

Republique du Sénégal



Gm. 0616

Ecole Polytechnique de THIES

PROJET DE FIN D'ETUDES

*en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur
de conception en génie mécanique*

TITRE: Etude de faisabilité d'une source
d'énergie photovoltaïque d'appoint:
cas d'une boulangerie

AUTEUR: Mouhamadou GUEYE

DIRECTEURS: Mamadou SARR

Adama D. DIARRA

Juin 89.

DEDICACES

A mes regrettés parents

A grand-mère Maréma

A mes frères et soeurs

A mes amis

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce travail.

SOMMAIRE

Ce travail consiste en une approche théorique du dimensionnement d'un système photovoltaïque. Le rapport est divisé en trois parties:

-1^{ère} partie: étude du rayonnement solaire.

-2^{ème} partie: étude des systèmes photovoltaïques avec batterie comprenant, par ailleurs une étude de la photopile solaire complétée par une théorie des semi-conducteurs en annexe.

-3^{ème} partie: application au cas d'une boulangerie avec une étude économique comparative.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'endroit de MM Mamadou SARR et ADAMA D. Diarra, professeurs à l'EPT et directeurs de ce projet pour leur constante sollicitude ainsi que tous ceux dont la disponibilité ne m'a fait défaut dans ce travail.

TABLE DES MATIERES

	Pages
PAGE-TITRE	I
DEDICACES	II
REMERCIEMENTS	III
SOMMAIRE	IV
TABLE DES MATIERES	V
INTRODUCTION	1
I. <u>La constante solaire.</u>	3
I.1 Un modèle du soleil	
I.2 Emission d'un corps noir	
I.3 Emission radiative du soleil	
II. <u>L'astronomie du soleil.</u>	14
II.1 L'orbite terrestre	
II.2 Le jour solaire	
II.3 L'équation du temps	
II.4 Les coordonnées solaires	
II.5 Les coordonnées solaires locales	
II.6 L'obiquité des rayons solaires aux surfaces inclinaées	
II.7 Insolation à masse d'air zéro	
III. <u>L'insolation terrestre.</u>	29
III.1 Un modèle de l'atmosphère	
III.2 Le profil de température	
III.3 Le profil de densité	
III.4 L'absorption et la dispersion de la radiation	

solaire par les constituants atmosphériques

III.5 La radiation solaire directe

III.6 Le flux diffus

III.7 Equations approximatives pour le flux solaire
total

IV. <u>La photopile solaire.</u> -----	51
IV.1 historique	
IV.2 Principe	
IV.3 Causes de limitation du rendement des photopiles	
IV.4 Caractéristiques de la photopile	
V. <u>Les systèmes photovoltaïques avec batterie.</u> -----	60
V.1 Principe de fonctionnement	
V.2 Le panneau solaire photovoltaïque	
V.3 Les accumulateurs	
V.4 Régulation électronique	
VI. <u>Dimensionnement du système.</u> -----	73
VI.1 Caractéristique de la charge	
VI.2 Dimensionnement	
VI.3 Calcul des régulateurs	
VI.4 Calcul des onduleurs	
VI.3 Etude économique comparative	
CONCLUSION-----	88
ANNEXES-----	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES-----	98

INTRODUCTION

La flambée des prix pétroliers de la fin de 1973 a suscité entre autres réactions, un bouillonnement d'idées, un foisonnement de propositions et même l'éclosion de quelques initiatives tendant, face à des énergies fossiles tout d'un coup fortement renchérées, à organiser l'utilisation des énergies renouvelables jusque-là négligées par l'industrie, bien que toutes aient fait l'objet, au cours des cents dernières années, à tout le moins d'études, sinon d'expérimentations, voire de tentatives d'exploitation plus ou moins poussées. C'est dans ce cadre qu'a été institué le CRES (Centre Régional pour l'Energie Solaire), organisme du CILSS (Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel), pour favoriser et développer l'exploitation, la vulgarisation et l'utilisation de ces énergies dans notre sous-région en proie à une sécheresse et une désertification chroniques. Le but est d'arriver à une satisfaction de nos besoins énergétiques aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain par l'utilisation de sources d'énergie technologiquement et économiquement compétitives: l'énergie solaire peut constituer une alternative si l'on suppose résolus tous les problèmes que pose son exploitation. Dans sa forme photovoltaïque, l'énergie solaire offre des perspectives intéressantes dans la mesure où le prix de l'énergie traditionnelle augmente et où celui des modules photovoltaïques continue à baisser. Le projet que nous étudions se veut une modeste contribution dans la résolution du problème énergétique en Afrique qui doit constituer une priorité pour

relever les défis qui nous interpellent. L'exploration du "solaire" devient en fait intéressante seulement lorsque les puissances mises en jeu sont compatibles avec le potentiel énergétique solaire du site où il est question de faire l'implantation du système photovoltaïque. L'électricité produite par les photopiles coûte chère à la production mais pratiquement rien en transport car le générateur est directement relié à l'appareil d'utilisation. D'autre part, les frais de fonctionnement et d'entretien sont presque inexistantes. Ce qui fait que pour un coût d'investissement relativement faible par rapport à une solution "classique", l'énergie photovoltaïque peut être appropriée. C'est ce que nous tenterons d'établir pour la production de l'énergie d'appoint dans une boulangerie.

I. LA CONSTANTE SOLAIRE

I.1 UN MODELE DU SOLEIL

La plupart des énergies actuellement disponibles sur la planète trouvent leur origine au niveau du Soleil, depuis l'énergie pour le chauffage direct à l'énergie dérivée des combustibles fossiles en passant par l'énergie éolienne et celle hydroélectrique. C'est en effet à partir de l'énergie solaire:

-que les combustibles fossiles existent (à travers la photosynthèse),

-que la Terre, comparable à une machine thermique, fait passer chaque jour son fluide de travail (l'atmosphère), de sa source chaude (l'hémisphère éclairé) à sa source froide (l'hémisphère obscur) pour produire une énergie mécanique qui n'est autre que l'énergie cinétique du vent,

-que l'énergie de la mer est disponible sous ses diverses manifestations (marées, courants marins, houle, gradient thermique).

De ce fait, une parfaite compréhension de la technologie de l'énergie solaire passe nécessairement par une analyse de la radiation solaire.

Le Soleil fournit l'énergie pour maintenir la vie sur terre et produit l'attraction gravitationnelle nécessaire pour garder notre planète sur une orbite approximativement circulaire. Il a une masse de $1.99E30$ Kg et un rayon de $6.96E8$ m. Sa distance de la Terre varie entre 1.0167 UA et 0.983 UA avec une moyenne de 1 UA ($1UA=1$ unité astronomique= $1.5E11$ m).

L'intérieur du Soleil nous est inaccessible pour des expéri-

mentations directes mais par des observations sur la surface solaire et des considérations d'ordre théorique, il est permis de penser que la température interne du Soleil serait de l'ordre de 15 millions de Kelvins. Sa composition chimique est principalement constituée d'hydrogène avec une quantité moindre d'hélium. L'énergie est générée à l'intérieur à partir de la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium, et ensuite émise dans l'espace sous forme d'une radiation électromagnétique. La plupart des radiations qui nous parviennent émanent de la surface du Soleil appelée photosphère de telle manière que le spectre solaire est déterminé par les propriétés optiques et thermiques de cette surface. Le modèle simple utilisé suppose que le Soleil se comporte comme un corps noir dont la surface est maintenue à une température $T \approx 6000 \text{ K}$ par une source d'énergie localisée à l'intérieur.

1.2 EMISSION D'UN CORPS NOIR

Lorsqu'une radiation électromagnétique est incidente sur la surface d'un corps, elle peut être transmise, réfléchie ou bien absorbée. Si le corps est opaque aucune transmission n'est possible. L'énergie radiale par unité de surface par unité de temps par unité de longueur d'onde incidente sur une surface est appelée flux spectral incident, $F_{\lambda}^{(i)}$. De la même manière, les flux spectral absorbé et réfléchi sont dénotés par $F_{\lambda}^{(a)}$ et $F_{\lambda}^{(r)}$ respectivement. Le flux total dans la distribution est alors

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda \quad (1.1)$$

On définira le coefficient d'absorptivité spectral a et le coefficient de réflectivité spectral r de la surface d'un corps comme

$$a_{\lambda} = F_{\lambda}^{(a)} / F_{\lambda}^{(i)} \quad \text{et} \quad r_{\lambda} = F_{\lambda}^{(r)} / F_{\lambda}^{(i)}$$

a_{λ} et r_{λ} dépendent, pour une surface réelle, de la longueur d'onde du flux incident ainsi que de la direction de l'incidence de cette radiation. Par souci de simplicité, nous négligeons cette dépendance selon l'incidence de la radiation et considérons que la surface est un absorbeur isotrope. Cependant, le coefficient de réflectivité et d'absorptivité spectrale varient très sensiblement avec la longueur d'onde du flux radiatif incident.

Il est un fait expérimental que lorsqu'un corps opaque est maintenu à une température constante, sa surface émet une radiation électromagnétique caractéristique appelée radiation thermique. Cette radiation est généralement émise dans toutes les directions et contient toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Le flux thermique émanant du corps dépend aussi bien des caractéristiques de la surface du corps que de sa température T en K. Pour un flux thermique isotrope (i.e émanant d'une surface isotrope), la distribution spectrale est donnée par

$$F_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T) \quad (1.2)$$

où ϵ_{λ} est une caractéristique de la surface appelée coefficient d'émissivité spectrale et où $B_{\lambda}(T)$ est appelée fonction de PLANCK et est donnée par

$$B(T) = \frac{a}{5(e^{b/\lambda T} - 1)} \quad (1.3)$$

Les constantes dans la fonction sont

$$a = 2\pi hc = 3.7405E-16 \text{ W-m}^2$$

et

$$b = hc/k = 1.4388E-2 \text{ m-K}$$

où

$$h (\text{constante de PLANCK}) = 6.6252E-34 \text{ J-s}$$

$$c (\text{vitesse de la lumière}) = 2.9979E8 \text{ m/s}$$

$$k (\text{constante de BOLTZMANN}) = 1.3806E-23 \text{ J/K}$$

Le flux total émis par la surface est alors

$$F = \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T) d\lambda \quad (1.4)$$

Il est possible grâce aux lois de l'équilibre thermodynamique, d'établir une relation entre le coefficient d'émissivité thermique ϵ_{λ} et le coefficient d'absorptivité optique a_{λ} . En effet, le coefficient d'émissivité thermique d'une surface isotrope est égal à son coefficient d'absorptivité.

$$\epsilon_{\lambda} = a_{\lambda} \quad (1.5)$$

Cela veut dire qu'un corps noir, pour lequel $a_{\lambda} = 1$, rayonne mieux la chaleur avec $\epsilon_{\lambda} = 1$ pour toutes les longueurs d'onde. De

ce fait,

$$F_{\lambda \text{ noir}} = B_{\lambda}(T) \quad (1.6)$$

de telle manière que la fonction décrivant le flux spectral émis par la surface d'un corps noir à une température T est simplement la fonction de PLANCK. Aussi, convient-il d'accorder une importance aux propriétés mathématiques de cette fonction dont nous donnons une représentation comme une fonction de la longueur d'onde pour différentes températures à la figure (1.1).

L'aire en dessous de chaque courbe est finie et il existe pour chacune une longueur d'onde maximale λ_{max} pour laquelle $B_{\lambda}(T)$ atteint sa valeur maximale. Donc pour une température finie, l'énergie transportée par les composants dont la longueur d'onde est trop courte ou trop grande est négligeable. Ainsi la plus grande partie de l'énergie est transportée par les longueurs d'onde dans une plage où $B_{\lambda}(T)$ est appréciable. Il peut être démontré que $B(T)$ détient les propriétés suivantes

$$\lambda_{\text{max}} = \alpha/T \quad (\text{loi du déplacement}) \quad (1.7a)$$

$$\int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4$$

où α et σ sont des constantes universelles

$\alpha=2898 \mu\text{m-K}$ et $\sigma=5.6696\text{E-8 W/m}^2\text{-K}^4$

La valeur de λ_{max} pour une distribution de PLANCK donnée est caractéristique de la "couleur" du corps en question, bien qu'elle ne soit pas nécessairement détectable à l'oeil nu. Le flux total émis par un corps noir peut être obtenu à partir de la loi de STEFAN-BOLTZMANN

$$F_{noir} = \sigma T^4 \approx (5.67E-8)T^4$$

1.3 EMISSION RADIATIVE DU SOLEIL

Si nous adoptons comme modèle du Soleil un corps noir maintenu à une température constante T alors le flux radiant émis à sa surface peut être représenté par une distribution de PLANCK. Cependant la distribution observée du Soleil diffère un peu de B (T) du fait que le Soleil est plutôt dans un équilibre radiative que dans un état stable. Néanmoins, une bonne approximation du spectre solaire serait la courbe caractéristique d'un corps noir à la température de 5800 K comme illustré à la figure (1.2).

C'est cette approximation qui sera adoptée par la suite. Alors la longueur d'onde caractéristique du spectre solaire est d'après l'équation (1.7a)

$$\lambda_{max} = 2.9E3 \mu m - K / 5800 K = 0.500 \mu m = 500 \text{ nm}$$

qui correspond à la lumière grise. D'après l'équation (1.7b), il est possible de déterminer le flux total quittant la surface du Soleil par la formule

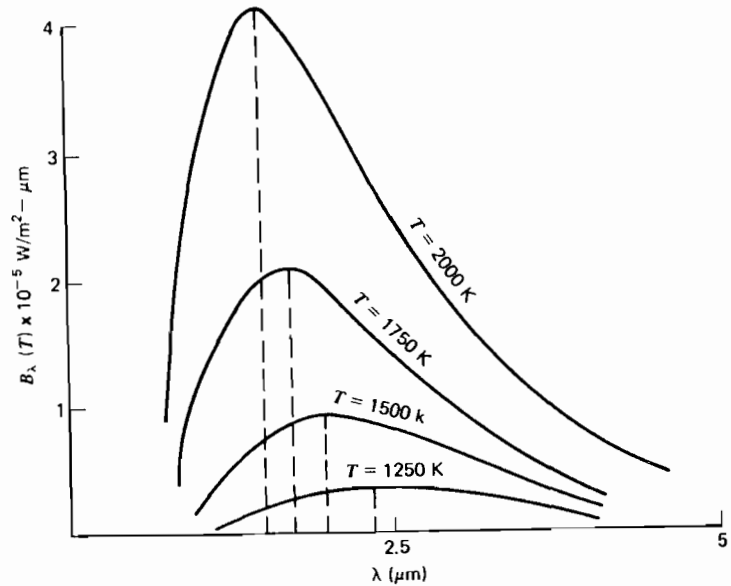


figure 1.1 : Spectres d'émission thermique de corps noirs à différentes températures. Les lignes pointillées représentent les valeurs de λ_{max} .

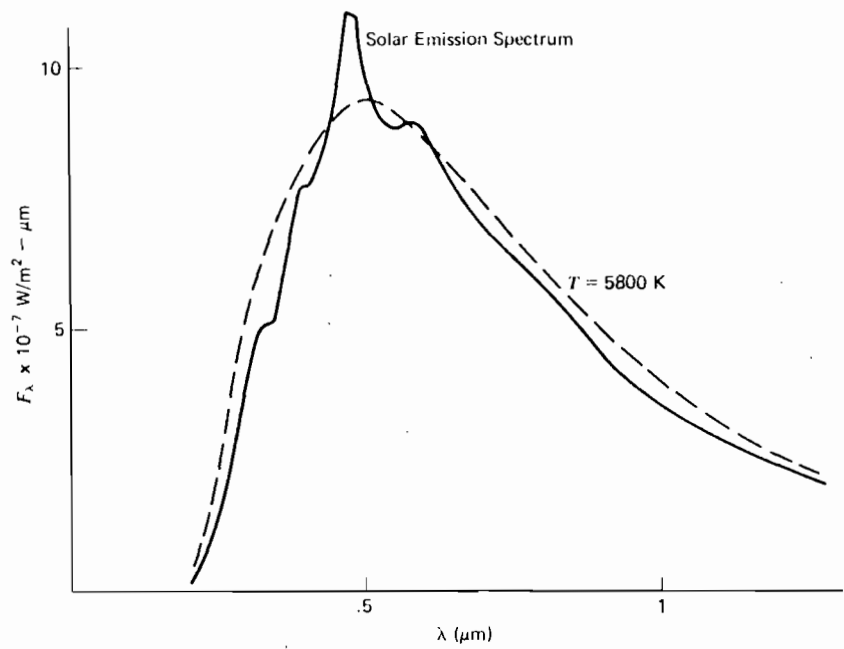


figure 1.2 : Distribution spectrale du flux émis de la surface du soleil. La ligne pointillée représente le spectre d'émission d'un corps noir à 5800 K.

$$F_{\odot} = \sigma T^4 = (5.670E-8 \text{ W/m}^2\text{-K}^4) (5800 \text{ K})^4 = 6.416E7 \text{ W/m}^2$$

Cette radiation est diffuse (propagée suivant toutes les directions) lorsqu'elle quitte la surface solaire. La puissance radiante totale émise à partir du Soleil est obtenue en multipliant ce flux par la surface du Soleil, soit

$$P_{\odot} = F_{\odot} * 4\pi R_{\odot}^2 \quad (1.8)$$

où R_{\odot} est le rayon du Soleil

$$d'où, P_{\odot} \approx (6.42E7W/m^2) 4\pi(6.96E8 \text{ m})^2 \approx 3.96E26 \text{ W}$$

Si le Soleil émet cette radiation isotropiquement, cette puissance énorme appelée luminosité par les astronomes, est émise également dans toutes les directions de l'espace. A mesure que la distance du Soleil augmente, cette puissance est distribuée sur des surfaces sphériques de plus en plus grandes. Ainsi l'intensité sera inversement proportionnelle au carrée de la distance du Soleil. A une distance r , l'aire de la surface est de $4\pi r^2$ de telle manière que le flux radiant traversant une telle surface est

$$F = P_{\odot} / 4\pi r^2$$

$$= 4\pi R_{\odot}^2 * F_{\odot} / 4\pi r^2$$

$$=R_{\odot}^2 * F_{\odot} / r^2$$

$$=3.11E25/r^2 \text{ W/m}^2 \quad (1.9)$$

Du fait que la distance de la terre au Soleil varie tout au long de l'année, le flux total atteignant la terre change constamment. A la distance moyenne du Soleil ($r=1.5E11 \text{ m}$), le flux est

$$S=F \approx 3.11E25/(1.5E11)^2 = 1382 \text{ W/m}^2 \quad (1.10)$$

La valeur du flux est appelée **constante solaire** qui, comme déjà mentionné, n'est pas une constante mais varie suivant les saisons et quelquefois suivant l'activité solaire. Notons que la valeur numérique du flux dans l'équation (1.10) a été obtenue en supposant que le spectre solaire est celui d'un corps noir à 5800 K. La constante a été expérimentalement mesurée comme variant de 1350 à 1382 W/m². Nous prendrons arbitrairement la valeur de la constante solaire comme étant égale à 1352 W/m² pour une température spectrale de 5760 K.

