opérationnel (UA741) qui assure à l'aide d'un relais, la protection contre la décharge complète de la batterie en comparant la tension du pont diviseur R_p égale à $V_{Bat}/2$ à celle de la zener V_{Z2} - lorsque la tension de la batterie descend jusqu'à sa limite inférieure, le comparateur se bloque, l'interrupteur s'ouvre et la décharge s'arrête totalement.

2- Un circuit transistorisé qui assure la protection contre les surcharges des accumulateurs et évitant également une décharge des batteries à travers les photopiles pendant les périodes de non illumination. Son fonctionnement est le suivant:

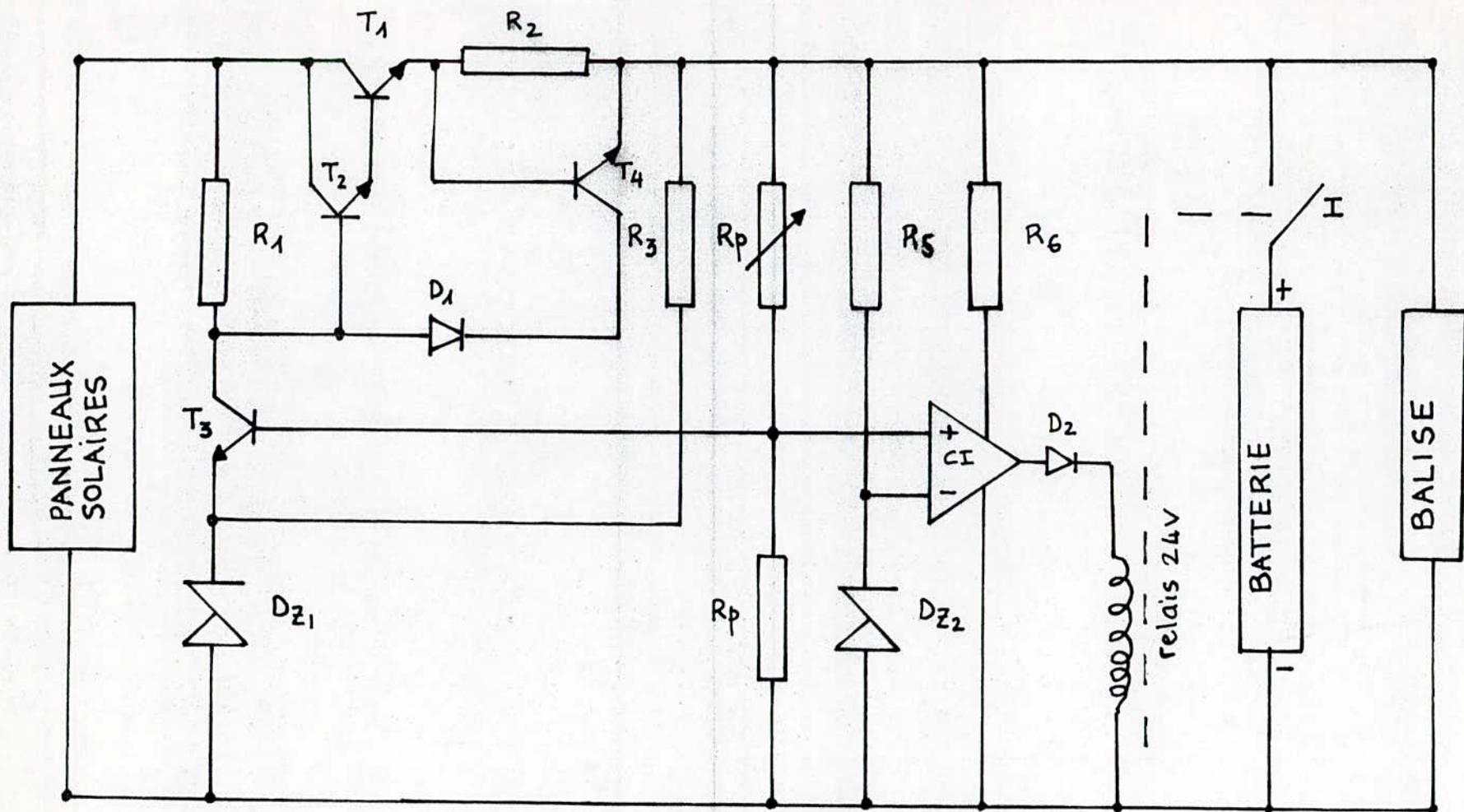


Figure 24 : schéma du coupleur électronique associé à la balise radioélectrique 24W

