

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
D.E.R Génie Electrique et Informatique

THESE

En vue de l'obtention du grade de

MAGISTER

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

en Electronique
option : Télécommunications

Thème

**ETUDE ET REALISATION D'UN CONTROLEUR
PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME UNIVERSEL**

Présentée par
Fouad KIRAT
Ingénieur en électronique, ENP

Soutenue en Novembre 1999 devant le jury composé de

M. A. ZERGUERRAS	Professeur, ENP	Président
M. MHADDADI	Maître de conférence, ENP	Rapporteur
M. A. MALEK	Chargé de recherche, CDER	Examinateur
M. C. LARBES	Maître de conférence, ENP	Examinateur
M. M. MEHENNI	Maître de conférence, ENP	Examinateur

Ecole nationale polytechnique, 10 avenue Hassen Badi El Harrach. ALGER

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
D.E.R Génie Electrique et Informatique

THESE

En vue de l'obtention du grade de

MAGISTER

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

en Electronique
option : Télécommunications

Thème

**ETUDE ET REALISATION D'UN CONTROLEUR
PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME UNIVERSEL**

Présentée par
Fouad KIRAT
Ingénieur en électronique, ENP

Soutenue en Novembre 1999 devant le jury composé de

M. A.ZERGUERRAS	<i>Professeur, ENP</i>	<i>Président</i>
M. M.HADDADI	<i>Maître de conférence, ENP</i>	<i>Rapporteur</i>
M. A.MALEK	<i>Chargé de recherche, CDER</i>	<i>Examinateur</i>
M. C.LARBES	<i>Maître de conférence, ENP</i>	<i>Examinateur</i>
M. M.MEHENNI	<i>Maître de conférence, ENP</i>	<i>Examinateur</i>

Ecole nationale polytechnique, 10 avenue Hassen Badi El Harrach. ALGER

REMERCIEMENTS

Je tiens vivement à remercier M. M.HADDADI , Maître de conférence, pour l'aide qu'il m'a apportée, pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués et pour son accueil chaleureux. Qu'il trouve ici, ma profonde gratitude.

Je remercie M. A.ZERGUERRAS , Professeur, d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie également Messieurs :

A. MALEK , Chargé de recherche,

C. LARBES , Maître de conférence,

M. MEHENNI , Maître de conférence,

d'avoir accepté, en qualité de membres, de participer au jury.

Enfin, je tiens à remercier tout le personnel de la bibliothèque centrale de l'école pour leur soutien, en particulier Messieurs SALAH et KRIMOU pour leur aide précieuse.

Pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce manuscrit, qu'ils trouvent ici mes sincères salutations.

المراقب الذي درسناه و أنجزناه يضمن تحقيق، إضافة إلى عمليات قياس (ت،ش)، عمليات أخرى داخل قاعة شمسية .
حيث ، يسمح هذا المراقب بإعطاء الإستطاعة القصوى و الزاوية المثالية للواجهات الشمسية قصد إكتساب أكبر طاقة ممكنة من خلال تتبع الحركة الظاهرة للشمس ، و تسيير و قياس طاقة بطاريات التخزين بطريقة مستقلة .
إضافة إلى هذا ، و حتى يمكن تعميم استخدامه ، يسهل المراقب لمستعمله معرفة مختلف العوامل لنظام كهربائي شمسي يسمح له بتسيير جيد للقاعدة .

Résumé :

Le contrôleur que nous avons étudié et réalisé assure, outre des fonctions de mesures classiques (I,V), quelques autres fonctions particulières aux systèmes photovoltaïques.

Il permet d'afficher la puissance maximale du générateur et de calculer l'angle optimal d'orientation des panneaux solaires en vue de capter le maximum d'énergie. Il permet aussi de gérer la capacité des batteries d'une manière autonome.

Ainsi, rendu universel, ce contrôleur facilite à l'utilisateur la connaissance des différents paramètres d'un système photovoltaïque en lui permettant de mieux gérer l'installation.

Abstract :

This project make a photovoltaic controller which can put some particular operations into execution in a solar installation.

It allows to give the maximum power supply and the orientation optimal angle of solar sensor in order to improve the energetic rate by making it tracking the sun, and to manage the battery capacity with an autonomy.

So to give it universal character, this controller offers to its users the possibility to know the different parameters that should be found in a photovoltaic system.

Mots clés : Angle optimal , batteries , capacité , concentration , étalonnage , irradiation , monture , rayonnement , rendement , système photovoltaïque , temps sidéral , panneau solaire .

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : Présentation d'un système photovoltaïque.....	3
1-Introduction.....	3
2- Les générateurs photovoltaïques.....	4
2-1- Rayonnement et insolation.....	4
2-2- Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	7
2-3- Le panneau solaire.....	10
3- Batterie d'accumulateurs.....	12
3-1- Définition des paramètres.....	13
4- Les récepteurs et les dispositifs d'adaptation.....	16
4-1- Les récepteurs.....	16
4-2- Les adaptateurs.....	16
5- Limitations d'un système photovoltaïque.....	16
CHAPITRE 2 : Présentation des panneaux solaires.....	18
1- Description du panneau.....	18
1-1- Cellules solaires.....	18
1-2- Association des cellules.....	19
1-3- Courbe courant-tension.....	19
2- Montures pour panneau.....	20
3- Rappels d'astrophysique.....	20
3-1- Mouvement diurne.....	20
3-2- Coordonnées terrestres.....	21
3-3- Coordonnées horaires.....	22
3-4- Repérage du soleil.....	23
4- Calcul des paramètres cosmologiques.....	23
4-1- Le temps.....	23
4-2- Longitude du soleil.....	24
4-3- Hauteur droite et déclinaisons.....	24
4-4- Le temps sidéral.....	25
5- Méthode de calcul.....	26
CHAPITRE 3 : Etude et test des batteries.....	29
1- Introduction.....	29
2- Divers types de stockage.....	29
3- Différents types d'accumulateurs.....	30
3-1- Accumulateurs au plomb.....	30
3-2- Accumulateurs alcalins.....	31
3-3- Accumulateurs au lithium.....	33
4- Fonctionnement des accumulateurs avec les panneaux.....	33
4-1- Courbes de fonctionnement.....	33
4-2- Branchement des accumulateurs avec les photopiles.....	34
5- Capacité de la batterie.....	36
6- Eléments constitutionnels.....	37
6-1- Surfaces des plaques.....	37

6-2- Epaisseur des plaques.....	37
6-3- Porosité.....	37
6-4- Concentration de l'électrolyte.....	38
7- Eléments fonctionnels.....	39
7-1- Intensité de décharge.....	39
7-2- Température.....	40
7-3- Repos.....	40
7-4- Fonctionnement.....	40
7-5- Capacités nominales.....	40
8- Méthodes de mesure de la capacité.....	41
8-1- Le microcoulombmètre.....	41
8-2- Test électronique de MOTOROLA.....	42
8-3- Autres méthodes.....	43
8-4- Méthode proposée.....	43
CHAPITRE 4 : Etude matérielle du contrôleur.....	45
1- Introduction.....	45
2- Bloc d'acquisition.....	45
3- Bloc d'affichage.....	46
4- Calcul de l'angle optimal.....	47
4-1- Oscillateur à quartz.....	47
4-2- Filtre passe-bas.....	48
4-3- Système à microcontrôleur.....	50
5- Gestion de la capacité de la batterie.....	51
5-1- Acquisition des données d'une batterie.....	51
5-2- Carte de puissance.....	51
5-3- Système à microcontrôleur.....	54
6- Mesure des paramètres.....	54
6-1- Capteur de courant.....	54
6-2- Capteur de tension.....	55
6-3- Puissance maximale.....	57
6-4- Capteur de température.....	57
6-5- Capteur d'irradiation.....	58
CHAPITRE 5 : Programmation du calcul de l'angle optimal.....	59
1- Clavier hexadécimal.....	59
2- Calcul et gestion du système.....	61
2-1- Introduction.....	61
2-2- Calcul de la position optimale.....	63
CHAPITRE 6 : Programmation de la gestion de la capacité.....	83
1- Introduction.....	83
2- Entrée du choix et gestion du clavier.....	83
3- Voltmètre numérique.....	85
4- Contrôle automatique de la capacité.....	86
5- Mesure de la capacité.....	87
CONCLUSION.....	89
BIBLIOGRAPHIE.....	91
ANNEXES	

INTRODUCTION

Bien utile dans les pays manquant en ressources pétrolières et disposant d'un fort ensoleillement, l'énergie solaire deviendrait après avoir été convertie en hélioélectricité, l'une parmi les diverses solutions à envisager quant à la génération de l'énergie électrique. (et en conséquence servir à la mise au point des dispositifs électriques). Ce constat provient du fait que la contribution de l'énergie solaire résoudrait un bon nombre de problèmes pour certains pays et particulièrement les pays dits en voie de développement.

C'est donc un marché considérable et, l'enjeu économique étant important, la compétitivité d'une source par rapport à une autre devra être estimée car, a priori, aucune ne bénéficie de préférence particulière.

Cependant, l'exploitation de cette énergie nécessite la mise en oeuvre d'un ensemble d'éléments installés d'une manière organisée pour atteindre une opération de conversion valable. Ces éléments qui opèrent lors de la captation des rayons solaires en dépendance les uns des autres, exigent un système de contrôle et de mesure ayant pour objectif d'assurer la communication entre les différents organes du système photovoltaïque dans des conditions optimales.

Afin de concrétiser cette fonction, le travail qui nous a été confié repose sur une conception et une réalisation d'un appareil de mesure et de contrôle utilisé dans un domaine d'application de l'énergie solaire qui est le domaine photovoltaïque.

Dans ce champ, l'utilisateur se retrouve face à des équipements ayant des fonctions bien spécifiques quant à la production et le stockage de l'énergie électrique. Afin qu'il arrive à assurer la gestion appropriée de l'ensemble des dispositifs composant l'installation photovoltaïque, il lui serait nécessaire d'avoir la grandeur des paramètres contribuant à une optimisation de l'utilisation de tels systèmes.

Notre travail assure le calcul autonome des angles d'orientation d'un panneau solaire. Il permet l'affichage rapide des paramètres permettant de manipuler les panneaux pour avoir le maximum d'énergie recueillie. Suite aux données enregistrées dans l'appareil telles que la longitude et la latitude du lieu, et en se basant sur l'heure présente ainsi que la date donnée, deux angles primordiaux pour la fixation des panneaux seront donnés avec précision, en particulier l'angle optimal.

En outre, le stockage, qui est une opération importante dans une installation solaire, nécessite l'emploi inévitable des batteries d'accumulateurs. Afin de bien connaître l'état de ces dispositifs et leur durée de vie, le contrôleur réalisé permet à l'utilisateur d'avoir tous les renseignements utiles.

En supplément, cette étude permet la mesure de plusieurs paramètres ayant relation directe avec le fonctionnement et le déroulement d'une installation solaire à savoir, la puissance maximale fournie par les panneaux, ainsi que les courant et tension correspondants.

Cependant, ce contrôleur photovoltaïque met au courant l'utilisateur de la température et de l'irradiation qui sont deux facteurs extérieurs importants dans une installation solaire.

CHAPITRE PREMIER : PRESENTATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

1- INTRODUCTION :

L'universalité de l'énergie électrique qui permet l'accès direct à la force motrice et au traitement de l'information fait que l'effet photovoltaïque est sans aucun doute l'effet le plus avantageux dans l'énergie solaire.

La structure de base de départ des systèmes photovoltaïques qui comprenait des panneaux solaires convertissant l'énergie solaire en électricité, des accumulateurs pour le stockage éventuel de cette énergie et la charge a nettement évolué. La figure 1-1 résume les variantes possibles pour les systèmes photovoltaïques actuels [1].

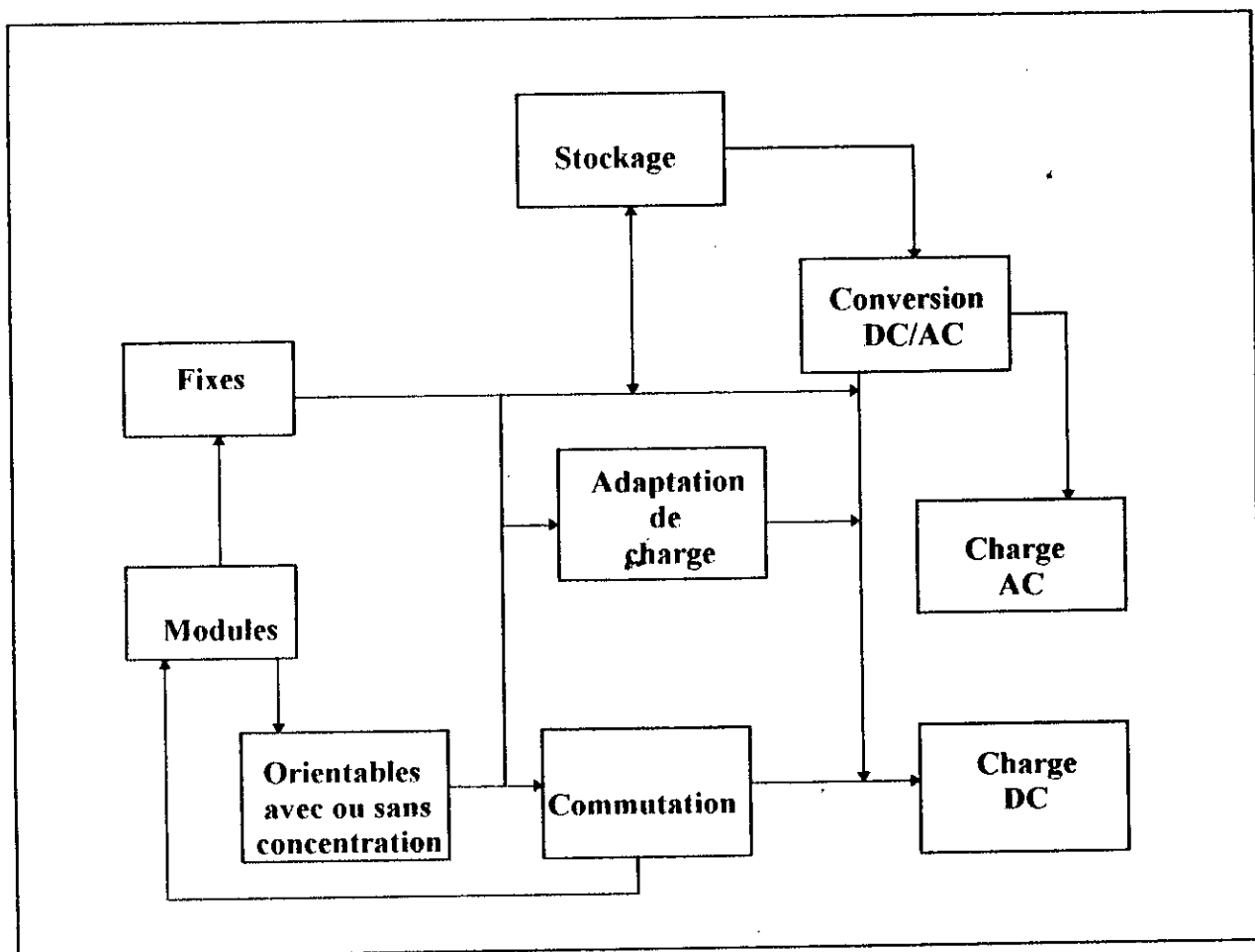


Fig 1-1 : Variantes d'un système photovoltaïque

Ainsi, le générateur peut être fixe ou orientable manuellement ou électriquement. Le groupement de panneaux peut être adapté à tout instant à la charge par commutation série-parallèle des panneaux ou modules.

Un stockage d'énergie piloté par une électronique permet d'alimenter des charges continues ou alternatives par l'intermédiaire d'un onduleur.

Il y a évidemment certains cas où le stockage n'est pas une obligation et on a alors la structure la plus simple qui est celle du couplage direct.

Cette souplesse acquise de l'électricité photovoltaïque la met maintenant en compétition directe avec les autres sources d'énergie puisque diverses estimations [2] chiffrent les besoins entre 50 et 500MW par an, généralement pour les applications en sites isolés.

2- LES GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES :

L'effet photovoltaïque peut être obtenu dans tous les semi-conducteurs. Les isolants ne conviennent pas du fait de leur faible absorption de la lumière; quant aux métaux, leur concentration élevée en électrons empêche tout effet photovoltaïque.

Ce sont les semi-conducteurs qui sont les mieux adaptés à la conversion de la lumière « visible » en puissance électrique: ils donnent le produit courant-tension le plus élevé.

En fait la plus grande partie de l'énergie transmise par les rayons solaires se situe dans la partie visible du spectre lumineux [3].

En effet, l'énergie du faisceau lumineux incident sur une jonction P-N, est transmise au matériau, et lorsque l'énergie $h\nu$ d'un photon est supérieure à la hauteur E_g de la bande interdite, les électrons de valence pourront migrer dans le semi-conducteur, ce qui donne lieu à un champ local qui traîne les charges, d'où il en résulte un courant I [4]. Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium, car il est plus avantageux à plusieurs points de vue.

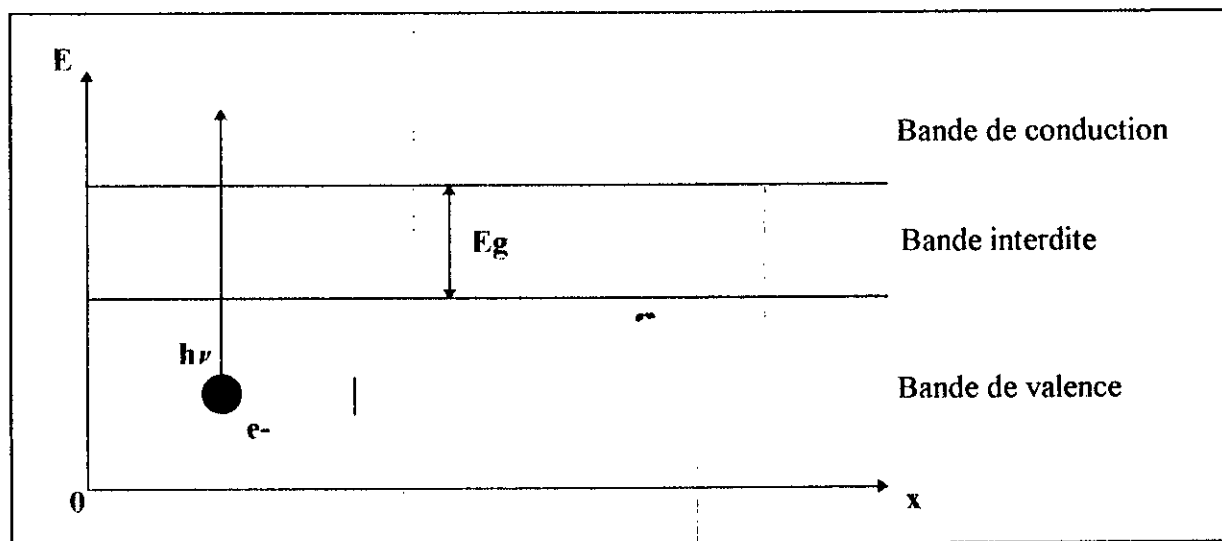


Fig 1-2 : Bandes d'énergie de silicium

2-1- RAYONNEMENT ET INSOLATION :

2-1-1- Généralités :

Les mesures des paramètres photovoltaïques sont destinées à chiffrer les échanges énergétiques s'effectuant par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique; on distingue le rayonnement solaire dont le spectre est compris entre 0,29 et 4 μm et le rayonnement terrestre émis par l'ensemble surface terrestre-atmosphère, dont le spectre d'énergie s'étale de 4 à 10 μm .

Le rayonnement solaire est caractérisé par les grandeurs suivantes [5]:

- Le rayonnement direct **I** qui provient du disque solaire seulement, à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère. Sa mesure s'effectue à l'aide d'un pyrhéliomètre, appareil dont la surface sensible est toujours perpendiculaire aux rayons solaires.

- Le rayonnement global **G** : c'est le rayonnement, reçu sur une surface horizontale, provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste; on le mesure avec un pyranomètre.

- Le rayonnement diffus **D** : en provenance de la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, sa mesure s'effectue avec un pyranomètre muni d'une bande pare-soleil.

Les trois termes **G**, **I** et **D** sont reliés par la relation :

$$G = I \sin h + D \quad (1)$$

Avec **h** hauteur angulaire du soleil (en degrés).

- L'albédo, défini comme la rapport du rayonnement diffusé ou réfléchi par le sol au rayonnement global, est déterminé à l'aide d'un appareil constitué par deux pyranomètres montés en quotientmètre; l'un est tourné vers la surface du sol, l'autre vers le ciel (albédomètre).

- La durée d'insolation **S**, c'est-à-dire le temps pendant lequel le soleil est visible, est fournie par un héliographe; elle est notée en dixième d'heure.

Le rayonnement terrestre n'est pas mesurable directement, on l'obtient par différence entre le rayonnement total fourni par un pyradiomètre (opérant directement dans la gamme de 0,3 à 100 μm) et le rayonnement solaire global évalué par un pyranomètre.

L'unité d'éclairement énergétique la plus usitée est le milliwatt par centimètre carré (mW/cm^2) mais on emploie encore couramment la calorie par centimètre carré et par minute ($\text{Cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$).

note : $1 \text{ Cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} = 698 \text{ W. m}^{-2} = 69,8 \text{ mW. cm}^{-2}$.

2-1-2- Etude des caractéristiques physiques de la radiation solaire :

La quantité d'énergie rayonnée atteignant une unité de surface par unité de temps est connue sous le nom « d'irradiation ».

L'irradiation moyenne extra-terrestre, suivant un plan normal aux rayons solaires, à l'extérieur de l'atmosphère terrestre est de 1,35 kW par mètre carré, du fait que l'orbite terrestre est elliptique, la distance soleil-terre varie légèrement au cours de l'année; il s'ensuit que l'irradiation extra-terrestre varie de plus ou moins 3,4% [6].

Le rayonnement direct est presque un faisceau lumineux. Sachant que l'angle du centre du soleil à son bord vu de la terre n'est que de 0,00465 radians, le rayonnement solaire peut être assimilé à un faisceau uniforme.

L'énergie d'une longueur d'onde particulière du spectre atteignant une unité de surface par unité de temps est connue sous le nom d'irradiation spectrale.

2-1-3- Calcul de l'irradiation journalière :

En négligeant le rayonnement diffus **D**, la relation du rayonnement global devient :

$$G = I \sinh \quad (2)$$

L'irradiation journalière (H) sera alors :

$$H = \int_{-w_s}^{w_s} I \sinh dt \quad (3)$$

w_s étant l'angle du lever ou du coucher de soleil.

H peut s'écrire sous la forme suivante :

$$H = \int_{-w_s}^{w_s} I \sinh (dt/dw) dw \quad (4)$$

Sachant qu'une heure (soit 3600 secondes) correspond à un angle w de 15° ou $\pi/12$ rd d'où :

$$dt/dw = 12.3600/\pi \text{ sec/rd}$$

et puisque I ne varie pratiquement pas sur une journée, et en remplaçant \sinh par son expression, on aura :

$$H = (12.3600/\pi) I \int_{-w_s}^{w_s} (\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos w) dw$$

Tout calcul fait donne :

$$H = (24.3600/\pi) I \cos L \cos \delta (\sin w_s - (\pi w_s/180) \cos w_s) \text{ J/m}^2 \quad (5)$$

2-2- CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE:

2-2-1- La caractéristique I(V) :

Une cellule solaire peut être considérée comme une source de courant shuntée par une diode (fig 1-3).

La résistance série R_s est due essentiellement aux contacts localisés aux surfaces de séparation semi-conducteur électrode, et à la résistance interne du matériau.

La résistance R_{sh} est due aux effets de surface de la cellule [3].

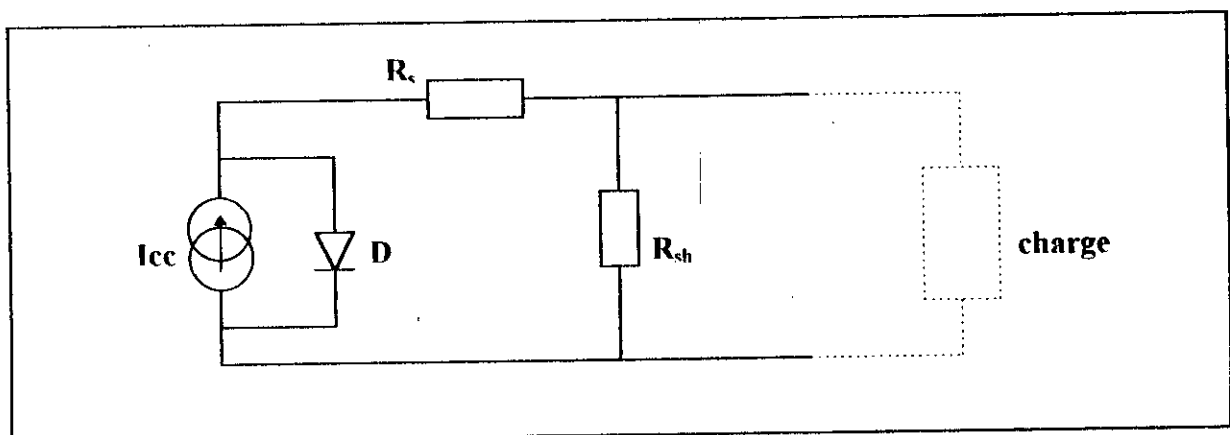


Fig 1-3 : Schéma équivalent d'une cellule solaire

D'après son schéma équivalent, la caractéristique courant-tension de la cellule résulte de la superposition de celle du générateur de courant constant sous un éclairage donné, et de celle de la diode à une température donnée (fig 1-4).

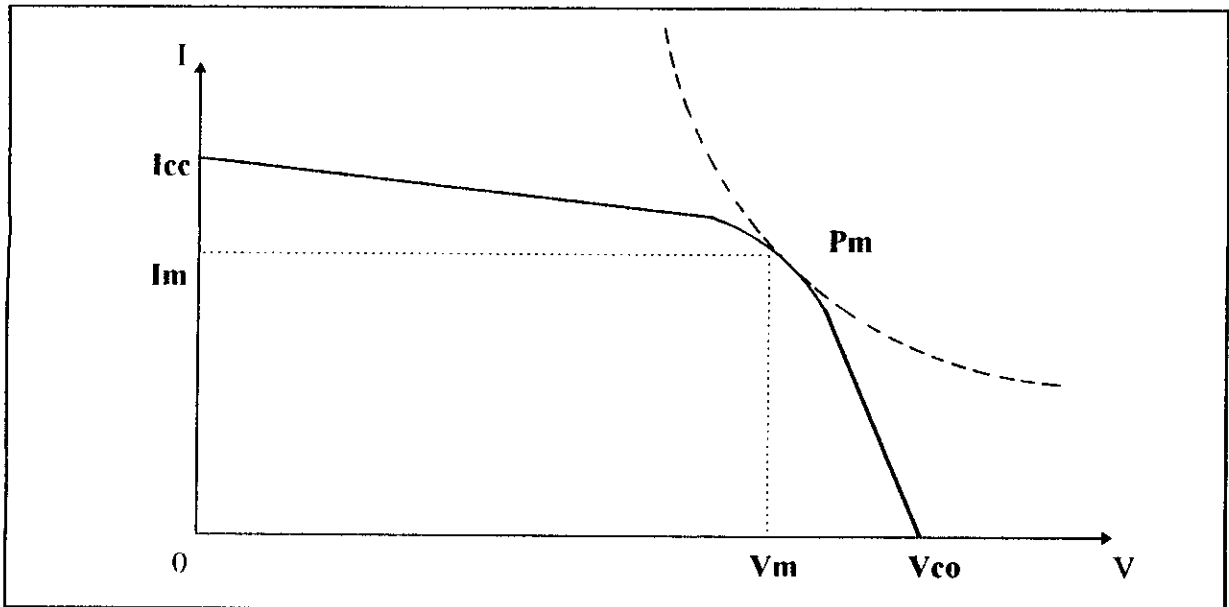


Fig 1-4 : Caractéristique I (V)

2-2-2- Particularité de la caractéristique :

a- Courant de court-circuit :

C'est le courant débité par une cellule en court-circuit pour un éclairage fixe donné.

Si on court-circuite les deux bornes d'une cellule photovoltaïque, la diffusion à travers la jonction des particules minoritaires créées par les photons produit le courant de court-circuit.

b- Tension à vide :

C'est la différence de potentiel entre les bornes de la cellule, en l'absence de tout débit, pour un éclairage fixé et à température déterminée.

c- Le point de puissance maximale :

La caractéristique $I(V)$ de la figure 1-4 montre qu'il existe un point de fonctionnement pour lequel, la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est maximale: c'est le point P_M où la caractéristique du générateur est tangente à l'hyperbole de puissance.

La figure 1-5 donne la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension imposée par le récepteur.

Pour se maintenir au point de fonctionnement (V_M, I_M) sur la caractéristique du générateur, il est nécessaire de l'explorer de façon permanente au voisinage de ce point, et de faire appel à un système de régulation extrême [7].

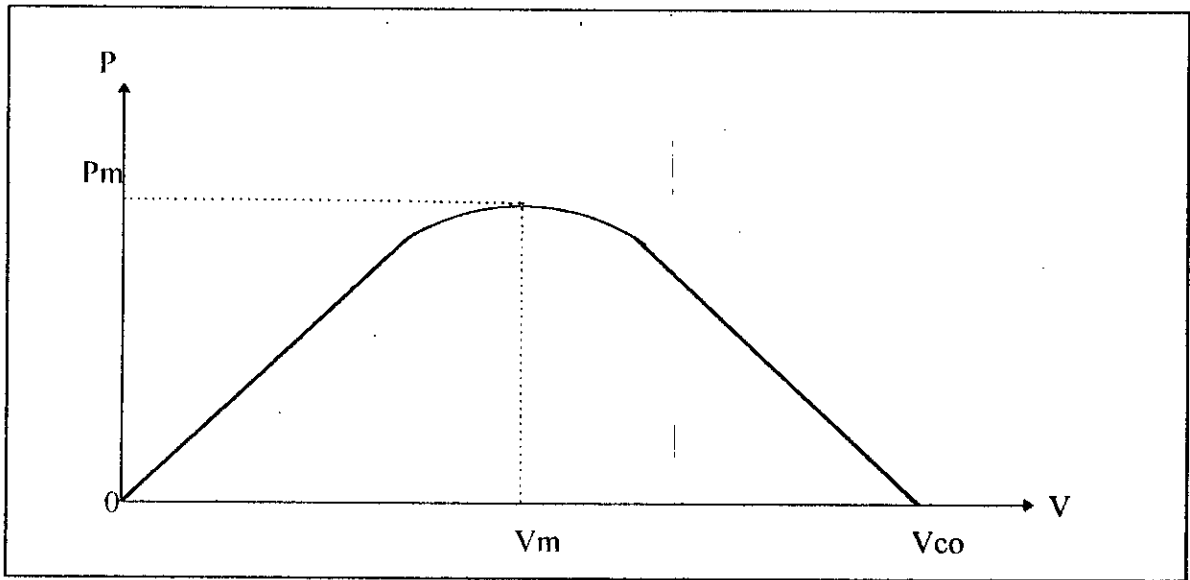


Fig 1-5 : Variation de la puissance en fonction de la tension

2-2-3- Le rendement de conversion:

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique est fortement liée à la bande interdite E_g du semi-conducteur, ce qui implique que le rendement est limité par les différentes pertes d'énergie.

Parmi les facteurs responsables des pertes, nous citons:

- Absorption incomplète des photons:

Les photons dont l'énergie $h\nu$ est inférieure au gap d'énergie E_g , ne peuvent pas créer de paires d'électron-trous et constituent une source de pertes pour la conversion photovoltaïque.

- Excès d'énergie ($h\nu - E_g$):

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

- Réflexions à la surface:

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

Le taux de photons réfléchis dépend de l'état de la surface de la cellule.

- Facteur de forme:

Le facteur de forme noté F est un coefficient liant la puissance maximale au produit $I_{cc} V_{co}$ (I_{cc} est le courant de court-circuit, V_{co} est la tension à vide).

$$\text{Soit : } P_M = F \cdot I_{cc} \cdot V_{co} \quad (6)$$

Donc, une photopile est d'autant plus performante que son facteur de forme se rapproche de l'unité [1].

2-2-4- Influence de la température et de l'éclairement :

Le processus de conversion photovoltaïque est en théorie, indépendant de la température. Ce comportement provient du fait que les photons de la lumière transfèrent directement leur énergie aux électrons, sans étape thermique intermédiaire. En réalité, il y a une variation de la caractéristique $I(V)$ en fonction de la température, et cette variation concerne quelques facteurs qui sont : le gap d'énergie E_g , les mobilités et les coefficients de diffusion des électrons et des trous.

De ce fait, lorsque la température augmente au delà des 40°C , le rendement de la cellule diminue (fig 1-6).

On observe une légère augmentation du courant I_{cc} , en même temps qu'une diminution de la tension V_{co} , et ces variations affectent le rendement de la cellule [8].

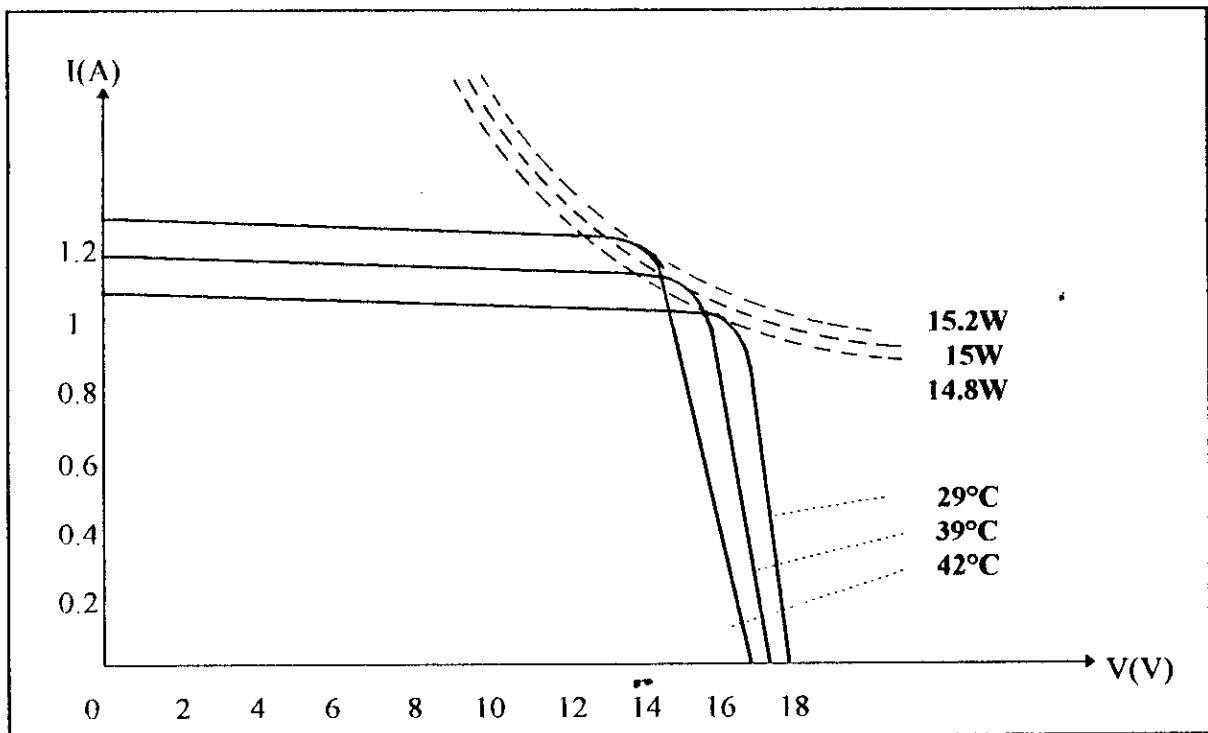


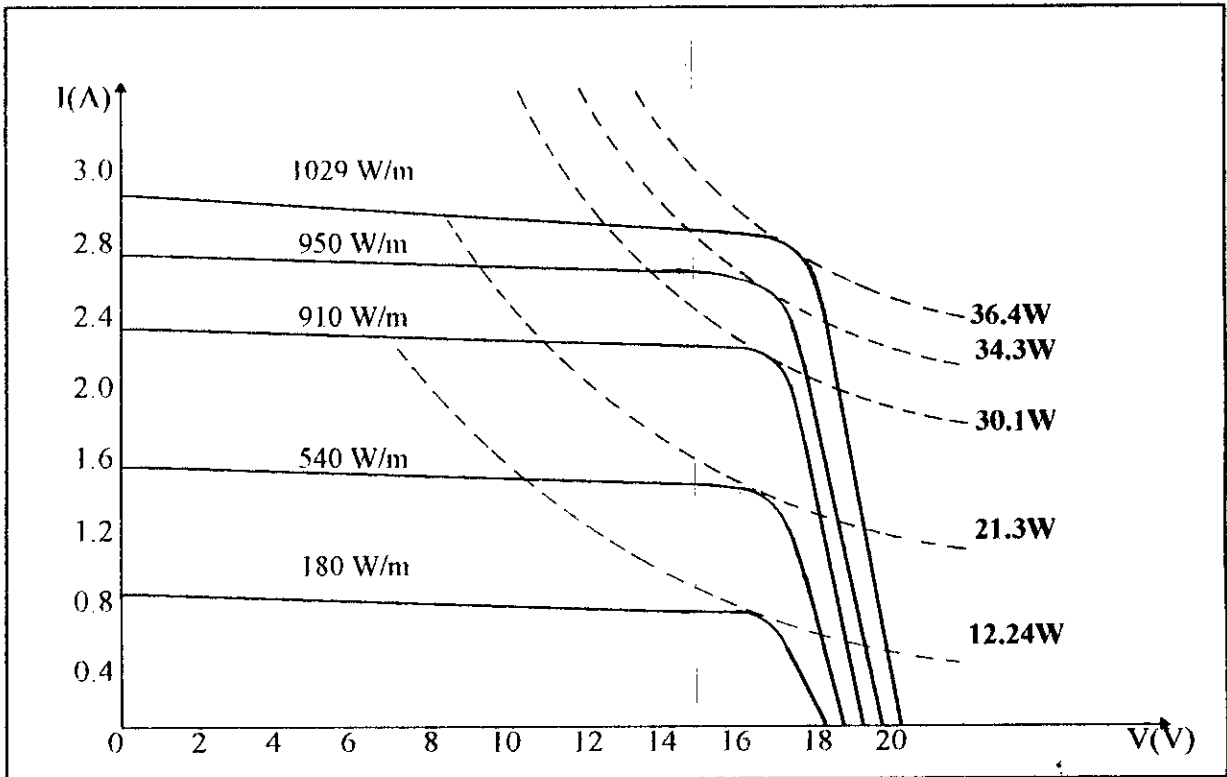
Fig 1-6 : Caractéristiques $I(V)$ pour trois températures
(Panneau PHOTOWATT - PBX-47-401)

Remarque

En moyenne, une augmentation de 1°C entraîne une augmentation de I_{cc} de quelques mA (cette augmentation dépend de la surface des cellules), et une diminution de V_{co} (environ de 2.2 mV).