L'équation (1.9) est aussi valable pour la distribution spectrale et on peut écrire

$$S_{\lambda} = (R_{\odot}^2 / r^2) * F_{\odot \lambda} \quad (1.11)$$

$$S = (R_{\odot}^2 / r^2) * B_{\lambda} (5760 \text{ K})$$

$$= 2.165E-5 B_{\lambda}(5760 \text{ K}) \text{ en } W/m^2 \cdot m$$

avec

$$\int_0^{\infty} S_{\lambda} d\lambda = 1352 \text{ W/m}^2$$

Donc on peut dire que la distribution spectrale du flux arrivant au niveau de l'atmosphère terrestre est la même celle émise par le Soleil. Cependant il faut noter une certaine atténuation de chaque composant spectrale durant ce trajet. Bien que le flux provenant du disque solaire soit diffus, la constante solaire peut être considérée comme une radiation monodirectionnelle (i.e. provenant d'une direction bien définie) avec une légère divergence de 0.53° .

Nous savons donc que le spectre de la constante solaire est déterminé par l'équation (1.11) sous la forme

$$S = \text{constante} * B_{\lambda}(T)$$

La fraction de l'énergie transmise par les longueurs d'onde entre 0 et λ est proportionnelle à l'aire sous la courbe du corps noir entre ces limites. Ainsi, si nous faisons l'approximation du spectre solaire par la distribution d'un corps noir à 5760 K alors

-12% de l'énergie est transmise par les longueurs d'onde inférieures à $0.4 \mu m$ principalement sous la forme d'une radiation ultraviolette,

-37% est contenue dans la partie visible du spectre solaire,

-les longueurs d'onde plus grandes que $0.7 \mu\text{m}$ contiennent 51% de l'énergie (essentiellement dans le domaine infrarouge).

Ainsi, près de $2/3$ de l'énergie provenant du Soleil est invisible à l'oeil humain alors que la majeure partie du reste est dans l'infrarouge.

En résumé, le flux solaire arrivant au dessus de l'atmosphère terrestre a un caractère principalement électromagnétique. Sa distribution spectrale ressemble à celle qu'émet un corps noir à 5760 K . Approximativement, la moitié de l'énergie solaire nous parvient à travers les rayons infrarouges alors que le $1/3$ se trouve dans le spectre visible. Le flux est essentiellement monodirectionnel avec une légère divergence de $\approx \frac{1}{2}^\circ$. Le flux total (moyenne saisonnière) sur une surface orientée vers le Soleil est appelée constante solaire et approximativement égal à

$$S=1352 \text{ W/m}^2$$

II. L'ASTRONOMIE DU SOLEIL.

La disponibilité de l'énergie solaire à la surface de la terre dépend principalement de l'état optique de l'atmosphère et du mouvement apparent journalier du soleil à travers la sphère céleste. Le mouvement du soleil est important car sa trajectoire détermine l'acuité de l'atténuation de l'énergie solaire par l'atmosphère. La variation saisonnière de cette trajectoire fait aussi que le nombre d'heures d'insolation journalière fluctue. Pour expliquer le mouvement apparent du soleil par rapport à un système d'axes lié à la terre, nous avons besoin d'étudier et le mouvement de la terre autour du soleil et sa rotation autour d'elle-même.

II.1 L'ORBITE TERRESTRE.

Le mouvement de la terre est principalement affecté par l'attraction gravitationnelle entre celui-ci et le soleil. Bien que la lune et les autres planètes exercent une certaine influence sur l'orbite terrestre, les perturbations qu'elles occasionnent sont négligeables. Aussi, pouvons-nous considérer la terre comme l'unique planète orbitant autour du soleil. Par ailleurs, on considère le soleil et la terre comme de minuscules sphères ou plutôt, se comptent comme telles à cause de la grande distance qui les sépare. En effet, cette distance fait plus de 200 fois le rayon du soleil et plus de 20000 fois celui de la terre.

A cause de la masse exorbitante du soleil comparée aux autres planètes, nous pouvons considérer le soleil comme étant

fixe lorsque la terre se déplace sur son orbite.

Selon les lois classiques de la dynamique newtonienne, en particulier, la loi de la gravitation de Newton, on peut montrer que:

-la terre tourne autour du soleil dans un plan fixe.

-la terre se déplace sur une orbite elliptique dont l'un des foyers est occupé par le soleil (première loi de Kepler).

Le plan fixe contenant l'orbite terrestre est appelé plan écliptique car c'est seulement lorsque la lune traverse ce plan qu'il y' aura éclipse. L'orbite de la terre bien qu'elliptique, est presque circulaire. Le soleil occupe l'un des foyers sur le long axe de l'ellipse (figure 2.1).

L'orbite terrestre est mieux représentée en coordonnées polaires planes comme

$$r = \frac{a(1 - \epsilon^2)}{1 + \epsilon \cos \theta} \quad (2.1)$$

où

a = moitié de la longueur du long axe (distance orbitale moyenne)

$$= 1.497E11 \text{ m}$$

$$\epsilon = \text{l'excentricité} = 0.0167$$

L'excentricité est la mesure de la déviation par rapport à un cercle; elle est égale à 0 pour un cercle et tend vers l'unité lorsque l'ellipse devient plate.

A partir de l'équation (2.1), on peut déterminer la plus petite valeur de r (appelée périhélie) obtenue pour $\theta = 0$ et

donnée par

$$r_p = a(1 - \epsilon) = 1.497E11(1 - 0.0167) = 1.471E11 \text{ m}$$

Dela même manière, la valeur maximale de r (appelée aphélie) est atteinte pour $\theta = 180^\circ$, autrement dit,

$$r_a = a(1 + \epsilon) = 1.497E11(1 + 0.0167) = 1.521E11 \text{ m}$$

Il est à noter que les distances périhélie et aphélie diffèrent de la valeur moyenne de moins de 2%. Ce qui veut dire que l'orbite terrestre est presque un cercle parfait. La terre atteint le périhélie et l'aphélie approximativement le 4 Janvier et le 4 Juillet respectivement. Donc, dans l'hémisphère Nord, la terre est plus proche du soleil en Hiver qu'en Eté.

Les saisons sont la conséquence de l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à une ligne perpendiculaire au plan écliptique. L'angle d'inclinaison est de 23.5° et demeure constant tout au long de l'année. La vitesse de rotation est aussi constante et égale à 23.93 heures pour un e rotation . Cette intervalle de temps appelé jour sidéral, est le temps pendant lequel les étoiles sont supposées faire une révolution autour d'unobservateur sur la terre. Cependant, l'angle entre l'axe de la terre et la ligne joignant la terre au soleil varie saisonnièrement. En un point de l'orbite terrestre, l'axe de rotation de la terre est incliné vers le soleil formant un angle de 66.5° avec cette ligne. Ceci arrive aux environs du 21 Juin et est connu sous le nom de solstice d'été. Le temps séparant deux solstices d'été successifs est appelé année tropicale et est égale pour toutes les applications pratiques, au temps entre deux

périhélie successive ou année sidérale. Chaque année est approximativement égale à $(365.25) \times (24) = 8766$ heures.

Un quart d'année tropicale après le solstice d'été, l'axe de la terre fait un angle de 90° avec la ligne terre-soleil: c'est l'équinoxe d'Automne qui se situe aux environs du 21 Septembre. La même situation est observée un quart d'année avant le solstice d'été à l'équinoxe du Printemps (21 Mars). Aux équinoxes, les jours et les nuits ont la même durée pour tous les observateurs sur la terre. Une moitié d'année tropicale après le solstice d'été, on se retrouve au solstice d'Hiver, pour lequel l'axe de rotation de la terre est incliné par rapport à la ligne terre-soleil d'un angle de 113.5° (figure 2.2).

II.2 LE JOUR SOLAIRE.

Le mouvement apparent du soleil par rapport à un observateur situé au centre de la terre est le résultat de deux mouvements séparés: la révolution de la terre autour du soleil et la rotation de la terre autour de son axe. Le soleil semble tourner autour de la terre en un intervalle de temps appelé jour solaire. Le jour solaire n'est pas constant mais varie légèrement tout au long de l'année d'une manière en quelque sorte irrégulière du fait que l'axe de rotation de la terre est incliné par rapport au plan écliptique et que son orbite est elliptique. La valeur moyenne du jour solaire intégrée sur une année est exactement de

$$T_{\text{jour solaire moyen}} = 24 \text{ heures}$$

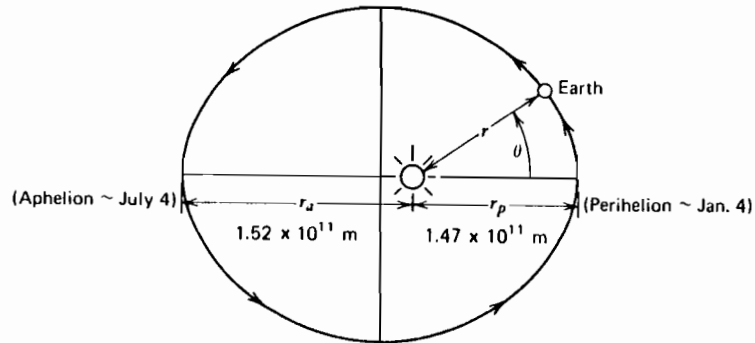


figure 2.1 : L'orbite terrestre montrée avec une excentricité exagérée .

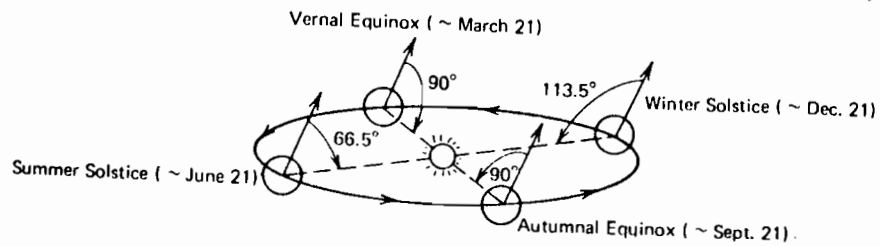


figure 2.2 : La variation saisonnière ~~entre~~ de l'angle entre l'axe polaire et la ligne terre-soleil.

la variation du jour solaire autour de sa valeur moyenne est montrée à la figure 2.3.

Le jour solaire atteint un maximum de 24 hr + 30 sec près du solstice d'Hiver et un minimum de 24 hr - 19 sec un peu avant l'équinoxe d'Automne. Un deuxième maximum est observé près du solstice d'été alors qu'un deuxième minimum survient près de l'équinoxe du Printemps. Les valeurs moyennes du jour solaire sont atteintes aux environs du 11 Février, 14 Mai, 26 Juillet et 3 Novembre. La différence entre le plus long et le plus court jour solaire est inférieur à une minute ou 0.07% de la valeur moyenne. De ce fait, pour la plupart des applications, le jour solaire peut être pris comme étant constant et égal à 24 heures solaires moyennes tout au long de l'année.

II.3 L'EQUATION DU TEMPS.

Le midi solaire survient lorsque le soleil traverse une ligne imaginaire s'étendant du pôle Nord au pôle Sud et passant directement par la tête d'un observateur au centre de la terre. Comme nous l'avons vu plus haut, le temps entre deux midis solaires successifs (un jour solaire) est pratiquement constant durant l'année. Cela signifie que lorsqu'un observateur observe le midi solaire à, disons 9 h 47 mn, il observera le midi solaire prochain 19 secondes au plus tôt et 30 secondes au plus tard le jour suivant. Il est évident que sur un mois ou plus cet effet est cumulatif et le midi solaire peut alors avoir lieu plusieurs minutes avant ou après 9 h 47 mn. Dans de nombreuses applications solaires, il est important de savoir le moment exact du midi

solaire en heure locale pour un jour donné.

La courbe qui donne cet effet cumulatif de la variation du jour solaire est appelé Equation Du Temps (EDT). Il est représenté à la figure (2.4). Mathématiquement, la figure (2.3) est la dérivée négative de la figure (2.4) et inversement la figure (2.4) est l'intégrale négative de la figure (2.3). Comme toute intégrale, elle introduit une constante qui, dans notre cas affecte les zéros de l'EDT. En pratique, on essaye de centrer la courbe de telle manière que sa valeur moyenne soit égale à 0 pour que l'effet cumulatif net sur une année s'annule. Cela fixe les zéros de l'EDT aux 16 Avril, 14 Juin, 1 Septembre et 25 Décembre. Le temps de Greenwich est établi de telle manière que le midi solaire à l'observatoire de Greenwich en Angleterre coïncide approximativement avec 12 heures 00 à ces dates.

On peut calculer alors l'heure du midi solaire pour une journée donnée.

$$\text{midi solaire} = 12:00 - 4(\text{Long}_{\text{st}} - \text{Long}_{\text{loc}}) - \text{EDT}$$

où

Long_{st} = longitude standard de l'heure de la zone de l'observateur

$$\text{Long}_{\text{loc}} = \text{longitude locale de l'observateur}$$

L'heure solaire pour un jour donné est définie comme

$$\text{heure solaire} = \text{heure standard} + 4(\text{Long}_{\text{st}} - \text{Long}_{\text{loc}}) +$$

EDT

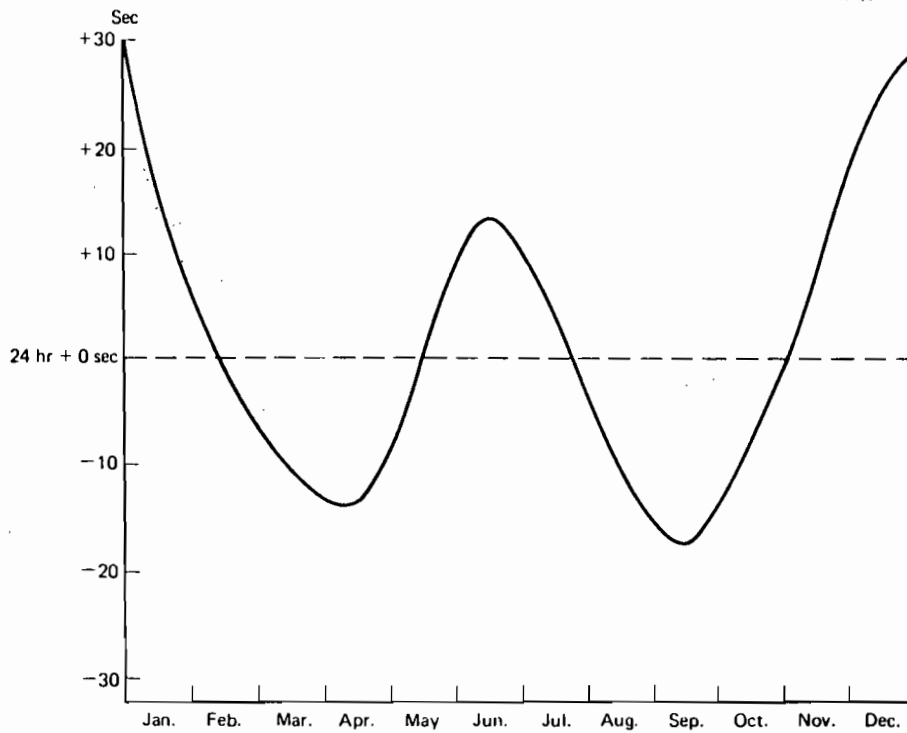


figure 2.3: La déviation saisonnière du jour solaire apparent autour de sa moyenne.

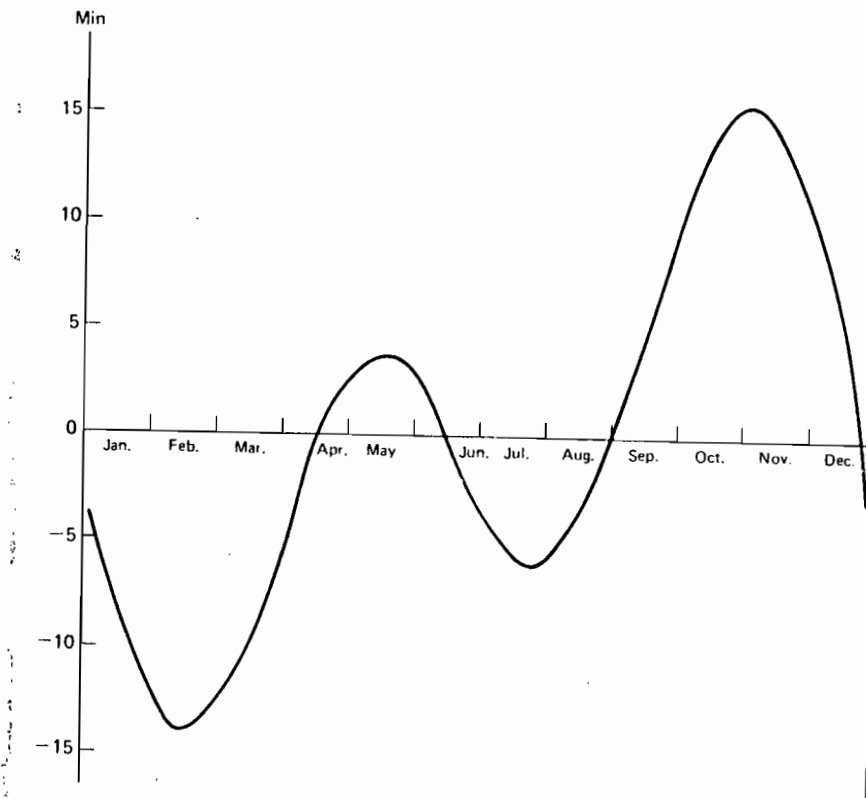


figure 2.4: L'équation du temps (EDT)

II.4 LES COORDONNEES SOLAIRES.