le transistor T_3 est chargé de la régulation et de la limitation en tension son émetteur est polarisé à une tension de référence fixe déterminée par la diode zener D_{31} (12.6V), la résistance R_3 assurant le fonctionnement de D_{31} au delà du coude de zener par le passage d'un courant $I = 5\text{mA}$

La base de T_3 reçoit une tension égale à $V_{\text{Bat}}/2$

lorsque la batterie est déchargée, la tension de la base de T_3 devient faible et par conséquent le transistor T_3 ne conduira pas, le courant I_{C3} sera très faible et la chute de tension due à la résistance R_1 sera faible également, la base de T_2 sera alors très positive et son courant I_{C2} maximal - le transistor T_1 conduira alors à son maximum. Au fur et à mesure de la remontée en tension de la batterie, le courant I_{C3} remontera aussi ce qui créera une chute de tension plus importante dans R_1 , la base de T_2 sera moins positive et donc l'ensemble (T_1, T_2) qui est un montage Darlington conduira moins.

lorsque la tension de la batterie atteindra la valeur limite supérieure de (26,4V), la base de T_3 alimentée par le pont diviseur R_p mettra le transistor à l'état de saturation, ceci aura pour effet de bloquer l'ensemble (T_1, T_2) et par conséquent le blocage de la liaison panneaux batterie.

le transistor T_1 assure également la protection contre la décharge de la batterie à travers les panneaux pendant la nuit et en période de mauvais temps. Il doit pouvoir supporter la tension inverse de la batterie lorsque les panneaux sont à l'obscurité.

L'ensemble (R_2, T_4) a pour rôle de limiter le courant ($\bar{I} = 3.5\text{A}$) délivré par le montage Darlington

III.4.2 Nomenclature

Transistors :