Les cellules sont recouvertes d'une couche antireflet afin de réduire les pertes par réflexion. Cette couche doit être transparente au rayonnement visible, et doit réduire le rayonnement infrarouge afin de diminuer l'échauffement.

Quand l'intensité de la lumière incidente croît, I_{cc} augmente, alors que nous observons en même temps, une légère augmentation de V_{co} (la tension V_{co} peut être considérée comme constante), (fig 1-7).



**Fig 1-7 : Caractéristiques I (V) pour différents éclairagements
(Panneau PHOTOWATT PBX-47-401)**

Remarque :

En moyenne, une variation de $1W/m^2$ entraîne une variation I_{cc} de 2.37 mA (Panneau fig1-7). L'augmentation de I_{cc} est facile à expliquer, car, plus l'éclairage augmente, plus le nombre de photons absorbés croît, lié à une augmentation de I_{cc} , la puissance maximale est directement proportionnelle à l'éclairage.

2-3- LE PANNEAU SOLAIRE :

La cellule solaire est le composant essentiel d'un système photovoltaïque mais rares sont ses utilisations directes car :

- Ses caractéristiques mécaniques (fragilité), et sa résistance à l'humidité ne pourraient garantir la longévité de ses performances.
- La puissance délivrée par une cellule est de quelques centaines de mW, et sa tension est de l'ordre de 0.5 V, ce qui ne permet pas généralement d'alimenter directement un équipement électrique dont les tensions de fonctionnement sont normalisées (12, 24, 48V....).

C'est pourquoi, les cellules sont associées en série pour augmenter la tension, ou en parallèle pour augmenter le courant, ou en série-parallèle, afin de former un panneau solaire (fig1-8) [9]. Ces cellules sont encapsulées de manière à les protéger contre les agents atmosphériques.

Les panneaux peuvent être fixes ou orientés. L'idéal pour recueillir une puissance maximale serait que les panneaux solaires effectuent la poursuite du soleil, mais cette solution est réservée aux systèmes à concentration. Toutefois, compte tenu du fait que l'énergie recueillie peut dépendre assez fortement de cette orientation, il serait utile d'orienter à des délais

raisonnables les modules en site et ce, sans recourir à une mécanique complexe. En effet, une étude [10] comparative entre les effets de la poursuite continue et la poursuite discontinue a montré que 99.7 % de l'insolation peut être reçue si le panneau photovoltaïque fait une rotation d'un pas horaire de 7.5°.

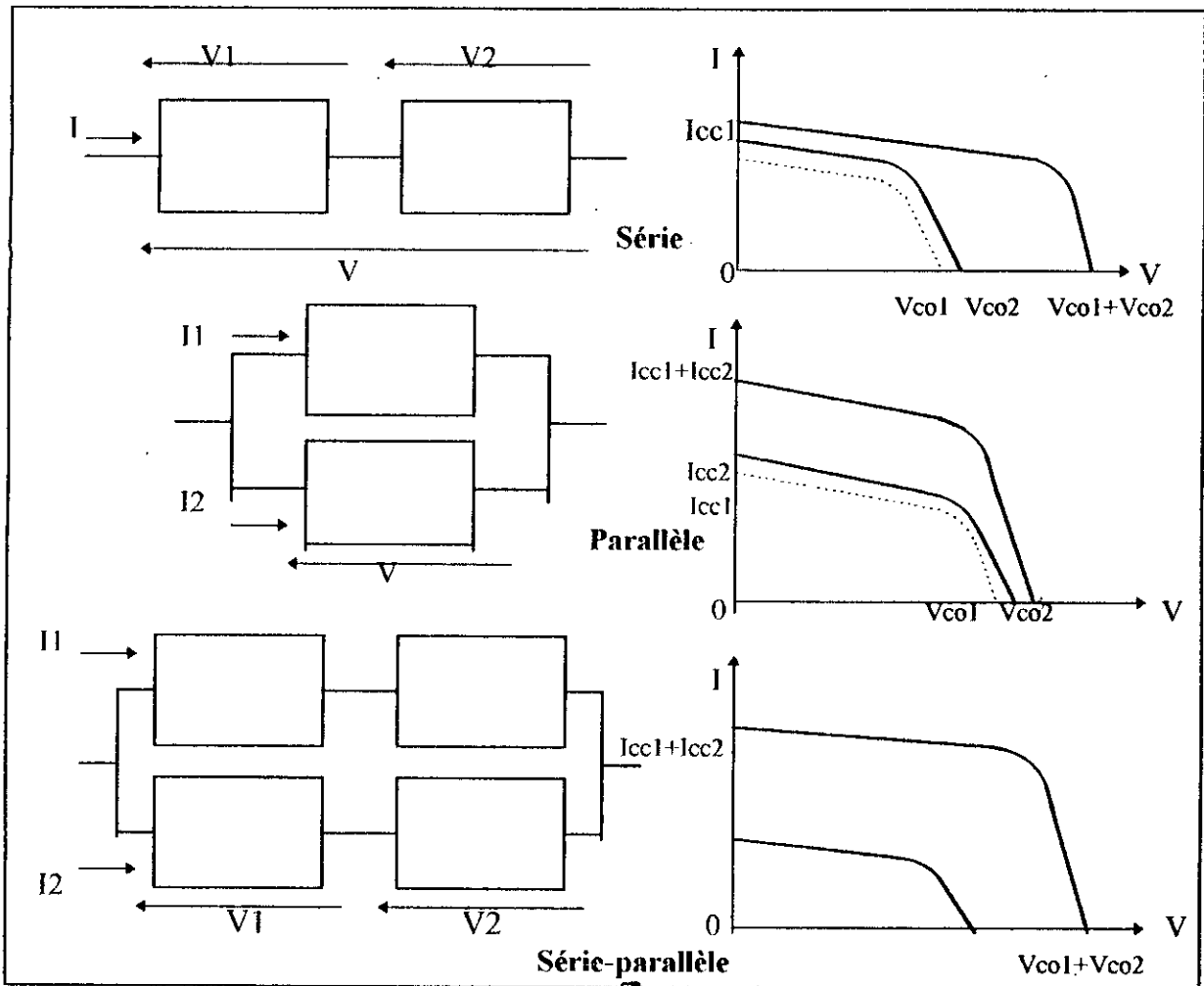


Fig 1-8 : Association des cellules

2-3-1- Protection des panneaux :

Lorsque le nombre de cellules est important, afin d'augmenter la puissance fournie, on réalise les montages série, parallèle ou série-parallèle comme vu précédemment.

Dans le cas des associations parallèles, des diodes anti-retour protègent contre la décharge des batteries à travers les panneaux solaires en périodes de non ensoleillement, et contre la circulation de courant inverse dans la branche de plus faible puissance, en cas de déséquilibre de tension (fig 1-9), car, sans diodes, une branche mal éclairée peut être traversée par le courant produit par les cellules mieux éclairées [9].

De même, dans les associations série, sans diodes de protection en parallèle, une cellule mal éclairée est soumise à une tension trop élevée, donc, on prévoit des diodes by-pass qui protègent les cellules solaires contre les phénomènes d'échauffements destructifs, causés par un masquage accidentel d'une partie du module.

Remarque :

Le type de diodes utilisé dépend de la tension ainsi que de l'intensité maximale débitée par chaque branche du générateur photovoltaïque.

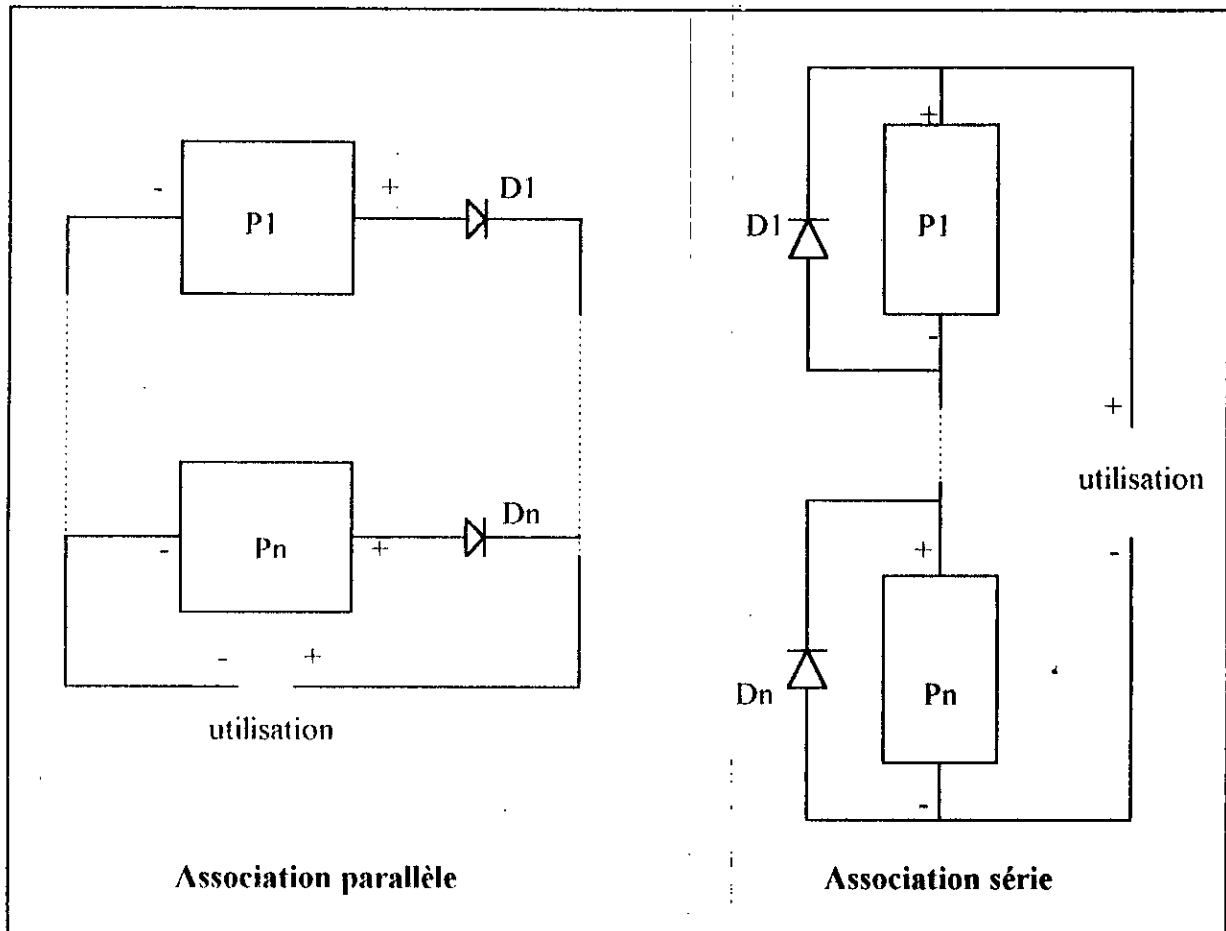


Fig 1-9 : Protection des panneaux

3- BATTERIE D'ACCUMULATEURS :

Lorsqu'un système photovoltaïque doit fonctionner en dehors des périodes d'ensoleillement, la présence d'un organe de stockage d'énergie s'impose. En effet, une partie de l'énergie électrique fournie par le générateur photovoltaïque devra être stockée pour assurer l'alimentation de la charge en l'absence du rayonnement solaire. A cet effet, les accumulateurs constituent le moyen de stockage le mieux adapté. Un stockage a pour but de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure.

Il sera caractérisé par sa nature (forme de l'énergie stockée), par sa capacité (quantité d'énergie stockée, directement liée à la notion de durée de stockage si on rapporte cette énergie stockée à l'énergie moyenne consommée), et par un rendement de stockage (rapport de l'énergie rétrocedée à l'énergie introduite).

On en distingue deux classes d'accumulateurs [11]:

- Les accumulateurs à électrolyte alcalin employant des électrodes de fer et de nickel ou de cadmium et de nickel.
- Les accumulateurs à électrolyte acide qui utilisent généralement des électrodes au plomb.

Cette dernière classe étant la plus courante et la moins coûteuse, c'est naturellement la classe qu'on choisit pour cette étude.

3-1- Définition des paramètres d'une batterie :

a- Capacité :

La capacité d'une batterie est la quantité d'électricité exprimée en Ampère-heure qu'elle est capable de restituer après avoir reçu une charge complète et lorsqu'elle est déchargée à un courant d'intensité déterminée et constante.

La capacité est proportionnelle à la quantité de matière mise en jeu dans les réactions chimiques. Elle dépend aussi des facteurs suivants :

- La température : la capacité augmente pour des températures qui dépassent 25° C, et diminue lorsque la température passe au dessous de 25° C. Pour des éléments au plomb, la température maximale d'emploi est de 45° C.

- Le régime de décharge : la capacité est définie pour un régime de décharge donné. La capacité augmente avec la durée de décharge, mais le régime de référence reste celui qui s'effectue en 10 heures.

- La tension finale (d'arrêt) : la tension aux bornes de la batterie diminue au cours de la décharge.

b- Energie :

La capacité en énergie d'une batterie présente un intérêt pratique plus grand. Elle est égale au produit de la puissance en Watt et de la durée en heures, de la décharge.

c- Rendement :

C'est le rapport de la quantité totale d'électricité débitée par la batterie sur celle qu'il faut fournir pour la recharger. Il est de l'ordre de 80 % en général.

d- F.e.m :

C'est la tension à vide, qui est une des caractéristiques principales d'une batterie. Cette tension ne peut dépasser de beaucoup 2V par élément, et on a :

$$E = 1.85 + 0.917(G-1) \quad (7)$$

Où G est la densité de l'électrolyte exprimée en degré baumé.

e- Résistance interne :

Elle est due à la résistance des électrodes et de celle de l'électrolyte qui les sépare. Notons que la résistance de l'électrolyte varie avec la densité et la température de celui-ci.

f-La tension aux bornes :

Elle suit les relations :

$$V = E + r.I \quad \text{pour la charge} \quad (8)$$

$$V = E - r.I \quad \text{pour la décharge} \quad (9)$$

g- Le cycle de charge et de décharge :

Le fonctionnement d'une batterie est périodique; c'est une succession de cycles charge-décharge. Le nombre de ces cycles, et donc la durée de vie, dépend des conditions d'utilisation.

Ainsi, pour assurer la longévité d'une batterie, il faut respecter certaines précautions d'emploi [12].

h- La décharge d'une batterie :

Pendant la décharge, la tension de la batterie diminue, comme le montre la fig 1-10 . Si la durée de décharge est trop prolongée, un effet de corrosion électrochimique (sulfatation) prend naissance et cause la détérioration des électrodes de plomb. Pour éviter cela, il y a une tension V_{\min} à partir de laquelle, la décharge doit être interrompue.

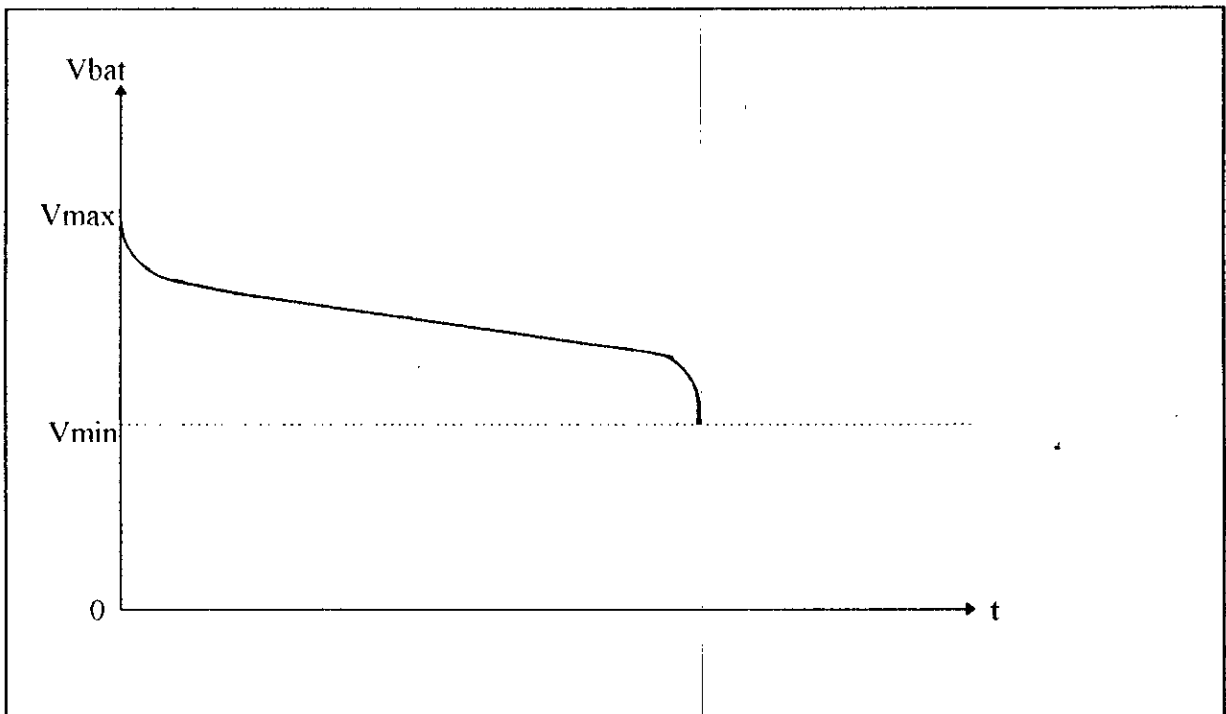


Fig 1-10 : Décharge d'une batterie

i- La charge d'une batterie :

Afin de charger une batterie, il faut lui fournir plus d'A.H qu'elle n'en a débités. Ceci peut se faire par deux méthodes principales [13]:

- La charge à courant constant : la batterie est connectée à une source de courant délivrant un courant d'intensité constante de l'ordre de $0.1 C$ (C : capacité de la batterie).

- La charge à tension constante : Dans ce cas, la batterie est connectée à une source de tension constante. C'est cette deuxième méthode qu'on préfère utiliser puisqu'elle convient le mieux pour des cycles de charge-décharge répétés.

Pendant la charge, la tension de la batterie croît, comme le montre la fig 1-11 , mais elle ne doit pas dépasser une certaine valeur V_{\max} à partir de laquelle, il y a un risque de détérioration à cause du dégazage. Donc, la charge devra être stoppée une fois cette valeur atteinte.

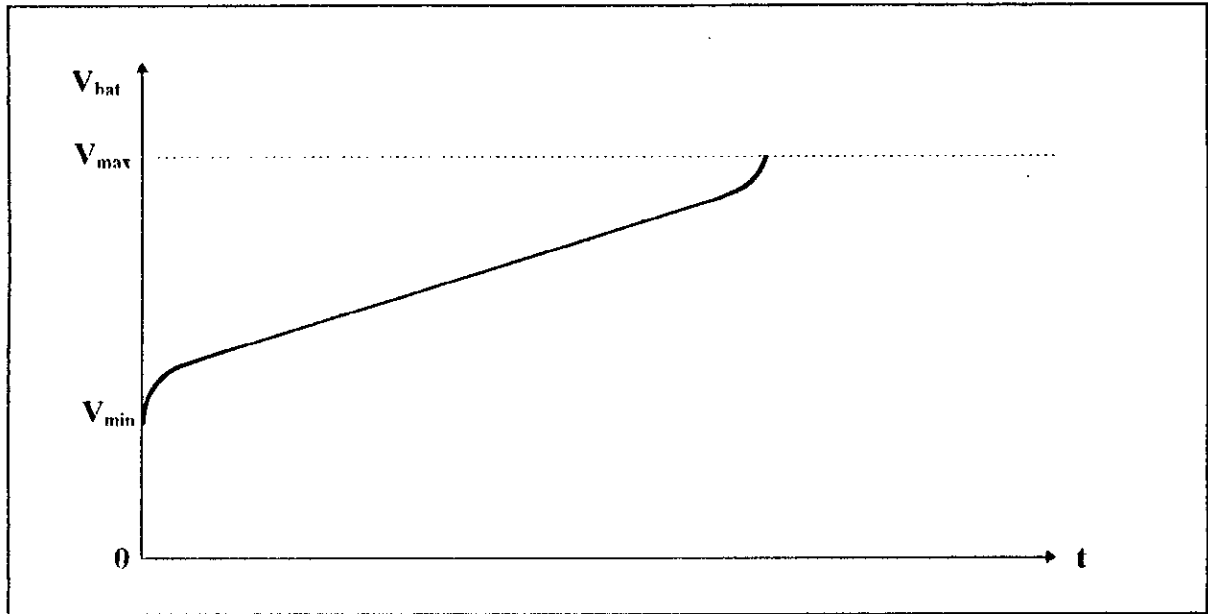


Fig 1-11 : Charge d'une batterie

Ainsi, durant les cycles charge-décharge, il faut veiller à ce que la tension de la batterie soit limitée dans la gamme [V_{min} , V_{max}].

Pour cela il est nécessaire d'adjoindre au système photovoltaïque un dispositif de gestion de charge-décharge qui assure le passage de la connexion panneau-batterie à la connexion batterie-récepteur de manière à ce que la tension de la batterie reste dans l'intervalle spécifié (voir fig 1-12).

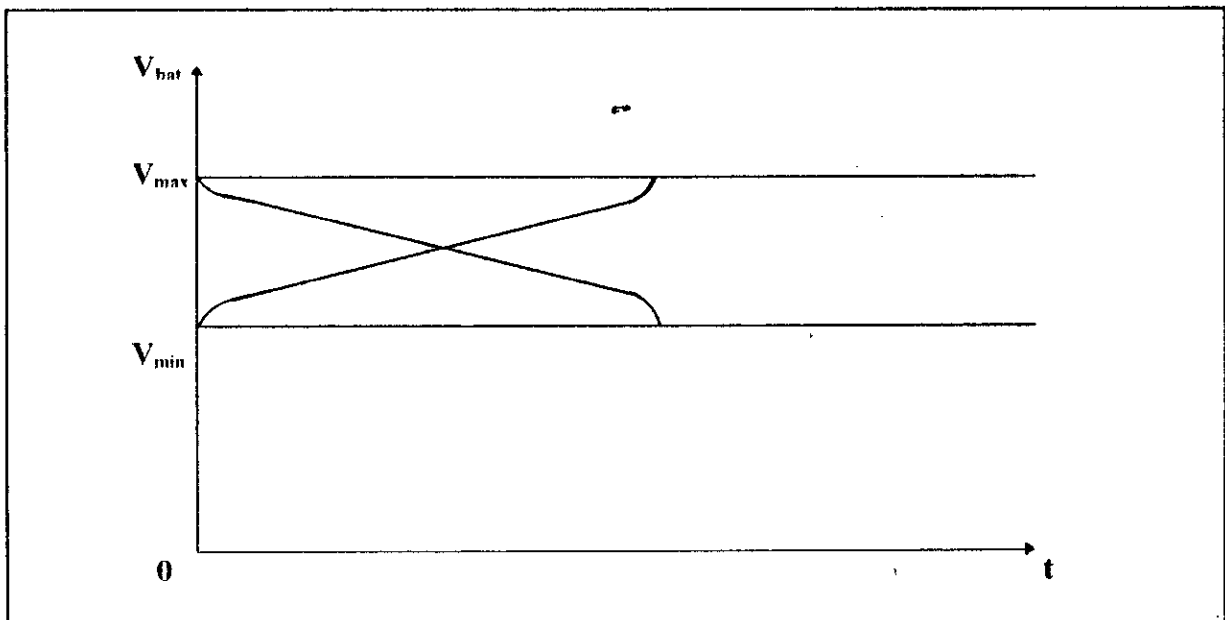


Fig 1-12 : Limite d'utilisation d'une batterie

3-2- Performance d'une batterie dans un système photovoltaïque :

Une batterie solaire doit assurer les fonctions d'une batterie de traction et d'une batterie stationnaire :

- Batterie de traction : parcequ'on lui demande souvent un cycle journalier de décharge (pas toujours suivi d'une recharge).

- Batterie stationnaire : parcequ'on lui demande de stocker de l'énergie, parfois longtemps pour la restituer en cas de non ensoleillement.

La durée de vie d'une batterie diminue lorsque le nombre de cycles charge-décharge journaliers et la profondeur de décharge augmentent. En moyenne, une batterie solaire peut assurer 2000 décharges, soit une durée de vie de 3 ans à raison de 600 décharges par an [14].

4- LES RECEPTEURS ET LES DISPOSITIFS D'ADAPTATION :

4-1- Les récepteurs :

Les récepteurs constituent l'ensemble des dispositifs que le générateur photovoltaïque devra alimenter, que ce soit en continu ou en alternatif.

Pour ce qui est des charges DC, elles peuvent être classées en deux catégories :

- Les récepteurs de tension qui fonctionnent à une tension constante comme les batteries d'accumulateurs.

- Les récepteurs de courant qui sont alimentés par un courant constant comme les moteurs à courant continu à aimant permanent.

Notons que toute charge possède un point (ou une gamme) de fonctionnement caractéristique qui définit les grandeurs électriques (tension, courant, puissance) nécessaires à sa mise en marche.

En plus, pour les charges AC, la fréquence de travail est un autre paramètre définissant le point de fonctionnement.

4-2- Les adaptateurs :

A priori, les caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque ne sont pas compatibles avec celles des récepteurs. Ainsi, pour coupler convenablement les panneaux à la charge, on intercale entre eux des dispositifs adaptateurs, qui assurent une double fonction :

- La mise en forme des grandeurs de sortie du générateur photovoltaïque pour les ramener aux niveaux exigés par les récepteurs.

- La réalisation d'une adaptation d'impédance pour une exploitation optimale de la puissance disponible au niveau du générateur photovoltaïque. Ceci permet une amélioration appréciable du rendement.

5- LES LIMITATIONS D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE :

L'énergie véhiculée par le rayonnement solaire est considérable et pratiquement intarissable. Malheureusement, son exploitation demeure difficile à réaliser, ce qui restreint son domaine d'application, et ceci pour les raisons suivantes :

- Le rendement de conversion d'un générateur photovoltaïque reste faible (de l'ordre de 10 à 16 %) ce qui nécessite des réseaux de panneaux photovoltaïques de grande envergure, pour atteindre des niveaux de puissance acceptables, au prix d'une augmentation importante du coût global de l'installation.

- Le caractère variable et aléatoire de l'ensoleillement rend le dimensionnement d'un système photovoltaïque (surtout les générateurs photovoltaïques et les batteries) très délicat. Souvent, pour passer à tout risque de panne d'énergie, le système est surdimensionné, ce qui le rend encore plus coûteux.

- Pour assurer la fiabilité du système, il faut associer au système photovoltaïque des dispositifs de protection aussi bien pour les générateurs que pour les éléments de stockage. L'amélioration du rendement de conversion d'un générateur photovoltaïque reste improbable, du moins à court terme, il est plus intéressant d'exploiter au maximum, la puissance disponible au niveau du générateur photovoltaïque.

La rotation de la terre s'effectue dans le sens direct d'un observateur sud-nord. Par rapport à des axes fixes liés à la terre, l'ensemble de la sphère céleste semble tourner d'un bloc dans le sens rétrograde d'un mouvement qu'on considère comme uniforme autour de l'axe du monde qui est un de ses diamètres. C'est le mouvement diurne, les étoiles se lèvent à l'Est et se couchent à l'Ouest.

Plutôt que d'étudier le mouvement de la terre sur son axe de rotation et sur sa trajectoire autour du soleil, nous examinons le mouvement apparent du soleil dans la voûte céleste.

Les quatre positions particulières de la terre caractérisant les saisons correspondent aux solstices et aux équinoxes.

Aux équinoxes, le soleil se lève à l'Est, passe à la verticale à midi (heure solaire) et se couche à l'Ouest. Entre le 21 Mars et le 21 Septembre, le soleil passe au nord de la verticale et pendant la deuxième moitié de l'année, il passe au sud de la verticale.

Aux solstices, l'angle que fait le soleil avec la verticale au midi solaire sera respectivement $\pm 23^\circ 27'$. Entre le 21 Septembre et le 21 Mars, le soleil décrit dans la voûte céleste un arc de cercle inférieur à 180° , rendant ainsi la nuit plus longue que le jour. Aux solstices d'été et plus généralement entre le 21 Mars et le 21 Septembre, le soleil décrit un arc de cercle supérieur à 180° , les journées seront plus longues que 12 heures.

3-2- Coordonnées terrestres (horizontales) :

Pour repérer en un lieu de la terre les positions successives de la sphère céleste étoilée et pour repérer de façon générale une direction, on utilise un système de coordonnées lié à ce lieu.

Le système de coordonnées sera basé sur une direction particulière, celle de la verticale du lieu qui perce la sphère céleste locale au zénith vers le haut et au nadir vers le bas (fig 2-5).

Le plan horizontal perpendiculaire à la verticale coupe la sphère locale suivant le grand cercle d'horizon.

Les différents plans verticaux ou demi-plans verticaux [20] qui matérialisent les différentes directions autour de la verticale seront repérés par leur intersection avec le cercle d'horizon .

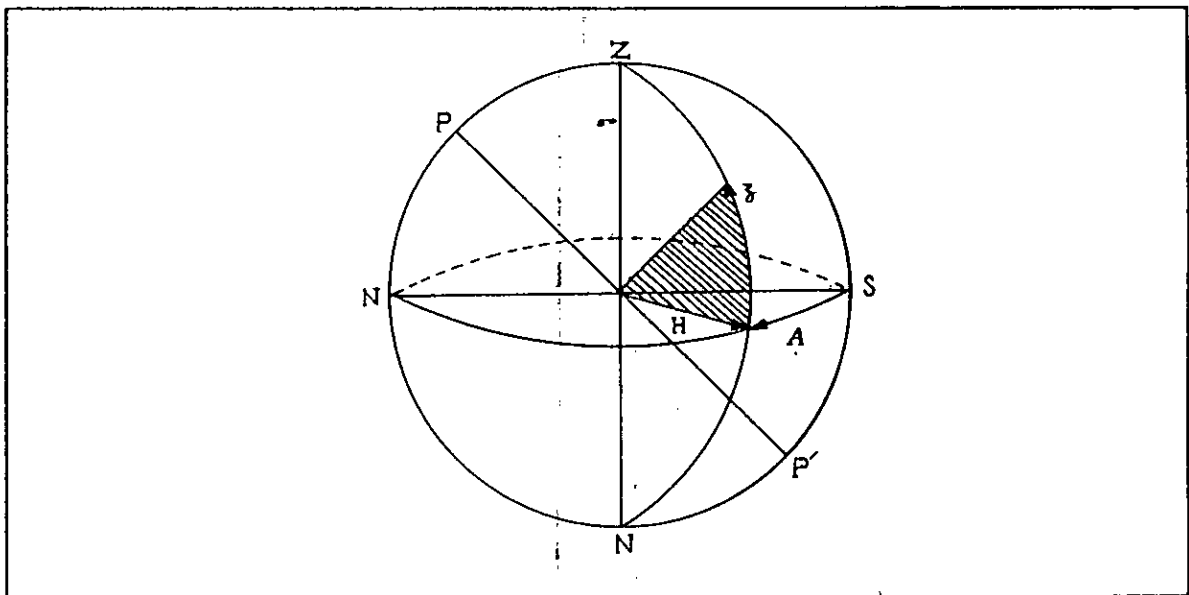


Fig 2-5 : Schéma des coordonnées terrestres

On les définira à partir du plan vertical particulier qui contient l'axe du monde, direction fixe pour le lieu. On l'appelle le plan méridien du lieu, et passe par les pôles célestes. L'axe du monde le partage en deux demi-plans : le méridien supérieur qui contient le zénith et le méridien inférieur qui contient le nadir. Son intersection avec le plan horizontal est la méridienne du lieu ou ligne Nord-Sud.

Les coordonnées horizontales sont donc [20]:

- L'azimut A : Angle dièdre entre la verticale de l'astre et le plan méridien sud. Il a pour mesure l'arc d'horizon compris entre ces deux plans et est compté de 0 à 360° dans le sens rétrograde.

- La hauteur angulaire h : Angle de la direction de l'astre avec le plan horizontal, compté de 0 à 90° vers le zénith et de 0 à -90° vers le nadir.

On utilise le plus souvent son complément : la distance zénithale z : Angle de la direction de l'astre avec la verticale, comptée de 0 à 180° du zénith vers le nadir.

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude du lieu.
- La date (jour de l'année).
- L'heure dans la journée.

3-3- Coordonnées horaires (équatoriales locales) :

Au lieu de baser le système de coordonnées locales sur la verticale, on peut le baser sur la ligne des pôles. Ce système est commode pour suivre l'étoile au cours de son déplacement dans le mouvement diurne. Le grand cercle perpendiculaire à la ligne des pôles s'appelle l'équateur.

Dans le mouvement diurne, une étoile décrit un petit cercle parallèle à l'équateur ou parallèle céleste. Le demi-grand cercle qui passe par les pôles et l'astre est le cercle horaire de l'astre. Son angle avec le demi-plan méridien supérieur est l'angle horaire w (fig 2-6) [6].

