



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
FACULTÉ DES SCIENCES
FORMATION DOCTORALE EN PHYSIQUE



DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

Laboratoire de Thermodynamique Thermique et Combustion

MÉMOIRE
pour l'obtention du

DIPLÔME D'ÉTUDES APPROFONDIES EN PHYSIQUE

option : ENERGETIQUE

sur :

**ETUDE DE CORRELATION ENTRE L'IRRADIATION
GLOBALE HORIZONTALE
ET LA PRESSION ATMOSPHERIQUE
A ANTANANARIVO**

Présenté par

ANDRISOANILAINA Tsiry
Soutenu publiquement le 16 Novembre 2009

Devant la commission d'examen composée de :

<i>Président :</i>	RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina	<i>Professeur Titulaire</i>
<i>Examineurs :</i>	RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	<i>Professeur Titulaire</i>
	RASAMIMANANA François de Salle	<i>Maître de conférences</i>
<i>Rapporteur :</i>	RAKOTOSALAMA Donné	<i>Maître de conférences</i>





UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
FACULTÉ DES SCIENCES
FORMATION DOCTORALE EN PHYSIQUE



DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

Laboratoire de Thermodynamique Thermique et Combustion

MÉMOIRE

pour l'obtention du

DIPLÔME D'ÉTUDES APPROFONDIES EN PHYSIQUE

Option : ENERGETIQUE

Sur :

**ETUDE DE CORRELATION ENTRE L'IRRADIATION
GLOBALE HORIZONTALE
ET LA PRESSION ATMOSPHERIQUE
A ANTANANARIVO**

Présenté par

ANDRISOANILAINA Tsiry

Soutenu publiquement le 16 Novembre 2009

Devant la commission d'examen composée de :



<i>Président :</i>	RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina	<i>Professeur Titulaire</i>
<i>Examineurs :</i>	RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	<i>Professeur Titulaire</i>
	RASAMIMANANA François de Salle	<i>Maître de conférences</i>
<i>Rapporteur :</i>	RAKOTOSALAMA Donné	<i>Maître de conférences</i>



REMERCIEMENTS

Ce présent ouvrage a été réalisé avec la contribution étroite et sérieuse des personnes suivantes, à qui nous témoignons ici toute notre reconnaissance et nos profonds remerciements, en particulier :

- Monsieur Bruno ANDRIANANTENAINA, Doyen de la Faculté des Sciences d'Antananarivo de nous avoir autorisé à soutenir ce mémoire et de nous avoir permis de poursuivre la formation doctorale de Physique au sein de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo;
- Monsieur Minoson RAKOTOMALALA, Directeur de l'Institut pour la Maitrise de l'Energie, Responsable de la formation Doctorale en Physique option ENERGETIQUE de la Faculté des Sciences, de nous avoir autorisé à poursuivre nos études pour l'obtention de ce Diplôme d'Etudes Approfondies. et l'honneur qu'il nous fait d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.
- Madame Zely Arivelo RANDRIAMANANTANY Chef du Département de Physique de l'Université d'Antananarivo pour avoir accepté d'assister en qualité d'examineur dans le Jury de ce Mémoire et pour les précieuses directives et la qualité de la formation qu'elle nous a dispensée pendant nos études.
- Monsieur RASAMIMANANA François de Salle pour avoir accepté d'assister en qualité d'examineur dans le Jury de ce Mémoire et malgré ses nombreuses obligations, il a bien voulu nous aider, conseiller et collaborer, veuillez recevoir nos sincères remerciement
- Monsieur Donné RAKOTOSALAMA, qui nous a proposé ce sujet et qui a bien voulu partager ses savoirs et ses expériences pendant la réalisation de ce travail, nous exprimons tout spécialement notre gratitude.
- Nous ne saurions oublier de remercier notre famille pour leur soutien et leur encouragement tout au long de nos longues années d'études.

A toutes nos connaissances proches ou éloignées qui n'ont pas ménagé leurs peines pour nous tendre la main.

- Enfin, nous ne saurions non plus oublier tous nos collègues. Nous les remercions pour leurs soutiens moraux durant la réalisation de ce mémoire.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

I: Gisement solaire	3
I-1 :Météorologie élémentaire	3
I-1-1 : Atmosphère [4]	3
I-1-2 : Pression atmosphérique [5].....	4
I-1-2 1 : Définitions	4
• Pression atmosphérique absolue.....	4
• Pression atmosphérique relative.....	4
• Relation entre la pression atmosphérique absolue et la pression atmosphérique relative	5
• Appareil de mesure de la pression atmosphérique	5
• Unité de mesure de la pression atmosphérique	5
I-1-2-2 : Les variations de pression	5
• Variation dans le temps	6
• Variation dans l'espace	6
• Les facteurs intervenant dans la variation de pression [5] :	7
-Facteur climatique.	7
-Facteur temps (jours et année).....	7
-Pollution.....	7
I-1-3 : Rayonnement incident au sol [2]	7
I-1-4 : Rayonnement global [6].....	7
I-1-5 : Irradiation [7]	8
I-1-6 : Astronomie.....	8
I-1-6-1 : La rotation de la Terre : la Terre tourne sur elle-même [8].....	8
I-1-6-2 : La révolution de la terre : la Terre tourne autour du soleil[8]	9
I-1-7 : Coordonnées du Soleil [9]	10
I-1-7-1 : Coordonnées célestes horizontales	10
I-1-7-2 : Coordonnées célestes horaires.....	12
I-1-8 : Problème du Temps [10].....	15
I-1-9 : Course du Soleil dans ciel [10]	16
I-1-10 : Diagrammes solaires [10]	17
I-1-11 : Durée du jour - lever et coucher du Soleil [10]	19
II : Etude des variations de la pression atmosphérique et de l'irradiation globale horizontale	21
II- 1 : Etude des variations de la pression atmosphérique	21
II-1-1 : Données disponibles :	21

II-1-2 : Variation au cours de l'année de la pression	22
II-1-3 : Variation de la pression au cours de la journée :	26
II-1-4 : Interprétation des résultats	29
II-2 : Etudes des variations de l'irradiation globale horizontale	31
II-2-1 : Données disponibles :	31
II-2-2 : Variation au cours de l'année	32
II-2-3 : Variation de l'irradiation globale au cours de la journée.	35
II-2-4 : Interprétation des résultats	39
III : Etude de corrélation entre irradiation globale horizontale et la pression atmosphérique	41
CONCLUSION GENERALE	
Annexe	a

NOMENCLATURE

a	azimut solaire	Degré
a_0	azimut au coucher ou au lever du soleil	Degré
COUCHER	heure de coucher du soleil	Heure
ET	Equation du Temps	Heure
G	rayonnement diffus	
h	hauteur angulaire du soleil	Degré
I	rayonnement direct	
J	numéro du jour dans l'année	
L	longitude du lieu	Degré
LEVER	heure de lever du soleil	Heure
m	Masse	Kg
SSMAX	durée théorique du jour	Heure
t	temps légal	Heure
TSV	Temps Solaire Vrai	Heure
TSM	Temps Solaire Moyen	Heure
z	distance zénithale du soleil	degré

LETTRES GRECQUES

δ	déclinaison solaire	Degré
ω	angle horaire	Degré
ω_s	angle horaire au lever ou au coucher du soleil	Degré
ϕ	latitude	Degré

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :Variation de la pression atmospherique avec l'altitude	6
Figure 2 : Rotation de la Terre sur elle même.....	9
Figure 3: Rotation de la Terre autour du Soleil.....	10
Figure 4 : Coordonnées horizontales	12
Figure5 : Coordonnées horaires	13
Figure 6 : Course du Soleil dans le ciel	16
Figure 7 : Diagramme solaire $\Phi = 18^{\circ}54'$ Sud(projection stéréograaphique)	18
Figure 8 : Diagramme solaire $\Phi = 18^{\circ}54'$ (projection orthogonale).....	18
Figure 9: Diagramme solaire $\Phi = 18^{\circ}54'$ (projection rectiligne).....	19
Figures 10 :Variation au cours de l'année de la pression.....	25
Figure 11 : Variation au cours de l'année de la pression pour differentes heures de la journée	26
Figure 12 : Variations de la pression au cours de la journée.....	28
Figure 13 : Variations journaliere de l'irradiation avec distribution mensuelle.....	33
Figure 14 : Variations au cours de l'année de l'irradiation pour differentes heures de la journée	34
Figure 15: Variation de l'irradiation au cours de la journée pour differents mois.....	37
Figure 16 : Nuage des points des couples (pression-Irradiation) pour differentes heures legales	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: << Journée – Type>> par mois de la pression atmosphérique (en mb)	21
Tableau 2: Les coefficients permettant le tracé des courbes de lissage	23
Tableau 3: Les paramètres de régression et les coefficients de corrélation	27
Tableau 4: « Journée-type » par mois de l'irradiation globale horizontale.....	31
Tableau 5: Les coefficients de régression des courbes de lissages	32
Tableau 6: Coefficients de régression des courbes de variation de l'irradiation au cours de la journée	37

INTRODUCTION GENERALE

En raison de l'augmentation des prix des énergies fossiles, il faut s'attendre dans les années à venir à utiliser l'énergie renouvelable. L'énergie renouvelable désigne les formes d'énergies dont le taux de génération est équivalent ou supérieur au taux de leur consommation. Elles sont pratiquement inépuisables et sont pour la plupart issues de l'activité solaire [1].

L'énergie solaire est une énergie d'avenir par excellence. Depuis toujours, la chaleur et la lumière du Soleil ont été les principales sources d'énergie des hommes. Le soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 6000 fois la consommation annuelle mondiale en énergie. Le rayonnement solaire est à l'origine de plus de 90% de l'énergie consommée. L'homme, pour ses besoins, puise dans le cycle énergétique naturel (hydro-électricité, biomasse) ou brûle actuellement et très rapidement la biomasse fossilisée produite à des époques lointaines (charbon, gaz, pétrole). Les problèmes engendrés par l'utilisation des énergies fossiles sont bien connus : pollution de l'air, effet de serre, production d'aérosols, et autres effets nocifs [2].

L'énergie solaire est propre, ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques. Face à cela, un effort accru existe depuis une vingtaine d'années pour développer l'utilisation directe de l'énergie solaire, afin de la transformer en chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie chimique plus facilement stockable (hydrogène par exemple). Le but est de faire le point sur les potentialités de l'énergie solaire pour un développement durable.

Cette énergie solaire a un grand avantage pour Madagascar car le potentiel solaire est globalement élevé sur l'ensemble de l'île, avec 2 800 heures d'ensoleillement annuel [1]. Toutes les régions de Madagascar ont en moyenne plus de 4 000 Wh/m² d'irradiation journalière, ce qui place Madagascar parmi les pays riches en gisement solaire (de l'ordre de 2 000 kWh/m²/an).

Faute d'appareil de mesure, nous n'avons pas assez des valeurs de l'irradiation globale utiles à la simulation du dimensionnement des appareils fonctionnant avec l'énergie solaire. Mais les valeurs de la pression atmosphérique sont mesurables dans toute station

météorologique. Si on arrive à établir une corrélation entre l'irradiation globale et la pression, on peut déterminer les valeurs de l'irradiation, qui est l'objectif même de notre recherche.

Cet ouvrage comporte trois parties :

Dans la première partie, nous allons parler de gisement solaire en général.

Dans la seconde partie, nous étudions les variations journalière et annuelle de la pression et l'irradiation globale horizontale.

La dernière partie sera consacrée à chercher la corrélation entre les valeurs de l'irradiation globale horizontale et celles de la pression atmosphérique.

A travers ces parties, nous allons chercher à sortir une conclusion sur la corrélation entre ces deux grandeurs.

I-GISEMENT SOLAIRE

I-1 METEOROLOGIE ELEMENTAIRE

I-1-1 : Atmosphère [4]

L'atmosphère est une couche très fine qui est bleu clair à l'horizon. Elle joue un rôle très important, vis-à-vis du rayonnement solaire tant par ses constituants fixes que par ses constituants variables.

En regardant dans le ciel, on surestime facilement l'épaisseur de l'atmosphère, qui est en fait une très fine couche au-dessus de la Terre. Si nous volons en avion à une altitude comprise entre 11 et 12 kilomètres, environ 75% des molécules de l'atmosphère sont en-dessous de nous. Cela signifie que cette couche d'air, mille fois plus fine que le diamètre de la Terre (12 800 kilomètres), contient trois quarts de la masse de l'ensemble de l'atmosphère.

L'air qui nous entoure est constitué de molécules et d'atomes innombrables et invisibles qui flottent au sein d'un espace vide. Ces molécules et atomes interagissent avec le rayonnement solaire, ce qui initie de multiples réactions chimiques. Des molécules plus grosses peuvent également s'agglomérer entre elles et former ainsi de petites particules. Les molécules d'eau peuvent se condenser sur ces particules et former des gouttelettes de nuage. S'il y a de plus en plus de gouttelettes de nuage qui se forment et qui grossissent, elles forment finalement un nuage qui apparaît dans le ciel.

Nous ne pouvons pas visualiser les différentes couches de l'atmosphère, mais nous pouvons mesurer les changements de la température lorsque l'altitude augmente. Ces modifications de l'évolution de la température définissent les couches atmosphériques comme suit :

La **troposphère**, qui est la couche la plus basse de l'atmosphère, où la température diminue avec l'altitude.

La **stratosphère**, qui est juste au dessus de la troposphère, la température augmente avec l'altitude.

Au-dessus de la stratosphère se trouve la **mésosphère**, où la température diminue de nouveau avec l'altitude.

La **thermosphère** est la couche la plus élevée de l'atmosphère, où la température augmente avec l'altitude.

Contrairement à la température qui augmente ou diminue avec l'altitude selon les couches, la densité de l'air et la pression atmosphérique, elles, diminuent progressivement avec l'altitude puisque l'air se raréfie.

I-1-2 : Pression atmosphérique [5]

I-1-2 1 Définitions

La pression atmosphérique ou pression exercée par l'atmosphère est la pression de l'air en un point quelconque de l'atmosphère ; c'est à dire la valeur du poids de la colonne d'air s'étendant entre la surface d'une section de base et la limite supérieure de l'atmosphère.

- ***Pression atmosphérique absolue***

C'est la Valeur réelle et absolue (par rapport à la valeur " au niveau de la mer ") de la pression atmosphérique en un lieu donné. Cette valeur est importante pour la prévision du temps, du fait qu'elle est comparable avec les mesures effectuées en d'autres lieux, après réduction en fonction de la valeur Celle-ci n'est pas réglable et sa plage de mesure va de 300 hPa à 1099 hPa. La pression atmosphérique standard à une altitude de 9100 mètres est de 300 hPa.

- ***Pression atmosphérique relative***

La pression atmosphérique relative est une valeur calculée à partir du niveau de la mer par rapport à la localisation de la station météo. Cette valeur est significative en termes de tendance météo pour l'ensemble du pays et peut être programmée afin de correspondre au strict besoin local. Les pressions diffusées par les supports médiatiques (presse, TV, radio,) sont les pressions atmosphériques relatives. Les utilisateurs de stations météo peuvent donc paramétrer la pression pour suivre les données locales.

La pression relative dépend de l'altitude du lieu où l'on se trouve. La pression relative diminue d'1 hPa tous les 8.3 mètres :

- ***Relation entre la pression atmosphérique absolue et la pression atmosphérique relative***

$$\text{Pression relative} = \text{Pression absolue} + (\text{altitude} / 8.3) [5] \quad (\text{I.1})$$

- ***Appareil de mesure de la pression atmosphérique***

Il y a 5 instruments météorologiques qui mesurent la pression atmosphérique.

- Le baromètre à mercure
- Le baromètre anéroïde
- La boule sphérique
- Le barographe
- La station météorologique

- ***Unité de mesure de la pression atmosphérique***

Elle a été longtemps mesurée en mm Hg (puis en torr) en raison de l'utilisation courante de baromètre à colonne de mercure. Depuis l'adoption du pascal comme unité de pression, les météorologues utilisent un multiple de cette unité, l'hectopascal (appelé auparavant le millibar (mb)) telle que (1 hPa = 100 Pa), nouvelle dénomination du millibar (1 bar = 100 000 Pa) avec (1Pa = 1 N/m²)

Remarque

La pression moyenne est de 1013 hPa au niveau de la mer, à une latitude de 45° et une température de 0 °C.

Sur la Terre , la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer dépend essentiellement de la masse de l'atmosphère, celle-ci pouvant évoluer avec la masse moyenne des gaz à concentration variable comme la vapeur d'eau. Elle demeure proche de l'atmosphère normale, valant 101 325 Pa.

I-1-2-2 Les variations de pression

La pression atmosphérique varie dans le temps et dans l'espace.

- ***Variation dans le temps***

Si on dispose d'un baromètre, on constate une variation plus ou moins importante de la pression tout au long de la journée. En l'absence de toute perturbation dans les environs, on observe une oscillation régulière de la pression connue sous le nom de "marée barométrique". Cette variation diurne de la pression est surtout perceptible dans les régions tropicales et comporte deux maximums en 24 heures. Elle est souvent masquée par les variations beaucoup plus importantes liées à l'approche de perturbations.

