

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم

العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département: Génie mécanique



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Energétique

Intitulé

Détermination de la position du Soleil de la ville de Relizane

Présenté par:

Mr :Boukhari Ayoub

Mr : Dahmani Abdelkader

Devant les membres de jury :

Président :Mr Belabbaci Madjid

Maître de conférence (A)(U. Relizane)

Encadreur :Mr Bouamra Messaoud

Maître de conférence (B) (U.Relizane)

Examineur : Mr Zahi Rachid

Maître de conférence (A) (U.Relizane)

Année universitaire : 2024/2025

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 **Dr. Bouamra Messaoud** 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

Dédicace

À ma chère mère

qui a toujours été mon premier soutien et ma source
constante de force.

À mon cher père Bouabdellah, qui a toujours été
mon soutien

A mes frères: mohammed amine, ibrahim khalil

À mon ami et frère Abdelkader, pour son
indéfectible soutien, ainsi qu'à sa noble et généreuse
famille, en témoignage de ma profonde gratitude.

Boukhari Ayoub

Dédicace

Toute la famille << DAHMANI >>

À mes parents pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études. Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mon amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être. À ma chère sœur DONIA et à Houda pour son aide, son encouragement et son soutien moral. À mon frère MALIK À mon binôme et meilleure amie Ayoub et à toute sa famille À tous mes amis(es) de toute ma promotion de génie mécanique.

ET À TOUS CEUX QUE J'AIME, MERCI.

DAHMANI ABDELKADER

Sommaire

Sommaire	1
Liste figure	3
Liste de Tableau	4
Introduction générale	5
CHAPITRE I SOLEIL ET ENERGIE SOLAIRE	
I-Introduction	7
I.2 Soleil	7
I.3. Les Caractéristiques Principals du Soleil.....	8
I.4-Structure du soleil	9
I.4.1. Structure interne.....	10
I.4.2. Structure externe	10
I.5-Influence de l’atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire	11
I.5.1-Masse atmosphérique.....	12
I.5.2-Structure de l’atmosphère	12
I.5.3-Absorption de rayonnement solaire	14
I.5.4- Distribution du rayonnement solaire par l’atmosphère	15
I.6. Rayonnement solaire	16
I.6.1-Définition	16
I.6.2-Types de rayonnement solaire.....	16
I.6.3- Gisement solaire	19
I.7 Activité solaire.....	20
I.7.1 Les taches solaires	21
1.7.2 Les éruptions solaires (Flares)	22
I.8- l’énergie solaire	23
I.8.1-Définition	23
I.8.2-Différents types de l'énergie solaire.....	23
I.9-Conclusion.....	26
CHAPITRE II POSITION DU SOLEIL	
II.1. Introduction	28
II.2. Mouvement de la terre autour du soleil.....	28
II.3. Coordonnées géographiques.....	29
II.3.1. La longitude	29

II.3.2 La latitude	29
II.4. Coordonnées horaires.....	30
II.4.1 Déclinaison solaire	30
II.4.2 Angle horaire.....	31
II.5. Coordonnées horizontales	32
II.5.1 Hauteur du soleil H.....	32
II.4.2. Azimut du soleil (α).....	32
Conclusion.....	33
Chapitre III : APPLICATION EN MATLAB	
III.1. Introduction	35
III.2 La déclinaison solaire	35
III.3 Evolution de la durée du jour à Relizane au cours de l'année	36
III.4 Evolution de la hauteur du Soleil à Relizane au cours de la journée et de l'année.....	37
III.5 Position du lever et du coucher du Soleil à Relizane par rapport à l'est et à l'ouest.....	45
III.6 Conclusion	51
Conclusion générale.....	52

Liste figure

CHAPITRE I SOLEIL ET ENERGIE SOLAIRE

Figure I. 1 Etoile du soleil	8
Figure I.2 Dimension de différentes couches du soleil en km.....	10
Figure I. 3 Structure du soleil (Photo Soho)	11
Figure I.4 Influence de la courbure du globe terrestre sur le trajet parcouru par le rayonnement solaire	13
Figure I.5 a structure verticale de l'atmosphère	13
Figure 1.6 Distribution de rayonnement solaire par l'atmosphère	16
Figure I.7 Rayonnement solaire	17
Figure I.8 pyrhéliomètre	17
Figure I.9 Pyranomètre muni d'une bande pare-soleil.....	17
Figure I.10 Albédomètre.....	17
Figure I.11 Pyranomètre (modèle SR11)	17
Figure I.12 Ensoleillement moyen annuel dans le monde	20
Figure I.13 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Algérie.....	20
Figure 1.14 Variation du nombre de taches solaires observées à la surface du Soleil en fonction du temps	21
Figure I.15 Les tâches solaires.....	22
Figure 1.16 Image représentant un Flare source (Jean-Pierre Brahic).....	23
Figure 1.17 Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire	24
Figure 1.18 Station photovoltaïque	24
Figure 1.19 Panneaux solaire thermique.....	24
Figure 1.20 Le solaire thermodynamique nécessite de grandes surfaces.....	24
Figure 1.20 Le solaire thermodynamique nécessite de grandes surfaces.....	24

CHAPITRE II POSITION DU SOLEIL

Figure II.1 Mouvement de la terre autour du Soleil	29
Figure II.2 Schéma descriptif pour les angles Latitude et Longitude de la Terre	30
Figure II.3. La déclinaison du soleil en fonction des jours	31
Figure II.4 Coordonnées horaires	31
Figure II.5 Schéma des coordonnées horizontales.....	33

Chapitre III : APPLICATION EN MATLAB

Figure III.1 Déclinaison solaire	36
Figure III.2 Evolution de la durée du jour à Relizane au cours de l'année.....	37
Figure III.3 Trajectoire du soleil au cours de la journée et de l'année.....	38
Figure III.4 trajectoire du soleil au cours de la journée, au début au milieu et à la fin de chaque mois de l'année à Relizane	38
Figure III. 5 Soleil et ombre	38
Figure III. 6 Evolution de la hauteur du Soleil aux équinoxes du printemps et d'automne et aux solstices d'hiver et d'été.....	38
Figure III. 7 Position du soleil au lever et au coucher par rapport à l'est et à l'ouest à Relizane.....	42
Figure III. 8 Azimut solaire.....	42
Figure III. 9 Evolution de l'azimut solaire à Relizane au mois de Janvier	42
Figure III. 10 Evolution de l'azimut solaire à Relizane au cours de l'année	42
Figure III. 11 Trajectoire du soleil calculée à Relizane.....	42

Liste de Tableau

Tableau I.1 Caractéristiques principales du soleil	9
Tableau I.2 Gisement solaire en Algérie.....	20
Tableau 1.3 Classification des flares selon la valeur du pic du Flux X entre 0.1 et 0.8 nm Source : GOES	23

Introduction générale

Le monde a connu une croissance démographique sans précédent, stimulée par les avancées médicales, l'amélioration des conditions de vie et la prospérité économique. Cette augmentation a entraîné une demande accrue en ressources naturelles telles que l'eau, la nourriture et l'énergie. Avec la dépendance continue aux sources d'énergie traditionnelles, comme les combustibles fossiles, l'environnement est confronté à des défis majeurs, notamment le changement climatique et l'épuisement des ressources. Face à ces enjeux, la diversification des sources d'énergie et l'adoption d'alternatives durables sont devenues une nécessité impérieuse au XXI^e siècle. L'énergie solaire apparaît comme l'une des solutions les plus prometteuses, offrant une source d'énergie renouvelable et propre tout en réduisant les émissions de carbone. Cependant, pour en tirer le meilleur parti, il est essentiel d'étudier précisément la trajectoire du soleil, afin de calculer le rayonnement solaire et d'optimiser l'orientation des bâtiments, ainsi que la conception et l'installation de systèmes solaires actifs, qu'ils soient thermiques ou photo La Terre se déplace autour du Soleil selon une trajectoire elliptique légèrement aplatie, ce qui entraîne une variation constante de sa position au cours de l'année. Pendant cette révolution annuelle, elle effectue une rotation complète autour de son axe polaire toutes les 24 heures, ce qui modifie la position apparente du Soleil dans le ciel. Cette position est déterminée à tout moment par son altitude et son azimut, rendant l'étude de son mouvement essentielle pour comprendre la répartition du rayonnement solaire à travers les différentes saisons.

L'Algérie bénéficie d'un potentiel solaire exceptionnel grâce à son climat ensoleillé et à sa position géographique avantageuse. L'ensoleillement y est particulièrement élevé, faisant du pays l'un des territoires les plus propices à l'exploitation de l'énergie solaire. En plein midi, lorsque le soleil est au zénith, l'intensité du rayonnement solaire peut atteindre environ 1 kW/m², ce qui représente une ressource énergétique considérable. Durant les mois d'été, notamment en juillet sous un ciel dégagé, l'énergie solaire reçue quotidiennement peut dépasser 6 kWh/m². Sur une base annuelle, certaines régions enregistrent un rayonnement global atteignant plus de 2500 kWh/m², une valeur parmi les plus élevées au monde. Ce potentiel solaire remarquable ouvre la voie à une exploitation optimale de l'énergie photovoltaïque et thermique, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour le développement des énergies renouvelables en Algérie. L'abondance de cette ressource constitue une opportunité stratégique pour réduire la dépendance aux énergies fossiles, renforcer la sécurité énergétique du pays et favoriser une transition énergétique durable. L'intégration des technologies solaires, qu'il s'agisse du photovoltaïque pour la production d'électricité ou du solaire thermique pour la chaleur industrielle et domestique, pourrait non seulement contribuer à l'essor économique du pays, mais aussi positionner l'Algérie comme un acteur clé dans le domaine de l'énergie verte à l'échelle régionale et internationale.

Cette thèse vise à déterminer la position du soleil à Relizane à chaque instant de l'année. Ce travail a été traité en trois chapitres. Le premier se concentre sur le Soleil et l'énergie solaire. En réalité, ce chapitre couvre globalement toutes les informations relatives au Soleil et à son énergie. Le second inclut toutes les équations requises pour déterminer la position du Soleil. Le dernier expose les résultats de calculs, c'est-à-dire la localisation du Soleil dans le ciel de Relizane, représentée par le diagramme solaire.

Chapitre I

I-Introduction

Le Soleil est l'étoile centrale de notre système solaire et constitue la principale source d'énergie pour la Terre. Il produit de l'énergie par un processus de fusion nucléaire, transformant l'hydrogène en hélium et libérant une quantité massive d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique[1].

L'énergie solaire qui atteint la Terre peut être exploitée de diverses manières. Deux des technologies principales sont les panneaux photovoltaïques, qui convertissent directement la lumière du Soleil en électricité, et les capteurs thermiques solaires, qui absorbent la chaleur du Soleil pour produire de l'eau chaude ou de l'énergie mécanique [2].

Avec l'augmentation de la demande énergétique mondiale et les problèmes liés aux combustibles fossiles, l'énergie solaire joue un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie durables. Les panneaux solaires sont de plus en plus efficaces et abordables, grâce aux avancées technologiques dans le domaine des cellules solaires, notamment en silicium cristallin et en couches minces[3].

L'un des grands avantages de l'énergie solaire est son impact environnemental réduit par rapport aux sources conventionnelles d'énergie. Elle ne produit pas de gaz à effet de serre pendant son utilisation, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique[4]. De plus, l'exploitation de l'énergie solaire permet une indépendance énergétique accrue et une réduction des coûts à long terme.

Malgré ses nombreux avantages, l'énergie solaire présente certains défis, notamment son intermittence et la nécessité de systèmes de stockage d'énergie performants pour garantir une alimentation continue. Cependant, avec les progrès dans les batteries et le stockage thermique, ces obstacles deviennent de moins en moins problématiques [5]. En conclusion, l'énergie solaire représente une alternative durable et prometteuse aux combustibles fossiles. Son développement continu et son intégration dans les réseaux énergétiques mondiaux sont essentiels pour assurer un avenir énergétique propre et efficace.

I.2 Soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire est la plus proche de la terre, sa lumière met environ huit minutes et 20 secondes à nous atteindre. Elle est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année. L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de $14 \cdot 10^5$ km de diamètre, sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{30}$ kg Figure (I.1). Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de Km. Sa luminosité totale, c'est-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à $4 \cdot 10^{26}$ W. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7 \cdot 10^{17}$ W.

Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques : 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation -précipitation de l'atmosphère. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. C'est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène, ses caractéristiques physiques principales sont données dans le tableau (I.1) . L'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde $564 \cdot 10^6$ tonnes d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = mc^2$), ce qui représente une énergie totale de $36 \cdot 10^{22}$ kW [6].



Figure I. 1 Etoile du soleil [7].

I.3. Les Caractéristiques Principales du Soleil

Le Soleil est une étoile de type naine jaune située au centre de notre système solaire. Il constitue la principale source d'énergie pour la Terre et joue un rôle essentiel dans l'équilibre climatique et le cycle de la vie. Voici ses principales caractéristiques:

1. Composition et Structure Le Soleil est composé principalement d'hydrogène (~74%) et d'hélium (~24%), avec des traces d'autres éléments comme l'oxygène, le carbone et le fer. Sa structure est divisée en plusieurs couches:

- **Le noyau:** Siège des réactions de fusion nucléaire, il produit de l'énergie sous forme de lumière et de chaleur.
- **La zone radiative:** Où l'énergie met des milliers d'années à traverser.
- **La zone convective:** Où la chaleur est transportée par des courants de convection.
- **La photosphère:** Surface visible du Soleil, principale source de lumière solaire.
- **La chromosphère et la couronne :** Couches externes émettant des éruptions solaires et des vents solaires. [8].

2. Température et Rayonnement

- La température au noyau atteint environ 15 millions de degrés Celsius.
- La photosphère a une température d'environ 5 500°C.

- La couronne peut atteindre plusieurs millions de degrés Celsius.
- Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique sous forme de lumière visible, d'ultraviolets et d'infrarouges [9].

3. Taille et Masse

- Diamètre : Environ 1,39 million de kilomètres (109 fois celui de la Terre).
- Masse : Environ $1,989 \times 10^{30}$ kg (environ 333 000 fois la masse de la Terre).
- Volume : Peut contenir environ 1,3 million de Terres [10].

4. Activité Solaire et Influence sur la Terre

- Le Soleil suit un cycle d'activité de 11 ans marqué par des taches solaires et des éruptions.
- Les vents solaires interagissent avec la magnétosphère terrestre, causant des aurores boréales.
- L'activité solaire influence le climat terrestre et peut perturber les communications et les satellites [11].

5. Durée de Vie et Évolution

- Le Soleil a environ 4,6 milliards d'années et est à mi-chemin de sa vie.

Dans environ 5 milliards d'années, il deviendra une géante rouge avant de se transformer en naine blanche [12].