Le mouvement apparent du soleil à travers la sphère céleste dépend en partie de la position de l'observateur sur la surface de la terre. Pour établir la description mathématique du mouvement du soleil, nous considérons d'abord un système de coordonnées par rapport à un observateur au centre de la terre: on parle de système de coordonnées géocentriques pour lequel l'axe z est dirigé suivant la ligne Nord-Sud. Les autres axes sont contenus dans le plan équatorial: L'axe x dirigé vers un méridien local, l'axe y faisant un angle de 90° vers l'Est. Dans ce système d'axes, la position du soleil est parfaitement déterminée par deux angles: la codéclinaison D' et l'angle horaire H (figure 2.5).

La codéclinaison (complément de la déclinaison D^1) est l'angle que fait les rayons solaires avec le pôle Nord. Il varie saisonnièrement entre 66.5° au solstice d'été et 113.5° au solstice d'hiver, passant par 90° à chaque équinoxe. L'angle horaire est l'angle entre la projection des rayons solaires sur le plan équatorial et l'axe des x. Ses variations horaires lui font prendre des valeurs négatives avant le midi solaire et des valeurs positives après le midi solaire. Il est possible de calculer la codéclinaison et l'angle horaire par les formules suivantes

¹ Dans d'autres littératures, on utilise la déclinaison D qui est l'angle mesuré à partir du plan équatorial variant de 23.5° au solstice d'été à -23.5° au solstice d'hiver.

$$\cos D' = \sin 23.5^\circ \sin \frac{360^\circ \cdot n}{365.25 \text{ jours}} \quad (2.2)$$

$$H = \pm \frac{360^\circ}{24 \text{ h}} t \quad (2.3)$$

où

n : nombre de jours après l'équinoxe du Printemps.

t : nombre d'heures avant (-) ou après (+) le midi solaire.

II.5 LES COORDONNEES SOLAIRES LOCALES.

Les coordonnées géocentriques définies pour un observateur situé au centre de la terre ne sont pas appropriées pour un observateur à la surface de la terre. Pour un tel observateur, il est plus indiqué d'utiliser l'angle zénithal Z et l'angle azimuthal A comme coordonnées solaires. Le système de coordonnées utilisé ici est situé à la surface de la terre à une latitude L et assimile la direction z avec la verticale du lieu où l'on se trouve. L'axe x est dirigé vers le Sud tandis que l'axe y est orienté vers l'Est. L'angle Z est l'angle que fait la verticale avec les rayons solaires (figure 2.6). Son complément est appelé altitude du soleil. L'angle azimuthal est l'angle que fait la projection des rayons solaires dans le plan horizontal ($x-y$) avec la direction Sud (l'axe x).

Il est possible d'établir une corrélation entre les coordonnées locales Z et A et les coordonnées géocentriques D' et H en utilisant certaines relations vectorielles. On obtient

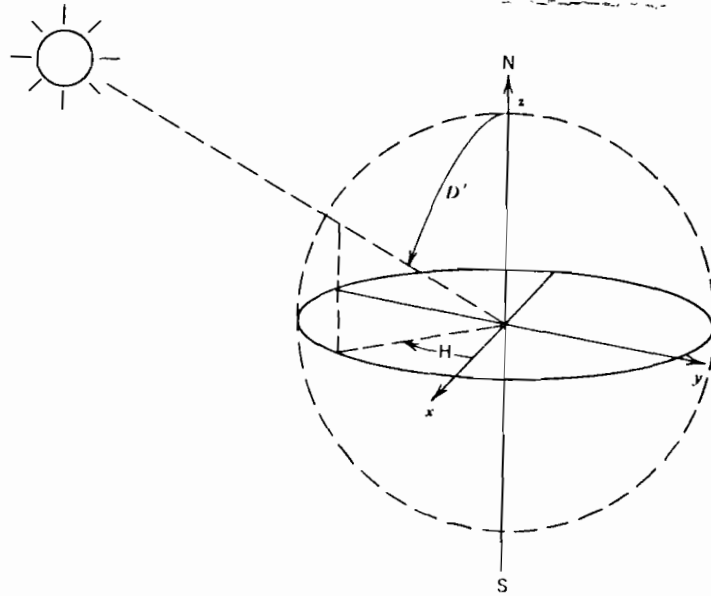


figure 2.5 : Les coordonnées solaires géocentriques - La codéclinaison D' et l'angle horaire H .

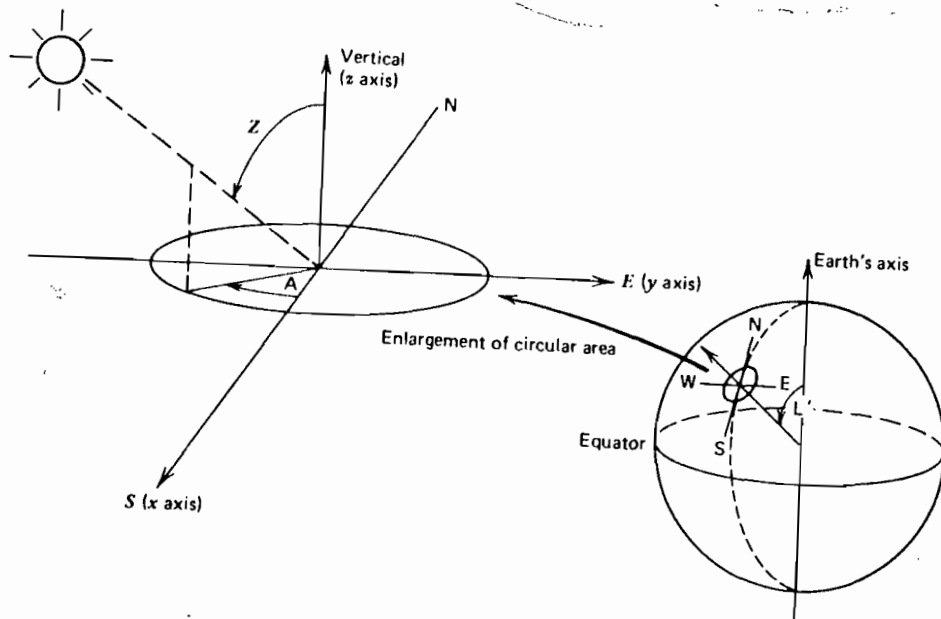


figure 2.6 : Les coordonnées solaires locales - L'angle zénithal Z et l'angle azimuthal A .

$$\cos Z = \cos D' \cos L' + \sin D' \sin L' \cos H \quad (2.4a)$$

et

$$\tan A = \sin D' \sin H / (\sin D' \cos L' \cos H - \cos D' \sin L') \quad (2.4b)$$

où L' est la colatitude (complément de la latitude L) de l'observateur.

II.6 L'OBLIQUITE DES RAYONS SOLAIRES AUX SURFACES INCLINEES.

La quantité d'énergie interceptée par une surface fixe est déterminée en partie par l'angle θ entre la perpendiculaire à la surface et les rayons solaires. La fonction $\cos \theta$ est appelée facteur d'obliquité. Ce facteur dépend et des coordonnées solaires locales (Z et A) et des coordonnées d'inclinaison de la surface (Δ et ψ). L'angle d'inclinaison de la surface, Δ , est l'angle entre la perpendiculaire à la surface (normale à la surface) et la verticale du lieu (figure 2.7). L'angle azimuthal de la surface, ψ est l'angle entre la projection de la normale à la surface dans le plan horizontal et la direction Sud. Les angles Δ et ψ fixent la direction de la normale à la surface de la même manière que Z et A déterminent la direction des rayons solaires.

L'obliquité des rayons solaires par rapport à une surface inclinée est donnée par

$$\cos \theta = \cos Z \cos \Delta + \sin Z \sin \Delta \cos (A - \psi) \quad (2.5)$$

La variation horaire de $\cos \theta$ est déterminée par la dépendance de Z et A selon l'angle horaire. A noter que pour une surface horizontale (i.e $\Delta = 0$),

$$\cos \theta = \cos Z \quad \text{ou} \quad \theta = Z$$

Par ailleurs, pour un collecteur suiveur pour lequel $Z = \Delta$ et $A = \psi$, on trouve que

$$\cos \theta = \cos^2 Z + \sin^2 Z = 1 \quad \text{ou} \quad \theta = 0$$

Pour un collecteur dirigé face au Sud ($\psi = 0$), l'angle θ au midi solaire θ_n devient

$$\begin{aligned} \cos \theta_n &= \cos Z_n \cos \Delta + \sin Z_n \sin \Delta \\ &= \cos(Z_n - \Delta) \end{aligned}$$

ou

$$\theta_n = |Z_n - \Delta|$$

où Z_n est l'angle azimuthal au midi solaire.

L'équation (2.5) montre que le facteur d'obliquité, dans certaines conditions, peut prendre une valeur négative (i.e $\theta > 90^\circ$). Cela signifie que les rayons solaires tombent en arrière de la surface. Si cette dernière a été conçue pour recevoir le rayonnement direct tombant sur sa surface frontale, la collection n'aura pas lieu lorsque $\cos \theta$ est négatif. Un exemple peut être donné dans le cas d'une surface verticale collectrice ($\Delta = 90^\circ$) avec une inclinaison face à l'Ouest ($\psi = 90^\circ$). L'équation (2.5) donne alors

$$\cos \theta = \sin Z \cos(A - 90^\circ) = \sin Z \sin A$$

Avant le midi solaire, A est négatif de telle manière que $\cos\theta$ l'est. Donc, pour une surface collectrice verticale faisant face à l'Ouest, aucun rayonnement solaire direct ne peut être intercepté avant le midi solaire. Il peut être démontré qu'un phénomène similaire s'observe pendant l'été pour une surface verticale avec une inclinaison face au Sud ($\psi = 0$).

Puisque l'obliquité des rayons solaires à une surface collectrice est déterminée par l'équation (2.5), cette dernière joue un rôle important dans l'emplacement et l'orientation des panneaux solaires.

II.7 INSOLATION A MASSE D'AIR ZERO.

Le niveau d'ensoleillement sur la terre est déterminé par deux facteurs: l'état optique de l'atmosphère et les coordonnées solaires. Dans le but d'établir la dépendance dans le dernier cas, nous supposons les conditions d'une masse d'air zéro. Cela veut dire que l'atmosphère est considérée comme totalement transparente de telle façon qu'elle n'affecte guère le rayonnement solaire, en aucune manière.

Si les coordonnées de la surface sont Δ et ψ et celles du soleil caractérisées par Z et A , alors le flux intercepté est

$$F(t) = S \cos\theta(t) \quad (2.6)$$

où

S : constante solaire.

θ : angle d'obliquité entre les rayons solaires et la

normale à la surface.

t : temps solaire.

En utilisant les équations (2.2), (2.3), (2.4) et (2.5), on peut établir la dépendance de $\cos\theta$ selon t . Cependant, les résultats peuvent être obtenus avec une bonne précision à l'ordinateur.

III. L'INSOLATION TERRESTRE.

La quantité d'énergie solaire disponible à la surface de la terre est considérablement plus petite que celle en dehors de l'atmosphère. Cette quantité dépend de l'état physique de notre atmosphère. Comme nous allons le voir, l'atmosphère affecte la radiation solaire par deux processus: l'absorption et la dispersion. La quantité d'absorption et de dispersion pour un composant du spectre solaire dépend non seulement de la composition de l'atmosphère mais aussi de la longueur d'onde de ce composant. Dans certaines régions du spectre, l'énergie est prédominément dispersée alors que dans d'autres elle est essentiellement absorbée. La composition spectrale de l'insolation terrestre est donc notablement différente de la courbe caractéristique d'un corps noir à 5760 K de la constante solaire.

Un autre fait important est que l'insolation terrestre ne peut plus être considérée comme étant monodirectionnelle comme l'était la radiation incidente au dessus de l'atmosphère. En effet, la radiation solaire totale au niveau de la terre est constituée d'une composante directe ou monodirectionnelle qui a survécu à l'absorption et à la dispersion et d'une composante diffuse (voyageant dans toutes les directions) produite par la dispersion atmosphérique.

Pour comprendre, quantitativement, comment le rayonnement solaire est modifié lorsqu'il traverse l'atmosphère, nous présentons ici quelques éléments de la physique de l'atmosphère.

III.1 UN MODELE DE L'ATMOSPHERE.

L'état de l'atmosphère peut être décrit par des variables thermodynamiques telles que la température T , la densité ρ , la pression P et sa composition chimique. Ces paramètres varient aussi bien dans l'espace que dans le temps. A cause de ces variations plutôt imprédictibles, il est difficile de mener des études théoriques quant à la prédiction de l'insolation terrestre. Dans le but de considérer certaines conclusions théoriques, il devient nécessaire alors de faire quelques simplifications sur la structure de l'atmosphère.

Tout d'abord, nous considérons l'atmosphère comme suffisamment mince comparée au rayon de la terre de telle manière qu'elle peut être vue comme étant plate. Comme nous le verrons, l'atmosphère a une hauteur effective de ≈ 8 km; ce qui est vraiment petit comparé au rayon de la terre ($R = 6371$ km). C'est une bonne approximation, sauf quelquefois au lever et au coucher du soleil où l'insolation terrestre est négligeable. Donc, la courbure de l'atmosphère est d'une légère influence dans la plupart des applications en énergie solaire.

La deuxième approximation veut que les paramètres atmosphériques varient seulement suivant une coordonnée, l'altitude z . Ce qui veut dire qu'on peut exprimer tous les paramètres atmosphériques sous forme de profils verticaux tels que $T = T(z)$, $\rho = \rho(z)$ et $P = P(z)$. Cette approximation sera certainement défailante spécialement lorsque des nuages sont présents. Une atmosphère plate dont la composition varie seulement avec l'altitude est dite atmosphère stratifiée plane.

III.2 LE PROFIL DE TEMPERATURE.

Le profil de température de l'atmosphère est d'un intérêt particulier dans plusieurs problèmes en science atmosphérique et en météorologie. Sa structure permet de subdiviser l'atmosphère approximativement en quatre couches. La plus basse couche, la troposphère s'étend du niveau de la mer à environs 12 km au dessus de ce dernier. Dans cette région, la température décroît avec l'altitude à une vitesse approximative de $r \approx 6 \text{ K/km}$ (figure 3.10).

Entre 12 et 50 km au dessus du niveau de la mer se trouve la stratosphère dans laquelle la température croît avec l'altitude. De 50 à 85 km s'étend la mésosphère; au dessus de 85 km se trouve la thermosphère.

Bien que la mésosphère et la thermosphère soient d'un grand intérêt pour la science de l'atmosphère, elles jouent un rôle secondaire dans la détermination de l'insolation terrestre. La troposphère qui contient 80% de la masse total de l'atmosphère, est principalement responsable de l'abondance ou non de l'énergie solaire à la surface de la terre. Sauf pour l'absorption de la radiation ultraviolette par l'ozone stratosphérique, l'atténuation de la radiation solaire est due, en grande partie, aux constituants de la troposphère. Donc, nous porterons notre attention sur cette couche basse dont le profil de température peut être caractérisé par

$$T(z) = T_0 - rz \quad (3.1)$$

où T_0 est la température de la terre et $r = 6 \text{ K/km}$.

III.3 LE PROFIL DE DENSITE.

L'atténuation de l'énergie solaire est fonction, dans une large mesure, du profil de densité $\rho(z)$. Pour établir un tel profil, nous supposons que l'air atmosphérique est bien mélangée et se comporte comme un gaz parfait. La loi des gaz parfaits s'écrit alors

$$P = \rho \frac{RT}{\bar{M}} \quad (\text{loi des gaz parfaits}) \quad (3.2)$$

où T : température en Kelvin

P : pression

\bar{M} : masse moyenne moléculaire de l'air ($M = 29 \text{ uma}$)

R : constante des gaz parfaits ($R = 8317 \text{ J/kg.mole-K}$)

Du fait que l'air est considérée comme étant en équilibre hydrostatique, nous pouvons écrire

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (\text{Equation hydrostatique}) \quad (3.3)$$

où $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ est l'accélération de la gravité.

En substituant la valeur de ρ obtenue dans l'équation (3.2) dans l'équation (3.3), on obtient après intégration, le profil de pression.

$$P(z) = P_0 \exp \left[- \left(\frac{\bar{M}g}{R} \int_0^z \frac{dz}{T(z)} \right) \right] \quad (3.4)$$

En introduisant cette dernière équation dans l'équation (3.2), on trouve

$$\rho(z) = \rho_0 \frac{T_0}{T(z)} \exp \left[- \left(\frac{\bar{M}g}{R} \int_0^z \frac{dz}{T(z)} \right) \right] \quad (3.5)$$

où ρ_0 et T_0 sont des valeurs au niveau de la mer.

Selon l'équation (3.5), le profil de densité est entièrement déterminé si le profil de température est spécifié. Pour simplifier, nous ignorons le facteur γ dans l'équation (3.1) et supposons que dans la troposphère, la température est partout égale à celle au niveau de la mer T_0 . Pour une telle atmosphère isotherme, l'équation (3.5) peut être intégrée pour donner

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H} \quad (3.6)$$

où

$$H = RT_0 / \bar{M}g \quad \text{et} \quad \rho_0 = P_0 \bar{M} / RT_0$$

Une atmosphère dont le profil est donné par l'équation (3.6) est appelée atmosphère exponentielle; la constante est son

échelle de hauteur.

Pour une température de $T_0 = 273 \text{ K}$ et une pression de $P_0 = 1.01E5 \text{ N/m}^2$, on trouve

$$H = (8317) (273) / (29) (9.8) = 8000 \text{ m} = 8 \text{ km}$$

et

$$\rho_0 = (1.01E5) (29) / (8317) (273) = 1.29 \text{ kg/m}^3$$

L'échelle de hauteur représente l'altitude à laquelle la densité d'une atmosphère exponentielle tombe à $1/e = 1/2.7$ de la valeur au niveau de la mer. Il peut être montré que si toute l'atmosphère était redistribuée avec une densité uniforme égale à sa valeur au niveau de la mer, elle ne s'étendrait pas plus haut que l'échelle de hauteur. La figure (3.1b) montre l'équation (3.6) ^{pour} différentes températures.

II.4 L'ABSORPTION ET LA DISPERSION DE LA RADIATION SOLAIRE PAR LES CONSTITUANTS ATMOSPHERIQUES.