- ***Variation dans l'espace***

La pression varie verticalement et horizontalement. Toutefois la variation verticale est de loin la plus importante. Alors qu'il suffit de s'élever de quelques mètres pour que la pression baisse de 1 hPa, il faut parcourir parfois plusieurs dizaines de kilomètres pour observer la même variation dans le plan horizontal.

La décroissance verticale de la pression est particulièrement rapide dans la basse troposphère, puisque la pression n'atteint plus que 500 hPa vers 5500 mètres, moins de 300 hPa vers 10000 mètres, et environ un milliardième de hPa à 800 kilomètres d'altitude. Cette décroissance n'est pas régulière.

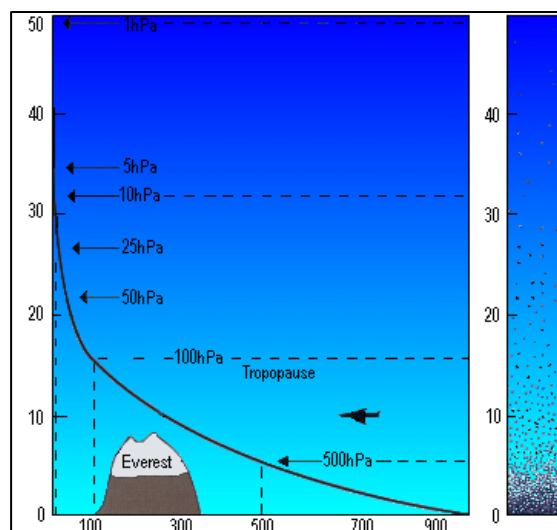


Figure 1

A gauche : diminution de la pression avec l'altitude (en km).

A droite, raréfaction de l'air avec l'altitude (en km).

- ***Les facteurs intervenant dans la variation de pression [5] :***

Facteur climatique.

La pression atmosphérique est définie par une masse dans l'atmosphère sur un volume déterminé, et que l'atmosphère est conditionnée par le temps qu'il fait, la dépendance de la pression atmosphérique et le climat est donc justifiée.

Facteur temps (jours et année).

Ce facteur est en relation avec le facteur climatique. Comme le climat change en fonction du temps (matin, midi, soir, saisons,...), il en résulte aussi que la pression varie aussi.

Pollution.

On constate que les polluants de l'atmosphère sont nombreux. Cette pollution, surtout excessive entraîne une variation de la pression.

I-1-3 : Rayonnement incident au sol [2]

En ne considérant ici que les radiations dont le spectre s'étendent de $0,3 \mu m$ à $3 \mu m$, le rayonnement thermique de très grande longueur d'onde n'intervient pas. Les composantes du rayonnement solaire incident instantané sont :

- Le rayonnement direct : c'est une partie de rayonnement qui parvient au sol directement après avoir subi l'atténuation pendant sa traversée dans l'atmosphère.
- Le rayonnement diffus une autre partie qui est diffusée par les molécules de gaz et les gouttelettes de liquide ; elle parvient au sol sans direction privilégiée

Usuellement, toutes ces contributions sont projetées selon la verticale du lieu.

I-1-4 : Rayonnement global [6]

Le rayonnement global horizontal correspond à l'éclairement énergétique reçu sur une surface horizontale unitaire pendant une période donnée. Une partie de ce rayonnement correspond à la fraction du rayonnement solaire incident qui atteint directement le sol ; c'est

le rayonnement direct, l'autre provient de la diffusion du rayonnement solaire incident dans l'atmosphère, c'est le **rayonnement diffus**. Le rayonnement (exprimé en Joules/cm²) est mesuré à l'aide d'un **pyranomètre**, et est exprimé en Joules/cm².

Le rayonnement global sur une surface quelconque au voisinage du sol est la somme vectorielle des rayonnements direct et diffus. Mais notre cas se réfère à une surface horizontale et pour le rayonnement global selon la verticale du lieu. Ainsi, il est donné par la formule suivante :

$$G = D + I \sin h \quad \textbf{(I-1)}$$

Avec D indiquant le rayonnement diffus et I, le rayonnement direct.

I-1-5 : Irradiation [7]

L'irradiation solaire exprime la quantité d'énergie, en provenance du soleil, reçue par unité de surface pendant un temps donné (seconde, heure, jour, ..). Ses unités usuelles sont le J/m² ou J/cm² ou Wh/m² ou kWh/m².

Par exemple théoriquement l'irradiation est de 1353 W/ m² (constante solaire) mais pratiquement, elle se mesure aux environs de 1000W/ m².

I-1-6 : ASTRONOMIE

I-1-6-1 La rotation de la Terre : la Terre tourne sur elle-même [8]

La Terre tourne sur elle-même en 24 heures, ou plus exactement en 23 heures 56 minutes et 4 secondes. Ce mouvement que la terre effectue autour de son axe s'appelle la **rotation**. La terre tourne sur elle-même selon un axe incliné de 23,27 ° par rapport au plan écliptique.

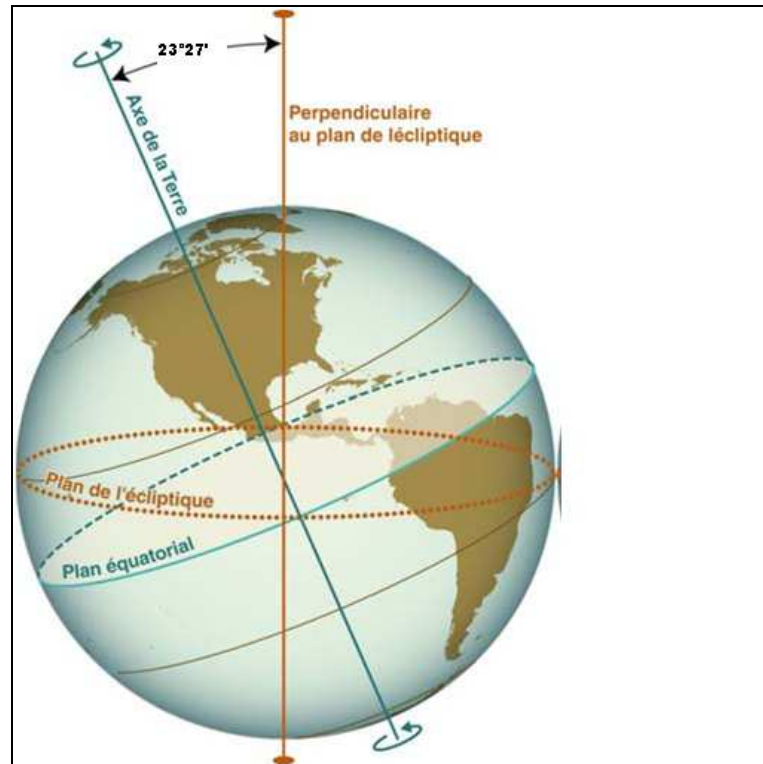


Figure 2 : Rotation de la Terre sur elle-même

I-1-6-2 La révolution de la terre : la Terre tourne autour du soleil[8]

Le mouvement que la **Terre** effectue autour du Soleil s'appelle la **révolution de la Terre**. La Terre met 365 jours 1/4 pour faire le tour du Soleil. La Terre tourne autour du Soleil en formant une ellipse de faible excentricité (0,01673) dont le Soleil occupe l'un des foyers. Le plan de cette ellipse s'appelle l'écliptique (figure 1)

La distance de la Terre au Soleil varie de 1,7% par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 km.

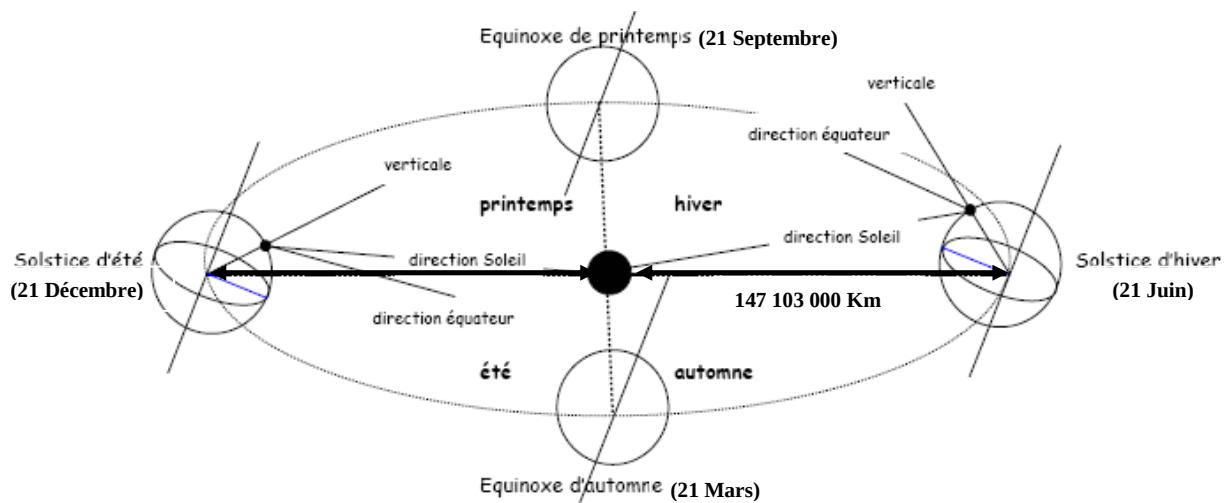


Figure 3: rotation de la terre autour du soleil

I-1-7 : Coordonnées du Soleil [9]

Nous utilisons deux systèmes de coordonnées sphériques pour repérer la position du Soleil dans l'espace

I-1-7-1 : Coordonnées célestes horizontales

Les coordonnées sont :

- La HAUTEUR : Distance angulaire à l'horizon sur un cercle vertical.
- L'AZIMUT : Distance angulaire mesurée dans le sens rétrograde (sud vers ouest), en prenant le sud comme référence.

Ce système permet de définir rapidement la position d'un objet mais, du fait de la rotation de la terre, la hauteur et l'azimut varient sans arrêt.

Le système de coordonnées azimutales représente le mieux le ciel de l'observateur. Il est construit à partir des éléments terrestres que sont le plan horizontal de l'observateur et son zénith (direction verticale orientée vers le haut).

Les principaux éléments des systèmes sont :

- le centre de la sphère qui est sur l'observateur, il est confondu avec le centre de la terre
- La hauteur au dessus de l'horizon en ° de 0° à 90° au zénith (-90° au nadir) appelé hauteur
- La direction de l'objet amenée dans le plan horizontal qui est l'azimut. Il est compté de 0° à 360° positivement vers l'ouest. 0° (ou 360°) dans la direction du sud.
- Le système de coordonnées est fixe par rapport à l'observateur

Le grand cercle qui passe par les pôles et le zénith de l'observateur s'appelle méridien il contient la direction nord- sud

En désignant par O le lieu considéré, les axes orthogonaux de ce système OXYZ sont définis de la façon suivante pour un site de l'hémisphère Sud comme l'indique la figure 2 avec :

OX vers le Sud,

OY vers l'Ouest,

OZ verticale du lieu, vers le haut.

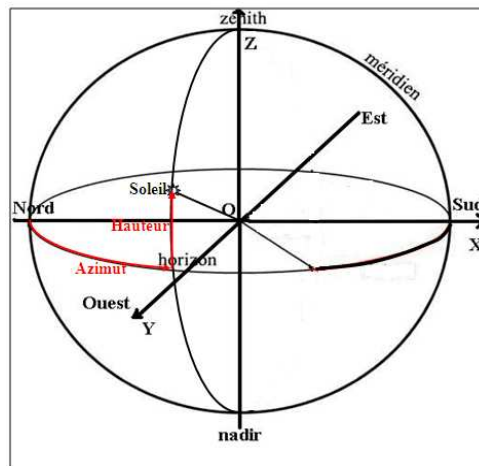


Figure 4 : Coordonnées horizontales

La direction OS du Soleil est repérée grâce à deux angles :

- Son azimut a , angle entre la projection de OS sur le plan horizontal et le Sud.

L'azimut est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est :

$$-180^\circ \leq a \leq +180^\circ$$

Soleil à l'Est : $a = -90^\circ$

Soleil au Sud : $a = \pm 180^\circ$

Soleil à l'Ouest : $a = +90^\circ$

Soleil au Nord : $a = 0^\circ$

• Sa hauteur h au-dessus de l'horizon, comptée positivement au-dessus de ce plan horizontal.

$$0^\circ \leq h \leq 90^\circ$$

Nous pouvons utiliser également la distance zénithale z

$$z = 90^\circ - h$$

I-1-7-2 : Coordonnées célestes horaires

Les coordonnées sont :

- LA DECLINAISON : arc de cercle horaire compris entre l'astre et l'équateur céleste en degrés (+ hémisphère nord-sud).
- L'ANGLE HORAIRE : distance angulaire entre le cercle horaire portant l'astre et le méridien du lieu en (+vers ouest,-vers).

Les coordonnées horaires ont comme éléments de référence :

• le centre de la sphère est le centre de la terre, l'observateur est confondu avec le centre de la terre

- l'équateur terrestre
- l'axe des pôles de la terre
- le zénith de l'observateur

Les coordonnées sont définies comme suit :

• la déclinaison mesure l'angle par rapport à l'équateur 0° à l'équateur, 90° au pôle nord, -90° au pôle sud

• Les demi grands cercles dont les extrémités sont aux pôles s'appellent les cercles horaires

- Le cercle horaire qui contient le zénith de l'observateur s'appelle le méridien

• L'angle horaire est l'angle dièdre entre le méridien et le cercle horaire qui contient l'objet à définir, il est compté positivement vers l'ouest à partir du méridien. Il est gradué en heures de 0h à 24h.

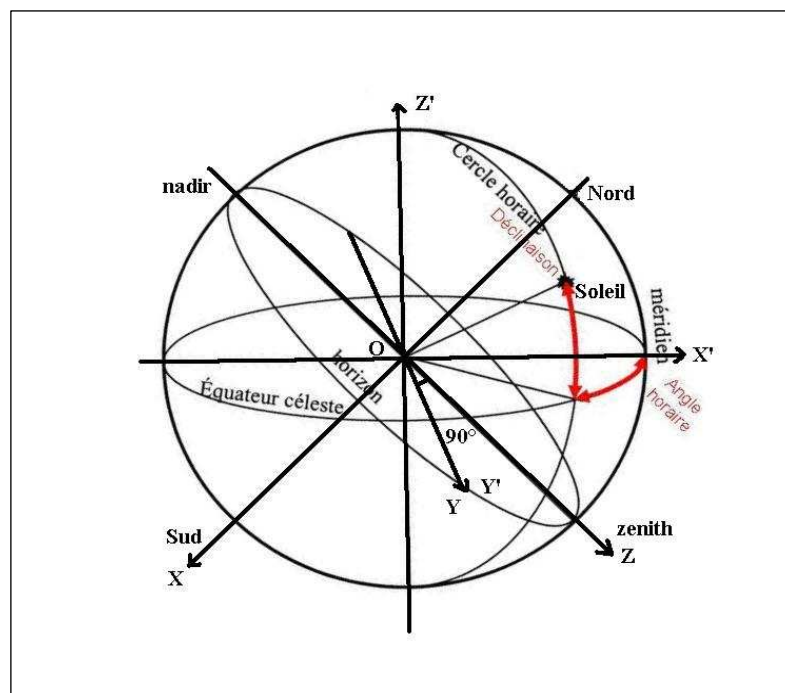


Figure5 : Coordonnées horaires dans

Le système de coordonnées horaires représenté sur la figure 4 est défini pour un point O de l'hémisphère Sud par :

OZ' : parallèle à l'axe de rotation de la Terre vers le pôle Nord,

OY' : vers l'Ouest,

OX' : dans le plan (OX, OZ) et perpendiculaire à OZ'

- **La déclinaison δ**

La déclinaison δ est l'arc de cercle horaire compris entre la direction du Soleil et l'équateur céleste. Elle varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice de décembre à $23^{\circ}27'$ au solstice de Juin et s'annule aux équinoxes (21 Mars et 21 Septembre).

En première approximation, nous avons :

$$\delta = 23,45 \sin(JD) \quad (\text{Exprimée en degrés}) \quad (I.3)$$

Avec

$$JD = (J - 81) \frac{360}{365} \quad (I-4)$$

J étant le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

Au cours d'une journée, δ peut être considérée comme constante.

- **L'angle horaire ω**

L'angle horaire ω est la distance angulaire entre le cercle horaire portant le soleil et le méridien du lieu.

L'angle horaire peut s'exprimer aussi en heures et s'annule au midi solaire. Ensuite, chaque heure correspond à une variation de 15° , car la Terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures.

ω est compté négativement le matin et positivement le soir.

$$\omega = -90^{\circ} \text{ à } 6\text{H TSV (Temps Solaire Vrai)}$$

$$\omega = 0^{\circ} \text{ à } 12\text{H TSV}$$

$$\omega = 90^{\circ} \text{ à } 18\text{H TSV}$$

$$\omega = \pm 180^{\circ} \text{ à minuit}$$

D'où la relation entre le temps solaire vrai TSV et l'angle horaire ω :

$$\omega = \frac{360}{24} \text{TSV} - 180 \quad (I.5)$$

ω S'exprime en degrés et TSV en heures.