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989 \times 10^{30}$ Kg
Diamètre	$1,392 \times 10^9$ m
Masse volumique moyenne	1410 Kg/m ³
Puissance rayonnée	$3,83 \times 10^{26}$ W
Température superficielle	5770 °K
Vitesse de déplacement	216 km s ⁻¹

I.4-Structure du soleil

Le Soleil peut être divisé en plusieurs couches concentriques, comme illustré dans la figure (I.2). On distingue quatre régions principales : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne

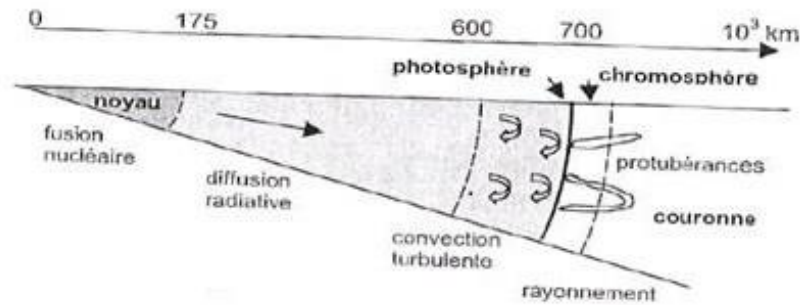


Figure I.2 Dimension de différentes couches du soleil en km [13].

Les réactions de fusion nucléaire ont lieu au cœur du Soleil, générant une quantité d'énergie colossale. Ces réactions sont rendues possibles grâce aux propriétés exceptionnelles du noyau : une densité extrêmement élevée (environ 10 kg/m^3), une température atteignant 15 millions de degrés Celsius et une pression avoisinant 2×10^{11} bars. En s'éloignant du centre sur une distance de 175 km, soit le quart du rayon solaire, la densité diminue progressivement.

L'énergie produite se propage d'abord par diffusion radiative, puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère, d'où elle est émise sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace [14].

I.4.1. Structure interne

Le noyau

Le noyau du Soleil contient plus de 50 % de sa masse totale (Fig. I.2). Il occupe environ un quart du rayon solaire et présente une densité avoisinant $1,6 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$. Sa température, atteignant près de 15 millions de degrés, permet la réalisation des réactions de fusion nucléaire, au cours desquelles l'hydrogène est converti en hélium via le cycle proton-proton. [15]

La zone radiative

Cette région s'étend jusqu'à environ 0,7 RO. L'énergie produite par les réactions nucléaires y est transportée majoritairement sous forme de rayonnement. Dans cet environnement fortement ionisé, les photons interagissent constamment avec les électrons libres et les ions. Ils sont absorbés, réémis, puis de nouveau absorbés et réémis dans un processus complexe. [15]

La zone convective

Dans cette région, le transport de l'énergie s'effectue principalement par convection, c'est-à-dire par le déplacement du plasma. Le plasma chaud remonte vers la surface tandis que le plasma plus froid redescend vers les couches internes. Un proton met environ une dizaine de jours pour traverser cette zone. Une fois cette région franchie, le milieu devient moins dense, permettant à l'énergie de se propager à nouveau par rayonnement, sans interactions avec la matière environnante. Cette dernière région correspond à l'atmosphère solaire, dont la photosphère marque la limite visible du Soleil. [15]

I.4.2. Structure externe

La photosphère

La photosphère est la couche la plus profonde parmi celles qui sont visibles, représentant ainsi la surface apparente du Soleil. Elle est responsable de l'émission de la majeure partie du

rayonnement solaire. C'est également dans cette région que l'hydrogène neutre est localisé, formant l'enveloppe externe de la structure solaire [15].

La chromosphère

Située au-dessus de la photosphère, la chromosphère est une couche hétérogène dont la température augmente à mesure que l'on s'éloigne du Soleil. Son éclat est environ 100 fois plus faible que celui de la photosphère. Elle se distingue par un rayonnement spécifique, caractérisé par des raies d'émission brillantes.

La couronne

Il s'agit de la couche externe du Soleil, constituée d'un plasma de faible densité. Sa température connaît une élévation surprenante, passant d'environ 10 000 K à la base de la zone de transition à près de 2 000 000 K dans la couronne. Ce phénomène de chauffage coronal, encore mal compris, demeure un sujet de recherche majeur en physique solaire [15].

L'héliosphère

L'héliosphère est une vaste bulle engendrée par les vents solaires qui s'étend dans le milieu interstellaire. Son influence peut atteindre jusqu'à 100 unités astronomiques (UA) du Soleil [15].

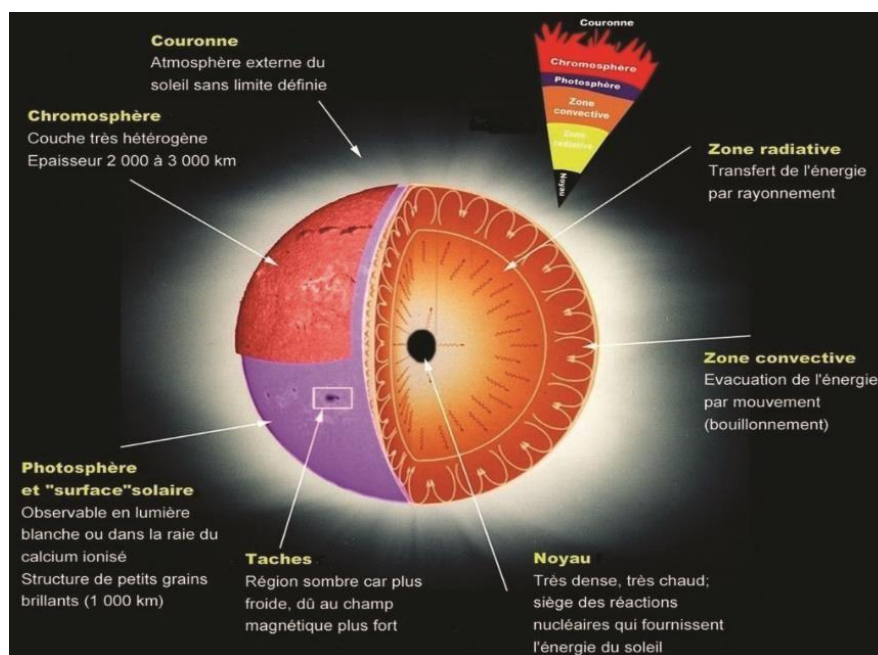


Figure I. 3 Structure du soleil (Photo Soho) [15].

I.5-Influence de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse la plus externe de notre planète. Bien que dans la vie de tous les jours elle soit oubliée et parfois ignorée, elle est pourtant indispensable. Elle est transparente aux rayons lumineux dans le domaine visible, ce qui nous permet de voir le monde qui nous entoure. Sa présence est tout de même révélée par la couleur bleue du ciel. Ses propriétés de transparence sélective sont dues à la capacité des molécules qui la composent d'absorber une partie du rayonnement électromagnétique et d'émettre un rayonnement du même

type dans une autre longueur d'onde. Une partie seulement de l'énergie solaire atteint donc la surface de la Terre [16].

La masse volumique $\rho(z)$ de l'air atmosphérique diminue avec l'altitude z , cette variation entraîne une variation de la réfraction de l'air celle-ci provoque une déviation progressive des rayons lumineux ce qui influe sur la durée du jour car s'il n'y avait pas d'atmosphère, l'obscurité la plus complète arriverait dès que le soleil disparaît à l'horizon. La lumière solaire diffusée par les couches supérieures de l'atmosphère encore illuminées par le soleil fait que le passage du jour à la nuit ou de la nuit au jour se fait graduellement [17].

I.5.1-Masse atmosphérique

Pour prendre en compte le trajet parcouru par les photons, on utilise le concept de masse atmosphérique, également appelé masse du chemin optique de l'atmosphère. Ce concept est défini à partir de l'épaisseur de l'atmosphère mesurée verticalement au niveau de la mer et s'exprime par le rapport noté m_h :

$$m_h = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I. 1})$$

En considérant la figure (I.4) ci-dessous, où l'atmosphère est une couche d'épaisseur constante et au sol supposé horizontal [18], on a :

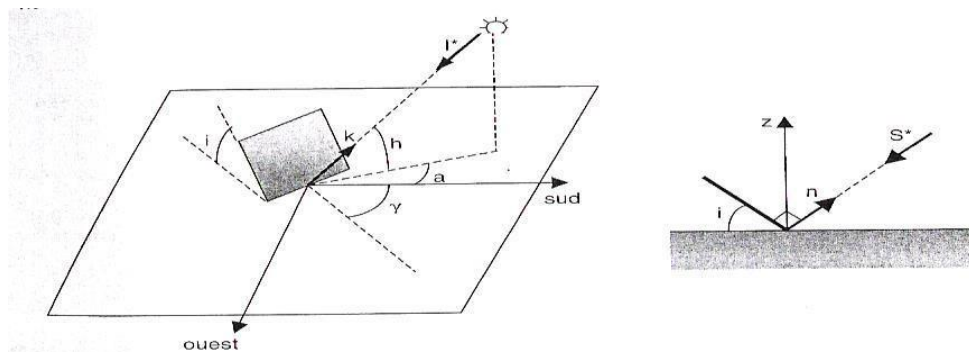


Figure I.4 Influence de la courbure du globe terrestre sur le trajet parcouru par le rayonnement solaire[1].

I.5.2-Structure de l'atmosphère

I.5.2.1. La composition de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre possède une composition relativement stable dans ses trois premières couches, comprenant principalement :

- 78% d'azote
- 21% d'oxygène
- 0,9% d'argon
- 0,03% de dioxyde de carbone (CO₂)
- Ainsi que de faibles quantités d'autres gaz.

La troposphère contient une certaine quantité de vapeur d'eau, tandis que la stratosphère renferme une fine couche d'ozone, essentielle pour absorber les rayons ultraviolets les plus nocifs [19].

I.5.2.2 Régions atmosphériques

L'atmosphère terrestre est composée de plusieurs couches, chacune se distinguant notamment par son profil thermique vertical (ou variation de température avec l'altitude). Cela signifie que la température de l'air peut augmenter, diminuer ou rester stable en fonction de l'altitude. À partir de la surface terrestre, on identifie plusieurs couches :

- **La Troposphère**

La troposphère est la couche inférieure de l'atmosphère, s'étendant jusqu'à environ 10 km d'altitude (atteignant 7 km aux pôles et 15 km dans les régions équatoriales). Elle contient 80% de la masse totale de l'atmosphère et constitue la zone où se produisent la plupart des phénomènes météorologiques et des réactions chimiques. Elle renferme également de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, des particules de poussière et des cristaux de sel, ce qui en fait le siège de la formation des nuages, des précipitations et des orages.

Dans cette couche, la température diminue progressivement à un taux de 5,6 à 6,5°C par kilomètre, tandis que la pression passe de 400 à 100 mb à son extrémité supérieure. Ce phénomène est dû à la détente adiabatique, qui favorise les mouvements de convection de l'air, assurant ainsi un mélange atmosphérique efficace. La troposphère représente environ les trois quarts de la masse totale de l'atmosphère, soit 5×10^{15} tonnes. Quant au temps de renouvellement de l'air dans cette couche, il est estimé à environ 3 ans.

- **La stratosphère**

La stratosphère s'étend jusqu'à environ 50 km d'altitude et contient la majorité de l'ozone atmosphérique. La formation de l'ozone dans cette couche est un processus exothermique, ce qui entraîne une élévation progressive de la température, atteignant son maximum au niveau de la stratopause.

Cette région se caractérise par une stabilité thermique importante, limitant ainsi les mouvements verticaux de l'air et expliquant son organisation en couches horizontales bien distinctes.

Les circulations atmosphériques y sont essentiellement horizontales. En raison de l'absence de nuages et de précipitations, les particules en suspension dans la stratosphère y restent durant de très longues périodes.

- **la mésosphère**

Elle est située juste au-dessus de la stratosphère, où la température diminue à nouveau avec l'altitude, atteignant environ -80 degrés Celsius à une altitude de 80 kilomètres. Lorsque les météores et les particules provenant de l'espace pénètrent dans la mésosphère, ils brûlent en raison de la friction avec l'air [20].

- **la thermosphère**

Cette couche se situe au sommet de l'atmosphère et sa température est influencée par l'absorption des rayons ultraviolets intenses et des rayons X du soleil, entraînant des variations significatives en fonction de l'activité solaire et de l'alternance jour-nuit. Elle est également connue sous le nom d'ionosphère ou d'exosphère [21].

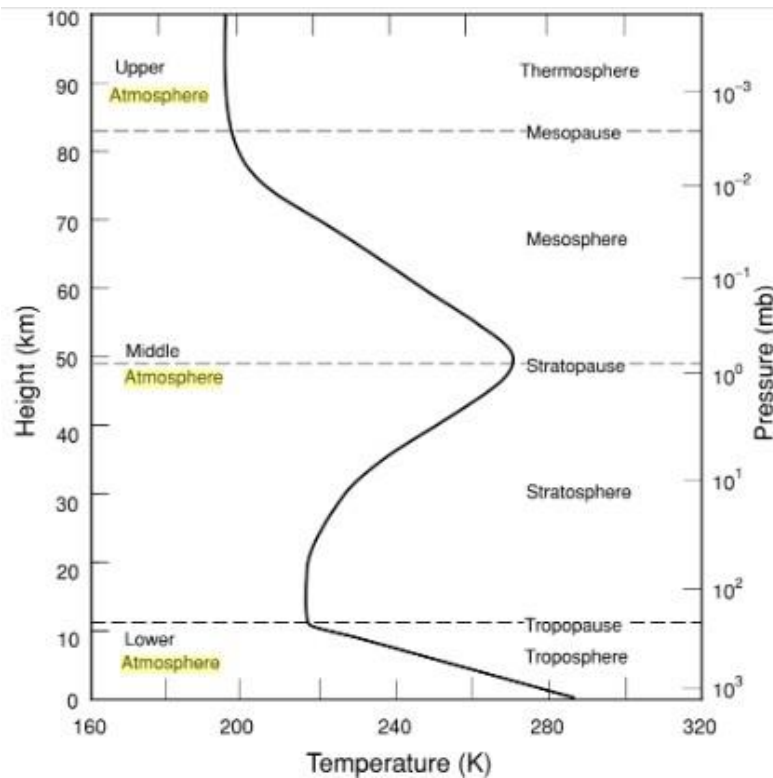


Figure I.5 la structure verticale de l'atmosphère[22] .

I.5.3-Absorption de rayonnement solaire

L'atmosphère modifie le spectre du rayonnement solaire par le biais de deux processus principaux : l'absorption par les différents gaz et la diffusion provoquée par les molécules d'air, les aérosols et les nuages.

a- L'absorption atmosphérique

L'absorption des gaz atmosphériques est sélective, ce qui signifie qu'elle ne concerne que certaines longueurs d'onde spécifiques. Ce phénomène est principalement attribué à la vapeur d'eau (H_2O), à l'ozone (O_3), à l'oxygène (O_2) et au dioxyde de carbone (CO_2).

La vapeur d'eau, qui constitue le deuxième composant le plus abondant après l'air, possède plusieurs bandes d'absorption situées à des longueurs d'onde supérieures à $0,65 \mu m$, avec une bande particulièrement marquée entre $2,4$ et $2,8 \mu m$, où l'absorption atteint son intensité maximale, représentant environ 10 % de l'absorption totale.