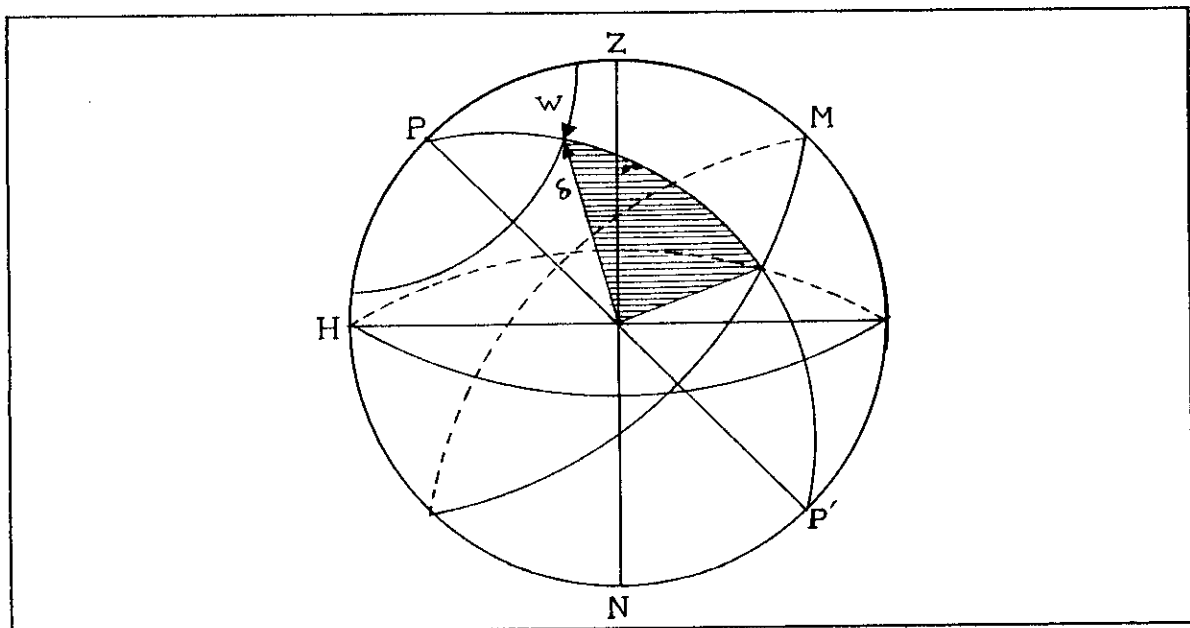


Fig 2-6 : Schéma des coordonnées horaires

L'angle horaire varie à mesure que s'effectue le mouvement diurne, on le compte dans le sens rétrograde pour qu'il augmente avec le temps. On le compte de 0 à 24 heures, l'heure étant ici, une unité d'angle qui vaut 15° .

Si l'on se limite à des périodes assez courtes, de quelques jours, par exemple, on peut admettre comme un fait d'observation que l'angle horaire croît uniformément avec le temps. Il peut servir à mesurer le temps.

La deuxième coordonnée d'un astre dans ce système est la déclinaison δ : angle de la direction de l'astre avec le plan de l'équateur. On la compte positivement de 0 à 90° vers le nord et négativement vers le sud. Ainsi, la déclinaison dépend directement du jour de l'année.

3-4- Repérage du soleil :

D'après les deux types de coordonnées décrivant le mouvement apparent du soleil, le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de quatre angles :

- La déclinaison δ exprimée en fonction du jour [19] par la relation suivante :

$$\delta = 23.45 \text{ Sin}(0.980(j+84)) \quad (10)$$

Où j est le numéro du jour de l'année.

- L'angle horaire w qui est défini comme étant 15° fois le nombre d'heure de différence avec le midi solaire et affecté du signe positif pour les heures de l'après-midi.

- La hauteur angulaire h exprimée en fonction de la latitude, de la déclinaison et de l'angle horaire.

Ainsi,
$$\text{Sin } h = \text{Sin } L \text{ Sin } \delta + \text{Cos } L \text{ Cos } \delta \text{ Cos } w \quad (11)$$

- L'azimut A qui s'exprime en fonction des trois angles cités :

$$\text{Sin } A = \text{Cos } \delta \text{ Sin } w / \text{Cos } h \quad (12)$$

3-5- Heure solaire au lever du soleil :

Le calcul de l'angle solaire au lever et au coucher du soleil s'obtient en mettant $\text{Sin } h = 0$

Alors :
$$\text{Cos } w_s = - \text{tg } L \text{ tg } \delta \quad (13)$$

Où w_s est l'angle au lever et au coucher. L'heure solaire au lever sera donc:

$$T_s = (12 - w_s) / 15 \quad (14)$$

Ceci étant vrai uniquement dans le cas où l'horizon a une hauteur nulle. Dans les régions montagneuses, on écrira qu'au lever du jour, h est égal à l'angle sous lequel on voit l'horizon.

4- CALCUL DES PARAMETRES COSMOLOGIQUES [21] :

4-1- Le temps :

Dans les paragraphes qui suivent, le temps est compté en jours à partir de 1er janvier 1980 à l'heure moyenne de Greenwich.

L'algorithme suivant nous donne le temps correct, utilisé dans les équations qui suivent.

$$\Delta = \text{année} - 1980 \quad (15)$$

$$M = \Delta/4 \text{ (modulo 4)} \quad (16)$$

$$\text{Temps} = \Delta.365 + M + \text{jour} - 1 + (\text{heure} + (\text{minute} + \text{seconde}/60)/60).24 \quad (17)$$

Où **jour** est le nombre de jours compté à partir du 1er janvier, excepté pour l'année bissextile où il faut retrancher 1 du nombre de jours s'il est avant le 1er mars.

4-2- Longitude du soleil :

La position du soleil dans la sphère céleste peut être obtenue en spécifiant seulement un paramètre, la longitude **L**. Puisque l'orbite de la terre autour du soleil n'est pas circulaire, la vitesse de déplacement du soleil sur l'orbite elliptique varie légèrement dans l'année. Ainsi, l'expression de la longitude est quelque peu compliquée. La longitude du soleil en radian est donnée par les équations suivantes :

$$\theta = 2\pi \cdot \text{Temps} / 365,25 \quad (18)$$

$$g = -0.031271 - (4,53963 \cdot 10^{-7}) \cdot \text{Temps} + \theta \quad (19)$$

$$L = 4,900968 + (3,67474 \cdot 10^{-7}) \cdot \text{Temps} + (0,033434 - 2,3 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Temps}) \cdot \sin(g) \\ + 0,00349 \cdot \sin(2g) + \theta \quad (20)$$

g est appelé l'anomalie moyenne de la terre.

4-3- Hauteur droite et déclinaisons :

Un autre moyen d'exprimer la position du soleil sur la sphère céleste est en terme de la hauteur droite et de la déclinaison.

La hauteur droite est l'angle entre le cercle méridien de l'équinoxe de printemps et le cercle horaire du soleil mesuré à partir de l'équinoxe de printemps dans la direction de l'est.

En utilisant le cercle trigonométrique on peut démontrer que la hauteur droite et la déclinaison du soleil sont reliés à la longitude du soleil par la relation:

$$\text{tg } \alpha = \cos \varepsilon \cdot \text{tg } L \quad (21)$$

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \cdot \sin L \quad (22)$$

Avec ε l'angle entre le plan de l'ellipse et le plan de l'équateur céleste, la valeur précise de ε est :

$$\varepsilon = 23,442 - (3,56^\circ \cdot 10^{-7}) \cdot \text{Temps} \quad (23)$$

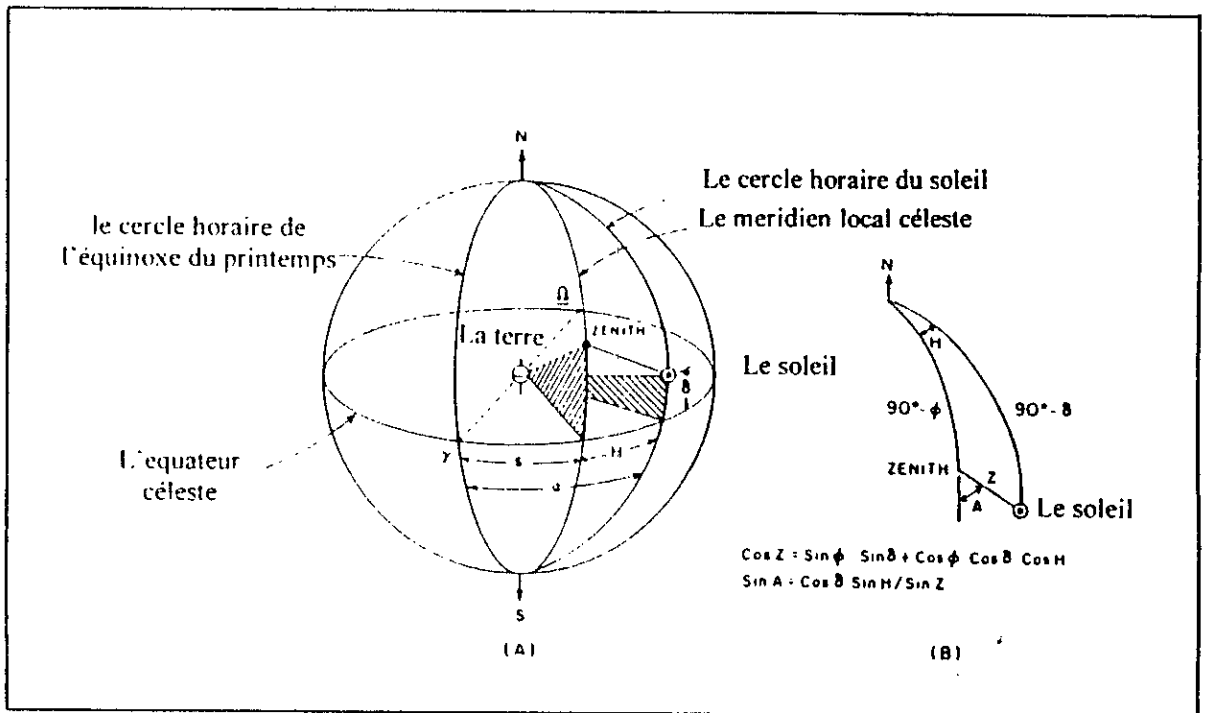


Fig 2-7 : Sphère céleste montrant les paramètres δ , S , H et α

4-4- Le temps sidéral :

Pour déterminer la position du soleil dans le ciel pour un temps donné, il est nécessaire de connaître non seulement la position du soleil dans la sphère céleste, mais aussi la position de la sphère céleste par rapport à la terre à cet instant. La rotation de la sphère céleste est mesurée dans le temps sidéral relatif au méridien local céleste.

Le méridien local céleste, comme représenté sur la fig 2-7, est le plus grand cercle traversant le pôle céleste et le zénith (le point sur la sphère céleste directement au dessus d'un observateur sur la terre).

Le jour sidéral est le temps entre deux transitions successives du cercle horaire de l'équinoxe de printemps à travers le méridien céleste.

L'heure sidérale est de zéro à l'instant où le cercle horaire de l'équinoxe de printemps traverse le méridien local céleste. Ainsi, la localisation dans la terre avec différentes longitudes nous donne différents temps sidéraux à un instant donné.

Le temps sidéral dans l'heure de Greenwich à 0h du temps universel de Greenwich (GUT) est donné par :

$$ST = 6,720265 + 24 (\text{Temps}/365,25 - (\text{année} - 1980)) + 0,000001411. \text{Temps} (24)$$

Le temps local sidéral à 0h GUT est obtenu par soustraction de ST la longitude locale $LONG$ en heures ouest de Greenwich ($1h = 15^\circ$).

Nous voyons que la sphère céleste tourne autour de la terre de manière légèrement plus rapide que le soleil. En fait :

$$1 \text{ jour standard} = 1,0027379 \text{ jour sidéral} \quad (25)$$

En outre le temps standard local (LST) est relié à (GUT) par la relation :

$$GUT = LST + Zone - C \quad (26)$$

Où Zone est le temps de zone internationale donné dans le tableau de la fig 2-8 et C est égale à zéro sauf s'il fait jour, où il est égal à un.

Le temps local sidéral dans n'importe quel LST est par conséquent égal au temps local sidéral à 0h plus $1,0027379.(LST + Zone - C)$.

En combinant l'effet de la longitude locale et du LST, on obtient l'expression suivante du temps sidéral :

$$S = ST - LONG + 1,0027379.(LST + Zone - C) \quad (27)$$

Zone de temps	Temps de zone (hr)
Temps standard Atlantique	4
T S Estern	5
T S Centra	6
T S Mountain	7
T S Pacifique	8
T S Hawai	10

Fig 2-8 : Les temps de zone international pour plusieurs zones de temps

5- METHODE DE CALCUL :

Les relations donnant les angles d'orientation des panneaux introduisent des fonctions trigonométriques différentes. Ceci rend l'opération très délicate étant donné que le calcul de la fonction se réalise avec un microprocesseur.

Pour ce faire, nous pouvons utiliser deux façons différentes : le calcul matériel ou le calcul logiciel.

Le premier consiste à tirer les valeurs des fonctions trigonométriques à partir des circuits et éléments associés au microprocesseur.

Le second met en évidence la programmation de la fonction dans la mémoire du système et son utilisation en effectuant un transfert par le microprocesseur.

Le choix entre les deux méthodes nous permet de retenir le calcul matériel en raison des avantages qu'il présente par rapport à la méthode logicielle.

En effet, la première solution permet d'économiser un espace mémoire important, ce qui offre la possibilité de rajouter d'éventuels programmes. De plus, cette solution n'est pas coûteuse car elle met en oeuvre des circuits de base moins chers. Son inconvénient réside dans l'espace

matériel qu'elle occupe par rapport à l'autre solution, mais ceci n'est pas d'une très grande importance.

Pour calculer les angles d'orientation dont les expressions présentent des fonctions trigonométriques, nous avons exploité la propriété d'un oscillateur harmonique qui délivre un signal purement sinusoïdal à sa sortie (fig 2-9).

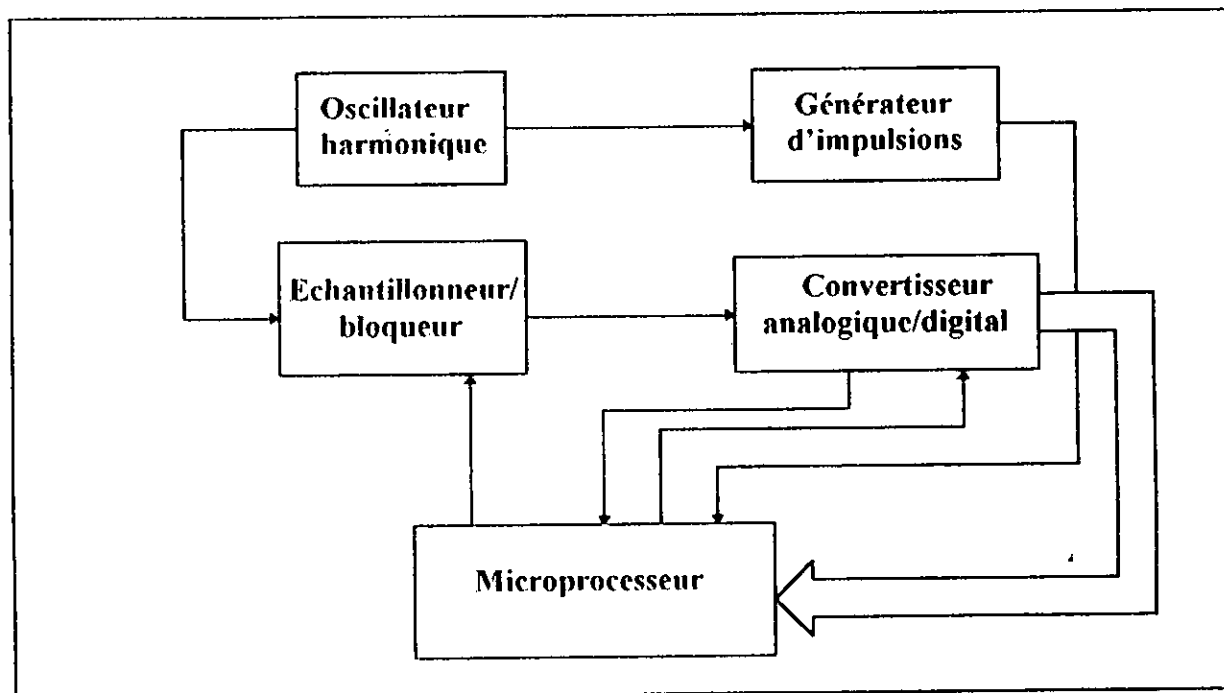


Fig 2-9 : Synoptique du calcul de la fonction sinus

Ayant, a priori, cet élément très important, le but serait de fixer une référence concernant l'angle donné par le microprocesseur, et l'extraction de la donnée à la sortie de l'oscillateur. Pour cela, la solution que nous avons envisagée repose sur l'acquisition de l'information pour extraire la donnée, et l'association à l'oscillateur d'un élément produisant des fronts rectangulaires. L'ensemble sera commandé par le microprocesseur.

Pour calculer le sinus d'un angle, le microprocesseur se synchronise avec l'oscillateur, temporise un temps proportionnel à cet angle, et extrait la donnée reçue par le convertisseur analogique-numérique (fig 2-10).

Pour les angles allant de 0 à π , le microprocesseur temporise directement la valeur correspondante. Pour les angles allant de π à 2π , le microprocesseur procède à un traitement, profitant de la symétrie, de la fonction sinus, transforme l'angle en un autre situé dans la gamme $[0 , \pi]$ et affecte le résultat d'un signe moins. Pour les angles dépassant 2π , le microprocesseur fait une ou plusieurs opérations de soustraction de l'angle donné avec la valeur 2π jusqu'à avoir un angle inférieur à cette valeur, ensuite il calcule sa fonction sinus.

Les autres fonctions trigonométriques se déduisent de la fonction sinus après avoir effectué des opérations de décalage et de division correspondant à chaque fonction (cosinus et tangente).

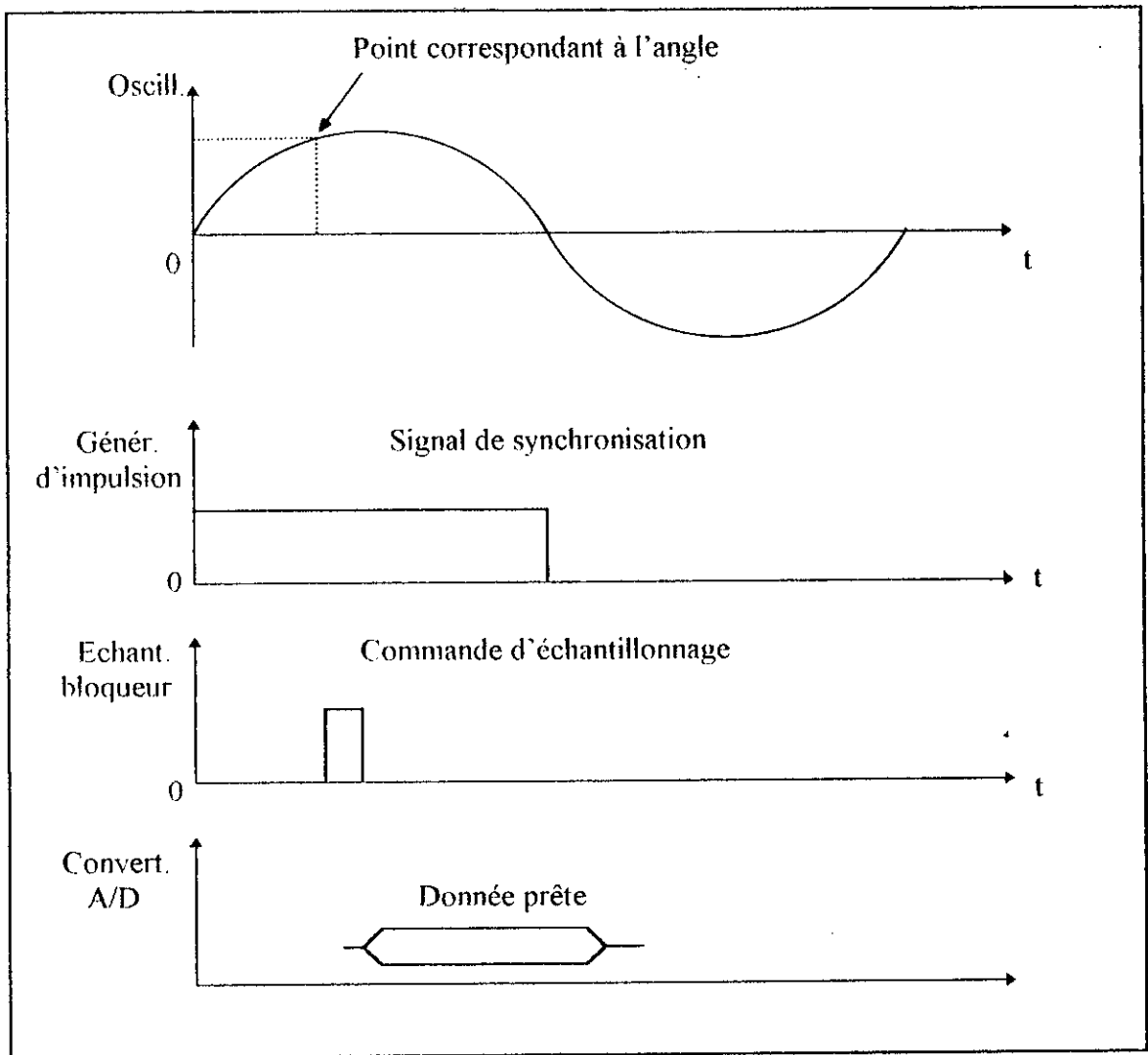


Fig 2-10 : Chronogrammes de calcul du sinus d'un angle

CHAPITRE 3 : ETUDE ET TEST DES ACCUMULATEURS

1- INTRODUCTION :

Les batteries de stockage occupent une place très importante après les panneaux solaires dans un système photovoltaïque. En effet, près de 30 % du coût global est consacré uniquement au stockage de l'énergie convertie [9].

L'accumulateur est ainsi défini par deux caractéristiques importantes : sa capacité en Ampère-heure et sa tension nominale en Volt. Les batteries d'accumulateurs au plomb sont les plus utilisées pour le stockage car elles sont plus efficaces et moins onéreuses. On utilise aussi les batteries alcalines ou les batteries à électrolyte gélifié [9].

2- DIVERS TYPES DE STOCKAGE :

Les capteurs photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique que l'on peut qualifier d'énergie noble.

Deux possibilités s'offrent alors : soit stocker cette énergie sous forme électrique, soit la transformer pour effectuer un stockage sous une forme intermédiaire, mais en évitant au maximum la dégradation de cette énergie.

Un stockage énergétique possible est celui effectué par une production d'hydrogène. Ce corps a le très gros avantage de présenter les plus faibles rapport poids / énergie.

Les très grands systèmes de stockage opérationnels [1] sont les réserves hydrauliques des barrages. Pour augmenter la capacité des installations il est proposé un pompage de l'eau, d'un lac inférieur dans un lac supérieur par exemple, pour la turbiner aux heures de pointe. Les deux transformations ci-dessus correspondent à des possibilités de stockage de longue durée.

Une possibilité plus hypothétique pour stocker de l'énergie sous forme mécanique intermédiaire, est soit d'utiliser la compression de l'air, soit d'accumuler une énergie cinétique. Ces deux types de stockage conviennent mal au photovoltaïque dans ses développements actuels et sont de toute façon réservés à des installations de très grandes puissances.

Il serait très intéressant de pouvoir conserver l'énergie électrique fournie par les photopiles sous sa forme première, c'est-à-dire à l'état de courant électrique. Ceci est possible dans les matériaux supraconducteurs, et bien que l'état supraconducteur nécessite de très basses températures, un tel stockage est très sérieusement envisagé. Il est malheureusement le plus onéreux de tous, malgré un rendement dépassant 90 %, et reste réservé lui aussi aux très fortes puissances.

Les possibilités de stockage citées auparavant sont soit hypothétiques, soit trop onéreuses, soit mal adaptées aux puissances inférieures au MW rencontrées dans le photovoltaïque. Le seul stockage possible d'énergie électrique reste donc le stockage électrochimique dont l'inconvénient majeur est la très forte valeur du rapport poids/ énergie stockée [1].

Les batteries, ou accumulateurs, sont malgré tout très largement utilisées puisqu'il n'existe pas de solutions de rechange à l'heure actuelle.

3- DIFFERENTS TYPES D'ACCUMULATEURS :

Les accumulateurs électrochimiques permettent de stocker sous forme chimique l'énergie électrique qu'ils reçoivent et la restituent sous forme d'électricité grâce à une réversibilité de la transformation électrique-chimique.

3-1- Accumulateurs au plomb :

Ils datent du début du siècle, mais ont subi depuis, de sérieux perfectionnements en raison de leur application à l'industrie automobile.

L'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique. L'électrode positive est le bioxyde de plomb, et le plomb l'électrode négative.

Ce type d'accumulateurs correspond à la chaîne dissymétrique suivante :

OXYDE DE PLOMB	SOLUTION D'ACIDE SULFURIQUE	PLOMB
PbO₂	H₂SO₄	Pb
(électrode positive)	(électrolyte)	(électrode négative)

Lors de la décharge, l'hydrogène se dégage sur l'électrode positive et réduit l'oxyde de plomb en sulfate de plomb (PbSO₄), tandis que les ions sulfate(SO₄²⁻)produisent l'oxydation de l'électrode négative en sulfate de plomb également.

Pendant la charge, les électrodes initiales se reconstituent; en effet, les réactions chimiques qui se produisent dans l'accumulateur sont réversibles (théorie de la double sulfatation). La concentration de l'électrolyte diminue au cours de la décharge de l'accumulateur et augmente au cours de la charge [22].

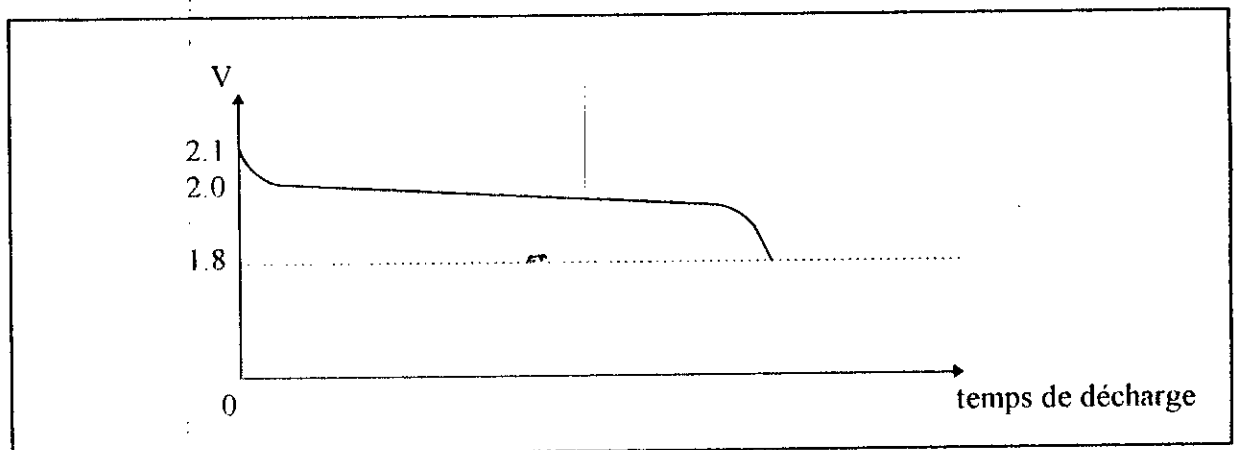


Fig 3-1 : Variation de la tension pendant la décharge

Pendant toute la décharge, la f.é.m reste pratiquement constante et voisine de 2V (fig 3-1).

Au cours de la charge, elle est légèrement supérieure à 2V et lorsque la batterie est très chargée, elle peut atteindre 2.4V (fig 3-2).

A la fin de la décharge se produit une brusque chute de f.é.m. Il ne faut jamais laisser l'accumulateur longtemps déchargé sinon les électrodes se recouvrent d'une couche blanche de sulfate de plomb, qui empêchera toute recharge [22].

L'accumulateur est sulfaté : les cristaux de sulfate atteignent des dimensions trop grandes, obstruent les pores de la matière active et ne peuvent plus être transformés lors de la charge.

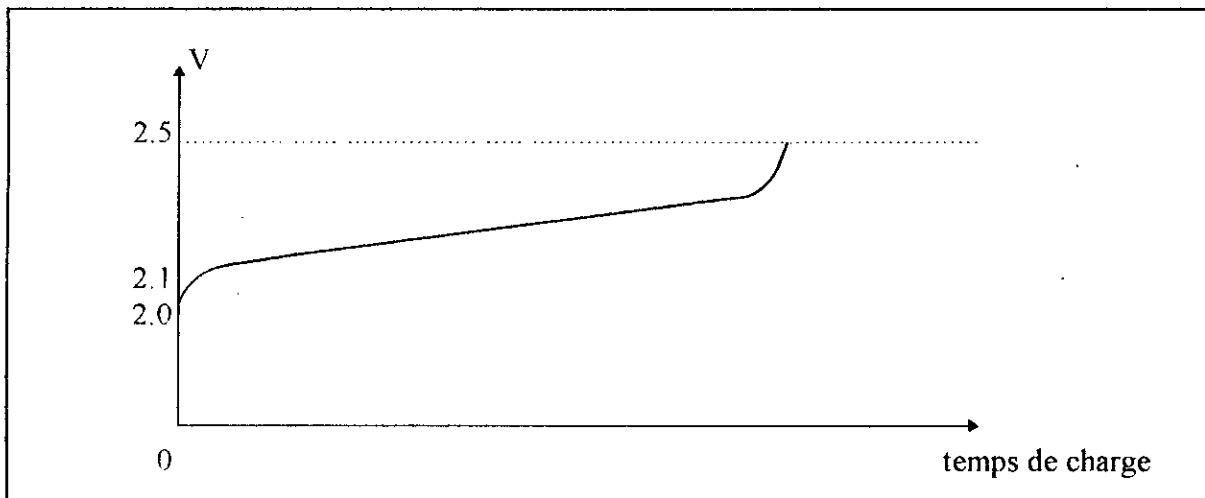


Fig 3-2 : Variation de la tension pendant la charge

Le rendement énergétique d'un accumulateur au plomb est, en général, compris entre 0.7 et 0.8. La résistance interne d'un accumulateur au plomb est très faible : voisine du centième d'ohm pour les accumulateurs habituels, elle peut même être inférieure au millième d'ohm pour les gros accumulateurs.

La capacité d'un accumulateur au plomb est proportionnelle à la masse des plaques et est comprise entre 10 et 15AH par Kg de plaque. La capacité en énergie qui représente l'énergie que peut restituer un accumulateur au cours d'une décharge complète a une valeur comprise entre 22 et 33 Wh/ Kg [14].

L'électrolyte liquide, acide fort, a longtemps constitué un sérieux inconvénient, car il rend la manipulation de ces accumulateurs très délicate. L'emploi de batteries étanches constitue un important progrès. Dans une batterie étanche l'électrolyte est immobilisé par un agent gélifiant et plusieurs événements permettent le dégagement des gaz provenant de la décomposition de l'eau lors d'une surcharge éventuelle [13].

D'autre part, pour supprimer l'attaque des armatures des plaques par l'acide lorsque le générateur se trouve en circuit ouvert ces armatures sont réalisés en un matériau inattaquable formé de calcium et de plomb [1].

L'accumulateur au plomb s'emploie comme réservoir d'énergie électrique (source auxiliaire, source de secours) fixe ou mobile, et aussi comme régulateur de tension (batterie tampon), puisque la d.d.p entre ses bornes reste sensiblement constante quel que soit le débit, du fait de la très faible valeur de sa résistance interne.

3-2- Accumulateurs alcalins :

L'accumulateur alcalin, concurrent de l'accumulateur au plomb, comporte un électrolyte basique : une solution de potasse, le plus souvent, et des électrodes métalliques.

Cet accumulateur est robuste, d'un poids relativement faible, et ne demande qu'un entretien réduit. Il peut rester déchargé pendant plusieurs mois sans inconvénient, ce que ne peut supporter un accumulateur au plomb. D'autre part, l'électrolyte basique, moins dangereux que l'électrolyte acide a rendu facile la réalisation de batteries entièrement étanches, de toutes capacités et qui permettent d'obtenir toutes les tensions désirées. Le volume de ces éléments

est comparable à celui des piles sèches, qu'ils peuvent facilement remplacer. Cependant, l'accumulateur alcalin reste d'un coût relativement élevé [22]. Dans cette catégorie on distingue les variantes suivantes :

a- Accumulateur Cadmium-Nickel :

Il est représenté par la chaîne suivante :

HYDROXYDE DE NICKEL	SOLUTION D'HYDROXYDE DE POTASSIUM	CADMIUM
Ni(OH)₃	KOH à 20 %	Cd
(électrode positive)	(électrolyte)	(électrode négative)

Lors de la décharge, sur la plaque positive se forme un hydroxyde de nickel Ni(OH)₂, et sur la plaque négative un hydroxyde de cadmium Cd(OH)₂.

La concentration de l'électrolyte reste constante. Lors de la charge on retrouve les éléments de départ.

Chaque élément de ce type présente une f.é.m de 1.2V.

b- Accumulateur Argent-Zinc :

Il est représenté par la chaîne suivante :

OXYDE D'ARGENT	SOLUTION D'HYDROXYDE DE POTASSIUM	ZINC
(électrode positive)	(électrolyte)	(électrode négative)

Pendant la décharge, sur la plaque positive se forme de l'argent, et sur la plaque négative de l'hydroxyde de zinc Zn(OH)₂.

La f.é.m d'un élément d'accumulateur argent-zinc est sensiblement égale à 1.5V. Le principal avantage de cet accumulateur est sa grande capacité en énergie par unité de masse ou de volume : 130 Wh/Kg et 300 Wh/dm³, 4 à 6 fois supérieure à celle des batteries à électrolytes acides. En revanche son prix est très élevé, à cause de l'emploi de l'argent [1].

C- Accumulateur Zinc-Air :

Il est représenté par la chaîne suivante :

OXYGENE DE L'AIR	SOLUTION D'HYDROXYDE DE POTASSIUM	ZINC
-----------------------------	--	-------------

L'oxygène est pompé dans l'air à travers une paroi poreuse en nickel, qui joue le rôle de catalyseur. Lors de la décharge, tout se passe comme si l'oxygène de l'air oxydait le zinc à l'état d'oxyde de zinc ZnO soluble dans l'électrolyte. Cette transformation est réversible.

L'accumulateur zinc-air, de capacité en énergie élevée, puisqu'elle atteint 170 Wh/Kg, rend possible l'emploi de moteurs électriques sur les chariots industriels, les voitures de livraisons, et même les voitures particulières [22].

3-3- Accumulateurs au Lithium :

Les nombreux progrès accomplis expliquent la grande variété d'accumulateurs réalisés. L'emploi d'accumulateurs à électrolyte organique semble très prometteur [22].

Un premier type, comportant une plaque positive en cuivre et une plaque négative en lithium poreux, présente une capacité en énergie atteignant 500 Wh/Kg. La réaction réversible mise en jeu fait intervenir l'insertion d'ions lithium dans un bisulfure de titane.

Leur intérêt réside dans une forte capacité par unité de masse, une très bonne étanchéité et une stabilité importante vis-à-vis de la température.

Leur développement est subordonné à une augmentation du nombre de cycles qu'ils peuvent accepter.

4- FONCTIONNEMENT DES ACCUMULATEURS AVEC LES PANNEAUX :

4-1- Courbes de fonctionnement :

Les accumulateurs sont caractérisés par deux variables fonction de l'état de charge Q , la f.é.m $V_a(Q)$ et la résistance interne $r_a(Q)$. V_a diminue avec l'état de décharge, comme indiqué sur la figure 3-3 pour les accumulateurs au plomb.

Les courbes présentées sont des courbes de décharge à intensité constante. La tension limite de décharge est généralement fixée à 1.8V par élément.

Lors de la charge la tension augmente linéairement à partir de 2.05V mais elle doit être limitée à environ 2.25V par élément [1]. En fonctionnement normal la f.é.m des accumulateurs doit donc être maintenue entre deux limites V_{ad} et V_{ac} ($V_{ac} > V_{ad}$).

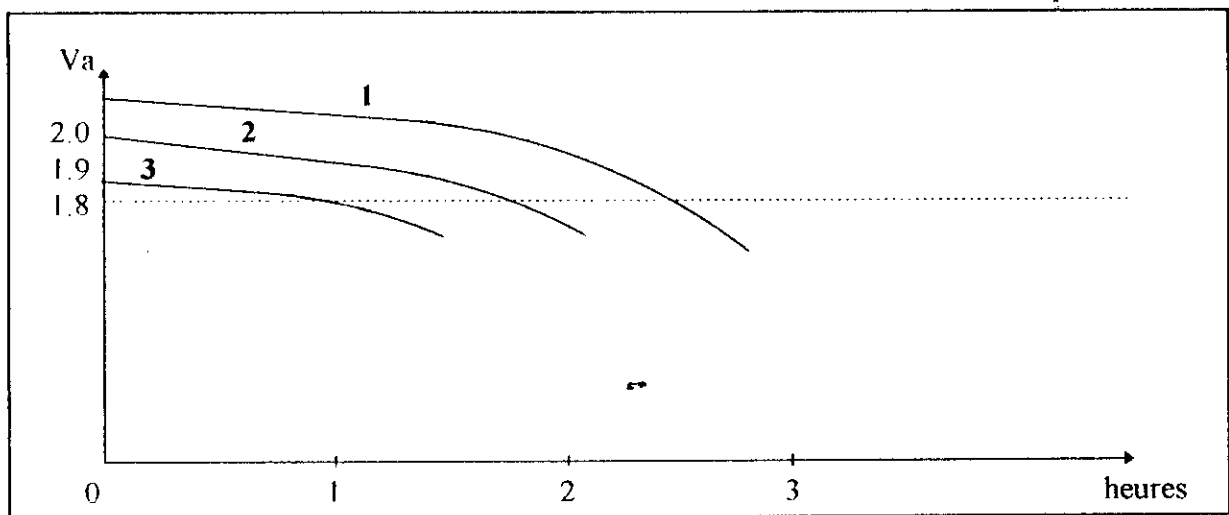


Fig 3-3 : Tension des éléments d'accumulateurs au plomb en fonction de l'état de charge

La résistance interne r_a diminue avec l'état de charge comme l'indique la figure 3-4 qui met en évidence un effet d'hystérésis entre charge et décharge.