- **Passage d'un système de coordonnées à un autre [10]**

A partir du système local OXYZ en faisant une rotation de $90^\circ + \Phi$ autour de OY dans le sens direct, nous obtenons ce système orthogonal OX'Y'Z'

Il est possible d'obtenir h et a en fonction de Φ , δ et ω en utilisant les formules de passage d'un système à l'autre, Φ désigne la latitude du lieu d'observation.

$$\cos a = \frac{\sin \Phi - \cos \delta - \cos \omega + \cos \Phi - \sin \delta}{\cosh} \quad (I.6)$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cosh} \quad (I-7)$$

$$\sinh = \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \Phi \cdot \sin \delta \quad (I.8)$$

I-1-8 : Problème du Temps [10]

Pour que les 3 formules ci-dessus soient directement utilisables, il faut relier l'angle horaire ω au temps légal t.

$$\omega = \frac{360}{24} TSV - 180 \quad (\text{en degrés}) \quad (I.9)$$

$$TSV = t + \frac{L}{15} - N' + \frac{ET}{60} \quad (\text{en heures}) \quad (I.10)$$

N'est le numéro du fuseau horaire et L la longitude du lieu.

L'équation du temps ET est la valeur algébrique de l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV :

$$ET = TSV - TSM \quad (1.11)$$

Cet écart est variable d'un jour à l'autre et sa variation a sensiblement la même allure chaque année.

L'équation du temps ET peut être représentée en minutes par la formule approchée suivante :

$$ET = 9,87 \sin(2JD) - 7,53 \cos(JD) - 1,5 \sin(JD) \quad (1.12)$$

JD étant toujours relié au numéro J du jour de l'année selon la relation (1.2)

I-1-9 : Course du Soleil dans ciel [10]

Pour un jour donné, la course apparente du Soleil s'effectue dans un plan P incliné de $(90^\circ - \Phi)$ sur l'horizontal HZO comme l'indique la figure 5.

La position du soleil change au fil de la journée (en fonction de la rotation de la Terre) et de la période de l'année (en fonction des variations d'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'orbite du soleil).

La position du soleil pendant la journée et son angle par rapport au Nord augmente de 15° toutes les heures. C'est l'angle qui doit apparaître approximativement entre toutes les ombres tracées toutes les heures.

La position du soleil à midi peut être identifiée lorsque l'ombre la plus courte est constatée. Il se peut qu'elle ne corresponde pas exactement au sud de la boussole, il peut exister des différences en fonction de la longitude de l'endroit et de sa relation avec le fuseau horaire.

L'élévation du soleil à midi varie en fonction des saisons. Elle est à son minimum ($\delta=0$) au solstice d'hiver (21 décembre) et à son plus haut au solstice d'été (21 juin).

L'élévation au solstice d'hiver est équivalente à la latitude du lieu moins 23° .

L'élévation au solstice d'été est équivalente à la latitude plus 23° .

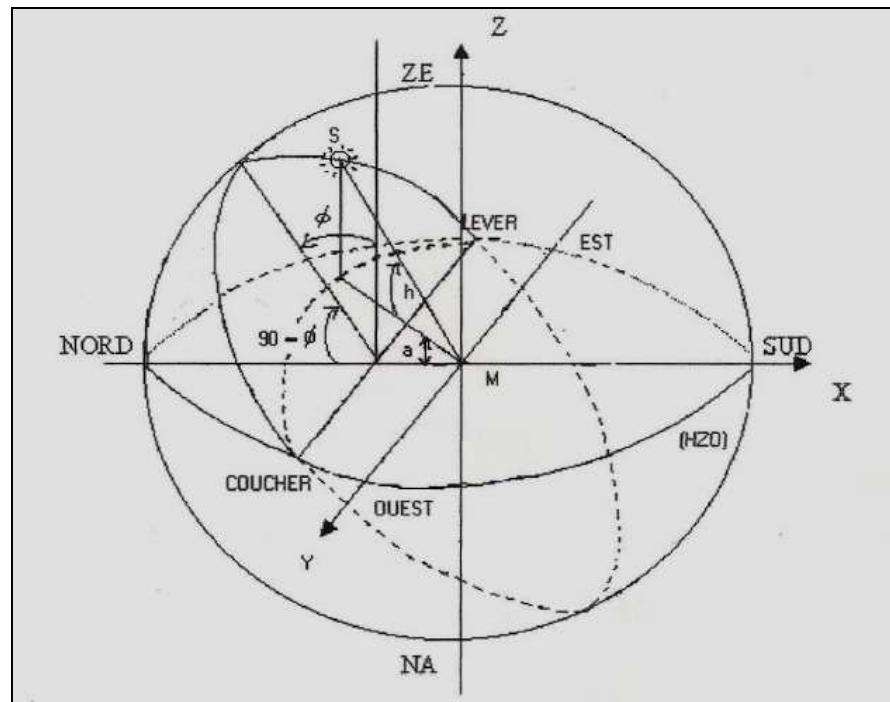


Figure 6 : Course du Soleil dans le ciel dans un endroit de l'hémisphère Sud

Nous notons que le Soleil ne se lève exactement à l'Est et ne se couche exactement à l'Ouest que lors des équinoxes où la déclinaison δ s'annule ($\delta = 0$: aux environs de 21 Mars et 21 Septembre).

La projection orthogonale de cette trajectoire apparente du Soleil sur le plan horizontal HZO est un arc d'ellipse.

La projection orthogonale de cette trajectoire sur le plan méridien est un segment de droite.

I-1-10 : Diagrammes solaires [10]

Une bonne connaissance de la course du Soleil durant l'année et des diagrammes solaires est essentielle pour l'élaboration d'un projet solaire.

Ces diagrammes établis pour un lieu donné donnent directement la hauteur h et l'azimut a du Soleil à l'instant désiré.

Nous utilisons le diagramme polaire et le diagramme en coordonnées rectilignes avec l'azimut a en abscisses et la hauteur h en ordonnées.

Nous donnons sur les figures 6, 7 et 8 trois exemples de diagrammes solaires pour ANTANANARIVO.

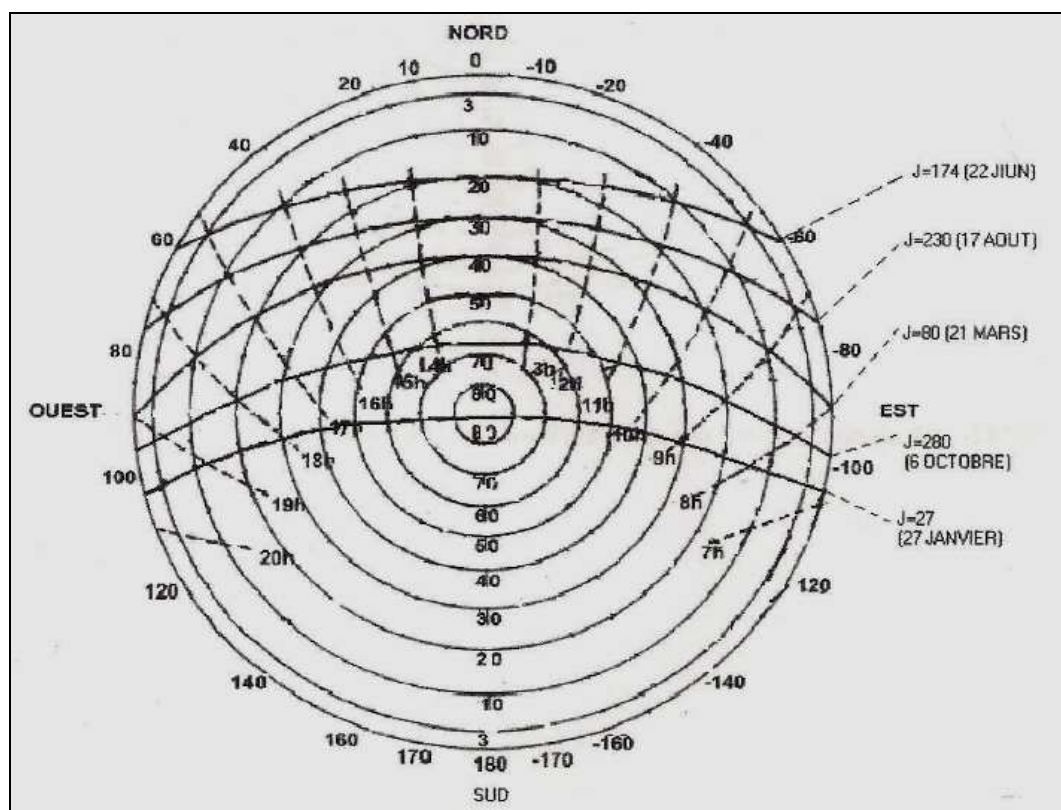


Figure 7 : Représentation du Diagramme solaire d'Antananarivo : $\Phi = 18^{\circ}54'$ (projection stéréographique).

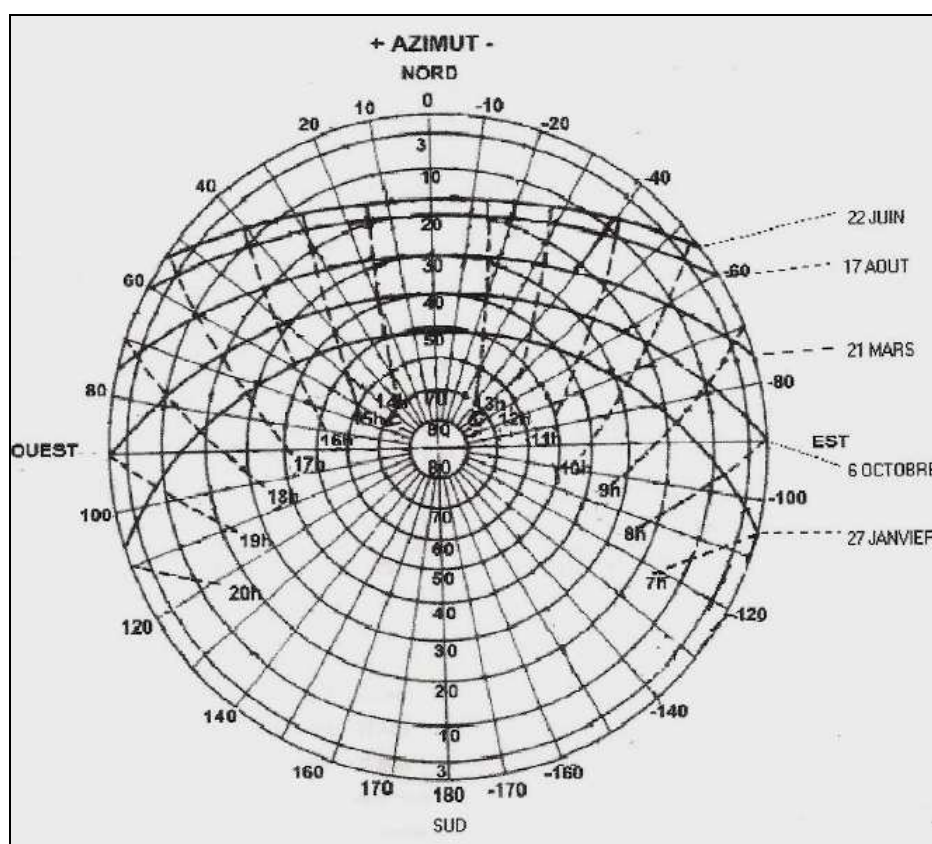


Figure 8 : Représentation du Diagramme solaire d'Antananarivo $\Phi = 18^{\circ}54'$ (projection orthogonale).

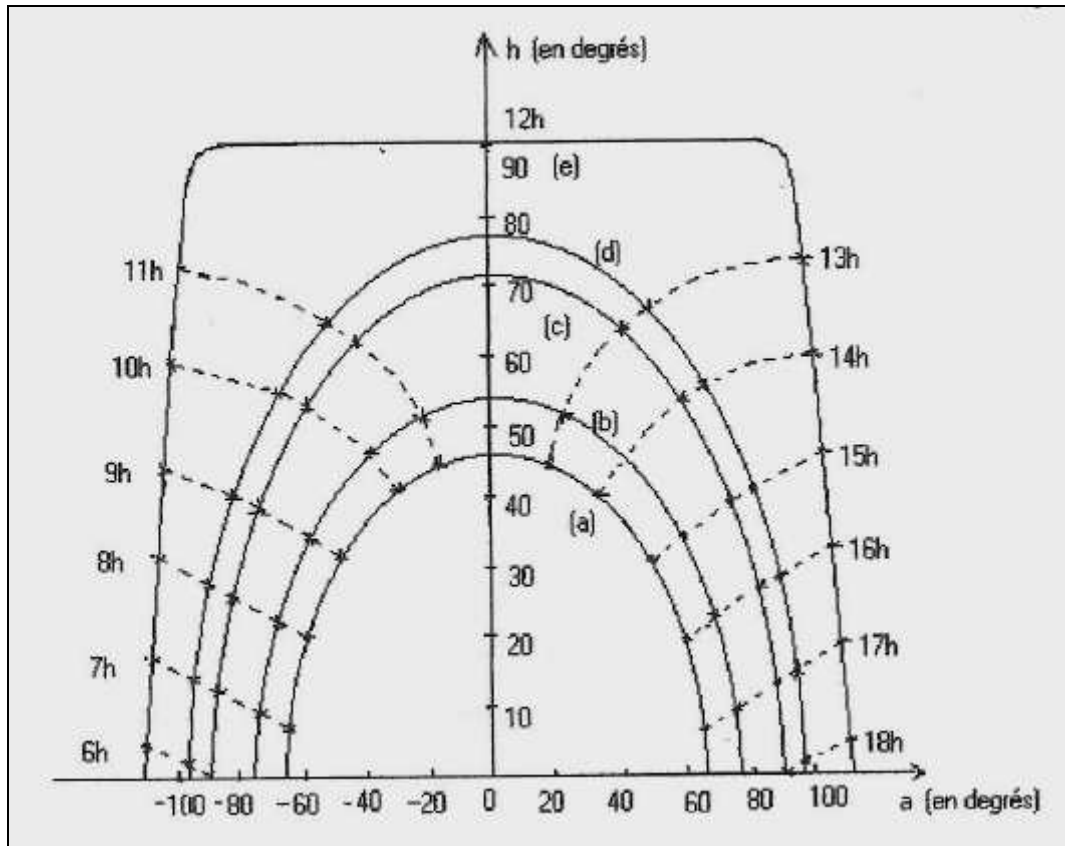


Figure 9: Diagramme solaire pour Antananarivo $\Phi = 18^{\circ}54'$ (coordonnées rectilignes)

I-1-11 : Durée du jour - LEVER et COUCHER du Soleil [10]

La durée du jour SSMAX est définie comme l'intervalle de temps pendant lequel le Soleil se trouve au-dessus de l'horizon, sans tenir compte de la réfraction atmosphérique qui entraîne des écarts de l'ordre de $0,5^{\circ}$. SSMAX peut être calculée à partir de la formule (I-6) donnant la hauteur du Soleil.

En effet, au lever et au coucher du Soleil, $h = 0$ et la formule (cc) donne :

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (\text{I.13})$$

ω_s sont les angles horaires du Soleil au lever et au coucher du Soleil. A partir de ω_s , les heures en TSV de la durée du jour SSMAX, du LEVER et du COUCHER du Soleil se calculent respectivement à partir des formules suivantes :

$$\text{SSMAX} = 2 \frac{24}{360} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (\text{I.14})$$

$$LEVER = 12 - \frac{24}{360} |\omega_s| \quad (I.15)$$

$$COUCHER = 12 + \frac{24}{360} |\omega_s| \quad (I.16)$$

Où ω_s , est exprimé en degrés.

II : ETUDE DES VARIATIONS DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DE L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

II- 1 ETUDE DES VARIATIONS DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

II-1-1 : Données disponibles :

Rappelons que la pression atmosphérique est celle exercée par l'air au niveau du sol. En général, elle s'exprime en mb.