L'ozone joue un rôle clé dans l'absorption des rayonnements ultraviolets. Il absorbe fortement les longueurs d'onde inférieures à $0,3 \mu m$ et présente une absorption plus faible dans l'intervalle de $0,45$ à $0,7 \mu m$.

L'oxygène, quant à lui, possède deux bandes d'absorption étroites dans le domaine du visible, situées respectivement à $0,69$ et $0,76 \mu m$. De son côté, le dioxyde de carbone absorbe le rayonnement dans plusieurs bandes distinctes, localisées à $1,46$; $1,60$; $2,04$; $2,75$ et $4,27 \mu m$.
 . [23]

b- La diffusion

La diffusion est un processus par lequel le rayonnement solaire est redistribué dans différentes directions en raison de son interaction avec les molécules gazeuses, les gouttelettes d'eau et les particules en suspension, sans modification de sa longueur d'onde.

Selon la taille des particules responsables de la diffusion par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, on distingue deux principaux types de diffusion :

- **La diffusion de Rayleigh**, qui affecte principalement les molécules de gaz et influence les courtes longueurs d'onde, expliquant ainsi la couleur bleue du ciel.
- **La diffusion de Mie**, causée par des particules plus grandes comme les aérosols et les gouttelettes d'eau, influençant les grandes longueurs d'onde et contribuant à l'apparition d'un ciel plus blanchâtre ou brumeux.

I.5.4- Distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère

Les radiations solaires arrivant au sommet de l'atmosphère sous forme d'ondes électromagnétiques se répartissent premièrement en deux parties : L'une (R_a) est directement réfléchie vers l'espace avant de s'enfoncer dans l'atmosphère. L'autre partie (R_d) , en pénétrant dans l'atmosphère subit des réflexions et des diffractions pour être à son tour, soit renvoyée vers l'espace (R_a) soit dirigée vers la terre (D) [24].

Dans l'atmosphère, la vapeur d'eau et de multiples gaz absorbent de façon très irrégulière.

Certaines radiations caractérisées par leurs longueurs d'ondes, les radiations (R_A) absorbées par les composantes de l'atmosphère sont ensuite émises dans toutes les directions.

Il en résulte que parmi les radiations solaires parvenant finalement au sol. Une fois ces radiations arrivées au sol, une fraction est réfléchie directement vers le ciel (A) , l'autre est gagnée par la terre, pour être à son tour émise par le sol sous forme de chaleur latente et chaleur sensible [24] :

$$R_n = F_l + R_s$$

Où : F_l est la chaleur latente. R_s est la chaleur sensible.

La figure I.6.ci-dessous présente la distribution du rayonnement solaire par R_f est le rayonnement diffusé vers le sol R_f est le rayonnement diffusé vers le sol.

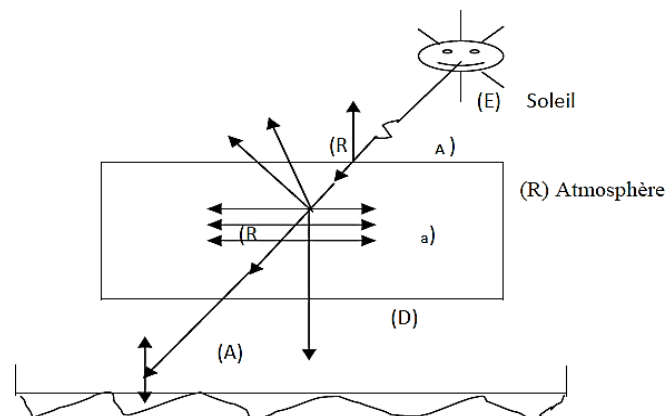


Figure 1.6 Distribution de rayonnement solaire par l'atmosphère [25].

I.6. Rayonnement solaire

I.6.1-Définition

Le rayonnement solaire est la principale source d'énergie thermique à la surface de la Terre. Il arrive sous forme d'ondes électromagnétiques et est mesuré en unités appelées calories.

Les rayons du soleil atteignent la Terre après avoir traversé l'atmosphère terrestre, qui en absorbe une partie avant qu'ils ne nous parviennent. Les différents gaz présents dans l'atmosphère, tels que l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, possèdent des capacités d'absorption variées des rayons solaires.

Le calcul du rayonnement solaire incident sur les surfaces extérieures, comme celles des bâtiments et autres structures, est d'une importance majeure, notamment pour les calculs liés à la climatisation. Par exemple, pendant la saison de refroidissement, le rayonnement solaire influence les calculs de la charge de refroidissement, car il intervient dans le calcul de la température de l'air solaire. Cette température est essentielle pour estimer les gains thermiques par conduction à travers les surfaces extérieures, ainsi que pour évaluer le gain thermique solaire direct à travers les fenêtres et les ouvertures vitrées.

En revanche, pendant la saison de chauffage, les méthodes de calcul modernes prennent en compte l'effet du rayonnement solaire comme un apport thermique contribuant à la réduction de la charge de chauffage. Cela est intégré dans des approches telles que la méthode à base fixe et la méthode à base variable.[26]

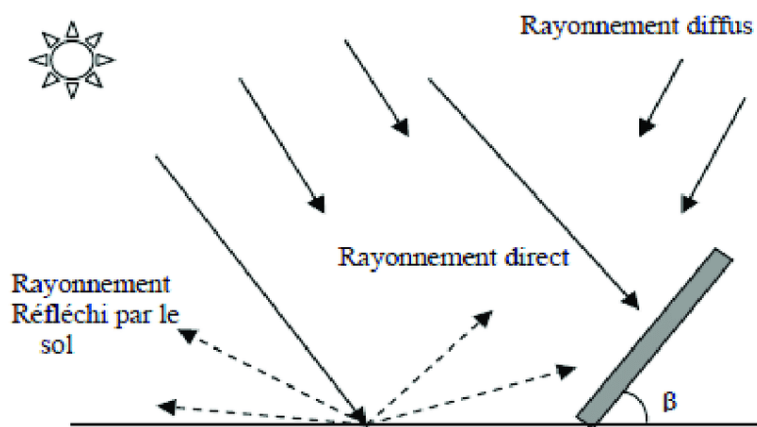


Figure I.7 Rayonnement solaire [1].

I.6.2-Types de rayonnement solaire

I.6.2.1-Le rayonnement solaire direct

Elle correspond au rayonnement solaire direct qui atteint la surface terrestre et dont l'intensité est plus élevée en été lorsque le ciel est dégagé. Il est défini comme le flux d'irradiation solaire par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires à l'intérieur de l'atmosphère [27]

On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion, il se diffère de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en

particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Sa mesure s'effectue à l'aide d'un pyrhéliomètre (figure (I.8)), appareil dont la surface sensible est toujours disposée perpendiculairement aux rayons solaires [28] [29].



Figure I.8 pyrhéliomètre [28].

I.6.2.2-Le rayonnement solaire diffuse

Le rayonnement solaire diffus est une composante du rayonnement global qui résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct dans l'espace en raison de la présence de nuages, de gouttelettes d'eau, de gaz et de particules en suspension dans l'atmosphère terrestre. Sa proportion augmente en hiver lorsque les nuages sont plus nombreux, représentant ainsi la majeure partie du rayonnement total. Ce rayonnement se caractérise par sa diffusion dans la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, en raison de la dispersion des rayons solaires par les particules solides ou liquides présentes dans l'air. Pour mesurer ce rayonnement, on utilise un pyranomètre équipé d'un pare-soleil métallique qui masque le disque solaire, permettant ainsi une mesure précise du rayonnement diffus uniquement, (figure I.9) [28] .



Figure I.9 Pyranomètre muni d'une bande pare-soleil [28].

I.6.2.3-Le rayonnement solaire réfléchi

Il est défini comme la partie réfléchi par le sol. L'albédo du système Terre atmosphère est défini comme la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont les nuages, les surfaces de neige et de glace. On peut citer par exemple l'albédo de la neige fraîche qui est de 0,87, ce qui signifie 87% de l'énergie solaire est réfléchi par ce type de neige. Un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde sans n'en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un

miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1. [30]

Il est mesuré à l'aide d'un albédomètre ou d'un pyranomètre, qui sont des instruments permettant de quantifier la quantité de rayonnement solaire réfléchi par rapport au rayonnement incident. Ces mesures sont essentielles pour permettre une meilleure compréhension des effets de la réflexion du rayonnement solaire sur l'espace et le climat terrestre.(figure I.10)



Figure I.10 Albédomètre [28].

I.6.2.4-Le rayonnement solaire global

Le rayonnement résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct dans l'espace en raison des nuages, des gouttelettes d'eau et des gaz dans l'atmosphère. Son pourcentage augmente en hiver lorsque les nuages sont abondants, constituant ainsi la majeure partie du rayonnement total [31].

Le rayonnement est diffusé par les molécules d'air et les particules en suspension dans l'atmosphère, représentant ainsi le rayonnement global à l'exception de sa composante directe. Il est également défini comme le rayonnement reçu sur une surface horizontale, provenant du soleil et de l'ensemble de la voûte céleste. Il est mesuré à l'aide d'un pyranomètre. (figure I.11)



Figure I.11 Pyranomètre (modèle SR11) [28].

I.6.3- Gisement solaire

I.6.3.1- Gisement solaire dans le monde

La situation géographique de notre planète nous montre un gisement solaire très élevé ce qui nous pousse à faire penser à l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable et facile à l'exploiter pour produire de l'électricité.

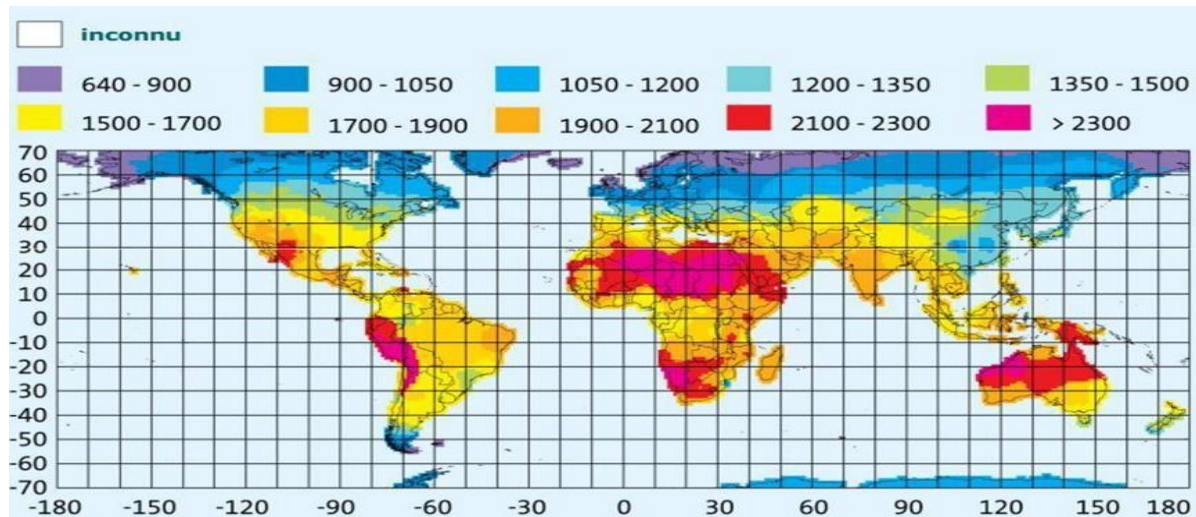


Figure I.12 Ensoleillement moyen annuel dans le monde [32].

I.6.3.2- Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée, il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [33].

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique [34]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde comme le montre la figure (I.13)

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 kwh/m²/an au Sud du pays, ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [35]

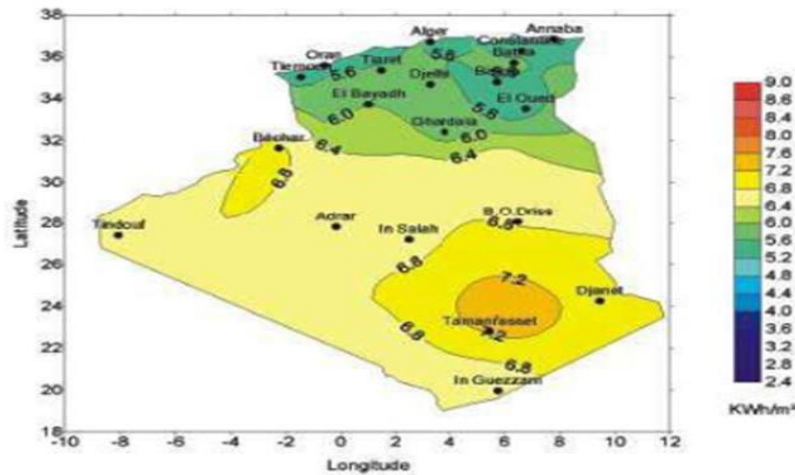


Figure I.13 Moyenne annuelle de l’irradiation solaire en Algérie [35].

Suite à une évaluation par satellites, l’Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l’Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169,000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire Algérien est l’équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi Rmel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien est représentée dans le tableau (I,2) selon l’ensoleillement reçu annuellement [36].

Tableau I.2: Gisement solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenn d’ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.7 Activité solaire

Le soleil est une étoile variable magnétique qui fluctue sur des échelles de temps allant d'une fraction de seconde à des milliards d'années. Les éruptions solaires, les éjections de masse coronale, le vent solaire à grande vitesse et les particules énergétiques solaires sont toutes des formes d'activité solaire. Toute l'activité solaire est entraînée par le champ magnétique solaire qui se manifeste à la surface solaire. Elle est caractérisée par le cycle solaire (Une répétition de l’activité solaire périodique). Un cycle d’activité solaire dure 11 ans (Figure 1.14) alors que le cycle magnétique dure 22ans

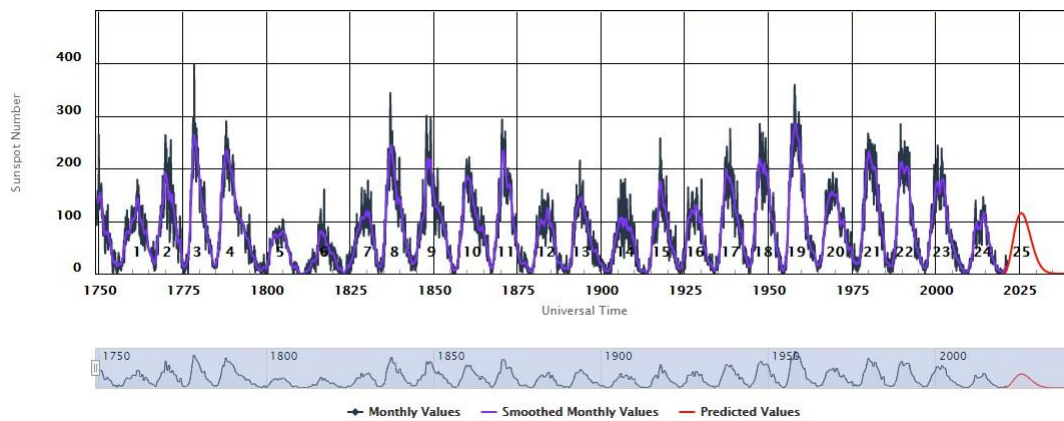


Figure 1.14: Variation du nombre de taches solaires observées à la surface du Soleil en fonction du temps[37].