Les constituants atmosphériques -soit les molécules telles que N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O ou O_3 soit les particules plus grosses telles que les gouttelettes de brouillard ou les particules de poussière- peuvent affecter la radiation soit par l'absorption soit par la dispersion. Par absorption, l'énergie radiante est convertie en une autre forme d'énergie, habituellement la chaleur. La fraction absorbée est déterminée par la section d'absorption massique, $\sigma^a(\lambda)$, du constituant. Ce paramètre varie d'une molécule à l'autre et dépend aussi de la longueur d'onde de

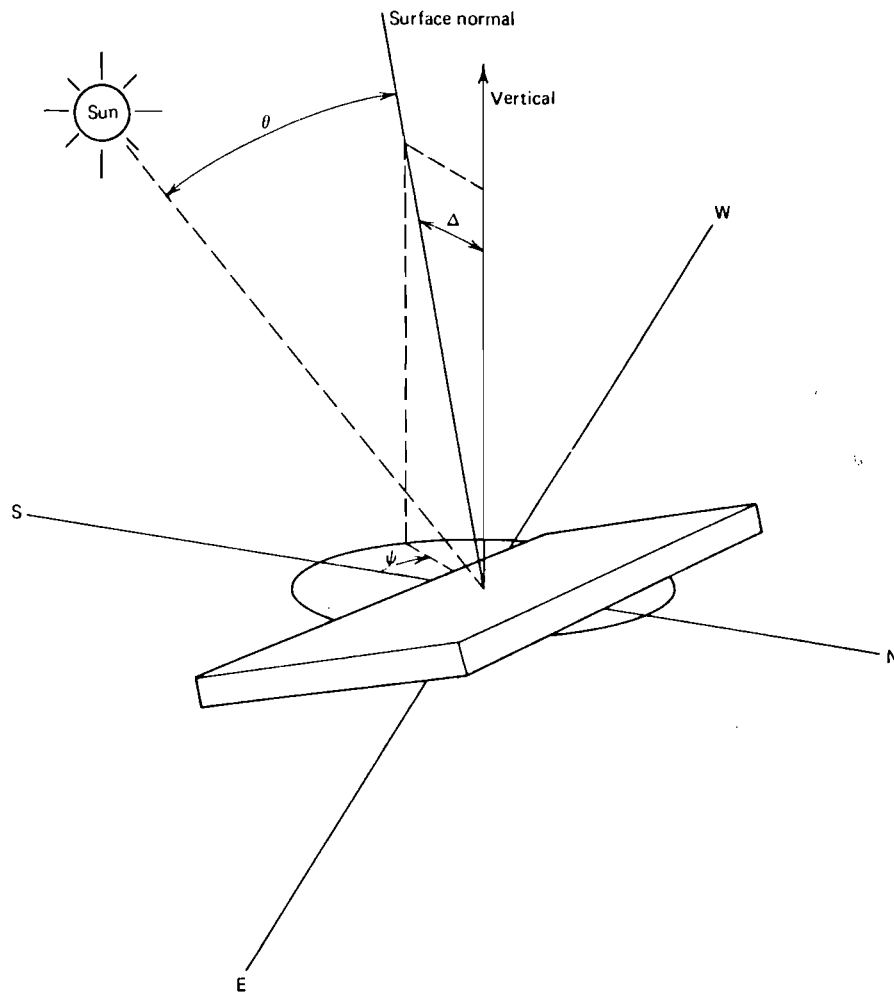


figure 2.7 : Une surface inclinée montrée avec les angles Δ , ψ et θ

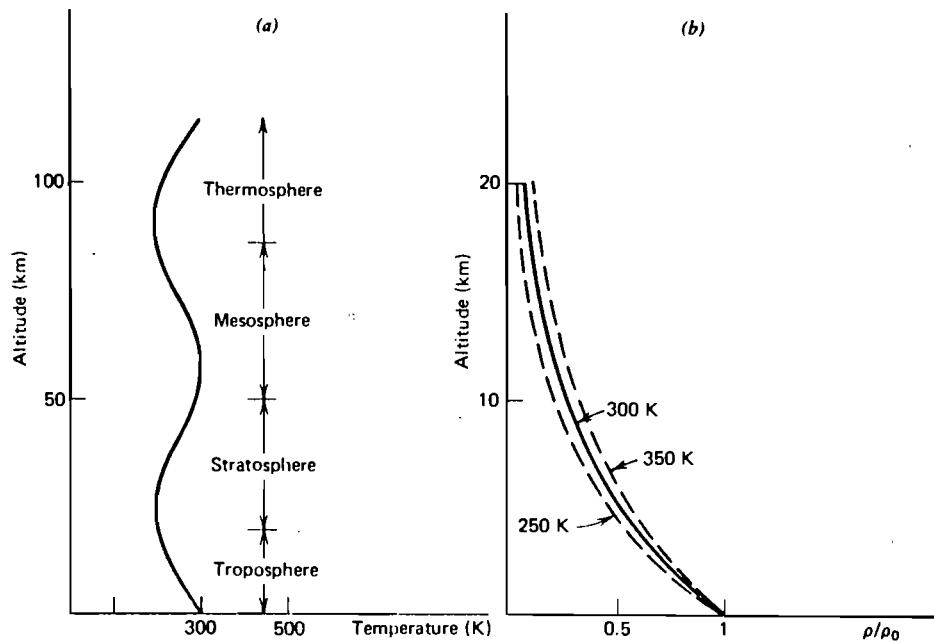


figure 3.1 : (a) le profil de température de l'atmosphère. (b) les profils de densité d'atmosphères isothermes à différentes températures.

la radiation incidente. Comme nous allons le voir, les molécules d'O₂ et de N₂ n'absorbent pas de façon appréciable dans le spectre solaire. D'autre part les molécules de CO₂ et de H₂O absorbent intensément dans certaines régions de la portion infrarouge du spectre solaire. De telles régions sont appelées bandes d'absorption caractéristiques. Dans les régions ultraviolettes du spectre solaire, les bandes d'absorption sont produites par l'ozone de la stratosphère.

La dispersion est un processus plus compliqué que l'absorption. Comme dans l'absorption, une fraction de l'énergie est déviée de la trajectoire monodirectionnelle de la radiation incidente. Cette quantité est déterminée par la section de dispersion massique, $\sigma^m(\lambda)$, du constituant. Contrairement à l'absorption, la dispersion ne convertit pas l'énergie radiante en chaleur mais le dévie suivant d'autres directions de l'espace. La dispersion atmosphérique de l'énergie solaire par jour clair est produite principalement par l'oxygène et l'azote. La théorie suggère que la dispersion de l'énergie solaire par les molécules d'air varie selon la loi de Rayleigh

$$\sigma_{\text{air}}^m(\lambda) = C/\lambda^4 \quad (\text{loi de Rayleigh}) \quad (3.7)$$

où C est un paramètre avec une légère dépendance avec la longueur d'onde.

Selon la loi de Rayleigh, les courtes longueurs d'onde telles que l'ultraviolet, le violet et le bleu, sont plus dispersées que le rouge ou l'infrarouge. D'autres particules telles que les particules de poussière dispersent la radiation d'une manière plus compliquée que ne le prédit la loi de Rayleigh.

La radiation qui a survécu aussi bien à la dispersion qu'à l'absorption est appelée composante direct ou atténuée. Pour une atmosphère stratifiée plane, cette composante peut être simplement calculée et est déterminée par un paramètre atmosphérique ne dépendant que de la longueur d'onde appelé épaisseur optique, τ_λ . Ce paramètre et la manière dont il affecte la direction de la radiation seront considérés en détail.

III.5 LA RADIATION SOLAIRE DIRECTE.

Nous avons supposé que les constituants de l'atmosphère étaient uniformément mélangés et que le profil de densité pouvait être représenté par $\rho = \rho(z)$.

Jusqu'à présent, nous avons caractérisé un point dans l'atmosphère par son altitude z qui variait de zéro, à la terre à l'infini, au dessus de l'atmosphère. Puisque la radiation arrive du haut de l'atmosphère et se propage vers la surface terrestre, il est plus adéquat d'introduire une variable s qui mesure la profondeur d'un point de l'atmosphère à partir du dessus. Cette variable prend des valeurs entre $s=0$ au dessus de l'atmosphère et $s=\infty$ à la terre. Les variations de l'altitude et de la profondeur sont reliées par la relation $dz = -ds$.

Imaginons qu'un faisceau de rayons solaires parallèles

constante solaire. Nous trouvons alors l'intensité directe au sol comme

$$I^{(dir)} = S_{\lambda} e^{-\tau_{\lambda} / \mu_0} \quad (3.10)$$

où S_{λ} se réfère à l'intensité spectrale de la constante solaire et $\tau_{\lambda} = \int_0^{\infty} k_{\lambda}(s) ds$ est appelé épaisseur optique spectrale de l'atmosphère pour un faisceau de longueur d'onde λ .

Cette intensité directe demeure essentiellement monodirectionnelle après avoir traversé l'atmosphère de telle manière que le flux spectral intercepté par une surface plane à la surface de la terre, inclinée d'un angle d'obliquité μ par rapport au faisceau est

$$F^{(dir)} = \mu I_{\lambda}^{(dir)} = \mu S_{\lambda} e^{-\tau_{\lambda} / \mu_0} \quad (3.11)$$

où $\mu = \cos\theta$. Il vient d'après l'équation (3.11) que le flux spectral direct tombant sur une surface plane au sol est déterminé par trois facteurs variables

-l'obliquité du panneau aux rayons solaires, $\mu = \cos\theta$.

-le cosinus de l'angle zénithal solaire, $\mu_0 = \cos Z$.

-l'épaisseur optique spectrale de l'atmosphère, τ_{λ} pour une radiation de longueur d'onde λ .

La quantité de flux interceptée par la surface décroît quand on augmente son obliquité par rapport au faisceau. $F_{\lambda}^{(dir)}$ décroît

lorsque l'angle zénithal croît car la distance parcourue par le faisceau à travers l'atmosphère augmente. La dépendance exponentielle selon $\cos Z$ explique le fait que le flux solaire décroît notablement lorsqu'on s'approche du coucher ou du lever du soleil.

Quelquefois, il est plus pratique d'écrire l'équation (3.10) comme suit

$$I_{\lambda}^{(dir)} = S_{\lambda} T_{\lambda}^m$$

où $T_{\lambda} = e^{-\tau_{\lambda}}$ est appelé transparence optique spectrale de l'atmosphère à une masse d'air unité et $m = 1/\cos Z$ est appelé le nombre de masses d'air traversées par le faisceau.

Lorsque le soleil est au zénith ($Z=0$), la radiation traverse une masse d'air unité. De la même manière, $Z = 60^{\circ}$ et $Z = 70.5^{\circ}$ correspondent à des masses d'air de 2 et 3 respectivement. L'épaisseur optique spectrale pour un état de l'atmosphère est due d'une part à l'absorption, $\tau_{\lambda}^{(a)}$ et d'autre part, à la dispersion, $\tau_{\lambda}^{(s)}$. Par temps clair, l'atténuation par absorption est due généralement au dioxyde de carbone et à la vapeur d'eau dans la troposphère et à l'ozone de la stratosphère. Le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau absorbent intensément dans certaines bandes de l'infrarouge tandis que l'ozone est responsable d'une absorption marquée dans des bandes privilégiées de l'ultraviolet.

L'atténuation par la dispersion moléculaire dans une atmosphère claire est due à l'oxygène et à l'azote et varie avec la longueur d'onde d'une manière plus régulière que pour l'absorption. En utilisant la loi de Rayleigh, équation (3.7), on peut établir les relations suivantes pour une dispersion dans une atmosphère exponentielle

$$\tau_{\lambda}^{(s)} = \left[\frac{32}{3} \pi^3 \frac{(n-1) \bar{M} H}{N_0 \rho_0} \right] \frac{1}{\lambda^4}$$

où n est l'indice de réfraction de l'air et $N_0 = 6.02E26$ mol/kg.mole est le nombre d'Avogadro. En utilisant des valeurs de $(n-1) \approx 2.8E-4$; $\bar{M} = 29$ uma; $H = 8000$ m et $\rho_0 = 1.29$ kg/m³, nous obtenons

$$\tau_{\lambda}^{(s)} = \frac{0.0076}{\lambda^4}$$

où λ est exprimé en μm . Cette formule donne des valeurs de $\tau_{\lambda}^{(s)}$ de 0.27, 0.12 et 0.04 pour les lumières violette (0.410 μm), verte (0.500 μm), et rouge (0.650 μm) respectivement. L'atténuation par dispersion moléculaire croît notablement lorsqu'on s'approche de la limite ultraviolette du spectre visible et est presque négligeable pour la radiation infrarouge. Une représentation de l'intensité solaire directe au niveau de la mer pour une masse d'air unité est montrée à la figure (3.4).

d'intensité spectrale I_λ soit incident sur une couche infinitésimale de l'atmosphère d'épaisseur ds située à une profondeur s (figure 3.2).

Le faisceau est incident à un certain angle zénithal Z . La variation unitaire de l'intensité lorsque le faisceau sort du bas de la couche, est donnée par

$$\frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = - \int (s) \sigma(\lambda) dl \quad (3.8)$$

où $\rho(s)$ et $\sigma(s)$ sont la densité et la section d'atténuation massique totale [$\sigma^a(\lambda) + \sigma^s(\lambda)$] de la couche, respectivement.

L'épaisseur dl est définie par $dl = ds/\mu_0$

où $\mu_0 = \cos Z$. On peut écrire l'équation (3.8) plus simplement comme suit

$$\frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = - k_\lambda(s) \frac{ds}{\mu_0} \quad (3.9)$$

où $k_\lambda(s) = \rho(s)\sigma(\lambda)$ est appelé coefficient d'atténuation spectrale.

Ce coefficient varie avec l'altitude de la couche et avec la longueur d'onde de la radiation incidente.

Pour déterminer l'atténuation de toute l'atmosphère, nous intégrons l'équation (3.9) entre $s = 0$ et $s = \infty$, en utilisant le fait qu'à $s = 0$, la distribution spectrale est celle de la

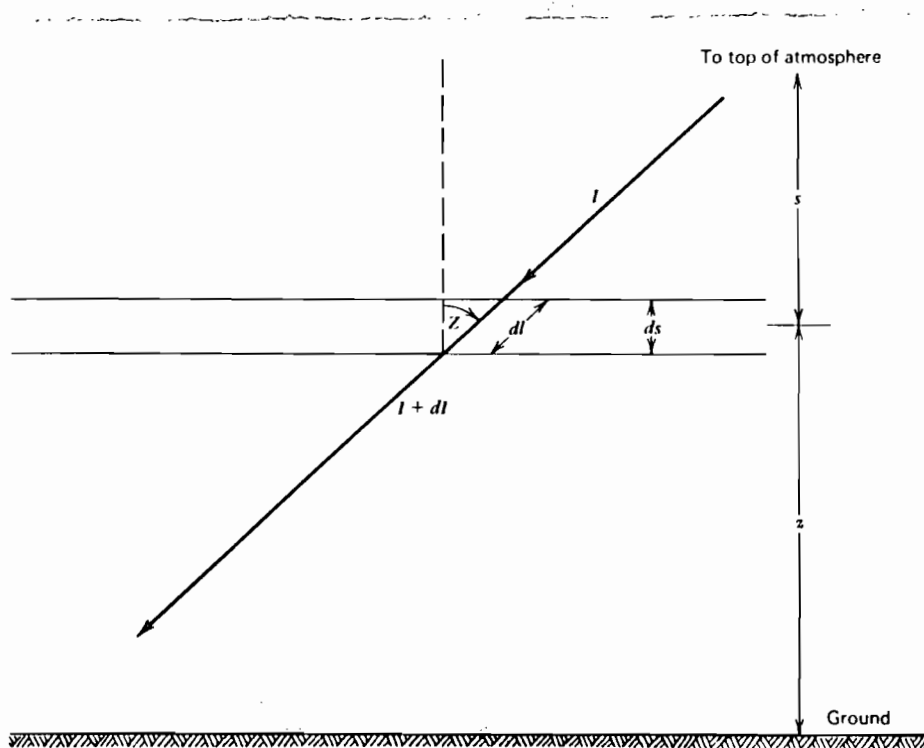


figure 3.2 : L'atténuation d'un rayon solaire direct d'intensité I par une couche différentielle de l'atmosphère. Le rayon est incident à un angle zénithal z .

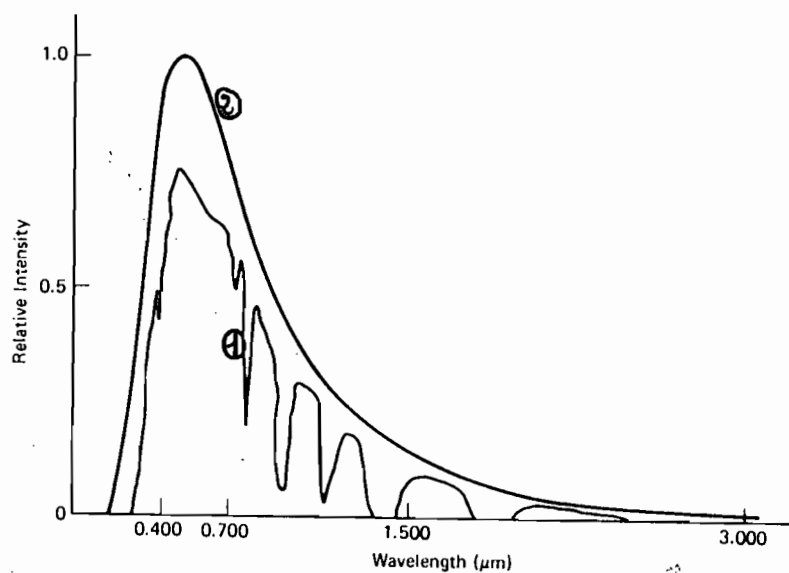


figure 3.3 : La distribution spectrale d'un faisceau solaire direct à une masse d'air unité (courbe ①). La distribution spectrale de la constante solaire (courbe ②).