T_1 : 2N3055

T_2 : 2N1711

T_3 : BC 107

T_4 : 2N1711

Diodes

D_1 : 1N4001

D_2 : 1N4001

Diodes Zener

$D_{31} : 12.6V$

$D_{32} : 10.8V$

Circuit intégré

$\mu A 741$

Résistances

$R_1 : 1.8K\Omega \quad 1/2 W$

$R_2 : 0.17\Omega \quad 4 W$

$R_3 : 2.8K\Omega \quad 1/2 W$

$R_4 : 4K\Omega \quad 1/2 W$

$R_5 : 3K\Omega \quad 1/2 W$

$R_6 : 1.8K\Omega \quad 1/2 W$

Potentiomètre

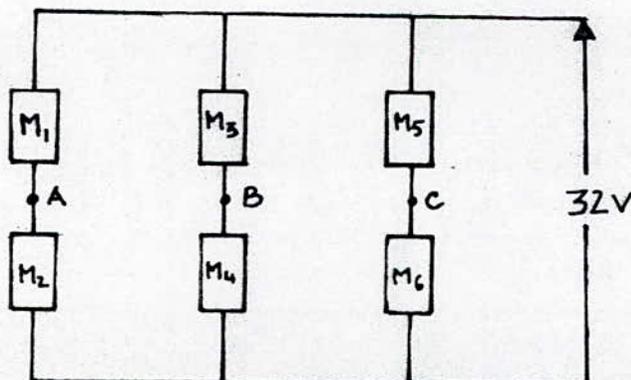
$R_p : 4.7K\Omega$

Relais

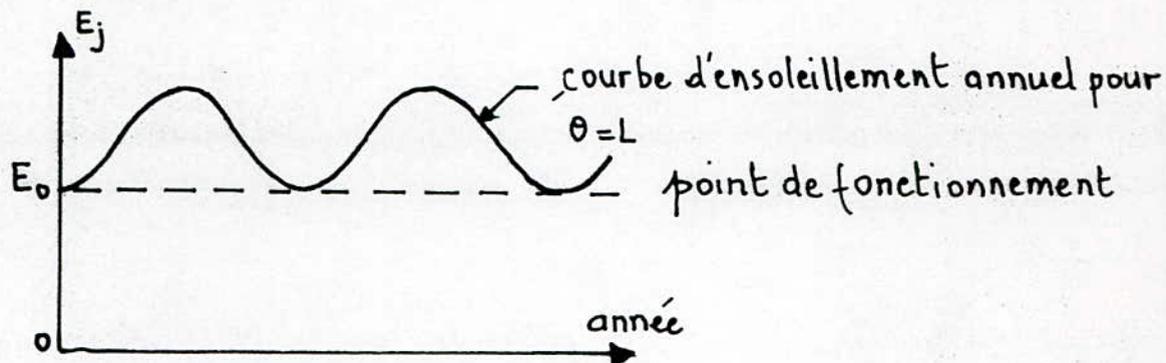
1relais 24v

III. 5. Adaptation des panneaux à la balise radioélectrique

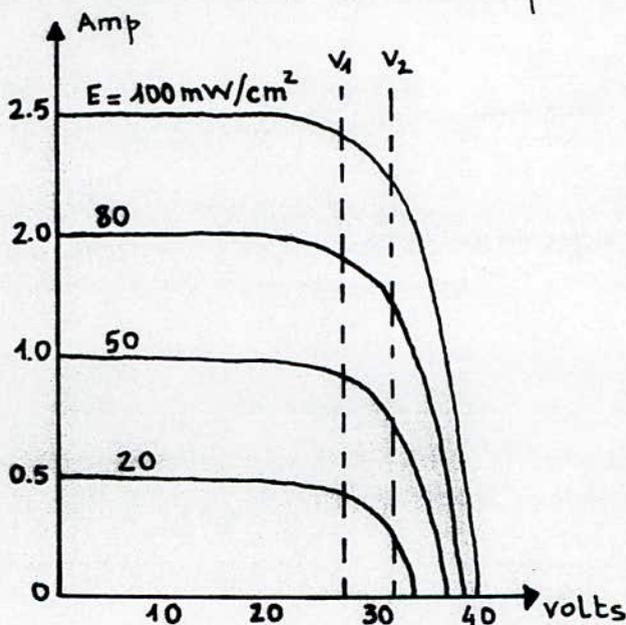
le calcul de dimensionnement pour la région de Hassi-Messaoud nous a donné un nombre minimal de panneaux solaires égal à 5. Comme il faut alimenter la balise radioélectrique sous 24V, 1A et que chaque module délivre sous des conditions optimales une tension de 16V, un courant de 2A, la configuration la plus simple que l'on puisse adopter est la suivante



Pour limiter les fluctuations de flux solaire, nous faisons travailler les 6 panneaux solaires au point de fonctionnement comme indiqué sur la figure ci-dessous



le réseau de caractéristiques $I = f(V)$ de deux modules solaires ARCO 16.200 placés en série à $T = 28^\circ\text{C}$ est donné par la figure suivante:



Cette caractéristique montre que le maximum de puissance est obtenu lorsque V est voisin de 32V

Comme notre radiobalise fonctionne sous 24V, le problème qui se pose est de concevoir un ensemble de manière à extraire le maximum de puissance du convertisseur photovoltaïque c'est à dire trouver un système pour lequel les points de la caractéristique de charge coïncident avec les points de la puissance maximale délivrée par l'ensemble des panneaux

Une solution intéressante consiste à découper la tension fournie par les panneaux solaires. Puis, on abaisse l'amplitude des impulsions ainsi obtenues vers la valeur de la tension nominale de la balise. Enfin, on procède au redressement de ces impulsions

Si ce type de coupleur ne comportait aucune perte d'énergie, on pourrait adapter ainsi les caractéristiques des panneaux et celles de la radiobalise respectivement à l'entrée et à la sortie de ce coupleur. Ce qui se traduirait par un gain de 30% en énergie convertie.