Toute station météorologique fait des mesures de la pression atmosphérique. Nous avons à notre disposition des données de pression mesurées à la station Météorologique Nationale Malagasy établie sur la colline d'Ampandrianomby dont les coordonnées géographiques sont :

Longitude : 47° 32' Est

Latitude : 18° 54' Sud

Altitude : 1302m

La fréquence journalière des relevés est tri horaire : 6h, 9h, 12h, 15h et 18h

Le tableau suivant montre les valeurs de la pression atmosphérique en (mb) des « journée- types » par mois

	6 H	9 H	12 H	15 H	18 H
Janvier	870.8	871.5	870.4	868.9	869.5
Février	869.8	870/7	870.0	868.2	868.7
Mars	870.9	872.0	871.1	869.5	870.1
Avril	872.2	873.3	872.1	870.6	871.5
Mai	874.1	875.3	874.1	872.8	873.6
Juin	875.1	876.3	875.2	873.9	8874.7
Juillet	876.2	877.3	876.4	875.2	875.9
Août	876.4	877.4	876.4	875.2	875.9
Septembre	875.6	876.5	875.3	873.9	874.9
Octobre	874.8	875.6	874.3	872.7	873.8
Novembre	873.1	873.8	872.6	870.9	871.9
Décembre	871.6	872.2	871.1	869.4	870.1

Tableau 1 : << Journée – Type >> par mois de la pression atmosphérique (en mb)

II-1-2 : Variation au cours de l'année de la pression

Pour une heure donnée, la variation de la pression atmosphérique peut s'exprimer en fonction quantième J jour de l'année par l'équation suivante :

$$Y = A + B \cdot \cos(w \cdot j) + C \cdot \sin(w \cdot j) \quad (\text{II.1})$$

A représente la valeur moyenne annuelle a l'heure considérée

Les coefficients A, B et C sont déterminé par la méthode des moindres carrés qui consiste à minimiser la quantité suivante [10] :

$$Q = \sum_{j=1}^n [y_j - (A + B \cdot \cos(w \cdot j) + C \cdot \sin(w \cdot j))]^2$$

n : nombre total des valeurs mesurées (n = 366)

j : numéro du jour dans l'année compté à partir du premier Janvier

y_j : valeur mesurée de la pression à l'heure et au jour considérés

$$w = \frac{2 \cdot \pi}{366}$$

Q est minimale si :

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial Q}{\partial A} \right)_{BC} &= 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial B} \right)_{AC} &= 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial C} \right)_{AB} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-2})$$

Ceci conduit au système de 3 équations linéaires en A, B et C suivant :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n [A + B \cdot \cos(w \cdot j) + C \cdot \sin(w \cdot j)] &= \sum_{j=1}^n y_j \\ \sum_{j=1}^n [A \cdot \cos(w \cdot j) + B \cdot \cos^2(w \cdot j) + C \cdot \sin(w \cdot j) \cdot \cos(w \cdot j)] &= \sum_{j=1}^n y_j \cdot \cos(w \cdot j) \\ \sum_{j=1}^n [A \cdot \sin(w \cdot j) + B \cdot \cos(w \cdot j) \cdot \sin(w \cdot j) + C \cdot \sin^2(w \cdot j)] &= \sum_{j=1}^n y_j \cdot \sin(w \cdot j) \end{aligned} \right\} \quad (\text{II- 3})$$

Ce système peut se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{j=1}^n \cos(w.j) & \sum_{j=1}^n \sin(w.j) \\ \sum_{j=1}^n \cos(w.j) & \sum_{j=1}^n \cos^2(w.j) & \sum_{j=1}^n \cos(w.j).\sin(w.j) \\ \sum_{j=1}^n \sin(w.j) & \sum_{j=1}^n \cos(w.j).\sin(w.j) & \sum_{j=1}^n \sin^2(w.j) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^n y_j \\ \sum_{j=1}^n y_j.\cos(w.j) \\ \sum_{j=1}^n y_j.\sin(w.j) \end{pmatrix} \quad (\text{II-4})$$

Les valeurs de A, B et C sont obtenues par la résolution de l'équation matricielle (II-4), Nous avons utilisé le logiciel **turbo pascal** pour la résolution.

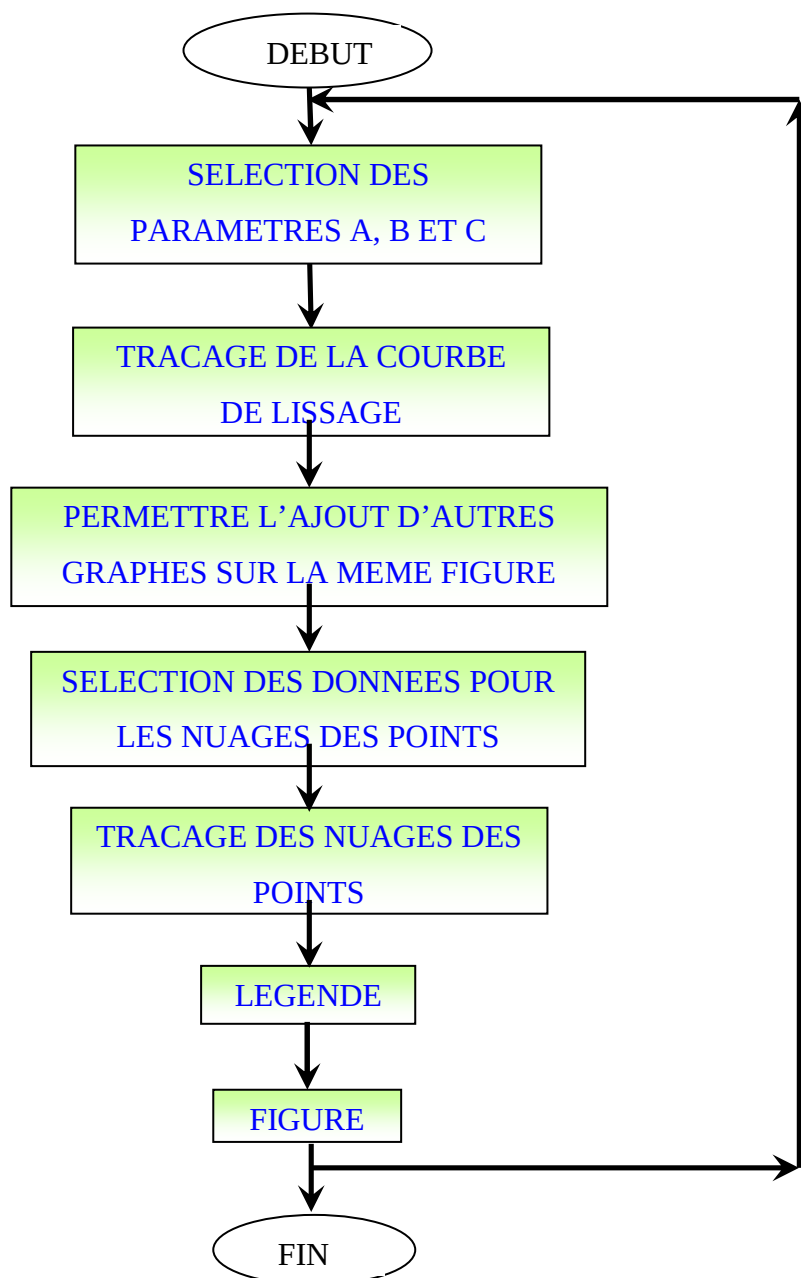
Les valeurs de A, B et C, et le coefficient de corrélation R pour chaque mesure tri horaire sont consignés dans le tableau 2.

	A	B	C	R
6h	873,4	-2,45	-1,87	0,97
9h	874,34	-2,69	-1,73	0,99
12h	873,23	-2,74	-1,65	0,98
15h	871,78	-2,92	-1,67	0,97
18h	872,57	-2,96	-1,81	0,99

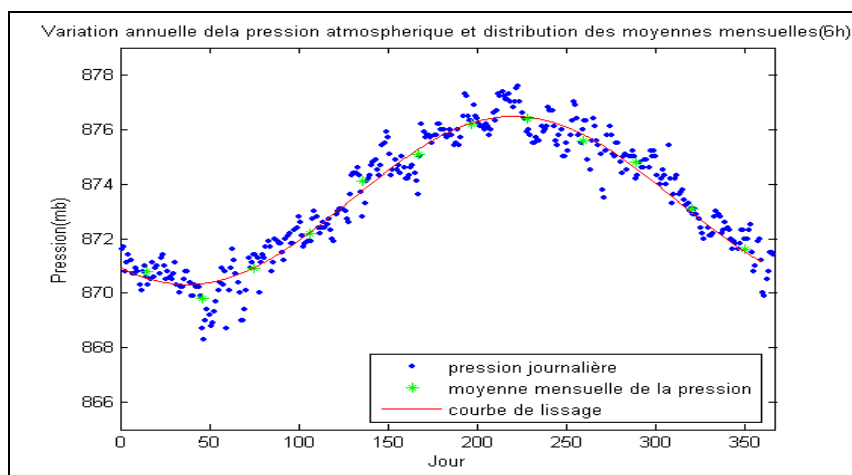
Tableau 2 : Les coefficients permettant le trace des courbes de lissage

Nous avons utilisé le logiciel Mat Lab pour tracer les courbes de lissage.

Voici l'algorithme :

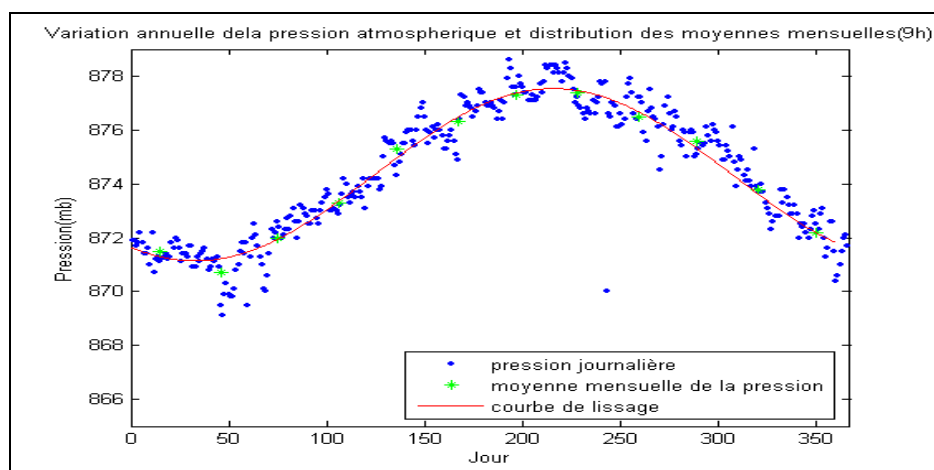


Les figures 10 montrent, pour chaque heure de mesure, le nuage des points, la distribution des moyennes mensuelles et la courbe de lissage.



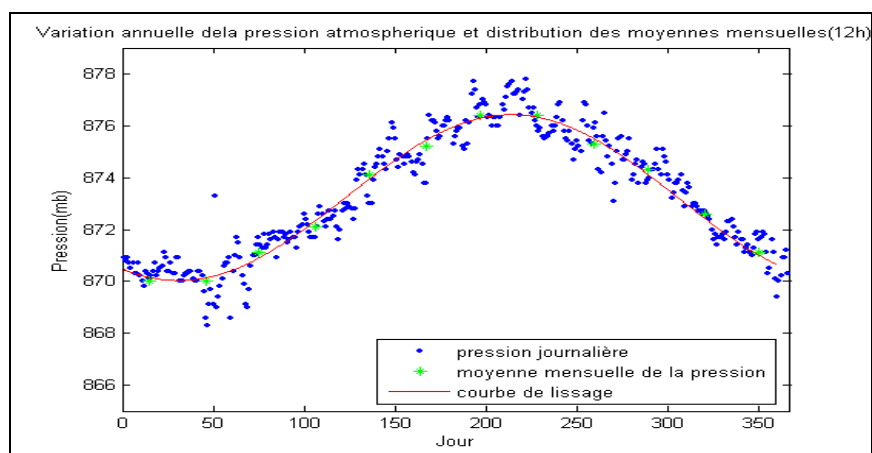
$$y=873.40-2.45\cos (0.0172*j)-1.87\sin (0.0172*j)$$

Figure 10-a



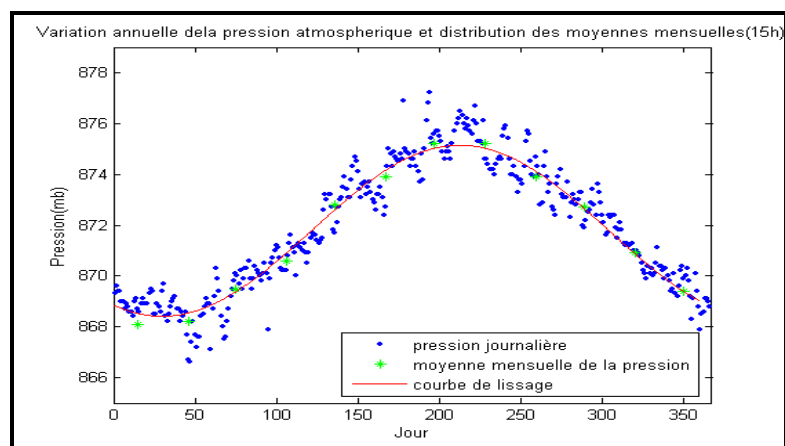
$$y=874.34-2.69\cos (0.0172*j)-1.73\sin (0.0172*j)$$

Figure 10-b



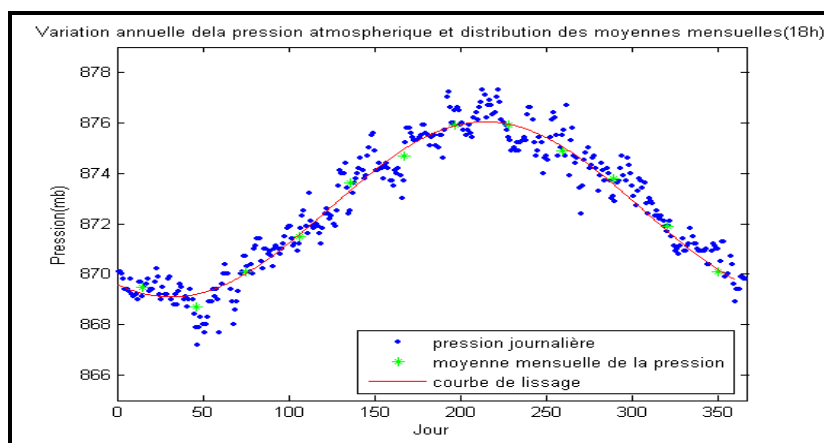
$$y=873.23-2.74\cos (0.0172*j)-1.65\sin (0.0172*j)$$

Figure 10-c



$$y=871.78-2.92\cos (0.0172*j)-1.67\sin (0.0172*j)$$

Figure 10-d



$$y=872.57-2.96\cos (0.0172*j)-1.81\sin (0.0172*j)$$

Figure 10-e

En regroupant les 5 courbes de lissage, nous avons pu obtenir la figure ci-dessous :

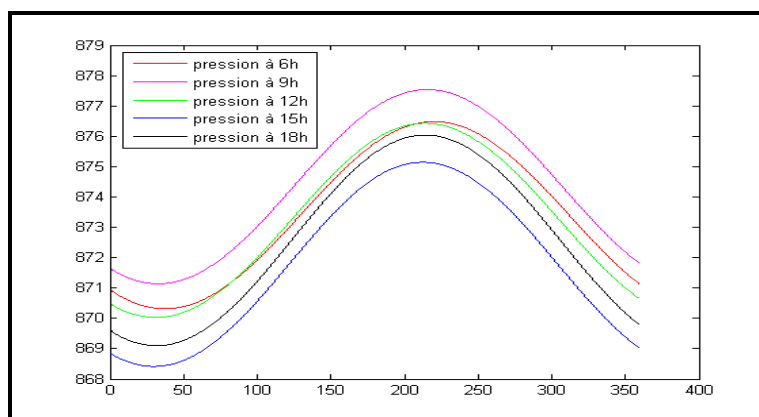


Figure 11 : Variation au cours de l'année de la de pression pour différent heur de la journée

II-1-3 : Variation de la pression au cours de la journée :

Entre 6h et 18h légale, les valeurs horaires de « journée type » peuvent être approximées par un polynôme de 3ème degré en t (heure légale)

$$Y=a_0+a_1t+a_2t^2+a_3t^3 \quad (\text{II-4})$$

y : valeur de la pression à l'heure t de la journée

Les coefficients de régression a_0 , a_1 , a_2 et a_3 sont obtenus par la méthode des moindres carrés qui vérifie l'équation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{j=1}^5 t_j & \sum_{j=1}^5 t_j^2 & \sum_{j=1}^5 t_j^3 \\ \sum_{j=1}^5 t_j & \sum_{j=1}^5 t_j^2 & \sum_{j=1}^5 t_j^3 & \sum_{j=1}^5 t_j^4 \\ \sum_{j=1}^5 t_j^2 & \sum_{j=1}^5 t_j^3 & \sum_{j=1}^5 t_j^4 & \sum_{j=1}^5 t_j^5 \\ \sum_{j=1}^5 t_j^3 & \sum_{j=1}^5 t_j^4 & \sum_{j=1}^5 t_j^5 & \sum_{j=1}^5 t_j^6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^5 y_j \\ \sum_{j=1}^5 t_j \cdot y_j \\ \sum_{j=1}^5 t_j^2 \cdot y_j \\ \sum_{j=1}^5 t_j^3 \cdot y_j \end{pmatrix} \quad (\text{II-5})$$

Nous consignons dans le tableau suivant ces paramètres de régression ainsi que les coefficients de corrélation R

	a₀	a₁	a₂	a₃	R
Janvier	855.3	4.77	- 0.44	0.012	0.99
Février	853.1	5.04	- 0.45	0.012	0.98
Mars	853.0	5.39	- 0.48	0.013	0.99
Avril	853.1	5.82	- 0.53	0.014	0.99
Mai	855.6	5.63	- 0.51	0.014	1.00
Juin	856.8	5.53	- 0.50	0.013	0.99
Juillet	859.8	4.95	- 0.44	0.012	0.99
Août	860.4	4.88	- 0.44	0.012	0.99
Septembre	857.9	5.44	- 0.50	0.014	0.99
Octobre	856.3	5.73	- 0.53	0.015	0.99
Novembre	855.4	5.50	- 0.51	0.014	0.99
Décembre	855.6	4.96	- 0.46	0.013	0.99

Tableau 3 : Les paramètres de régression et les coefficients de corrélation

Les figures 12 représentent les distributions des moyennes mensuelles, la courbe de variation journalière pour chaque mois de la pression atmosphérique.