Le flux direct total capté par une surface au niveau de la mer est obtenu en intégrant sur toutes les longueurs d'onde.

$$F^{(dir)} = \int_0^{\infty} \mu S_{\lambda} e^{-\tau_{\lambda}/\mu_0} d\lambda \quad (3.12)$$

Dans plusieurs applications, on s'intéresse plus au flux total qu'au flux spectral. Pour de telles applications, on peut se contenter d'utiliser une moyenne d'épaisseur optique pour le spectre solaire $\bar{\tau}_{\lambda} = \tau_{\lambda}$ et l'équation (3.12) s'écrit alors

$$F^{(dir)} = \mu e^{-\tau/\mu_0} \int_0^{\infty} S_{\lambda} d\lambda$$

ou

$$\boxed{F^{(dir)} = \mu e^{-\tau/\mu_0} S} \quad (3.13)$$

où $S = 1352 \text{ W/m}^2$ est la constante solaire. Nous utiliserons cette relation simple pour évaluer approximativement le flux solaire direct sur des surfaces inclinées au niveau de la mer. L'atmosphère sera relativement claire lorsque $\tau < 0.3$ et relativement opaque quand $\tau > 1$. Il est à noter que pour un jour donné et un état atmosphérique fixe, la variation horaire du flux direct est due à la dépendance de $\mu_0 \cos \theta$ et $\mu_0 = \cos Z$ avec l'an-

gle horaire. La représentation de F 'air' versus le temps solaire est donnée, d'après l'équation (3.13), à la figure (3.2).

III.6 LE FLUX DIFFUS.

Le flux solaire au niveau du sol est composé d'un faisceau monodirectionnel de flux direct et d'une composante de flux diffus. Cette composante diffuse est une radiation qui a été dispersée ou réfléchié aussi bien par les constituants atmosphériques que par des éléments au sol (constructions, terrains, etc ...). Même pour une atmosphère stratifiée plane, il est difficile de donner une formule théorique comme l'équation (3.13) pour évaluer la proportion de flux diffus dans le rayonnement solaire. Seulement, nous ferons une analyse semi-quantitative pour voir comment l'évaluer et comment les facteurs environnementaux l'affectent.

Jusqu'à présent, nous n'avons pas fait une distinction entre l'intensité et le flux de radiation solaire. Alors qu'elle n'était pas essentielle pour la radiation monodirectionnelle, elle devient nécessaire pour la radiation diffuse. Le terme intensité est utilisé pour désigner la distribution directionnelle de la radiation. Autrement dit, elle fournit des informations sur la distribution de la puissance radiante par unité de surface suivant plusieurs directions autour d'un point de l'espace. Nous caractérisons une direction donnée par le vecteur $\hat{\Omega}$. Pour une atmosphère stratifiée plane, on peut écrire l'intensité spectrale comme $I_{\lambda}(z, \hat{\Omega})$ indiquant que cette fonction dépend à la

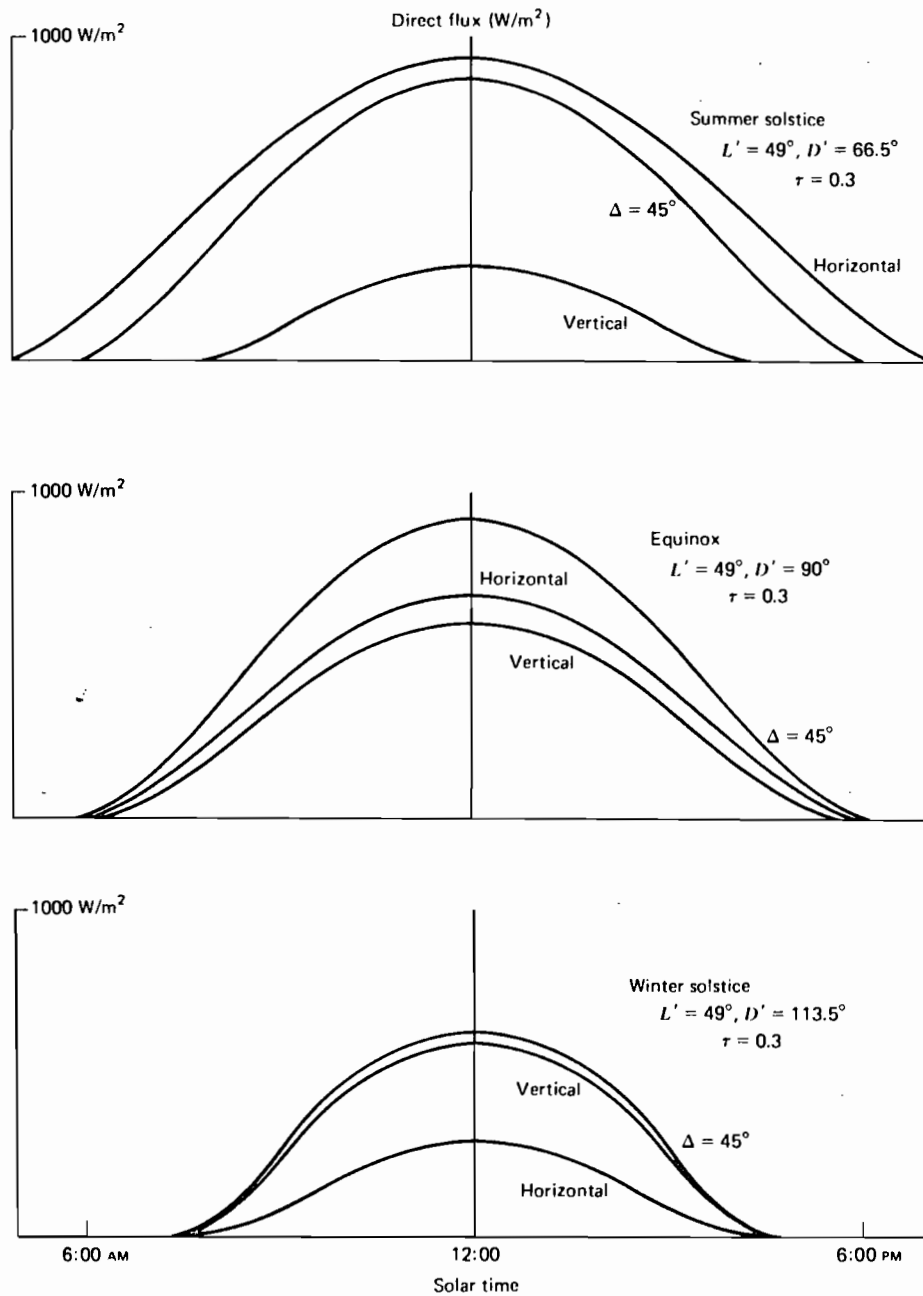


figure 3.4 : Le flux solaire direct horaire sur des surfaces à plusieurs inclinaisons pour différentes saisons. Tous les cas sont pour un observateur à une colatitude de $L' = 49^\circ$ et pour une épaisseur optique atmosphérique de $\tau = 0.3$.

fois de l'altitude et de la direction en question.

Lorsque $I_\lambda = I_\lambda(z)$ i.e l'intensité ne dépend pas de $\hat{\Omega}$, on dit que la radiation est isotrope. L'énergie radiante est alors également propagée dans toutes les directions. Si par contre la fonction $I_\lambda(z, \hat{\Omega})$ est très intense suivant une seule direction, disons $\hat{\Omega}_0$, et nulle suivant les autres directions, on parle de radiation monodirectionnelle. Alors que la composante directe de la radiation solaire est essentiellement monodirectionnelle, le composant diffus n'est pas une radiation purement isotrope.

Notons que dans la description de la fonction intensité, il n'a pas été fait mention d'une quelconque surface. Le concept de flux est intimement lié à la présence d'une surface spécifique. Si on considère une petite surface plane, dont l'orientation est caractérisée par sa normale intérieure i.e par un vecteur unitaire \hat{n} orienté perpendiculairement vers la surface, le flux spectral intercepté par cette surface est

$$F_\lambda(z, \hat{n}) = \int_{(\hat{n} \cdot \hat{\Omega} \geq 0)} I_\lambda(z, \hat{\Omega}) \hat{n} \cdot \hat{\Omega} d\Omega \quad (3.14)$$

où $\hat{n} \cdot \hat{\Omega}$ est le cosinus de l'angle entre \hat{n} et $\hat{\Omega}$ et $d\Omega$ l'angle solide différentiel autour de la direction $\hat{\Omega}$.

L'expression au bas de l'intégrale indique que l'intégration doit se faire sur les angles solides pour lesquels $\hat{n} \cdot \hat{\Omega} \geq 0$. Cela veut dire que seule la radiation arrivant sur la surface est prise en compte. l'équation (3.14) montre que le flux intercepté par une surface, même pour la radiation diffuse, dépend, en

général, aussi bien de l'orientation de la surface (sauf pour une radiation isotrope) que de sa position dans l'atmosphère.

La radiation diffuse n'est pas, en général, isotrope de telle manière que le flux intercepté dépend quelque peu de l'orientation de la surface. Cependant, cette dépendance n'est pas aussi marquée que dans le cas du flux direct.

III.7 EQUATIONS APPROXIMATIVES POUR LE FLUX SOLAIRE TOTAL.

Un calcul exhaustif de l'intensité totale (directe + diffuse) de l'insolation terrestre nécessiterait des équations ardues de la physique. Pour déterminer la fonction intensité $I(z, \hat{\Omega})$, nous avons besoin de résoudre une équation intégrodifférentielle connue sous le nom d'équation de transfert radiative. Même pour une atmosphère stratifiée plane, les solutions sont difficiles à développer. De ce fait l'équation ne sera traitée que superficiellement. Pour cela, nous ferons quelques considérations simplificatrices:

1) la composante diffuse est beaucoup plus petite que le flux direct.

2) la composante diffuse tombant sur une surface horizontale est isotrope.

3) le sol réfléchit la radiation incidente isotropiquement (loi de Lambert). La radiation réfléchie est alors isotrope.

En utilisant ces suppositions, nous voyons que le flux diffus est constitué d'un flux descendant isotrope $F \downarrow$ et

d'un flux ascendant isotrope $F^{\uparrow(\text{diff})}$. En outre le flux diffus total intercepté par une surface inclinée dépend de son angle d'inclinaison par rapport à la verticale, Δ , mais non de son angle azimuthal, ψ . Il peut être montré que pour les flux ascendant et descendant, le flux diffus total intercepté par une surface inclinée est

$$F^{\uparrow(\text{diff})} = \left[\frac{1 + \cos \Delta}{2} \right] F^{\downarrow(\text{diff})} + \left[\frac{1 - \cos \Delta}{2} \right] F^{\uparrow(\text{diff})}$$

de telle manière que le flux total (direct + diffus) intercepté est

$$F = F^{\downarrow(\text{dir})} + F^{\uparrow(\text{diff})}$$

ou

$$F = S_0 e^{-\tau/\mu_0} + \left[\frac{1 + \cos \Delta}{2} \right] F^{\downarrow(\text{diff})} + \left[\frac{1 - \cos \Delta}{2} \right] F^{\uparrow(\text{diff})} \quad (3.15)$$

On constate que le flux total est entièrement déterminé si on connaît $F^{\downarrow(\text{diff})}$ et $F^{\uparrow(\text{diff})}$. Ces deux flux peuvent être exprimés en fonction de trois paramètres environnementaux: l'épaisseur optique, τ , l'albedo de l'atmosphère, $\tilde{\omega}_0$ et la réflectivité, R , du sol. Les deux derniers paramètres sont définis comme suit

$$\tilde{\omega}_0 = \frac{\tau^{(=)}}{\tau} \quad \text{et} \quad R = \frac{F^\uparrow}{F^\downarrow}$$

où $\tau^{(=)}$ est l'épaisseur optique due à la dispersion et F^\uparrow et F^\downarrow sont respectivement, les flux descendant et ascendant au sol. Pour une atmosphère totalement dispersive (i.e pas d'absorption), $\tilde{\omega}_0 = 1$ alors que pour une atmosphère entièrement absorbant (i.e pas de dispersion), $\tilde{\omega}_0 = 0$. Les paramètres τ , ω_0 et R dépendent, bien sûr, de la longueur d'onde mais nous prendrons des valeurs moyennes sur le spectre solaire. On peut exprimer les flux diffus ascendant et descendant en fonction de ces paramètres comme suit

$$F^{\downarrow(\text{diff})} = S\mu_0 \left[\frac{1}{1+G} (G e^{\gamma+\tau} + e^{\gamma-\tau}) - e^{-\tau/\mu_0} \right] \quad (3.16a)$$

$$F^{\uparrow(\text{diff})} = RS\mu_0 \left[\frac{1}{1+G} (G e^{\gamma+\tau} + e^{\gamma-\tau}) \right] \quad (3.16b)$$

où

$$A \quad G = \left[\frac{\gamma^- + A + BR}{\gamma^+ + A - BR} \right] e^{(\gamma^- - \gamma^+) \tau}$$

$$\gamma^\pm = \frac{1}{2} (C - A) \pm \frac{1}{2} \left[(C + A)^2 - 4BD \right]^{1/2}$$

et où

$$A = \frac{2 - \tilde{\omega}_0}{2\mu_0}$$

$$B = \tilde{\omega}_0$$

$$C = 2 - \tilde{\omega}_0$$

$$D = \frac{\tilde{\omega}_0}{2\mu_0}$$

Il est à noter que lorsqu'il n'y a pas de dispersion ($\tilde{\omega}_0 \rightarrow 0$), le flux diffus ascendant est nul (i.e. $F_{\text{diff}}^{(\text{diff})} \rightarrow 0$).

Par ailleurs, il est évident que lorsque la réflectivité du sol est nul, il n'y aura pas de composant ascendant.

L'exactitude des résultats pour le flux diffus dépend aussi bien de la validité du modèle utilisé pour développer les équations (3.15) et (3.16) que du choix de τ , $\tilde{\omega}_0$, et R . Les paramètres environnementaux sont difficiles à mesurer expérimentalement et évidemment varient d'un jour à l'autre.

IV. LA PHOTOPILE SOLAIRE.

IV.1 HISTORIQUE. [réf. 9]

1877: W.G.Adams et R.E.Day découvrent l'effet photovoltaïque de sélénium (métalloïde analogue au soufre et dont la conductivité électrique augmente avec la lumière qu'il reçoit).

1905: A.Einstein s'aperçoit que les rayons solaires étaient une combinaison d'ondes électromagnétiques et d'une radiation de particules. Il reçoit le prix Nobel en 1927 pour sa découverte de l'effet photoélectrique.

1940: Adler, reprenant une idée émise par Garrison en 1923, montre que la tension d'un circuit ouvert d'une pile varie comme le logarithme de l'intensité d'illumination alors que le courant varie d'une façon linéaire.

1941: R.S.Ohl décrit la première jonction PN dans le silicium à effet photovoltaïque.

1955: C.S.Fuller, G.L.Pearson et M.B.Prince (pour des recherches de la Bell Telephone Laboratories aux USA) annoncent la mise au point d'une cellule à haut rendement (8%) marquant véritablement la naissance des photopiles solaires.

IV.2 PRINCIPE

L'énergie lumineuse du rayonnement solaire tombant sur un semi-conducteur, est capable d'y créer des électrons et des trous; chaque quantum d'énergie produit une paire électron-trou. Dans un semi-conducteur homogène, ces porteurs de charge subissent l'agitation thermique et se recombinent au fur et à mesure

de leur création; mais s'il existe une barrière de potentiel comme dans le cas d'une jonction PN, les électrons sont entraînés dans un sens et les trous dans le sens opposé, et on peut obtenir ainsi un courant électrique: c'est l'effet photovoltaïque.

IV.3 CAUSES DE LIMITATION DU RENDEMENT DES PHOTOPILES.

La création d'une paire électron-trou dans le silicium demande 1.12 eV. La partie du rayonnement solaire dont la longueur d'onde dépasse 1.1 μ est donc perdue. D'autre part chacun des photons d'énergie $h\nu > 1.12$ eV ne crée qu'une paire électron--trou, la différence $h\nu - 1.12$ est également perdue. Les photons énergétiques ($h\nu > 3$ eV) peuvent, il est vrai, créer plusieurs paires électron-trou, mais leur nombre dans le rayonnement solaire est réduit.

A cause de ces pertes 30% de l'énergie solaire au maximum est susceptible d'être transformée par une photopile au silicium. Si l'on prend en compte les pertes par réflexion, on tombe à 24%.

Alors que le rendement d'une photopile peut théoriquement atteindre 15%, on ne peut dépasser industriellement 8 à 10% (une pile de 5cm² fournit environ 50 mW pour la meilleure illumination solaire).

IV.4 CARACTERISTIQUES DE LA PHOTOPILE.

Une pile solaire au silicium est constituée par une plaque de silicium de type N, de résistivité $\approx 1 \Omega.cm$ sur laquelle a été formée, par diffusion gazeuse de bore, à haute

température, une couche de silicium de type P, de résistivité $\approx 1E-3 \Omega.cm$, d'épaisseur $1 \approx 2 \mu$ (figure 4.1).

La surface de la pile est limitée par la difficulté de préparation de monocristaux de silicium de très grande dimension.

On peut se représenter un circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque comme un générateur de courant débitant sur une charge donnée comme l'indique la figure (4.2) (si on néglige les résistances série inhérentes à la fabrication des photopiles).

Il s'agit là de jonctions de surface beaucoup plus grandes que dans les redresseurs. Les caractéristiques de telles jonctions diffèrent de celles des jonctions classiques. Ainsi, si l'on peut prendre comme équation de la caractéristique d'une jonction non éclairée comme conforme au modèle de SHOCKLEY:

$$I_j = I_0 (e^{qV/nkT} - 1) \quad (4.1)$$

où

I_j : courant traversant la jonction

I_0 : courant de saturation inverse (de l'ordre de $1E-13$ à $1E-15$)

v : tension aux bornes de la jonction

kT/q : potentiel thermique

$$= 25 \text{ mV à } 22 \text{ }^\circ\text{C et } 26 \text{ mV à } 27 \text{ }^\circ\text{C}$$

n : coefficient d'idéalité de la diode (constante sans dimension dont la valeur se situe entre 1 et 2)

k : la constante de Boltzmann

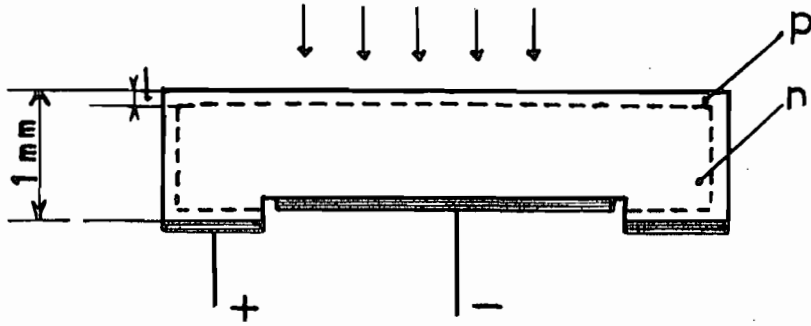


figure 4.1 : Schéma d'une photopile solaire en silicium.

