



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

BENRABAH Athmane

DJAIDJA Fouad

### Thème

---

---

DETERMINATION DE LA POSITION DU SOLEIL A M'SILA

---

---

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
BAKHTI Fatima zahra	MCA	Président
IHDDADENE Nabila	Professeur	Encadreur
BOUAOUINA Lalouani	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

# Remerciements

Nous tenons premièrement à remercier dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste mémoire.

En second lieu, nous tenons à remercier nos encadreurs **Pr. HADDADEN N.** pour leur précieux conseil, leur patience, leur aide et leur orientation ficelée tout au long de notre travail.

Nos remerciement les plus distinguées vont également aux membre du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail se de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou loin à la réalisation de ce modeste travail

**Merci à tous à toutes**

## Dédicace

A ma très chère mère FATMA

pour son amour et ses encouragements.

A mon très cher père AMAR,

qui est le premier soutien pour moi.

A mes frères MOUHAMMED , SIRADJ et mon cher  
ISHAQ.

A tout ma famille

Et mes amis : LOTFI, BILAL, IMAD , SAMI  
YOUCEF , MAROUNE , ACHRAF

A tous les amis qui ne sont pas mentionnés.

DJAIDJA Fouad

## **Dédicace**

A ma très chère mère FATIMA

pour son soutien précieux et son amour.

A mon très cher père AHMED

A mes frères

A ma Grand-mère MERIEM

A tout ma famille

Et mes amis : ELHOCINE LABIAD, SEDDIK  
LOUKRIZ.

A tous les amis qui ne sont pas mentionnés.

**BENRABAH Athmane**

# Sommaire

<b>Sommaire</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste de figure</b> .....	<b>III</b>
<b>Liste de Tableau</b> .....	<b>IV</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I SOLEIL ET ENERGIE SOLAIRE</b>	
I.1 Introduction .....	2
I.2 Soleil .....	2
I.2.1. Le diamètre du Soleil .....	3
I.2.2. La forme du Soleil .....	5
I.2.3. L'éclairement solaire total .....	7
I.3. Structure Du Soleil.....	9
I.3.1. Structure interne .....	10
I.3.2 Structure externe .....	11
I.4. Situation De Soleil Dans La Voie Lactée .....	12
I.5 Activité solaire.....	12
I.5.1 Les taches solaires .....	13
I.5.2 champs magnétique solaire .....	14
I.5.3 Les éruptions solaires .....	14
I.6 L'observation du Soleil .....	14
I.6.1 Les instruments en orbite étudiés .....	16
I.6.2 Les instruments au sol étudiés .....	21
I.7 Energie solaire .....	23
I.7.1 Différents types d'énergie solaire .....	23
Conclusion.....	25
<b>CHAPITRE II POSITION DU SOLEIL</b>	
II.1. Introduction .....	26
II.2. Mouvement de la terre autour du soleil .....	26
II.3. Système de coordonnée horaires .....	27
II.3.1. Déclinaison du soleil ( $\delta$ ) .....	27
II.3.2. Angle horaire ( $\omega$ ) .....	28
II.4. Coordonnées horizontales (coordonnées azimutales).....	29
II.4.1 Hauteur du soleil H .....	29
II.4.2. Azimut du soleil ( $\alpha$ ).....	30
Conclusion.....	31

**CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSION**

III.1 Introduction..... 32

III.2 La déclinaison solaire ..... 32

III.3 Evolution de la durée du jour à M'Sila au cours de l'année..... 33

III.4 Evolution de la hauteur du Soleil à M'Sila au cours de la journée et de l'année ..... 34

III.5 Position du lever et du coucher du Soleil à M'Sila par rapport à l'est et à l'ouest ..... 38

III. 6 Conclusion ..... 43

Conclusion générale ..... **44**

Références Bibliographiques ..... **45**

## Liste de figure

Figure I. 1 Etoile du soleil .....	2
Figure I. 2 Structure du soleil (Photo Soho). .....	11
Figure I. 3 Situation De Soleil.....	12
Figure I. 4 Le cycle de 11 ans observé à Meudon au spectrohéliographe. ....	13
Figure I. 5 Les tâches solaires. (a) : zones sombres caractérisées par une température de 3500°C, inférieure à celle de son environnement proche de 5500°C. (b) Lignes de champ magnétique à configuration toroïdale. .[15] .....	14
Figure I. 6 (I) Vue d'artiste du satellite PICARD (Crédits : CNES). (II) Instruments au sol de la mission PICARD observant le Soleil sur le plateau de Calern à l'Observatoire de la Côte d'Azur (Crédits : CNRS- LATMOS-OCA).(III) Vue d'artiste du satellite SDO (Crédit NASA).....	16
Figure I. 7 Configuration de l'instrument SODISM avec les principaux composants optiques. Crédits : CNRS-LATMOS.....	17
Figure I. 8 Vue générale de DIARAD, la partie radiométrique de l'instrument SOVAP. Cet ensemble est constitué d'obturateurs, de diaphragmes d'entrée à ouverture limitée, de miroirs de précision, de cavités cylindriques, de détecteurs de puissance associés à des réchauffeurs, d'un puit thermique et d'un servo (système d'asservissement des puissances de réchauffage des détecteurs).Crédits : IRMB. ....	19
Figure I. 9 Configuration optique de l'instrument HMI. Crédits : Université de Stanford .....	20
Figure I. 10 Schéma optique de l'instrument SOLAR/SOLSPEC. Crédits : LATMOS& IASB. ..	21
Figure II. 1 Mouvement de la terre autour du Soleil. [23].....	27
Figure II. 2 Déclinaison solaire. ....	28
Figure II. 3 Coordonnées horaires. ....	28
Figure II. 4 Coordonnées horizontales du soleil [29] .....	31
Figure III. 1 Déclinaison solaire $\delta$ [Web 1] .....	32
Figure III. 2 Evolution de la déclinaison du soleil. ....	33
Figure III. 3 Evolution de la durée du jour à M'Sila.....	33
Figure III. 4 Trajectoire du soleil au cours de la journée et de l'année [Web2] .....	34
Figure III. 5 trajectoire du soleil au cours de la journée, au début, au milieu et à la fin de chaque mois de l'année à M'Sila. ....	35
Figure III. 6 Soleil et ombre [Web3]. ....	36

Figure III. 7 Evolution de la hauteur du Soleil aux équinoxes du printemps et d'automne et aux solstices d'hiver et d'été. ....	37
Figure III. 8 Position du soleil au lever et au coucher par rapport à l'est et à l'ouest à M'Sila. ....	38
Figure III. 9 Azimut solaire [Web2] .....	38
Figure III. 10 Evolution de l'azimut solaire à M'Sila au mois de Janvier.....	39
Figure III. 11 Evolution de l'azimut solaire à M'Sila au cours de l'année.....	39
Figure III. 12 Trajectoire du soleil calculée à M'Sila.....	43

### Liste de Tableau

<b>Table 1.1</b> Principales caractéristiques des télescopes étudiés.....	22
---	----

## Introduction générale

L'énergie solaire est une source d'énergie reçue par la Terre en provenance du Soleil. Elle est classée dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. Elle est dite verte car sa production n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité et de la chaleur en utilisant des capteurs destinés à ces faits.

La connaissance de la trajectoire du Soleil est intéressante dans tout projet visant l'exploitation de l'énergie solaire. En effet, Cette information est indispensable pour le calcul des apports solaires, pour le choix de l'exposition d'un immeuble, l'implantation de systèmes actifs solaires (thermique ou photovoltaïque), l'aménagement des parties extérieures voisines, l'éclairage naturel des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres, des protections solaires et de la végétation, etc.

On sait que la course de la Terre autour du Soleil décrit une ellipse légèrement aplatie. Dans cette ronde annuelle autour du Soleil, la Terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures autour de l'axe des pôles.

À un instant donné, la hauteur et l'azimut du Soleil déterminent la position du Soleil dans le ciel. Ce mémoire de fin d'étude se veut positionner le Soleil à M'Sila à chaque minute au cours de l'année.

Ce travail a été abordé à travers trois chapitres.

Le premier est dédié au Soleil et à l'énergie solaire. En fait, ce chapitre présente en général toutes les informations concernant le Soleil et son énergie.

Le second regroupe toutes les équations nécessaires à la détermination de la position du Soleil dans le ciel,

Le dernier présente les résultats de calcul, c'est-à-dire la position qu'occupe le Soleil dans le ciel de M'Sila à travers le diagramme solaire.

---

# Chapitre I

---

## I.1 Introduction

Si l'énergie est le moteur de l'humanité, l'énergie solaire en est le centre vital. Sans soleil, aucune vie n'est possible sur Terre. Elle est utilisée également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière, qui s'appelle énergie solaire photovoltaïque. [1]

## I.2 Soleil

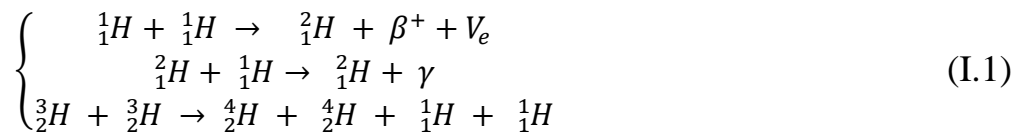
Le soleil (figure I.1) est l'étoile la plus proche, elle apparaît sous la forme d'une sphère gazeuse de 696 000 km de rayon, soit 109 fois celui de la terre, dont on évalue la masse à 1030 kg. Sa période de rotation moyenne s'étale sur vingt-cinq jours. La source d'énergie provient d'une réaction nucléaire transformant l'hydrogène en hélium, prenant naissance au centre du soleil.

Le Soleil est actuellement constitué de 75% d'hydrogène et de 25% d'hélium en masse, de 92,1% d'hydrogène et de 7,8% d'hélium en nombre d'atomes. Tous les autres éléments ne représentent pas plus de 0,1%. Ces chiffres varient lentement au fur et à mesure que le Soleil convertit l'hydrogène en hélium par réaction de fusion nucléaire.



Figure I. 1 Etoile du soleil

Le processus dominant commence par la fusion de deux protons puis se poursuit par l'apport d'un troisième proton :



Le Soleil se trouve en pleine phase de combustion de l'hydrogène. On a calculé qu'il pouvait encore rayonner pendant cinq milliards d'années.

Les astrophysiciens identifient des couches à sa périphérie, l'intérieur n'est pas accessible à l'analyse, les couches extérieures masquent les phénomènes mis en jeu [2].

### I.2.1. Le diamètre du Soleil

Avant le développement de l'astrophysique, l'étude d'un astre concernait surtout ses propriétés géométriques. C'est pourquoi la mesure du diamètre du Soleil a été entreprise dès l'Antiquité. Cette mesure a été réalisée à différentes époques par les différentes Ecoles d'Astronomie (grecque, arabo-musulmane, française, allemande, anglaise, américaine, etc.) sans pouvoir fournir une conclusion définitive quand à la valeur absolue du diamètre de notre astre. La valeur la plus communément admise aujourd'hui est celle déterminée par Arthur Auwers (1838–1915) lors des passages de Vénus de 1874 et 1882. La valeur canonique du demi-diamètre solaire  $1$  (ou rayon solaire  $R$ ) a été obtenue en utilisant un héliomètre et par le biais d'observations visuelles [3]. Depuis plus de 2000 ans, différentes méthodes ont été développées afin de déterminer le diamètre de notre astre. On peut énumérer de manière non exhaustive les méthodes de mesure suivantes :

- Les temps de passage successifs des bords solaires à un repère donné,
- Les mesures angulaires (bâton de Jacob, secteur, quart de cercle, cercle répétiteur, lunette méridienne, sextant, etc.),
- Les mesures micrométriques (micromètre de William Gascoigne, etc.),
- Les éclipses solaires,
- Les passages de planète (Mercure ou Vénus).

Les avancées technologiques ont permis d'améliorer la précision des mesures. Cependant, les résultats obtenus ont fait l'objet de débats en raison de la grande dispersion des valeurs rapportées. Les différences obtenues dépendent principalement de la méthode de mesure, de l'instrumentation utilisée, des effets indirects affectant la mesure, et des différences

entre les observateurs pour les méthodes visuelles. De plus, vouloir mesurer avec précision le diamètre d'une sphère gazeuse, dont l'enveloppe est en perpétuel changement, représente un réel défi. Et ceci d'autant plus que l'atmosphère terrestre, à travers laquelle les observations sont faites, constitue un gros handicap. A ces difficultés s'ajoute celle de la définition du bord solaire qui sert de repère géométrique pour délimiter la sphère solaire. Malgré ces obstacles, la mesure du diamètre solaire et de ses variations représente depuis très longtemps des programmes de Recherche dans de nombreux observatoires. Au cours de ces 40 dernières années, une des plus longues séries de mesure a été obtenue avec l'astrolabe de Danjon [4] installé sur le plateau de Calern (Observatoire de la Côte d'Azur). Les mesures réalisées semblent indiquer qu'il existe une anti-corrélation entre le diamètre solaire et l'activité solaire. Si cette anti-corrélation était confirmée, cela permettrait d'utiliser la mesure du diamètre comme traceur (proxy) de l'activité solaire tout comme les taches solaires.

Cependant, l'interprétation des observations au sol est controversée. Comme mentionné précédemment, les mesures de diamètre solaire sont sensibles aux effets de réfraction et de déformation du front d'onde par la turbulence atmosphérique et potentiellement par les effets de diffusion de la lumière par les aérosols qui dégradent la qualité des images. La seule façon de s'affranchir des effets atmosphériques est de pouvoir réaliser des observations hors atmosphère avec des instruments stables.

La détermination précise du diamètre solaire est considérée comme un des plus vieux problèmes en astrophysique. La valeur absolue du diamètre de notre astre représente aussi un intérêt en astronomie stellaire car le Soleil est le seul repère de dimension d'une étoile connu avec une bonne précision. De même, connaître le diamètre solaire avec la plus grande précision est indispensable pour savoir si notre étoile est stable dans le temps. En effet, une des motivations concernant l'observation du diamètre solaire au cours du temps est liée au fait qu'il puisse varier. Les variations du diamètre solaire présentent un intérêt scientifique par rapport à sa signification astrophysique et par rapport à sa potentielle relation avec le climat de la Terre. Enfin, le diamètre de notre astre correspond à un des paramètres utilisé au niveau des modèles de physique solaire. Pour les modèles ne faisant appel qu'au magnétisme de surface, le diamètre ne peut pas varier. Pour d'autres modèles faisant appel au magnétisme à la base de la zone convective, la variation du diamètre avec l'activité solaire dépend de la turbulence du plasma de la zone convective. [ 3 ].

### I.2.2. La forme du Soleil

Le Soleil est une gigantesque boule de gaz de  $\sim 1.4$  millions de kilomètres de diamètre. Au premier ordre, il s'agit d'une sphère gazeuse en équilibre hydrostatique qui tourne lentement (un tour complet en environ 27 jours). Ainsi, la rotation du Soleil provoque un aplatissement des régions polaires. L'aplatissement d'un astre se définit comme la valeur arithmétique du rapport de la différence des deux axes (rayon équatorial et rayon polaire dans le cas du Soleil) sur le grand axe (rayon équatorial). Dans le cas d'une rotation rigide du Soleil (composition homogène et vitesse de rotation uniforme), l'aplatissement ( $\epsilon$ ) peut être estimé théoriquement [2]. Mais le Soleil ne peut être considéré comme un corps rigide en rotation. En effet, la rotation différentielle de surface clairement identifiable par les taches solaires (25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles) complique la détermination théorique de l'aplatissement solaire. De même, l'aplatissement solaire est difficile à mesurer parce que sa valeur est très faible et parce qu'il peut être perturbé par l'activité magnétique superficielle, notamment par les taches solaires et les facules.