On peut négliger ce point et considérer que la résistance interne r_a varie entre deux valeurs limites r_{ad} et r_{ac} ($r_{ad} > r_{ac}$).

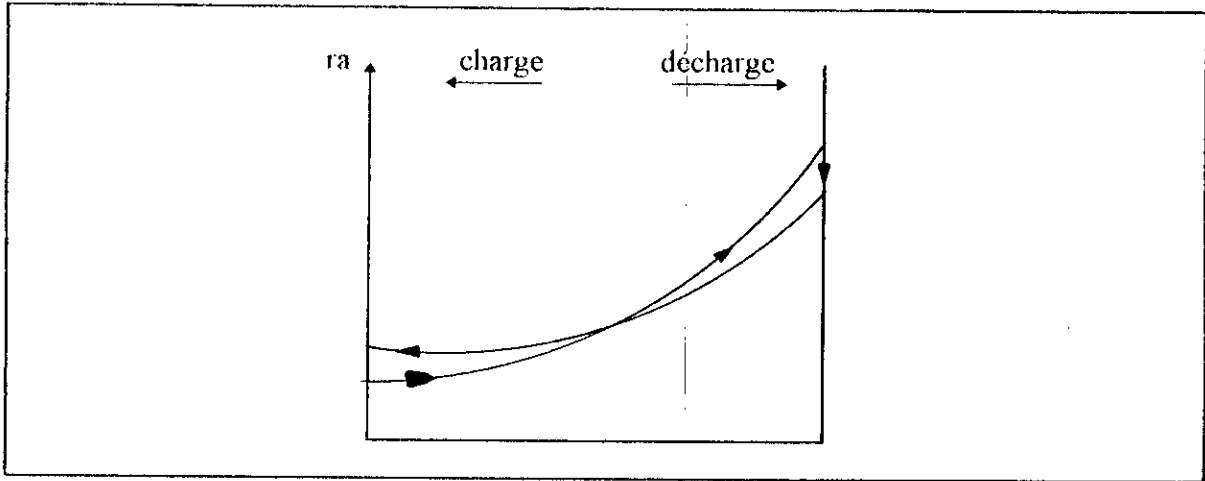


Fig 3-4 : Variation de la résistance interne des éléments d'accumulateurs

4-2 Branchement des accumulateurs avec les photopiles :

La figure 3-5 présente schématiquement le branchement le plus simple entre un groupement d'accumulateurs et celui des photopiles. La diode D_s de protection évite une décharge des accumulateurs à travers les photopiles pendant les périodes de non illumination. Cette diode dissipe le moins d'énergie possible et l'on utilise parfois des diodes Schottky dont les tensions de seuil sont de l'ordre de 0.3V.

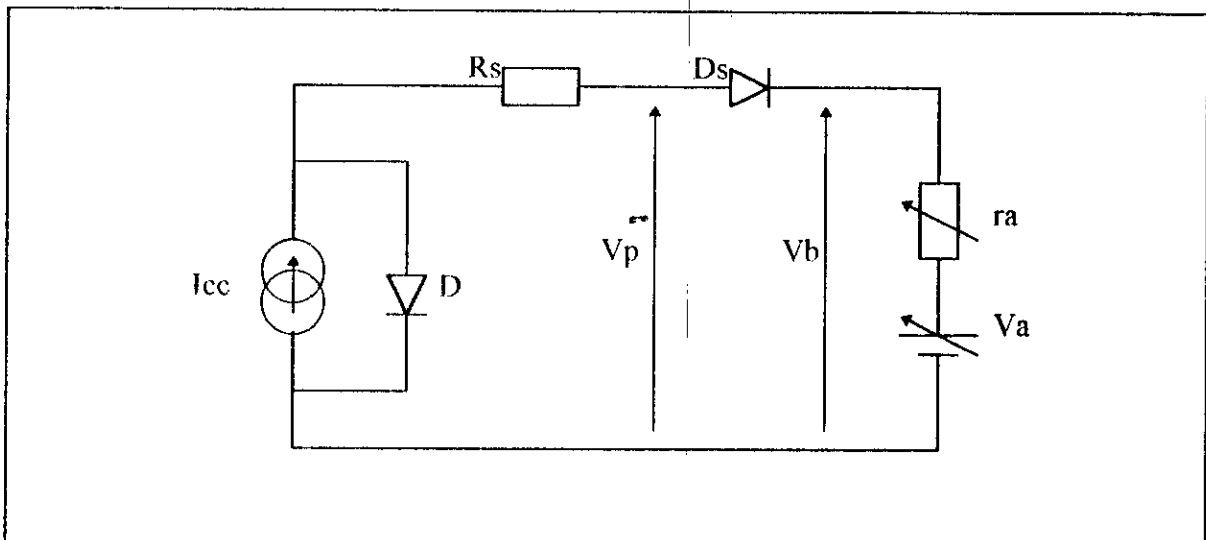


Fig 3-5 : Liaison des batteries et photopiles

Ces diodes Schottky ne peuvent pas toutefois être utilisées pour des tensions supérieures à 24V à cause de leur faible tension limite inverse.

La figure 3-5 correspond au cas où l'utilisation est déconnectée des accumulateurs mais très souvent la charge reste branchée comme l'indique la figure 3-6.

Ce montage où les batteries sont placées en parallèle sur générateur et charge, montage dit flottant est très employé pour les petits systèmes.

Si la charge R est supérieure à r_a , ce qui est pratiquement toujours le cas, trois cas peuvent alors se présenter :

1- Les photopiles fournissent de l'énergie aux accumulateurs et à la charge.

2- Le courant généré par les photopiles est trop faible pour satisfaire la demande de la charge; celle-ci est donc alimentée à la fois par les accumulateurs et par les photopiles.

3- L'éclairement est pratiquement nul, la diode D_s est bloquée et les accumulateurs alimentent la charge.

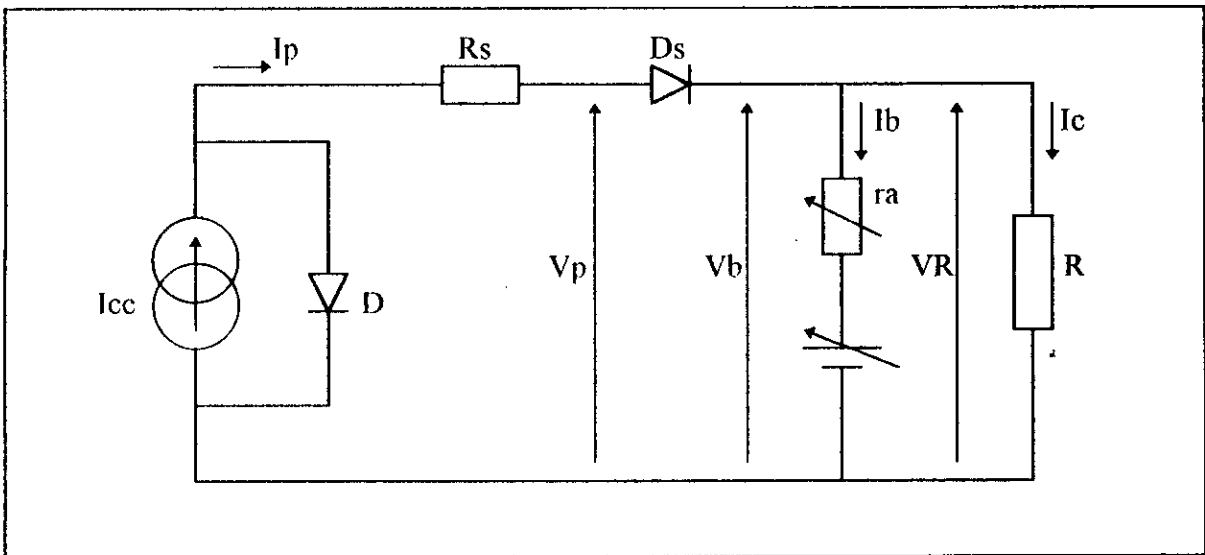


Fig 3-6 : Montage d'une batterie tampon

Le passage du premier au deuxième cas se produit lorsque l'éclairement devient inférieur à un seuil ϕ_s (fig 3-7).

Dans les conditions du point A aucun courant ne circule dans les accumulateurs :

$$V_p = V_s + V_a = V_s + R \cdot I_p \quad (28)$$

La figure 3-7 permet de déterminer le seuil de charge-décharge de la batterie tampon. Le flux seuil ϕ_s augmente avec l'état de charge, et augmente si la charge R diminue.

Le passage du deuxième au troisième cas a lieu lorsque la tension de circuit ouvert des panneaux devient inférieure à V_a , c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pratiquement plus d'illumination sur les photopiles.

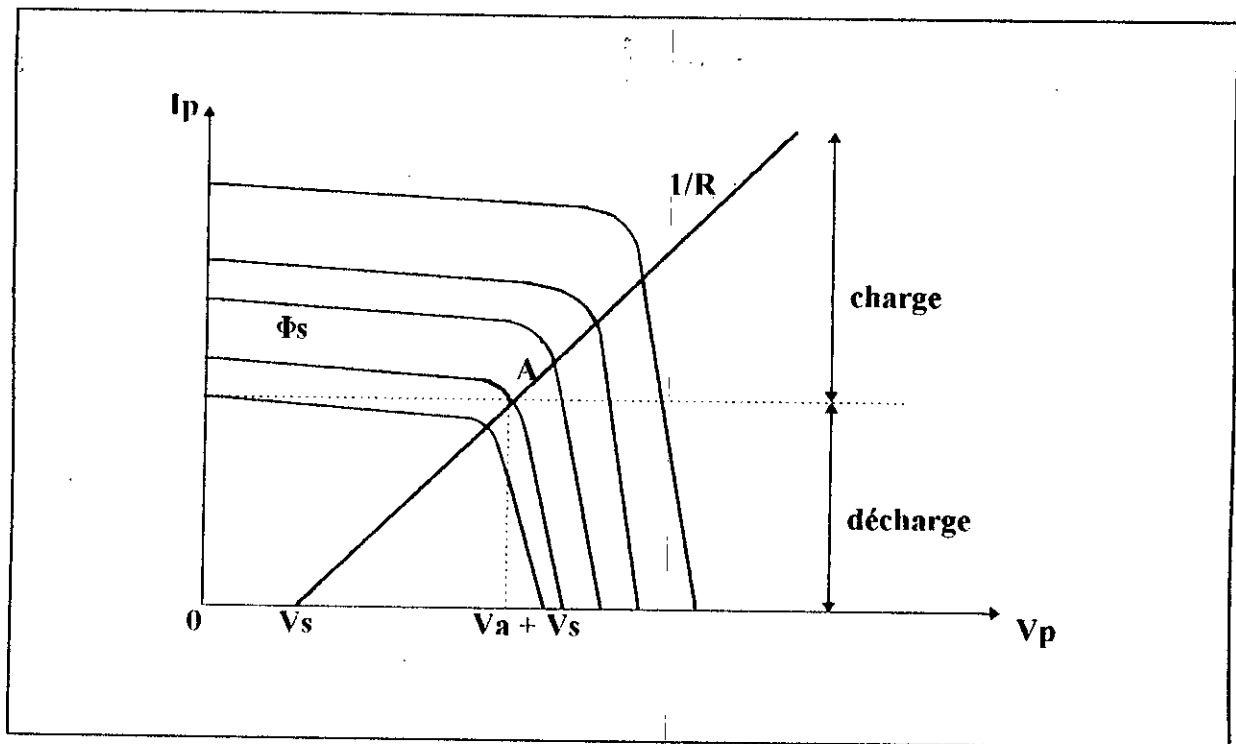


Fig 3-7 : Détermination du seuil de fonctionnement de la batterie tampon

5- CAPACITE DE LA BATTERIE :

Toutes les fois qu'un dispositif contient quelque chose qu'il peut rendre à volonté, le problème de sa contenance se pose. Si le contenu est conservé identique à lui-même, la capacité est facile à définir, en litres ou en kilogrammes par exemple. Quelles que soient les modalités d'utilisation du contenu et leur rapidité, la capacité est sensiblement la même, sous réserve des évaporations ou des quantités restant fixées aux parois, négligeables ou faciles à évaluer [14]. Il faut tenir compte aussi des dilatations des récipients avec la température; mais il faut bien distinguer les variations de la quantité du liquide contenu.

Pour la batterie d'accumulateurs, le problème est plus compliqué. Elle reçoit et rend de l'électricité, mais conserve autre chose, ou plutôt conserve l'électricité sous une forme différente, celle d'une modification chimique complexe, susceptible d'une évolution d'une utilisation à l'autre, suivant certaines modalités. C'est un récipient à contenance variable.

C'est pourquoi il vaut mieux théoriquement parler des capacités d'une batterie, plutôt que de la capacité, étant entendu que la pratique impose l'emploi d'une capacité nominale, de même qu'il y a une puissance nominale pour un moteur.

On sait que l'accumulateur au plomb a, comme matière active, sur les plaques positives du bioxyde de plomb, et sur les plaques négatives du plomb poreux, l'une et l'autre plongées dans un électrolyte composé d'un mélange d'eau et d'acide sulfurique. On sait aussi que la décharge se traduit par une fixation de l'acide sulfurique sur les plaques avec transformation des deux matières actives en sulfate de plomb et appauvrissement de l'électrolyte en acide, ce qui diminue sa densité. Inversement, la charge consiste dans le retour de l'acide dans l'eau et dans la réapparition des deux matières d'origine, par décomposition du sulfate. Plus il y a de la matière à transformer, plus on peut produire de l'électricité. En théorie, il faut 8,32g de matières solides et 3,66g d'acide sulfurique pour produire 1A.H ou 3600 Coulombs [12].

On pourrait croire que l'on peut déterminer mathématiquement l'équivalence des quantités de matières à mettre en oeuvre et des quantités d'électricité à attendre. La capacité d'un ensemble donné serait certaine, sous réserve des pertes par renversement ou par désagrégation. Il n'en est rien parce que le phénomène dominant dans l'accumulateur est la diffusion.

Le fonctionnement de l'accumulateur, basé sur le contact entre un liquide et des solides qu'il transforme n'est possible et durable que parce qu'à travers les matières qui ont été transformées les premières par l'électrolyte, celui-ci peut atteindre des matières fraîches. Il faut que ces matières aient une certaine porosité. Une matière compacte ne donnerait qu'une capacité infime par sa seule surface. Le secret d'une forte capacité se trouve dans l'emploi d'une grande plaque poreuse sur une certaine profondeur.

Malheureusement, le sulfate de plomb qui remplace les matières actives (bioxyde et plomb) est plus volumineux qu'elles. Il tente à boucher les pores. La pénétration de l'acide devient donc de plus en plus difficile, ce qui a un effet capital : la chute de la force électromotrice et par suite de la tension, puisque la force électromotrice dépend de la concentration de l'électrolyte au contact des matières [14].

Quand la densité de l'électrolyte au contact tend vers zéro, il faut s'arrêter, même si toute la matière n'a pas été utilisée, sous peine de boucher irrémédiablement les pores par une sulfatation irréversible, puisqu'une sulfatation limitée et réversible est l'essence même de la décharge.

6- ELEMENTS CONSTITUTIONNELS :

La capacité des accumulateurs est liée aux éléments principaux suivants :

6-1- Surfaces des plaques :

Pour une même quantité des matières actives, plus la surface des plaques est grande, plus les contacts sont faciles, plus la capacité est grande.

Quand un accumulateur doit être généreux, c'est-à-dire, doit donner son électricité rapidement, même s'il doit la donner en totalité, il y a intérêt à étaler largement sa matière, ce qui facilite par ailleurs la recherche des faibles résistances intérieures. C'est ainsi que l'on opère pour les batteries de démarrage.

De grandes surfaces n'impliquent pas forcément de grandes dimensions [14], puisque les grandes plaques peuvent être fractionnées et imbriquées avec les plaques de nom contraire en formant des blocs compacts et ramassés.

6-2- Epaisseur des plaques :

La quantité de matière active augmente avec son épaisseur, ainsi que la capacité. Mais, comme la matière profonde ne peut être atteinte que difficilement, le gain réel de capacité est rapidement réduit.

Des plaques épaisses peuvent cependant être intéressantes quand le débit est faible et entrecoupé. On gagne en solidité ce que l'on perd en générosité.

6-3- Porosité :

La porosité des plaques a naturellement une grande influence sur la capacité; c'est elle qui permet la diffusion de l'acide. Elle dépend des matières employées pour l'empâtage sous forme de plaquettes disposées dans les augets des grilles qui constituent les armatures des plaques.

Elle dépend aussi de la technique de première formation des parties actives, c'est-à-dire de l'état moléculaire auquel elles sont amenées après empâtage et réduction électrochimique.

Tout cela est lié au constructeur, la porosité est souvent en rapport avec la solidité. Les deux qualités ont tendance à varier en sens inverse.

6-4- Concentration de l'électrolyte :

La capacité croît avec la densité de l'électrolyte qui baigne les plaques. En même temps augmentent aussi la force électromotrice et la tension.

La capacité croît parce que l'acide, plus concentré diffuse mieux. L'augmentation passe cependant par un maximum pour une valeur de la concentration voisine de celle qui donne le minimum de résistivité, ou le maximum de conductibilité.

Cela correspond à la densité de l'électrolyte voisine de 1,22, soit 26° Baumé, pour environ 30% d'acide dans l'eau [12]. Il est certain que la conductibilité doit intervenir, puisqu'elle contribue nécessairement à la combinaison des circuits qui sont réalisés à l'intérieur des pores imprégnés d'électrolyte à des densités qui varient avec les combinaisons qui apparaissent.

La fig 3-8 donne l'allure générale des courbes traduisant la capacité en fonction de l'électrolyte suivant le régime de décharge.

Quand l'intensité augmente, la capacité diminue, et le maximum se déplace vers des densités de plus en plus élevées.

Ces graphiques supposent la densité de l'électrolyte constante, ce qui ne peut être vrai que pour une quantité importante de liquide rendant insignifiantes les quantités d'acide consommées par les réactions.

En fait, dans la pratique, et tout particulièrement dans les accumulateurs au plomb où l'organisation est très ramassée, la densité baisse à mesure que la décharge se produise.

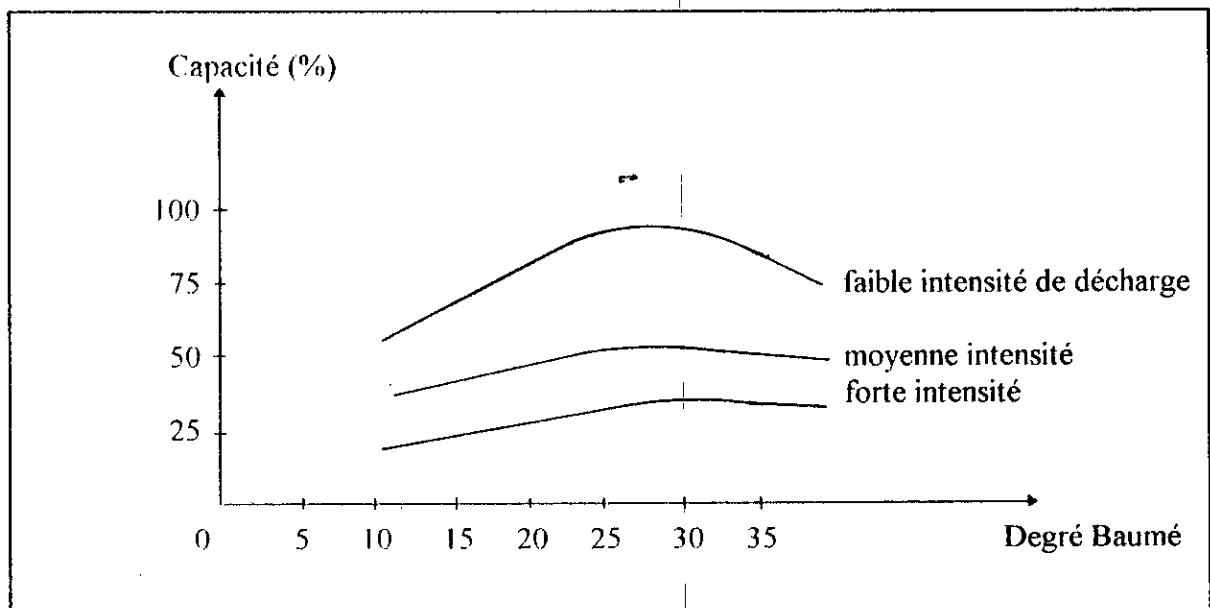


Fig 3-8 : Courbe de la capacité en fonction de l'électrolyte et du régime de décharge

7- ELEMENTS FONCTIONNELS :

Ce sont les éléments qui, pour un accumulateur donné, varient avec les circonstances plus ou moins exceptionnelles d'emploi.

7-1- Intensité de décharge :

L'intensité est le facteur pratique principal réagissant sur la capacité, parce que c'est celui qui a l'influence principale sur la diffusion; c'est-à-dire finalement sur le crochet qui indique la fin de la décharge sur la courbe caractéristique.

Quand l'intensité augmente, le crochet se produit, pour une tension de plus en plus faible, par suite de l'augmentation de la perte de charge intérieure et de la baisse de la densité d'électrolyte au contact de la matière, et de plus en plus tôt, puisque les transformations sont de plus en plus rapides.

La fig 3-9 représente le faisceau des courbes de décharge à intensités croissantes définies par la durée de décharge inscrite sur la courbe. En ordonnées sont indiquées les tensions, en abscisses les quantités d'électricité débitées.

On a supposé un accumulateur dont la capacité est de 100A.H pour une décharge faite en 10 heures. Toutes les courbes sont arrêtées au point qui correspond à la tension du crochet et qui est d'autant plus basse que la décharge est plus rapide.

Ce graphique établi pour 100A.H, peut être utilisé pour n'importe quelle capacité d'une batterie du même type en considérant que les capacités inscrites sont remplacées par des pourcentages de la capacité en 10 heures.

Ce faisceau de courbes est appelé courbes de performance d'un accumulateur déterminé. Suivant le constructeur elles concernent des temps de décharge variés allant de quelques minutes à quelques heures.

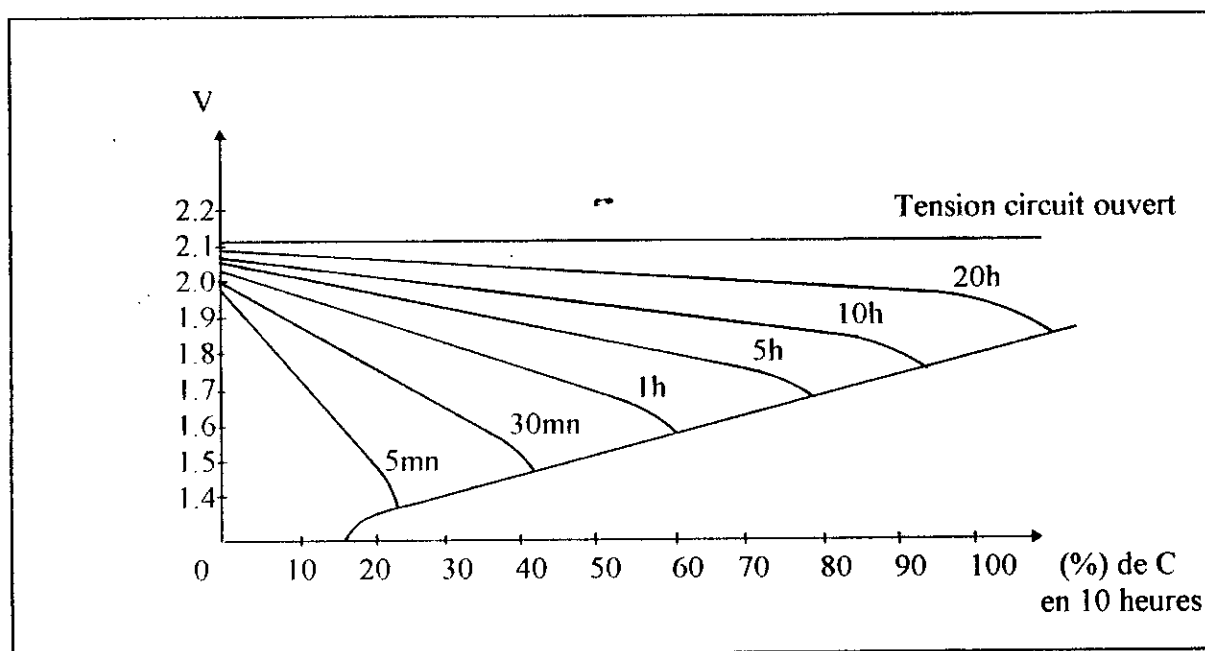


Fig 3-9 : Courbes de performance

En partant de cette courbe de faisceau on pourrait obtenir une courbe donnant la variation de la capacité, ou mieux de la capacité en % en 10 heures, en fonction de la durée de la décharge (Fig 3-10).

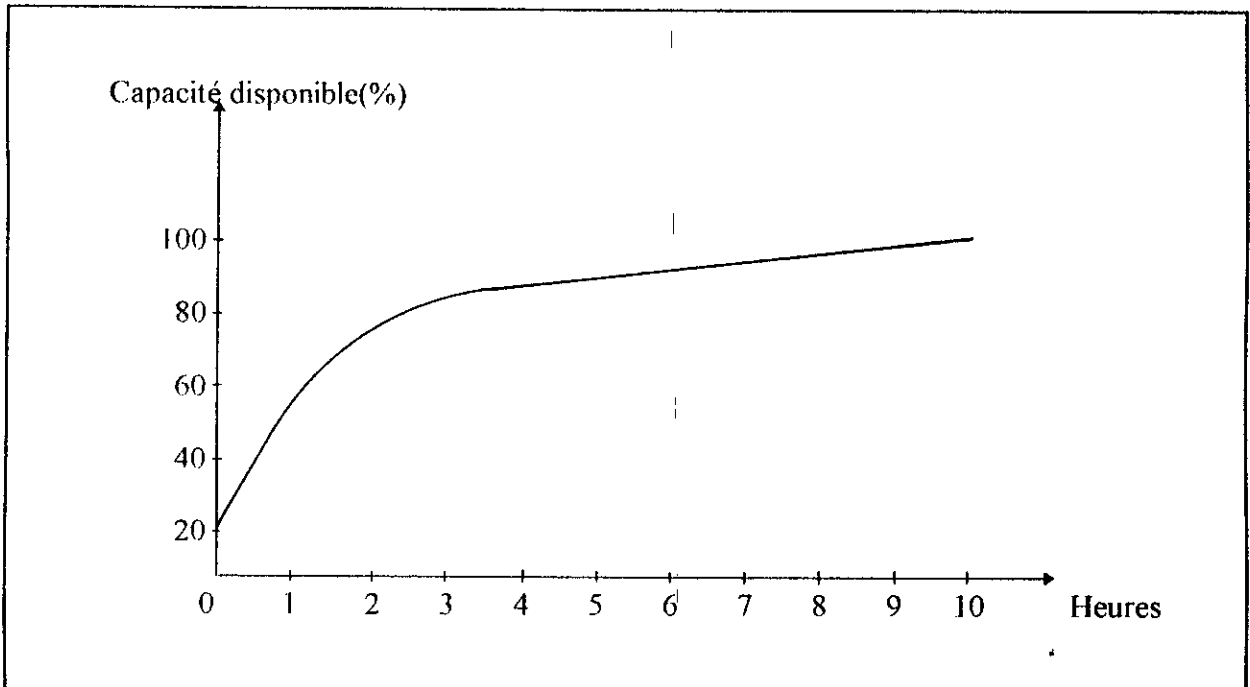


Fig 3-10 : Variation de la capacité en fonction du temps de décharge

7-2- Température :

La température facilitant, quand elle est élevée, la diffusion de l'acide, augmente la capacité de 1 à 4% suivant le régime de décharge [8]. Le coefficient est plus fort pour les décharges rapides.

La recherche d'une température élevée est cependant une arme à double tranchant, car la chaleur favorise l'attaque des plaques à circuit ouvert, c'est-à-dire la décharge sans intensité extérieure.

7-3- Repos :

Si la décharge est effectuée non pas en une fois, mais en plusieurs, avec des repos intercalés, on retrouve, pour une intensité forte, les avantages d'une décharge lente, dans une certaine mesure, puisque le repos facilite la diffusion.

7-4- Fonctionnement :

Le fonctionnement qui, pendant la charge, est une opération de formation des grilles à base de plomb, peut avec certains types d'accumulateurs, donner au début une augmentation de la capacité, jusqu'à ce que la sulfatation et la dégradation viennent compenser cet avantage. Si le support est peu oxydable cela ne peut pas être observé.

7-5- Capacités nominales :

Pour désigner une batterie avec simplicité, il faut bien utiliser un nombre qui la caractérise approximativement et dire à peu près ce que l'on peut en attendre.

C'est ainsi qu'on emploie comme capacité nominale la capacité de décharge en 10 heures ou en 20 heures. Cela n'implique pas forcément telle aptitude pour une décharge plus rapide. La vraie désignation d'une batterie devrait se faire par une courbe ou par une table donnant les mêmes valeurs.

8- METHODES DE MESURE DE LA CAPACITE :

Il existe deux méthodes principales pour la mesure de la capacité d'une batterie [11].

8-1- Le microcoulombmètre :

C'est un appareil qui totalise dans un sens ou dans l'autre (charge, décharge) les quantités d'électricité qui passent et donne par la suite, l'état de charge de la batterie à chaque instant.

8-1-1- Principe :

Il se trouve directement dans le phénomène de l'électrolyse, lorsque le dispositif comprend deux électrodes du même métal en présence d'un électrolyte composé de la solution d'un sel de ce métal dans l'eau.

Les variations de poids de l'anode (ou de la cathode) constituent un renseignement exact sur la quantité d'électricité qui est passée dans le sens indiqué. Si le poids des électrodes sont ceux de départ, cela signifie qu'il est passé autant d'électricité dans un sens que dans l'autre. La mesure de cette quantité d'électricité se fait en coulomb ou en A.H.

Cependant, la variation de poids est imprécise et on ne peut réaliser un affichage permanent qui exprimerait la quantité d'électricité en fonction du poids.

Le microcoulombmètre traduit les variations de poids en variations de surface, de capacité, d'intensité avant que cela soit par l'indication de l'afficheur dans un appareil de mesure.

8-1-2- Présentation et fonctionnement :

C'est un tube capillaire de verre contenant deux colonnes de mercure rempli d'un électrolyte. Deux électrodes avec lesquelles sont en contact les deux colonnes de mercure font fonction d'anode et de cathode alternativement suivant le sens du courant correspondant à la charge et à la décharge.

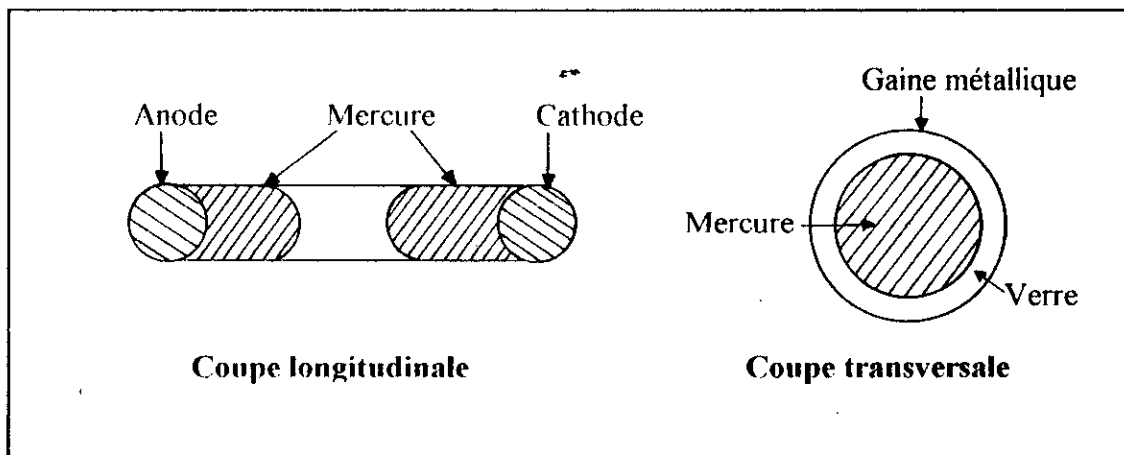


Fig 3-11 : Constitution de la sonde de mesure

L'extérieur du tube capillaire est recouvert d'une gaine métallique. Le passage du courant fait passer le mercure d'une électrode à l'autre sans que la composition de l'électrolyte ne soit changée.

Par le poids de mercure déplacé, le système fait l'intégration par rapport au temps des quantités d'électricité qui passent. La capacité du condensateur formé par la gaine métallique, le tube de verre, et chaque colonne de mercure varie avec la position de l'électrolyte, sa variation donne donc la quantité d'électricité passée, donc sa mesure.

8-1-3- Montage de principe :

Le microcoulombmètre ne peut être placé dans le circuit principal, mais en dérivation, compte tenu du fait qu'il soit conçu pour les faibles intensités. Un shunt est donc placé à cet effet dans le circuit principal. De la fraction du courant qui passe dans le microcoulombmètre permet à ce dernier d'effectuer la mesure.

Pour mesurer la capacité formée lors du passage du courant par la gaine de mercure, on a recours à un courant alternatif émis par un oscillateur pilote lui-même branché dans le circuit principal par l'intermédiaire d'un régulateur de tension.

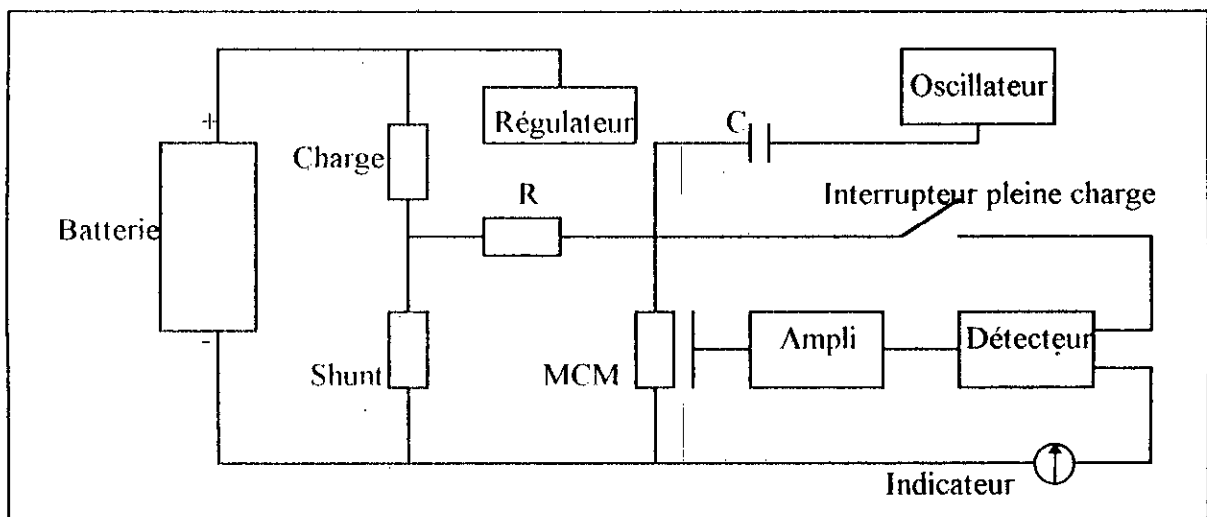


Fig 3-12 : Schéma de principe du microcoulombmètre

Le courant alternatif traversant ce condensateur et dont la valeur dépendra de C , est détecté puis amplifié en vue d'actionner l'appareil de mesure. L'interrupteur de pleine charge limite le comptage à 100% de la capacité de la batterie à tester pendant un cycle de recharge.