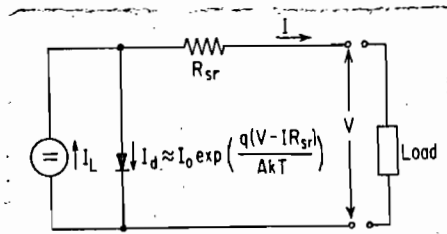


figure 4.2 : Circuit équivalent ^{d'une} cellule photovoltaïque.

q : la charge de l'électron

T : température absolue en Kelvins

Une telle jonction est trop simple pour représenter les jonctions de grande surface obtenue par diffusion. On peut cependant faire un calcul approché en admettant la formule (4.1); la caractéristique de la jonction éclairée aura pour équation

$$I = I_{ph} - I_0 (e^{qV/nkT} - 1) \quad (4.2)$$

et la tension de circuit ouvert

$$V_{co} = (kT/q) \ln(1 + I_{ph} / I_0) \quad (4.3)$$

La tension de circuit ouvert est donc contrôlée par la valeur du courant de saturation I_0 , qui dépend des propriétés du silicium de type N employé pour la photopile.

$$I_0 \simeq 1/n (D_p / \tau_p) \quad (4.4)$$

où

n=nombre d'électrons libres

D_p =vitesse de diffusion=constante=13 cm²/s

τ_p =durée de vie des trous dans le silicium du type N

Donc I_{sc} est d'autant plus faible que n et τ_p sont grands. Si on admet que $I_{sc} \approx 1E-7$ A/cm², alors $V_{oc} \approx 0.5$ V pour une illumination de 100 mW/cm².

Les résistances série ont pour effet de diminuer le courant de court-circuit et d'aplatir la courbe caractéristique (figure 4.3b); le rendement s'en trouve notablement réduit (figure 4.3b). L'origine des résistances est double:

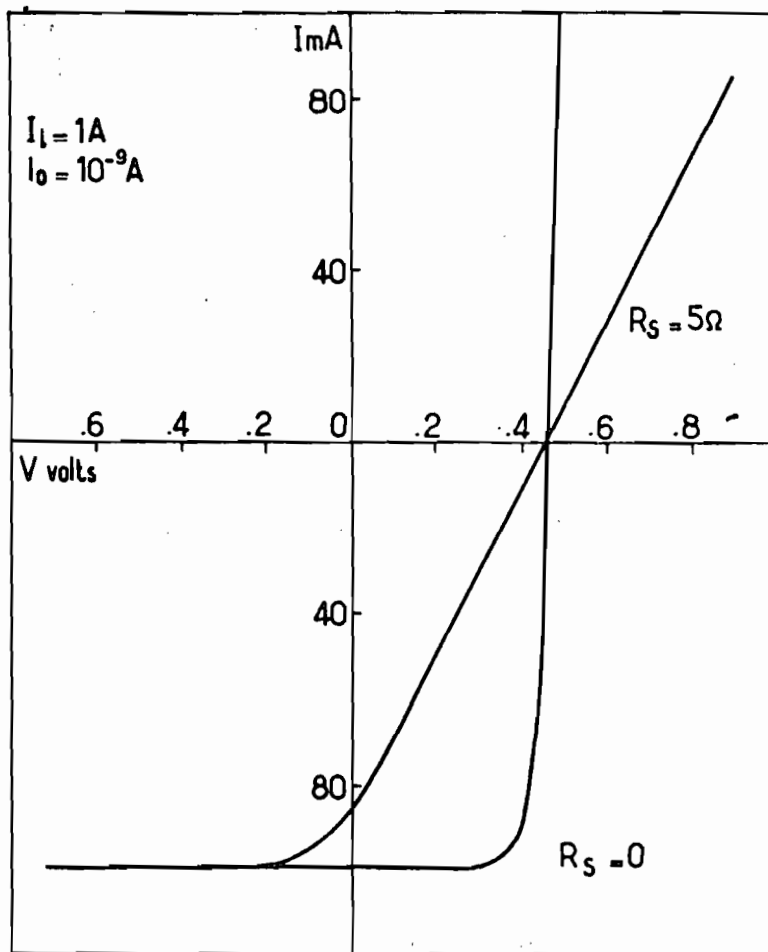
- la couche superficielle de type N a une résistance importante, d'autant plus grande que l est faible.

- les contacts sur les zones P et N ne sont jamais parfaits.

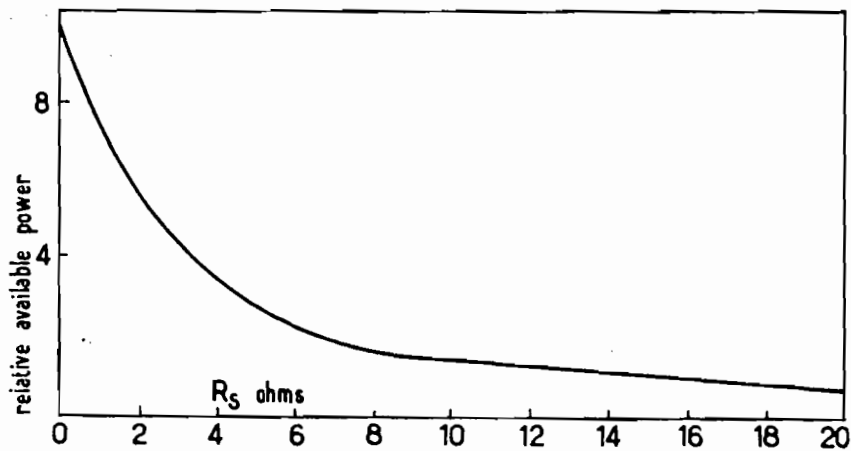
Le choix de l résulte d'un compromis entre les pertes par effet Joule et les pertes par recombinaison, qui croissent de façon très rapide si l dépasse la longueur de diffusion L_n des électrons dans la zone P. Les contacts électrique de faible résistance demeurent l'un des problèmes les plus difficiles dans la technologie des piles solaires.

La figure (4.4) représente la caractéristique courant-tension de deux piles solaires au silicium, à la température de 20°C. A représente une pile solaire commerciale de rendement 2.5%, B représente une pile de rendement 11% obtenue en laboratoire en 1957.

Les photopiles au silicium ont un rendement qui croît quand on abaisse la température et qui décroît quand on l'élève. C'est la tension de circuit ouvert V_{oc} qui varie avec la température, selon une loi exponentielle; le rendement est divisé par deux



(a)



(b)

figure 4.3 : (a) Influence de la résistance serie sur la caractéristique (b) sur le rendement d'une photopile au silicium.

vers 100 °C. Plus importante pour l'utilisateur est la loi de variation du rendement avec l'éclairement. Quand l'intensité de la lumière incidente croît, I_0 croît linéairement et V_{oc} croît logarithmiquement (figure 4.5). La tension pour le rendement maximal varie également, passant par exemple de 250 mV à 150 mV quand l'éclairement est divisé par 10.

A cause des grandes variations de l'éclairement solaire, l'emploi normal d'une photopile consiste à charger des accumulateurs. Une photopile solaire ne travaillera dans les conditions de rendement maximum, que pour un éclairement donné; il en résulte des chutes de tensions qui peuvent être appréciables.

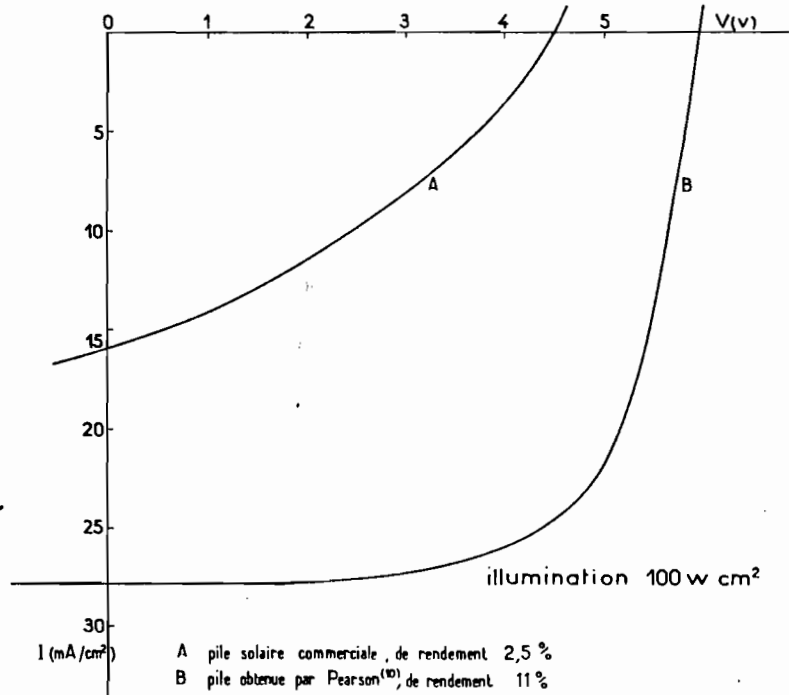


figure 4.4 : Caractéristiques de photopiles solaires au silicium.

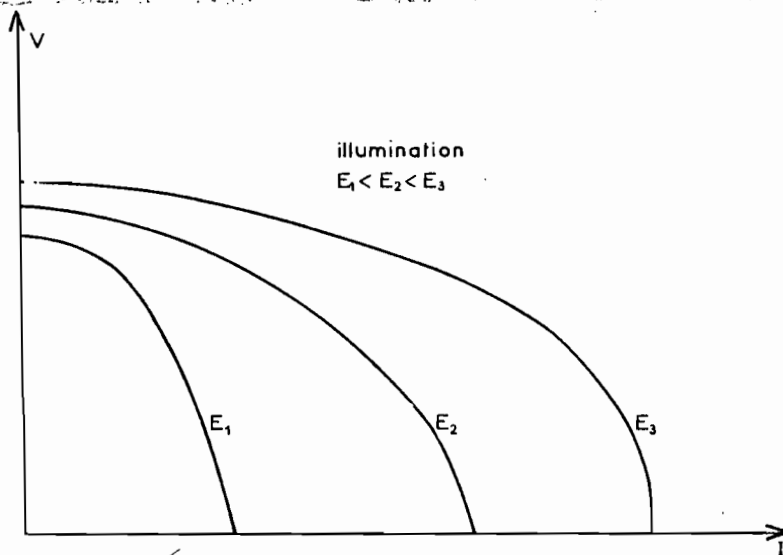


figure 4.5 : Variation de la caractéristique d'une photopile au silicium avec l'illumination.

V. LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES AVEC BATTERIE. [réf 8]

V.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.

V.1.1 SCHEMA DE PRINCIPE.

Un générateur photovoltaïque avec batterie comprend généralement différents composants de base comme l'indique la figure (5.1) suivante :

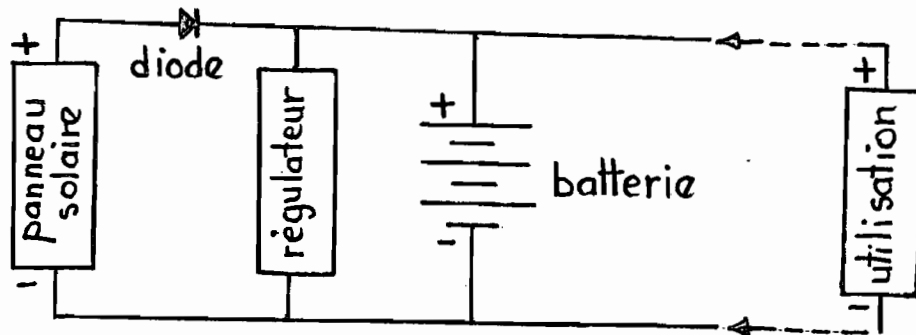


figure 5.1 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque.

-le panneau solaire charge la batterie en période d'ensoleillement.

-la batterie d'accumulateurs assure le stockage journalier et saisonnier de l'énergie électrique.

-la diode anti-retour évite la décharge des accumulateurs à travers le panneau solaire en période d'obscurité.

-le régulateur protège la batterie contre la surcharge et éventuellement contre les décharges profondes occasionnelles.

Chaque composant doit être déterminé en fonction des contraintes techniques et économiques.

V.1.2 MODES DE FONCTIONNEMENT.

Cinq modes de fonctionnement peuvent exister en fonction de l'ensoleillement et du courant d'utilisation (hors régulation).

a) -la charge est déconnectée,

-le courant du panneau solaire, fonction de l'ensoleillement charge la batterie.

b) -la charge est connectée,

-le courant provenant du panneau solaire I_p est supérieur au courant d'utilisation I_u ,

-le courant excédentaire I_b charge la batterie

$$I_p = I_b + I_u .$$

c) -la charge est connectée,

-le courant provenant du panneau solaire se trouve, pour un ensoleillement donné, égal au courant d'utilisation

$$I_p = I_u ,$$

-aucun courant ne traverse la batterie $I_b = 0$.

d) -la charge est connectée,

-le courant provenant du panneau solaire est inférieur au courant d'utilisation,

-la batterie se décharge en fournissant le courant déficitaire

$$I_b = I_u - I_p .$$

e) -la charge est connectée,

-le courant provenant du panneau solaire est nul $I_p = 0$

(période d'obscurité),

- la diode anti-retour est bloquée,

- la batterie se décharge en fournissant le courant d'utilisation,

$$I_b = I_u .$$

NB: Dans tous les cas la tension du système est imposée par la batterie.

V.1.3 CARACTERISTIQUE DE FONCTIONNEMENT.

L'étude d'adaptation d'un module solaire branché sur une batterie revient à superposer les caractéristiques courant-tension du module et de la batterie en charge.

En première approximation, nous pouvons considérer qu'un accumulateur se charge sous une tension presque constante en dehors des courtes périodes de début et de fin de charge.

La tension de la batterie V_b peut être exprimée en fonction de la force contre électromotrice E_0 et de la résistance interne qui est très faible.

$$V_b = E_0 + rI \quad (5.1)$$

Si on réalise la liaison photopiles-batterie, le point de fonctionnement sera déterminé par l'intersection des deux courbes

$I_p = f(V_p)$: caractéristique du module

$$V_p = V_b + RI_p + V_d$$

$= E_0 + V_d + (r+R)I_p$: caractéristique de la batterie, diode

et câble

V_d : chute de tension dans la diode

R : résistance électrique des câbles.

Une bonne adaptation est obtenue lorsque la caractéristique de charge est pratiquement perpendiculaire à l'axe des tensions dans la zone des puissances optimales (figure 5.2). Cette condition justifie le nombre de 36 cellules en moyenne pour les modules adaptés à la recharge d'une batterie de tension nominale 12 V.

En effet la tension correspondant aux points de puissance maximale (14.3 V à 60°C) est égale à la chute de tension dans les câbles et diodes (0.8 V) additionnée à la tension de fin de charge de la batterie (6*2.25 V/élément pour le Plomb).

La température des cellules solaires prise en considération est de 60°C en considérant que celle-ci est supérieure de 20°C environ par rapport à la température ambiante qui peut être très élevée dans certaines zones géographiques (40°C).

V.2 LE PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE.

Pour obtenir des puissances importantes, il est nécessaire d'associer les modules solaires en série-parallèle pour constituer le panneau solaire. Ceux-ci sont reliés électriquement et assemblés sur un châssis. Il est d'usage de représenter la taille d'un panneau par sa puissance-crête. Cependant, il est nécessaire d'indiquer le mode de groupement des modules pour définir complé-

tement le système.

V.2.1 GROUPEMENT DES MODULES.

Selon la puissance de l'utilisation, la tension de la batterie peut être différente. En effet,

-un module de 36 cellules au silicium monocristalin étant adapté pour la charge d'une batterie de 12 V, la tension d'utilisation détermine le nombre de modules à mettre en série (2 pour 24, 4 pour 48)

-le dimensionnement du système solaire détermine le nombre de branches à mettre en parallèle pour un fonctionnement satisfaisant de l'ensemble en fonction de la consommation de l'utilisation et de l'ensoleillement du lieu.

V.2.2 LE CHASSIS.

Le panneau solaire est constitué de modules photovoltaïques assemblés sur un support généralement métallique. Cette charpente est réalisée le plus souvent en aluminium ou acier galvanisé. Ce choix de matériau est justifié par la contrainte d'environnement:

- résistance mécanique (vent)
- tenue à la corrosion
- conductivité thermique
- facilité d'assemblage
- poids
- etc ...

De nombreux types de châssis existent et sont fonction

- du nombre de modules et de leur taille,

- du support d'implantation (dalle, mûr, toit, ...),
- de leur hauteur,
- de leur inclinaison.

Leur hauteur doit être telle que les modules solaires soient hors de portée d'éléments indésirables (flore, faune, ...).

Leur inclinaison est généralement fixe et déterminée par le dimensionnement.

V.2.3 LE CABLAGE.

Le câblage a pour but de regrouper électriquement l'ensemble des modules solaires.

Généralement, les modules sont tout d'abord reliés en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série (rôle d'anti-retour vis-à-vis de la batterie et des branches voisines). La mise en parallèle est réalisée à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis.

Il est indispensable d'apporter un soin particulier au câblage d'une installation. En effet, une chute de tension trop importante dans les câbles peut réduire considérablement le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre le panneau solaire et la batterie.

V.3 LES ACCUMULATEURS.

V.3.1 GENERALITES.

Il y aura nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet, alors que la demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, l'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (nuage ou non).

Ce décalage nécessite alors un stockage d'électricité pour subvenir aux besoins de la charge à temps utile. Le système tampon le plus couramment utilisé pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques dont la plus répandue est l'accumulateur au Plomb.

V.3.2 LES ACCUMULATEURS AU PLOMB.

V.3.2.1 Description.

C'est un dispositif constitué de deux faisceaux de plaques parallèles positives et négatives (électrodes) baignant dans un électrolyte contenu dans un bac en matière isolante (verre ou matière plastique).