La problématique liée à l'aplatissement solaire (valeur théorique, mesure, etc.) a fasciné les astronomes à partir de la fin du dix-neuvième siècle. A cette époque, un des enjeux des astronomes était de pouvoir expliquer ainsi la précession du périhélie de Mercure. En effet, l'origine de cette quête est apparue lorsque Urbain Le Verrier (1811–1877) a mis en évidence que la précession observée de Mercure était « trop grande » [5]. Il a montré que le point de l'orbite de Mercure le plus rapproché du Soleil (appelé périhélie) se déplaçait de 574 secondes d'arc par siècle. Or, selon la théorie de Newton, cette valeur devrait être de 531 secondes d'arc, soit une différence de 43 secondes d'arc entre l'observation et la théorie. Afin de justifier la légère perturbation de Mercure dans son mouvement par rapport au modèle prévu par la mécanique newtonienne, certains astronomes de l'époque sont allés jusqu'à imaginer l'existence d'une planète positionnée entre Mercure et le Soleil (Vulcain). D'autres ont suggéré une erreur grossière dans la masse acceptée de Vénus, un nuage de poussière zodiacale, ou un aplatissement solaire beaucoup plus important que prévu. Ainsi, Simon Newcomb (1835–1909) s'est demandé si l'aplatissement solaire ne pouvait pas expliquer la perturbation de la précession du périhélie de Mercure [6], valeur qu'il estima à  $5.2 \cdot 10^{-4}$ . A la fin du dix-neuvième siècle, Arthur Auwers a réalisé des observations solaires [3] et il a fourni une des premières mesures de l'aplatissement solaire ( $-4.0 \cdot 10^{-5}$ ). Cette valeur de l'aplatissement solaire est assez faible et de surcroît négative (rayon polaire plus grand que le rayon équatorial) ; ainsi, elle ne permettait pas de justifier la précession du périhélie de

Mercure. Cette anomalie sera expliquée en 1915 par Albert Einstein (1879–1955) avec la théorie de la relativité générale [7]. En effet, la planète Mercure orbite près du Soleil (son périhélie se trouve à ~46 millions de kilomètres du Soleil), et elle est particulièrement influencée par son champ de gravitation. Du point de vue la théorie d'Albert Einstein, Mercure circule dans une zone où, selon la relativité générale, la masse du Soleil courbe particulièrement l'espace-temps. Cette courbure entraîne une précession du périhélie nettement supérieure à celle prévue par la théorie de Newton. Ainsi, les travaux d'Albert Einstein ont permis de résoudre une énigme vieille de plus de soixante ans. Cependant, il n'a pas pris en compte la forme du Soleil dans ces travaux (effet du second ordre). Il faudra attendre la fin des années 1960 avec les travaux de Robert Henry Dicke (1916–1997) pour que l'on s'intéresse à nouveau aux mesures d'aplatissement solaire. En effet, Robert Henry Dicke met au point la théorie de Brans-Dicke, une alternative à la théorie d'Albert Einstein. Il effectue des mesures de l'aplatissement solaire ( $4.4 \cdot 10^{-5}$ ) [8] qui sont utiles pour comprendre la précession du périhélie de Mercure, un des tests classiques de la relativité générale. Il posera ainsi les bases de « l'étude sur les paramètres de formes du Soleil » dès 1970. Dans les années 1990, des scientifiques se sont intéressés au problème de la forme du Soleil, en mettant en avant les retombées physiques, principalement au niveau des moments gravitationnels. Ils ont déterminé la figure générale de l'astre, au-delà de son aplatissement « naturel » en montrant qu'elle permettait de déterminer de manière plus exacte les éphémérides des planètes (positionnement précis à des dates déterminées), et de bâtir éventuellement des théories alternatives de la gravitation. Les mesures acquises jusqu'à présent par différents auteurs depuis les années 1960, fournissent des valeurs proches de 8 millièmes de seconde d'arc (mas) pour la variation de rayon équateur-pôle (est environ égal à  $8.3 \cdot 10^{-6}$ ) avec des dispersions plus ou moins importantes. En effet, les observations directes de la forme du Soleil sont très difficiles à réaliser et représentent un défi encore très intéressant à relever aujourd'hui. Il y a un manque de séries chronologiques de mesure afin de pouvoir étudier la relation entre l'aplatissement solaire et l'activité solaire. Une des meilleures manières de pouvoir obtenir ces mesures est de pouvoir réaliser des observations hors atmosphère avec des instruments stables et sophistiqués.

Sur le plan scientifique, la mesure précise de l'aplatissement permet alors de valider les hypothèses physiques mises en œuvre dans les modèles. La mesure de l'aplatissement solaire donne des indications précieuses sur la rotation des couches internes du Soleil et sur le magnétisme de sous surface. Il faut savoir que la rotation

solaire interne est une donnée fondamentale. C'est elle qui génère le champ magnétique qui crée la variabilité solaire. Pour cela, on doit aussi étudier la relation entre la valeur de l'aplatissement solaire et l'activité solaire. La forme exacte du Soleil permet aussi d'effectuer un des tests de la Relativité Générale d'Albert Einstein. En effet, la répartition exacte de la masse solaire détermine comment le Soleil affecte l'orbite de toutes les planètes, et en particulier celle de Mercure.

### I.2.3. L'éclairement solaire total

Le rayonnement solaire, première source d'énergie sur Terre, est constitué de l'ensemble du spectre électromagnétique, du rayonnement aux ondes radio. L'ensemble du spectre solaire varie avec des amplitudes différentes selon le domaine spectral considéré, et influe sur le système Terre-Atmosphère. L'éclairement solaire total (noté TSI pour « total solar irradiance ») exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 mètre carré située hors atmosphère terrestre à une distance d'une unité astronomique. L'éclairement solaire total est une entrée essentielle pour tous les modèles climatiques ; il représente une variable climatique essentielle. La première détermination sérieuse de la valeur absolue de l'éclairement solaire total date de 1838 [9]. Grâce à l'invention du pyrhéliomètre, Claude Pouillet (1790–1868) réalise les premières mesures quantitatives de l'éclairement solaire total (appelé constante solaire jusqu'à l'avènement de l'ère spatiale et les premières mesures obtenues hors atmosphère à la fin des années 1970). L'estimation de la constante solaire était alors de  $1228 \text{ W m}^{-2}$  [9] ; cette estimation est assez proche de la valeur actuellement admise 3. Depuis 1838, d'autres physiciens ont estimé cette valeur tels que Jules Louis Gabriel Violle (1841–1923) ou encore Samuel Pierpont Langley (1834–1906). Charles Greeley Abbot (1872–1973) a affirmé que ses mesures ont montré des variations de la constante solaire, mais sans être en mesure de le démontrer. En effet, l'atmosphère de la Terre affecte les mesures au sol, ce qui rend très difficile la détermination absolue de la constante solaire. En particulier, la distribution du flux solaire spectral (lorsqu'il transite dans l'atmosphère de la Terre) est modifiée par des processus d'absorption et de diffusion. Par conséquent, la mesure de la constante solaire depuis l'espace fût nécessaire. Les premières observations réalisées hors atmosphère et en continu ont commencé à partir de 1978 grâce à l'utilisation de pyrhéliomètres spatiaux innovants [10-11]. Elles ont mis en évidence la variabilité de ce qui était appelé jusqu'alors « la constante solaire ». En

effet, la variation de l'éclairement solaire total au cours d'un cycle solaire (environ 11 ans) est d'environ 0.1% crête à crête (ces variations sont relativement faibles, néanmoins, elles ont été proposées comme un possible facteur de changement climatique [12-13] avec des fluctuations de 0.3–0.4% autour des maxima d'activité solaire (observation de baisses notoires mais peu d'excursions positives). D'autres variations ont été détectées à partir de ces mesures (fréquences autour de 3 mHz, période de rotation solaire de 27 jours, etc.). En effet, l'éclairement solaire total varie sur une vaste gamme d'échelles temporelles. Les observations ont démontré que les variations de l'éclairement solaire total peuvent être expliquées par les variations de la couverture photosphérique de différentes structures magnétiques (taches solaires, facules, éléments du réseau supergranulaire, plages, régions éphémérales, trous coronaux, etc.). Par ailleurs, les mesures radiométriques de l'éclairement solaire réalisées depuis plus de 35 ans ont montré des désaccords vis à vis de la valeur absolue de l'éclairement solaire total qui peu à peu se sont réduits. Cependant, le débat reste ouvert et une détermination précise de la valeur absolue de l'éclairement solaire total est nécessaire ; cette détermination nécessite un bilan d'erreur justifié lié à l'incertitude de la mesure. De même, la continuité des mesures calibrées d'éclairement solaire total doit être assurée avec des radiomètres spatiaux ultra-stables afin de mieux comprendre les relations avec les autres « proxies » d'activité solaire (taches solaires, indice du Ca II K, indice de flux radio solaire F10.7 cm, indice Mg II, données sur les radionucléides cosmogéniques ( $^{10}\text{Be}$  et  $^{14}\text{C}$ ), etc.). En effet, la vision traditionnelle de l'activité solaire à long terme est basée sur l'enregistrement du nombre de taches solaires. Les mesures long-terme de l'éclairement solaire total permettent aussi de consolider les modèles de reconstruction de l'éclairement solaire total (SATIRE, NRLTSI, etc.). Cependant, les mesures présentent des incertitudes dans leurs tendances décennales. De même, pour les reconstitutions historiques, l'absence d'une compréhension physique complète de la relation entre l'éclairement solaire total et d'autres indicateurs de l'activité solaire laissent planer un doute dans les tendances multi-décennales. En effet, le lien entre l'activité solaire et l'éclairement solaire total doit être consolidé afin de valider les modèles de reconstruction de l'éclairement solaire total depuis le minimum de Maunder (modèle basé sur les taches solaires).

Les mesures de l'éclairement solaire total présentent aussi un intérêt vis à vis de l'influence du Soleil sur notre climat. Sur le long terme, la position astronomique de la Terre par rapport au Soleil (cycles de Milankoviéliés à l'excentricité, l'obliquité, et la précession) est le principal facteur de variabilité naturelle de la température globale de surface de la Terre, au travers de l'éclairement solaire total. L'activité solaire et la température globale de surface de la Terre semblent relativement corrélées aussi bien sur des échelles de temps courtes que longues. Cependant, le climat de la Terre ne dépend pas uniquement de la contribution solaire. Sur des échelles de temps allant jusqu'au millénaire, la température globale de surface est régie par les éruptions volcaniques, les forçages anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, émissions d'aérosols, déforestation et plus généralement la modification des surfaces végétales), et maintes oscillations naturelles (variations de marée lunaire, etc.). Ainsi, il est nécessaire de connaître le poids des différents contributeurs (notamment d'origine solaire) afin de mieux comprendre les mécanismes associés au climat de la Terre et l'impact sur le réchauffement climatique.

### **I.3. Structure Du Soleil**

Le soleil est une étoile qui se compose de 74% d'hydrogène, 24% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds [14] A lui seul, le soleil rassemble 99,8 % de la masse totale du système solaire. La puissance rayonnée totale est de l'ordre de  $4 \cdot 10^{26}$  W. Il tourne sur lui-même, n'étant pas un objet solide, il subit une rotation différentielle plus rapidement à l'équateur (25 jours) qu'aux pôles (35 jours).

**Age** : environ 4,6 milliards d'années.

**Masse** :  $1,9891 \cdot 10^{30}$  kg.

**Diamètre** : 1 392 000 km.

**Période de révolution** : 25,4 jours à l'équateur 35 jours aux pôles

**Inclinaison de l'axe de rotation / écliptique** :  $7^{\circ},25$

**Vitesse à la latitude  $0^{\circ}$**  : 7 008,17 km/h

**Température** : 151MK au centre 5800 K en surface 5 MK dans la couronne

**Distance terre – soleil** : environ 150 millions km.

**Temps mis par la lumière pour atteindre la terre** : 8mn 20s

### I.3.1. Structure interne

- **Le noyau**

Plus de 50% de la masse du Soleil est contenue dans le noyau (Fig. I.2). Occupant environ un quart du rayon solaire, la densité est de l'ordre de  $1,6 \cdot 10^5 \text{ kgm}^{-3}$ , avec une température de l'ordre de 15 millions de degrés, ce qui permet les réactions de fusion nucléaire transformant l'hydrogène en hélium via le cycle proton-proton. [15]

- **La zone radiative**

Cette zone s'étend jusqu'à 0.7 RO. L'énergie issue des réactions nucléaires est à environ 80% sous forme de radiation. Ces photons sont dans un environnement fortement ionisé. Ils vont fortement interagir avec les électrons libres ainsi qu'avec les ions. Ces photons sont d'abord absorbés, puis émis, puis de nouveau absorbés puis réémis. [15]

- **La zone convective**

Le transport des photons via des mouvements de plasma est efficace pour évacuer l'énergie jusqu'à la surface. Des remontées de plasma chaud croisent du plasma froid qui redescend dans les couches plus profondes. Un photon ne met qu'une dizaine de jours pour traverser la zone convective. Ensuite le milieu est suffisamment peu dense pour que l'énergie puisse de nouveau être évacué radiativement car le milieu devient optiquement mince et est sans interaction avec les photons, c'est l'atmosphère solaire. On définit la photosphère comme la surface du Soleil. [15]

### I.3.2 Structure externe

- **La photosphère** est la plus profonde des couches visibles et constitue la surface apparente, émettant la majeure partie du rayonnement. C'est donc la photosphère qui localise l'hydrogène neutre et constitue l'enveloppe de la structure solaire. [15]
- 
- **La chromosphère** apparaît comme une couche hétérogène dont la température croît vers l'extérieur, elle a un éclat 100 fois plus faible que celui de la photosphère. Son rayonnement est caractérisé par des raies d'émission brillantes.
- **La couronne** est la couche externe du Soleil. C'est un plasma de faible densité. Sa température augmente à nouveau et passe de 10 000 K à la base de la zone de transition à 2 000 000 K dans la couronne. Ce phénomène surprenant de « chauffage » de la couronne est encore à l'heure actuelle un des grands sujets de recherche en physique solaire. [15]
- **L'héliosphère** est une bulle dans le milieu interstellaire engendrée par les vents solaires. Cette bulle s'étend jusqu'à 100 UA du Soleil. [15]

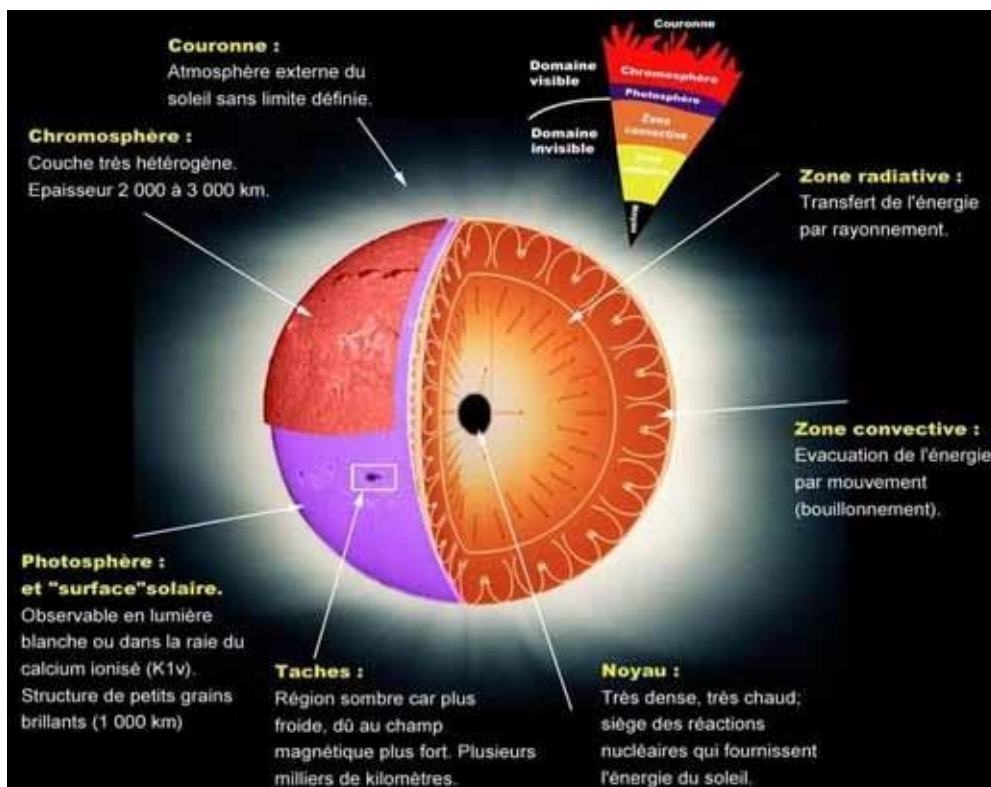


Figure I. 2 Structure du soleil (Photo Soho).

#### I.4. Situation De Soleil Dans La Voie Lactée

La Voie lactée est le nom de notre galaxie dans laquelle se situe notre Système solaire. Il s'agit d'une grande galaxie spirale barrée, abritant environ 100 milliards à 400 milliards d'étoiles, dont le Soleil, et mesurant environ 100 000 années-lumière de diamètre. La nuit, loin des éclairages provenant on peut facilement la distinguer sous la forme d'une bande nuageuse blanchâtre, il s'agit de sa couleur qui lui vaut son nom, chez les Grecs, on pensait que la Voie lactée était une traînée de lait ayant coulé de la poitrine de la déesse Héra. Autour de la Voie lactée se trouve un petit nombre de petites galaxies en orbite autour de la nôtre, ce sont des galaxies naines, qui sont plus petites et possèdent généralement une forme irrégulière.

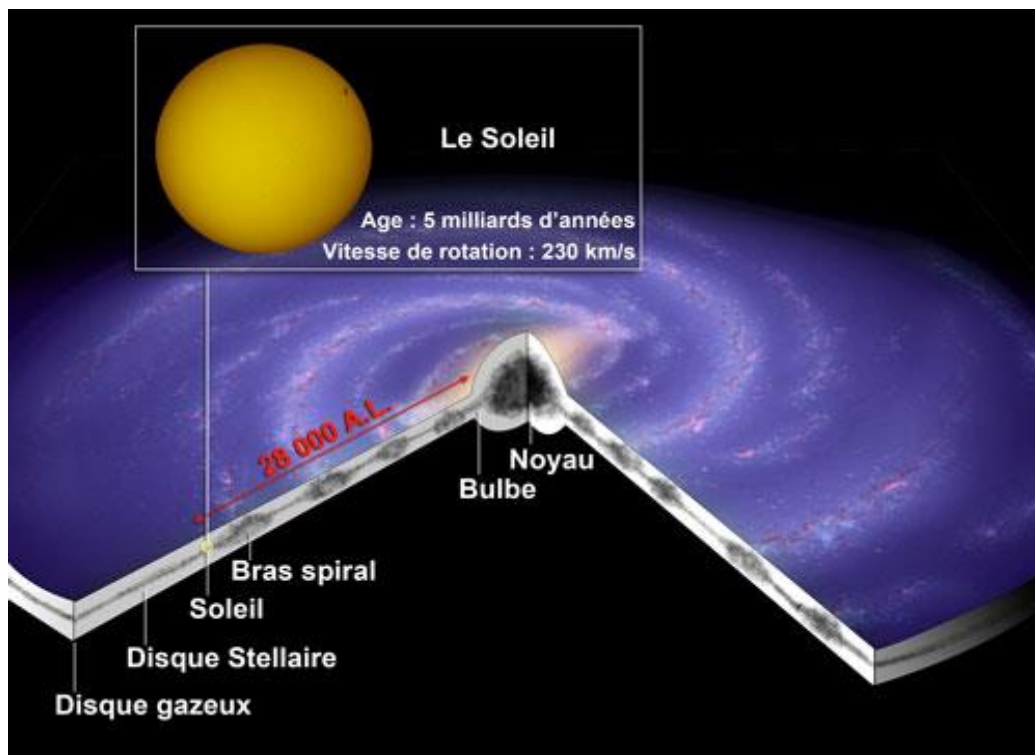


Figure I. 3 Situation De Soleil.