Le Soleil étant une boule de gaz et de plasma à température extrêmement élevée, remplie de particules chargées tel que les électrons et les ions. C'est avec le déplacement de ces particules chargées qu'est née le champ magnétique solaire.

Le champ magnétique solaire est majoritairement responsable de l'activité solaire, car toutes les structures que l'on peut observer à la surface du Soleil sont dues à cette activité (taches solaires protubérance trois...). Il existe une mesure appelée Soleil calme (quiet sun) qui est la mesure du champ magnétique solaire sans qu'aucune activité ne s'y passe, lors de période d'activité élevée on compare le champ magnétique par rapport au Soleil dit calme, la formation de taches solaires résulte du blocage des zones de convection par le champ magnétique qui génère une température moins élevée que celle de la surface du Soleil, et donc par rapport de contraste on peut observer les taches solaires comme étant plus sombre que la surface du Soleil car la température y est inférieure au niveau de la photosphère tandis qu'au niveau de la couronne et à des altitudes plus haute la configuration des lignes de champ peut devenir instable créant ainsi des reconnexion magnétique violente, qui sont à l'origine de phénomènes tels que les éruptions solaires et les CMEs.

L'activité solaire est modulée par le cycle solaire d'une période de 11 ans. Cette activité se manifeste visiblement sous la forme de taches solaires, éruptions et éjections de masse coronale [38].

1.7.1 Les taches solaires

Le Soleil tourne autour de son axe à des vitesses variables, effectuant une rotation plus rapide à l'équateur (environ 25 jours) qu'aux pôles (environ 35 jours). Le mouvement des particules chargées, telles que les protons, les électrons et les atomes ionisés, génère un champ magnétique intense, à l'origine de l'apparition des taches solaires (Fig. I.15).

Une tache solaire est une région sombre à la surface du Soleil, où le champ magnétique est particulièrement intense et orienté verticalement. Elle est entourée d'une zone plus claire où le champ magnétique est plutôt horizontal. Les taches solaires sont moins chaudes que leur environnement immédiat et présentent une forte activité magnétique, pouvant atteindre environ 0,3 Tesla. [39]

Ces taches, facilement observables, apparaissent par paires de polarité opposée dans la photosphère. Elles résultent de structures magnétiques alignées le long des latitudes solaires.

La durée de vie moyenne d'une tache solaire varie de quelques jours à environ deux semaines. Les mesures effectuées montrent que le cycle solaire principal dure entre 9 et 13 ans, avec une moyenne statistique d'environ 11,2 ans. Chaque cycle comporte une phase d'activité maximale suivie d'une phase minimale. L'observation des taches solaires constitue un outil essentiel pour surveiller l'activité solaire et anticiper ses effets sur la Terre.

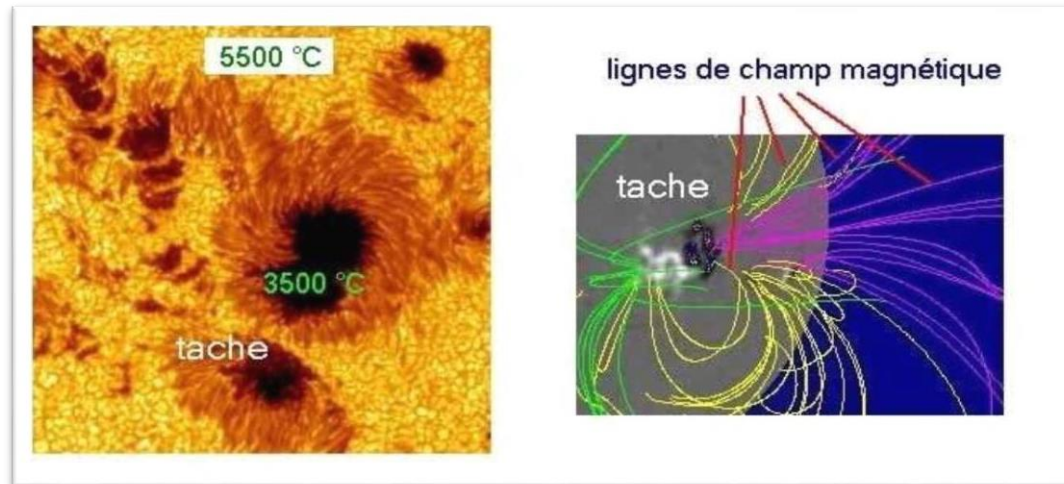


Figure I.15 Les taches solaires [39]

1.7.2 Les éruptions solaires (Flares)

Les éruptions solaires sont l'une des principales causes des tempêtes solaires, jouant un rôle essentiel dans l'activité du cycle solaire. Leur fréquence et leurs variations déterminent la durée de ce cycle, qui est d'environ 11 ans.

Elles surviennent généralement à la suite d'une reconnexion magnétique, un phénomène résultant de l'interaction entre deux champs magnétiques de polarité opposée. Ce processus libère l'énergie magnétique accumulée, provoquant une éruption solaire qui émet de l'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques, tels que les rayons X, la lumière visible et les ondes radio (voir Figure 1.16).

Une éruption solaire est souvent précédée par une protubérance locale et évolue à travers plusieurs étapes, chacune pouvant durer de quelques secondes à plusieurs heures. L'énergie totale libérée lors d'une éruption est estimée à environ 10^{26} joules, avec des températures pouvant atteindre 25 millions de degrés, entraînant l'ionisation du fer jusqu'à vingt-cinq fois.

Pour faciliter leur identification lors des observations, les éruptions solaires sont classées en fonction de l'intensité maximale de leur flux énergétique dans le spectre des rayons X, comme indiqué dans le tableau 1.3 [40].

Tableau 1.3 Classification des flares selon la valeur du pic du Flux X entre 0.1 et 0.8 nm
Source : GOES

Classe des flares	Gamme de flux 0.1-0.8 nm (Peak) [W / m ²]
A	$10^{-8} - 10^{-7}$
B	$10^{-7} - 10^{-6}$
C	$10^{-6} - 10^{-5}$
M	$10^{-5} - 10^{-4}$
X	$>10^{-4}$

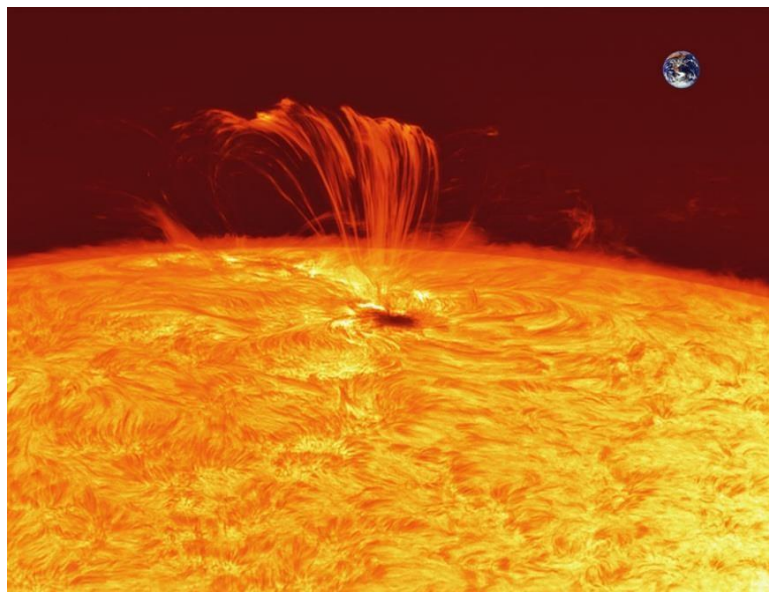


Figure 1.16 Image représentant un Flare source [40].

I.8- l'énergie solaire

I.8.1-Définition

L'énergie solaire est la plus prépondérante parmi toutes les sources d'énergies renouvelables et constitue l'origine principale de la majorité des formes d'énergie exploitées par l'homme. Son utilisation à travers des capteurs repose sur deux technologies distinctes : l'énergie solaire thermique, qui génère de la chaleur, et l'énergie photovoltaïque, qui permet de produire de l'électricité [41].

I.8.2-Différents types de l'énergie solaire

L'énergie solaire se divise en trois catégories principales : l'énergie solaire photovoltaïque, qui convertit la lumière du soleil en électricité, l'énergie solaire thermique, qui exploite la chaleur du soleil pour produire de l'énergie, et l'énergie solaire thermodynamique, qui utilise des technologies avancées pour transformer la chaleur en énergie utile. Ces types illustrent l'importance d'exploiter les rayons du soleil comme source d'énergie renouvelable de manière diversifiée et efficace

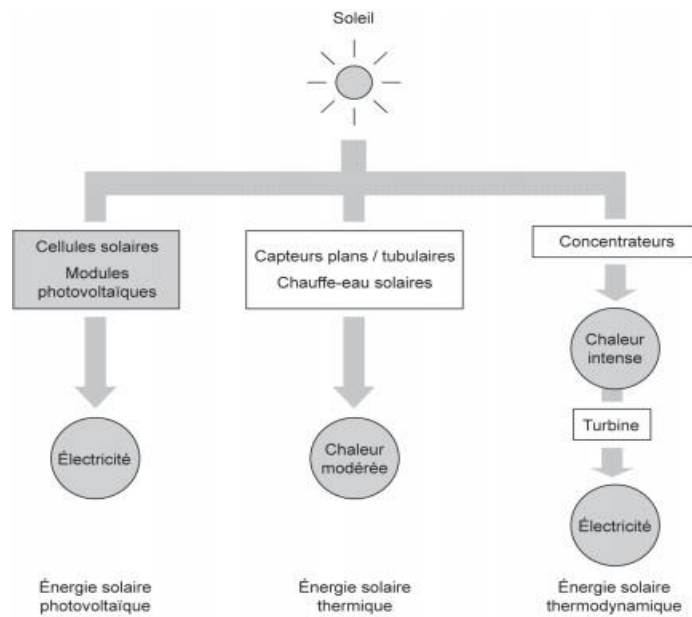


Figure 1.17 Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire [42].

I.8.2.1-L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque exploite l'énergie contenue dans les rayonnements du soleil pour produire de l'électricité. Ainsi, les panneaux photovoltaïques, qui collectent cette énergie, sont généralement installés sur les toits en position optimale pour maximiser leur exposition aux rayonnements solaires. Leur objectif est de capter un maximum de photons, lesquels, en traversant les couches semi-conductrices chargées positivement ou négativement, génèrent une tension électrique. Un circuit, reliant une borne positive et une borne négative – de manière similaire à une pile – permet de récupérer et d'exploiter cette énergie.

De plus, les avancées technologiques récentes ont permis d'augmenter l'efficacité de ces systèmes tout en réduisant leur coût de production, rendant cette technologie de plus en plus accessible. Les innovations dans les matériaux et les techniques de fabrication contribuent également à améliorer la durabilité des panneaux et à faciliter leur intégration dans les réseaux électriques modernes, participant ainsi activement à la transition énergétique et à la réduction de l'empreinte carbone. Ces développements ouvrent la voie à une exploitation encore plus large de l'énergie solaire, offrant une alternative propre et renouvelable aux sources d'énergie traditionnelles [43].



Figure 1.18 Station photovoltaïque [43].

1.8.2.2-L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique constitue l'une des principales formes d'exploitation du rayonnement solaire. Elle consiste à convertir l'énergie rayonnante provenant du soleil en énergie thermique, utilisée pour chauffer des fluides (liquides ou gaz). Cette énergie thermique peut ensuite être utilisée dans diverses applications, soit de manière directe – comme la production d'eau chaude à usage domestique ou industriel, ou pour le chauffage –, soit de manière indirecte, notamment pour la production de vapeur servant à entraîner des turbines génératrices d'électricité, ou dans des systèmes de refroidissement par absorption [44].

Cette forme d'énergie fait partie des énergies renouvelables, dans la mesure où elle exploite la chaleur issue du rayonnement solaire, contrairement à l'énergie solaire photovoltaïque qui repose sur l'effet photoélectrique. L'instrument principal de cette conversion est le capteur solaire (*collecteur solaire*), qui repose sur des principes physiques fondamentaux tels que l'absorption thermique et la conduction, permettant le transfert de chaleur entre la surface du capteur et le fluide caloporteur [45].

Dans les systèmes à concentration élevée, comme les centrales solaires thermodynamiques ou les fours solaires, le phénomène de réflexion joue un rôle crucial. Des miroirs ou lentilles sont utilisés pour concentrer les rayons solaires en un point focal, permettant d'atteindre des températures très élevées, dépassant parfois les 1000 °C dans certaines applications [46].

Bien que le développement de ce secteur ait connu un ralentissement depuis 2009, l'énergie solaire thermique demeure un pilier essentiel dans les stratégies de transition énergétique de nombreux pays. Selon les statistiques, la Chine représente à elle seule environ 71 % de la capacité installée mondiale en capteurs solaires, mais elle est dépassée en termes de capacité installée par habitant par plusieurs pays européens et océaniques, tels que l'Autriche, la Grèce et l'Australie [47].



Figure 1.19 Panneaux solaire thermique [47].

1.8.2.3- L'énergie solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique repose sur le principe de la concentration du rayonnement solaire afin de produire de la chaleur à haute température, qui sera ensuite transformée en énergie mécanique, puis en électricité. Cette technologie est mise en œuvre dans des centrales solaires à concentration, qui utilisent un agencement complexe de miroirs (héliostats, paraboles ou cylindres paraboliques selon les configurations) afin de focaliser le rayonnement solaire direct sur un récepteur thermique.

Ce récepteur contient un fluide caloporteur, généralement une huile thermique, un sel fondu ou de la vapeur d'eau, capable de supporter des températures élevées sans se dégrader. À travers ce procédé, l'énergie solaire captée est convertie en chaleur intense, atteignant des températures comprises entre 250 °C et 800 °C, en fonction de la technologie employée (type de concentrateur, fluide utilisé, pression, etc.).

La chaleur ainsi générée est ensuite utilisée pour alimenter un cycle thermodynamique, similaire à celui des centrales classiques, où un *turbo-alternateur* transforme l'énergie thermique en énergie électrique. Ce procédé permet non seulement de produire de l'électricité de manière durable, mais aussi de stocker la chaleur dans des matériaux spécifiques (comme les sels fondus), offrant ainsi la possibilité de générer de l'électricité même en l'absence d'ensoleillement direct [48].



Figure 1.20 Le solaire thermodynamique nécessite de grandes surfaces [48].

I.9-Conclusion

Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre, située à environ 150 millions de kilomètres. Il possède une masse immense qui représente la quasi-totalité de celle du système solaire. Il est composé de plusieurs couches, à commencer par le cœur, où l'énergie est produite, suivi de la zone radiative, puis de la zone convective. Ensuite vient la photosphère, qui émet la lumière visible, puis la chromosphère, et enfin la couronne, qui est la couche externe.