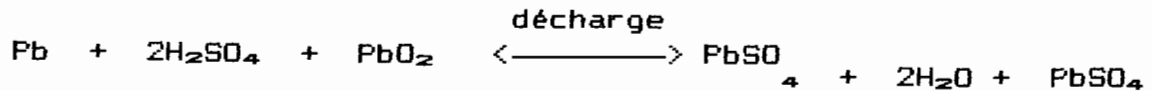
*l'électrode positive est une plaque rectangulaire en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont déposés des lamelles ou des tubes constitués par de l'oxyde de plomb.

*l'électrode négative est une plaque de plomb à surface gaufrée dont les alvéoles sont garnis de plomb spongieux.

*l'électrolyte est une solution d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie.

V.3.2.2 Principe.

Le principe est basé sur un cycle de transformations chimiques réversibles qui peut être sommairement décrit par la double équation suivante:



Cette description simplifiée du principe est de loin, à même de rendre compte de toutes les observations suivantes:

-Pendant la décharge, la concentration de l'acide sulfurique décroît. Inversement, de l'acide sulfurique se forme pendant la charge. Le moyen le plus sûr de vérifier l'état de charge d'une batterie est de mesurer la densité de l'électrolyte; ce qui permet de connaître la concentration en acide.

-En fin de charge, si on prolonge le passage du courant, l'hydrogène et l'oxygène résultant de la décomposition de l'eau, finissent par se dégager à l'état gazeux sur les électrodes (électrolyse).

-Si la décharge se produit trop longtemps ou si on ne surveille pas la concentration d'acide sulfurique, celui-ci peut attaquer les plaques en donnant du sulfate de plomb PbSO_4 , qui n'est plus détruit par la suite. L'accumulateur se sulfate; il finit par devenir inutilisable.

On voit qu'il est important de surveiller l'état de charge ou de décharge de la batterie au plomb pour la conserver en bon état car un fonctionnement prolongé dans un sens ou dans l'autre aboutirait à la destruction définitive de l'accumulateur.

V.3.2.3 Caractéristiques.

V.3.2.3.1 Tension

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V avec une variation entre 1.7 V et 2.4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.

charge: après un court régime transitoire, la tension s'établit à la valeur de 2.2 V pour s'accroître rapidement en fin de charge pour une valeur de 2.6 V (charge cyclique) ou entre 2.25 et 2.35 V par élément (régulation de charge).

décharge: pendant la décharge, la tension reste pratiquement constante (2 V) avec une diminution brusque à 1.8 V. Il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques.

En pratique, on ne descend pas en général au dessous de 20% ou davantage de la capacité de la batterie. Sinon la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où une baisse de tension.

V.3.2.3.2 La résistance interne

La résistance d'un accumulateur est très faible (de l'ordre de quelques centièmes d'Ohm) et généralement négligeable dans les applications numériques.

Cette faible résistance présente d'ailleurs un inconvénient: quand les deux bornes sont accidentellement mises en contact électrique par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit restant très faible, l'intensité du courant

débité est alors considérable; l'accumulateur ainsi mis en court-circuit est rapidement hors d'usage.

V.3.2.3.3 Capacité.

La capacité est la quantité d'électricité généralement exprimée en ampères-heures (Ah), qu'un accumulateur chargé peut faire circuler pendant la période de décharge.

La capacité d'un élément est fonction du régime de décharge; la capacité nominale C_n d'une batterie étant généralement donnée pour un régime de décharge en 10 heures (C/10).

Pour un régime de décharge plus élevé ($I > C/10$), la capacité diminue.

Pour un régime de décharge plus faible ($I < C/10$), la capacité augmente.

Le courant de décharge est évalué en fonction de la capacité exprimée en Ah.

V.3.2.3.4 Rendement.

On distingue deux rendements:

-le rendement en Ah (ou faradique) qui est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge et la quantité d'électricité fournie lors de la charge. Il est de l'ordre de 20%.

-le rendement en énergie (ou énergétique) qui est de l'ordre de 70 à 80%. Ce rendement est plus faible car les ampères-heures ne sont pas stockés et restitués à la même tension.

V.3.2.3.5 Auto-décharge.

Le taux d'auto-décharge, τ , d'un accumulateur représente la perte moyenne relative de capacité par mois et pour une température donnée.

$$\tau (\%) = \frac{Q_{ae} - Q_{pe}}{nQ_{ae}} \quad (5.2)$$

où

Q_{ae} : capacité avant stockage.

Q_{pe} : capacité après stockage.

n : durée de stockage en mois.

L'auto-décharge est une caractéristique interne découlant de la technologie utilisée et est généralement donnée pour une température de 20°C.

Elle varie très rapidement avec la température (elle double de valeur tous les 10 °C).

V.3.2.3.6 Durée de vie.

La durée de vie des accumulateurs est directement liée à leurs conditions d'utilisation. Pour une utilisation en stockage tampon, elle dépend essentiellement du nombre et de l'amplitude des cycles charge-décharge. En limitant la profondeur de décharge journalière (< 15% C_n) et la profondeur de décharge saisonnière (< 60% C_n), on estime la durée de vie des accumulateurs à 6 ou 7 ans, ceux-ci étant protégés contre la surcharge.

V.4 REGULATION ELECTRONIQUE.

Elle a pour but de réguler la charge et la décharge de la batterie. La régulation de charge est obtenue par limitation en tension de la batterie (de l'ordre de 2.25 V / élément), afin d'éviter

- une surcharge entraînant une perte en eau,
- un vieillissement prématuré des accumulateurs.

La protection contre les décharges profondes est réalisée par un disjoncteur automatique dont le but est d'éviter la sulfatation des plaques.

La régulation de charge peut s'effectuer selon trois principes différents.

-régulation parallèle (shunt): le régulateur de charge intervient en dérivation sur la panneau solaire pour diissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique, grâce à des composants de puissance.

-régulation série par semi-conducteur: le régulateur intervient en série avec le panneau solaire. Un semi-conducteur se comporte comme une résistance variable en fonction de l'état de charge de la batterie.

-régulation série par coupure électromagnétique: le régulateur de charge intervient en série avec le panneau solaire. Il interrompt la charge de la batterie par coupure électromagnétique lorsqu'elle atteint un seuil maximum. La remise en charge est automatique à prtir d'un seuil de tension inférieur.

Lors de situations exceptionnelles (mauvais ensoleillement,

panne du générateur, abus de consommation, etc...), il est nécessaire de limiter la décharge profonde de la batterie pour éviter la sulfatation des plaques. Le principe de disjonction est identique à celui de la régulation par coupure électromagnétique. Un circuit électronique à double seuil va commander un relais dont le contact se trouve dans le circuit de décharge.

VI. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME

VI.1 CARACTERISTIQUES DE LA CHARGE.

Au niveau des différentes boulangeries que nous avons eu à visiter, nous avons répertorié un certain nombre de charges que nous avons jugées importantes.

-Le pétrin: appareil qui sert pour le pétrissage de la pâte de farine. Il utilise un moteur AC monophasé 220 V, 50 Hz.

-La façonneuse: utilisée pour présenter la pâte de farine sous forme de baguettes qu'on peut introduire dans le four après fermentation. Elle est aussi munie d'un moteur AC monophasé 220V, 50 Hz.

-Le four: fonctionne avec du gaz-oil mais utilise un brûleur pour produire l'étincelle nécessaire pour enflammer le combustible. Cet étincelle est générée par imposition d'une tension très élevée entre les électrodes du brûleur. Le four est doté, par ailleurs, de systèmes de contrôle et de régulation de la température et de l'énergie de chauffe. Il est aussi équipé de lampes d'éclairage pour son utilisation.

-L'éclairage: il s'agit là de l'éclairage du fournil, de la salle de fermentation, du dépôt de pain et de la salle du gérant.

Les caractéristiques des différentes charges sont consignées dans le tableau suivant (les puissances sont celles pour une boulangerie de taille moyenne):

<u>CHARGES</u>	<u>PUISSANCE (kW)</u>	<u>DUREE D'UTIL.</u> (hrs/jour)	<u>ENERGIE CONSOM.</u> (kWh/jour)
Pétrin	5.5	6	33.0
Fogonneuse	0.6	6	3.6
Four	2.0	7	14.0
Eclairage	0.4	7	2.8
Charge totale -----			53.4

VI.2 DIMENSIONNEMENT.

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque a pour but de déterminer la puissance-crête du panneau solaire et la capacité de la batterie associée à partir des données d'ensoleillement du site d'une part et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. Cette détermination des composants doit permettre de garantir une fourniture d'énergie pendant la période désirée.

Pour ce faire, nous utiliserons deux méthodes de dimensionnement.

VI.2.1 Première méthode.

Variables utilisées:

E_0 : insolation du champ (en kWh/m².jour)

$P_{crête}$: puissance-crête du générateur (en Wc)

V_{bat} : tension nominale de la batterie (en V)

Capa.bat: Capacité de la batterie (en Ah)

Taux.déch: Taux de décharge admissible de la batterie

Rdt.bat: rendement énergétique de la charge/décharge de la batterie

Ener.ut: énergie utile délivrée par la batterie (kWh/j)

Rdt.ond: rendement de l'onduleur

Corr.temp: facteur de correction de température

Pert.res: pertes dans le réseau

Rdt.adapt: rendement d'adaptation générateur-batterie

VI.2.1.1 Le générateur.

Le rendement du générateur (quantité d'énergie qu'il peut produire) est égal au produit de l'insolation du champ par sa puissance-crête [réf.10]. En tenant compte des pertes dans le réseau, on aura

$$\text{Ener.ut} = E_0 * P_{\text{crête}} * (1 - \text{Corr.temp}) * (1 - \text{Pert.res}) * \text{Rdt.adapt} * \\ * \text{Rdt.bat} * \text{Rdt.ond}$$

d'où

$$P_{\text{crête}} = \frac{\text{Ener.ut}}{E_0 * (1 - \text{Corr.temp}) * (1 - \text{Pert.res}) * \text{Rdt.adapt} * \text{Rdt.bat} * \text{Rdt.ond}}$$

Sachant que l'énergie utile doit être égale à l'énergie consommée par les charges (Ener.ut = 53.4 kWh) et que les différents facteurs qui interviennent dans l'équation ci-haut ont pour valeurs

$$E_0 = 5.83 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{jour}$$

$$\text{Corr.temp} = 0.9$$

$$\text{Pert.res} = 0.95$$

$$\text{Rdt.adapt} = 0.9$$

$$\text{Rdt.bat} = 0.85$$

$$\text{Rdt.ond} = 0.9$$

On trouve,

$$\begin{aligned} P_{\text{crête}} &= 53.4\text{E}3 / (5.83 * 0.9 * 0.95 * 0.9 * 0.85 * 0.9) \\ &= 15560 \text{ Wc} \quad 15.56 \text{ kWc} \end{aligned}$$

Pour des modules M55 de 53 Wc et 0.33 m x 1.29 m, il faudra

$$15560/53 = 294 \text{ modules.}$$

soit

$$294 * 0.4257 = 125.1558 \text{ m}^2 \text{ de surface de panneau.}$$

Pour une puissance-crête supérieure à 1 kWc, il faut un système en 48 V [réf.10]. Donc le système comprendra 4 modules en série et par conséquent 74 modules en parallèle; ce qui fera un total de 296 modules.

VI.2.1.2 La batterie.

Le stockage a pour but

-d'emmagaziner, le jour, l'énergie consommée pendant la cuisson du pain.

-de compenser la variation d'ensoleillement au cours du mois ou une période plus longue.

Pour cette deuxième raison en particulier, il y'aura avantage à équiper un système d'une capacité de batterie égale à 3 à 5 fois la consommation journalière (nous prendrons, ici 3).

Nous utiliserons des batteries de 75 Ah en 12 V ayant une capacité utile de 15 Ah (20% de décharge admissible), soit une

quantité d'énergie de $15 \times 12 = 150$ Wh.

Il nous faudra alors

$$53.4 \times 3 / 150 = 1068 \text{ batteries.}$$

soit 4 batteries en série et 267 en parallèle.

VI.2.2 Deuxième méthode.

VI.2.2.1 Principe.

Cette méthode est basée sur le fait qu'en moyenne, sur une année, l'énergie journalière fournie par un panneau solaire (W_s) doit être au moins égale, à un coefficient correctif près K, à l'énergie journalière moyenne consommée par l'utilisateur (W_u).

La méthode proposée est de comparer les ampères-heures/jour consommés par l'utilisateur avec les ampères-heures/jour fournis par le panneau solaire dans des conditions d'ensoleillement et de température bien définies. Cette méthode permet de s'affranchir de la tension qui est légèrement fluctuante en fonction de l'état de charge de la batterie.

VI.2.2.2 Le coefficient correctif K

Dans le calcul de l'énergie disponible au niveau de l'utilisation, on doit tenir compte des rendements des divers composants du système ainsi que de certains coefficients correctifs dus à des incertitudes. Le coefficient K inclue:

-l'incertitude météorologique: 10%

-la perte de rendement des modules dans le temps (vieillessement, poussière etc...)

- la dispersion des caractéristiques des modules
- le rendement de la batterie (90% sur l'énergie transitant par elle)
- le rendement du régulateur (90%)

La prise en compte de tous ces paramètres donne un coefficient correctif global K entre 0.6 et 0.7 selon leur appréciation. On pourra retenir un coefficient moyen de 0.65.

NB: les pertes de puissance dans les câbles de connexion seront prises en compte dans la détermination du point de fonctionnement du module solaire.

VI.2.2.3 La puissance-crête.

La détermination de la puissance-crête consiste à déterminer le nombre de modules solaires nécessaires aussi bien en série qu'en parallèle pour satisfaire les besoins de l'utilisateur.

- le nombre de module en série est déterminé par les tension de l'utilisation.

- le nombre de branches parallèles peut être déterminé par un calcul simple.

La consommation journalière de la charge (en Ah/j) doit être satisfaite tout au long de l'année avec une moyenne annuelle journalière en kWh/m²/jour i.e avec un nombre d'heures d'ensoleillement équivalent à 1kW/m².

Ainsi, la production journalière d'énergie (en Ah/j) pour une branche est obtenue en multipliant son courant de charge I_c par le nombre d'heures h d'ensoleillement équivalent à 1kW/m².

Le nombre de branches en parallèle est obtenu simplement, au coefficient correctif près, en divisant la consommation de l'utilisation (en Ah/jour) par la production journalière moyenne (en Ah/jour) délivrée par une branche comme indiquée ci-dessous

$$N \geq \frac{W(\text{Ah})}{K \times h \times I}$$

En considérant une tension du système de 48 V, nous aurons 4 modules de 12 V (M55 4 A, 12 V) en série. La consommation journalière dans notre cas est de (53.4 kWh/jour)/0.9 = 59.3 kWh/jour, si nous considérons l'onduleur comme faisant partie de la charge et ayant un rendement de 0.9; ce qui donne, sous 48 V, une consommation journalière en Ah/jour de

$$W_u = 1235.5 \text{ Ah/jour.}$$

L'ensoleillement moyen journalier sur l'année est de $E_o = 5.83 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ [réf.9] soit 5.83 heures d'ensoleillement équivalent à 1 kW/m^2 sur une journée ($h=5.83$ heures).

Le courant de charge d'une batterie sous un ensoleillement de 1 kW/m^2 est de 4 A pour un module M55 de 53 Wc: $I_c = 4 \text{ A}$ (source SINAES).

D'où

$$\text{nombre minimum de branches: } N \geq \frac{W}{K \times h \times I} = \frac{1235.5}{0.65 \times 5.83 \times 4} = 81.5$$

Il faudra alors, au moins 82 branches de 4 modules de 53 Wc en série pour satisfaire la consommation demandée, soit 328 modules.

VI.2.2.4 La capacité batterie.

Le rôle de la batterie est de stocker pendant les mois d'ensoleillement maximum le déficit des mois moins ensoleillés.

La capacité minimale.

La capacité minimale de la batterie peut être calculée en déterminant le cumul d'ampères-heures déficitaires sur les mois les moins ensoleillés.

$$C_{\min} = \sum_{\substack{\text{mois} \\ \text{déficitaires}}} (W_u - KW_e)$$

où W_e est l'énergie journalière fournie pour un mois donné (en Ah/jour).

L'énergie produite (en Ah/jour) par les 82 branches est

$$KW_e = 82 \times 0.65 \times 4 \times E \text{ (en kWh/m}^2\text{)} = 213.2 \times E$$

où E est l'ensoleillement journalier pendant un mois donné.

En se référant au tableau de l'annexe [réf.9], on peut établir le tableau suivant

	Ensoleillement en kWh/m ²	Energie produite en Ah/j	Cosommation moyenne(W) en Ah/j	Déficit journalier W - KW	Déficit mensuel en Ah/j
JAN	5.08	1083.1	1235.5	152.4	4724.4
FEV	6.09	1298.4	1235.5	-	-
MAR	6.77	1443.4	1235.5	-	-
AVR	6.95	1481.7	1235.5	-	-
MAI	6.86	1462.6	1235.5	-	-
JUIN	6.37	1358.1	1235.5	-	-
JUIL	5.60	1193.9	1235.5	41.6	1289.6
AOUT	5.38	1147.0	1235.5	88.5	2743.5
SEPT	5.46	1164.1	1235.5	71.4	2142.0
OCT	5.67	1208.8	1235.5	26.7	827.7
NOV	5.15	1098.0	1235.5	137.5	4125.0
DEC	4.66	993.5	1235.5	242.0	7502.0

Donc, on peut calculer la capacité minimale qui doit être égale au cumul des mois déficitaires i.e

$$\begin{aligned}
 C_{min} &= 4724.4 + 1289.6 + 2743.5 + 2142.0 + 827.7 + 4125.0 + \\
 &+ 7502.0 \\
 &= 23354.2 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

La capacité réelle.

La capacité réelle est obtenue en tenant compte des limitations des caractéristiques réelles des accumulateurs.

-la capacité minimale ne doit pas dépassée environ 60% de la capacité réelle (profondeur de décharge).

-le type de batterie est choisi en tenant compte du régime de charge et de décharge et de la température d'utilisation.

-le cycle journalier ne doit pas dépassé 10 à 15% de la capacité nominale de la batterie pour préserver sa longévité .

-d'autre part, certains souhaits du client (nombre de jours d'autonomie garantis sans soleil) imposent une capacité minimale.

Pour le calcul de la capacité réelle pour notre cas, on peut prendre une capacité minimale à 60% de la capacité réelle, soit

$23354.2/0.6 = 38924 \text{ Ah}$; ce qui correspond, à peu près, à 520 batterie de 75 Ah.