#### I.5 Activité solaire

Un cycle solaire est une période pendant laquelle l'activité du soleil varie en reproduisant les mêmes phénomènes que pendant la période de même durée précédente (Fig. I.4). L'activité solaire est réglée par un cycle d'une période moyenne de 11,2 ans d'un maximum et peut varier entre 9 et 14 ans.[15]

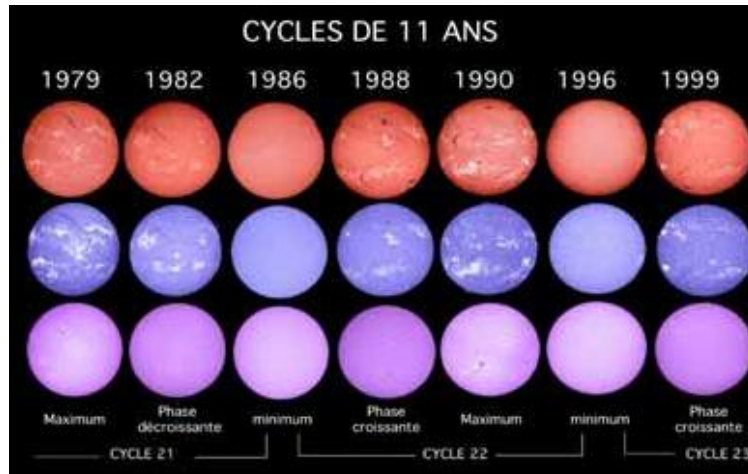


Figure I. 4 Le cycle de 11 ans observé à Meudon au spectrohéliographe.

### I.5.1 Les taches solaires

Le soleil tourne sur lui-même, plus rapidement à l'équateur (25 jours) qu'aux pôles (35 jours). Le mouvement des particules (protons, électrons, atomes ionisés) produit un puissant champ magnétique à l'origine de phénomènes particuliers : les tâches solaires (Fig. I.5). Une tache solaire, zone sombre où le champ magnétique est vertical, entourée d'une région plus claire où le champ magnétique est plutôt horizontal à la surface du soleil, est caractérisée par une température inférieure à celle de son environnement proche et présentant une intense activité magnétique de l'ordre de 0,3 Tesla. **[15]**

Les tâches facilement observées, apparaissent par paire de polarité opposée dans la photosphère. Elles sont formées de structures magnétiques alignées le long des parallèles (toroïdales). Une tache solaire a une durée de vie moyenne de deux semaines. L'ensemble des mesures réalisées indique un cycle principal dont la période varie entre 9 et 13 ans ce qui nous conduit à une moyenne statistique de 11,2 ans. Dans chaque période apparaît un maximum et un minimum d'activité. La surveillance de ces taches est un excellent moyen pour mesurer l'activité solaire et prédire ses répercussions terrestres.

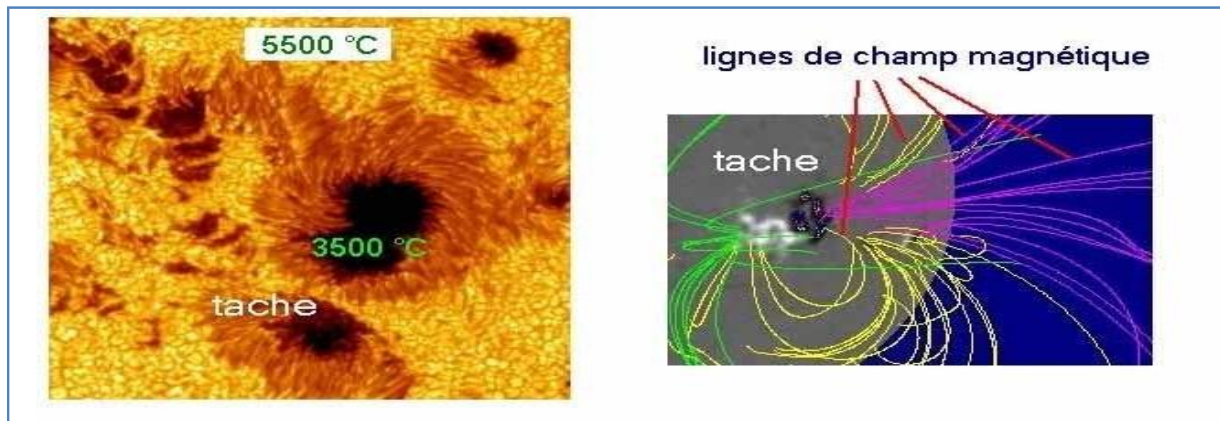


Figure I. 5 Les taches solaires. (a) : zones sombres caractérisées par une température de 3500°C, inférieure à celle de son environnement proche de 5500°C. (b) Lignes de champ magnétique à configuration toroïdale. .[15]

### I.5.2 champs magnétique solaire

Le Soleil est une étoile dynamique ! Son atmosphère est structurée par des champs magnétiques évolutifs dont les manifestations sont citées dans ce qui suit.

### I.5.3 Les éruptions solaires

Une éruption est un phénomène complexe, à la fois dans sa géométrie et dans sa séquence temporelle. Dans une région active, elle correspond à la libération brusque (en quelques minutes) d'une énergie importante (jusqu'à 10<sup>25</sup> joules). Cette libération d'énergie donne lieu à l'échauffement du plasma ( 10<sup>8</sup> K) et à l'accélération de particules (électrons, protons, ions). On détecte alors des émissions intenses dans tout le domaine spectral, depuis les rayons X jusqu'aux ondes radioélectriques. Certaines éruptions particulièrement intenses donnent également lieu à des éjections de masse coronale. Electrons et protons accélérés peuvent s'échapper de l'atmosphère solaire et être détectés dans le milieu interplanétaire.

### I.6 L'observation du Soleil

Au sol, l'observation du Soleil se fait essentiellement dans l'ultra-violet proche, dans le spectre visible et dans le proche-infrarouge. Plusieurs télescopes ou instruments « sol » dédiés à l'étude du Soleil ont été ou sont en cours d'exploitation. On peut citer notamment les instruments de l'Observatoire de Paris, les instruments de l'Observatoire du Mont Wilson, les instruments de l'Observatoire solaire de Big Bear Lake, les instruments de l'observatoire solaire national à Sacramento Peak, les instruments de l'Observatoire du Teide, les instruments de l'Observatoire de la Côte d'Azur (Astrolabe, DORAYSOL, PICARD SOL),

les instruments de l'Observatoire du Pic du Midi, etc. La performance des instruments au sol est limitée en grande partie par la turbulence atmosphérique qui dégrade la qualité des images. Les sites d'observation sont choisis en fonction de leurs bonnes conditions de qualité d'image (seeing). L'utilisation de systèmes d'optique adaptative (analyse et correction du front d'onde en boucle fermée) au niveau des télescopes L'utilisation des satellites permet d'observer le Soleil sur une plage étendue de longueurs d'onde, qui s'étend aujourd'hui des rayons X au proche infra-rouge. Les observations des télescopes spatiaux permettent de s'affranchir des effets de la turbulence atmosphérique et des alternances « jour-nuit ». Depuis la fin des années 1950, plusieurs missions spatiales dédiées à l'étude du Soleil ont été développées ou sont en cours de développement. On peut citer entre autres : Trace,

SoHO, RHESSI, SORCE, HINODE, STEREO, SDO, PICARD, Solar Probe Plus, Solar Orbiter, etc.

Les travaux associés à cette thèse sont basés sur l'exploitation des données des instruments suivants (Figure 1.6) : le télescope SODISM et le radiomètre SOVAP de la mission spatiale PICARD, l'instrument HMI de la mission spatiale SDO, le spectromètre SOLAR/SOLSPEC à bord de la station internationale spatiale et les instruments au sol de la mission PICARD

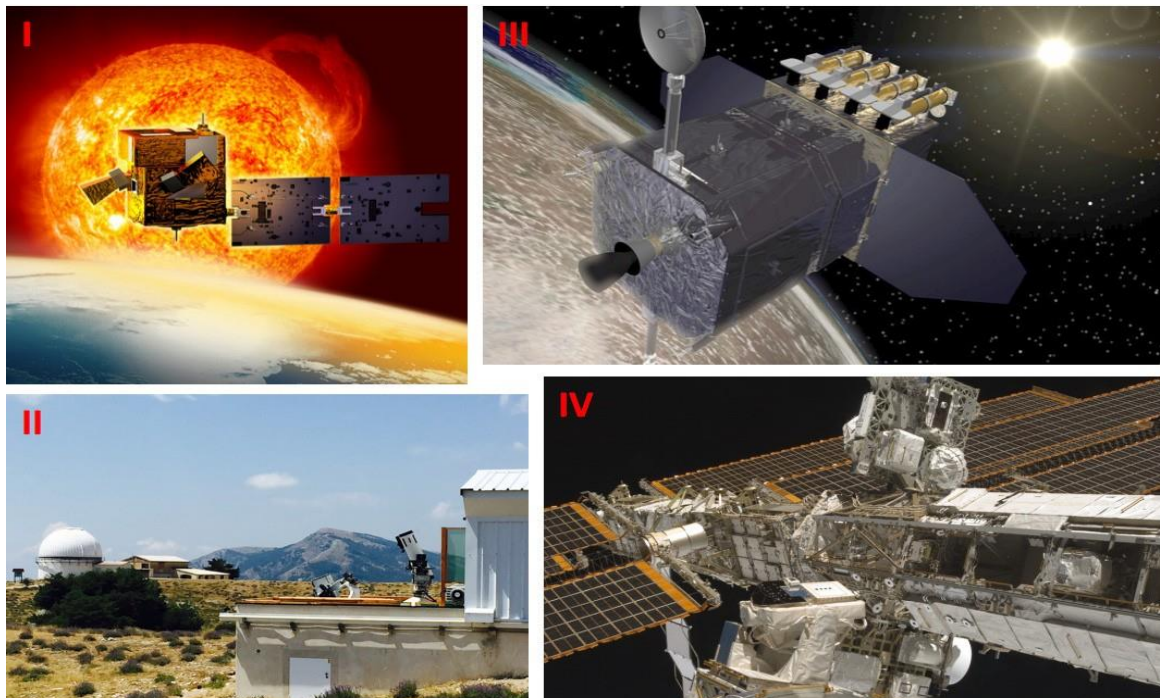


Figure I. 6 (I) Vue d'artiste du satellite PICARD (Crédits : CNES). (II) Instruments au sol de la mission PICARD observant le Soleil sur le plateau de Calern à l'Observatoire de la Côte d'Azur (Crédits : CNRS- LATMOS-OCA). (III) Vue d'artiste du satellite SDO (Crédit NASA).

(IV) Charge utile SOLAR arrimée au module européen COLUMBUS de la Station Spatiale Int. 1.11. Les moyens d'observation et les instruments étudiés internationale (Crédits : NASA).

## I.6.1 Les instruments en orbite étudiés

### I.6.1.a SODISM, un télescope imageur dédié à la mesure du diamètre solaire

SODISM (Solar Diameter Imager and Surface Mapper) est un télescope imageur de 9 cm de diamètre associé à un détecteur (CCD) ayant une résolution de  $2048 \times 2048$  pixels. Ce télescope est un des instruments de la charge utile du satellite PICARD. Les objectifs initiaux de la mission PICARD étaient de mesurer la forme du limbe solaire, le diamètre solaire photosphérique, le diamètre solaire sismique, l'éclairement solaire total, la rotation différentielle et sa variabilité, l'asphéricité de la figure solaire, la variabilité solaire par l'observation de l'émission du Ca II (liée au magnétisme), les oscillations solaires (héliosismologie), le diamètre solaire référencé aux distances angulaires stellaires et la variabilité solaire dans le domaine UV. L'instrument SODISM devait en partie permettre l'obtention de ces résultats. Dans le cadre de cette thèse, l'étude du diamètre du Soleil et de l'aplatissement solaire a été réalisée à partir des images acquises par l'instrument SODISM. Une description détaillée de l'instrument est donnée par Meftah et al. [16]. La configuration optique du télescope de type Ritchey-Chrétien est représentée au niveau de la Figure 1.6. Les

images du Soleil acquises par l'instrument SODISM sont obtenues suivant cinq longueurs d'onde (215.0, 393.37, 535.7, 607.1 et 782.2 nm).

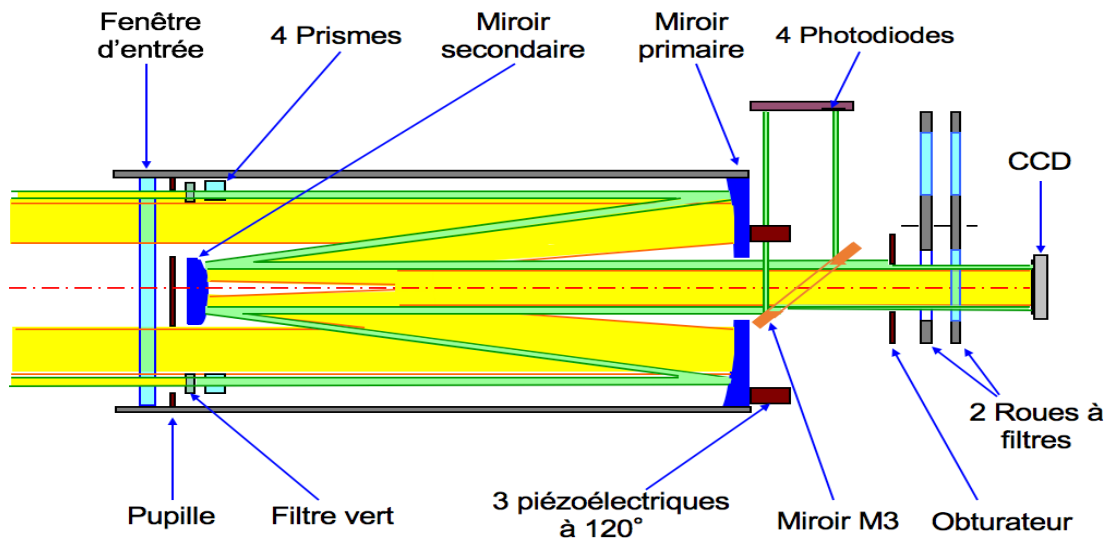


Figure I. 7 Configuration de l'instrument SODISM avec les principaux composants optiques.  
Crédits : CNRS-LATMOS.

Les principales caractéristiques de l'instrument SODISM sont présentées au niveau de la Table 1.1. La résolution angulaire du télescope peut être limitée par la pixélisation. Le critère de Shannon énonce qu'il faut au moins 2 pixels par élément de résolution. Le facteur d'échelle d'un télescope ( $PS \approx 0.2063 \times p/f$ ) relie la distance angulaire d'un objet avec la séparation linéaire de son image au niveau du plan focal. Il dépend de la focale du télescope ( $f$ ) en m et de la taille d'un pixel ( $p$ ) en  $\mu\text{m}$  au niveau du plan focal du télescope. Le facteur d'échelle du télescope SODISM a été déterminé en orbite lors du passage de Vénus (étalonnage en orbite). Cette étude est traitée dans la section suivante. A partir de l'exploitation des données de l'instrument SODISM, le diamètre absolu du Soleil a été déterminé suivant plusieurs longueurs d'onde. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre suivant. Les images acquises par SODISM lors d'opérations spéciales (rotation du satellite) permettent de déterminer la valeur absolue de l'aplatissement solaire. Enfin, une évaluation des variations du diamètre solaire est obtenue à partir de l'exploitation des données de l'instrument SODISM. **L'instrument PICARD/SODISM a été opérationnel de juillet 2010 à mars 2014.**

### *1.6.1.b SOVAP, un radiomètre dédié à la mesure de l'éclairement solaire total*

SOVAP (Solar VARIability PICARD) est constitué d'un radiomètre différentiel absolu utilisant deux canaux (sensibilité de quelques nm à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ ). DIARAD

(Differential Absolute RADiometer) est la partie radiométrique de l'instrument SOVAP qui a déjà été embarquée sur plusieurs missions spatiales. L'instrument SOVAP associé à DIARAD est dédié à la mesure de l'éclairement solaire total. SOVAP est un des instruments de la charge utile du satellite PICARD. La partie radiométrique de l'instrument SOVAP (Figure 1.8) est constituée de deux détecteurs de puissance montés sur une pièce de référence thermique commune (puit thermique). Une cavité cylindrique à fond plat (recouverte de peinture noire afin d'obtenir un corps noir) est fixée sur chaque détecteur. Un élément chauffant recouvert de peinture noire est fixé sur la partie plate de l'ensemble détecteur/cavité cylindrique. La surface d'entrée de chaque canal est constituée d'un obturateur et d'un diaphragme d'entrée. Le principe de mesure pour ce type de radiomètre est basé sur l'utilisation des deux cavités du radiomètre (d'où la notion de radiomètre différentiel). Une puissance électrique de réchauffage par effet Joule est injectée au niveau du détecteur de la cavité fermée ( $P_f = 0.13 \text{ W}$ ). Lorsqu'une des deux cavités est ouverte (obturateur ouvert), le flux solaire incident traverse le diaphragme d'entrée et un miroir de précision dont la surface est connue (SR). Le flux solaire incident est alors absorbé par le détecteur peint en noir (puissance d'origine solaire :  $P \approx 0.10 \text{ W}$ ). Un système d'asservissement (servo) permet alors d'équilibrer les puissances injectées au niveau de la cavité fermée et de la cavité ouverte ( $P_f \approx P + P_o$ ). Ainsi, une puissance électrique de réchauffage par effet Joule est injectée au niveau du détecteur de la cavité ouverte ( $P_o = 0.03 \text{ W}$ ). A partir de la connaissance exacte de la surface du miroir de précision de la cavité ouverte et de la mesure des puissances injectées dans les deux cavités, on peut déterminer au premier ordre la valeur de l'éclairement solaire total ( $TSI \approx (P_f - P_o)/SR$ ). Une description détaillée de l'instrument SOVAP est donnée par Conscience et al [17]. A partir de l'exploitation des données de l'instrument SOVAP, la valeur absolue de l'éclairement solaire total a été déterminée. Les résultats obtenus sont présentés dans un des chapitres de cette thèse. De même, les variations de l'éclairement solaire total ont été obtenues à partir de ces mesures. L'instrument PICARD/SOVAP a été opérationnel de juillet 2010 à mars 2014.