En réalité ce genre de dispositif présente des pertes d'énergie et son utilisation n'est pas bénéfique dans le cas d'installations solaires de petite puissance.

III.6. Association et protection des panneaux solaires

Dans la pratique les panneaux solaires ne sont jamais rigoureusement identiques, des déséquilibres peuvent survenir il est alors possible d'envisager des lignes dites d'équilibrage correspondant à des court-circuits reliant les points A, B, C de la figure (III.5); ainsi que des protections par diodes. Un groupement de 6 panneaux est illustré par la figure 25 où un maillage du réseau a été effectué à l'aide de lignes dites d'équilibrage reliant tous les points devant se trouver au même potentiel. Etant donné que le courant de court-circuit de chaque réseau série est relativement faible (2A) il est inutile de mettre une diode en série avec les panneaux seule la diode de protection qui évite une décharge des accumulateurs à travers les photopiles est nécessaire. mais par contre il faut des diodes en parallèle comme l'indique la figure 26 pour éviter la destruction des panneaux si l'un est éventuellement à l'obscurité.

III.7. Installation sur le terrain des panneaux solaires

Si on doit installer les panneaux à Hassi-Messaoud, il faudrait prendre un certain nombre de précautions spécifiques au Sud.

1. Surélever les panneaux d'une hauteur supérieure à un mètre pour éviter les vents de sable et l'albedo de la terre et les orienter vers le Sud d'un angle $\theta = L = 32^\circ$. L'idéal est de disposer ces panneaux sur le toit d'un local.

2. Il faut assurer l'isolation électrique des cellules solaires vis à vis du support des panneaux.

3. les batteries et le coupleur électronique doivent être logés dans un caisson en béton enterré, pour^{les} protéger contre les variations de climat, les poussières et la chaleur.

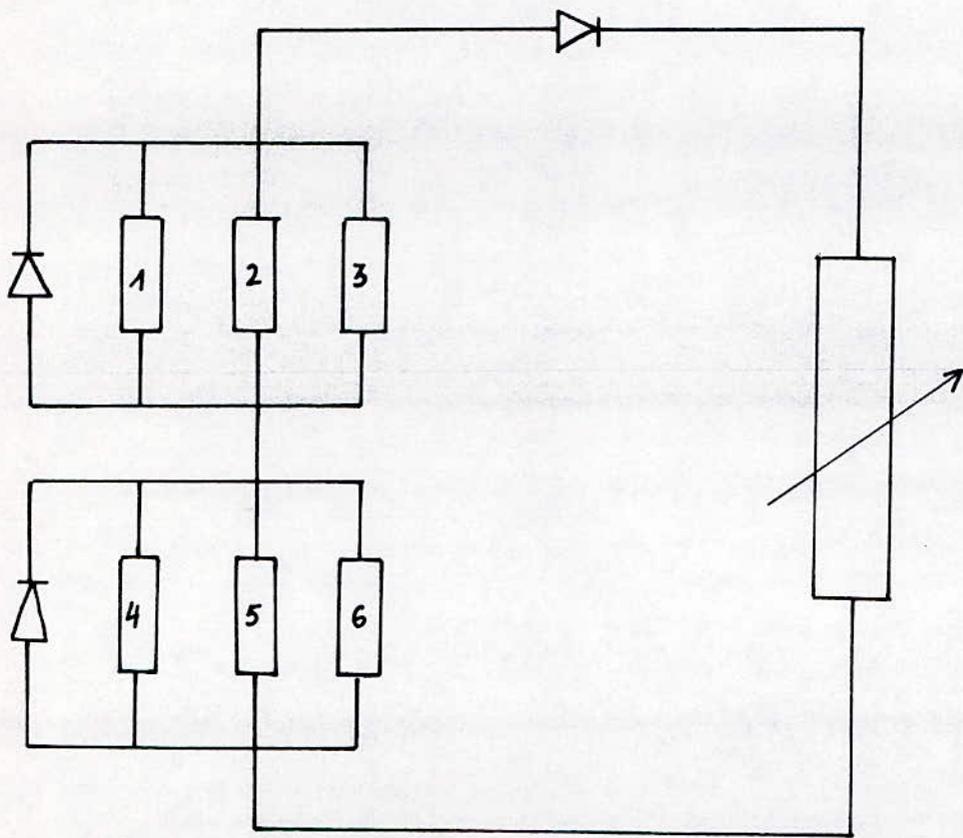


Figure 25 : Association et protection des modules
Montage serie - parallèle "conseillé"