L'énergie solaire désigne le rayonnement émis par le Soleil et capté par la Terre. Elle fait partie des énergies renouvelables, car elle est disponible en permanence et inépuisable. Elle est aussi qualifiée de propre, car elle n'émet pas directement de gaz à effet de serre comme le CO₂. Grâce à des technologies spécifiques, comme les panneaux solaires, cette énergie peut être transformée en électricité ou utilisée pour produire de la chaleur au service des besoins humains.

Chapitre II

II.1. Introduction

La position du Soleil dans le ciel varie continuellement en raison de la rotation de la Terre sur elle-même d'une part, et de son mouvement annuel autour du Soleil d'autre part. Ce changement dépend principalement du temps et de la localisation géographique du point d'observation. En raison de la rotation quotidienne de la Terre, le Soleil semble se déplacer d'est en ouest selon un trajet appelé mouvement diurne apparent, dont la forme dépend de la latitude géographique de l'observateur.

Au midi solaire, le Soleil atteint son point le plus haut dans le ciel, en passant par le méridien local, tandis qu'il reste proche de l'horizon au lever et au coucher. Au cours de l'année, la hauteur du Soleil dans le ciel change en raison de l'inclinaison de l'axe terrestre et de la révolution terrestre autour du Soleil : il est plus bas dans le ciel lors du solstice d'hiver et plus élevé lors du solstice d'été.

La connaissance précise de la position du Soleil dans le ciel est essentielle dans plusieurs domaines comme l'astronomie, la navigation, l'énergie solaire, la météorologie, la climatologie ainsi que dans la conception d'instruments comme les cadrans solaires.

Dans ce chapitre, nous présenterons un ensemble de relations et de formules astronomiques permettant de calculer la position du Soleil dans le ciel, pour n'importe quel endroit sur Terre et à tout.

II.2. Mouvement de la terre autour du soleil

La Terre tourne autour du Soleil dans une orbite elliptique presque circulaire, complétant un tour en environ 365,25 jours (comme montré dans la figure I.21). Le plan de cette orbite est appelé le plan de l'écliptique, qui représente le chemin suivi par la Terre autour du Soleil. Lors du solstice d'hiver (21 décembre), la Terre est à son point le plus proche du Soleil, à une distance de 147 millions de kilomètres. En revanche, lors du solstice d'été (21 juin), la Terre est à son point le plus éloigné du Soleil, avec une distance de 152 millions de kilomètres. La distance moyenne entre la Terre et le Soleil est d'environ 149,5 millions de kilomètres, utilisée couramment dans les calculs astronomiques[1].

La Terre coupe l'axe mineur de son orbite à deux points importants : l'équinoxe de printemps (21 mars) et l'équinoxe d'automne (21 septembre), lorsque les rayons du Soleil sont répartis de manière égale entre les deux hémisphères. De plus, la Terre effectue une rotation sur son axe toutes les 24 heures, provoquant l'alternance entre le jour et la nuit. L'axe de rotation de la Terre (qui passe par les pôles Nord et Sud) conserve une orientation fixe dans l'espace tout au long de l'année et forme un angle δ avec la normale du plan de l'écliptique, entraînant des variations saisonnières de l'exposition de la Terre à la lumière du Soleil.

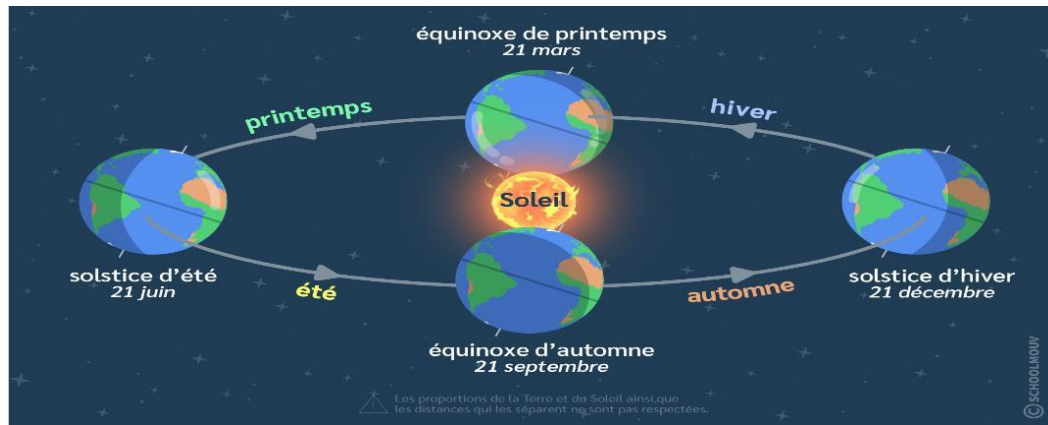


Figure II.1 Mouvement de la terre autour du Soleil

II.3. Coordonnées géographiques

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes [2]:

II.3.1. La longitude

La longitude est l'une des coordonnées géographiques fondamentales utilisées pour déterminer la position d'un point selon sa direction est ou ouest à la surface de la Terre (ou d'une autre planète). Elle est mesurée comme un angle par rapport au méridien de référence, connu sous le nom de méridien de Greenwich, qui traverse la ville de Greenwich en Angleterre et constitue la norme mondiale pour le calcul des longitudes.

La longitude est généralement représentée par la lettre L, et sa valeur s'étend de -180 degrés (vers l'ouest) à +180 degrés (vers l'est). Ce système divise le globe terrestre en deux hémisphères : est et ouest. Les longitudes sont essentielles dans les systèmes de navigation, la géolocalisation (GPS), et servent également au calcul de l'heure locale en fonction des différences de fuseaux horaires entre les régions[3].

II.3.2 La latitude

La latitude est l'une des coordonnées géographiques fondamentales utilisées pour déterminer la position géographique d'un point donné à la surface de la Terre ou de toute autre planète. Elle s'exprime par une valeur angulaire mesurant la distance entre le point considéré et l'équateur, qui constitue le plan de référence principal divisant la Terre en hémisphère nord et hémisphère sud.

La latitude est mesurée en degrés angulaires, allant de 0 degré à l'équateur, jusqu'à +90 degrés au pôle Nord, et -90 degrés au pôle Sud. Ces valeurs permettent de situer précisément un point par rapport à l'équateur, contribuant ainsi à la classification des zones géographiques en régions tropicales, tempérées ou polaires, selon leur position sur le réseau des parallèles[4].

La latitude joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines, notamment la géographie, la navigation aérienne et maritime, ainsi que la météorologie. Elle est utilisée pour analyser le climat, répartir les températures, et comprendre divers phénomènes naturels liés aux saisons, à la durée du jour et de la nuit, ou encore à l'ensoleillement des régions.

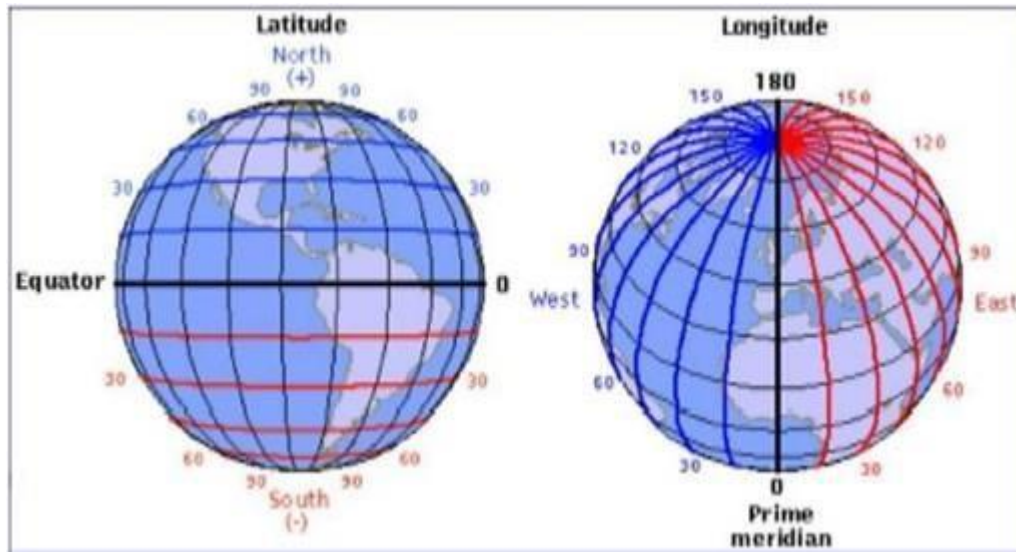


Figure II.2 Schéma descriptif pour les angles Latitude et Longitude de la Terre[5]

II.4. Coordonnées horaires

Le système de coordonnées équatoriales est un référentiel indépendant de la position de l'observateur à la surface de la Terre, mais il dépend directement de l'heure de l'observation. La position du Soleil dans ce système est définie à l'aide de deux angles fondamentaux[2]:

II.4.1 Déclinaison solaire

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre $(-23^{\circ},27')$ (Au solstice d'hiver) et $(+23^{\circ},27')$, (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne. Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur, de demi angle au sommet = 90°

L'angle sera donc fonction du jour de l'année [2].

$$\delta = 23,45 \sin[0,980(N + 284)] \quad (\text{II. 1})$$

Où N est le nombre de jours de l'année compté à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

Année civile : 365 jours

Année bissextile : 366 jours.

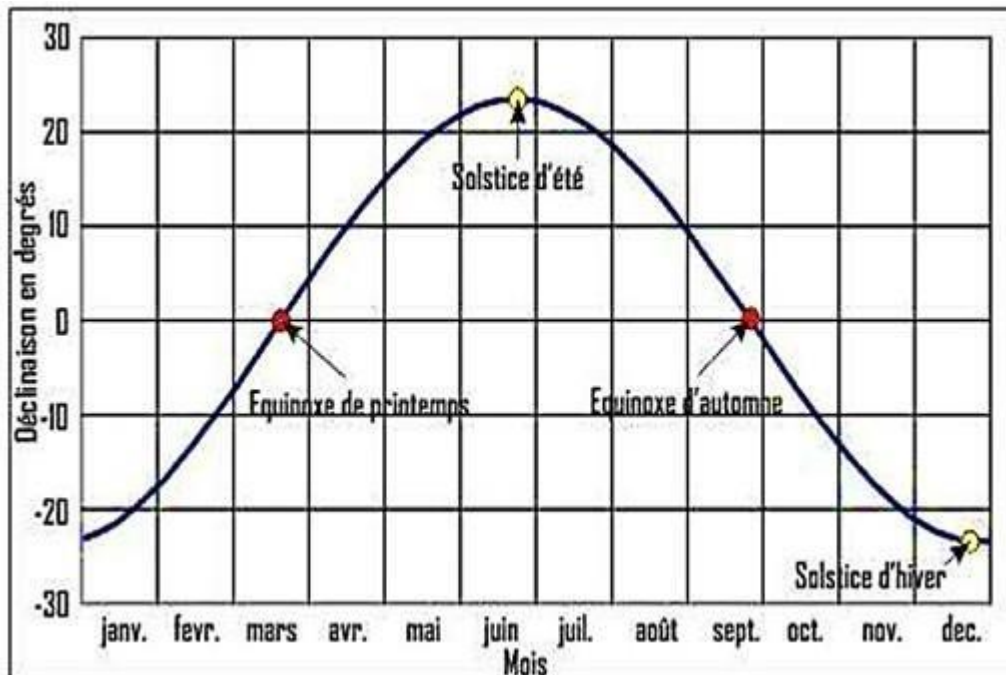


Figure II.3. La déclinaison du soleil en fonction des jours [5]

δ : varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_0 < \delta < +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23.45^\circ$.

$\delta=0$ aux équinoxes (E.P, E.A) /Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, l'équinoxe automnal, le 23 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxe printanier le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour.

$\delta=23.45^\circ$: au Solstice d'été (S.E) (au 21 juin), nous observons que le soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique [6].

- $\delta=-23.45^\circ$: au Solstice d'hiver (S.H) (au 21 décembre).
- $\delta > 0$: aux E.P - S.E- E.A
- $\delta < 0$: aux E.A -S.H- E.P

II.4.2 Angle horaire

L'angle horaire du soleil représente l'angle établi entre le plan méridien de l'emplacement en question et celui qui suit la direction solaire. En prenant le méridien de Greenwich comme référence, l'angle horaire varie de 0° à 360° . L'angle horaire est nul à midi solaire, il devient négatif durant la matinée, positif l'après-midi et s'accroît de 15° par heure [7].

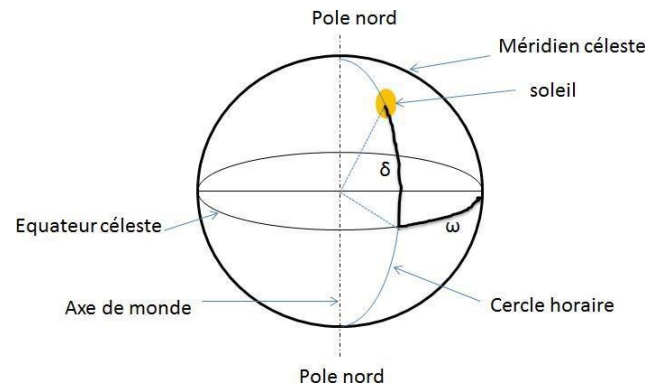


Figure II.4 Coordonnées horaires [8]

II.5. Coordonnées horizontales

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

II.5.1 Hauteur du soleil H

La hauteur du soleil est l'angle formé entre la direction du soleil et le plan horizontal (c'est-à-dire la surface tangente au sol) (figure II.5). Elle est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos m \quad (\text{II. 3})$$

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. Cet angle est mesuré de 0° à 90° vers le zénith, et de 0° à -90° vers le nadir. Le complément de l'angle de hauteur est souvent appelé distance zénithale, ce qui donne : $z + h = 90^\circ$ [9].

La hauteur du soleil varie entre -90° et $+90^\circ$, selon le moment de la journée et la position géographique, comme suit [6] [7]:

- $h = 0$ au lever et au coucher du soleil.
- $h > 0$ pendant la journée.
- $h < 0$ pendant la nuit.

II.4.2. Azimut du soleil (α)

L'azimut solaire est l'angle formé entre le plan du méridien local et le plan vertical passant par le soleil (figure II.5). Il représente l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet (comme le soleil) et une direction de référence, généralement le sud.

L'azimut est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sinh}{\cos h} \quad (\text{II. 4})$$

L'azimut est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest, ce qui donne [2]:

- $z > 0$: vers l'ouest
- $z < 0$: vers l'est
- $z = 0$: en direction du sud.

L'azimut solaire varie entre -180° et $+180^\circ$, et il est mesuré à partir du méridien local [7].