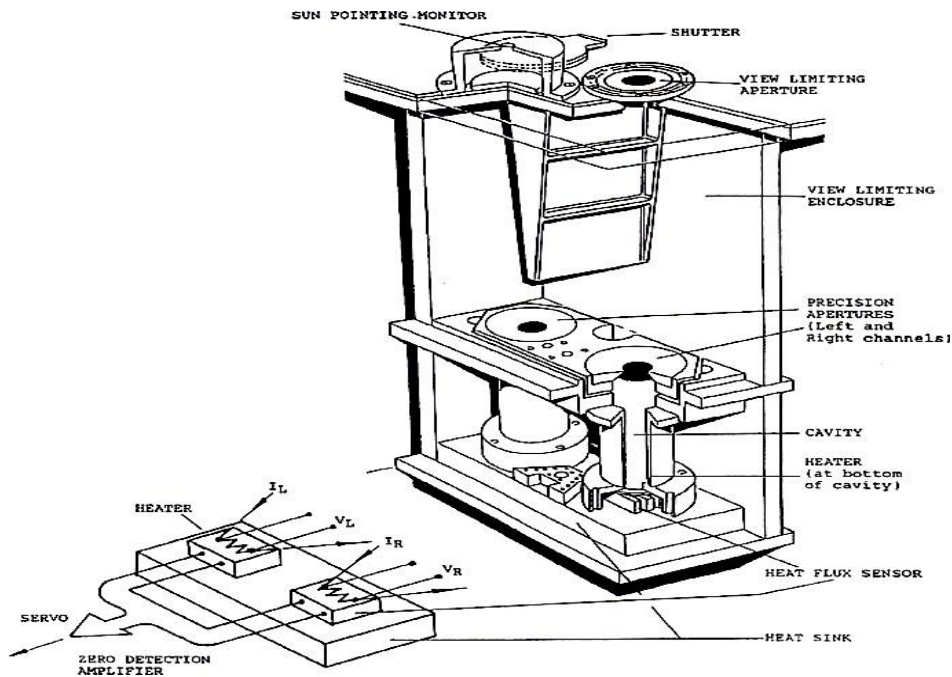


Figure I.8 Vue générale de DIARAD, la partie radiométrique de l'instrument SOVAP. Cet ensemble est constitué d'obturateurs, de diaphragmes d'entrée à ouverture limitée, de miroirs de précision, de cavités cylindriques, de détecteurs de puissance associés à des réchauffeurs, d'un puits thermique et d'un servo (système d'asservissement des puissances de réchauffage des détecteurs). Crédits : IRMB.

### *1.6.1.c HMI, un instrument conçu pour étudier les oscillations et le champ magnétique à la surface du Soleil*

HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) est un télescope de 14 cm de diamètre associé à un détecteur (CCD) ayant une résolution de  $4096 \times 4096$  pixels. Cet instrument est une des composantes du satellite SDO ; il cartographie le champ magnétique et la vitesse de la surface du Soleil. Il s'agit d'un instrument aux capacités améliorées par rapport à l'instrument MDI (Michelson Doppler Imager) à bord de l'observatoire solaire spatial SoHO (Solar and Heliospheric Observatory). Les principales caractéristiques de cet instrument sont présentées au niveau de la **Table 1.1**. Une description détaillée de l'instrument est donnée par Scherrer [18] et par Schouet al. [19]. La configuration optique de l'instrument est représentée au niveau de la Figure 1.9. Les images du Soleil acquises par l'instrument HMI sont obtenues autour d'une longueur d'onde centrée à 617.33 nm (ligne d'absorption du Fe I). La sélection et le réglage des longueurs d'onde sont réalisés avec un ensemble de filtres étroits (filtre atténuateur à l'entrée du télescope, filtre de blocage, filtre de Lyot à cinq éléments et deux interféromètres de Michelson). Les trois derniers étages de filtrage peuvent être réglés avec des lames de retard rotatives ; il s'agit d'un outil optique capable de modifier la polarisation de la lumière la

traversant. Les images acquises par HMI lors d'opérations spéciales (rotation du satellite) permettent de déterminer la valeur de l'aplatissement solaire au cours du temps. Ainsi, une évaluation des variations de l'aplatissement solaire au cours du cycle 24 est obtenue à partir de l'exploitation des données de l'instrument HMI (images dans le continuum solaire à 617.33 nm). Dans le cadre de cette thèse, seules les images acquises par l'instrument HMI dans le domaine visible sont analysées. **L'instrument SDO/HMI est opérationnel depuis février 2010**

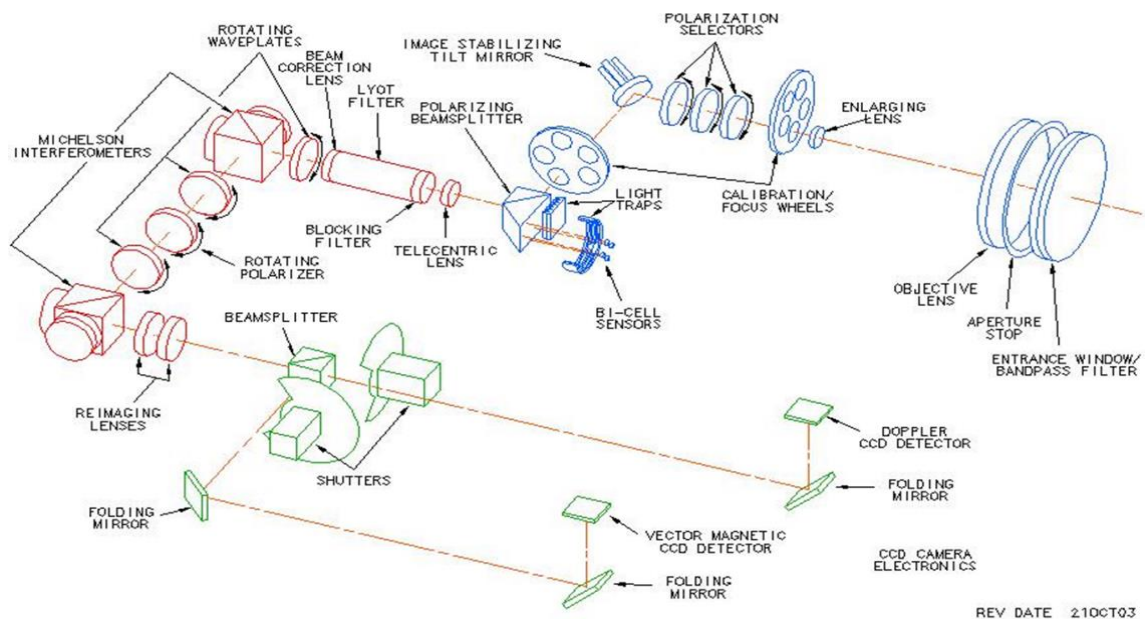


Figure I. 9 Configuration optique de l'instrument HMI. Crédits : Université de Stanford

#### *1.6.1.d SOLSPEC, un spectromètre dédié à la mesure de l'éclairement spectral*

SOLSPEC (SOLAR SPECTral Irradiance Measurements) est un spectromètre dédié à la mesure de l'éclairement solaire spectral [20]. SOLSPEC fait partie de la charge utile SOLAR à bord de la station internationale spatiale. La configuration optique d'une partie de l'instrument est représentée au niveau de la Figure 1.10. L'instrument SOLAR/SOLSPEC est composé de 3 spectromètres couvrant un domaine de longueur d'onde compris entre 165 et 3100 nm. Chaque spectromètre est composé d'un double monochromateur formé de réseaux concaves afin de réduire le taux de lumière parasite. Les 6 réseaux sont montés sur un vilebrequin unique, dont la rotation est gérée par un moteur pas à pas (vis et motorisation). Les détecteurs des canaux ultra-violet et visible sont des tubes photomultiplicateurs, et celui du canal infrarouge est un détecteur photoconducteur au sulfure de plomb régulé en

température à  $-20^{\circ}\text{C}$ . Pour chaque spectromètre, une roue à filtres (permettant d'adapter le signal dans le domaine linéaire des détecteurs) est placée entre la fente de sortie et le détecteur. Les filtres sont positionnés en fonction de la longueur d'onde afin de prendre en compte les variations d'intensité du signal solaire et les différences d'efficacité des spectromètres, principalement en bout de spectre. A partir de l'exploitation des données de l'instrument SOLSPEC, le spectre solaire dans l'ultra-violet et ses variations ont été déterminés. **L'instrument SOLAR/SOLSPEC a été opérationnel entre avril 2008 et février 2017.** Il s'agit de l'instrument à bord de la Station Spatiale Internationale qui a observé le plus longtemps.

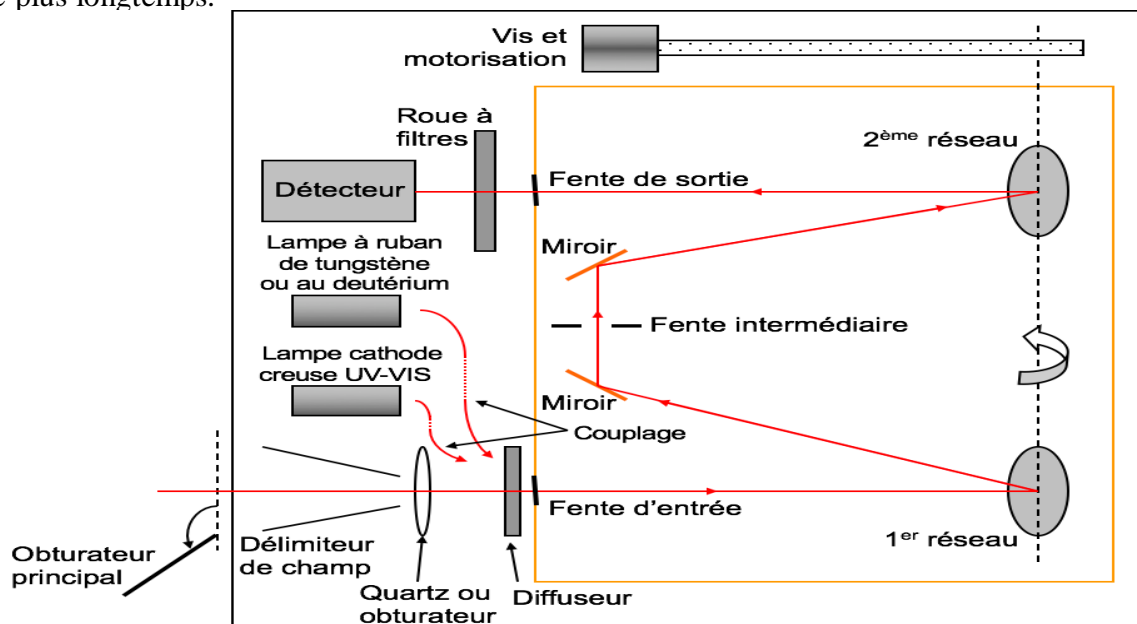


Figure I. 10 Schéma optique de l'instrument SOLAR/SOLSPEC. Crédits : LATMOS& IASB.

## I.6.2 Les instruments au sol étudiés

### I.6.2.a SODISM II, un télescope dédié à la mesure du diamètre solaire au sol

SODISM II est une copie conforme du télescope spatial SODISM ; il s'agit du modèle de qualification. Ce télescope fait partie de la mission sol de PICARD. Les mesures du diamètre solaire effectuées depuis plusieurs décennies depuis le sol par la méthode des temps de passage à hauteur donnée ou par des transits semblent indiquer qu'il peut exister une anti-corrélation entre le diamètre solaire et l'activité solaire. Si cette anti-corrélation était confirmée, cela permettrait d'utiliser la mesure du diamètre solaire comme proxy de l'activité solaire à partir des éclipses observées depuis 1715. Cependant l'interprétation des observations au sol est controversée. Les mesures du diamètre solaire sont sensibles aux effets de la réfraction et de la déformation du front d'onde par la turbulence atmosphérique et potentiellement par les effets de diffusion de la lumière par les aérosols qui dégradent la

qualité des images. La seule façon de s'affranchir des effets atmosphériques est de se placer dans l'espace. C'est pour cela que la mission PICARD a été conçue dès le départ avec 2 composantes : la composante spatiale et la composante sol. L'ensemble instrumental PICARD SOL installé à Calern sur le site de l'Observatoire de la Côte d'Azur est constitué de l'instrument SODISM II (copie de l'instrument SODISM) et du moniteur de turbulence MISOLFA (Moniteur d'Images Solaire Franco-Algérien). Un photomètre permet de mesurer simultanément l'épaisseur optique des aérosols. L'idée est d'une part de déterminer si les variations de diamètre observées depuis le sol sont d'origine solaire ou induites par les effets atmosphériques. Une description détaillée de l'instrument SODISM II est donnée par Meftahet al. [16]. Les images du Soleil sont obtenues suivant cinq longueurs d'onde : 393.37, 535.7, 607.1, 782.2 et 1025 nm. Les principales caractéristiques de SODISM II sont présentées au niveau de la Table 1.1. SODISM II est associé à MISOLFA, un télescope conçu pour fournir les paramètres de la turbulence atmosphérique (le paramètre de Fried, l'échelle externe de cohérence spatiale du front d'onde, le profil vertical de turbulence, le temps caractéristique d'évolution du front d'onde, le domaine d'isoplanétisme). Le principe de fonctionnement de MISOLFA Ikhlefet al., [21] est basé sur la mesure des fluctuations des angles d'arrivée qui sont responsables de l'agitation des images au foyer d'un télescope. Cet instrument permet d'évaluer la dégradation du front d'onde induite par la turbulence atmosphérique. Les principales caractéristiques de MISOLFA sont présentées au niveau de la Table 1.1. La détermination des variations du diamètre solaire au cours du cycle solaire 24 est obtenue à partir de l'exploitation des données de la mission PICARD SOL. Ces résultats s'insèrent dans la synergie sol-espace de la mission PICARD. **Les instruments SODISM II et MISOLFA de la mission PICARD SOL observent le Soleil de manière conjointe depuis mai 2011.**

**Table 1.1** Principales caractéristiques des télescopes étudiés.

Instrument	SODISM	HMI	SODISM II	MISOLFA
Focale ( $f_t$ )	2.626 m	4.95 m	2.626 m	10.00 m
Diamètre de la pupille ( $D_t$ )	0.09 m	0.14 m	0.09 m	0.25 m
Longueur d'onde ( $\lambda$ )	$5 \lambda$	617.33 nm	$5 \lambda$	535.7 nm
Résolution angulaire	$\sim 0.6$ à $2.2$ as	$\sim 1.1$ as	$\sim 1.1$ à $2.9$ as	$\sim 0.54$ as
Taille du pixel ( $p$ )	$13.5 \mu m$	$12 \mu m$	$13.5 \mu m$	$9.9 \mu m$
Facteur d'échelle ( $PS$ )	$1.06$ as/p	$0.50$ as/p	$1.06$ as/p	$0.20$ as/p

## I.7 Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil.

Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité.

Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité.

C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu qui sera converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur.

Cette électricité produite peut être immédiatement employée pour faire fonctionner vos appareils ou vous éclairer.

### I.7.1 Différents types d'énergie solaire

#### *I.7.1.a Les éléments permettant d'assurer la récupération des rayons transmis par le soleil*

- Une installation de type panneaux photovoltaïques ;
- Un onduleur permettant de convertir l'électricité obtenue en courant alternatif ;
- Un compteur servant à comptabiliser la quantité de courant ainsi produite et distribuée.

#### *I.7.1.b Les 3 types d'exploitations de l'énergie solaire*

- **L'énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par l'énergie des rayonnements du soleil. C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent installés sur les toits, avec la meilleure orientation possible.

Le but est qu'ils soient exposés un maximum aux rayonnements du soleil, pour récolter les photons du soleil, et en faire ensuite de l'électricité.

La composition des panneaux solaires est conçue de telle sorte que la superposition des couches, chargées négativement ou positivement, produit une tension électrique quand un photon les traverse. Un fil raccordé à une borne positive et un autre à la borne négative, un peu à l'image d'une pile, permet de mettre à profit l'énergie ainsi produite.

- **L'énergie solaire thermique**

Les panneaux solaires thermiques contiennent des fluides caloporteurs. Une fois qu'ils sont chauffés par le soleil, les fluides commencent à chauffer le ballon d'eau chaude.