III.8 Considérations économiques

Dans le cas où les panneaux solaires travaillent avec le point de fonctionnement de la figure du paragraphe (III.5), l'amplitude de la fluctuation d'énergie saisonnière qui sert à compenser les creux d'énergie de l'été ou de l'hiver sera considérée comme nulle et par conséquent l'énergie annuelle E reçue aura alors la valeur

$$E = \int_0^{365} E_0 dt = 365 E_0 \quad (\text{III.1})$$

III.8.1 Calcul du coût du watt installé

Ce calcul nous permet uniquement d'avoir une idée générale de l'ordre de grandeur du kWh installé dans le cas d'une installation photovoltaïque de petite puissance.

III.8.2 Hypothèses

les termes suivants seront considérés comme donnés.

C_p : coût du watt-crête

C_b : coût du kWh du stockage

W_a : besoins convertis en énergie

P_0 : puissance maximale par m^2 des panneaux

η_a : rendement convertisseur stockage

η_p : rendement des photopiles

θ : coefficient d'actualisation: Il caractérise les variations du DA d'une année à l'autre. Sa forme générale est donnée par l'expression suivante

$$\theta = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{1+k} \right)^i = \frac{1}{k} \left(1 - (1+k)^{-N} \right) \quad (\text{III.2})$$

ou k : taux d'intérêt ou taux d'actualisation

N : durée de vie de l'installation

le coût du terrain, du support et des opérations de main d'œuvre seront considérés comme négligeables

la formule donnant le coût du Watt installé est alors

$$C = \frac{C_p P_0 + n_a C_b (E_x + A E_M)}{h_p \theta \cdot E} \quad (\text{III } 3) \quad [10]$$

avec $E_x = E_0 - E_M \cos \frac{4\pi t}{T}$ représentant la courbe d'ensoleillement annuel pour $\theta = L$

$$A = f \left(\frac{E_M}{E_0}, t, K \right)$$

lorsque $E_M = 0$ c'est à dire que le point de fonctionnement des panneaux est choisi de telle manière à réduire au maximum les fluctuations d'énergie l'expression (III 3) devient plus simple et s'écrit

$$C = \frac{C_p P_0 + n_a C_b E_0}{h_p \theta \cdot 365 E_0} \quad (\text{III } .4)$$

Remarque : le coût C du kWh installé dépend essentiellement du prix des panneaux solaires.

les panneaux développent une puissance crête de 100 à 120 watt/m² de surface utile (surface occupée uniquement par les cristaux de silicium) pour un rayonnement de 1000 W/m². leur coût varie de 50 à 100 DA le W/crête suivant les conditions industrielles de production c'est à dire suivant leur durée de vie et leur fiabilité.

L'utilisation d'un taux d'actualisation correct exige l'existence d'un large marché de capitaux qui permet d'observer un taux d'intérêt d'équilibre et on utilise ce taux d'intérêt comme taux d'actualisation. Pour évaluer le coût du watt installé, nous avons utilisé pour nos calculs les données suivantes.

$$N = 10 \text{ ans}$$

$$K = 10\%$$

$$m_p = 9\%$$

$$m_a = 80\%$$

on trouve finalement

$$C_p = 100 \text{ DA/W. crête}$$

$$C_b = 0.5 \text{ DA}$$

$$P_0 = 33 \times 6 \text{ W. crête/m}^2$$

$$E_0 = 4800 \text{ Wh}$$

$$C = 30 \text{ DA / kWh.}$$

Conclusion

Nous avons ainsi examiné au cours de cette étude comment alimenter par conversion photovoltaïque une balise radioélectrique qui serait installée à l'aéroport de Hassi-Messaoud.