Astérix(*) : moyennes mensuelles de la pression atmosphérique

Courbes (—) : courbes de lissage

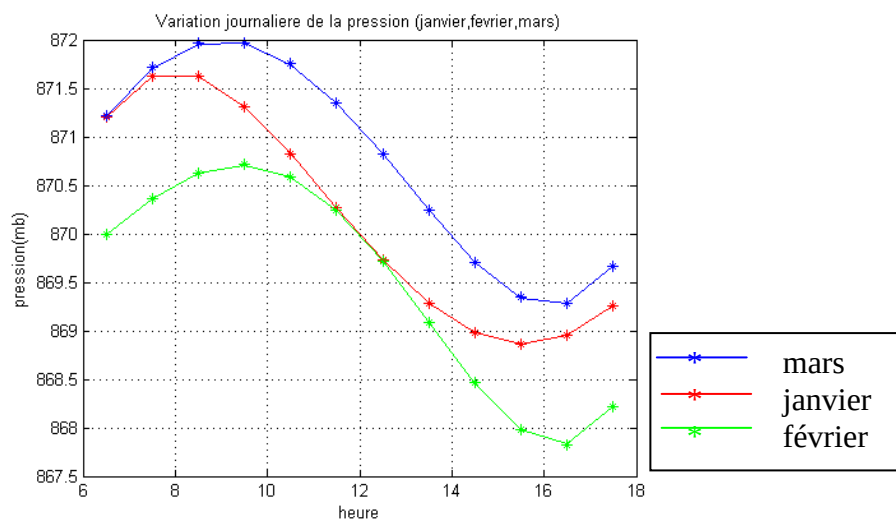


Figure 12-a

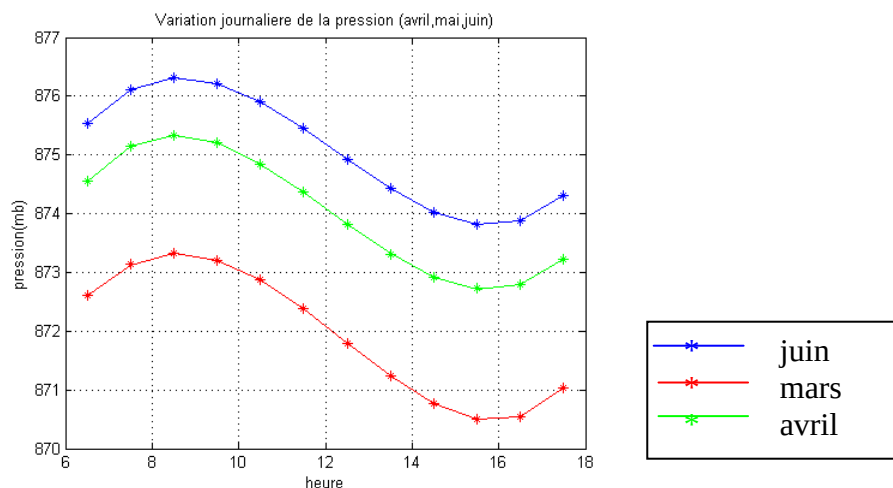


Figure 12-b

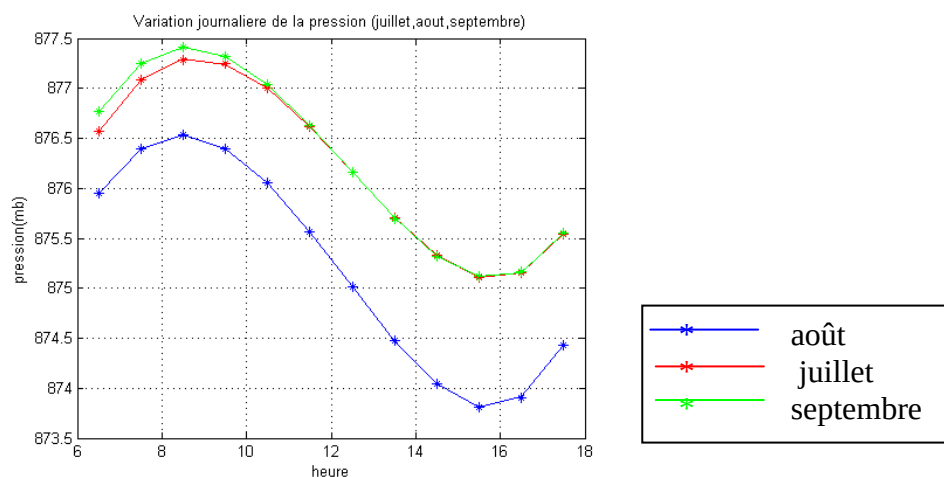


Figure 12-c

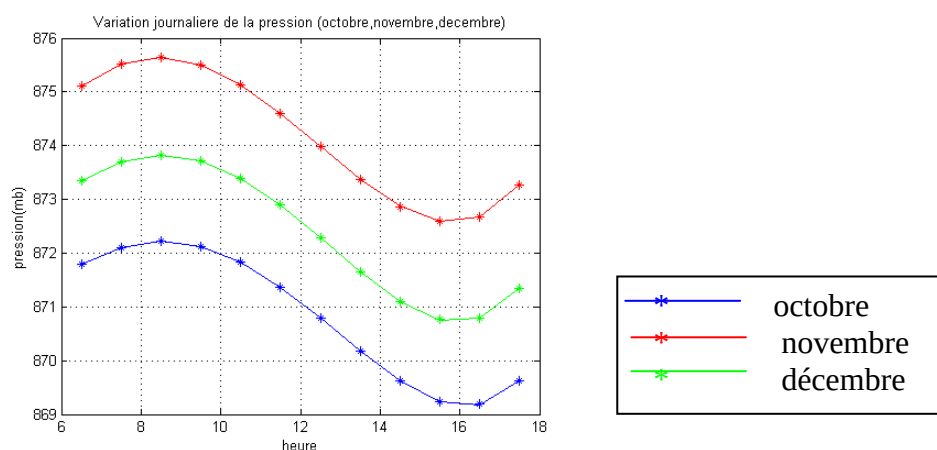


Figure 12-d

II-1-4 : Interprétation des résultats

- ❖ A travers la figure 12, on aperçoit que la variation de la pression garde une allure plus ou moins semblable. Même si celle de 6h et de 18h se ressemblent autant à celle de 12h et de 15h, la valeur maximale de la pression pour chaque heure de mesure se situe vers la fin de l'année ou le début de l'année suivante.
- ❖ L'intervalle de variation de la pression atmosphérique est large. La raison est que le gaz de l'atmosphère, qui est directement en relation avec la pression atmosphérique, est sensible au changement de température, et par conséquent, la densité de l'air atmosphérique, ou la pression atmosphérique varie considérablement.

- ❖ On observe une basse pression atmosphérique pendant la saison pluvieuse et moyennement chaude (Novembre- Mars). A cette période, la durée d'ensoleillement est courte, ce qui diminue considérablement la température moyenne au niveau de la terre, et par conséquent, la pression atmosphérique [11].
- ❖ La fréquence de pluie purifie aussi l'atmosphère par hydratation. Ce qui permet l'alésage de l'atmosphère et la diminution de la densité de l'air atmosphérique, c'est-à-dire la pression.
- ❖ Pendant le reste de l'année (Avril-Octobre), la pression atmosphérique est relativement élevée. A cette période, la pluie est quasi-inexistante. Une sorte de barrière, qui sert à bloquer l'ascension des gaz légers, se forme alors sur l'atmosphère, augmentant ainsi la charge par unité de surface de l'atmosphère [11].
- ❖ La valeur de la pression atmosphérique à 9h est la plus élevée. Cette observation est valable tout au long de l'année, quelque soit la saison. Nous savons que la pression atmosphérique est une grandeur dépendante de la température. La température est déjà considérable à cette heure, et les activités d'évapotranspiration atteignent son rendement maximal. Ce qui augmente considérablement les vapeurs et gaz qui se trouvent au dessus de la surface de la terre. De plus, l'air est déjà pollué à cette heure, ce qui influe aussi sur la valeur de la pression mesurée. Autour de midi où la température atteint la valeur maximale, la pression est inférieure à celle de 9h car il n'y a plus d'évaporation des eaux de condensation et la température permet l'évaporation des vapeurs d'eau au dessus de l'atmosphère de mesure [12].
- ❖ La pression atmosphérique vers 16h est la plus basse. A cette heure, l'évaporation est quasi-inexistante par rapport à celle du matin. L'humidité de l'air qui est un facteur important dans la variation de la pression atmosphérique est très faible. La charge qui se trouve au dessus de la surface de la terre est donc la moindre à cet intervalle de temps. La présence d'humidité justifie la hausse de pression atmosphérique à 18h par rapport à celle de 16h.

II-2- ETUDES DES VARIATIONS DE L'IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE

II-2-1 : Données disponibles :

Les caractéristiques des données sont identiques à celles de la pression atmosphérique annuelle que nous avons décrit dans le paragraphe (II-1-1). Cette fois ci, nous n'avons pas les valeurs des moyennes mensuelles de l'irradiation à 6h, 9h, 12h, 15h, et 18h comme celle de la pression. Nous avons alors recours à des calculs mathématiques pour interpoler les données existantes. On a utilisé la commande interpolation dans Mat Lab.

Les valeurs des irradiances des <<journée – type>> par mois exprimées en Wh/m² sont consignées dans le tableau 5

	6h	9h	12h	15h	18h
janvier	66,42	569,33	845,64	542,77	53,47
février	45,37	533,57	817,37	517,52	38,02
mars	29,47	486,99	771,77	478,92	23,98
avril	15,43	442,55	757,06	460,63	16,49
mai	7,10	376,22	665,18	398,21	7,85
juin	4,64	338,44	609,94	351,20	4,65
juillet	5,89	339,91	628,91	380,57	6,82
août	12,80	412,64	705,78	436,32	14,08
septembre	25,43	524,82	844,98	534,34	27,88
octobre	44,03	589,02	908,25	601,26	43,35
novembre	60,55	592,42	872,13	523,68	50,66
décembre	64,55	534,47	822,33	476,55	44,20

Tableau 4 : <<Journée-type>> par mois de l'irradiation globale horizontale

II-2-2 : Variation au cours de l'année

Pour une heure donnée, la variation de l'irradiation globale peut s'exprimer en fonction du quantième J jour de l'année par l'équation suivante :

$$Y = A + B \cdot \cos(w \cdot j) + C \cdot \sin(w \cdot j) \quad (\text{II.5})$$

A représente la valeur moyenne annuelle à l'heure considérée.

Les coefficients A, B et C sont déterminés par la méthode des moindres carrés qui consiste à minimiser la quantité suivante [10] :

$$Q = \sum_{j=1}^n [y_j - (A + B \cdot \cos(w \cdot j) + C \cdot \sin(w \cdot j))]^2$$

n : nombre total des valeurs mesurées (n = 366)

j : numéro du jour dans l'année compté à partir du premier Janvier

y_j : valeur mesurée de la pression à l'heure et au jour considérés

$$w = \frac{2\pi}{366}$$

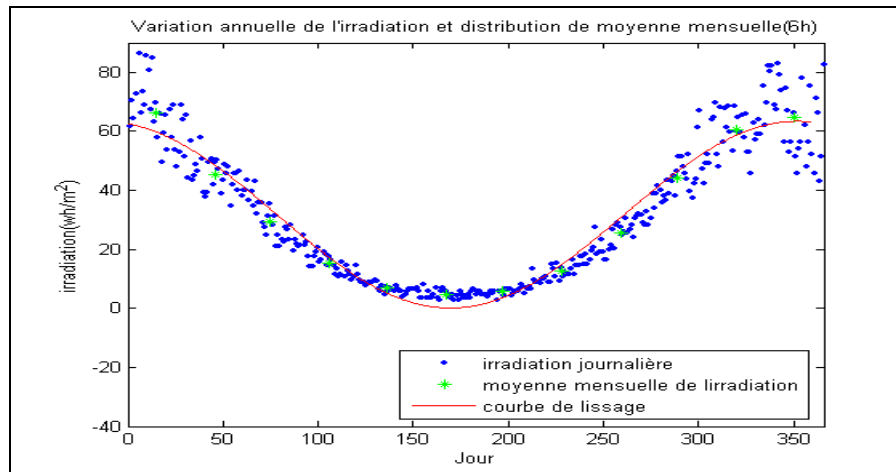
La démarche pour obtenir les valeurs de A, B, C, et R sont identiques au précédent (paragraphe II-1-1-1).

Les valeurs de A, B, C et R sont consignées dans le tableau suivant

	A	B	C	R
6h	31.76	30.88	-6.92	0.98
9h	478.31	112.66	-41.59	0.88
12h	770.77	109.66	-49.32	0.86
15h	475.18	73.99	-36.62	0.90
18h	27.60	22.66	-7.26	0.93

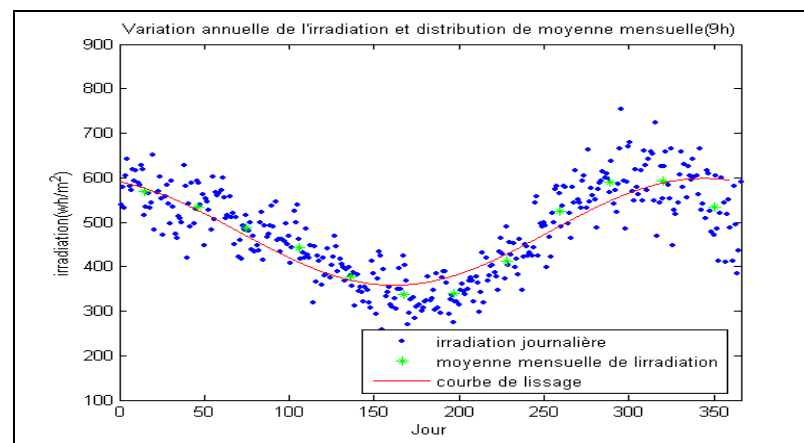
Tableau 5: Les coefficients de régression des courbes de lissages

Les figures 13 montrent, pour chaque heure de mesure, le nuage des points, la distribution des moyennes mensuelles et la courbe de lissage de l'irradiation globale



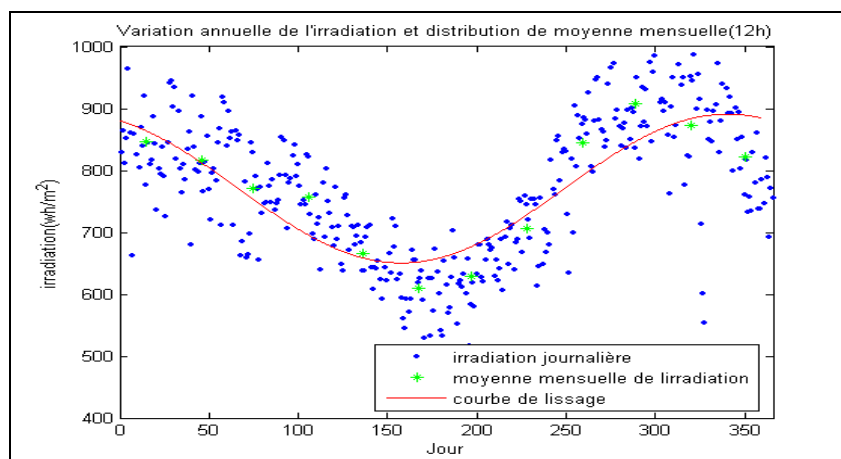
$$Y=31.76+30.88 \cos (0.0172*j)-6.92\sin (0.0172*j)$$

Figure 13-a



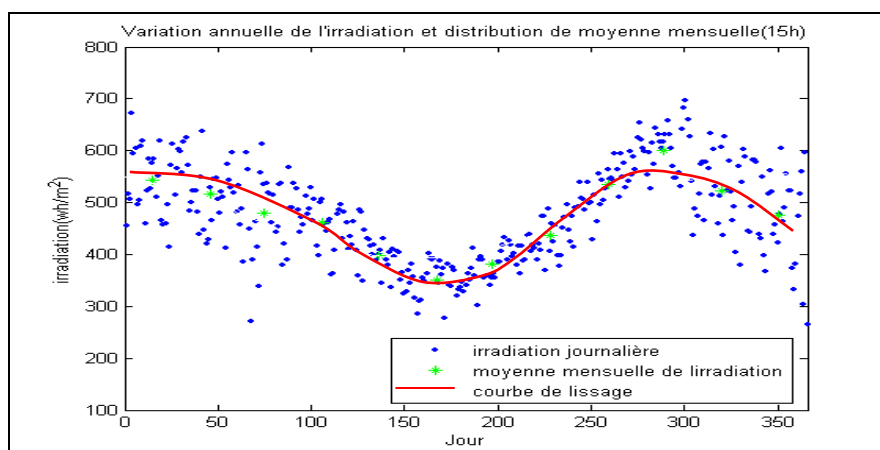
$$Y=478.31+112.66 \cos (0.0172*j)-41.59\sin (0.0172*j)$$