L'énergie solaire thermique sert aussi bien pour alimenter :

- Un chauffage solaire
- Un chauffe-eau
- Une cuisinière

- **L'énergie solaire thermodynamique**

L'énergie solaire thermodynamique est produite via des centrales solaires à concentration. Il s'agit d'un assemblage de miroirs contenant des fluides caloporteurs, couplés à un générateur d'électricité solaire.

À l'image des panneaux solaires thermiques, ce sont les miroirs qui transforment l'énergie collectée par les rayons du soleil, en chaleur.

Cette chaleur a une température très élevée. Bien supérieure à la température à laquelle elle a été collectée. Elle peut aller de 250 à 800 degrés selon la technique employée.

Cette chaleur sera convertie en électricité au moyen d'un turbo-alternateur.

**Conclusion**

Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre, dont elle est distante d'environ 150 millions de kilomètres. Sa masse représente la majeure partie de la masse du système solaire.

On distingue dans le Soleil diverses couches parmi lesquelles le noyau ou cœur, la zone radiative, la zone de convection, la photosphère (qui émet la majeure partie de la lumière solaire), la chromosphère et sa partie extérieure, la couronne.

L'énergie solaire est une source d'énergie reçue par la Terre en provenance du Soleil. Elle est classée dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. Elle est dite verte car sa production n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité et de la chaleur en utilisant des capteurs destinés à ces faits

---

# **Chapitre II**

---

### II.1. Introduction

L'emplacement du Soleil dans le ciel est fonction à la fois du temps et de la position géographique de l'observation à la surface de la Terre qui tourne autour de son axe provoquant ainsi un mouvement diurne. Le Soleil, dans ce cas, se déplace dans le ciel d'est en Ouest suivant une trajectoire qui dépend de la latitude géographique de l'observateur. Il est haut dans le ciel à midi solaire où le Soleil transite par le méridien de l'observateur et bas au lever et au coucher du soleil. La Terre orbite autour du Soleil au cours d'une année et la position de ce dernier n'est pas la même dans le ciel. En effet le Soleil est bas dans le ciel au solstice d'hiver et haut dans le ciel au solstice d'été.

La connaissance de l'emplacement du soleil dans le ciel est utile en astronomie, pour la navigation, l'arpentage, la météorologie, la climatologie, l'énergie solaire et la conception de cadrans solaires.

A travers ce chapitre, on va présenter toutes les formules mathématiques qui permettent de déterminer la position du soleil dans le ciel à n'importe quel emplacement sur terre.

### II.2. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit du autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365.25 jours (figure II.1). Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solsticed'hiver (21 décembre) que la terre est la plus près du soleil : 147 millions de km et au solstice d'été qu'elle en est la plus éloignée : 152 millions de km, la distance moyenne étant de 149.5 million de km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle  $\delta$  avec la normale du plan de l'écliptique.

[22]

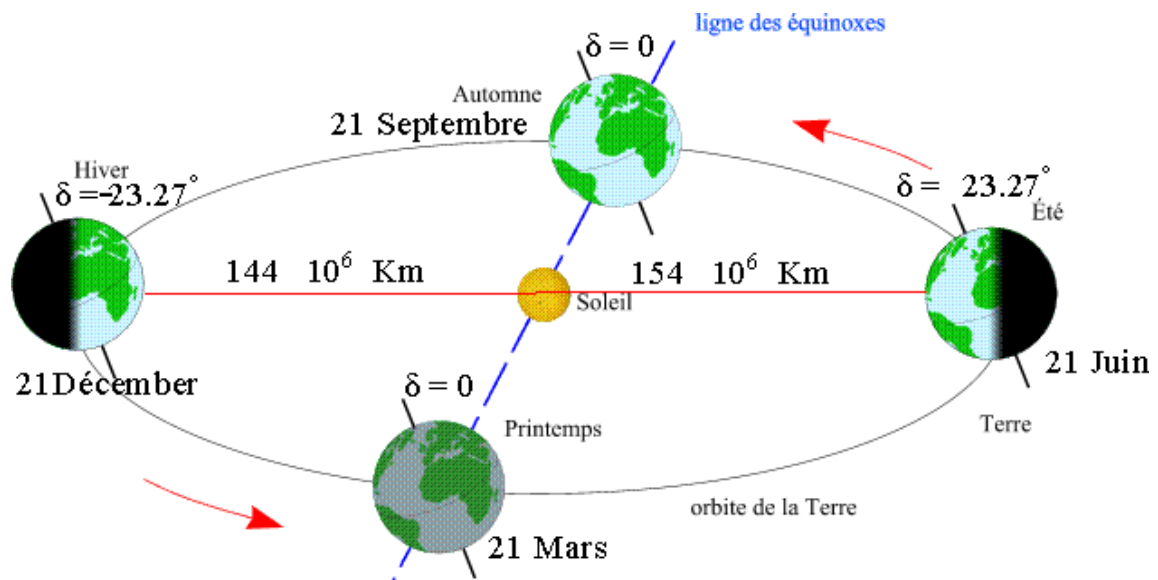


Figure II. 1 Mouvement de la terre autour du Soleil. [23]

### II.3. Système de coordonnées horaires

Le déplacement des astres du fait du mouvement diurne rend intéressant l'utilisation des coordonnées horaires, qui est un système de coordonnées locales "mixtes", dans lequel les plans de référence sont l'équateur céleste et le plan méridien du lieu de l'observation. La position d'un objet sur la voûte céleste est définie par l'angle horaire et la déclinaison

Notons que la sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (Terre – Soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste [24].

#### II.3.1. Déclinaison du soleil ( $\delta$ )

L'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction Terre-soleil est appelé la déclinaison. Cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique de  $-23^{\circ}26'$  à  $+23^{\circ}26'$  (figure II.2) [25].

La valeur de la déclinaison peut être obtenue avec une bonne précision par la formule suivante :

$$\delta = 23.45^{\circ} \cdot \sin 360 \cdot \frac{(284+n)}{365}$$

Avec, n : numéro du jour.

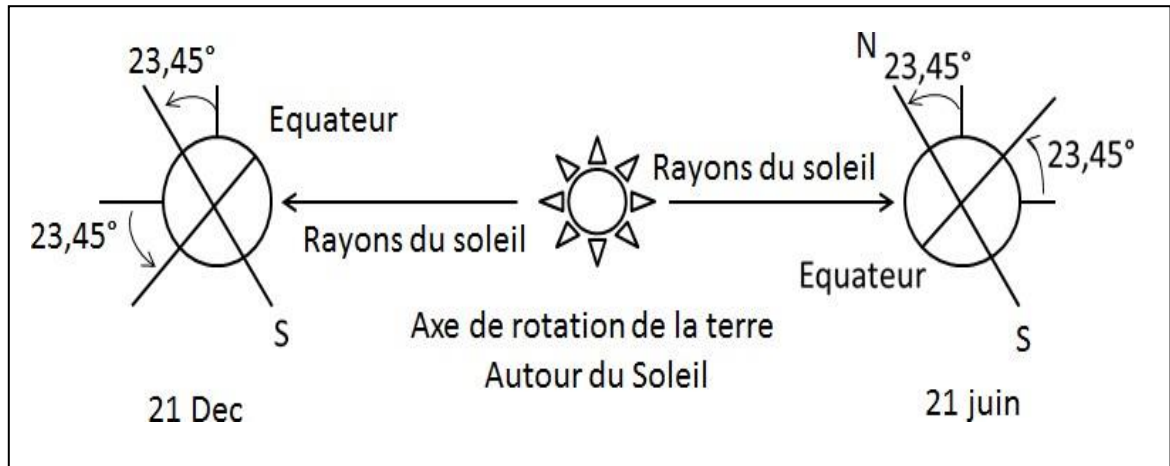


Figure II. 2 Déclinaison solaire.

### II.3.2. Angle horaire ( $\omega$ )

L'angle horaire  $\omega$  est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire de l'astre (soleil) avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur, positivement à l'ouest, négativement à l'est (voir la figure II.3).

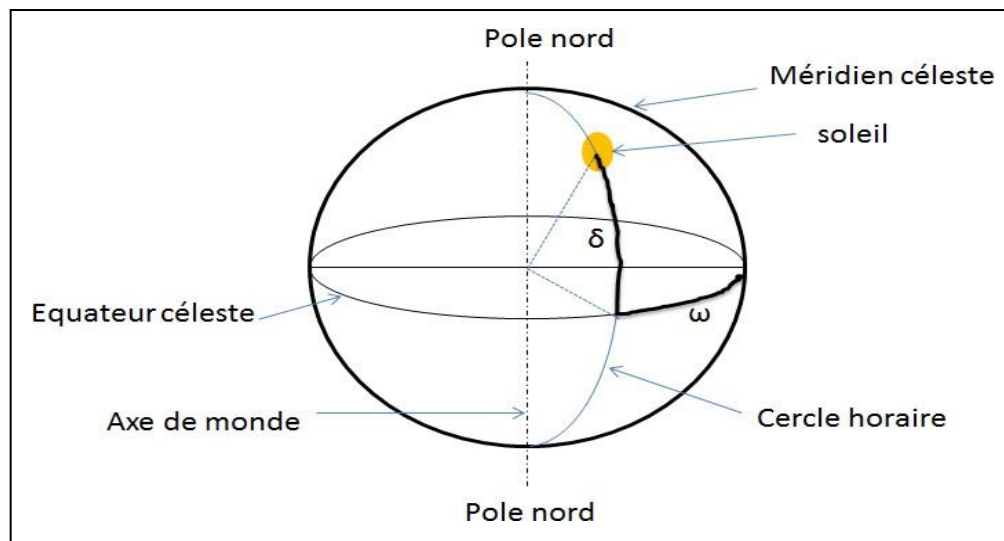


Figure II. 3 Coordonnées horaires.

### Remarque

Les deux coordonnées ( $\omega$  et  $\delta$ ) sont aussi appelées coordonnées semi locales puisque l'angle horaire  $\omega$  dépend du lieu d'observation, contrairement à la déclinaison  $\delta$ . [6]

## II.4. Coordonnées horizontales (coordonnées azimutales )

### II.4.1 Hauteur du soleil H

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol) (figure II.4), elle est donné par la relation suivante :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos m \quad (\text{II. 2})$$

Où,

$\delta$  est la déclinaison,  $\omega$  est l'angle horaire.

- **Azimut**

L'azimut (anciennement et parfois encore orthographié azimuth[26]) est l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence. Le terme est issu de l'espagnol « acimut », lui-même issu de l'arabe السمّت (as-simt), qui signifie direction.

Cette référence peut être le nord géographique ou magnétique. L'azimut est mesuré depuis le nord en degrés de  $0^\circ$  (inclus) à  $360^\circ$  (exclu) dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre) : ainsi l'est est au  $90^\circ$ , le sud au  $180^\circ$  et l'ouest au  $270^\circ$ .

En navigation, l'azimut d'un objet (communément appelé le relèvement d'un objet ou amer)

se mesure à l'aide d'un compas de relèvement. Cette mesure est l'azimut compas (ou relèvement compas) et se note  $Z_C$  ; l'azimut vrai (ou relèvement vrai), noté  $Z_v$ , s'en déduit en apportant les corrections dues au compas utilisé (déviation) et à la position géographique (déclinaison magnétique terrestre « D »). La somme de ces corrections s'appelle la variation

et on peut donc écrire :

$$Z_v = Z_C + w$$

$w = \delta + D$  (variation = déviation + déclinaison) ;

- On notera que dans le cas de l'utilisation d'un compas gyroscopique, qui donne un  $Zg$ , la variation  $Wg$  est de manière générale faible (de l'ordre de quelques degrés).

$$Zv = Zg + Wg$$

**D** est calculée par les scientifiques et évolue dans l'espace et dans le temps. Elle se lit sur les cartes marines ou isogoniques ; s'obtient d'après la « courbe des déviations » du compas, qui doit être révisée régulièrement par un membre de l'équipage ou un technicien.

En astronomie, dans le système de coordonnées horizontales (système local), la direction d'un objet céleste peut être donnée par son azimut, angle horizontal mesuré depuis le méridien Sud dans le sens des aiguilles d'une montre, et sa hauteur[27] : l'avantage est qu'au moment de son passage au méridien, l'azimut et l'angle horaire d'un astre sont tous deux nuls.

En géodésie, on le compte à partir du nord.

### Azimut d'un enregistreur

Pour un enregistreur magnétique (magnétophone à bande ou à cassette) il est essentiel que l'entrefer des têtes magnétiques fasse très exactement un angle de  $90^\circ$  avec l'axe de défilement de la bande. Un parfait réglage de l'azimut assure une bonne reproduction des fréquences élevées. Cette opération, baptisée azimutage [28], doit s'effectuer avec le plus grand soin.

#### II.4.2. Azimut du soleil ( $\alpha$ )

L'azimut correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par le soleil (figure II.4). L'azimut est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos h}$$

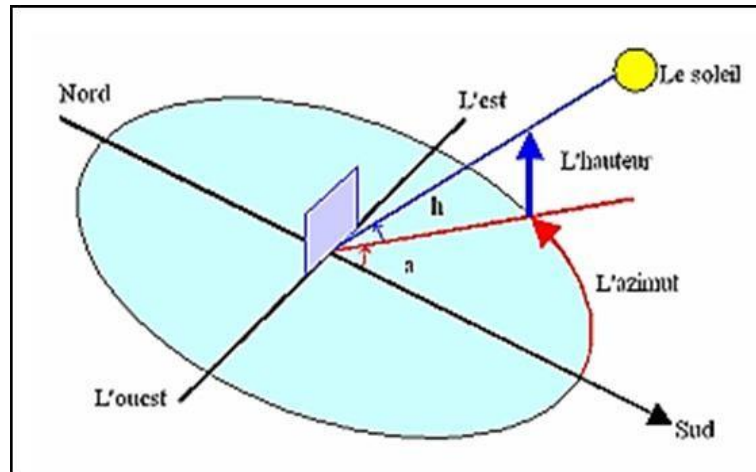


Figure II. 4 Coordonnées horizontales du soleil [29]

Remarquons que ces coordonnées dépendent du lieu d'observation et que pour cela elles sont appelées aussi coordonnées locales. Des calculs solaires effectués en un lieu donné avec ces coordonnées ne pourront donc pas être transposable directement en un autre lieu.[30] .

### Conclusion

À un instant donné, la hauteur et l'azimut du Soleil déterminent la position du Soleil dans le ciel. Ces coordonnées peuvent être calculées à travers des équations mathématiques. En fait, la hauteur du soleil qui n'est que l'angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu. Cet angle est nul au coucher et au lever du soleil, atteint un maximum à midi solaire. L'azimut solaire n'est que l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil.

---

# **Chapitre III**

---

### III.1 Introduction

Ce chapitre présente les différentes positions que peut occuper le soleil dans le ciel de M'Sila durant la journée et l'année aussi à savoir ; sa hauteur, son azimut, sa déclinaison, etc. En fait, la position du soleil est d'une grande importance dans tout projet visant l'exploitation de l'énergie solaire que ce soit dans le secteur de construction ou dans le secteur énergétique.

### III.2 La déclinaison solaire

La déclinaison  $\delta$  du Soleil n'est que l'angle entre la direction du Soleil et le plan de l'équateur terrestre (voir la Figure III.1).

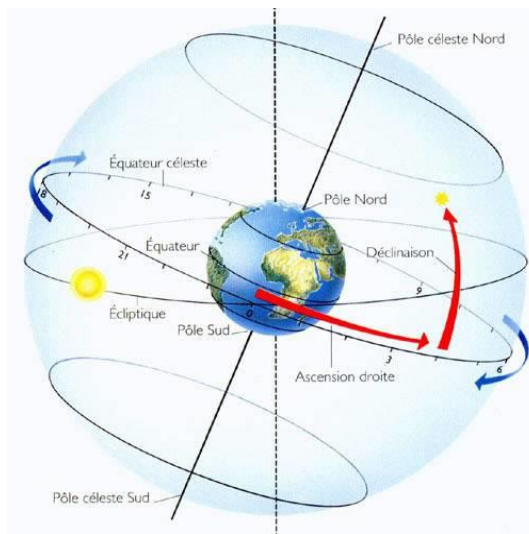


Figure III. 1 Déclinaison solaire  $\delta$  [Web 1]

Sur la Figure III.2 on a porté l'évolution de la déclinaison solaire au cours de l'année. Cette dernière est nulle aux équinoxes du printemps et d'automne, atteint un pic au solstice d'été et prend une valeur minimale au solstice d'hiver. Ces valeurs remarquables correspondent aux 22 mars, 21 septembre, 21 juin et 21 décembre, respectivement. Ces positions particulières de la Terre sur son orbite (autour du soleil) sont caractérisées par la position du Soleil par rapport à l'équateur terrestre. Les équinoxes correspondent au moment où le Soleil est dans le plan équatorial ( $\delta = 0$ ) ; les solstices correspondent au moment où le Soleil est au plus haut ou au plus bas par rapport à l'équateur ( $\delta = +23.45$ ,  $\delta = -23.45$ , respectivement). Les saisons sont alors définies par le temps mis par la Terre pour passer d'un équinoxe à un solstice ou d'un solstice à un équinoxe (l'été est par exemple l'intervalle de temps entre le solstice d'été et l'équinoxe d'automne).