Il est à noter que toutes les deux méthodes sont valables pour le dimensionnement du générateur. Etant donné que nous ne disposons d'éléments d'appréciation des deux méthodes, nous en choisirons, arbitrairement, une pour méthode définitive; soit la première méthode (le choix de la deuxième ne changerait en rien la démarche qui sera adoptée).

VI.3 CALCUL DES REGULATEURS.

Les régulateurs disponibles sur le marché sont des régulateur de 16 A, 12 V (soit une puissance de $16 \times 12 = 192 \text{ W}$). La puissance de régulation nécessaire pour notre système est déterminée par la puissance-crête de l'installation qui est 15.56 kW. Donc, il faudra

$$15.56 \text{ E}3 / 192 \approx 82$$

avec 4 en série et 21 en parallèle; ce qui fait un total de

84 régulateurs.

VI.4 CALCUL DES ONDULEURS.

L'onduleur qui sera utilisé doit être à mesure de fournir la puissance de l'utilisation qui est de 8.5 kW. Si nous supposons un rendement de 0.9, nous aurons besoin d'un onduleur d'une puissance nominale de $8.5 \text{ kW} / 0.9 = 9.45 \text{ kW}$. Etant donné que les onduleurs dont nous disposons ont une puissance de 500 W, il nous en faudra

$$9.45 \times 10^3 / 500 = 18.9, \text{ disons } 20 \text{ onduleurs.}$$

VI.5 ETUDE ECONOMIQUE COMPARATIVE.

Dans le but de comparer le coût de notre installation aux factures d'électricité payées par la boulangerie, nous utilisons une méthode d'actualisation appelée coût annuel équivalent (CAE).

VI.5.1 Définition.

C'est le montant annuel qui provient de la conversion d'un déboursé d'investissement et de sa valeur résiduelle en une annuité qui répartit ces montants d'argent sur toute la durée du projet et de l'addition à celle-ci des coûts annuels d'exploitation.

VI.5.2 Procédure.

1. On choisit le taux d'intérêt approprié (le taux de rendement minimum acceptable).

2. On calcule l'annuité correspondant aux déboursés d'investissement.

3. On évalue l'annuité correspondant à la valeur résiduelle des investissements.

4. On établit les coûts annuels d'exploitation.

5. On ajoute l'annuité découlant du déboursé d'investissement aux coûts annuels d'exploitation et on soustrait, du montant obtenu, l'annuité équivalente à la valeur résiduelle de l'investissement.

VI.5.3 Calcul du CAE.

Avant de faire ce calcul, faisons quelques hypothèses spécifiques au cas que nous étudions:

-le coût du capital considéré (taux de rendement minimum acceptable) est de $i=10\%$.

-les incidences de l'impôt sur le calcul du CAE sont négligeables.

-les coûts annuels d'exploitation sont les mêmes pour une installation solaire et une installation traditionnelle alimentée par la SENELEC (si on néglige les frais d'entretien des composants solaires).

-l'amortissement sera dégressif à un taux de 20% (taux maximum pour mobiliers et équipements [réf 7]).

Le tableau suivant donne les prix unitaires et les durées de vie des divers composants utilisés dans le système.

<u>COMPOSANTS</u>	<u>PRIX UNITAIRES (TTC)</u> (CFA)	<u>DUREE DE VIE</u> (ans)
modules M55 (53 Wc)	125 000	10
régulateur 12 V, 16 A	40 000	10
onduleur 500 W	250 000	10
batterie 75 Ah	35 000	5

En considérant tous ces prix et en se référant au calcul de dimensionnement fait précédemment, on peut établir les valeurs suivantes

Panneaux	-----	37 000 000 F CFA
Batteries	-----	37 380 000 F CFA
Régulateurs	-----	3 360 000 F CFA
Onduleurs	-----	5 000 000 F CFA
Total	-----	82 740 000 F CFA

Valeurs résiduelles au bout de 10 ans

Panneaux	-----	3 972 845 F CFA
Batteries	-----	5 689 175 F CFA *
Régulateurs	-----	360 377 F CFA
Onduleurs	-----	536 871 F CFA
Total	-----	10 559 668 F CFA

* pour le calcul de la valeur résiduelle des batteries au bout des 10 ans, il faut tenir compte du fait que la durée de vie des batteries est de 5 ans. De ce fait, à la fin des 5 ans, il

faut renouveler les batteries à un déboursé net de

$$\begin{array}{rcl}
 37\ 380\ 000 & - & 12\ 248\ 678 = 25\ 131\ 322\ \text{F CFA} \\
 \text{valeur d'achat} & & \text{valeur} \\
 \text{des batteries} & & \text{résiduelle} \\
 & & \text{à la fin des 5 ans}
 \end{array}$$

La valeur résiduelle des batteries au bout des 10 ans est obtenue en actualisant le déboursé net à la fin des 5 ans et en calculant l'amortissement pour un investissement de la batterie de

$$37\ 380\ 000 + (25\ 131\ 322)/(1+i)^5$$

ou $37\ 380\ 000 + (25\ 131\ 322)/(1+0.1)^5$

soit $37\ 380\ 000 + 15\ 604\ 574 = 52\ 984\ 574\ \text{F CFA}$

La valeur résiduelle au bout des 10 ans sera alors

$$52\ 984\ 574 \times (1-0.2)^{10} = 5\ 689\ 175\ \text{F CFA.}$$

Si on actualise la valeur résiduelle totale de l'installation au bout des 10 ans, on trouve

$$10\ 559\ 668 \times (1/(1+0.1)^{10}) = 4\ 071\ 209\ \text{F CFA.}$$

Calculons maintenant, l'annuité correspondant à l'investissement qui est de 82 740 000 F CFA, soit

$$82\ 740\ 000 \times \frac{0.1(1+0.1)^{10}}{(1+0.1) - 1} = 13\ 465\ 554\ \text{F CFA}$$

Ce qui fait un coût annuel équivalent de

$$13\ 465\ 554 - 4\ 071\ 209 = 9\ 394\ 345\ \text{F CFA}$$

Par contre, si l'on s'alimentait par la SENELEC, cela occasionnerait un coût annuel de 2 400 000 F CFA (200 000 F CFA de facture d'électricité par mois).

Donc, cette solution a un CAE inférieur; elle est donc, la plus rentable. Cependant, il vaut voir que cette comparaison a été établie en considérant que notre installation serait amortie au bout de 10 ans. D'autre part, nous avons considéré un coût constant de l'énergie; ce qui est loin d'être évident comme l'est d'ailleurs, l'hypothèse selon laquelle il y'aurait une stagnation des prix des modules ainsi que des autres composants.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Après l'étude que nous venons de faire, il convient de dresser un bilan, de tirer les enseignements nécessaires et de formuler des recommandations. Bien qu'il ne soit pas une solution miracle dans la voie de la résolution du problème énergétique en Afrique, ce travail nous aura permis de cerner, dans toutes ces dimensions l'équation de l'énergie photovoltaïque qui constitue un domaine d'avenir. En effet, par une meilleure connaissance des mécanismes qui sont à la base de la conversion photovoltaïque ainsi que de la nature du rayonnement solaire, il sera aisé d'accéder à la maîtrise de l'énergie des photopiles.

Après l'étude économique, l'on peut être tenté de dire que le projet n'est pas rentable; cependant, il faudrait le dire avec beaucoup de réserve. En effet, à l'état actuel de la technologie des photopiles et les perspectives de développement auxquelles on peut espérer s'attendre à moyen terme, il est difficile de se prononcer. En effet, si on arrivait à augmenter sensiblement le rendement de conversion des photopiles avec une technologie simple et peu coûteuse, l'énergie photovoltaïque demeurerait compétitive devant toute autre forme d'énergie.

Il faut noter, à présent, que le but premier de notre projet était de faire l'étude de faisabilité d'un four solaire. Seulement, nous nous sommes rendus compte, dès le début, qu'il fallait une puissance de chauffe de l'ordre de 60 kW; énorme! pour une application solaire. D'autre part, au Sénégal, il n'existe pas de four électrique proprement dit.

Cependant, avec les éléments de cette étude, les bases sont

jetées pour, par exemple, faire l'étude d'un modèle de four solaire avec tout le dimensionnement requis.

Par ailleurs, il est possible, avec les informations données dans ce projet, de concevoir un programme d'ordinateur capable d'optimiser la quantité d'énergie solaire tombant sur un panneau solaire et de pauffer la méthode de dimensionnement du système qui, dans notre cas, est très approximative bien que donnant des résultats satisfaisants dans la pratique.

ANNEXES

THEORIE DES SEMI-CONDUCTEURS

A.1 DEFINITION

S'il est permis de faire une classification des éléments chimiques solides en fonction de leur résistivité électrique à la température ambiante, l'on pourrait les ranger dans leur grande majorité dans deux catégories:

- les isolants pour lesquels $1E11 \leq \rho \leq 1E19 \Omega.cm$
- les conducteurs pour lesquels $1.5E-6 \leq \rho \leq 1E-4 \Omega.cm$

Seront classés alors semi-conducteurs tous les éléments dont la résistivité électrique est comprise entre $1E-3$ et $1E6$

Cependant la différence fondamentale entre semi-conducteurs et conducteurs réside moins dans la valeur de ρ que dans la variation de celle-ci en fonction de la température. En effet ρ croît avec la température pour les conducteurs alors qu'elle décroît très rapidement avec celle-ci pour les semi-conducteurs.

Dans les solides, la circulation des charges électriques est liée à la présence d'électrons libres au sein du matériau. Pour les semi-conducteurs le nombre d'électrons libres est très faible et est même nul au voisinage du zéro absolu. Les électrons des orbites intérieures sont profondément enfouis dans les atomes; les électrons des orbites extérieures font partie de la liaison covalente et ne peuvent s'échapper sans recevoir une énergie extérieure suffisante. Donc au voisinage du zéro absolu, un cristal de "semi-conducteur" se comporte comme un isolant.

Si E est l'énergie d'ionisation et T la température du réseau, on montre que la probabilité pour qu'une telle ionisation

se produise est proportionnelle à $\exp(-E/KT)$ où K est la constante de Boltzmann. On voit donc que la densité d'électrons libres croît exponentiellement avec la température. Pour les isolants E est importante et T est supérieure au point de fusion pour avoir une valeur notable de l'exponentiel. Pour les semi-conducteurs, E est assez faible et on obtient un nombre d'électrons libres assez notable à la température ambiante (pour Si $E=1.1$ eV).

A.2 BANDES D'ENERGIE

La configuration atomique de Bohr nous enseigne que l'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons sur des orbites de rayon tel que la force centrifuge née de ce déplacement puisse contrebalancer l'attraction du noyau. Cependant, seulement certains rayons sont permis nous dit la Physique moderne: comme onde l'électron ne peut parcourir qu'une orbite dont la circonférence est égale à sa longueur d'onde ou à un multiple de celle-ci. De ce fait à chaque électron correspond une orbite auquel on attribue un état énergétique appelé niveau d'énergie. Plus l'orbite d'un électron est grande, plus son potentiel d'énergie est élevé par rapport au noyau.

Quand des atomes d'un semi-conducteur forment un cristal, l'orbite d'un électron est non seulement influencée par les charges à l'intérieur de son propre atome mais aussi par le noyau et les électrons de tous les atomes du cristal. Comme chaque électron occupe une position différente à l'intérieur du cristal, il n'y a pas deux électrons qui ont le même environnement de

charges. C'est pourquoi, chaque électron a une orbite différente. Les électrons qui gravitent sur les premières orbites ont des niveaux d'énergies légèrement différents (puisque'ils n'ont pas le même environnement de charges) et comme il y a des milliards d'électrons de première orbite, les niveaux d'énergie légèrement différents forment une bande. Il en est de même pour les milliards d'électrons de seconde orbite, les milliards d'électrons de troisième orbite, etc...

Entre deux bandes d'énergie existe toujours une zone dite interdite qui se traduit par la différence énergétique entre deux états. A mesure que l'on s'éloigne du noyau, les bandes d'énergie ne sont pas toutes occupées. Les bandes extrêmes sont la bande de conduction et la bande de valence. Entre les deux se trouve une zone interdite dont la largeur est décisive dans le comportement du cristal.

A.3 MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus répandu dans la fabrication des photopiles. Sous forme cristalline ce semi-conducteur est en parfait équilibre énergétique: on parle alors de cristaux intrinsèques. La couche de valence comprend quatre électrons qui forment des liaisons covalentes avec leurs voisins et il faut une énergie $E_g = 0.72\text{eV}$ pour rompre une liaison covalente et libérer un électron.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, les paires électron--trou sont les seuls porteurs de courant et le plus souvent il n'y

a pas assez pour produire un courant utilisable en pratique. C'est pourquoi, pour obtenir des éléments actifs on introduit des impuretés (dopage) atomiques non tétravalentes à un cristal pour accroître soit le nombre d'électrons libres soit le nombre de trous. Le cristal dopé est appelé semi-conducteur extrinsèque. On distingue deux types d'impuretés:

-les donneurs: atomes pentavalents tels le phosphore , l'arsenic , l'antimoine.

-les accepteurs: atomes trivalents tels le gallium ou l'indium.

Dans le cas des donneurs, l'atome tétravalent devient positif par rapport à celui du donneur; on obtient ainsi un semi-conducteur du type N. On observe le phénomène inverse dans le cas d'un accepteur dont l'atome trivalent attire un électron de son voisin tétravalent provoquant un "trou" dans la liaison covalente: c'est le semi-conducteur du type P.

A.4 LA JONCTION PN

Un semi-conducteur intrinsèque ou extrinsèque pris séparément ne présente aucun effet externe. Lorsque deux cristaux respectivement de type P et de type N sont mis en contact intime, la jonction PN ainsi réalisée est le siège de phénomènes extrêmement importants tant du point de vue théorique que pratique.

La figure A1 nous décrit ces phénomènes: les trous de la zone P diffusent vers la zone N où ils sont minoritaires alors que les électrons passent de la zone N à la zone P où leur concentration est faible. Dans la zone de transition ou zone de

déplétion ($-b < z < +a$) les concentrations des porteurs sont faibles donc également la conductivité électrique. Dans cette région un champ électrique E dirigé de la zone N vers la zone P qui s'oppose à la diffusion des porteurs puisqu'il tend à ramener les trous dans la zone P et les électrons dans la zone N. L'état d'équilibre est obtenu par l'antagonisme des deux phénomènes suivants:

-la diffusion: si la concentration des porteurs n'est pas uniforme, un "courant de diffusion" s'établit spontanément dans un sens tel qu'il tend à égaliser les concentrations en tout point,

-le champ électrique responsable d'un courant de sens inverse.

A.5 ZONE DE DEPLETION

Lorsqu'un électron diffuse dans la zone P il se recombine avec un trou; le trou disparaît et l'électron libre (de la bande de conduction) devient un électron de valence. Chaque fois qu'un électron traverse la jonction, il crée une paire d'ions. Au fur et à mesure que le nombre de paires d'ions augmente, la zone qui entoure la jonction se vide de ses charges mobiles. Cette zone où les charges sont rares s'appelle la zone de déplétion ou zone de transition.

A.6 BARRIERE DE POTENTIEL

Chaque paire d'ions (ou dipôle) a un champ électrique. Donc l'intensité du champ augmente chaque fois qu'un électron traverse la jonction jusqu'au moment où le champ empêche toute diffusion d'électrons à travers la jonction. Lorsqu'un électron de la zone P

(porteur minoritaire) entre dans la zone de déplétion, il est repoussé dans la zone N par le champ diminuant ainsi l'intensité du champ. Mais celui-ci sera rétabli à sa valeur originale par la diffusion de quelques porteurs majoritaires. Ce champ électrique E entre les ions est équivalent à une différence de potentiel appelée barrière de potentiel dont la valeur est 0.7 V pour une jonction PN au silicium à 25°C. Cette barrière de potentiel dépend de la température de la jonction. Une température plus élevée crée plus de paires électron-trou; ce qui augmente le courant de porteurs minoritaires à travers la jonction. L'équilibre se produira ainsi pour une valeur plus basse de la barrière de potentiel. En première approximation nous pouvons admettre que la barrière de potentiel diminue de 2.5 mV chaque fois que la température augmente de 1°C. La formule correspondante est:

$$\Delta V \approx -0.0025 \Delta T$$

A.7 L'ECART D'ENERGIE

Lorsqu'un électron diffuse à travers la jonction, il remplit le trou d'un atome trivalent. Cette électron supplémentaire repousse l'orbite de la bande de conduction plus loin du noyau de l'atome trivalent. Tout autre électron passant près de cet atome aura donc besoin de plus d'énergie pour se déplacer sur l'orbite de la bande de conduction. Ceci revient à dire que la bande P remonte par rapport à la bande N une fois la zone de déplétion établie. A l'équilibre, les électrons du côté N n'ont pas assez d'énergie pour traverser la jonction. Un électron ne peut fran-

chir l'écart d'énergie (i.e la trajectoire à suivre pour diffuser à travers la jonction) que s'il reçoit de l'énergie d'un générateur externe. Dans le cas des cellules photovoltaïques, ce générateur est le Soleil avec l'énergie de son rayonnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- réf.1: Sol WIEDER, **An Introduction to Solar Energy for Scientists and Engineers**, Wiley Edition.
- réf.2: Malvino, **Principe d'Electronique**, McGraw-Hill Editeurs.
- réf.3: Electricité de France, **Que peut-on attendre des "énergies nouvelles"?** par J.M Vergnieaud.
- réf.4: Dr.Jan F. Kreider and Dr.Frank Kreith, **Solar Energy Handbook**, MacGraw-Hill Editors.
- réf.5: CRES, **Séminaire régional sur l'ingénierie des systèmes énergies renouvelables**, Manuel de formation.
- réf.6: Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique: **Application thermique de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie.**
- réf.7: René DEROME, M.B.A, C.A, **Rentabilité des projets**, Ecole Polytechnique de Montréal, Edition révisée, Janvier 1985.
- réf.8: INSTN-CADARACHE, **Session d'étude sur les énergies renouvelables: l'électricité photovoltaïque - Principe et application -.**
- réf.9: Ngor SARR, **Projet de fin d'étude: Système de pompage solaire**, Juin 1985.
- réf.10: Ecole Polytechnique de Thiès, **Sources d'énergie et leur exploitation (ENER 4.21)**, 1989.