Figure 13-b



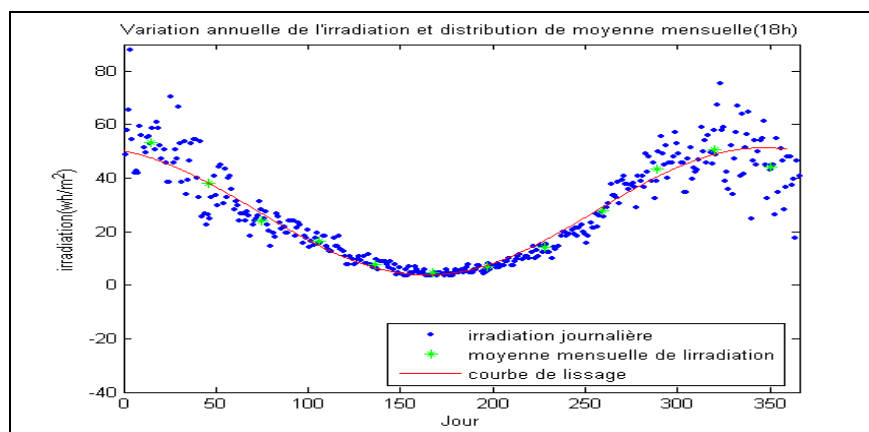
$$Y=770.77+109.66 \cos (0.0172*j)-49.32 (0.0172*j)$$

Figure 13-c



$$Y=475.18+73.99\cos (0.0172*j)-36.62\sin (0.0172*j)$$

Figure 13-d



$$Y=27.60+22.66 \cos (0.0172*j)-7.26\sin (0.0172*j)$$

Figure 13-e

Si on représente les courbes dans une même figure, on l'aperçoit comme suit

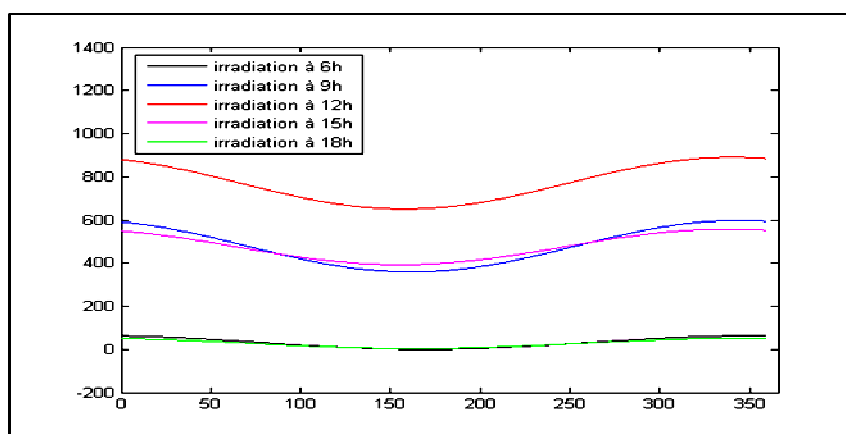


Figure 14 : les 5 courbes de lissage des valeurs de l'irradiation

II-2-3 -Variation de l'irradiation globale au cours de la journée.

Entre 6h et 18h légale, les valeurs horaires des « journée – types » par mois de l'irradiation globale horizontale peuvent être approximées par une sinusoïde de la forme :

$$Y = A \cdot \cos(B \cdot (t - C)) \quad (\text{II-6})$$

Y : valeur de l'irradiation à l'heure légale t de la journée

Les coefficients A, B et C sont déterminés par la méthode des moindres carrés c'est-à-dire leur valeur donnant le meilleur lissage de la courbe, minimise la quantité Q suivante :

$$Q = \sum_{j=1}^{12} [Y_j - A \cdot \cos(t_j - C)]^2 \quad (\text{II-2})$$

Cela conduit au système de 3 équations non linéaires en A, B et C suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \{A \cdot \cos^2[B \cdot (t_j - C)] - y_j \cos[B \cdot (t_j - C)]\} = 0 \\ \sum_{j=1}^n \{(t_j - C) \cdot \sin[B \cdot (t_j - C)] - (y_j - A \cdot \cos[B \cdot (t_j - C)])\} = 0 \\ \sum_{j=1}^n \{A \cdot \cos[B \cdot (t_j - C)] \cdot \sin[B \cdot (t_j - C)] - y_j \sin[B \cdot (t_j - C)]\} = 0 \end{array} \right.$$

Pour résoudre l'équation, on utilise la méthode numérique des approximations successives. Voici le principe de cette méthode :

On pose :

$$f_2 = \sum_{j=1}^n \{(t_j - C) \cdot \sin[B \cdot (t_j - C)] - (y_j - A \cdot \cos[B \cdot (t_j - C)])\}$$

$$f_2 = \sum_{j=1}^n \{(t_j - C) \cdot \sin[B \cdot (t_j - C)] - (y_j - A \cdot \cos[B \cdot (t_j - C)])\}$$

$$f_3 = \sum_{j=1}^n \{A \cdot \cos[B \cdot (t_j - C)] \cdot \sin[B \cdot (t_j - C)] - y_j \sin[B \cdot (t_j - C)]\} = 0$$

Nous pouvons écrire le système sous forme la forme matricielle suivante :

$$F(X) = 0$$

Les coefficients A , B et C peuvent être considérés comme les éléments d'un vecteur de dimension 3 :

$$X = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix}$$

F est un vecteur fonction de l'espace des fonctions dérivables à 3 dimensions :

$$F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}$$

On montre en Analyse Numérique que la relation entre les solutions approchées d'ordres $k+1$ et k s'écrit :

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - W^{-1}(X^{(k)}) \cdot F(X^{(k)})$$

$W^{-1}(X^{(k)})$ étant l'inverse de la matrice jacobienne W de F

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial A} & \frac{\partial f_1}{\partial B} & \frac{\partial f_1}{\partial C} \\ \frac{\partial f_2}{\partial A} & \frac{\partial f_2}{\partial B} & \frac{\partial f_2}{\partial C} \\ \frac{\partial f_3}{\partial A} & \frac{\partial f_3}{\partial B} & \frac{\partial f_3}{\partial C} \end{bmatrix}$$

En prenant une solution initiale grossière pour chaque mois et en adoptant cette méthode des approximations successives, on obtient les valeurs des coefficients A, B et C.

Les valeurs des paramètres de régression A, B, C et celle des coefficient de corrélation R sont consignées dans le tableau 7

Mois	A	B	C	R
janvier	443,335	0,2614	11,837	0.99
février	520,153	0,2751	11,723	0.98
mars	421,748	0,2583	11,621	0.99
avril	403,253	0,2564	11,714	0.99
mai	401,273	0,2578	11,712	1.00
juin	400,632	0,2542	11,668	0.99
juillet	400,938	0,2531	11,731	0.99
août	442,001	0,2645	11,745	0.99
septembre	521,141	0,2658	11,648	0.99
octobre	638,577	0,2715	11,842	0.99
novembre	561,047	0,2672	11,801	0.99
décembre	399,789	0,2585	11,725	0.99

Tableau 6 Coefficients de régression des courbes de variation de l'irradiation au cours de la journée

Les figures 15 montrent les variations de l'irradiation au cours de la journée par mois ainsi que les distributions de moyenne mensuelles.

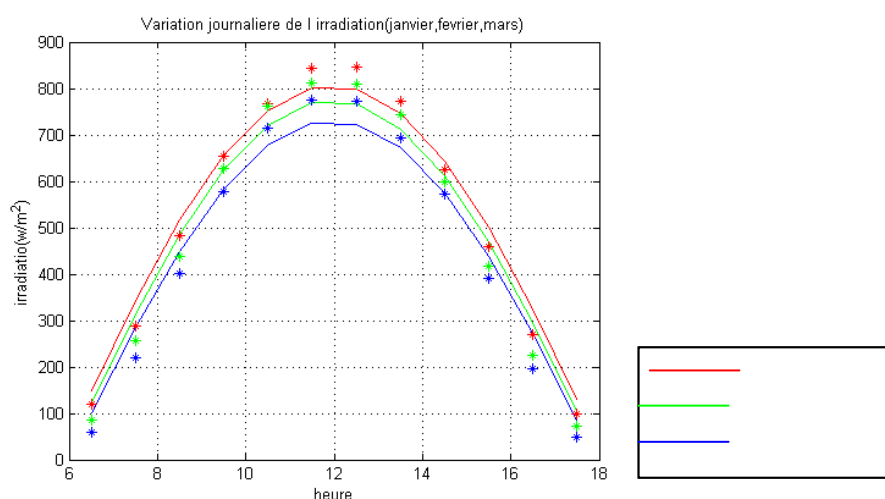


Figure 15-a

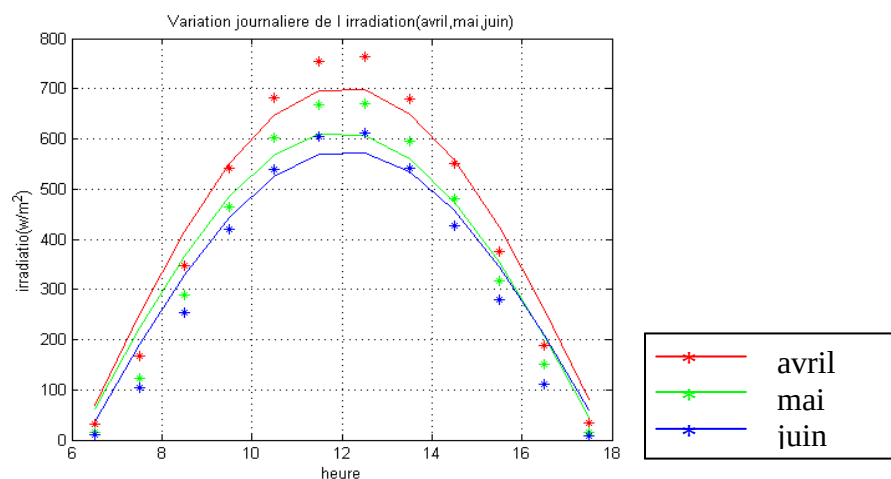


Figure 15-b

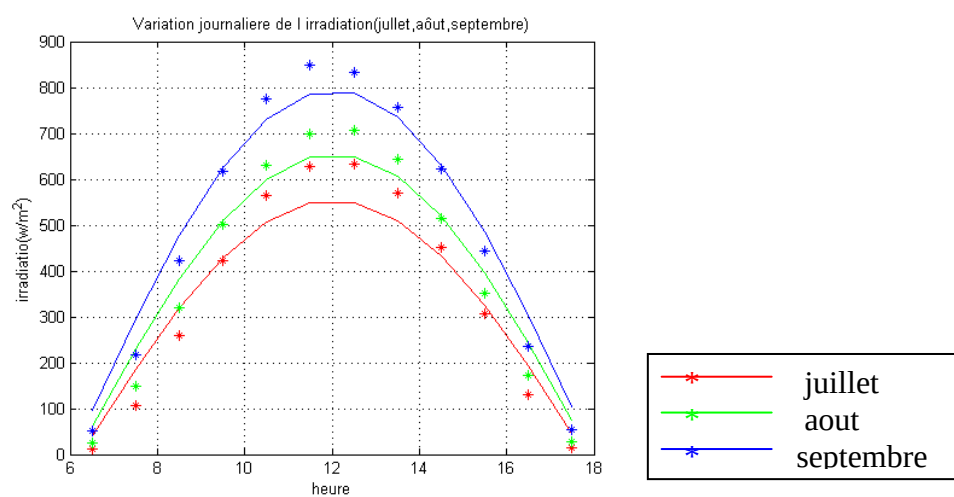


Figure 15-c

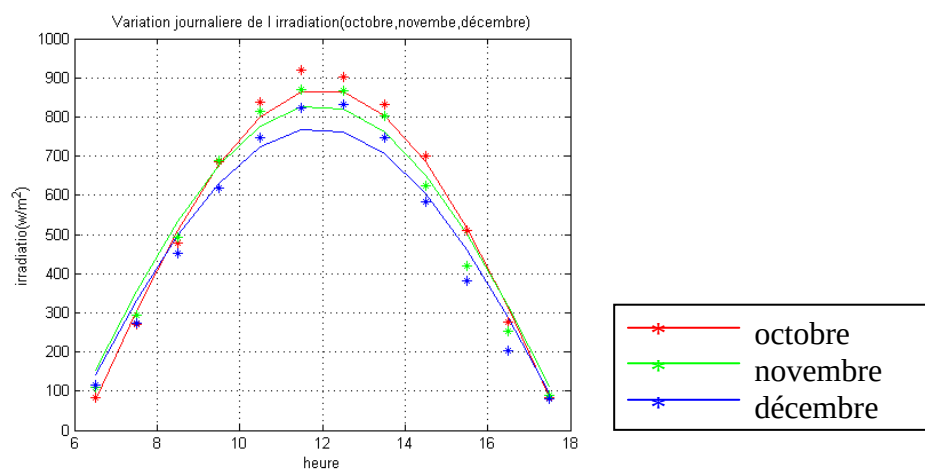


Figure 15-d

II-2-4 : Interprétation des résultats

- ❖ Pour les trois premiers et les trois derniers mois, c'est-à-dire pendant la saison de pluie, les valeurs de l'irradiation sont assez élevées par rapport à celles des six autres correspondant à la saison sèche [10].
- ❖ Nous savons qu'au passage de l'atmosphère, les processus d'absorption et de diffusion se produisent et provoquent l'atténuation du rayonnement direct et donnent naissance au rayonnement diffus. Ce qui explique que pour une forte teneur en eau, cet effet d'absorption et de diffusion doit être fort, alors que la valeur de l'irradiation globale horaire doit être moins élevée. Pour une atmosphère assez humidifiée, l'irradiation doit être aussi assez grande comme le cas du mois d'Avril jusqu'au mois de Septembre. Mais pour les autres mois de l'année, il existe un phénomène assez compliqué pour une atmosphère assez troublée, l'irradiation globale horaire prend des valeurs fortement élevées. Ce qui explique l'effet d'un phénomène dit évaporation-condensation qui engendre ensuite des flux de chaleur supplémentaires. C'est pendant la saison de pluie que ce phénomène est très fréquent.
- ❖ En se rapprochant du début de l'après-midi, la valeur de l'irradiation augmente progressivement pour atteindre un maximum à 12,5h quel que soit le mois. Après, l'irradiation s'apaise jusqu'à la fin de la journée. Au cours de la journée, le rayonnement solaire direct s'ajoute au diffus et au rayonnement propre de l'atmosphère pour constituer la partie positive du bilan. Au contraire, l'énergie qui est réfléchiée par le sol et les nuages, ainsi que les pertes par rayonnement tellurique en sont les éléments négatifs. Le bilan radiatif, qui est la somme algébrique de ces différentes quantités, est positif jusqu'au début de l'après-midi et le sol s'échauffe [14]
- ❖ La température de l'air dans son voisinage, peut continuer à s'élever peu après puisqu'au rayonnement solaire s'ajoute l'effet du rayonnement terrestre. Pendant la nuit, la déperdition l'emporte à cause du rayonnement terrestre que le rayonnement de rétrodiffusion atmosphérique ne peut pas compenser totalement. Le bilan radiatif est négatif, ce qui entraîne un refroidissement qui est d'autant plus marqué que l'atmosphère est plus sec. En effet, les nuages diminuent la déperdition en apportant leur rayonnement propre. De plus, en milieu humide, l'évaporation est plus faible qu'en milieu sec et le

transfert d'énergie du sol à l'atmosphère s'en trouve réduit d'autant. Ce bilan est très imparfait et trop global. Les basses couches de l'atmosphère contenant la quasi-totalité de la vapeur d'eau sont relativement opaques aux radiations IR du rayonnement terrestre et il en est de même pour le gaz carbonique. Il en résulte ainsi que l'atmosphère joue le rôle d'un régulateur thermique. Cet effet de régulation n'est autre que l'effet de serre et sans lequel la température moyenne du sol serait très basse. Le bilan varie considérablement selon la tranche d'atmosphère considérée, selon la latitude et selon l'époque. Il faut tenir compte aussi des échanges d'énergie par conduction, par convection et par le cycle évaporation-condensation de la vapeur d'eau.

- ❖ Tous ces échanges calorifiques conduisent à une certaine distribution de la température à la surface du globe ainsi qu'au sein de l'atmosphère. Par conséquent, la température la plus élevée à 12h conduit à une valeur élevée de l'irradiation.
- ❖ Les valeurs de l'irradiation à 6h et 18h sont les plus basses. Comme nous avons expliqué précédemment, la température est relative à la valeur de l'irradiation. A ces heures (6h et 18h), la température est relativement basse. De plus, les deux courbes de l'irradiation sont plus ou moins confondues car les conditions climatiques de 6h et de 18h sont semblables tout au long de l'année.
- ❖ Nous constatons selon les figures 10 et 13 que, les courbes d'équation :

$$Y=A+B*\cos (w*j) + C*\sin (w*j)$$

constituent une bonne approximation des variations au cours de l'année de la pression et l'irradiation globale.