La connaissance de l'azimut est essentielle pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons solaires sur des surfaces non horizontales[6], et il est largement utilisé dans les domaines des énergies renouvelables et de la conception architecturale

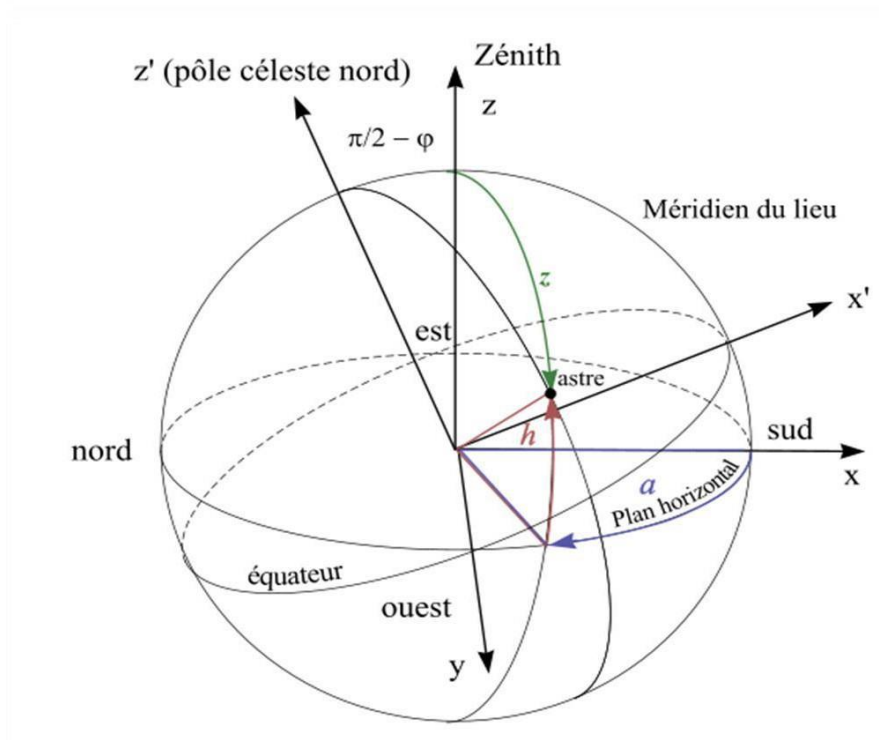


Figure II.5 Schéma des coordonnées horizontales [10]

Conclusion

À un moment précis, la position du Soleil dans le ciel est définie par deux coordonnées principales : la hauteur solaire et l'azimut. Ces coordonnées peuvent être déterminées à l'aide de formules mathématiques prenant en compte la date, l'heure et la position géographique de l'observateur.

En réalité, la hauteur du Soleil correspond à l'angle formé entre le Soleil et le plan horizontal de l'endroit considéré. Cet angle est nul au lever et au coucher du Soleil, et atteint sa valeur maximale à midi solaire, lorsque le Soleil culmine dans le ciel. Quant à l'azimut solaire, il s'agit de l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du sud (dans l'hémisphère nord) ou du nord (dans l'hémisphère sud), jusqu'à la projection sur le plan horizontal local de la ligne reliant la Terre au Soleil.

Chapitre III

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, une étude détaillée de la trajectoire solaire dans le ciel de la wilaya de Relizane sera présentée. Elle se fera à travers le calcul des coordonnées temporelles comprenant la déclinaison solaire (δ) et l'angle horaire (ω), ainsi que des coordonnées horizontales telles que la hauteur du soleil (h) et l'azimut du soleil (Az).

Ces calculs sont essentiels pour comprendre le comportement quotidien et annuel du rayonnement solaire, permettant ainsi une conception optimale des systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, que ce soit dans le domaine du bâtiment ou de la production énergétique.

Pour atteindre cet objectif, l'utilisation du logiciel MATLAB est prévue afin de réaliser des calculs précis et de tracer les courbes de la trajectoire solaire à partir de formules scientifiques reconnues.

Ces outils permettront d'analyser avec rigueur l'évolution de la position solaire sous le climat spécifique.

III.2 La déclinaison solaire

La déclinaison δ du Soleil est simplement l'angle entre la trajectoire du Soleil et le plan équatorial terrestre. (voir la Figure III.1).

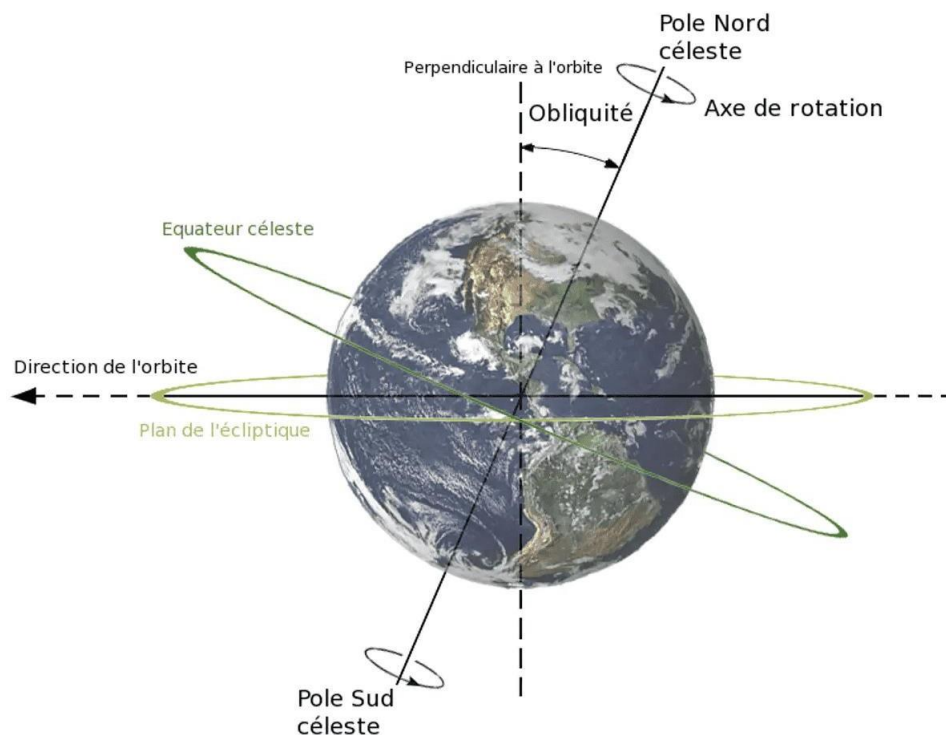


Figure III.1 Déclinaison solaire δ [Web1].

Nous avons suivi l'évolution de la déclinaison solaire tout au long de l'année. Elle est à son niveau le plus bas lors des équinoxes de printemps et d'automne, elle atteint son apogée pendant le solstice d'été et sa valeur minimale durant le solstice d'hiver.

Ces valeurs exceptionnelles correspondant respectivement au 22 mars, au 21 septembre, au 21 juin et au 21 décembre.

Ces positions spécifiques de la Terre dans son orbite (autour du Soleil) sont définies par la localisation du Soleil par rapport à l'équateur terrestre. Les équinoxes se produisent lorsque le Soleil atteint le plan équatorial ($\delta = 0$) ; les solstices ont lieu lorsque le Soleil est à son point le plus élevé ou le plus bas par rapport à l'équateur ($\delta = +23,45$, $\delta = -23,45$, respectivement). Les saisons sont déterminées par la durée qu'il faut à la Terre pour passer d'un équinoxe à un solstice ou vice versa (par exemple, l'été est la période s'étendant du solstice d'été jusqu'à l'équinoxe d'automne).

III.3 Evolution de la durée du jour à Relizane au cours de l'année

Le jour est la période pendant laquelle le soleil est au-dessus de l'horizon, depuis son lever jusqu'à son coucher. Il commence au lever du soleil et se termine à son coucher. Sa durée varie selon la saison et la position géographique. À Relizane, la durée du jour change au cours de l'année, comme l'illustre la figure III.2

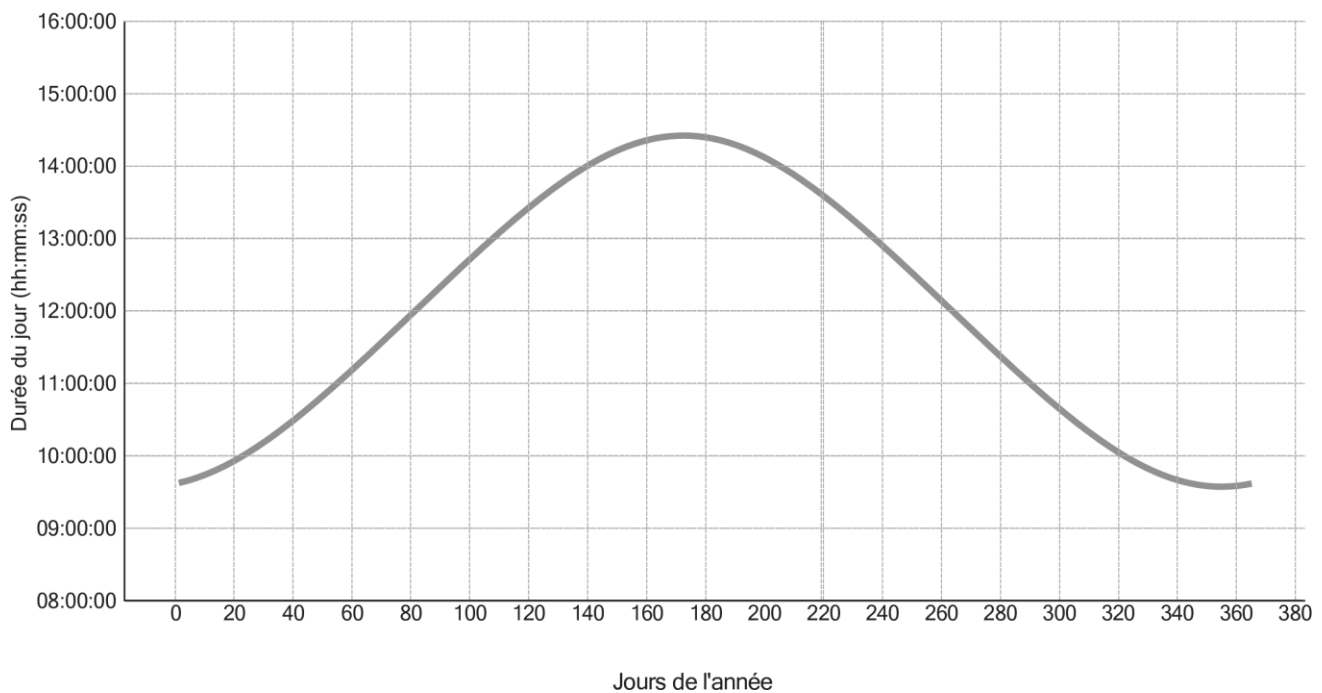


Figure III.2 Evolution de la durée du jour à Relizane au cours de l'année

Le graphique représente l'évolution de la durée du jour dans la ville de Relizane au cours de l'année. La durée a été calculée avec précision en utilisant la latitude locale ($35,73^\circ$ nord) et selon les équations astronomiques qui prennent en compte l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. À travers ce graphique, on observe que le jour le plus court de l'année se situe pendant le solstice d'hiver, précisément vers le 21 décembre, avec une durée d'environ 9 heures, 34 minutes et 43 secondes. En revanche, le jour le plus long de l'année a lieu lors du solstice d'été, autour du 21 juin, avec une durée d'environ 14 heures, 25 minutes et 17 secondes.

Lors des équinoxes de printemps et d'automne (vers le 21 mars et le 23 septembre), la durée du jour est approximativement de 12 heures, ce qui signifie que le jour et la nuit sont quasiment

égaux. Cette variation de la durée du jour est due à l'inclinaison de l'axe terrestre de $23,45^\circ$, ce qui entraîne un changement de l'angle d'incidence des rayons du Soleil sur la surface de la Terre. La durée moyenne annuelle du jour à Relizane est estimée à environ 12 heures, reflétant ainsi un équilibre global entre les saisons.

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

Étant donné que la Terre tourne autour de son axe, le soleil se lève chaque jour à l'est et se couche à l'ouest. Au cours de ce mouvement quotidien, le soleil trace dans le ciel une forme semblable à une cloche (un demi-cercle), atteignant son apogée en un point particulier et ayant deux points les plus bas (voir la figure III.3).

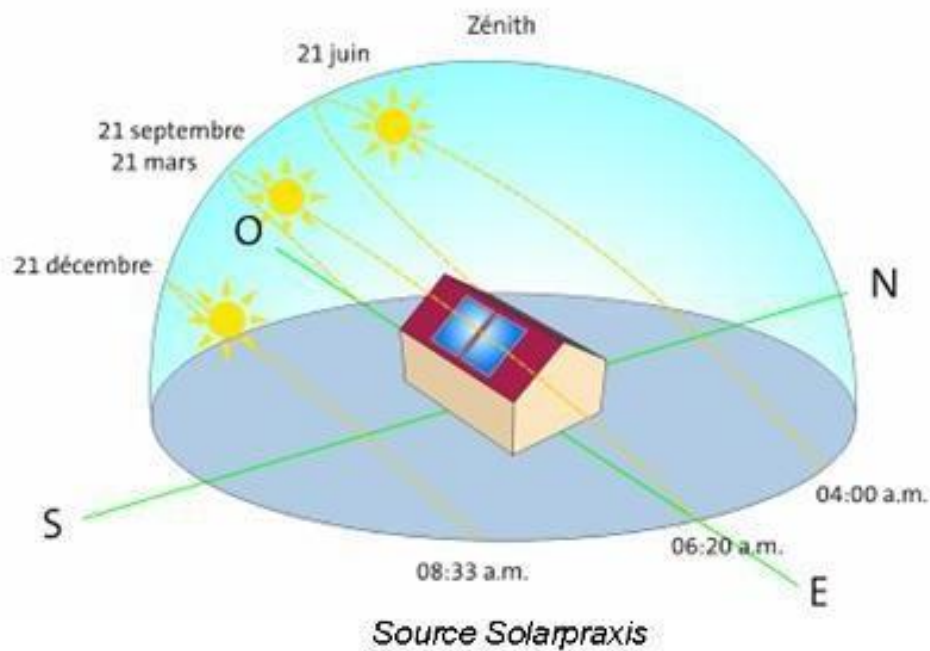


Figure III.3 Trajectoire du soleil au cours de la journée et de l'année [Web2]

Ce trajet peut être décrit par l'altitude du soleil (α), qui est l'angle entre la position du soleil et le plan horizontal du lieu. Cet angle est nul au lever et au coucher du soleil, et atteint son maximum au moment du midi solaire (milieu de la journée solaire) (voir la figure III.3).