8-2- Test électronique de MOTOROLA :

Cette méthode est basée sur une série de trois tests sur lesquels l'utilisateur fera son jugement sur l'état de sa batterie.

- 1- Test de la puissance maximale instantanée disponible.
- 2- Test de l'état de la batterie.
- 3- Test de la tension.

8-2-1- Premier test :

Il est à lire sur l'échelle supérieure de l'appareil en KW, la mesure, ici en débit, est basée sur le principe (mathématique) suivant :

Un générateur de f.e.m E et de résistance interne r données fournit à un circuit extérieur le maximum de puissance possible quand la résistance extérieure de ce circuit est égale à r , cette puissance est

$$P = K E^2 / r \quad (29)$$

P : puissance
 E : f.e.m

r : résistance interne

K : coefficient

Notons que dans ce test, on ne s'intéresse pas aux autres paramètres, ni aux dimensions ni à la nature de la batterie.

8-2-2- Second test :

Dans ce test on compare le test précédent à celui effectué sur une batterie type, dont celle qui a été testée n'est qu'un exemplaire ou à défaut avec l'hypothèse sur la puissance à demander à la batterie.

Ce test nous permet de savoir si la puissance disponible dans la batterie est suffisante dans l'immédiat et aussi si son état lui donne par rapport à la norme une fiabilité convenable.

Pour ce test on fait intervenir deux facteurs : la caractéristique de la batterie type ou la performance nécessaire et la température réelle dont on connaît l'influence sur la capacité. Ce qui est lu sur l'appareil pour ce test n'est pas une grandeur exprimée avec une unité mais on constate la position d'une aiguille dans un secteur coloré « bon-mauvais ».

8-2-3- Troisième test :

On mesure la tension à circuit fermé à de faibles intensités. On lit la tension sur une échelle dilatée et graduée de 11 à 12,4V pour une batterie de six éléments.

8-3- Autres méthodes :

Ces méthodes pour la majorité sont basés soit sur la mesure de la tension aux bornes de la batterie (à circuit ouvert ou fermé) ou bien par la mesure de la densité de l'électrolyte.

Les seuls renseignements que peuvent apporter ces méthodes sont une approximation (bonne, moyenne, mauvaise charge de la batterie), à condition de tenir compte des conditions d'utilisation de ces testeurs (exemple : température).

Ces tests dépendent par ailleurs des conditions d'entretien de la batterie.

8-4- Méthode proposée :

8-4-1- Introduction :

Notre objectif est de déterminer la capacité d'une batterie donnée. Alors, en étudiant les paramètres influant sur la capacité, on s'aperçoit que l'idéal serait de trouver une relation empirique ou même analytique entre cette capacité d'une part et la température, la densité de l'électrolyte, l'intensité de décharge et la tension d'autre part.

Nous nous heurtons ici à une difficulté majeure qui est liée à la précision des mesures et à la modélisation à partir des données expérimentales (les différences de température non uniforme, ...etc.).

En premier temps, on peut procéder à l'enregistrement du courant de charge et de décharge d'éléments neufs en notant l'évolution de la densité de l'électrolyte. Mais cette méthode fait appel aux éléments constitutionnels de la batterie (densité, résistance interne) et ne peut montrer les résultats qu'on recherche du fait que :

- La température ne peut nous renseigner à cause, d'une part, de ses faibles (ou quasiment nulles) variations durant un test et, d'autre part, du fait qu'elle ne soit qu'un paramètre à combiner avec les éléments constitutionnels.

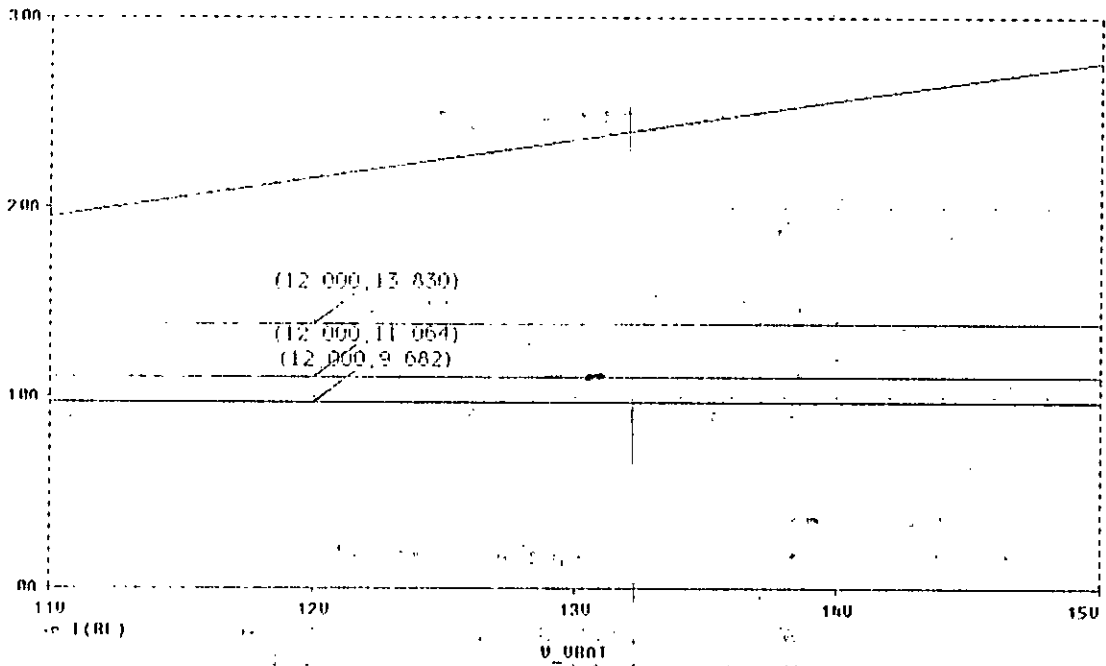
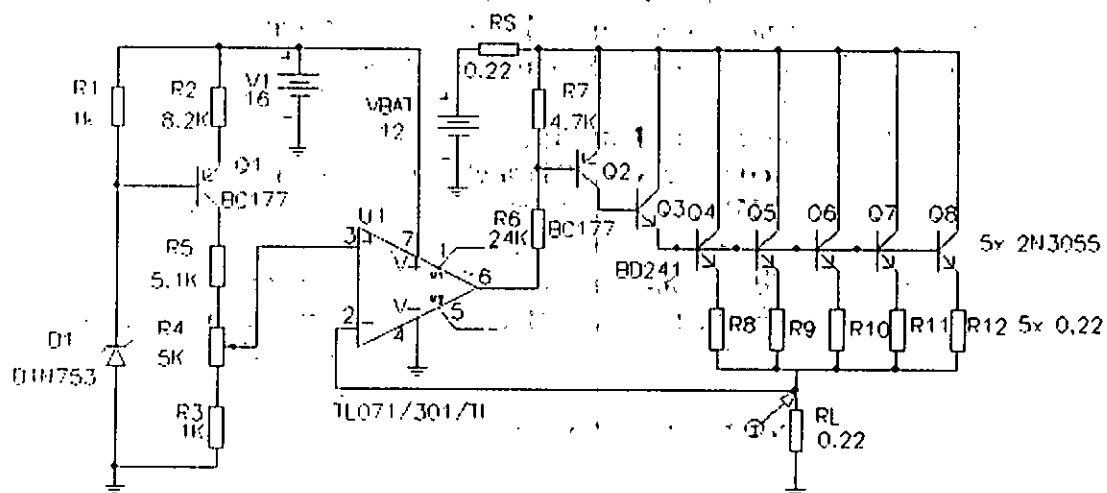


Figure 4-7
Circuit de décharge et résultats de sa simulation

Ces courants sont issus d'une source de courants élaborée avec des transistors. Un tarage pour fixer ces courants s'effectue à l'aide des potentiomètres RV₁ à RV₄.

La décharge est validée grâce à un signal « commande » actif au niveau haut pendant 10 secondes afin de ne pas détériorer la batterie.

La mise à zéro de l'une des sorties du décodeur 74LS155 provoque le blocage de l'un des trois transistors (T₁, T₂ ou T₃), ce qui engendre la fermeture de l'interrupteur correspondant (K₄, K₃ ou K₂). L'interrupteur se ferme sur l'un des potentiomètres RV₂, RV₃ ou RV₄, ce qui fixe le rapport entre la sortie et l'entrée de l'amplificateur. A l'arrivée du signal de commande, l'interrupteur K₁ se ferme et provoque la saturation du transistor T₁. Le circuit de sortie sera équivalent à celui de la fig 4-8.

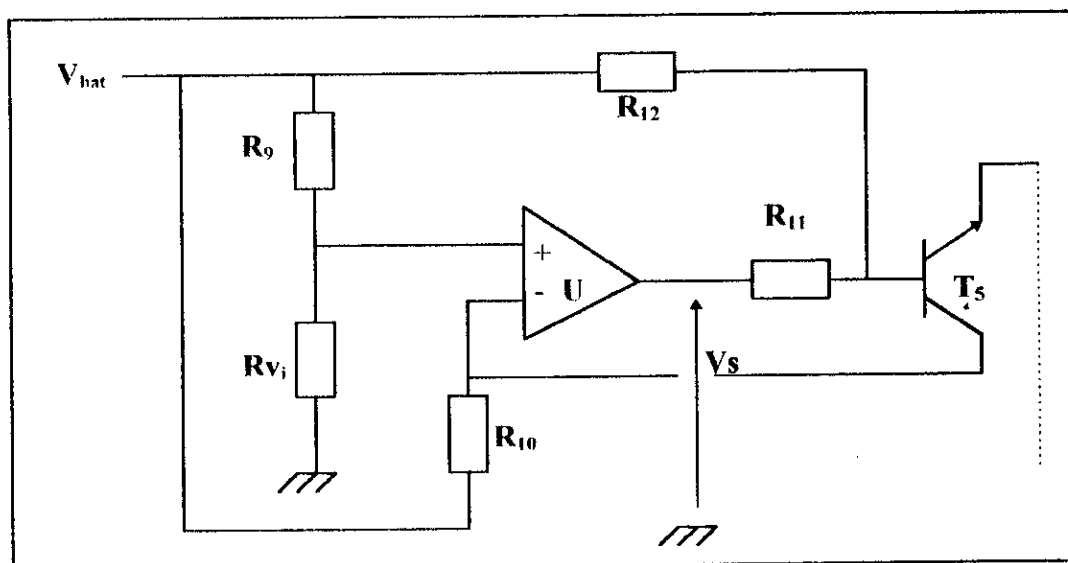


Fig 4-8 : Circuit équivalent de sortie

La sortie V_s sera égale :

$$V_s = A \cdot (-R_9/R_{V_i} + R_9) \cdot V_{bat} \quad (36)$$

Si R_{V_i} varie, la tension change et par conséquent le courant varie permettant d'avoir alors une source de courant commandable par tension.

5-2-2- Circuit relais :

Ce circuit permet la sélection des charges quand le microcontrôleur prend cette décision. Il est constitué : d'un décodeur deux vers quatre, de quatre bistables et quatre relais, comme indiqué sur la fig 4-9.

Les deux lignes PC2 et PC3 sélectionnent l'une des quatre sorties du décodeur. Cette transition fait basculer le bistable associé à la ligne en question. Un niveau bas sur la sortie du bistable ouvre le relais, tandis qu'un niveau haut le ferme, ce qui a pour effet de désactiver la charge.

Notons que Pa7 sert à autoriser la sélection des charges au moment voulu.

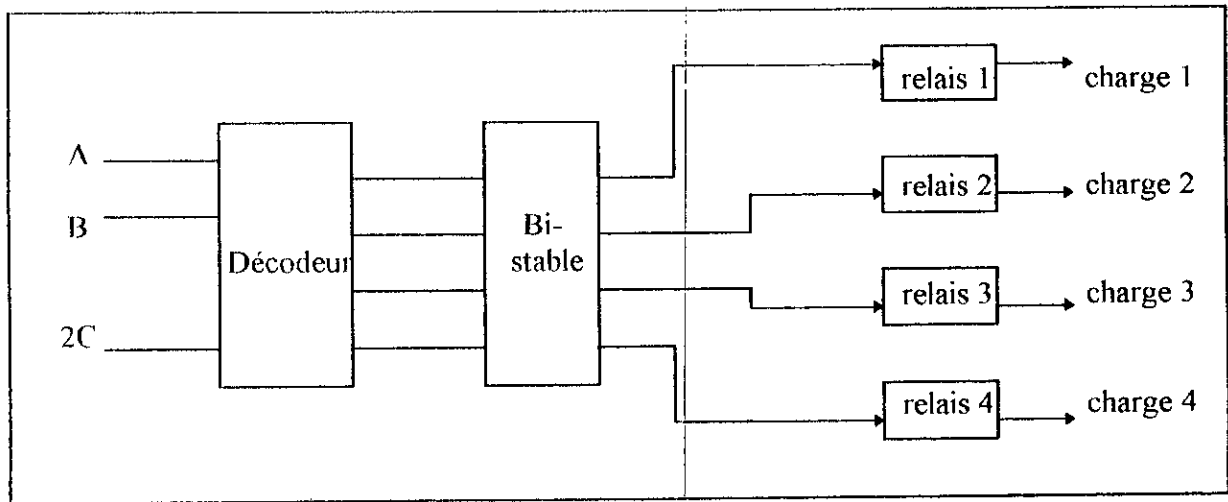


Fig 4-9 : Schéma de principe du circuit relais

5-3- Système à microcontrôleur :

Ce bloc permettant la liaison du microcontrôleur avec les éléments précédemment cités est représenté par la fig 4-10.

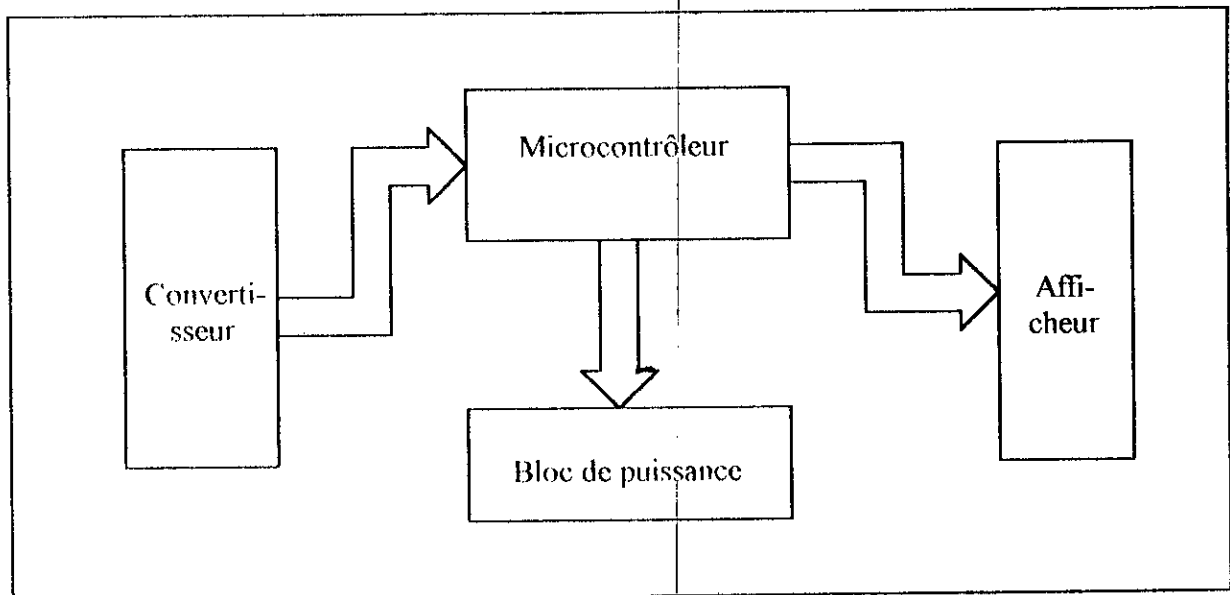


Fig 4-10 : Liaisons du 68705P3S avec les éléments externes

6- MESURE DES PARAMETRES :

La mesure des paramètres d'une installation solaire concerne : le courant de court-circuit, la tension à vide, la puissance maximale, la température et l'irradiation.

Pour que l'unité centrale puisse avoir toutes les informations liées à ces paramètres, il serait nécessaire d'avoir recours à des capteurs dont le rôle est d'extraire les données désirées et de les délivrer sous une forme accessible.

6-1- Capteur de courant :

La mesure du courant panneau s'effectue grâce à un shunt placé comme le montre la fig 4-11.

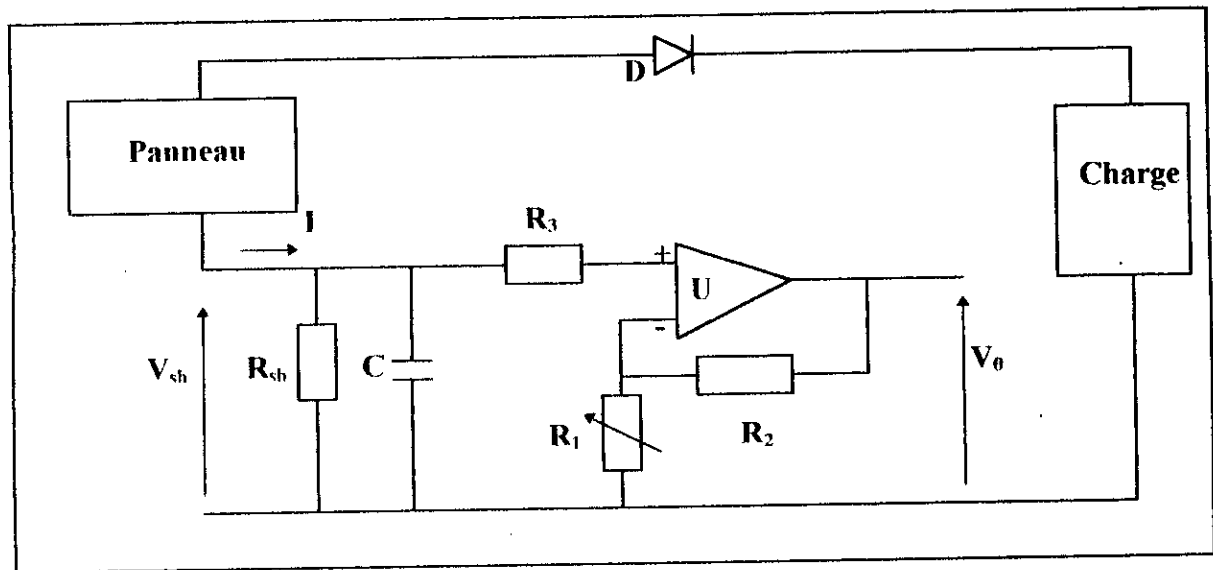


Fig 4-11 : Circuit de mesure du courant panneau

La résistance du shunt doit être aussi petite que possible pour que la différence de potentiel à ses bornes soit négligeable. La tension aux bornes de R_{sh} est proportionnelle au courant I et vaut $R_{sh} \cdot I$.

Une capacité C permet d'atténuer les ondulations qui peuvent surgir, afin d'éviter que les parasites perturbent le fonctionnement du convertisseur analogique-numérique. Ensuite, le signal est appliqué à un amplificateur qui présente un gain variable par les résistance R_1 et R_2 et une impédance d'entrée élevée.

La tension de sortie V_0 est donnée par :

$$V_0 = (1 + R_2/R_1) \cdot R_{sh} \cdot I \quad (37)$$

En prenant $R_{sh} = 0,05\Omega$, et lorsque on limite la valeur maximale de courant à 10A, on aura :

$$V_{sh} = 0,5V$$

Puisque la tension maximale d'entrée du convertisseur ADC804 vaut 5V, nous prendrons un gain de 10 pour atteindre cette limite.

Nous prendrons alors :

$$R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega \text{ (ajustable)}$$

$$R_2 = 22 \text{ k}\Omega$$

Afin de compenser la tension de décalage à l'entrée, nous avons rajouté une résistance $R_3 = 4,7 \text{ k}\Omega$.

6-2- Capteur de tension :

La mesure de la tension est basée sur l'emploi d'un diviseur de tension faisant abaisser une tension dont la limite maximale a été estimée à 20V. Pour cela, nous avons utilisé un diviseur de 4 pour atteindre une limite maximale compatible avec la gamme de conversion du convertisseur ADC804, c'est-à-dire [0 , 5V].

La figure 4-12 montre le principe de la mesure.

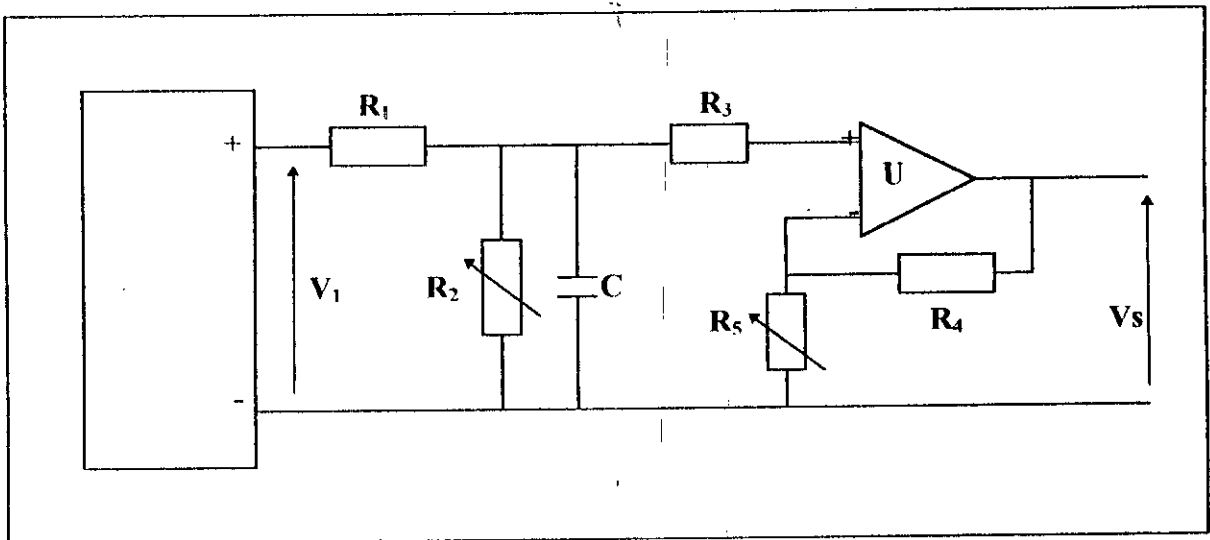


Fig 4-12 : Circuit de mesure de la tension

Les résistances sont choisies de façon à avoir $(R_1 + R_2)/R_2 = 4$

Nous prendrons alors :

$$R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega \text{ (ajustable)}$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

L'amplificateur opérationnel sert d'étage suiveur permettant d'avoir une adaptation (grande résistance d'entrée, et faible résistance de sortie).

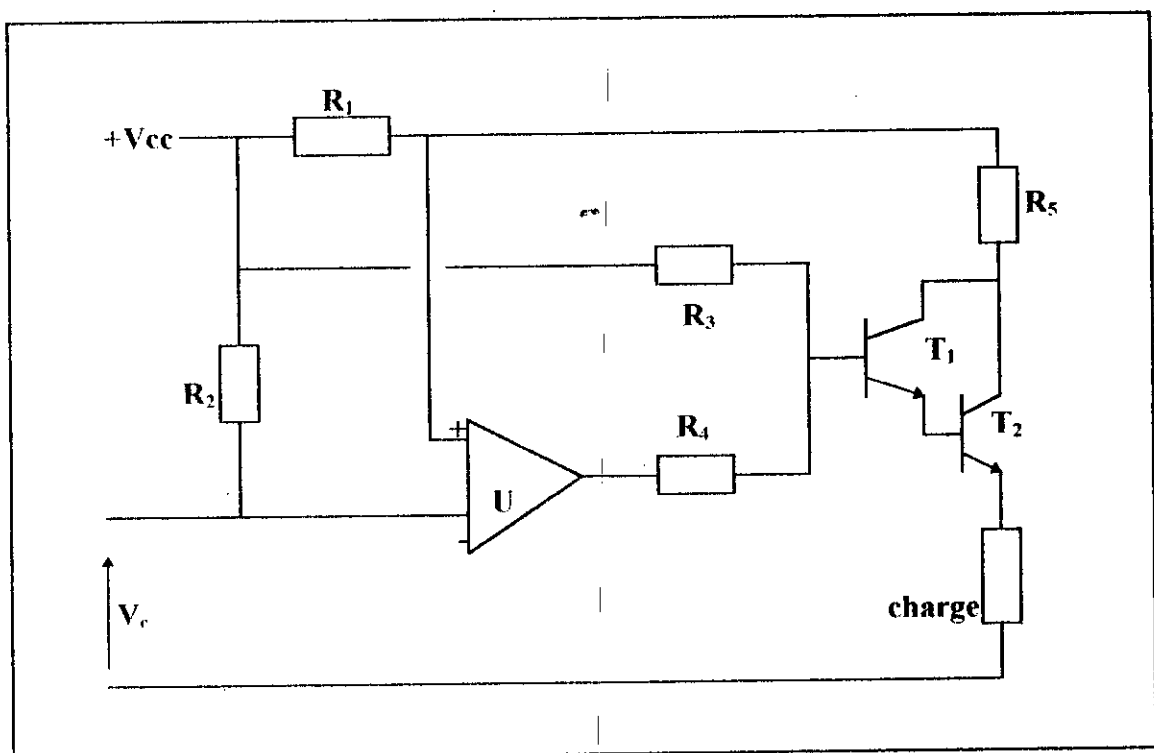


Fig 4-13 : Variation de la charge pour le calcul de la puissance maximale

6-3- Puissance maximale :

Le principe de détermination de la puissance maximale consiste à faire varier une charge et mesurer les courant et tension correspondants. Une fois leur produit atteint la valeur maximale, la puissance maximale sera déduite en conséquence.

La figure 4-13 montre le principe de la variation de la charge.

6-4- Capteur de température :

Le principe de la mesure de la température est basé sur l'emploi d'une résistance à coefficient de température négative (CTN). Cette dernière est placée dans un pont de Wheatstone comme montré sur la fig 4-14.

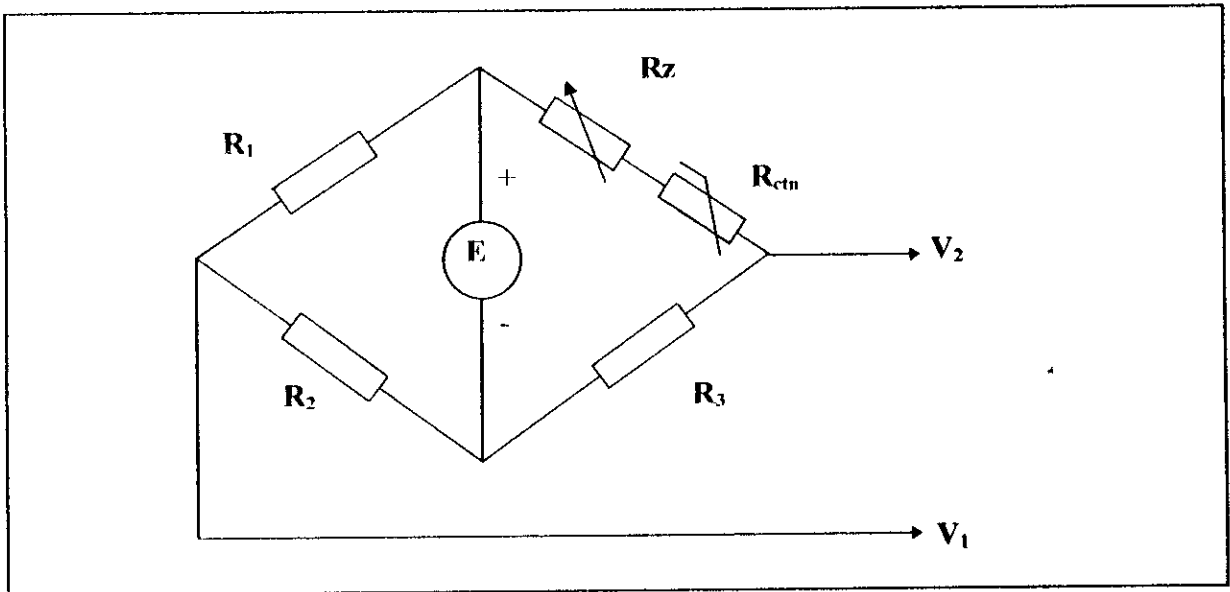


Fig 4-14 : Mesure de la température

D'après la figure ci-dessus,

$$V_1 = E \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$V_2 = E \frac{R_3}{R_3 + R_2 + R_{ctn}}$$

Si $R_1 = R_2$

$$V_2 - V_1 = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_2 + R_{ctn}} - \frac{1}{2} \right] \quad (38)$$

Les valeurs pratiques que nous avons prises sont :

$$R_1 = R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 27 \text{ k}\Omega$$

$$R_z = 22 \text{ k}\Omega \text{ (ajustable)}$$

$$R_{ctn} = 10 \text{ k}\Omega \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

6-5- Capteur d'irradiation :

La mesure de l'irradiation est basée sur l'insertion d'une photopile solaire qui, sous l'éclairement reçu, engendre une tension à ses bornes. En faisant un étalonnage, cette tension correspondra désormais à une valeur d'irradiation.

La fig 4-15 montre le principe de la mesure.

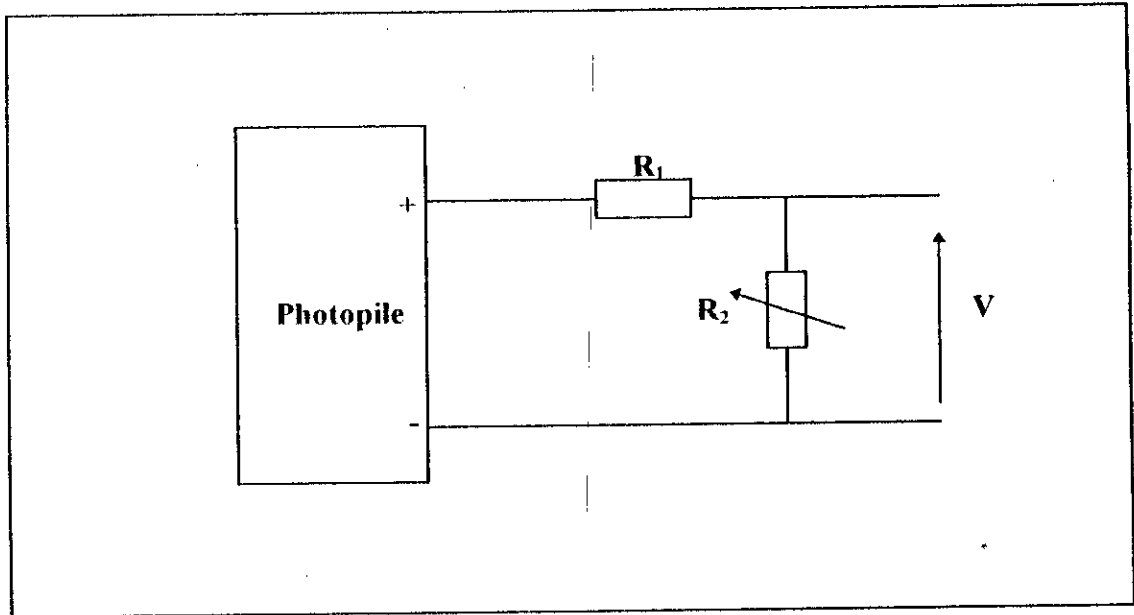


Fig 4-15 : Mesure de l'irradiation

CHAPITRE 5 : PROGRAMMATION DU CALCUL DE L'ANGLE OPTIMAL

La poursuite du mouvement apparent du soleil consiste à déterminer l'angle optimal d'orientation des panneaux solaires. Ce calcul, qui met en évidence l'utilisation des fonctions trigonométriques, est assuré par le microcontrôleur et l'oscillateur harmonique via un clavier hexadécimal. Ce dernier facilitera la communication de l'utilisateur avec le système.

1- CLAVIER HEXADECIMAL :

Comme la position du soleil est fonction de la longitude et de la date, il faut prévoir un outil qui nous permet d'indiquer ces valeurs au microcontrôleur. La solution la plus simple est d'utiliser un clavier numérique. Le microcontrôleur devra alors connaître la touche enfoncée et en déduire son code.

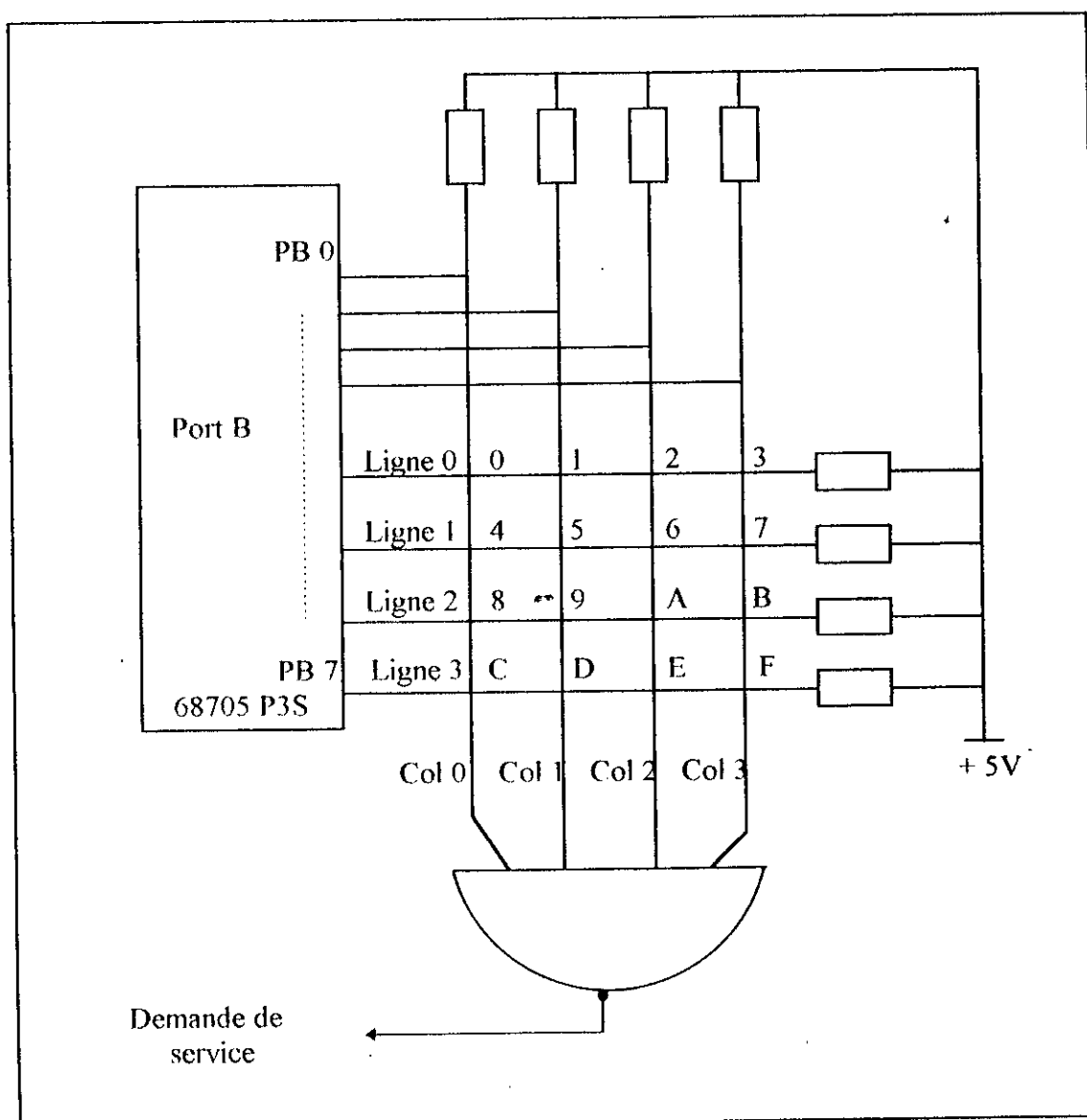


Fig 5-1 : Clavier hexadécimal et son interface

Ainsi sur la fig 5-1 l'appui sur la touche 8 entraîne un court-circuit entre la ligne 2 et la colonne 2 et uniquement entre cette ligne et cette colonne. Ceci permet la récupération du mot binaire 1110 sur les colonnes et 1011 sur les lignes.