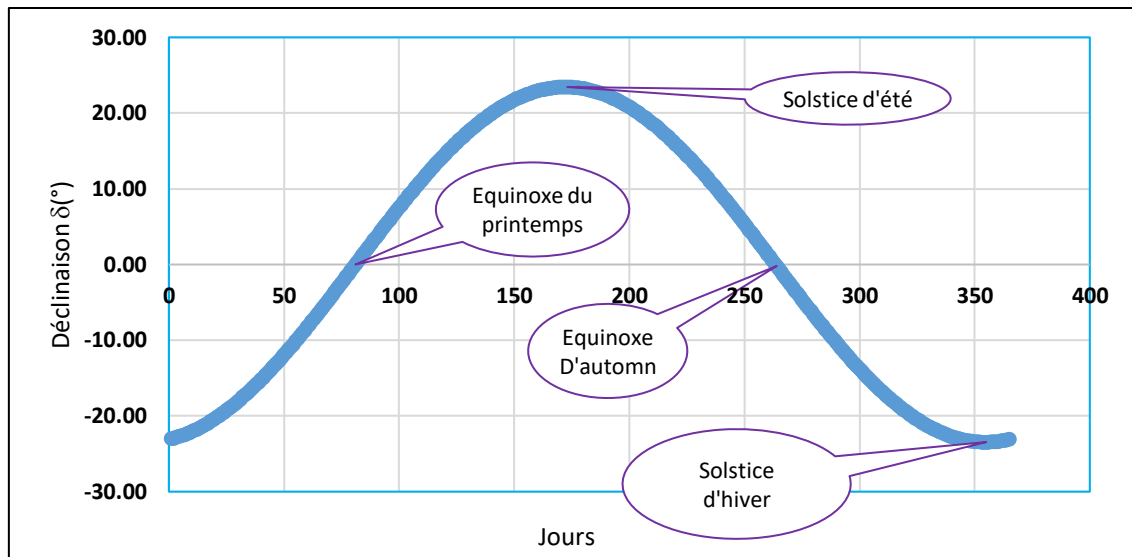


Figure III. 2 Evolution de la déclinaison du soleil.

Sur ce, l'été dure 92 jours, le printemps s'étale sur 91 jours, l'automne sur 91 jours, et l'hiver demeure 91 jours.

### III.3 Evolution de la durée du jour à M'Sila au cours de l'année

Le jour ou la journée est l'intervalle qui sépare le lever du coucher du soleil. En effet, il débute par le lever du soleil et se termine par son coucher. Sa durée dépend de l'année et de la latitude. La Figure III.3 montre l'évolution de la durée du jour à M'Sila au cours de l'année.

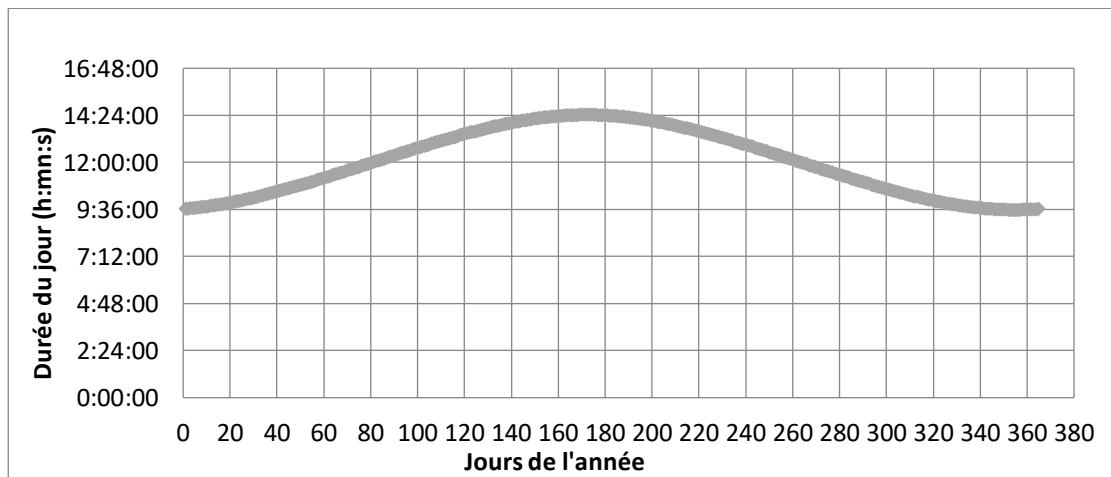


Figure III. 3 Evolution de la durée du jour à M'Sila.

D'après la Figure III.3, la durée du jour à M'Sila varie de 9h 34mn 43s à 14h 25mn 17s atteinte aux solstices d'hiver et d'été, respectivement. Aux équinoxes du printemps et d'automne, le jour égale la nuit (c.à.d. il dure 12h). En moyenne, le soleil reste dans le

ciel de M'Sila pendant 12h durant l'année, autrement dit, la durée moyenne du jour à M'Sila est de 12h.

### III.4 Evolution de la hauteur du Soleil à M'Sila au cours de la journée et de l'année

Vu que la terre tourne autour de son axe, le soleil s'élève chaque jour du côté de l'est et se couche du côté de l'ouest. Au cours de cette trajectoire journalière, le soleil trace dans le ciel une forme d'une cloche (d'un demi-cercle) qui atteint un maximum et possède deux minimums (voir la Figure III.4).

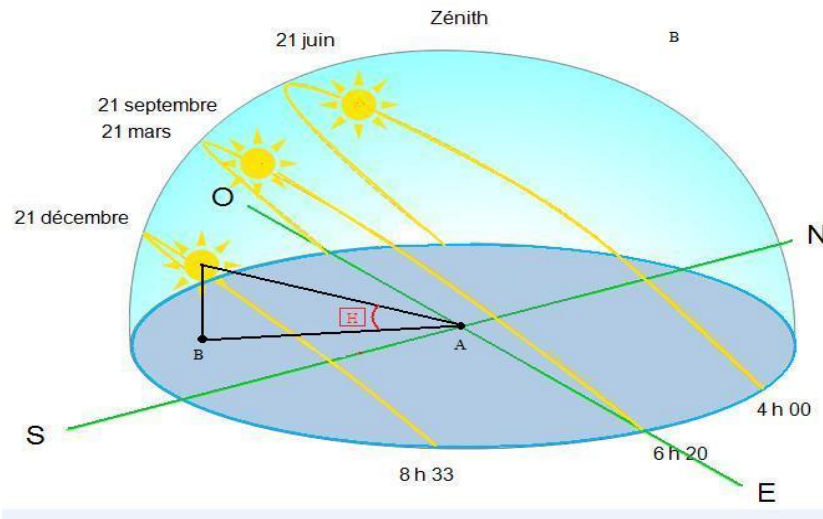


Figure III. 4 Trajectoire du soleil au cours de la journée et de l'année [Web2]

On peut décrire cette trajectoire par la hauteur du soleil  $\alpha_s$  qui n'est que l'angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu. Cet angle est nul au coucher et au lever du soleil, atteint un maximum à midi solaire (voir la Figure III.4).

La Figure III.5 montre la trajectoire du soleil au cours de la journée ; au début, au milieu et à la fin de chaque mois de l'année à M'Sila. Effectivement, au cours de la journée, le Soleil monte graduellement dans le Ciel depuis le lever du soleil jusqu'à un point culminant appelé midi solaire qui indique la direction du sud, puis redescend pour se coucher du côté de l'ouest.

L'heure du lever et du coucher du soleil varient au cours de l'année comme vu précédemment et confirmée par la Figure III.5. Au cours du mois, cette variation n'est pas importante.

Midi, ou midi solaire (ou midi pile) est l'heure de la journée où le Soleil est au plus haut dans le ciel. Autrement dit le soleil est au plus proche du zénith (culmination), à mi-chemin entre l'aube et le crépuscule. A cet instant, son angle horaire est égal à zéro. C'est donc à ce moment que l'ombre d'un objet est la plus courte (voir la Figure III.6).

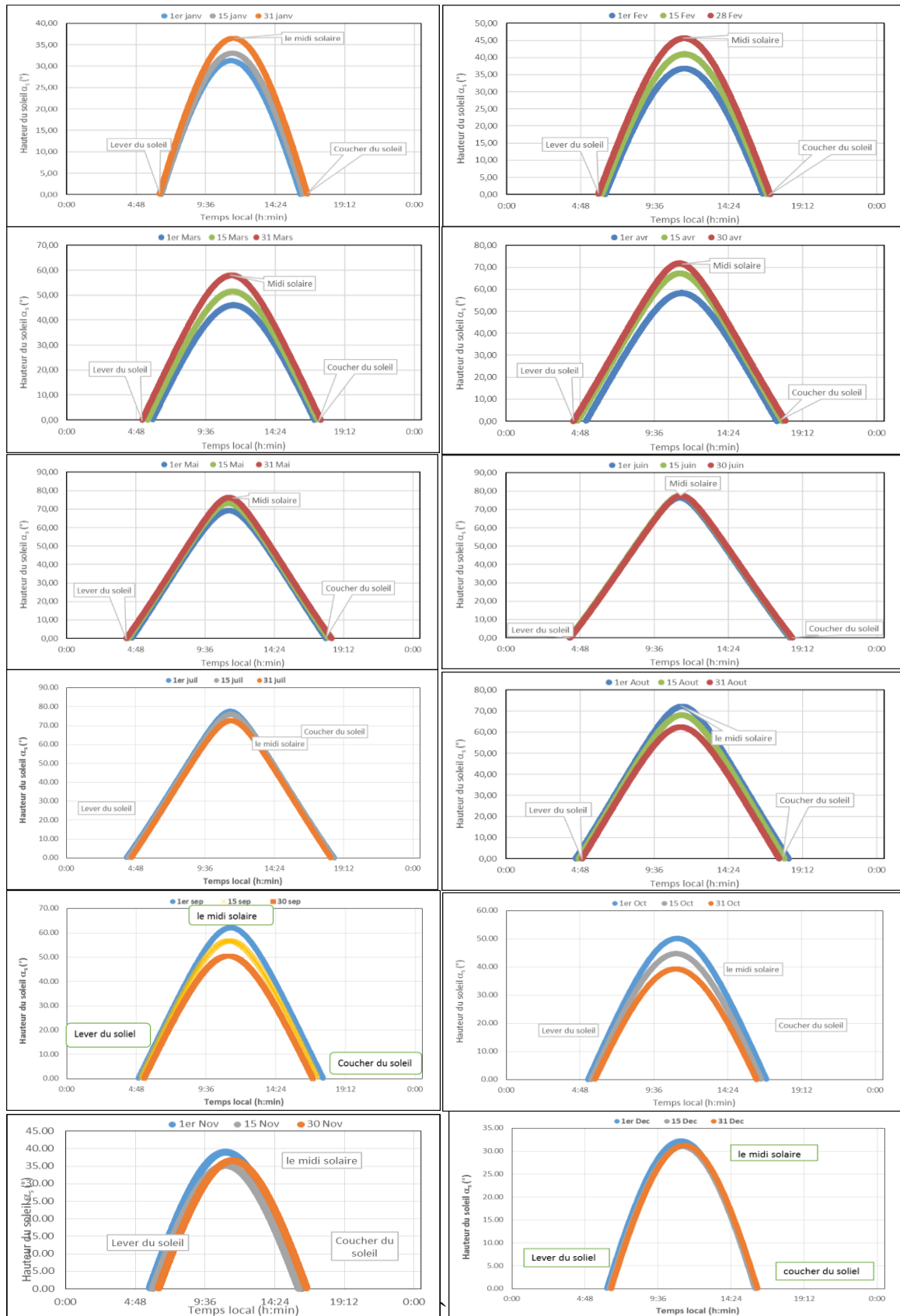


Figure III. 5 trajectoire du soleil au cours de la journée, au début, au milieu et à la fin de chaque mois de l'année à M'Sila.

Le midi solaire indique précisément le sud (dans l'hémisphère nord) ou le nord (dans l'hémisphère sud). Cet instant n'intervient pas forcément à 12 heures local et n'est pas forcément le même dans toute l'Algérie. Suivant le jour de l'année et la longitude du lieu, le midi solaire varie. A M'Sila, le midi solaire varie entre 11h 03mn et 11h 29mn

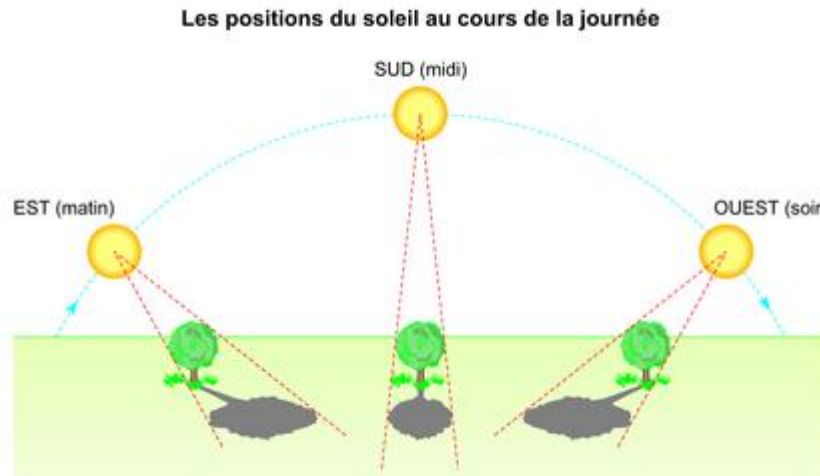


Figure III. 6 Soleil et ombre [Web3].

La hauteur maximale du Soleil exprimée en degré n'est pas fixe, elle varie au cours des mois de l'année. En effet, cette variation est plus prononcée aux mois de Janvier, Février, Mars, Aout, Septembre, Octobre, Novembre et moins prononcée aux mois de Mai, Juin et Juillet et Décembre, comme le montre la Figure III.5.

Sur la Figure III.7, on a porté l'évolution de la hauteur du Soleil aux équinoxes du printemps et d'automne et aux solstices d'hiver et d'été. On constate que la trajectoire du Soleil au cours de l'année se situe entre ses trajectoires aux solstices d'hiver et d'été et ceci d'après les Figures III.4 et III.7. Ainsi, le Soleil est le plus haut dans le ciel au solstice d'été qui correspond au 21 juin et le plus bas dans le ciel au solstice d'hiver qui correspond au 21 Décembre. Aux équinoxes du printemps et d'automne, le soleil parcourt la même trajectoire de l'est en ouest. De plus, chaque année, le Soleil s'élève dans le ciel depuis le solstice d'hiver jusqu'au solstice d'été en passant par l'équinoxe du printemps, puis redescend en suivant la même trajectoire précédente du solstice d'été au solstice d'hiver en passant par l'équinoxe d'automne.

D'après la Figure III.7, la hauteur du Soleil dans le ciel est liée à la durée des jours qui varient. En effet, lorsque le Soleil est le plus haut dans le ciel il parcourt la plus longue trajectoire qui se manifeste par la plus longue journée de l'année. L'inverse est vrai.

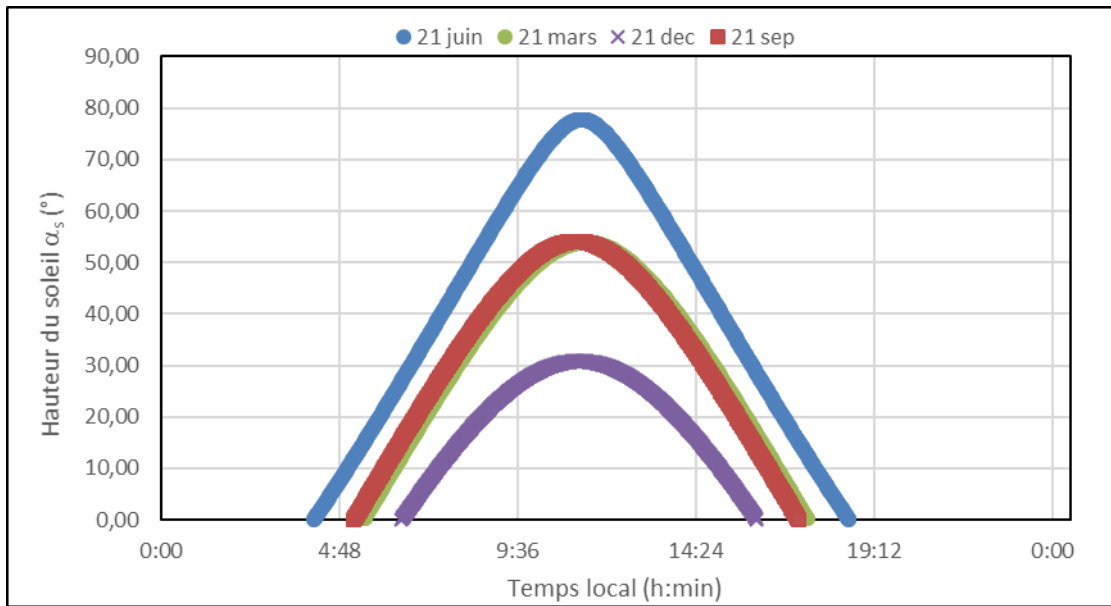


Figure III. 7 Evolution de la hauteur du Soleil aux équinoxes du printemps et d'automne et aux solstices d'hiver et d'été.

A mi-hauteur, le Soleil est aux équinoxes du printemps et d'automne, là, la durée du jour est égale à la durée de la nuit.

Il est à noter que la hauteur du soleil influe sur le l'intensité du flux solaire incident et par conséquent, sur la température du lieu. En effet, plus le soleil est bas, plus la surface éclairée (et donc chauffée) est grande et moins est l'intensité du rayonnement solaire incident : c'est l'hiver et les jours sont courts.

De même, plus le soleil est haut, plus la surface éclairée (et donc chauffée) est petite et plus grande est l'intensité du rayonnement solaire incident: c'est l'été et les jours sont longs.