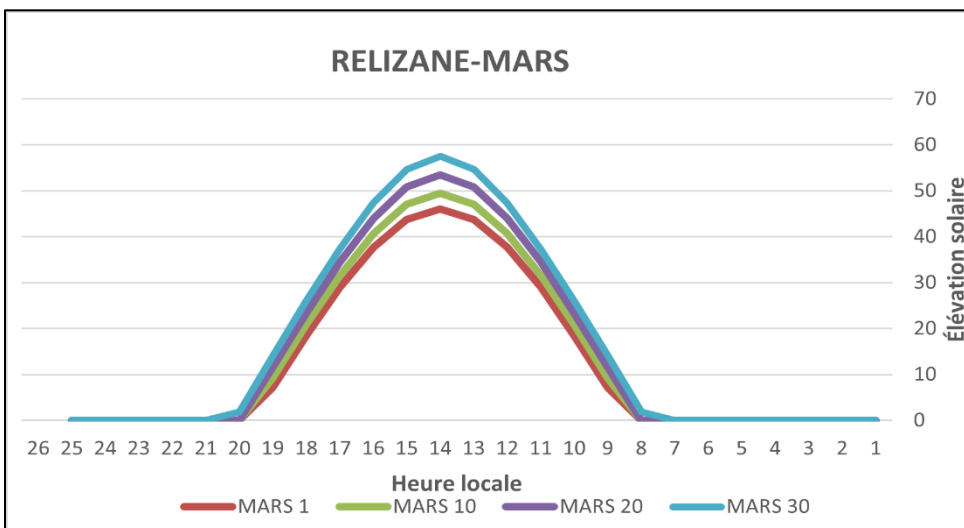
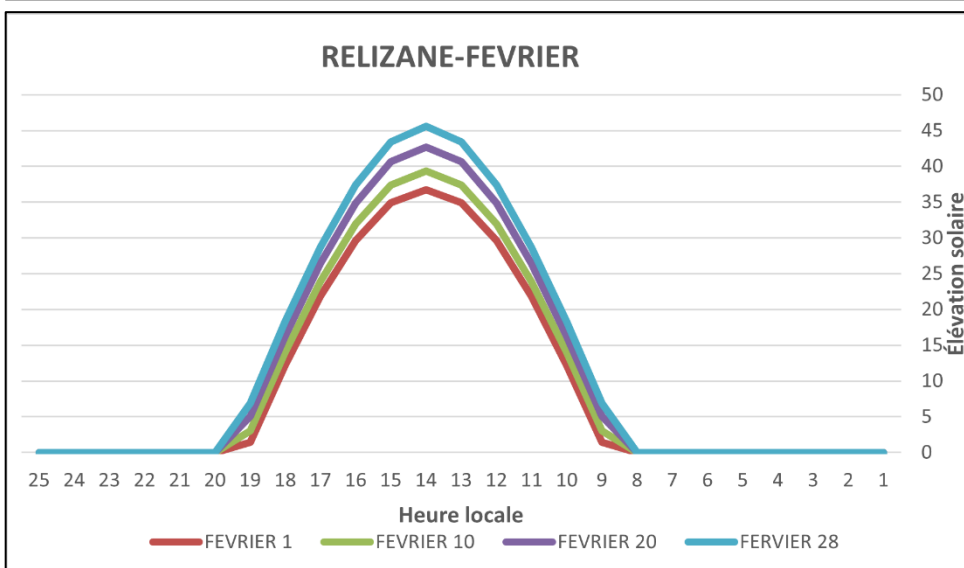
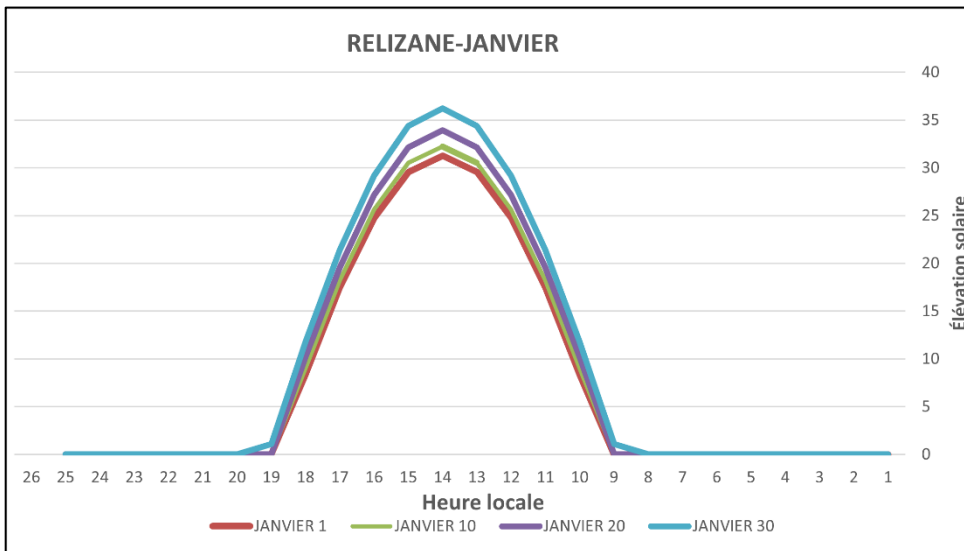
La figure III.4 montre la distribution de l'altitude du soleil (angle d'élévation solaire) au cours de la journée à Relizane, pour les jours 1, 10, 20 et 30 de chaque mois de l'année.

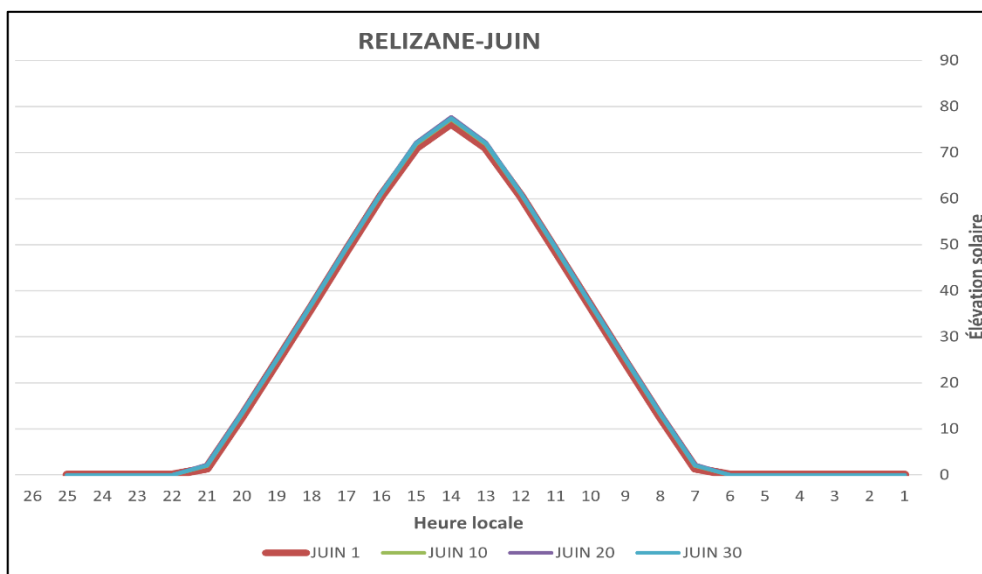
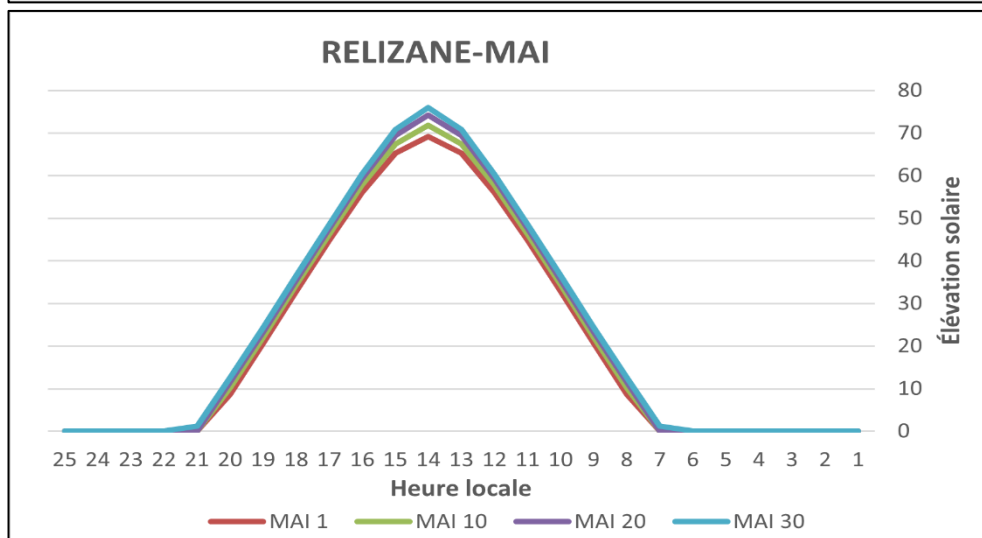
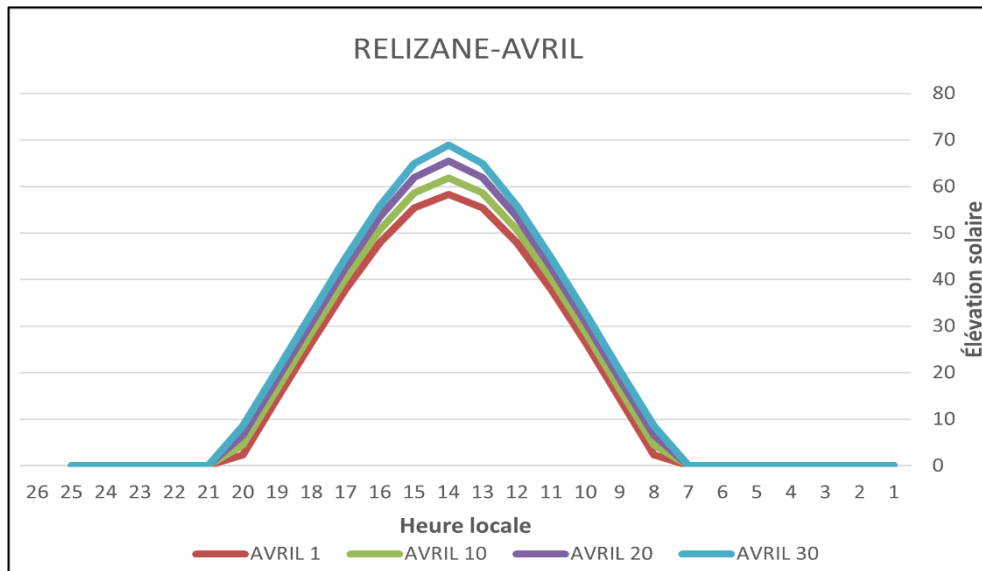
On observe que le soleil s'élève progressivement depuis son lever jusqu'à atteindre son point culminant au moment du midi solaire, puis commence à redescendre jusqu'à son coucher. Cette élévation varie clairement au fil de l'année : elle est faible pendant les mois d'hiver (décembre, janvier, février) et augmente progressivement jusqu'à atteindre ses

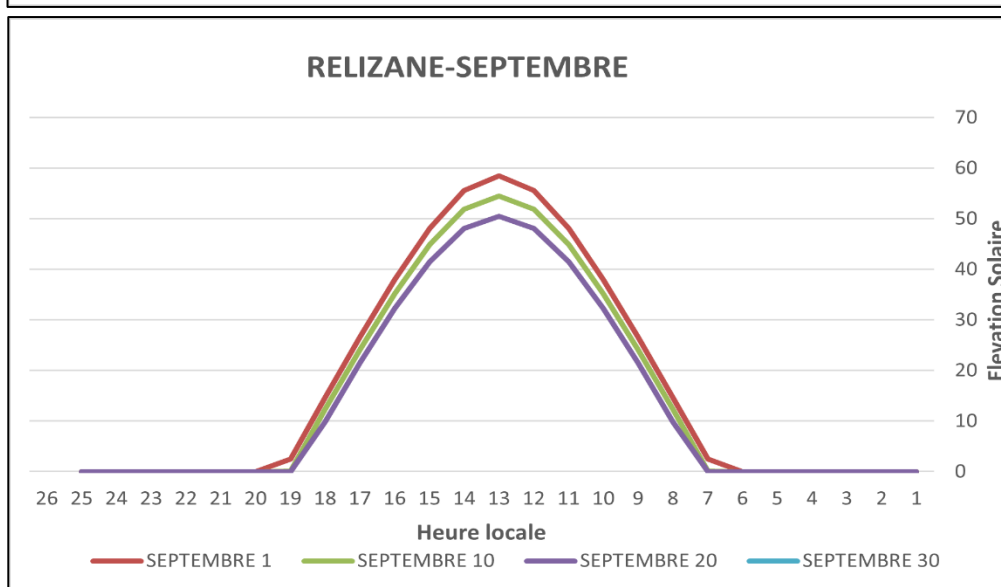
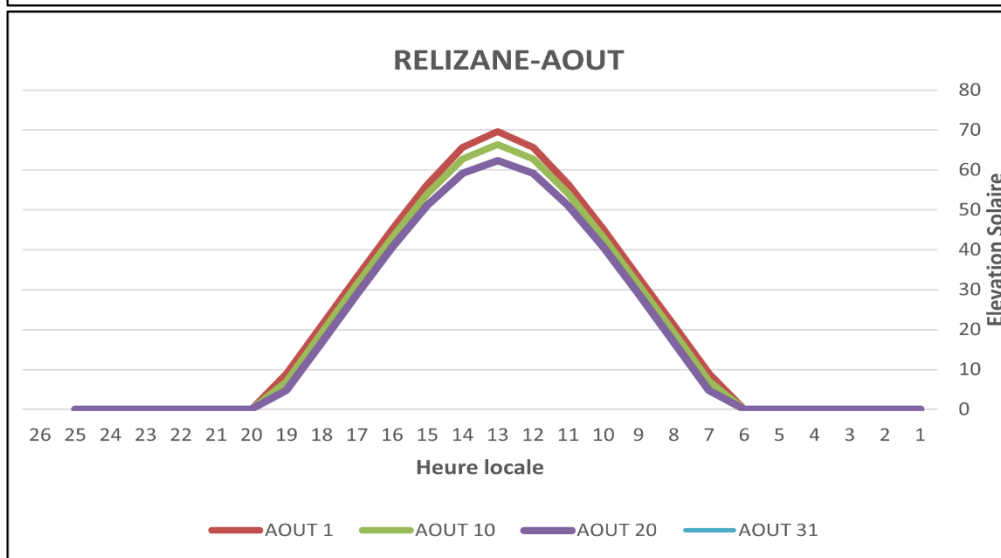
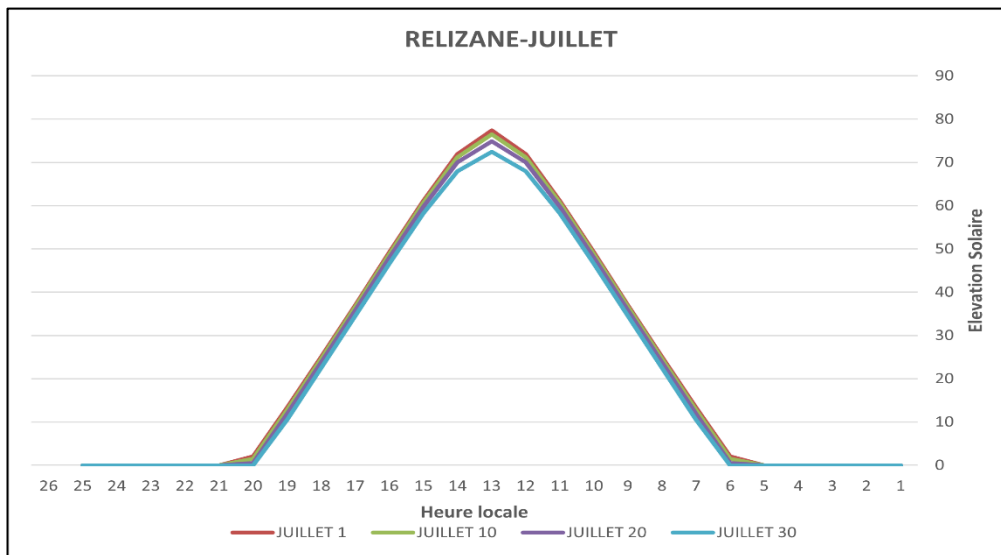
valeurs maximales pendant l'été (juin, juillet). À l'intérieur d'un même mois, les différences entre les jours 1, 10, 20 et 30 restent négligeables par rapport aux variations saisonnières.