L'envoi des niveaux zéro d'abord sur les lignes puis sur les colonnes s'effectue facilement par l'intermédiaire d'un port d'E/S.

Dans une première phase, les bits du port d'E/S affectés aux lignes sont programmés en sortie et les bits affectés aux colonnes, sont programmés en entrée. Un niveau zéro est envoyé sur chacune des quatre lignes : c'est l'état de repos du clavier ou d'attente. Tout appui sur une touche fait passer au niveau 1 le signal « demande de service » qui sert de bit d'état en mode programmé ou de demande d'interruption en mode interruptible.

La demande de service reçue par le microcontrôleur est alors traitée comme suit : le mot de quatre bits constitué par les quatre colonnes est lu et mémorisé. C'est la fin de la première phase.

Dans une deuxième phase, les bits du port d'E/S affectés aux colonnes sont programmés en sortie et les bits affectés aux lignes sont programmés en entrée. L'envoi du mot binaire 0000 sur les quatre colonnes est suivi de la lecture du mot binaire recueilli sur les quatre lignes. Ce mot lu est ensuite mémorisé.

La technologie des boutons-poussoirs est telle qu'ils présentent des rebondissements qu'il faudra éliminer par logiciel, c'est-à-dire créer une temporisation de quelques millisecondes avant de lire la donnée sur le port d'E/S.

Chaque mot de quatre bits ne code que quatre nombres, ce qui peut être ramené à un mot de deux bits par une conversion décimale-binaire. En juxtaposant ces deux mots de deux bits, nous obtenons un mot de quatre bits qui est l'adresse de position mémoire contenant le code approprié de la touche enfoncée.

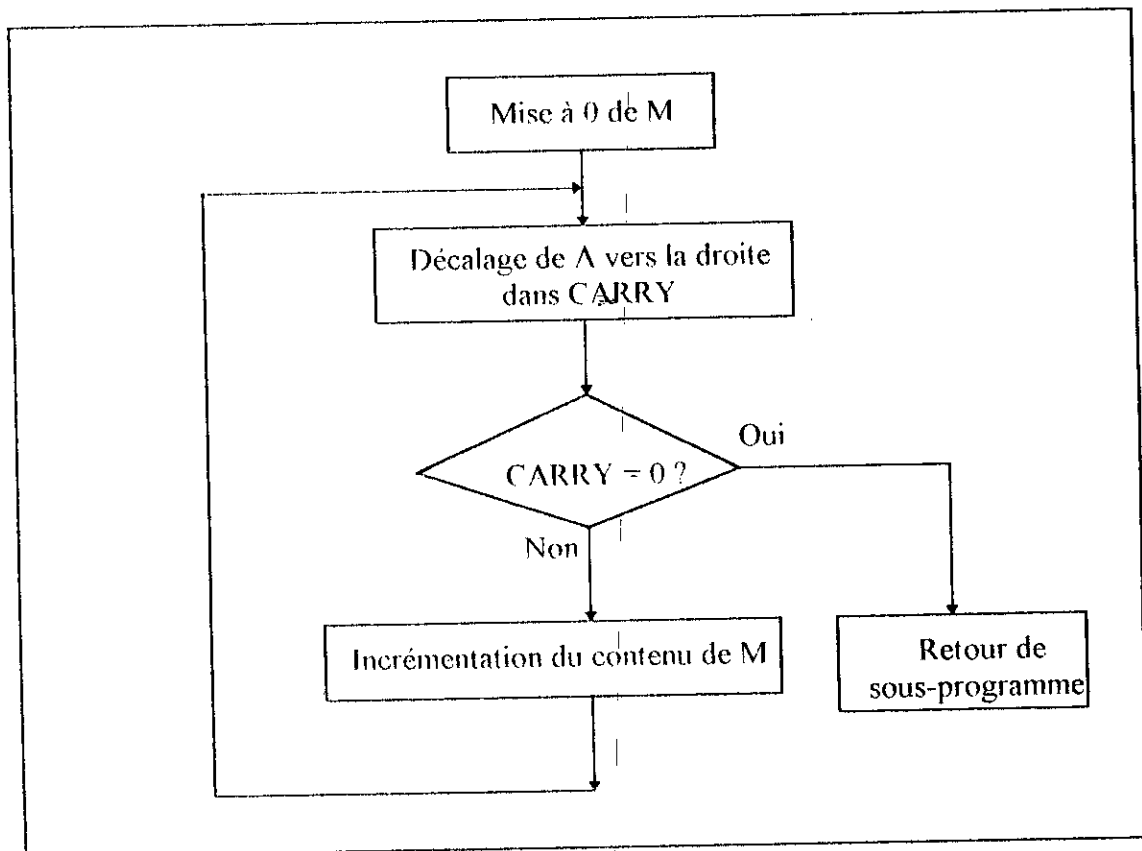


Fig 5-2 : Sous-programme de conversion décimale-binaire

Pour la conversion décimale-binaire, il suffit de repérer par des décalages successifs dans la retenue la position du 0 dans le mot de 4 bits affecté à la colonne ou à la ligne. Pour cela, nous utiliserons une position mémoire qui sera préalablement mise à zéro et incrémentée jusqu'à ce que le bit de l'accumulateur A décalé dans la retenue soit zéro (voir fig 5-2). L'organigramme complet de gestion du clavier est représenté par la fig 5-3.

2- GESTION DU SYSTEME :

2-1- Introduction :

Dans cette partie nous traçons les organigrammes nécessaires pour le fonctionnement du système. L'organigramme de la figure 5-4 donne les grandes lignes à suivre pour réaliser cette fonction.

A la mise sous tension, le microcontrôleur initialise le système et se met en attente. L'appui sur une touche du clavier crée un front montant sur la ligne PB3, et la partie du programme de gestion de clavier est exécutée.

Après cette étape, le microcontrôleur calcule la position optimale du panneau, et effectue le retour au début du programme principal.

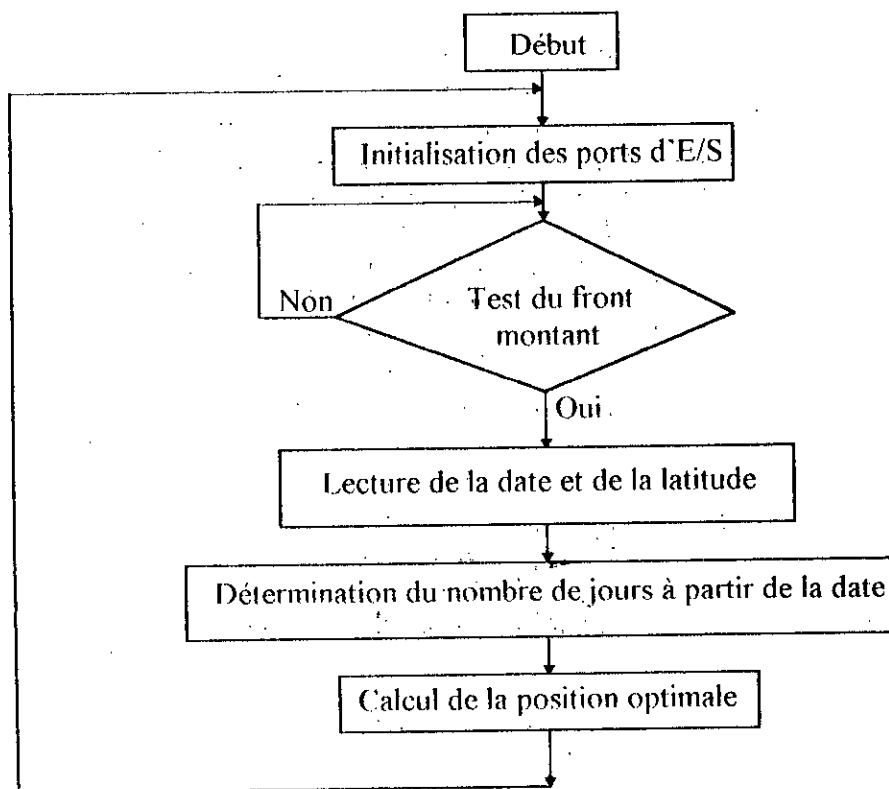


Fig 5-4 : Fonctionnement général du système

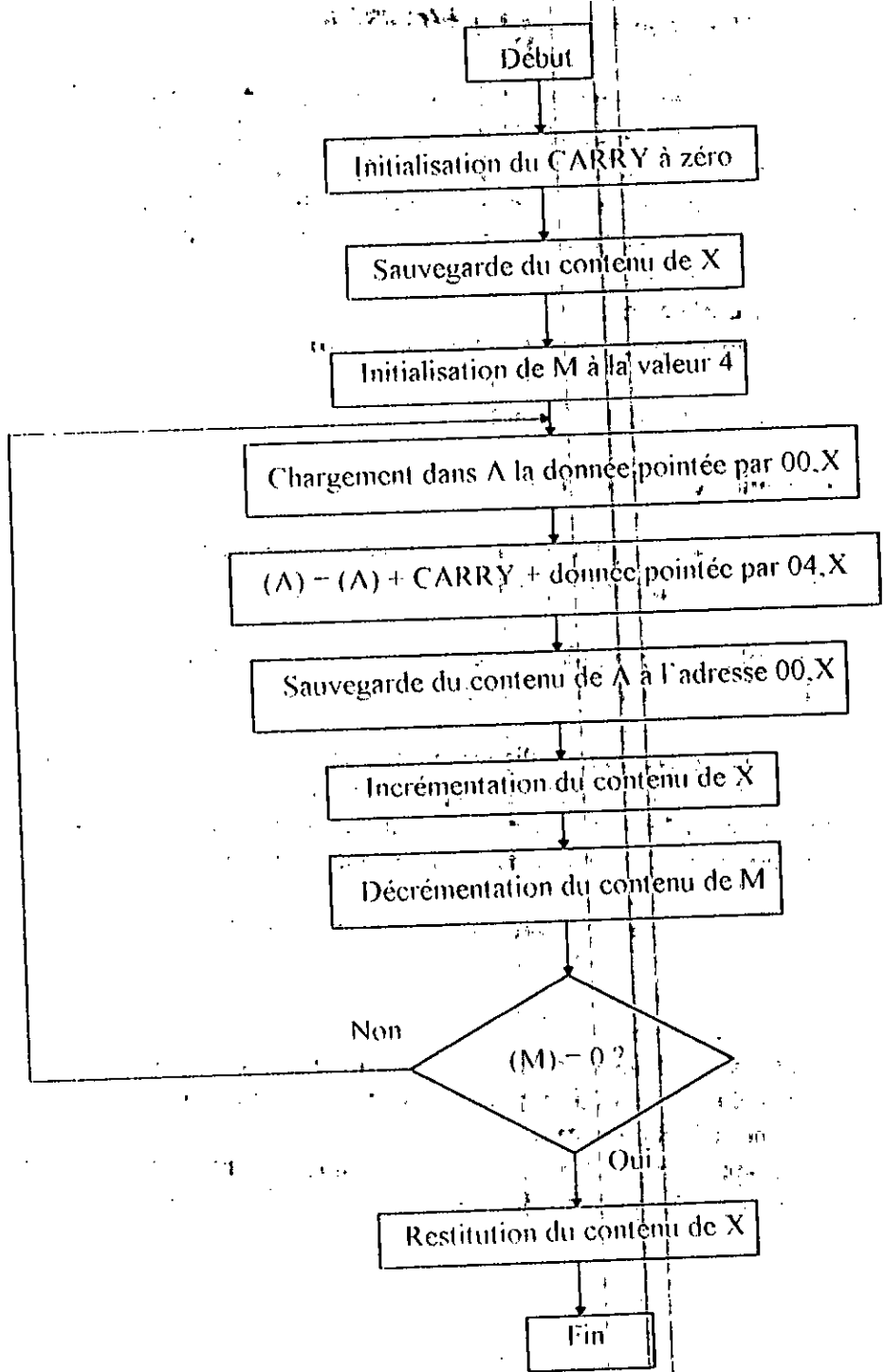
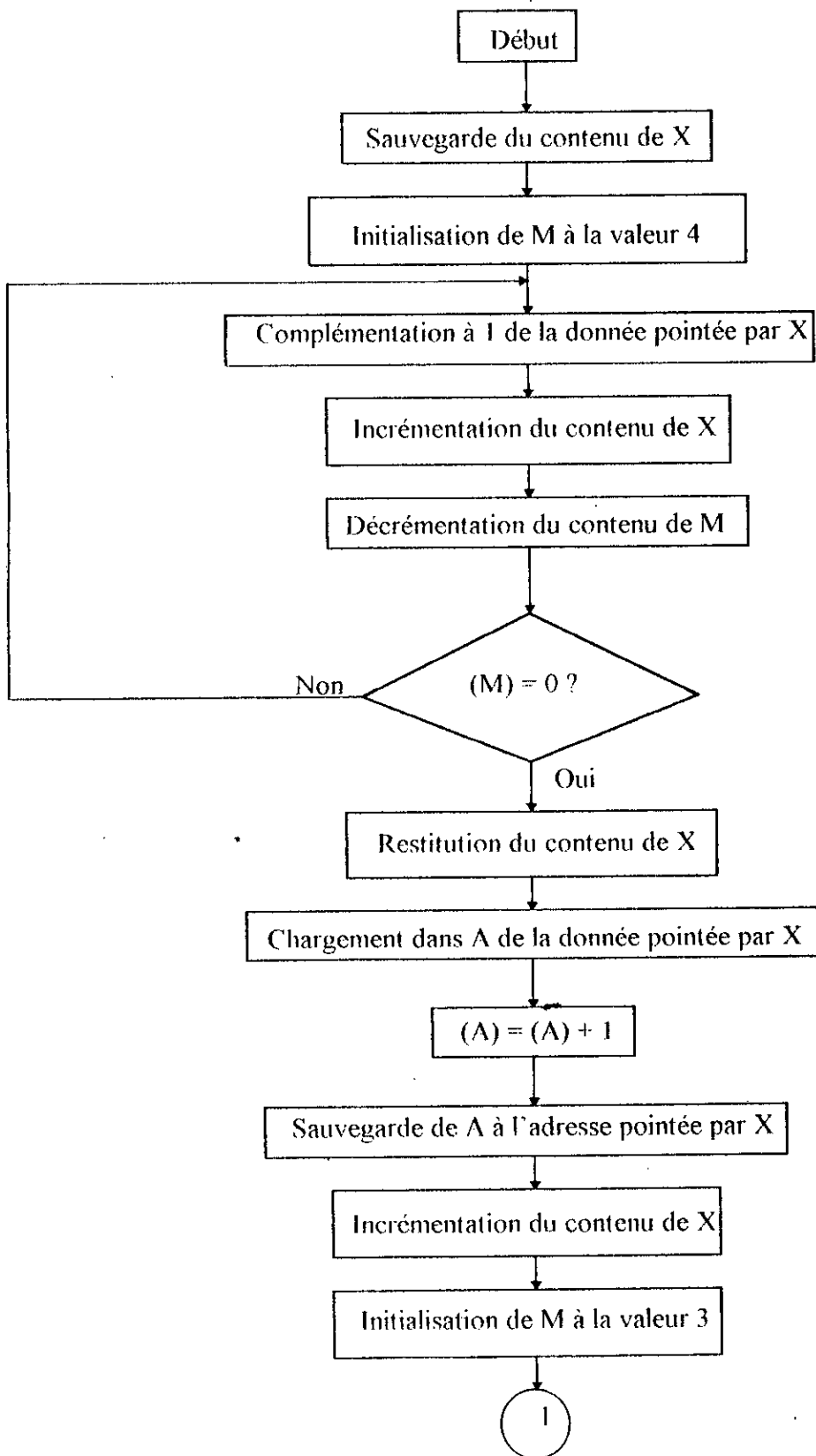


Fig 5-5 : Organigramme de l'addition binaire

2-2-3- Complément à deux :

Dans les sous-programmes, multiplication, division et soustraction, nous avons besoin de réaliser le complément à deux sur quatre octets d'un opérande. L'organigramme suivant réalise cette fonction, la transmission d'argument est réalisée comme précédemment et l'adresse de début de la donnée est transmise par le registre index.



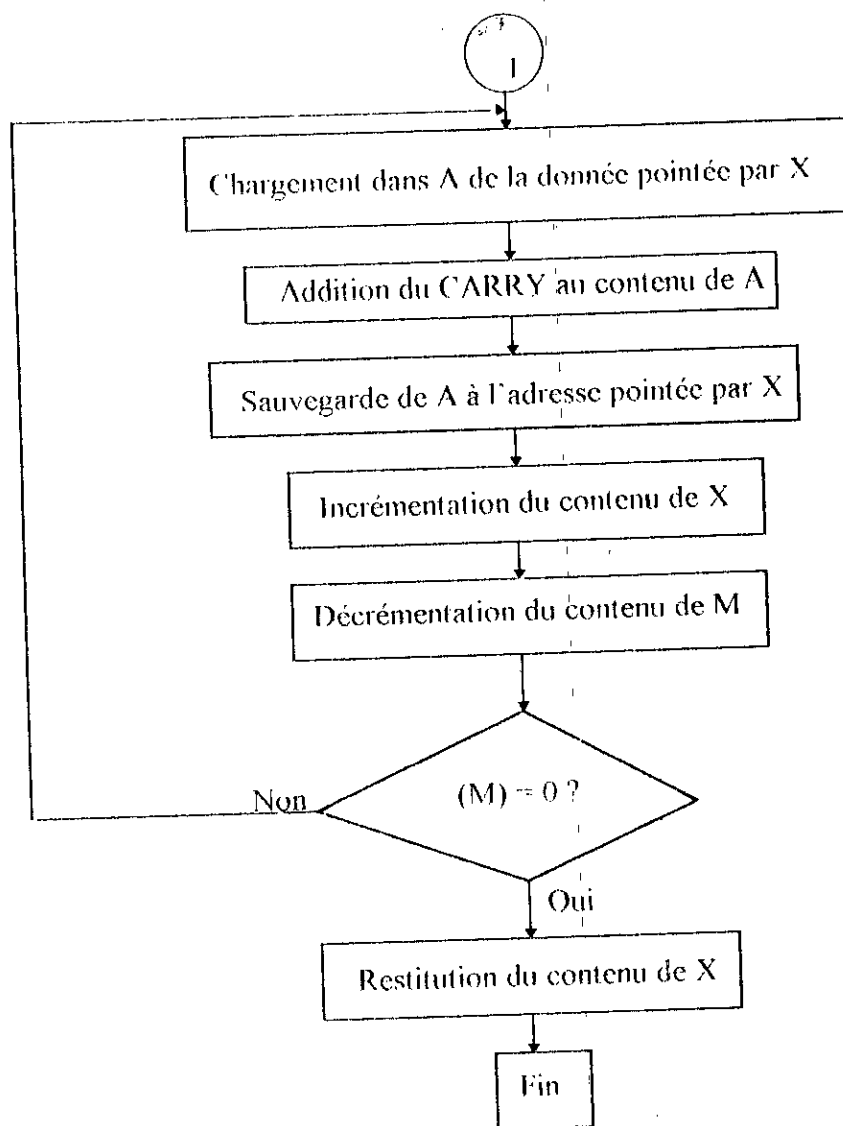


Fig 5-6 : Organigramme du complément à deux

2-2-4- Soustractions des nombres réels :

Au lieu d'écrire un programme qui réalise la soustraction de deux opérands sur quatre octets, on peut réaliser cette opération par addition et complément à deux, c'est-à-dire qu'on fait le complément à 2 du deuxième opérande puis on fait appel au sous-programme d'addition.

2-2-5- Conversion BCD-Hexadécimal :

Le calcul de la position du soleil nécessite la connaissance de la date et de la longitude. Ces données sont fournies par un opérateur par l'intermédiaire d'un clavier binaire en BCD. Comme dans notre application, les calculs à l'intérieur du microcontrôleur s'effectuent en binaire, il faudrait prévoir un sous-programme qui fait la conversion des données du BCD en Hexadécimal

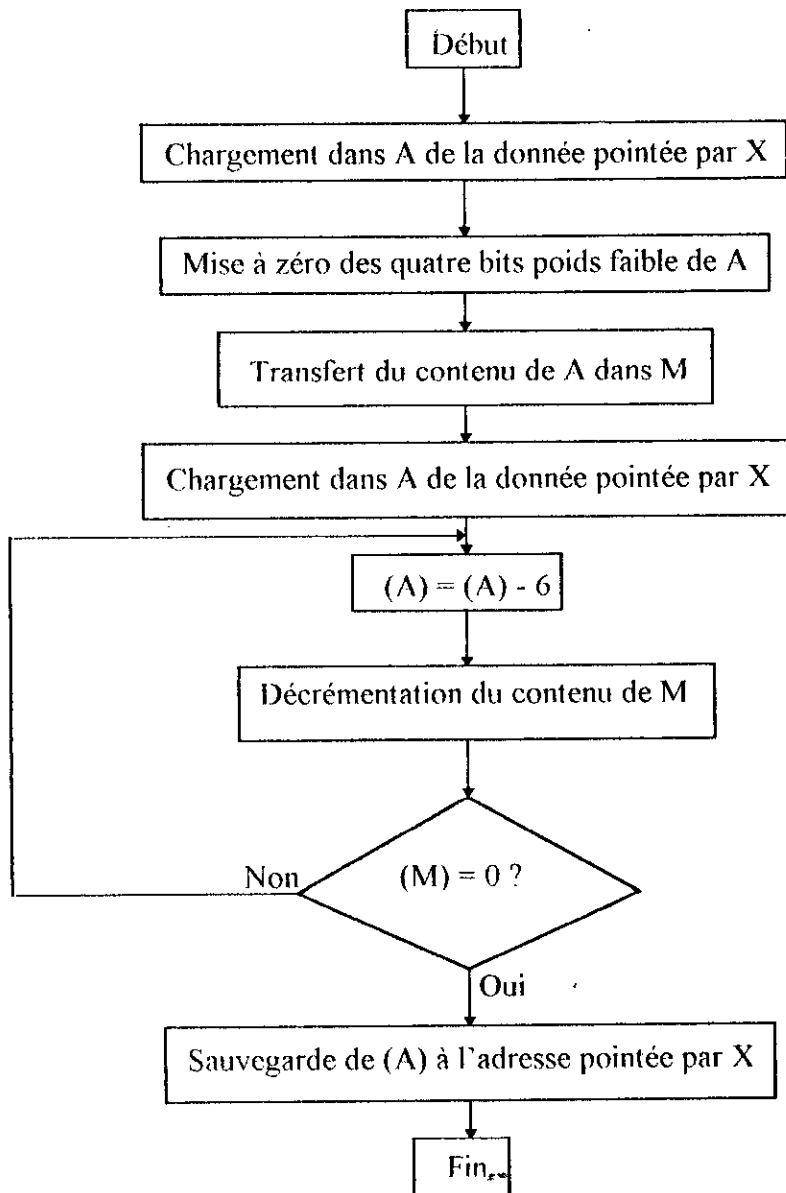


Fig 5-7 : Organigramme de conversion BCD-Hexadécimal

2-2-6- Conversion Hexadécimal-BCD :

L'angle optimal calculé par le microcontrôleur est exprimé en Hexadécimal.

Pour pouvoir l'afficher, il faudrait qu'il soit converti en BCD.

L'adresse de la donnée à convertir est transmise au sous-programme par l'intermédiaire du registre index. L'organigramme suivant illustre ce principe.

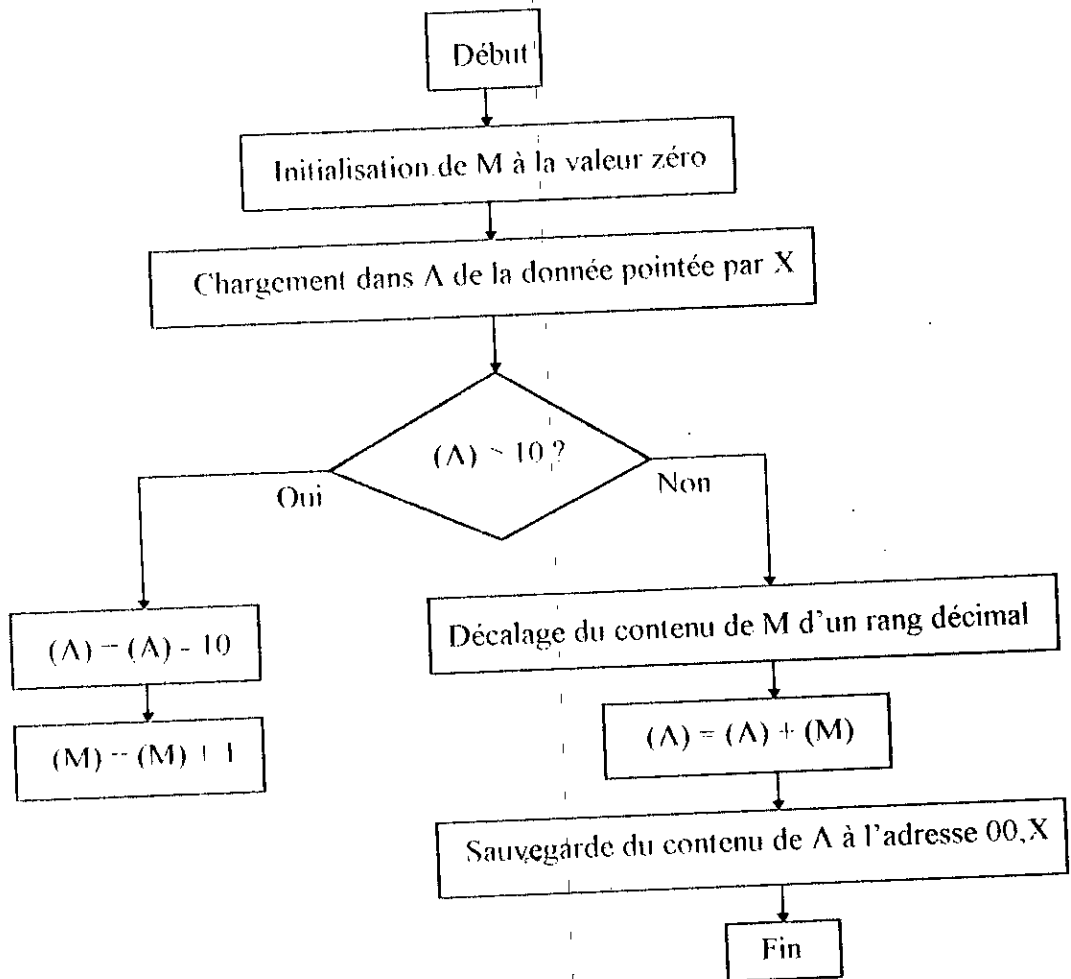


Fig 5-8 : Organigramme de conversion Hexadécimal-BCD

2-2-7- Multiplication des nombres réels :

Ce sous-programme réalise la multiplication de deux opérandes de quatre octets chacun. Les opérandes transmis au sous-programme doivent être placés dans une table comme représentée sur la fig 5-9.

L'adresse de début de cette table est transmise au sous-programme par l'intermédiaire du registre d'index. Le résultat de la multiplication est représenté sur les 8 octets de poids faible de la table de donnée.

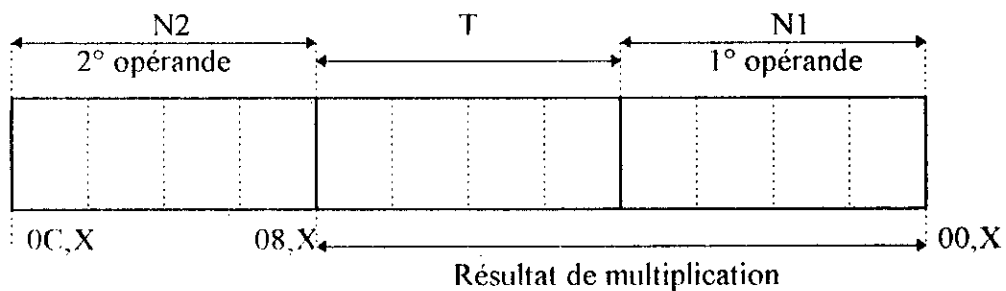


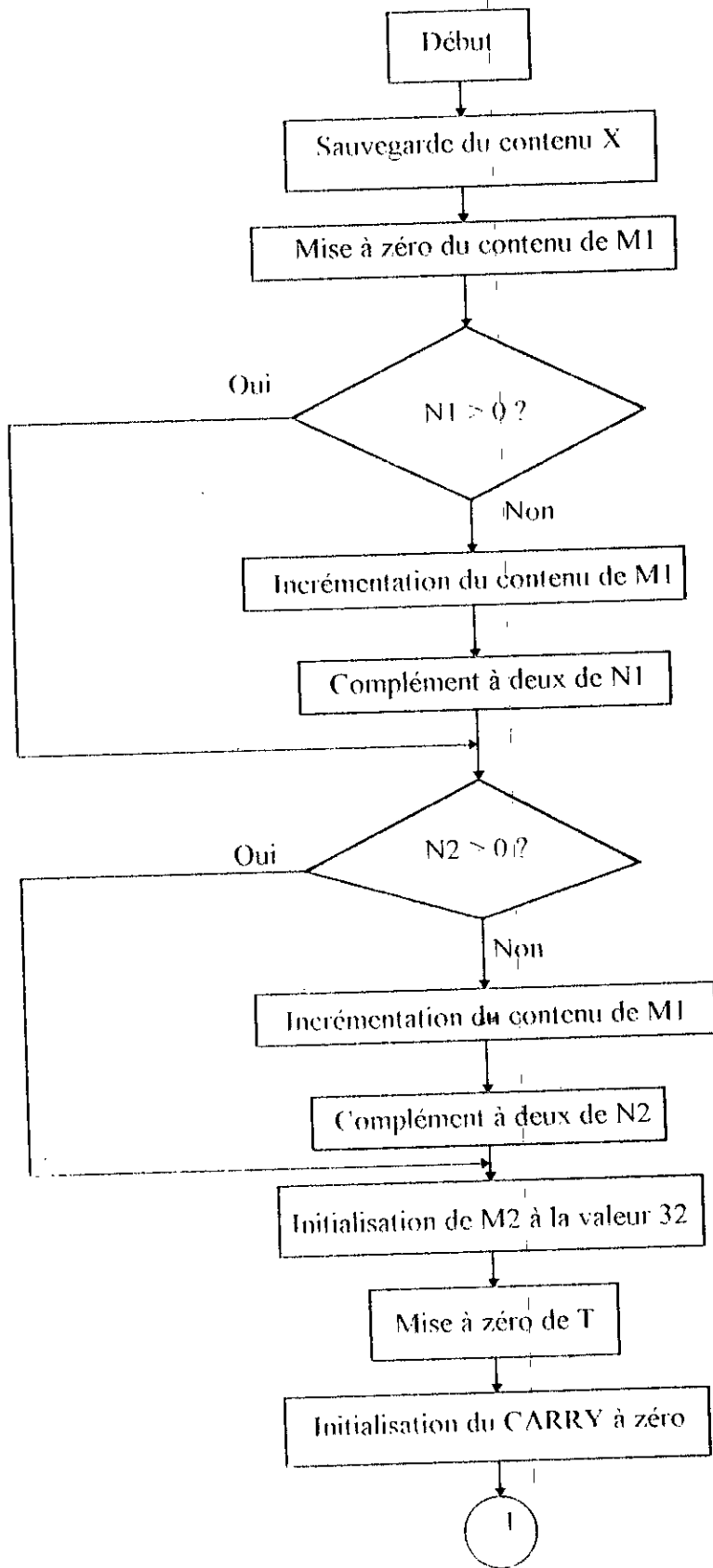
Fig 5-9 : Représentation de la table de donnée transmise au sous-programme

Le processus de multiplication est alors le suivant :

- 1- Le bit le moins significatif du premier opérande est testé :
 - S'il est à 1, le deuxième opérande est ajouté au contenu de T (T représente les quatre positions mémoires où le résultat de l'addition est sauvegardé).
 - S'il est à 0, on passe à la prochaine étape.

- 2- Le double contenu du premier opérande et T est décalé d'un rang binaire vers la droite, le LSB de T allant dans le MSB du premier opérande.

- 3- Répéter les deux phases précédentes trente deux fois.



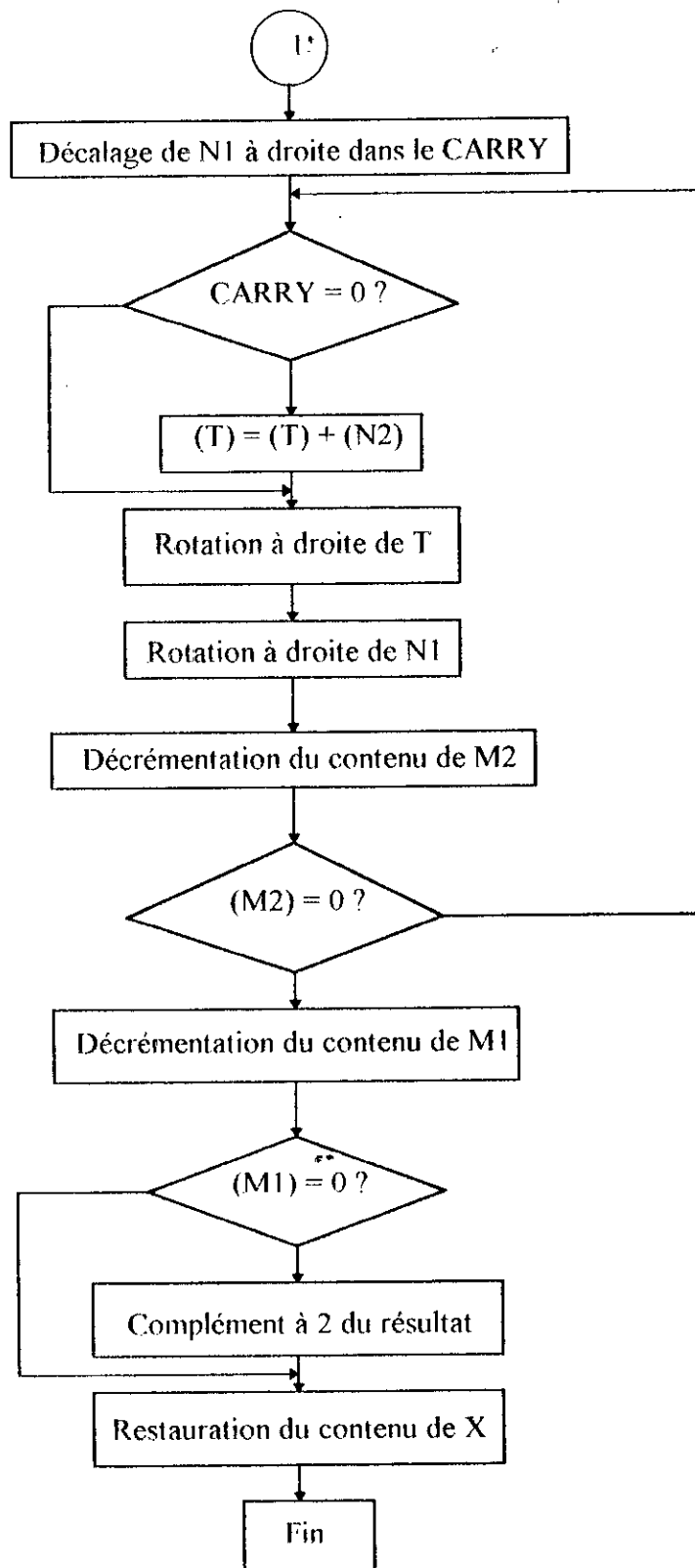
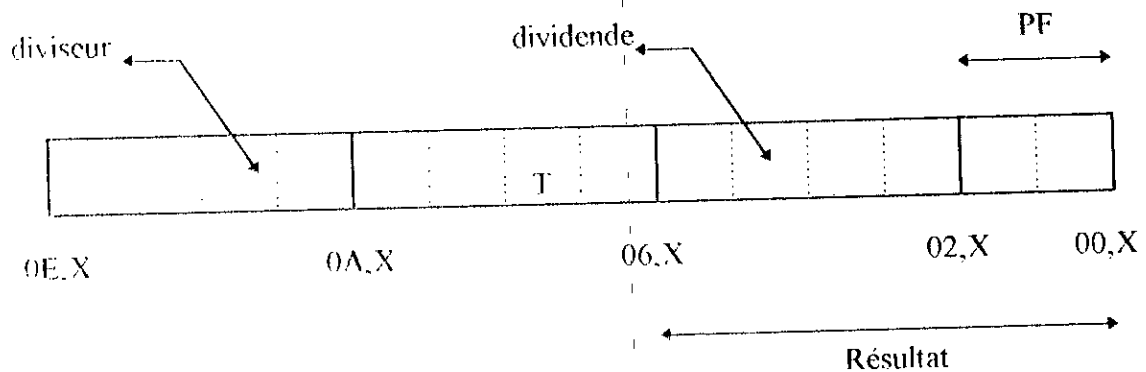


Fig 5-10 : Organigramme de la multiplication binaire

2-2-8- Division des nombres réels signés :

Ce sous-programme réalise la division binaire signée sur deux réels représentés chacun sur quatre octets. Le diviseur est installé dans les quatre octets poids forts de la table de données transmise au sous-programme (fig 5-11). Le dividende doit être installé du troisième au sixième octet à partir du début de la table comme représenté sur la fig 5-11. Le résultat de la division est représenté sur les quatre octets de poids faibles de la table. L'adresse de début de la table est transmise au sous-programme par l'intermédiaire du registre d'index.