En d'autres termes, plus une surface chauffée est petite, plus il fait chaud et plus une surface chauffée est grande, plus il fait moins chaud (on peut considérer le soleil comme un radiateur : lorsque la pièce à chauffer à l'aide du radiateur est petite, elle met moins de temps à chauffer que lorsque la pièce est grande). Ce raisonnement explique aussi pourquoi il fait plus chaud à midi solaire qu'au lever et au coucher du soleil.

A M'Sila, la hauteur maximale du soleil, le 21 juin à midi, est de  $77.75^\circ$  tandis qu'elle n'est que de  $30.85^\circ$ , le 21 décembre à la même heure. Donc, on voit qu'en été le soleil se rapproche de la verticale du lieu (Zénith) et s'éloigne d'elle en hiver. Aux équinoxes du printemps et d'automne, la hauteur du Soleil est de  $54^\circ$ .

### III.5 Position du lever et du coucher du Soleil à M'Sila par rapport à l'est et à l'ouest

On nous a appris que le Soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest, ce qui n'est pas vrai d'après les Figures III.4 et III.8.

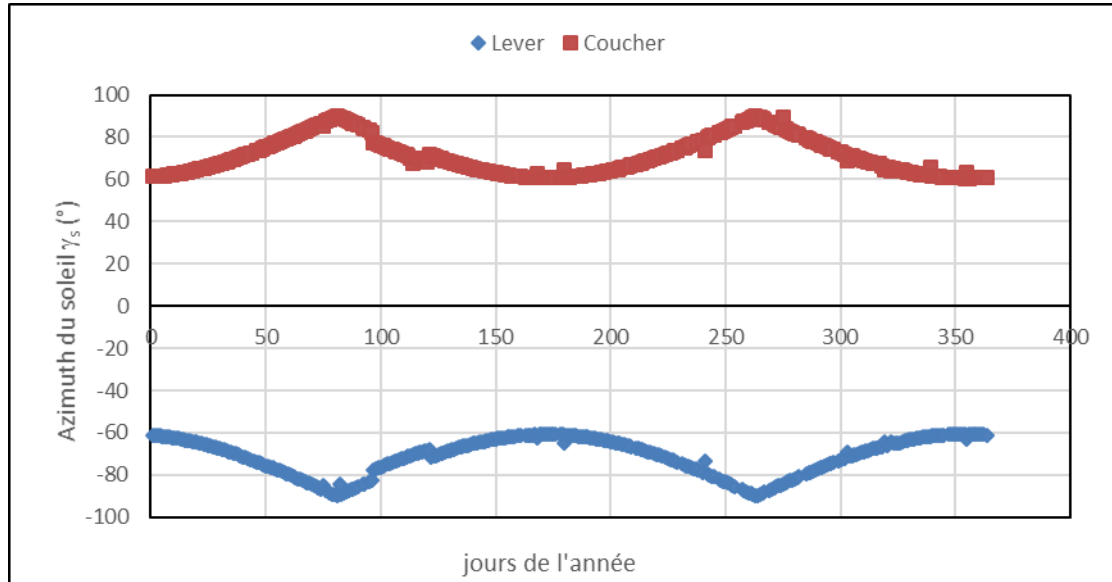


Figure III. 8 Position du soleil au lever et au cocher par rapport à l'est et à l'ouest à M'Sila.

Sur la Figure III.8 on a porté l'évolution de l'azimut solaire au cours de l'année. En effet, l'azimut solaire n'est que l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil.

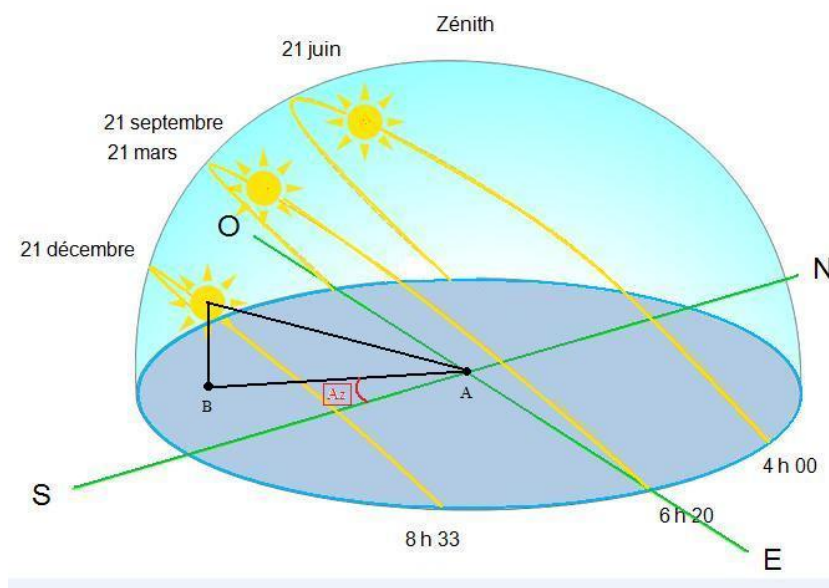


Figure III. 9 Azimut solaire [Web2]

A M'Sila, l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul à midi et positif l'après-midi (direction Ouest) comme le montre la Figure III.8 et III.9. En ce lieu, le soleil

ne se lève à l'est et ne se couche à l'ouest que 2 fois par an, aux équinoxes de printemps et d'automne, aux alentours du 21 mars et du 21 septembre. A ces positions l'azimut solaire est égale à -90 au lever et +90 au coucher (voir les Figures III.4, III.8).

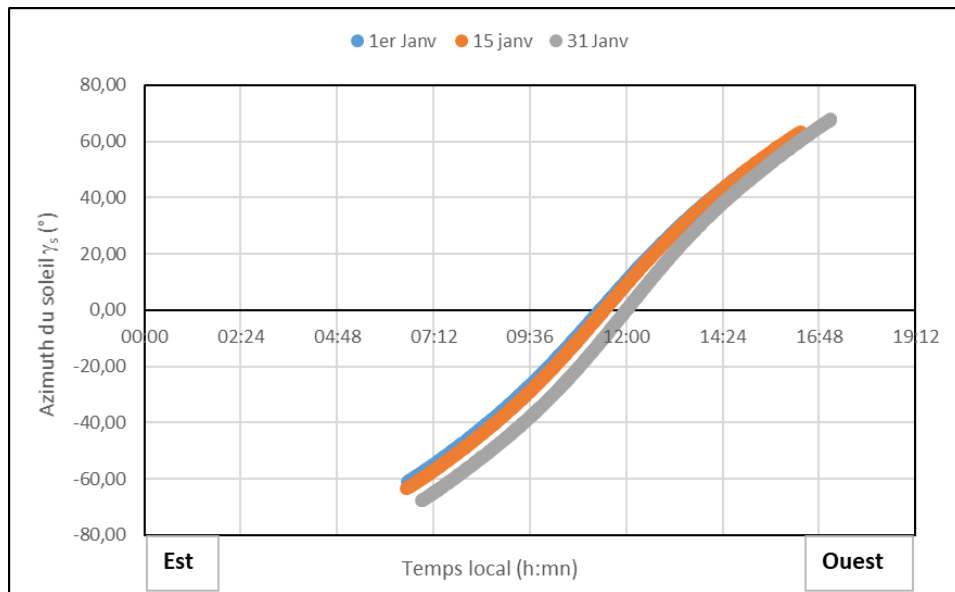


Figure III. 10 Evolution de l'azimut solaire à M'Sila au mois de Janvier.

Lors du solstice d'hiver, le 21 décembre, il se lève au sud-est et se couche au sud-ouest tandis qu'au solstice d'été, le 21 juin, il se lève au nord-est et se couche au nord-ouest comme le montre la Figure III.10.

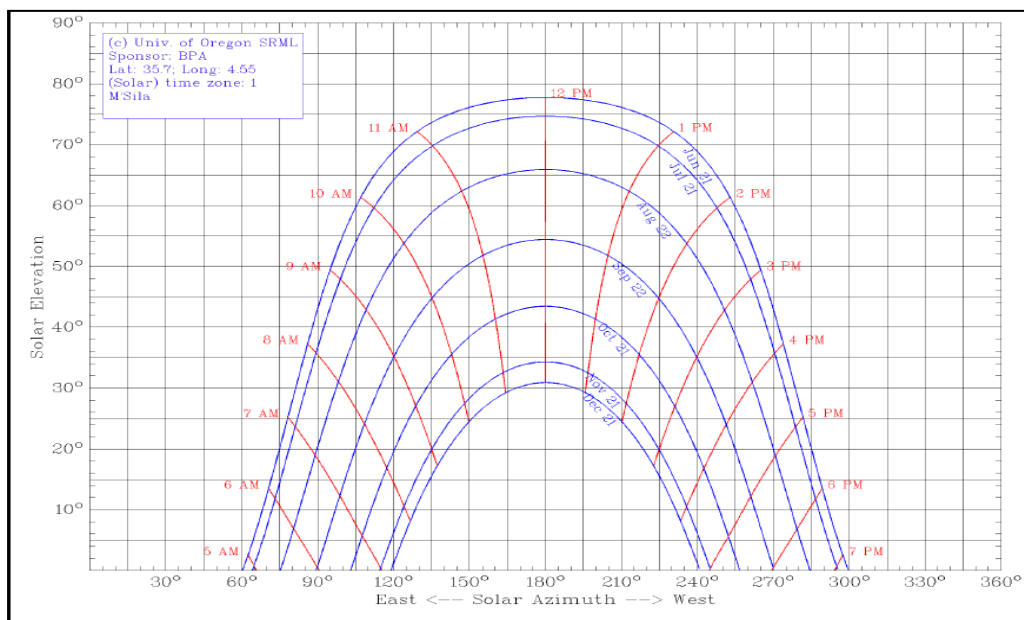


Figure III. 11 Evolution de l'azimut solaire à M'Sila au cours de l'année.

Effectivement, le soleil se lève à M'Sila au solstice d'été avant la direction est de  $30^\circ$  et se couche après la direction Ouest de  $30^\circ$  tandis qu'au solstice d'hiver, il se lève après la direction est de  $30^\circ$  et se couche avant la direction Ouest de  $30^\circ$ .

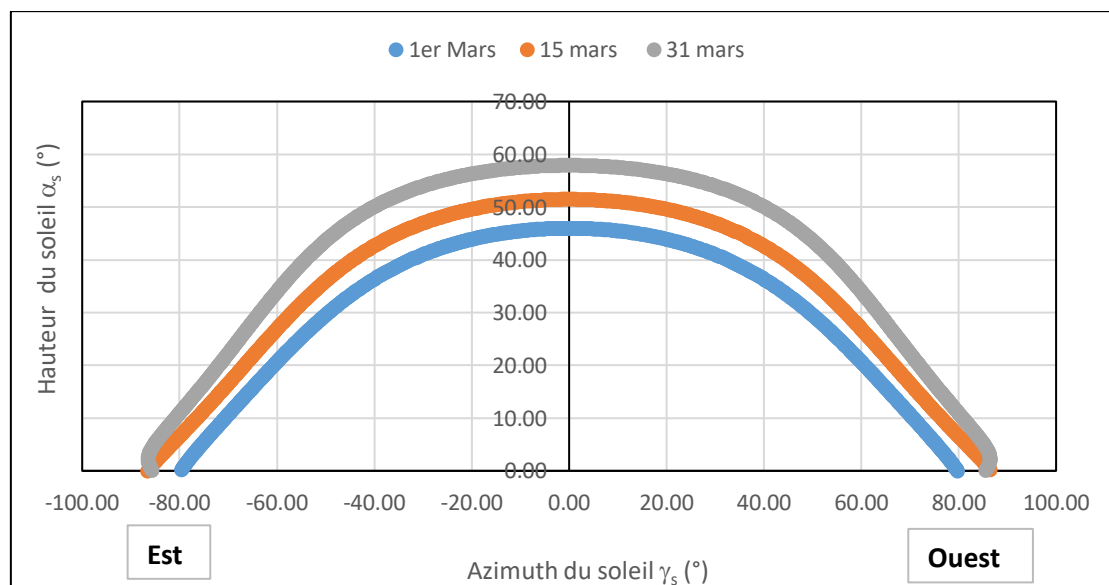
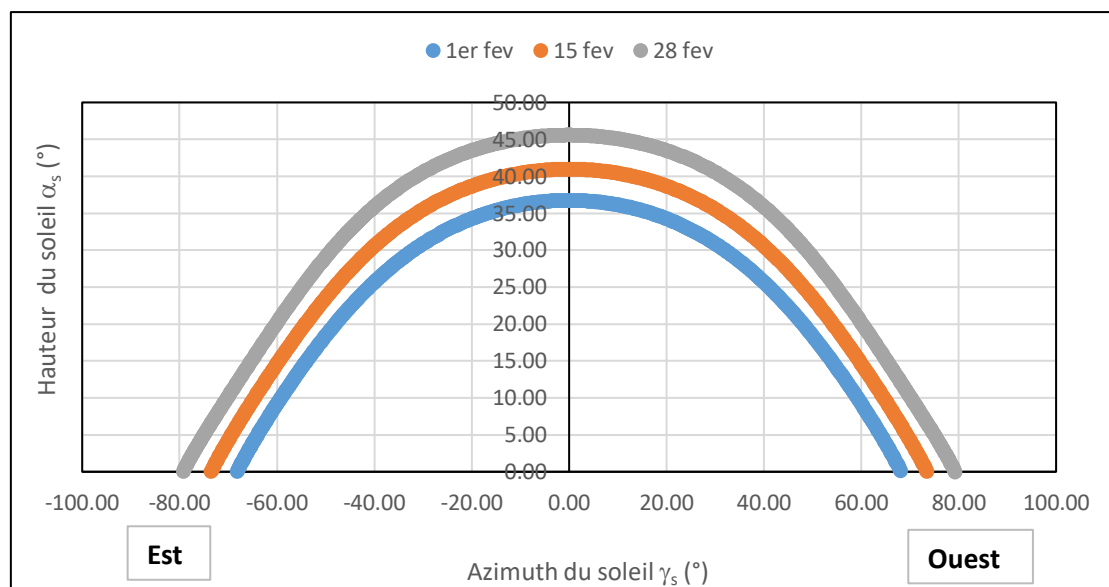
Pour les 361 jours restants, le soleil se lève dans l'intervalle de  $-30$  à  $+30$  par rapport à l'est et se couche dans le même intervalle par rapport à l'ouest.