L'étude économique montre que le prix du Kwh installé est cher, il vaut 30 DA le Kwh. Il est soixante (60) fois plus grand que celui délivré par le réseau public de la SONELGAZ, c'est à dire 0.5 DA/Kwh.

Cependant, la comparaison de ces prix n'est pas correcte dans la mesure où la balise radioélectrique a été prévue pour être implantée à 7.5 Km de l'aéroport de Hassi-Messaoud mais sur un site difficilement accessible. En effet, si on devait alimenter la balise par des moyens conventionnels, il faudrait prévoir au niveau de l'aéroport un groupe électrogène actionné par un moteur diesel. Ensuite, il faudrait relier celui-ci à la balise à l'aide d'un réseau électrique composé de transformateur, d'organes de protections, de câbles et de poteaux.

Si on introduisait le coût de ces éléments; ainsi que celui de la consommation quotidienne en fuel et la maintenance des équipements, on obtiendrait un coût du watt installé beaucoup plus élevé que 0.5 DA/Kwh. mais demeurant inférieur à 30 DA/Kwh.

Pour que le système photovoltaïque puisse devenir compétitif sur le plan économique, il faudrait réduire le prix des photopiles d'un facteur au moins supérieur à 2. Ce que les fabricants de cellules solaires ont prévu de faire dans un proche avenir en améliorant les techniques de fabrication. Malgré cela, le système photovoltaïque demeure simple, facile à entretenir et garantit une bonne sécurité de fonctionnement de la balise radioélectrique.

Le calcul de dimensionnement que nous avons fait montre qu'il faudrait:

- utiliser un nombre de panneaux égal à 6 et une capacité des batteries égale à 30AH pour alimenter la balise radioélectrique (24W).

- que la surface modulaire des panneaux soit dirigée vers le Sud et inclinée d'un angle $\theta = \lambda = 32^\circ$ par rapport à la verticale du lieu.

- Surélever les panneaux d'une hauteur minimale d'un mètre (1m) pour assurer un refroidissement correct des cellules solaires. l'idéal serait de placer ces panneaux en un endroit surélevé comme par exemple le toit d'un local ou un monticule rocheux. On limite ainsi par la même occasion, la

dégradation des cellules par les vents de sable:

- Enterrer les accumulateurs et le coupleur électronique dans un caisson suffisamment étanche mais facile d'accès. Ceci doit permettre de faire fonctionner ces éléments à température variant peu au cours de l'année et les protéger contre les intempéries.

Pour vérifier si la taille de la balise solaire a été correctement calculée, il faudrait maintenant procéder à l'installation d'un prototype sur le site choisi, puis faire des mesures pendant au moins une année pour voir si le système continu à fonctionner en période de mauvais temps. Espérons que les organismes de radionavigation aérienne puissent utiliser les résultats de notre étude et se pencher bientôt sur un tel problème !

Légende des abréviations

abréviations	Désignation en anglais	Désignation en Français
ENEMA		Entreprise nationale de l'exploitation météorologique et aéronautique
OACI	Organisation Aviation civil international	Organisation internationale de l'aviation civile
VASI	Visual approach slope indicator	dispositif d'angle d'approche visuel
I.L.S	Instruments Landing système	système d'atterrissage aux instruments
LORAN	Long range navigation	système de navigation grandes distance
DME	Distance measurement équipements	équipements de mesure de distance
VOR	VHF. omnirange	Radiophare omnidirectionnel VHF

Bibliographie

1. A. ADANE
Dimensionnement d'une centrale solaire à conversion photo-voltaïque
2. RTC (radiotechnique compelec)
3. A. Laugier et J.A. Roger
Les photopiles solaires. Du matériau au dispositif. Du dispositif aux applications. Technique et Documentation (1981)
4. W. PALZ
L'électricité solaire.
5. ALEX DRIEU
Méthodes modernes de radionavigation.
6. BBT (technique du balisage aérien)
7. AEG (TELEFUNKEN)
Aides visuelles pour la sécurité aérienne.
8. F. PENIN
Radionavigation (ENSTA) 1973
9. C. ALARI
radionavigation (ENAC) 1975