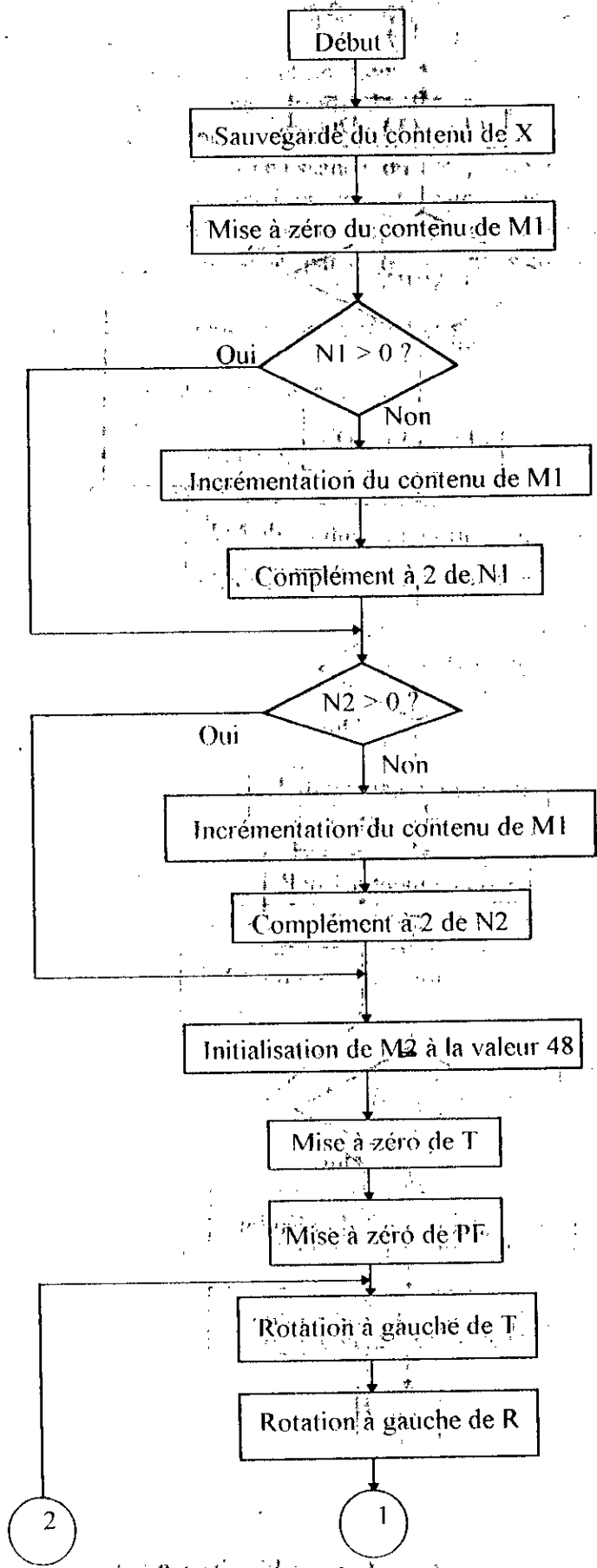


Le quotient est élaboré bit par bit dans R. Chaque bit est en réalité le complément de la retenue pour chacune des soustractions $(T) - \text{diviseur}$.
En réalité, nous élaborons bit après bit, le complément du quotient; lorsque la division sera terminée le quotient subira une complémentarité.

Le processus est le suivant :

- 1- Rotation du double contenu (R) et (T) d'un rang binaire à gauche.
- 2- Essai de soustraction : $(T) - \text{diviseur}$, si la soustraction est possible, la retenue est nulle; si ce n'est pas possible, la retenue est 1 et le contenu de T avant la soustraction est restauré dans T par l'addition $(T) + (T) - \text{diviseur}$.
- 3- Les opérations précédentes sont répétées quarante huit fois.
- 4- On fait le complément à 1 du résultat.

Le procédé est illustré par l'organigramme suivant :



$$x(n+1) = x(n) - f(x(n))/f'(x(n)) \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (39)$$

On a :

$$x = \text{Arctg } y \Rightarrow y = \text{tg } x \Rightarrow \text{tg } x - y = 0$$

On pose $f(x) = \text{tg } x - y = 0$

Avec $f'(x) = 1/\cos^2 x$

$$\text{Donc } x(n+1) = x(n) - \frac{1}{2} \sin(2x(n)) + y \cdot \cos^2(x(n)) \quad (40)$$

La procédure itérative est arrêtée quand $|x(n+1) - x(n)| < \epsilon$.
L'organigramme de la fig 5-14 illustre ce principe.

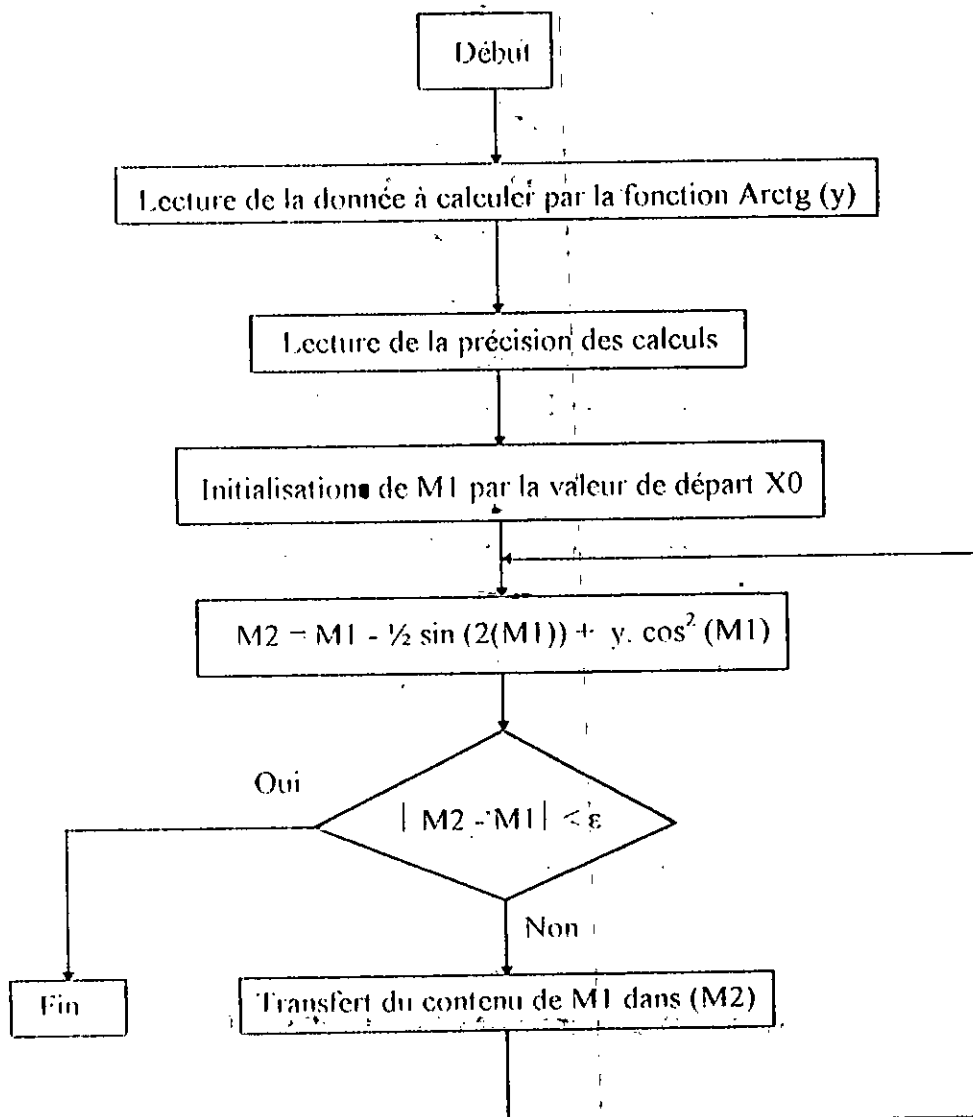


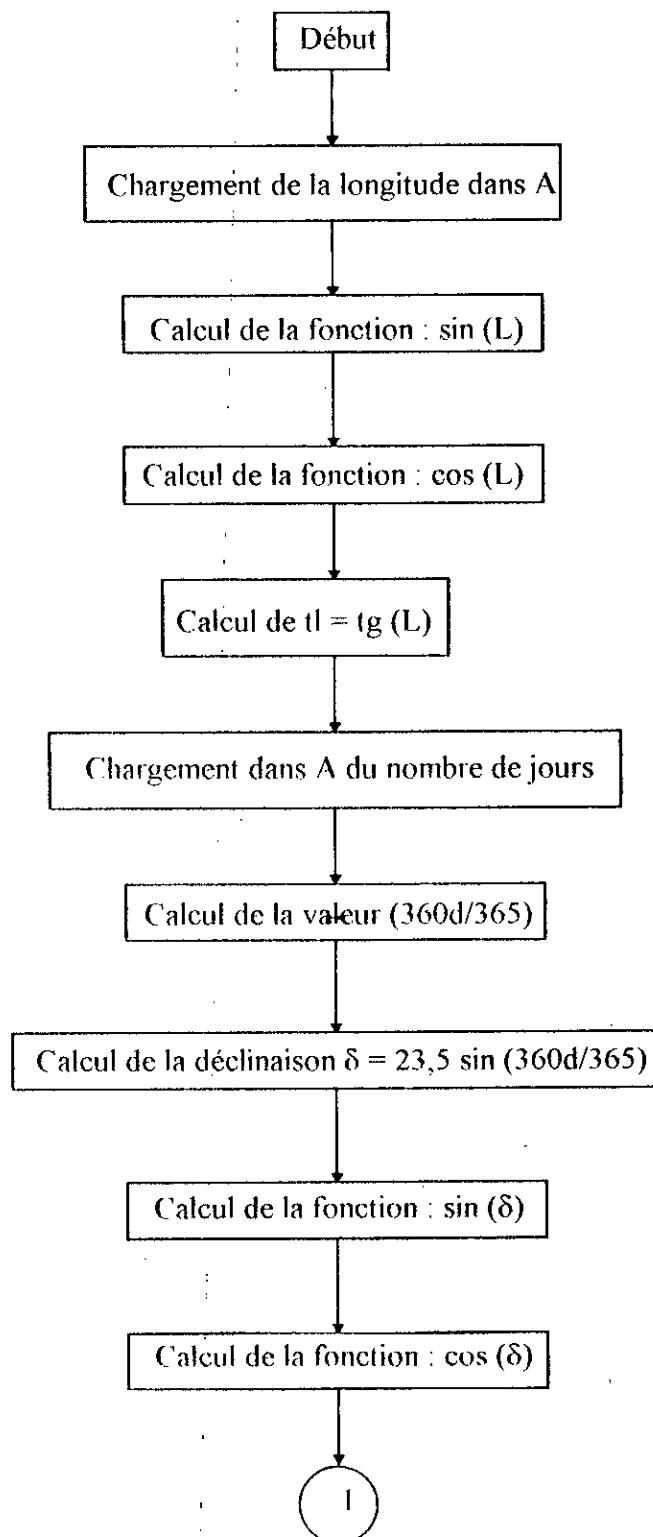
Fig 5-15 : Organigramme de la fonction Arctangente

2-2-12- Algorithme de calcul de l'angle optimal :

L'organigramme de la fig 5-15 montre la procédure de calcul de la position optimale d'un panneau solaire.

L : représente la longitude.

d : représente le nombre de jours.



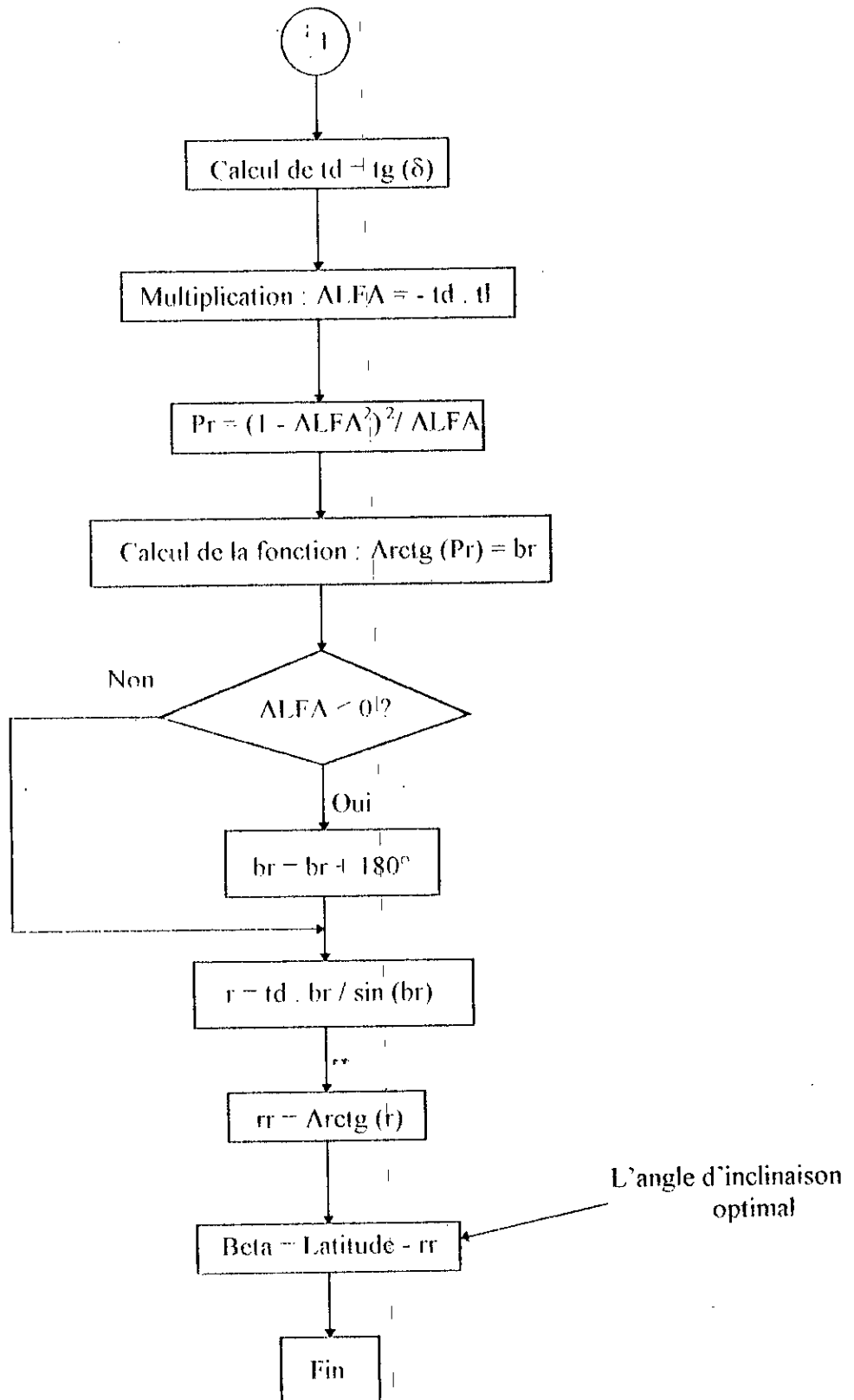


Fig 5-15 : Organigramme de calcul de la position optimale

CHAPITRE 6 PROGRAMMATION DE LA GESTION DE LA CAPACITE

1- INTRODUCTION :

Dans notre réalisation, le microcontrôleur doit pouvoir gérer la dépense de l'énergie stockée dans la batterie tout en respectant le choix de l'utilisateur.

Notre système devrait pouvoir prendre à tout moment une décision pour empêcher la dégradation de la batterie sous l'effet d'une décharge excessive, quand elle est en train d'alimenter simultanément plusieurs charges.

Cette décision consiste soit à arrêter le processus de décharge (quand il atteint la zone du crochet) ou bien le ralentir par souci que la batterie ne subisse en aucun cas une sulfatation.

Pour cela et afin de mieux gérer la capacité d'une batterie, nous avons décomposé notre système en quatre parties et qui sont :

- Entrée du choix priorité et gestion du clavier.
- Voltmètre numérique.
- Programme de contrôle automatique de la capacité.
- Programme de mesure de la capacité.

2- ENTREE DU CHOIX ET GESTION DU CLAVIER :

Cette partie du programme constitue le pont permettant la communication de l'utilisateur avec le système. En effet, elle offre à l'utilisateur la possibilité d'informer le microcontrôleur de ses exigences en faisant entrer des données par le biais du clavier géré par une boucle de scrutation utilisant quatre bits du port B (fig 6-1).

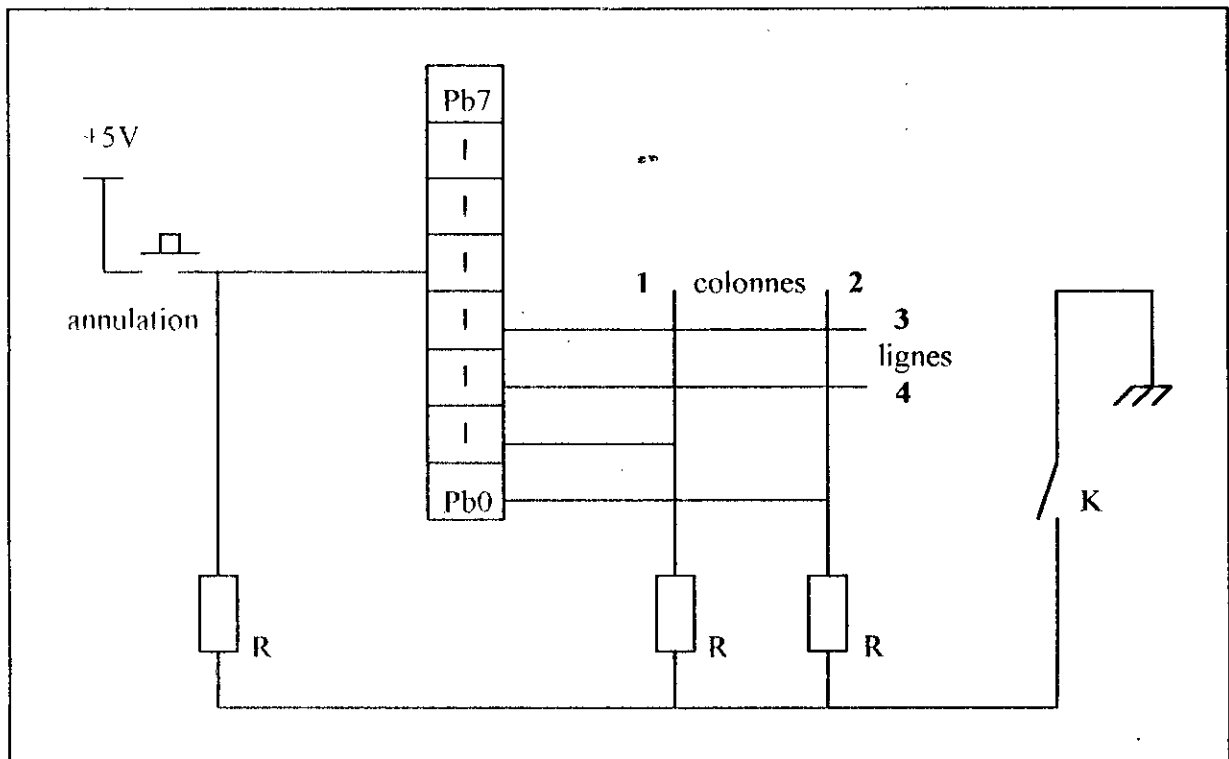


Fig 6-1 : Gestion du clavier

Après avoir effectué l'initialisation de ses ports, le microcontrôleur procède à une scrutation du clavier. Les chiffres envoyés par l'utilisateur seront enregistrés dans la mémoire et correspondent aux charges ainsi qu'à l'ordre de priorité. L'organigramme de cette partie est représenté par la fig 6-2.

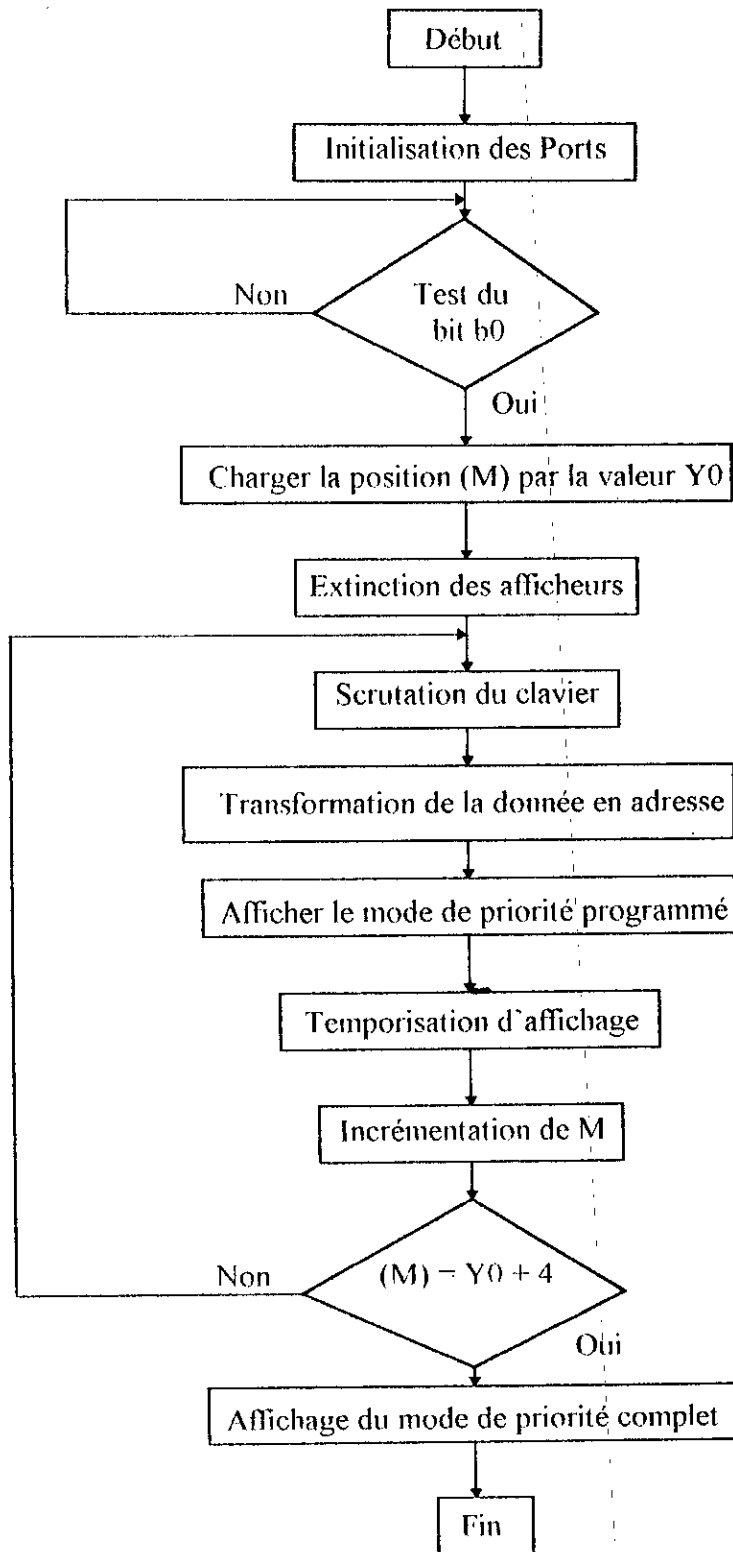


Fig 6-2 : Organigramme d'entrée du choix de priorité

3- VOLTMETRE NUMERIQUE :

Le convertisseur analogique-numérique délivre une valeur binaire parmi 256 valeurs possibles. Les valeurs à afficher sont comprises entre 10 et 15,1V avec un pas de progression de 0,2V.

Ainsi, à chaque chiffre est consacré une case mémoire concernant l'affichage de la donnée sur quatre afficheurs.

Il est à remarquer que le pas correspond à deux unités, que 5 pas correspondent à une dizaine et que 50 pas correspondent à une centaine. Le quatrième afficheur est toujours positionné à 1 puisque la plage de variation se situe entre 10 et 15,1V.

L'organigramme de la mesure et de l'affichage de la donnée acquise est représenté par la fig 6-3.

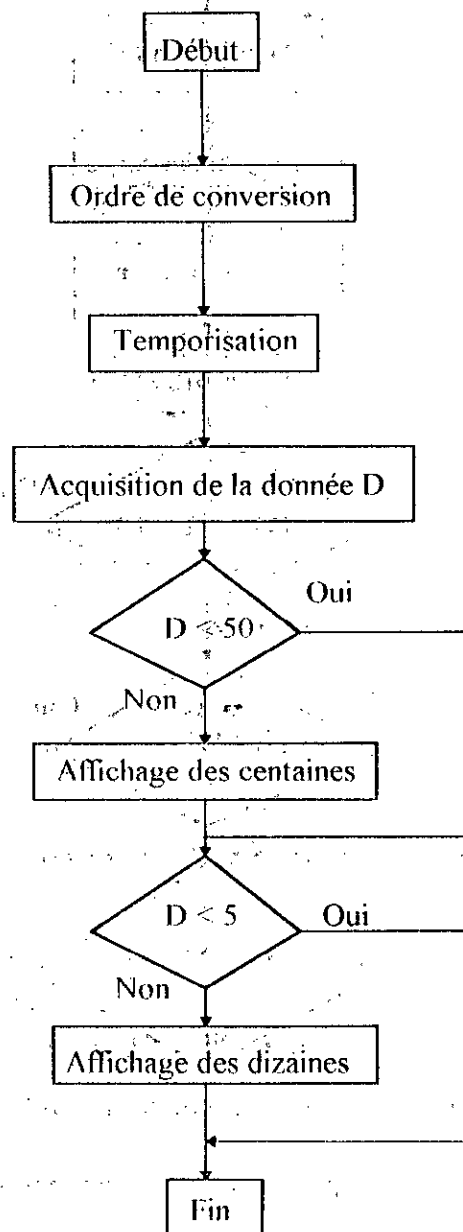


Fig 6-3 : Organigramme du voltmètre numérique

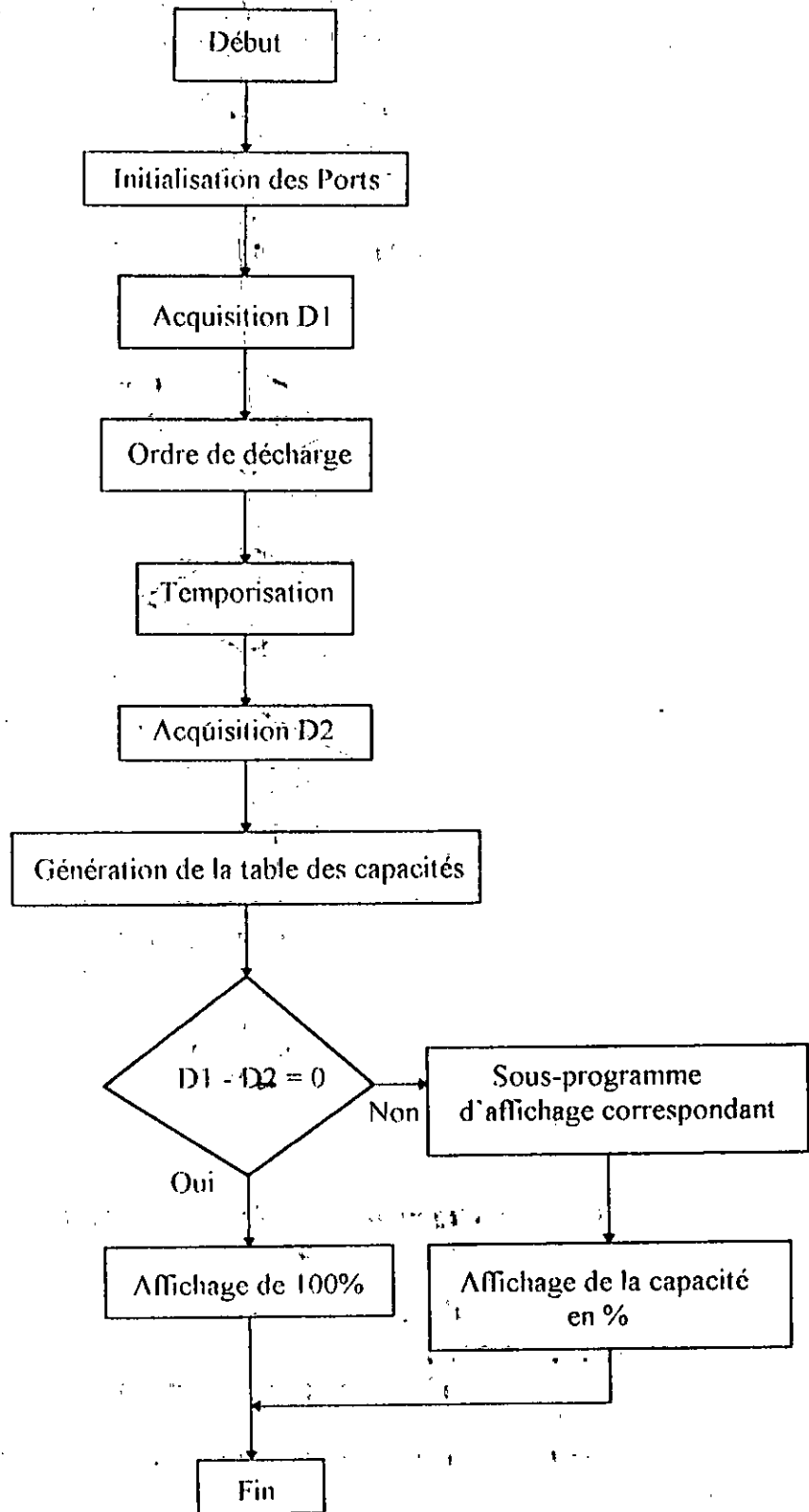


Fig 6-6 : Organigramme de mesure de la capacité

CONCLUSION

Aujourd'hui, la recherche d'une énergie renouvelable comme l'énergie photovoltaïque capable de rivaliser avec les autres énergies classiques est devenue une nécessité.

Cependant, cette recherche se heurte à une véritable difficulté technique. Il s'agira d'optimiser la génération photovoltaïque en exploitant intégralement la captation du rayonnement solaire qui est l'élément déterminant. En supplément, il sera commode d'une part de connaître à tout moment l'état de charge des batteries, et d'autre part de susciter la prise de décision quant au choix des priorités lors du test apporté.

Ainsi, le travail que nous avons effectué vient justement de remédier d'une manière relative à ces difficultés.

Le calcul de l'orientation du panneau solaire est basé sur la prédétermination des coordonnées de la position apparente du soleil à l'aide des équations cosmologiques. Mais, la résolution de ces équations nécessite l'utilisation de plusieurs opérations et fonctions trigonométriques, qui sont difficilement réalisables à l'aide d'un microcontrôleur 68705 P3S en raison de sa faible capacité mémoire.

Afin de pallier ce problème, nous avons procédé à l'utilisation d'un oscillateur harmonique pour le calcul des fonctions trigonométriques, mais la précision de cette méthode dépend de la résolution du convertisseur analogique-numérique et de la stabilité de l'oscillateur en amplitude et en fréquence.

Le dispositif que nous avons réussi à mettre au point, est également apte à gérer la capacité de tout type de batterie, dans la mesure où la conception du programme de gestion permet à l'appareil de s'adapter à plusieurs situations.

En effet, la table des capacités d'une batterie peut varier d'un modèle à l'autre, mais comme notre programme a été élaboré sous forme de modules, il suffira d'implémenter la table qui correspond à un type de batteries donné pour pouvoir assurer aisément sa gestion. Ainsi, ce caractère évolutif, confère à notre système une certaine universalité quant à la gestion des batteries.

Malgré les résultats que nous avons obtenus et que nous considérons encourageants, notre contrôleur nécessitera une amélioration par l'utilisation d'autres éléments, le constituant tels que le microcontrôleur et le convertisseur analogique-digital aussi performants que ceux utilisés.

Il s'agirait d'insérer un circuit faisant des calculs arithmétiques en virgule fixe et flottante ainsi que les fonctions trigonométriques et mathématiques réalisables sur un

micro-ordinateur, lequel système fournirait d'excellents résultats et cela, avec un faible coût.

Pour terminer, nous tenons à signaler la difficulté rencontrée quant à l'étalonnage de notre appareil. En effet, l'étalonnage est une opération onéreuse exigeant beaucoup de temps. Pourtant, cette opération est indispensable pour les besoins liés à la précision des mesures et à l'amélioration des performances du contrôleur.