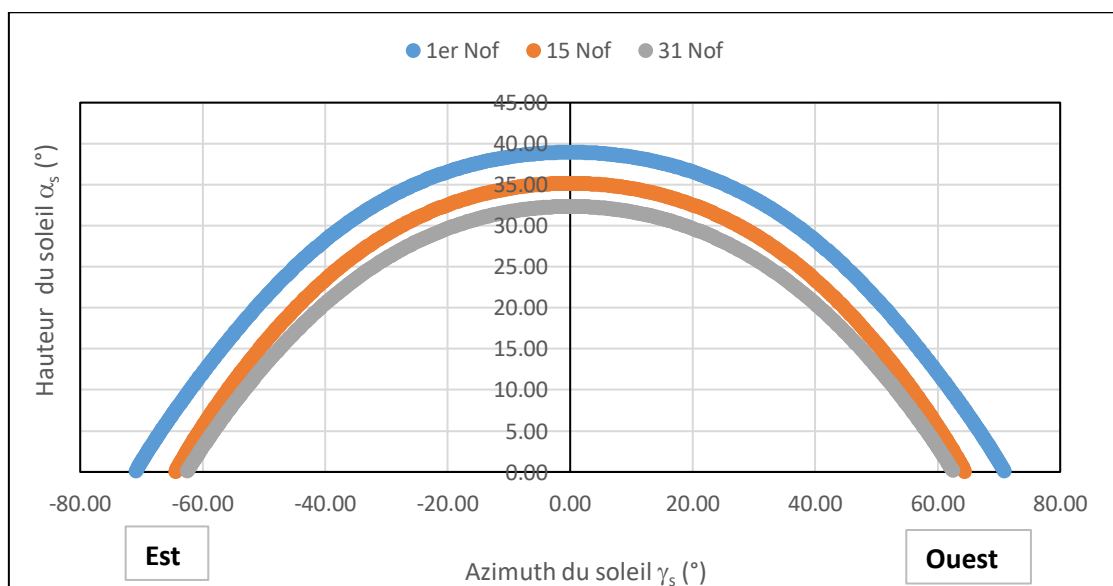
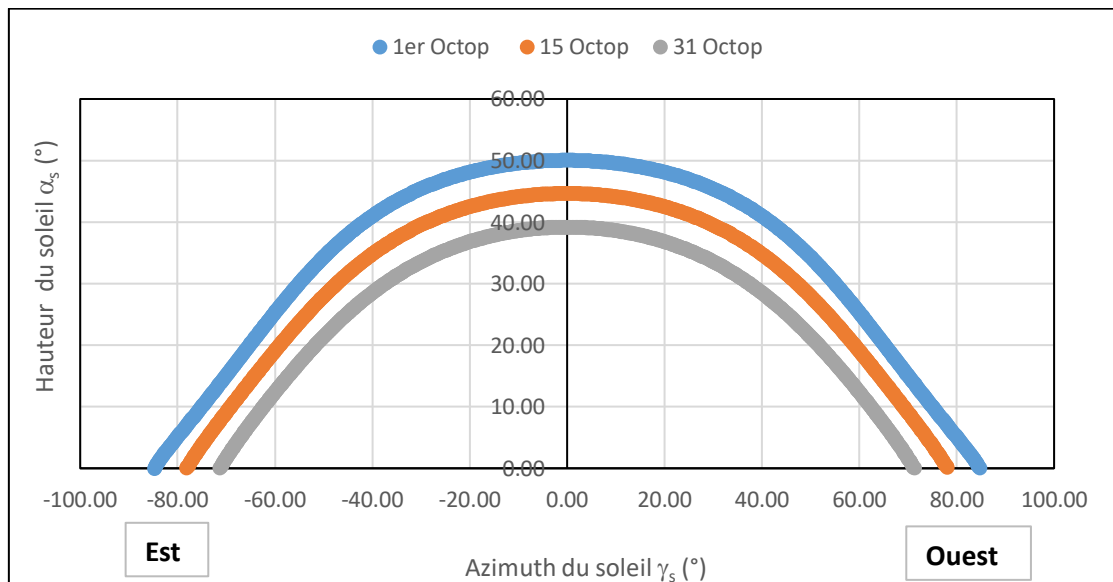
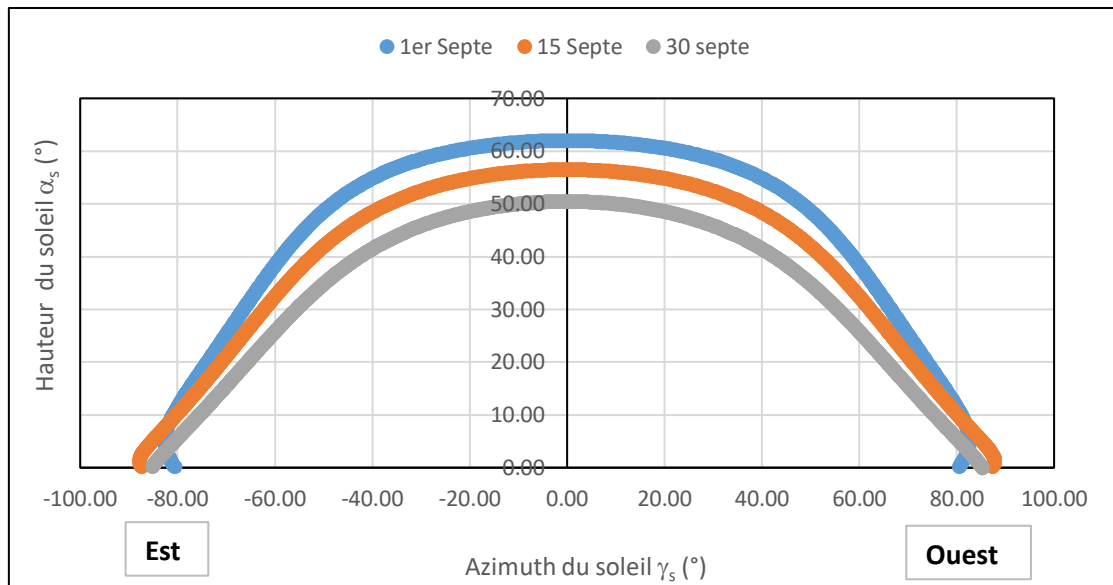
Le diagramme solaire de la Figure III.9 représente les trajectoires apparentes du Soleil dans le ciel de M'Sila à différentes dates de l'année. Il permet de visualiser l'azimut et la hauteur du soleil pendant les heures de la journée et suivant les saisons. D'après ce diagramme, la trajectoire du soleil du mois de mai coïncide avec celle du mois de juillet, celle d'avril avec le mois d'août, février avec le mois d'octobre et janvier avec le mois de novembre.

D'après cette carte, le Soleil se lève le 21 juin à M'Sila avant 5h (temps solaire vrai), atteint son pic à midi solaire et se couche après 19h (temps solaire vrai), il se lève le 21 décembre après 7h (temps solaire vrai), atteint son pic à midi solaire et se couche avant 17h (temps solaire vrai).

Dans nos calculs, on a commis une erreur qu'on a pas pu rectifier faute du temps dans le calcul de l'azimut solaire pour les mois de mars, avril, mai, juin, juillet et août raison pour laquelle, on a procédé à télécharger la carte solaire à partir du site Américain <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>.

Dans ce qui suit, on montre l'évolution de la trajectoire du soleil qu'on a calculé portée sur la Figure III.10.





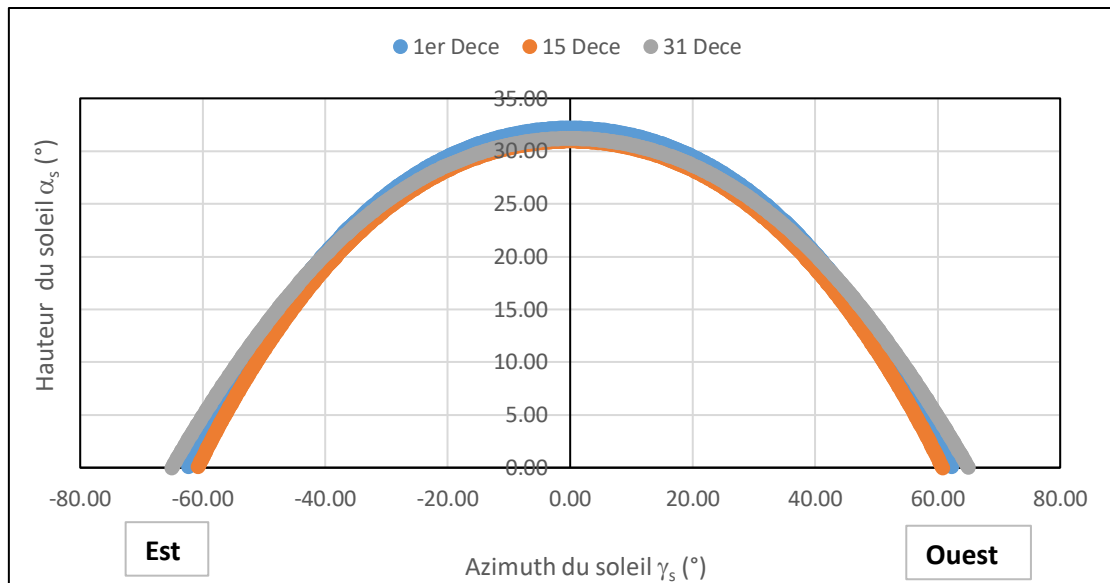


Figure III. 12 Trajectoire du soleil calculée à M'Sila.

### III. 6 Conclusion

Nous avons établi une feuille de calcul Excel qui permet de déterminer la position du soleil à M'Sila à chaque minute (heure locale). Ce travail après l'analyse des résultats obtenus nous a permis de retenir les points suivants :

La durée du jour à M'Sila varie de 9h 34mn 43s à 14h 25mn 17s atteinte aux solstices d'hiver et d'été, respectivement. Aux équinoxes du printemps et d'automne, le jour égale la nuit (c.à.d. il dure 12h). En moyenne, le soleil reste dans le ciel de M'Sila pendant 12h durant l'année, autrement dit, la durée moyenne du jour à M'Sila est de 12h.

Le soleil est au plus proche du zénith (culmination), à mi-chemin entre l'aube et le crépuscule. A cet instant, son angle horaire est égal à zéro. C'est donc à ce moment que l'ombre d'un objet est la plus courte.

Le soleil se lève à M'Sila au solstice d'été avant la direction est de  $30^\circ$  et se couche après la direction Ouest de  $30^\circ$  tandis qu'au solstice d'hiver, il se lève après la direction est de  $30^\circ$  et se couche avant la direction Ouest de  $30^\circ$ .

Pour les 361 jours restants, le soleil se lève dans l'intervalle de  $-30$  à  $+30$  par rapport à l'est et se couche dans le même intervalle par rapport à l'ouest.

## Conclusion générale

La position du soleil est d'une grande importance dans tout projet visant l'exploitation de l'énergie solaire que ce soit dans le secteur de construction ou dans le secteur énergétique. L'objectif de ce projet est de déterminer la position du soleil à M'Sila. Pour ce faire, On a établi une feuille de calcul Excel qui permet de positionner le Soleil à M'Sila à chaque minute (heure locale). Ce travail après l'analyse des résultats obtenus nous a permis de retenir les points suivants :

La durée du jour à M'Sila varie de 9h 34mn 43s à 14h 25mn 17s atteinte aux solstices d'hiver et d'été, respectivement. Aux équinoxes du printemps et d'automne, le jour égale la nuit (c.à.d. il dure 12h). En moyenne, le soleil reste dans le ciel de M'Sila pendant 12h durant l'année, autrement dit, la durée moyenne du jour à M'Sila est de 12h.

Le Soleil est au plus proche du zénith (culmination), à mi-chemin entre l'aube et le crépuscule. A cet instant, son angle horaire est égal à zéro. C'est donc à ce moment que l'ombre d'un objet est la plus courte.

Le Soleil ne se lève à l'est et ne se couche à l'ouest que 2 fois par an, aux équinoxes de printemps et d'automne, aux alentours du 21 mars et du 21 septembre. A ces positions l'azimut solaire est égale à -90 au lever et +90 au coucher

Le Soleil se lève à M'Sila au solstice d'été avant la direction est de 30° et se couche après la direction Ouest de 30° tandis qu'au solstice d'hiver, il se lève après la direction est de 30° et se couche avant la direction Ouest de 30°.

Pour les 361 jours restants, le Soleil se lève dans l'intervalle de -30 à +30 par rapport à l'est et se couche dans le même intervalle par rapport à l'ouest.

Le diagramme solaire représente les trajectoires apparentes du Soleil dans le ciel de M'Sila à différentes dates de l'année. Il permet de visualiser l'azimut et la hauteur du soleil pendant les heures de la journée et suivant les saisons. D'après ce diagramme, la trajectoire du soleil du mois de mai coïncide avec celle du mois de juillet, celle d'avril avec le mois d'août, février avec le mois d'octobre et janvier avec le mois de novembre.

## Références Bibliographiques

- [1] Charik abdeldjebar, Détermination de l'angle optimal d'inclinaison de capteur solaire à M'Sila, mémoire master, option énergétique université de M'sila.
- [2] M. Orgeret. « Les piles solaires (le composant et ses application) ». Edition MASSON.Paris.1985.
- [3] A. Auwers. Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtungen an den Heliometern der deutschen Venus-Expeditionen. *Astronomische Nachrichten*, 128 :361, Décembre 1891.
- [4] F. Laclare, C. Delmas, J. P. Coin, et A. Irbah. Measurements and Variations of the Solar Diameter. *Solar Phys.*, 166 :211–229, Juillet 1996.
- [5] U. J. Le Verrier. Théorie du mouvement de Mercure. *Annales de l'Observatoire de Paris*, 5 :1, 1859.
- [6] S. Newcomb. On the principal fundamental constants of astronomy. 1895.
- [Noël, 2004] F. Noël. Solar cycle dependence of the apparent radius of the Sun. *Astron. Astrophys.*, 413 :725–732, Janvier 2004.
- [7] A. Einstein. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354 :769–822, 1916.
- [8] R. H. Dicke et H. M. Goldenberg. Solar Oblateness and General Relativity. *Phys. Rev. Lett.*, 18 :313–316, Février 1967.
- [9] C. S. M. Pouillet. Mémoire sur la chaleur solaire. Paris, Bachelier. 1838.
- [10] J. R. Hickey, F. J. Griffin, D. T. Hilleary, et H. B. Howell. Extraterrestrial solar irradiance measurements from the Nimbus 6 satellite. In *Sharing the Sun : Solar Technology in the Seventies*, Volume 1, éditeur K. W. Boer, volume 1, pages

329–337, 1976.

[11] R. C. Willson et H. S. Hudson. Solar Maximum Mission experiment - Initial observations by the active cavity radiometer. *Advances in Space Research*, 1 :285–288, 1981.

[12] R. C. Willson et H. S. Hudson. The Sun's luminosity over a complete solar cycle. *Nature*, 351 :42–44, Mai 1991.

[13] C. Fröhlich et J. Lean. The Sun's total irradiance : Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophys. Res. Lett.*, 25 :4377–4380, Décembre 1998.

[14] Du Soleil à la Terre : aéronomie et météorologie de l'espace. Collection Grenoble Sciences. Presses Universitaires de Grenoble, Grenoble.

[15] BOUMELIT Zine laabidine, *Activité Solaire, Vent Solaire et Géomagnétisme durant les Cycles Solaires N°23 et24*, mémoire magistere, option géophysique Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

[16] M. Meftah, J.-F. Hochedez, A. Irbah, A. Hauchecorne, P. Boumier, T. Corbard, S. Turck-Chièze, S. Abbaki, P. Assus, E. Bertran, P. Bourget, F. Buisson, M. Chaigneau, L. Damé, D. Djafer, C. Dufour, P. Etcheto, P. Ferrero, M. Hersé, J.-P. Marcovici, M. Meissonnier, F. Morand, G. Poiet, J.-Y. Prado, C. Renaud, N. Rouanet, M. Rouzé, D. Salabert, et A.-J. Vieau. Picard SODISM, a Space Telescope to Study the Sun from the Middle Ultraviolet to the Near Infrared. *Solar Phys.*, 289 :1043–1076, Mars 2014.

[17] C. Conscience, M. Meftah, A. Chevalier, S. Dewitte, et D. Crommelynck. The space instrument SOVAP of the PICARD mission. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 8146 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 814613, Septembre 2011.

- [Danjon, 1994] A. Danjon. *Astronomie générale*, Albert Blanchard Paris. 1994.
- [18] P. H. Scherrer. The Helioseismic and Magnetic Imager for the Solar Dynamics Observatory. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #200*, volume 34 de *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 735, Mai 2002.
- [19] J. Schou, P. H. Scherrer, R. I. Bush, R. Wachter, S. Couvidat, M. C. Rabello-Soares, R. S. Bogart, J. T. Hoeksema, Y. Liu, T. L. Duvall, D. J. Akin, B. A. Allard, J. W. Miles, R. Rairden, R. A. Shine, T. D. Tarbell, A. M. Title, C. J. Wolfson, D. F. Elmore, A. A. Norton, et S. Tomczyk. Design and ground calibration of the helioseismic and magnetic imager (hmi) instrument on the solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, 275(1) :229–259, 2012.
- [20] D. Bolsée. *Métrologie de la spectrophotométrie solaire absolue : principes, mise en oeuvre et résultats ; Instrument SOLSPEC à bord de la station spatiale internationale* (Unpublished doctoral dissertation). PhD thesis, Université libre de Bruxelles, École polytechnique de Bruxelles, 5 2012.
- [21] R. Ikhlef, T. Corbard, F. Morand, C. Renaud, M. Fodil, A. Ziad, J. Borgnino, M. Meftah, P. Assus, B. Chauvineau, A. Hauchecorne, P. Lesueur, G. Poiet, F. Ubaldi, M. Hamadouche, et T. Abdelatif. MISOLFA : a generalized monitor for daytime spatiotemporal turbulence characterization. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 458 :517–530, Mai 2016.
- [22] Hamdani Maamar “ Etude et Effet l’orientation de Pièces d’un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa “. *Mémoire de Magister Energie Renouvelables*. Université Abou-Bakar Belkid Tlemcen.2011.
- [23] REDDAH Takieddine “ Etude et dimensionnement d’un système solaire combiné Application: Logement individuel type F3 à Batna “. *Mémoire de Magister Option : Energétique*. Université de batna.2015.

[24] Abdelkarim Bouras ‘‘Etude et conception d’un convertisseur solaire pour la production d’eau chaud sanitaire’’. Mémoire de Magister Physique. Université Mentouri, Constantine. 2007.

[25] Benmeriem Fatiha ‘‘Contribution a l’analyse de la faisabilité énergétique d’une installation de production de l’eau chaude sanitaire par voie solaire’’. Mémoire de magister. Université de Hassiba Benbouali. Chlef. 2009.

[26] Définitions lexicographiques (<http://www.cnrtl.fr/lexicographie/azimut/0>) et étymologiques (<http://www.cnrtl.fr/etymologie/azimut/0>) de « azimut » du Trésor de la langue française informatisé, sur le site du Centre national de ressources textuelles et lexicales

[27] « L’instrument méridien », L’Astronomie, vol. 75<sup>e</sup>, 1961, p. 159 (lire en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/full/1961LAstr..75..159M>)).

[28] Dictionnaire encyclopédique du son, Paris, Dunod, 2008, 559 p. (ISBN 978-2-10-005979-9), p. 41.

[29] Khoudrane Ismail ‘‘ Etude d’un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques ‘’. Mémoire de master en énergétique. Université de Ksdi Merbah Ouargla 2014.

[30] Benmeriem Fatiha ‘‘Contribution a l’analyse de la faisabilité énergétique d’une installation de production de l’eau chaude sanitaire par voie solaire’’. Mémoire de magister. Université de Hassiba Benbouali. Chlef. 2009.

[Web1]

<https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.astrosurf.com%2Ftousaint%2Fdossiers%2Fcoordonnees%2Fcoordonnees.htm&psig=AOvVaw0k9UKv7CxyGdoH5sgjsVqE&ust=1624369639191000&source=images&cd=vfe&ved=0CAcQjRxqFwoTCPiUpc7uqPECFQAAAAAdAAAAABAI>

[Web2] <http://www.solairethermique.guidenr.fr/images/trajectoire-soleil-hauteur.jpg>

[Web3]

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.assistancescolaire.com%2Fenseignant%2Felementaire%2Fressources%2Fbase-documentaire-en-sciences%2Fles-positions-du-soleil-au-cours-de-la-journee-6sce0601&psig=AOvVaw2z0Bqpr6OIT2oWh8jaeBA1&ust=1624420622649000&source=images&cd=vfe&ved=0CAcQjRxqFwoTCNjc8tKsqvECFQAAAAAdAAAAABAT>