- ❖ Selon les figures 12, les courbes d'équation $y_i=a_0+a_1t+a_2t^2+a_3t^3$ constituent une bonne approximation des variations journalières de la pression atmosphérique.
- ❖ Selon les figures 15, les courbes d'équation $y = A .\cos (B. (t - C))$ constituent une bonne approximation des variations journalières de l'irradiation globale
- ❖ Les valeurs des coefficients de corrélation R obtenues sont très voisines de l'unité. Nous pouvons noter que le modèle proposé pour l'estimation est satisfaisant.

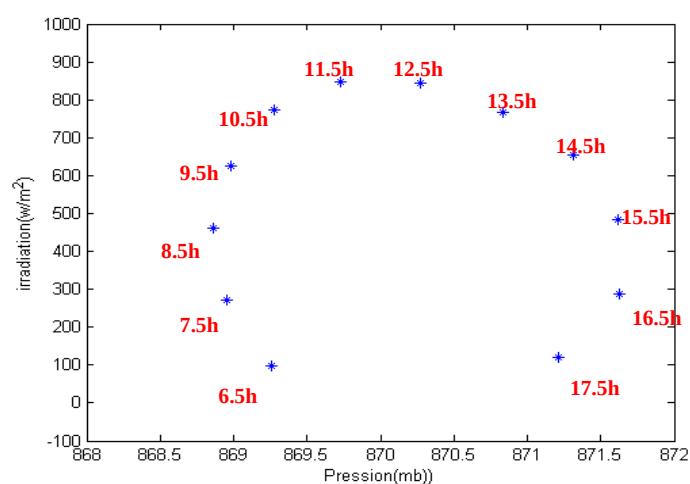
III : ETUDE DE CORRELATION ENTRE IRRADIATION GLOBALE HORIZONTALE ET LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

Pour établir cette corrélation, nous avons utilisé les valeurs moyennes mensuelles des deux grandeurs

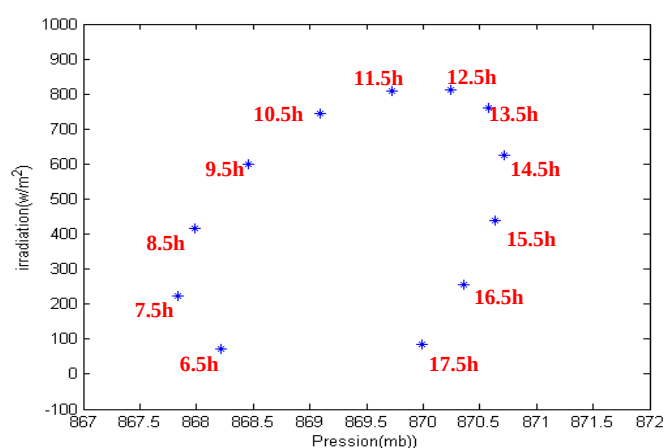
Nous avons utilisé le logiciel Matlab pour établir le programme de tracées des courbes :

$$\text{Irradiation} = f(\text{pressions}).$$

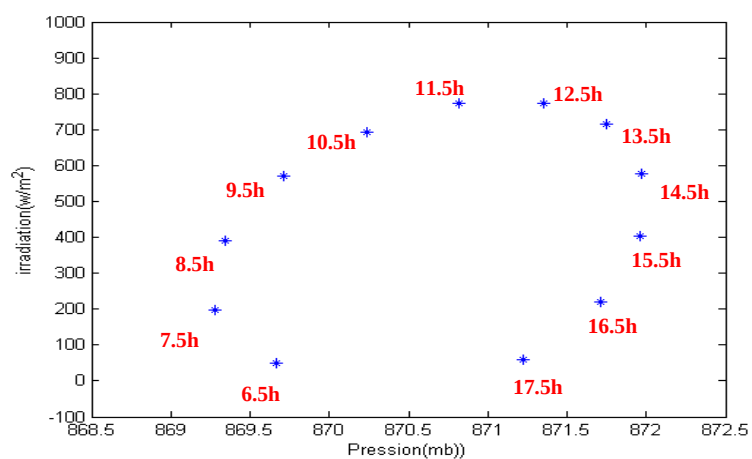
Les figures 16 représentent le nuage des points des couples (pression, irradiation) pour différentes heures légales pour chaque mois de l'année.



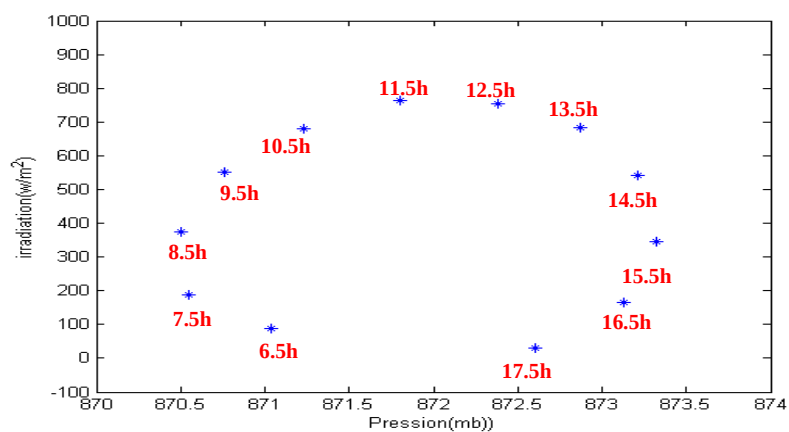
Janvier
Figure 16-a



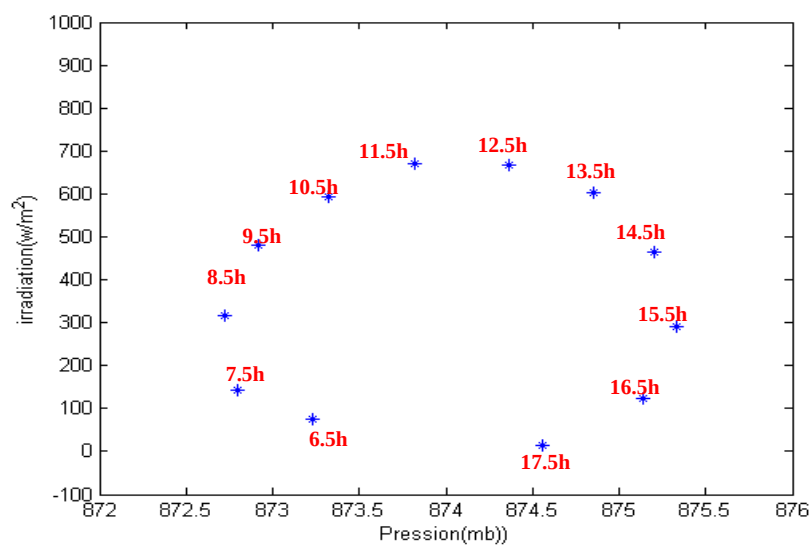
Février
Figure 16-b



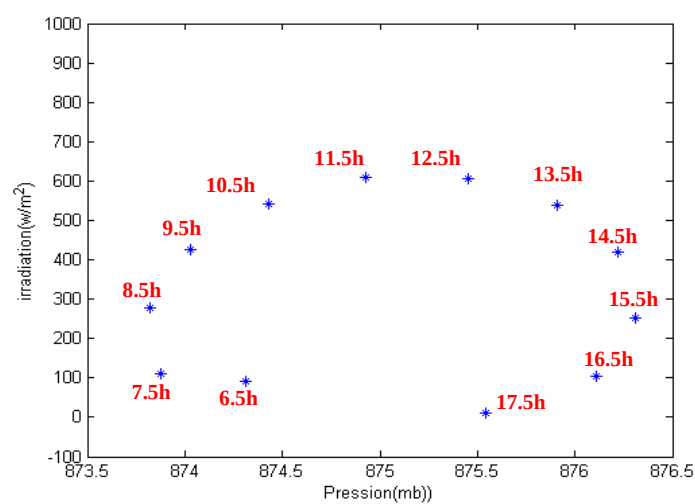
Mars
Figure 16-c



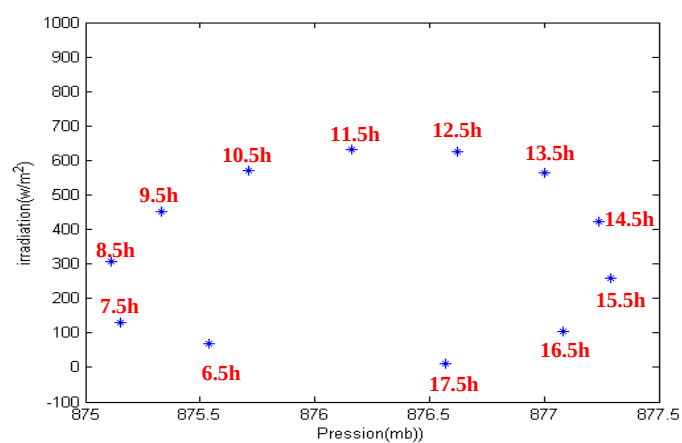
Avril
Figure 16-d



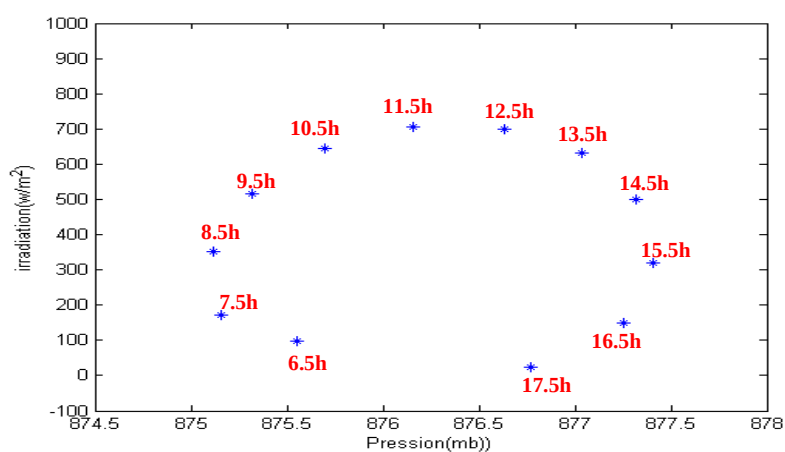
Mai
Figure 16-e



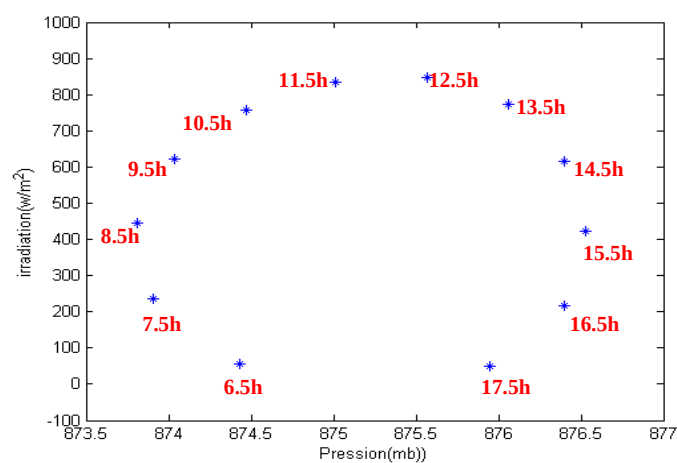
Juin
Figure 16-f



Juillet
Figure 16-g

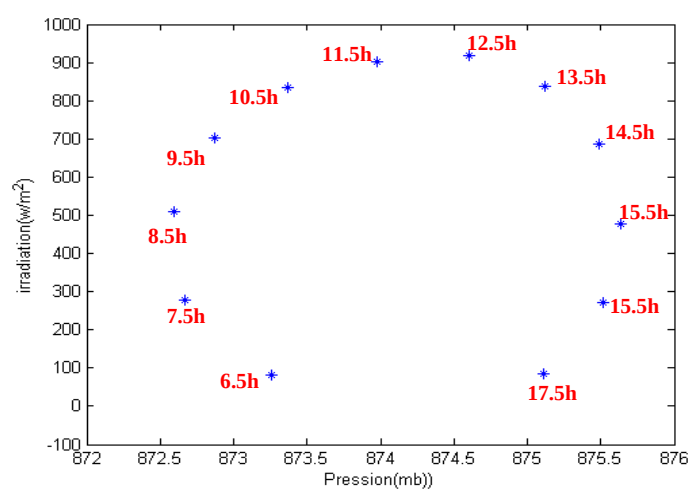


Aout
Figure 16-h



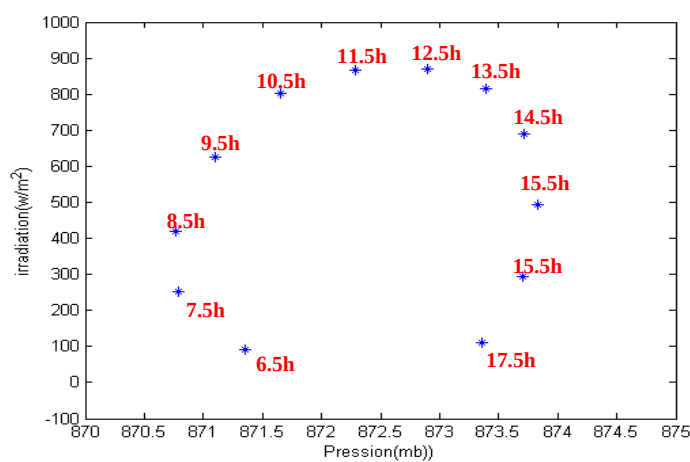
Septembre

Figure 16-i



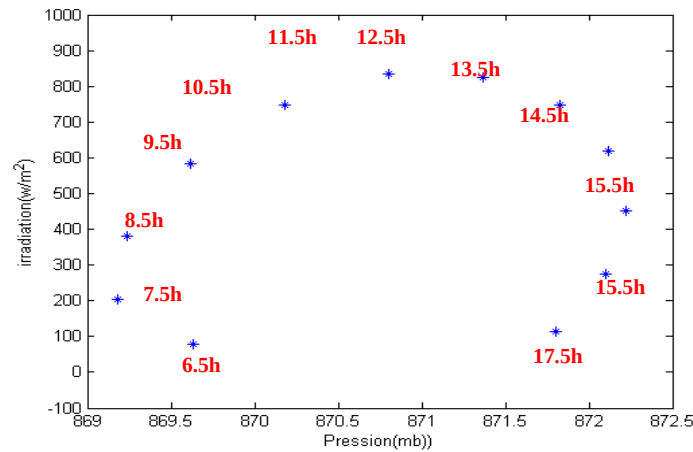
Octobre

Figure 16-j



Novembre

Figure 16-k



Décembre

Figure 16-1

En observant ces nuages des points, nous constatons qu'ils peuvent être approximes par une ellipse :

Les paramètres de chaque ellipse de lissage à déterminer sont :

x_0, y_0 : coordonnées du centre

a et b : longueur des demi-axes

Θ_0 : angle que fait l'axe de l'ellipse avec ox

La méthode des moindres carrés permet de déterminer ces paramètres.