Elle nous aurait également et assurément instruit sur les perspectives concernant les perfectionnements possibles du système.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **A. LAUGIER** , Les photopiles solaires.
Technique et documentation. 307p. Paris 1981
- [2] **S.A. AHMED** , Prospects for photovoltaic of solar energy. Proc.of a symposium on
alternative energy sources. Kuwait 1980
- [3] **W. PALZ** . L'électricité solaire.
édition Dunod. 356p. Paris 1981
- [4] **D.R. CLARK, S.A. KLEIN, W.A. BECKMAN** , A method for estimating
the performance of photovoltaic systems.
Solar Energy vol 38 N° 6. pp 551-556. 1987
- [5] **P.C. JAIN** , Comparison of techniques for the estimation of daily global irradiation
and a new technique for the estimation of global irradiation.
Solar and wind technology vol 1 N° 1. pp 123-134. 1984
- [6] **S.A. KLEIN** , Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces.
Solar Energy vol 19 N°4. pp 325-329. 1977
- 7] **Y. HAROEN** , Conditionnement de puissance d'un système autonome géré par
microprocesseur. Recherche du point de puissance maximum d'un
générateur photovoltaïque.
Thèse de Doctorat. Institut national polytechnique de Toulouse 1983
- [8] **L. PERRIER** , Energie solaire
éditions techniques et scientifiques françaises. 1979
- [9] **M. HADDADI** . Conception et optimisation de générateurs à conversion
photovoltaïque.
Thèse de Doctorat d'Etat. E.N.P. 1994
- [10] **P. BATLAS** , Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays
Solar Energy 1986
- [11] **M. ZEAITER, C. OULDAOUDIA**, Mise au point d'un test pour les accumulateurs
au plomb. P.F.E. E.N.P. 1986
- [12] **M. BARAK** , Electrochemical power sources.
Peter Peregrinus Ltd 1979
- [13] **A. CHAUREY, S. DEAMBI**, Battery storage for P.V power systems : an overview.
Renewable Energy vol 2 N°3. pp 227-235. 1992

- [14] **G. GORY** , Connaissance des accumulateurs au plomb et autres générateurs électrochimiques.
Coll. Auto-volt 336p. Paris 1979
- [15] **T. MARKVART** , Solar electricity
John wiley and sons Ltd Chichester 1994
- [16] **M. HADDADI** , Les photopiles au silicium amorphe.
Journées d'étude sur les matériaux. E.N.P 1991
- [17] **J.P.BERRY** , Automatisation d'un héliostat photovoltaïque.
CNRS 1978
- [18] **S. CHIKHI** , Etude et réalisation d'un héliostat à monture altazimuthale.
P.F.E E.N.P 1989
- [19] **K.K. GOPINATHAN** , Diurnal variation of the hourly hemispherical insolation.
Solar and wind technology vol 5 N° 6 pp 661-665 1988
- [20] **P.R. BENSON et al** , Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global radiation from bright sunshine data.
Solar Energy vol 32 pp 523-527 1984
- [21] **R. WALRAVEN** , Calculating the position of the sun.
Solar Energy vol 20 N°5 1978
- [22] **QUILLET** , Encyclopédie des sciences industrielles.
Librairie Aristide Quillet pp 282-291 Paris 1983
- [23] **F. KIRAT** , Réalisation d'une carte d'acquisition à base du microcontrôleur 68705 P3S.
P.F.E E.N.P 1994
- [24] **A. PELAT** , Pratique de l'amplificateur opérationnel.
édition Masson 127p Paris 1983
- [25] **M. MESSUD** , La pratique du microprocesseur.
édition Cepadues Toulouse 1991
- [26] **J.M. BERNARD** , Pratique des circuits logiques.
édition Eyrolles 453p Paris 1985
- [27] **M. BOUMAHMAT** , Méthodes numériques appliquées.
édition OPU Alger 1993
- [28] **AUMIAUX** , L'emploi des microprocesseurs.
édition Masson 310p Paris 1982

- [29] **R. BEAUVILLAIN** , Mesures électriques et électroniques.
Hachette technique 223p Paris 1979
- [30] **J.C. CHAUVEAU, G. CHEVALIER** , Mémotech électronique
édition Educalivre 547p Paris 1989
- [31] **DATA ACQUISITION** - Data book
Integrated circuits
Analog Devices Norwood 1982
- [32] **F. DEVIGNES** , Conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique.
Acta Electronica vol 5 N°3 pp 315-322 1961
- [33] **J.R. FRISCH** , Energie 2000 - 2020, Equilibre mondial et tensions régionales.
Technip 376p Paris 1983
- [34] **GILMORE** , Appareils de mesure
Mc Graw Hill 168p Montréal 1983
- [35] **Z. JIBRIL** , Estimation of solar radiation over Jordan-predicted tables.
Renewable Energy vol 1 N°2 pp277-291 1991
- [36] **NATIONAL SEMICONDUCTOR** , Data acquisition linear devices Data book.
N.S. Corporation California 1989
- [37] **TUCK C.D.S** , Modern battery technology
Ellis Horwood edition Chichester 1990
- [38] **G.W. VINAL** , Les piles électriques.
édition Dunod 344p Paris 1953

```

LDA      $ 00
STA      08, X
LDA      #$ 02
STA      05, X
CLR      06, X
CLR      07, X
CLR      00, X
CLR      01, X
CLR      02, X
CLR      03, X
TST      08, X
BEQ      ST4
BCL5 JSR      Add      { Appel du sous programme d'addition }
DEC      08, X
BNE      BCL5
ST4  LDA      #$ FF
STA      06, X
STA      07, X
CLR      04, X
CLR      05, X
JSR      Add      { Appel du sous programme d'addition }
TST      $ 30
BEQ      ST5
JSR      Com à 2    { Appel du sous programme de complément à 2 }
ST5  RTS

```

8. SOUS PROGRAMME DE GENERATION DE LA FONCTION COSINUS:

```

TST      03, X
BPL      ST1
JSR      Com à 2    { Appel du sous programme de complément à 2 }
ST1  NOP      Test du front montant
BRSET   3,02, ST1
ST2  NOP
BRCLR   3,02, ST2

LDA      #$ 2D      Temporisation de durée 90 ms
STA      $ 3D
BCL3  LDA      #$ E1
STA      $ 3C
BCL2  DEC      $ 3C
BNE      BCL2
DEC      $ 3D
BNE      BCL3

```

	TST	02, X	
	BEQ	ST3	
BCL5	LDA	#\$ E1	
	STA	\$ 3F	
BCL4	DEC	\$ 3F	
	BNE	BCL4	
	DEC	02, X	
	BNE	BCL5	
ST3	LDA	#\$ 01	Ordre de conversion
	STA	\$ 03	
	CLR	\$ 03	
BCL6	LDA	#\$ 80	Temporisation de durée 100 µs
	DECA		
	BNE	BCL6	
	LDA	\$ 00	
	STA	08, X	
	LDA	#\$ 02	
	STA	05, X	
	CLR	04, X	
	CLR	05, X	
	CLR	06, X	
	CLR	07, X	
	CLR	00, X	
	CLR	01, X	
	CLR	02, X	
	CLR	03, X	
	TST	08, X	
	DEQ	ST4	
BCL7	JSR	Add	{ Appel du sous programme d'addition}
	DEC	08, X	
	BNE	BCL7	
	LDA	#\$ FF	
	STA	06, X	
	STA	07, X	
	CLR	04, X	
	CLR	05, X	
	JSR	Add	{ Appel du sous programme d'addition}
	RTS		

9. SOUS PROGRAMME DE GENERATION DE LA FONCTION ARCTG:

STX	\$ 4D
LDA	02, X
STA	\$ 50

	LDA	#\$ 01	
	STA	\$ 4F	
DEBUT	LDA	\$ 4F	
	STA	\$ 32	
	CLR	\$ 31	
	LDX	#\$ 30	
	JSR	Cos	{ Appel du sous programme de la fonction cosinus }
	LDA	\$ 32	
	STA	\$ 3A	
	LDA	\$ 31	
	STA	\$ 39	
	CLR	\$ 38	
	CLR	\$ 3B	
	JSR	Mul	{ Appel du sous programme de multiplication }
	LDA	\$ 50	
	STA	\$ 3C	
	CLR	\$ 3A	
	CLR	\$ 3B	
	CLR	\$ 3D	
	INX		
	INX		
	JSR	Mul	{ Appel du sous programme de multiplication }
	LDA	\$ 4F	
	STA	\$ 32	
	CLR	\$ 30	
	CLR	\$ 31	
	CLR	\$ 33	
	CLC		
	ROL	\$ 30	
	ROL	\$ 31	
	ROL	\$ 33	
	LDX	#\$ 30	
	JSR	Sin	{ Appel du sous programme de la fonction sinus }
	CLC		
	ROR	\$ 33	
	ROR	\$ 32	
	ROR	\$ 31	
	ROR	\$ 30	
	JSR	Com à 2	{ Appel du sous programme de complément à 2 }
	JSR	Add	{ Appel du sous programme d'addition }
	LDA	\$ 4F	
	STA	\$ 36	
	CLR	\$ 34	
	CLR	\$ 35	
	CLR	\$ 37	
	JSR	Add	{ Appel du sous programme d'addition }
	LDA	\$ 32	

	STA	\$ 4F	
	LDX	#\$ 34	
	JSR	Com à 2	{ Appel du sous programme de complément à 2 }
	LDX	#\$ 30	
	JSR	Add	{ Appel du sous programme d'addition }
	BPL	ST1	
	JSR	Com à 2	{ Appel du sous programme de complément à 2 }
ST1	LDA	\$ 32	
	CMPA	#\$ 01	
	BCC	DEBUT	
	LDX	\$ 4D	
	LDA	\$ 4F	
	STA	02, X	
	RTS		

LE PROGRAMME PRINCIPAL :

{ La partie gestion du clavier }

	LDX	#\$ 59	
	CLR	\$ 05	
Début	LDA	#\$ F0	
	STA	\$ 05	
ST1	NOP		Test du front montant du signal demande de service
	BRSET3	\$ 02 ST1	
ST2	NOP		
	BRCLR3	\$ 02 ST2	
	CLR	00, X	..
	LDA	#\$ 0A	Temporisation pour élimination de rebondissement
	STA	\$ 10	
BCL2	LDA	#\$ 64	
	STA	\$ 11	
BCL1	DEC	\$ 11	
	BNE	BCL1	
	DEC	\$ 10	
	BNE	BCL2	
BCL3	LDA	\$ 01	
	LSR		
	BCC	ST3	
	INX	00, X	
	BRA	BCL4	
	LDA	#\$ 0F	
	STA	\$ 05	

	CLR	\$01
	LSRA	
	LSRA	
	LSRA	
	LSRA	
BCL4	CLR	01, X
	LSRA	
	BCC	ST4
	INC	01; X
	BRA	BCL4
	LDA	01, X
	LSLA	
	LSLA	
	ADD	00, X
	ADD	#\$ 80
	STA	\$ 2F
	STX	\$ 2C
	LDX	\$ 2F
	LDA	00, X
	LDX	\$ 2C
	STA	00, X
	LDA	\$ 40
	ADD	00, X
	STA	\$ 00
	ASLA	
	ASLA	
	ASLA	
	ASLA	
	STA	\$ 40
	LDA	#\$ FF
BCL6	STA	\$ 10
	LDA	#\$ 64
	STA	\$ 11
BCL7	DEC	\$ 11
	BNE	BCL7
	DEC	\$ 10
	BNE	BCL6
	INX	
	CMX	#\$ 61
	BNE	DEBUT
BCL8	LDX	#\$ 59
	LDA	00, X
	LSLA	
	LSLA	
	LSLA	

Temporisation

```

LSLA
ADD    01, X
STA    00, X
JSR    conv BCD-HEX    { Appel du sous programme de conversion
                        BCD- Hexadecimale }

INX
INX
CMX    #$ 61
BNE    BCL8

```

{ La partie calcul de la position optimale }

```

CLR    $ 4B
LDX    #$ 80
DEC    $ 5B
BEQ    ST1
CLRA
BCL1  ADD    00, X
      BCC    ST2
      INC    $ 4B
ST2   INX
      DEC    $ 5B
      BNE    BCL1
ST1   ADD    $ 59
      BCC    ST3
      INC    $ 4B
ST3   CLR    $ 10
      CLR    $ 11
      STA    $ 12
      LDA    $ 4B
      STA    $ 13
      LDA    #$ 7E
      STA    $ 18
      LDA    #$ FC
      STA    $ 19
      CLR    $ 1A
      CLR    $ 1B
      LDX    #$ 10
      JSR    Mul    { Appel du sous programme de multiplication }
      INX
      INX
      JSR    Sin    { Appel du sous programme de la fonction sinus }
      LDA    #$ 17
      STA    $ 1C
      LDA    #$ 80
      STA    $ 1B
      CLR    $ 1A

```

CLR	\$ 1D	
JSR	Mul	{ Appel du sous programme de multiplication }
LDA	\$ 14	
STA	\$ 1C	
LDA	\$ 15	
STA	\$ 1D	
LDA	\$ 16	
STA	\$ 1E	
LDA	\$ 17	
STA	\$ 1F	
INX		
INX		
JSR	Sin	{ Appel du sous programme de la fonction sinus }
LDX	#\$ 1A	
JSR	Cos	{ Appel du sous programme de la fonction cosinus }
LDX	#\$ 12	
JSR	Div	{ Appel du sous programme de division }
LDA	\$ 12	
STA	\$ 38	
LDA	\$ 13	
STA	\$ 39	
LDA	\$ 14	
STA	\$ 3A	
LDA	\$ 15	
STA	\$ 3B	
LDA	\$ 5F	
STA	\$ 1E	
STA	\$ 26	
LDX	#\$ 1C	
JSR	Sin	{ Appel du sous programme de la fonction sinus }
LDX	#\$ 24	
JSR	Cos	{ Appel du sous programme de la fonction cosinus }
LDX	#\$ 1A	
JSR	Div	{ Appel du sous programme de division }
JSR	Com à 2	{ Appel du sous programme de complément à 2 }
LDX	#\$ 12	
JSR	Mul	{ Appel du sous programme de multiplication }
LDA	\$ 14	
STA	\$ 3C	
STA	\$ 1C	
LDA	\$ 15	
STA	\$ 3D	
STA	\$ 1D	
LDA	\$ 16	
STA	\$ 3E	
STA	\$ 1E	
LDA	\$ 17	

STA	\$ 3F	
STA	\$ 1F	
LDX	#\$ 14	
JSR	Com à 2	{ Appel du sous programme de complément à 2 }
JSR	Mul	{ Appel du sous programme de multiplication }
CLR	\$ 1A	
CLR	\$ 1B	
CLR	\$ 1D	
LDA	#\$ 01	
STA	\$ 1C	
INX		
INX		
JSR	Add	{ Appel du sous programme d'addition }
LDA	\$ 16	
STA	\$ 1E	
LDA	\$ 17	
LDA	\$ 18	
STA	\$ 20	
LDA	\$ 19	
STA	\$ 21	
JSR	Mul	{ Appel du sous programme de multiplication }
LDA	\$ 3C	
STA	\$ 20	
LDA	\$ 3D	
STA	\$ 21	
LDA	\$ 3E	
STA	\$ 22	
LDA	\$ 3F	
STA	\$ 23	
JSR	Div	{ Appel du sous programme de division }
JSR	Arctg	{ Appel du sous programme de l'arctg }
LDA	\$ 16	
STA	\$ 24	
LDA	\$ 17	
STA	\$ 25	
LDA	\$ 18	
STA	\$ 26	
LDA	\$ 19	
STA	\$ 27	
TST	\$ 3F	
BPL	ST1	
CLR	\$ 1A	
CLR	\$ 1B	
LDA	#\$ B4	{ Charger A par la valeur 180 " }
STA	\$ 1C	
CLR	\$ 1D	
JSR	Add	{ appel du sous programme d'addition }

ST1	LDA	\$ 38	
	STA	\$ 1E	
	LDA	\$ 39	
	STA	\$ 1F	
	LDA	\$ 3A	
	STA	\$ 20	
	LDA	\$ 3B	
	STA	\$ 21	
	JSR	Mul	{ Appel du sous programme de multiplication }
	LDA	\$ 24	
	STA	\$ 20	
	LDA	\$ 25	
	STA	\$ 21	
	LDA	\$ 26	
	STA	\$ 22	
	LDA	\$ 27	
	STA	\$ 23	
	JSR	Div	{ Appel du sous programme de division }
	JSR	Arctg	{ Appel du sous programme de l'arctg }
	JSR	Com à 2	{ Appel du sous programme de complément à 2 }
	LDA	\$ 5F	
	STA	\$ 24	
	CLR	\$ 12	
	CLR	\$ 13	
	CLR	\$ 14	
	JSR	Add	{ Appel du sous programme d'addition, le résultat est l' angle optimale }.
	LDA	#\$ 02	Affichage de l'angle optimale
	STA	\$ 02	
	LDA	\$ 14	
	STA	\$ 01	

{ La partie commande du moteur }

{ A. La mise en forme de la donnée }

	LDA	#\$ 01	chargement du rapport de démultiplication
	STA	\$ 42	
	LDA	\$ 14	
	CLR	\$ 46	
	BRCLR	7.\$ 46	BCL1
	COM	\$ 46	
BCL1	BCLR	7.\$ 46	
	CLC		
	LDA	#\$ 08	

	STA	\$ 40
	LDX	\$ 42
	CLRA	
	LSRX	
BCL	BCC	BL
	ADDA	41
BL	RORA	
	RORX	
	DEC	\$ 40
	BNE	BCL

	STA	\$ 45
	STX	\$ 44

Stockage de la donnée
résultante sur deux octets.

{B. L'excitation du moteur}

	LDA	#\$ 01
	STA	\$ 00
	LDA	#\$ FF

Mise en sortie du port A

	STA	\$ 04
	STA	\$ 00

	LDA	#\$ FE
	STA	\$ 40
	LDA	#\$ FD
	STA	\$ 41
	LDA	#\$ FB
	STA	\$ 42
	LDA	#\$ F7
	STA	\$ 43

Chargement des différentes
configurations d'excitation des
phases du moteur.

BC2	LDA	\$ 46
	CMPA	#\$ 00
	BEQ	AV

Test du sens de rotation.

	CMPX	#\$ 03
	BNE	BCL4
	LDX	#\$ FF
BCL4	INX	
	BRA	EXE

Marche arrière.

AV	CMPX	#\$ 00
	BNE	BC1
	LDX	#\$ 04

Marche avant.

BC1	DEX	
EXE	LDA	40.X

	STA	\$ 00	
	LDA	#\$ 5D	Temporitation
	STA	\$ 3D	
B2	LDA	#\$ E1	
	STA	\$ 3C	
B1	DEC	\$ 3C	
	BNE	B1	
	DEC	\$ 3D	
	BNE	B2	
	DEC	\$ 44	
	BNE	BCL3	
	LDA	\$ 45	
	BEQ	SUI	
	BRA	BC2	
BCL3	LDA	\$ 44	
	CMPA	#\$ FF	
	BNE	BC2	
	DEC	\$ 45	
	BRA	BC2	
SUI	NOP		Fin de positionnement.

ANNEXE 2 : PROGRAMME DE MESURE DE LA CAPACITE

```

        LDA    # $FF
        STA    $ 04
        STA    $ 06
        LDA    # $ 00
        STA    $ 05
                                        { Initialisation des Ports }

        LDX    # $ 25
        LDA    # $ 32
BCL70   STA    X
        INC    A
        INC    X
        CPX    # $ 57
        BNE    BCL70

        LDA    # $ F0
        STA    $ 02
        LDA    # $ FF
        STA    $ 10
BCL 1   LDA    # $ FF
        STA    $ 11
BCL 0   DEC    $ 11
        BNE    BCL 0
        DEC    $ 10
        BNE    BCL 1
        LDA    # $ FF
        STA    $ 02
        STA    $ 10
BCL 2   DEC    $ 10
        BNE    BCL 2

        LDA    $ 01
        STA    $ 20
        NOP    NOP
        NOP    NOP
        NOP    NOP
        NOP    NOP
        NOP    NOP
                                        { Première acquisition }

        LDA    # $ 31
        STA    $ 00
        ORA    # $ 40
        STA    $ 00
    
```

STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 LDA \$ 23
 ORA # \$ 10
 STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 LDA # \$ 2F
 STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 NOP

0000	0000	0000
0001	0000	0000
0002	0000	0000
0003	0000	0000
0004	0000	0000
0005	0000	0000
0006	0000	0000
0007	0000	0000
0008	0000	0000
0009	0000	0000
000A	0000	0000
000B	0000	0000
000C	0000	0000
000D	0000	0000
000E	0000	0000
000F	0000	0000

SOUS-PROGRAMMES D’AFFICHAGE DE LA CAPACITE

Affichage 00%

CER A
 STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 LDA # \$ 10
 STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 LDA # \$ 2F
 STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 RTS

0010	0000	0000
0011	0000	0000
0012	0000	0000
0013	0000	0000
0014	0000	0000
0015	0000	0000
0016	0000	0000
0017	0000	0000
0018	0000	0000
0019	0000	0000
001A	0000	0000
001B	0000	0000
001C	0000	0000
001D	0000	0000
001E	0000	0000
001F	0000	0000

Affichage 10%

LDA # \$ 01
 STA \$ 00
 ORA # \$ 41
 STA \$ 00
 LDA # \$ 10
 STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 LDA # \$ 2F
 STA \$ 00
 ORA # \$ 40
 STA \$ 00
 RTS

0020	0000	0000
0021	0000	0000
0022	0000	0000
0023	0000	0000
0024	0000	0000
0025	0000	0000
0026	0000	0000
0027	0000	0000
0028	0000	0000
0029	0000	0000
002A	0000	0000
002B	0000	0000
002C	0000	0000
002D	0000	0000
002E	0000	0000
002F	0000	0000

Affichage 20% :

LDA # \$ 02
STA \$ 00
ORA # \$ 42
STA \$ 00
LDA # \$ 10
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
LDA # \$ 2F
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
RTS

Affichage 30% :

LDA # \$ 03
STA \$ 00
ORA # \$ 43
STA \$ 00
LDA # \$ 10
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
LDA # \$ 2F
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
RTS

Affichage 40% :

LDA # \$ 04
STA \$ 00
ORA # \$ 44
STA \$ 00
LDA # \$ 10
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
LDA # \$ 2F
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
RTS

Affichage 50% :

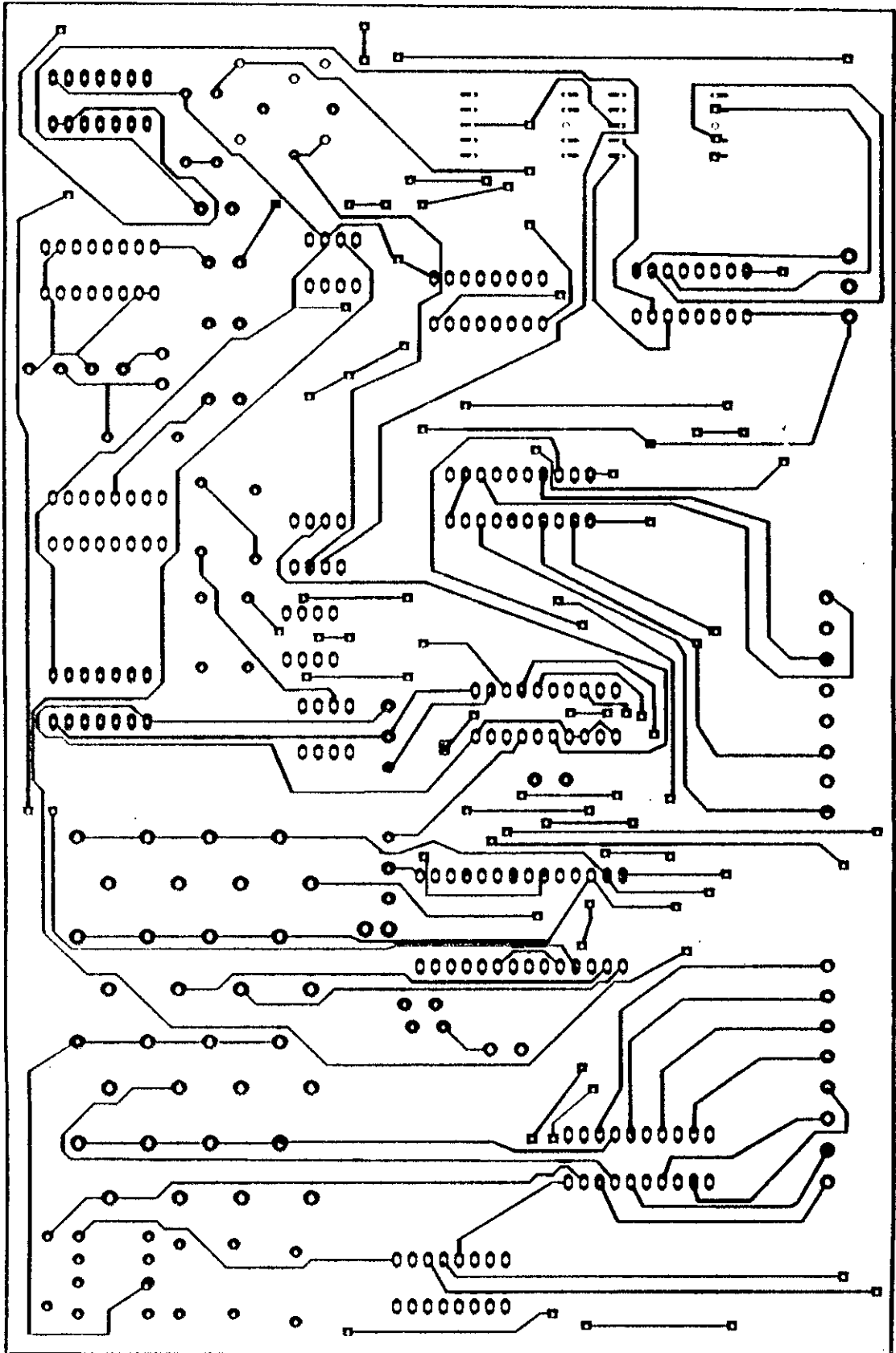
LDA # \$ 05
STA \$ 00
ORA # \$ 45
STA \$ 00
LDA # \$ 10
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
LDA # \$ 2F
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
RTS

Affichage 100% :

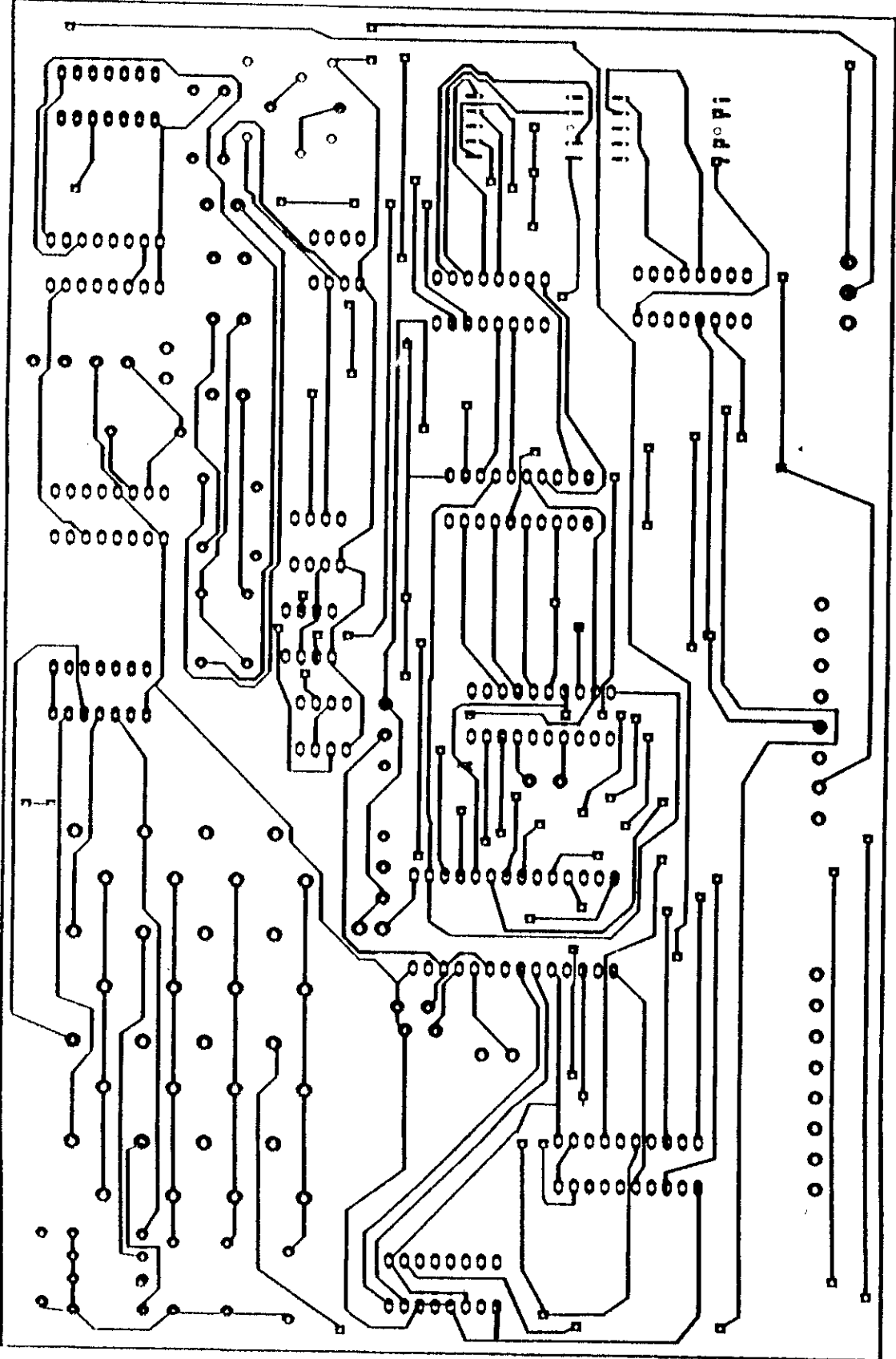
LDA # \$ 0F
STA \$ 00
ORA # \$ 4F
STA \$ 00
LDA # \$ 11
STA \$ 00
ORA # \$ 41
STA \$ 00
LDA # \$ 20
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
LDA # \$ 30
STA \$ 00
ORA # \$ 40
STA \$ 00
RTS

ANNEXE 3 : SCHEMAS ET CIRCUITS IMPRIMES

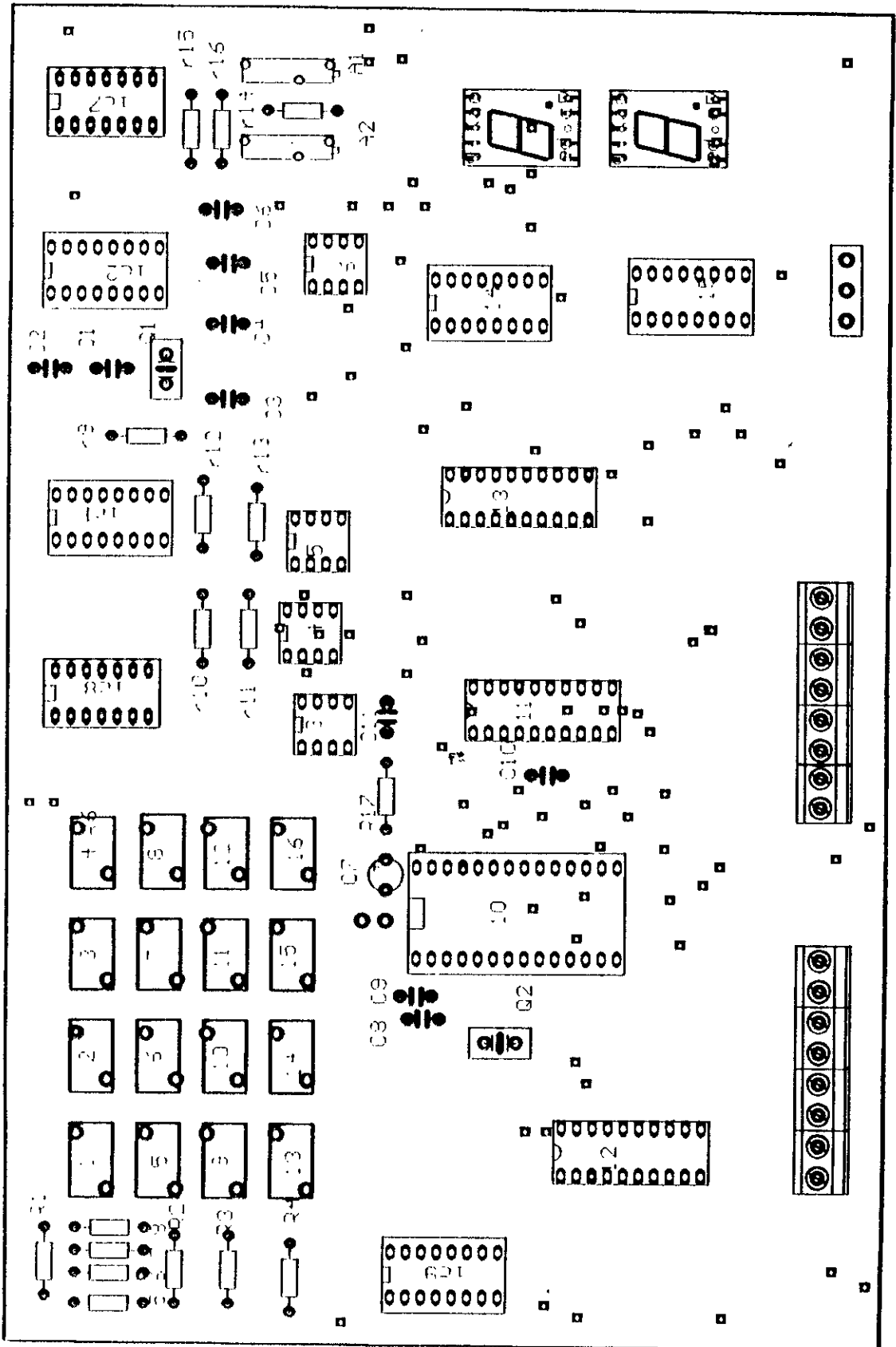
Calcul de l'angle optimal (face 1) :



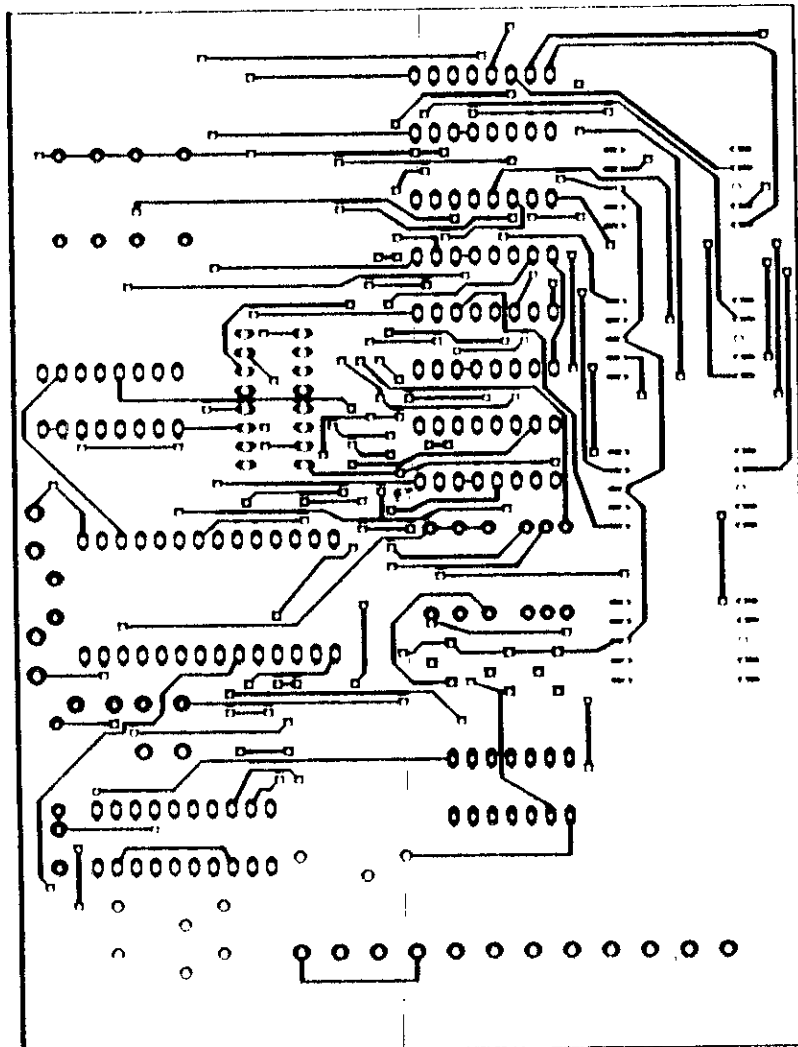
Calcul de l'angle optimal (face 2) :



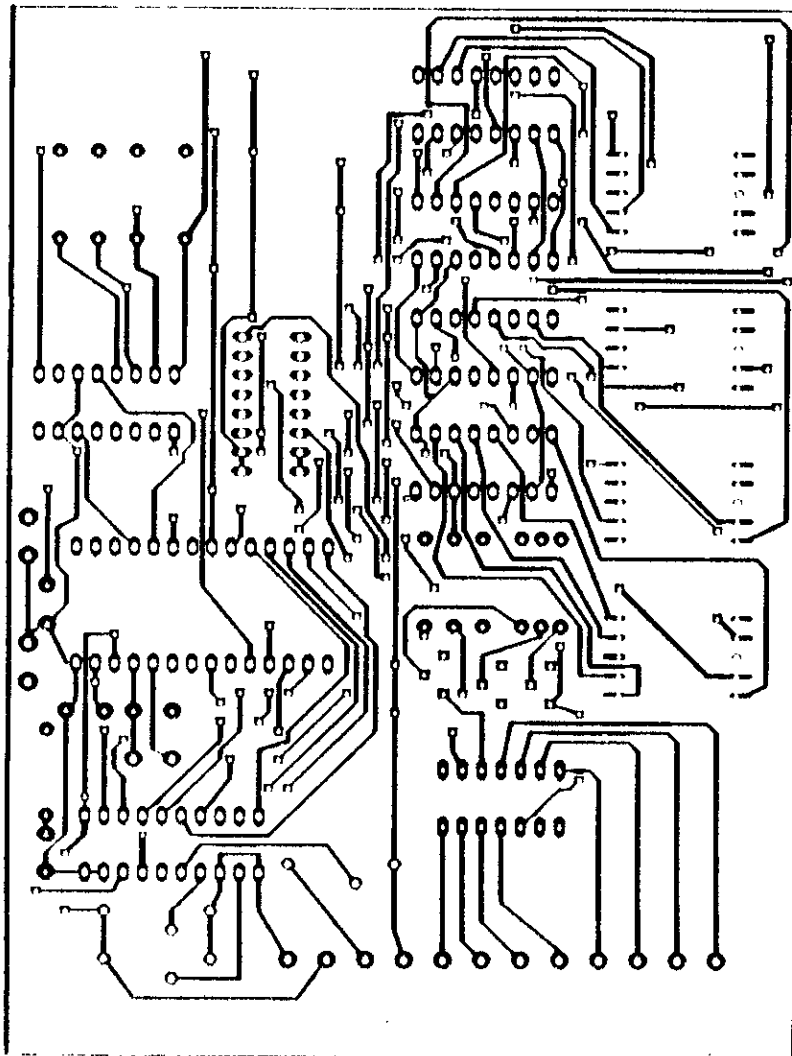
Calcul de l'angle optimal (implantation des composants) :



Gestion de la capacité d'une batterie (face 1) :



Gestion de la capacité d'une batterie (face 2) :



Gestion de la capacité d'une batterie (implantation des composants) :