L'équation cartésienne d'une ellipse de demi axes a et b dont les coordonnées du centre sont x_0 et y_0 .est :

$$y=f(x)=\left[y_j - y_0 - b * \left(\frac{x_j - x_0}{a}\right) * \sin\Theta_0 - b * \sqrt{\left(\frac{x_j - x_0}{a}\right)^2} * \cos\Theta_0\right]^2$$

Θ_0 : angle que fait un demi – axe par rapport à Ox

Les paramètres a, b, x_0, y_0 et θ_0 de l'ellipse sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Cela consiste à minimiser la quantité :

$$Q = [y_j - f(x_j)]^2 = \left[y_j - y_0 - b * \left(\frac{x_j - x_0}{a}\right) * \sin\Theta_0 - b * \sqrt{\left(\frac{x_j - x_0}{a}\right)^2} * \cos\Theta_0\right]^2$$

$Q = g(a, x_0, y_0, \Theta)$ est minimale si :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial Q}{\partial a} \right)_{b, x_0, y_0, \theta_0} = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial b} \right)_{a, x_0, y_0, \theta_0} = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial x_0} \right)_{a, b, y_0, \theta_0} = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial y_0} \right)_{a, b, x_0, \theta_0} = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta_0} \right)_{a, b, x_0, y_0} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III} - 1)$$

Ceci conduit au système non linéaire de 5 équations en a, b, x₀, y₀ et θ₀ suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial Q}{\partial a} \right)_{b, x_0, y_0, \theta_0} = \sum_{j=1}^n 2 \left(\frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a^2} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)^2}{a^3 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}}} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial b} \right)_{a, x_0, y_0, \theta_0} = \sum_{j=1}^n 2 \left(-\csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{\sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial x_0} \right)_{a, b, y_0, \theta_0} = \sum_{j=1}^n -2 \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial y_0} \right)_{a, b, x_0, \theta_0} = \sum_{j=1}^n 2 \left(\frac{b \sin(\theta_0)}{a} - \frac{b \cos(\theta_0)(x_j - x_0)}{a^2 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}}} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc(\theta_0) \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) = 0 \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta_0} \right)_{a, b, x_0, y_0} = \sum_{j=1}^n 2 \left(b \sin(\theta_0) \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \csc(\theta_0)(x_j - x_0)^2}{a} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) = 0 \end{array} \right.$$

Pour résoudre l'équation on utilise la méthode d'approximation successive. Voici le principe d la méthode

On pose :

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \sum_{j=1}^n 2 \left(\frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a^2} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)^2}{a^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}}} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) \\
 f_2 &= \sum_{j=1}^n 2 \left(-\csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{\sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) \\
 f_3 &= \sum_{j=1}^n -2 \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) \\
 f_4 &= \sum_{j=1}^n 2 \left(\frac{b \sin(\theta_0)}{a} - \frac{b \cos(\theta_0)(x_j - x_0)}{a^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}}} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc(\theta_0) \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right) \\
 f_5 &= \sum_{j=1}^n 2 \left(b \sin(\theta_0) \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \csc(\theta_0)(x_j - x_0)^2}{a} \right) \left(y_j - y_0 - b \csc \theta_0 \sqrt{1 - \frac{(x_j - x_0)^2}{a^2}} - \frac{b \sin(\theta_0)(x_j - x_0)}{a} \right)
 \end{aligned}$$

nous pouvons alors écrire le système sous forme matricielle suivant

$$F(x)=0$$

Les coefficients a, b, x_0, y_0, θ_0 peuvent être considérés comme les éléments de vecteur de dimension 5

$$X \begin{bmatrix} a \\ b \\ x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}$$

F est un vecteur de fonction dérivable a 5 dimensions

$$F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{pmatrix}$$

On montre en Analyse Numérique que la relation entre les solutions approchées d'ordres $k+1$ et k s'écrit :

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - W^{-1}(X^{(k)}) \cdot F(X^{(k)})$$

$W^{-1}(X^{(k)})$ étant l'inverse de la matrice jacobienne W de F

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a} & \frac{\partial f_1}{\partial b} & \frac{\partial f_1}{\partial x_0} & \frac{\partial f_1}{\partial y_0} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_0} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a} & \frac{\partial f_2}{\partial b} & \frac{\partial f_2}{\partial x_0} & \frac{\partial f_2}{\partial y_0} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_0} \\ \frac{\partial f_3}{\partial a} & \frac{\partial f_3}{\partial b} & \frac{\partial f_3}{\partial x_0} & \frac{\partial f_3}{\partial y_0} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_0} \\ \frac{\partial f_4}{\partial a} & \frac{\partial f_4}{\partial b} & \frac{\partial f_4}{\partial x_0} & \frac{\partial f_4}{\partial y_0} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_0} \\ \frac{\partial f_5}{\partial a} & \frac{\partial f_5}{\partial b} & \frac{\partial f_5}{\partial x_0} & \frac{\partial f_5}{\partial y_0} & \frac{\partial f_5}{\partial \theta_0} \end{bmatrix}$$

En prenant une solution initiale grossière pour chaque mois et en adoptant cette méthode des approximations successives, on obtient les valeurs des coefficients a , b , x_0 , y_0 et θ_0 .

CONCLUSION GENERALE

Notre travail est une contribution à l'étude du gisement solaire à Antananarivo.

L'étude statistique et l'établissement des formules reliant les valeurs mesurées au numéro du jour J ou au temps légal t permettent, d'une part de visualiser les variations annuelle et journalière de la pression atmosphérique et de l'irradiation globale horizontale et d'autre part de reconstituer les valeurs manquantes.

Nous pouvons aussi constater l'existence de corrélations entre les valeurs moyennes mensuelles de la pression et celles de l'irradiation globale horizontale.

Nous avons choisi le modèle sinusoïdal de période une année soit 366 jours pour les variations annuelles de la pression atmosphérique et de l'irradiation globale horizontale :

$$Y = A + B.\cos (w.J) + C.\sin (w.J)$$

Les résultats obtenus montrent que cette fonction donne un lissage satisfaisant des valeurs mesurées de ces deux grandeurs permettant d'estimer leurs valeurs à l'heure légale t du jour J de l'année.

Pour les variations dans la journée de l'irradiation, la fonction $Y = A. \cos [B (t - C)]$ constitue une bonne approche de ses valeurs moyennes mensuelles.

La détermination des coefficients A, B et C permet d'évaluer, pour un mois considéré :

- La valeur maximale de l'irradiation
- L'heure légale où la hauteur du soleil culmine
- La durée du jour

Pour la pression atmosphérique, les variations diurnes peuvent être approximées par un polynôme de du 3^e degré en t (heure légale) avec un coefficient de corrélation R proche de l'unité.

Les modèles que nous avons proposés aboutissent à des nouvelles formules empiriques pour estimer l'irradiation globale horizontale et la pression atmosphérique du site d'Antananarivo.

Puisque la station météorologique d'Antananarivo effectue quotidiennement, des mesures tri horaires de la pression atmosphérique, on peut alors déterminer la valeur de l'irradiation à partir de celle de la pression.

La connaissance complète du gisement solaire d'un site est une opération à long terme. Notre travail, malgré le cadre dans lequel il a été effectué, n'est pas encore terminé. Il nous faut encore la résolution du système de 5 équations non linéaires permettant l'évaluation des paramètres de l'ellipse de lissage de la relation Irradiation = f (pressions). Ce sera la suite de notre travail.

Annexe A :

Programme : lissage de la pression et de l'irradiation journalière (turbo pascal)

```

program grafprs6;
(*$I typedef.sys*)
(*$I graphix.sys*)
(*$I kernel.sys*)
(*$I polygon.hgh*)
(*$I polygon2.hgh*)
const
  numpoint=12;
  ymin=865;
  ymax=880;
  ypas1=1;
  xmin=-50;
  xmax=400;
  xpas1=50;
  ngrady1=12;
  ngradx1=8;
  N= 180;
type
  vect = array[1..numpoint] of real;
  chaine=string[15];
var
  X,Y:vect;
  I,j:integer;
  A,B,C,D,F,G:plotarray;

procedure LireVect(var X,Y:vect);
begin
  x[1]:=15;x[2]:=46;x[3]:=74;x[4]:=105;x[5]:=135;x[6]:=166;x[7]:=196;
  x[8]:=227;x[9]:=258;x[10]:=288;x[11]:=319;x[12]:=349;
  y[1]:=870.8;y[2]:=869.8;y[3]:=870.9;y[4]:=872.2;y[5]:=874.1;y[6]:=875.1;
  y[7]:=876.2;y[8]:=876.4;y[9]:=875.6;y[10]:=874.8;y[11]:=873.1;y[12]:=871.6;
end;

procedure ecriture2(var xx:vect);
var j,i:integer;
begin
  for j:=1 to numpoint do write(xx[j]:5:1,' ');
  writeln
end;

procedure definecran;
begin
  defineworld(1,xmin,ymin,xmax,ymax);
  selectworld(1);
  selectwindow(1);
end;

procedure traceraxes;
var i:integer;
xoo,yoo,xm,ym:real;
begin
  xoo:=xmin+xpas1;
  yoo:=ymin+ypas1;
  xm:=xmin+ngradx1*xpas1;
  ym:=ngrady1*ypas1;

```

```

for i:=1 to ngradx1 do
  begin
    A[i,1]:=xoo+(i-1)*xpas1;    A[i,2]:=yoo;    end;
    axisglb:=true;
    drawpolygon(A,1,ngradx1,1,3,0);
  for i:=1 to ngrady1 do
    begin
      C[i,1]:=xoo;
      C[i,2]:=yoo+(i-1)*ypas1;
      end;
      axisglb:=true;
      drawpolygon(C,1,ngrady1,1,3,0);
      F[1,1]:=A[1,1];
      F[1,2]:=(ngrady1-1)*ypas1+ymin+ypas1;
      F[2,1]:=F[1,1];
      F[2,2]:=ngrady1*ypas1+ymin+ypas1;
      F[3,1]:=xmax;
      F[3,2]:=ngrady1*ypas1+ymin+ypas1;
      F[4,1]:=xmax;
      F[4,2]:=ymin+ypas1;
      F[5,1]:=xmax-2.0*xpas1;
      F[5,2]:=ymin+ypas1;
      axisglb:=true;
      drawpolygon(F,1,5,0,3,0);
    end;

  procedure pause;
  var c:char;
  begin
    sound(350);delay(1000);nosound;    gotoxy(5,54);
    writeln('pour continuer presser une touche ');
    read(kbd,c)
  end;

  procedure tracercourbe(X1,Y1:vect);
  var i :integer;
  begin
    for i:=1 to numpoint do
      begin
        B[i,1]:=x1[i];
        B[i,2]:=y1[i];
      end;
      axisglb:=true;
      drawpolygon2(B,1,numpoint,4,2,0);
    end;

  procedure TRACER1;
  var i:integer;
      xa,deltax:real;
  begin
    xa:=xmin+xpas1;
    deltax:=2;
    for I:= 1 to N do
      begin
        G[i,1]:=xa;
        G[i,2]:=873.4-2.45*cos(0.0172*xa)-1.87*sin(0.0172*xa);
        xa:=xa + deltax;
      end;
      axisglb:=true;
      drawpolygon(G,1,n,9,0,0);
    end;

```

Annexe B :

Programme : traçage des courbes de lissage, moyenne mensuelle et variation journalière de la pression et l'irradiation(mat Lab)

```
clear all,close all,clc
t=ZA(:,1);
%h=ZA(:,2);
%h=ZA(:,3);
%h=ZA(:,4);
h=ZA(:,5);%
%h=ZA(:,6);%
plot(t,h,'b');
axis([0 366 -40 90])
%axis([0 366 400 1000])
hold on
%global x
%Graphe de la pression en fonction du mois
Fi=[15 46 75 106 136 167 197 228 259 289 320 350];
%Li=[66.42 45.37 29.47 15.43 7.10 4.64 5.89 12.80 25.43 44.03 60.55 64.55];% @ enina
%Li=[569.33 533.57 486.99 442.55 376.22 338.44 339.91 412.64 524.82 589.02 592.42
534.47];
%Li=[845.64 817.37 771.77 757.06 665.18 609.94 628.91 705.78 844.98 908.25 872.13
822.33];
Li=[542.77 517.52 478.92 460.363 398.21 351.20 380.57 436.32 534.34 601.26 523.68
476.55];
%Li=[53.47 38.02 23.98 16.49 7.85 4.65 6.82 14.08 27.88 43.35 50.66 44.20];
plot(Fi,Li,'*g');
x=0:10^-3:360;
%y=31.767+30.885*cos(0.0172*x)-6.920*sin(0.0172*x);
%y=478.31+112.66*cos(0.0172*x)-41.59*sin(0.0172*x);
%y=770.77+109.66*cos(0.0172*x)-49.32*sin(0.0172*x);
```

```

%y=475.18+73.99*cos(0.0172*x)-36.62*sin(0.0172*x);
y=27.60+22.66*cos(0.0172*x)-7.26*sin(0.0172*x);
plot(x,y,'r');
%Titre et information title('Variation annuelle de l'irradiation et
%distribution des moyennes mensuelles(6h)');
xlabel('Jour');
ylabel('irradiation(wh/m^2)');
%L=alpha*F+beta
%A=[Fi' ones(size(Fi))];
%B=Li';
%X=inv(A'*A)*(A'*B);
%fprintf('alpha=%f\nbeta=%f',X(1),X(2)); Representation graphique
%F=0:0.1:366;
%L=X(1)*F+X(2);
%plot(F,L,'*g');
%legend('nuage des points','L=\alpha F+\beta'); load(AZ) t=ZA(:,1);
%h=ZA(:,2); plot(t,h,'+r');
legend('irradiation journalière', 'moyenne mensuelle de l'irradiation', 'courbe de lissage', 4);
title('Variation annuelle de l'irradiation et distribution de moyenne mensuelle(18h)')

```

annexe C : lissage de l'irradiation journalière (Mat Lab)

```
function [a,n] = tsiry
n = 366;
omega = 2*pi/366;
for i = 1:12
    undeui(i,1) = cos(omega*i);
end;
for i = 1:12
    untroi(i,1) = sin(omega*i);
end;
for i = 1:12
    deudeui(i,1) = cos(omega*i)^2;
end;
for i = 1:12
    troitroi(i,1) = sin(omega*i)^2;
end;
for i = 1:12
    deutroi(i,1) = cos(omega*i)*sin(omega*i);
end;
%formation de la matrice
R=[n,sum(undeui),sum(untroi);sum(undeui),sum(deudeui),sum(deutroi);sum(untroi),sum(deutroi),sum(troitroi)];
d = xlsread('www'); %xlsread('databasetsiry');
% d1 = d(:,2);
% d = wk1read('tsirydonnee');
%formation du second membre
for p = 1:5
    for j = 1:12
        k(j,p) = j*d(j,p+1)*cos(omega*j);
    end;
end;
for p = 1:5
    for j = 1:12
        kk(j,p) = j*d(j,p+1)*sin(omega*j);
    end;
end;
for i = 1:12
    Y(:,i) = [sum(d(:,i+1));sum(k(:,i));sum(kk(:,i))];
end;
for i = 1:5
    a(:,i) = inv(R)*Y(:,i);
end;
function x = calltsiryfunsinus
% x0 = [870.2;360;0;2;450]; % Make a starting guess at the solution
x0 = [2;2*pi/14;0];
options = optimset('Display','iter'); % Option to display output
[x,fval] = fsolve(@tsirysinusoid,x0,options); % Call optimizer
y=350.0093*cos(0.5187*(6.5- 2.6289));
```


plot(y,'-r')

Annexe D : calcul de coefficient de corrélation :

La formule de coefficient de corrélation est donnée par le formule :

$$R = \mp \sqrt{\frac{\text{variation expliquées}}{\text{variation totale}}} = \mp \sqrt{\frac{\sum (y_{est} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

y_{est} = fonction de lissage

$$y_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Principe des moindres carrés :

Le principe de moindres carrées consiste à minimiser la quantité Q tel que

$$Q = \sum_i [y_i - f(x_i)]^2$$

$f(x_i)$: fonction de lissage

$$Q = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Q est minimale si :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial x_2} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial x_3} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial x_n} = 0 \end{array} \right.$$

On obtiendra un système de n équations à n inconnues en $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$

La résolution de ce système d'équation linéaire ou non selon le cas donne les valeurs $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MARGOLAINE Villev N <<Energies renouvelables >>
- [2] R.Peyturaux, <<Energie solaire de la recherche appliquée aux utilisations pratiques au perspective d'avenir>>
- [3] RAKOTONDRAKISOLO Nirina, <<Corrélation entre les valeurs horaires de l'irradiation globale horizontale et l'humidité relative >> D.E.A. Energétique Faculté des Sciences, Université de Madagascar, Antananarivo
- [4] G.W. Padridge and al., <<Radioactive Process in Meteorology and Climatology>>, Elsevier, New York, 1976).
- [5] http://www.alertes-meteo.com/divers_pheno/pression.htm
- [6] J. M. Chassériaux, « Conversion thermique du rayonnement solaire », Jouve – Paris (1984), p 99 - 178.
- [7] C.Delorme, « Le Gisement solaire, Système énergétique solaire », Faculté des Sciences Avignon, p 4 – 85.
- [8] NATHALIE BARRETTE, 2008 <<Energie : formes, échanges et bilans>>
- [9] <http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/>
- [10] D .RAKOTOSALAMA, (1993) <<Contribution à l'étude du Gisement solaire >> d'Antananarivo .Thèse de Doctorat, Université de Madagascar, Antananarivo, 180p
- [11] BOLLER, E, GUERER, B, Comparaison de modeles statistique saisonnière et non saisonniere en meteorologie (1979)115-130
- [12] K. Thomas K.an Van Heuklon, <<Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models', Solar Energy,>> Vol. 22, pp 63 - 68, 1979
- [13] R.E. Bird and R.L Hulstrom, <<A Simplified Clear Sky Model for a Direct and Diffuse Insolation onHorizontal Surface>>, Goldon Colorado, 1981. Technique et Documentation, 2ième Edition, 1980
- [14] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, <<Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et Applications>>.

**Titre : ETUDE DE LA CORRELATION ENTRE L'IRRADIATION GLOBALE
HORIZONTALE ET LA PRESSION ATMOSPHERIQUE A ANTANANARIVO**

RESUME

Nous avons contribué à l'étude du gisement solaire, l'irradiation globale horizontale et la pression atmosphérique à Antananarivo.

Nous avons fait l'étude des variations au cours de la journée de la pression atmosphérique et de l'irradiation d'une part, et variations annuelles et de ces deux grandeurs d'autre part.

Ensuite, nous avons essayé d'établir la corrélation existante entre ces deux paramètres météorologiques.

Mots clés : irradiation solaire globale horizontale, pression atmosphérique, gisement solaire, atmosphère

ABSTRACT

We contributed to the yearly and during the day's variations of horizontal whole – body irradiation and the atmosphere pressure in Antananarivo.

Next, we made the survey of the variations during the day of the atmosphere pressure and the irradiation.

Then, we established the interrelationship between these two meteorological parameters.

.Key words: Time irradiation, atmosphere press ion, solar layer, atmosphere

Encadreur :

Dr RAKOTOSALAMA Donné

Impétrante :

ANDRISOANILAINA Tsiry

Lot VT 85 Bis XIA Andohanimandroseza

Tél : 033 02 484 79 – 034 17 026 08

e-mail : thsirit@yahoo.fr