On remarque également que la durée du jour augmente progressivement de l'hiver vers l'été, le soleil se levant plus tôt et se couchant plus tard. De plus, l'angle au zénith (élévation maximale du soleil à midi) augmente nettement, ce qui reflète l'effet de l'inclinaison de l'axe terrestre et de la révolution de la Terre autour du Soleil.

En analysant la forme des courbes selon les saisons, on note que celles de l'été présentent des sommets hauts et larges, indiquant un jour long et un soleil haut dans le ciel. En revanche, en hiver, les courbes sont plus aiguës et basses, ce qui traduit une durée de jour plus courte et un rayonnement solaire plus faible. On observe également une symétrie autour du midi solaire, ce qui reflète la régularité du mouvement apparent du soleil dans le ciel. Bien que le midi solaire se situe généralement entre 12h et 13h, l'heure exacte varie légèrement d'un jour à l'autre en raison de « l'équation du temps », causée par l'inclinaison de l'axe terrestre et l'orbite elliptique de la Terre.







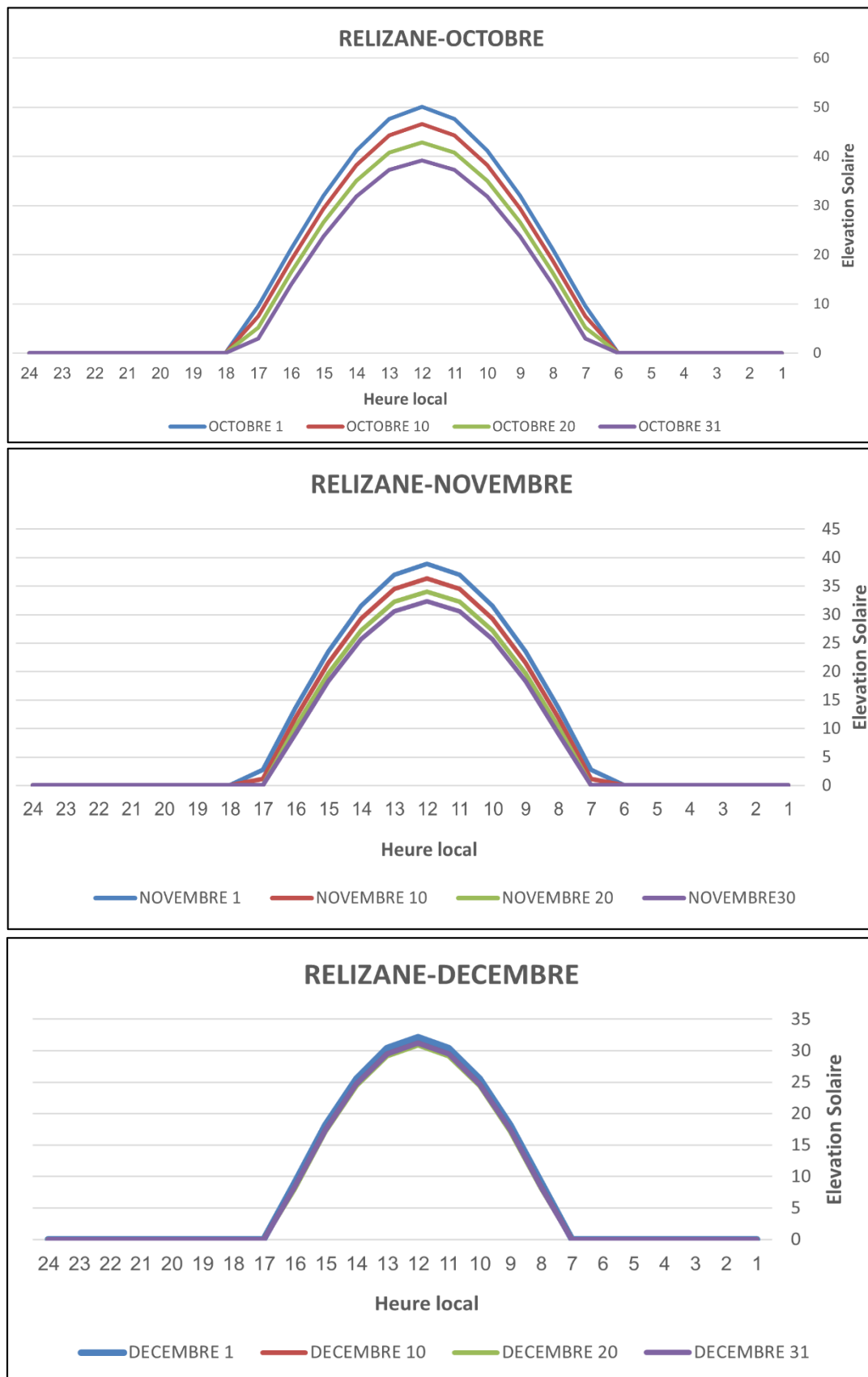


Figure III.4 trajectoire du soleil au cours de la journée, au début au milieu et à la fin de chaque mois de l'année à Relizane.

Au moment du midi solaire (vers 12h à 13h, heure locale), le soleil atteint son point le plus haut et l'ombre est la plus courte. Cela se reflète clairement dans les courbes où l'angle d'élévation atteint son sommet à midi. C'est ce que confirme la figure III.5

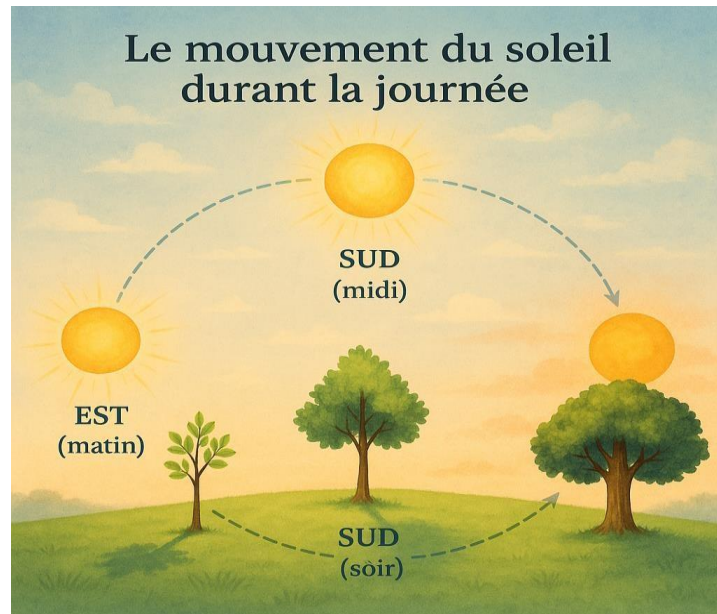


Figure III. 5 Soleil et ombre

La figure III.6 met en évidence la variation annuelle de l'élévation angulaire du soleil au-dessus de l'horizon pendant les moments astronomiques principaux, à savoir les solstices (d'hiver et d'été) et les équinoxes (de printemps et d'automne). Ces données montrent que l'orbite apparente du soleil dans le ciel ne reste pas fixe, mais change constamment tout au long de l'année en fonction de la position orbitale de la Terre autour du soleil et de l'inclinaison de son axe. On peut observer que les trajectoires quotidiennes du soleil se répartissent dans une plage angulaire limitée entre la hauteur maximale atteinte le jour du solstice d'été (21 juin) et la hauteur minimale atteinte le jour du solstice d'hiver (21 décembre).

Lors du solstice d'été, le soleil atteint son point le plus haut au-dessus de l'horizon sud dans l'hémisphère nord, ce qui entraîne le jour le plus long de l'année en raison de l'augmentation de la durée de présence du soleil au-dessus de l'horizon. En revanche, lors du solstice d'hiver, le soleil descend à son parcours le plus bas, avec un angle d'élévation faible, ce qui donne le jour le plus court de l'année. Quant aux équinoxes de printemps (environ le 21 mars) et d'automne (environ le 23 septembre), le soleil traverse l'équateur céleste et suit un parcours symétrique, où la durée du jour et de la nuit est presque égale.

Il est également observé à travers la figure III.6 qu'il y a un gradient dans ce changement angulaire : à partir du solstice d'hiver, la hauteur du soleil commence à augmenter progressivement, passant par l'équinoxe de printemps, jusqu'à atteindre sa valeur maximale au solstice d'été, puis diminue progressivement à travers l'équinoxe d'automne jusqu'à revenir à son niveau le plus bas au solstice d'hiver. Ce changement alterné de la hauteur du soleil reflète la dynamique saisonnière de l'énergie solaire atteignant la surface de la Terre, et affecte directement la durée du jour et la durée de l'irradiation solaire quotidienne.

Par conséquent, la relation entre la hauteur du soleil et la longueur du jour est clairement proportionnelle : plus l'angle d'élévation du soleil augmente, plus l'arc diurne qu'il trace à travers le ciel s'élargit, augmentant ainsi la longueur du jour, et vice versa. Ce phénomène astronomique est l'un des piliers fondamentaux pour comprendre les saisons climatiques et la distribution du rayonnement solaire sur la surface de la Terre.

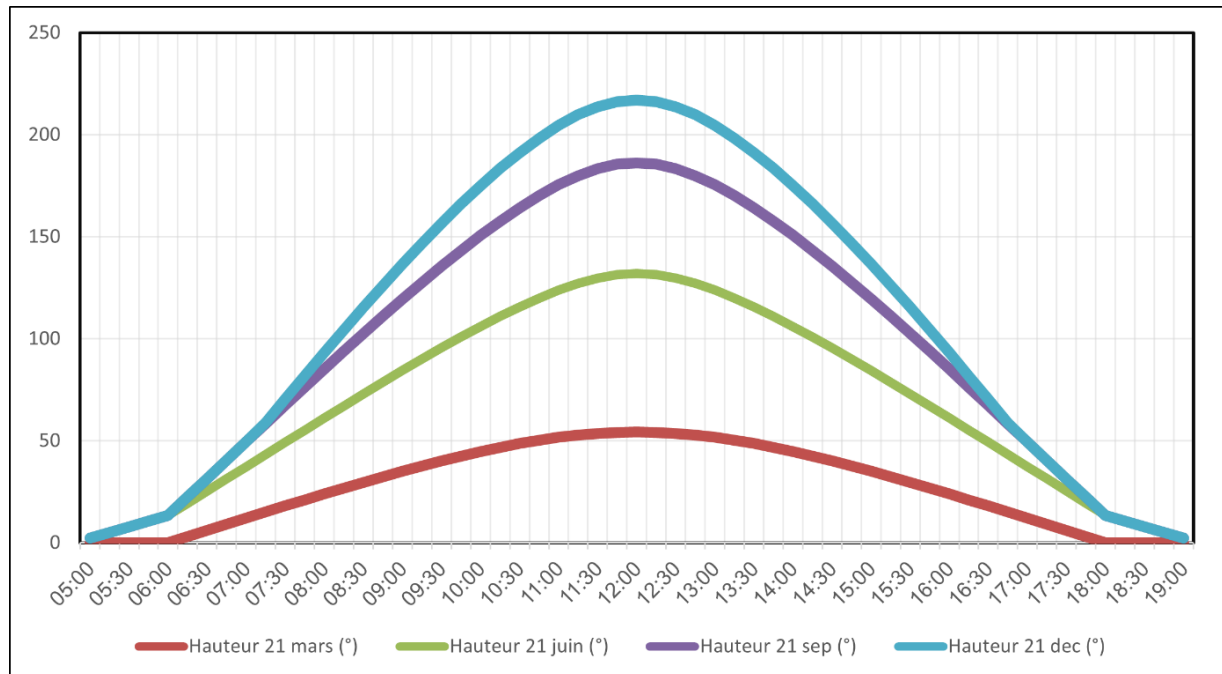


Figure III. 6 Evolution de la hauteur du Soleil aux équinoxes du printemps et d'automne et aux solstices d'hiver et d'été.

Lors des équinoxes de printemps et d'automne, le soleil atteint un point au milieu du ciel, où la durée du jour est exactement égale à celle de la nuit. Cet équilibre se produit lorsque l'axe de la Terre est incliné de manière à ce que les deux hémisphères soient exposés de manière égale aux rayons du soleil.

Il est essentiel de comprendre comment la hauteur du soleil dans le ciel affecte l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre, ce qui influence à son tour la température du lieu. Lorsque le soleil est bas dans le ciel, comme en hiver, les rayons du soleil sont obliques et se répartissent sur une plus grande surface de la Terre. Cela signifie que chaque rayon de soleil est réparti sur une plus grande surface, ce qui entraîne une diminution de la densité de l'énergie solaire atteignant l'endroit. Par conséquent, il fait plus froid et la journée d'hiver est plus courte.

En revanche, lorsque le soleil est haut dans le ciel, comme c'est le cas en été, les rayons se concentrent sur une plus petite surface de la Terre, ce qui augmente l'intensité du rayonnement solaire. Par conséquent, il y a plus de chaleur, car le soleil est perpendiculaire ou proche de la position perpendiculaire à la surface de la Terre, ce qui signifie que l'énergie solaire se concentre sur une plus petite zone et contribue à chauffer l'endroit plus rapidement et plus efficacement. Cela explique pourquoi les jours d'été sont plus longs et plus chauds.

Nous pouvons illustrer cela avec un exemple similaire à l'idée du radiateur : lorsque la pièce est petite, le radiateur la chauffe plus rapidement, car il concentre la chaleur dans un espace limité. En revanche, si la pièce est grande, le radiateur mettra plus de temps à la chauffer avec la même efficacité. En d'autres termes, plus l'espace éclairé et chauffé est petit, plus la chaleur augmente, et vice versa.

Ces phénomènes contribuent également à expliquer pourquoi le temps est plus chaud à midi, lorsque le soleil est à son point le plus haut dans le ciel, par rapport aux heures du lever et du coucher du soleil où le rayonnement solaire est moins concentré et moins chaud.

À Relizane, l'élévation maximale du soleil le 21 juin à midi est de $76,7^\circ$, ce qui signifie que le soleil est très proche de la position verticale (le zénith), et que les journées sont les plus longues de l'année à cette période. En revanche, le 21 décembre à la même heure, l'élévation du soleil ne dépasse pas $30,85^\circ$, ce qui fait que le soleil semble bas dans le ciel, et que les journées sont les plus courtes de l'année. Ainsi, on constate qu'en été, le soleil se rapproche de la position zénithale, tandis qu'en hiver, il s'en éloigne. Quant aux équinoxes de printemps et d'automne, la hauteur du soleil atteint 54° .

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

Dans la figure III.7, on a représenté l'évolution de l'azimut solaire au cours de l'année à Relizane :

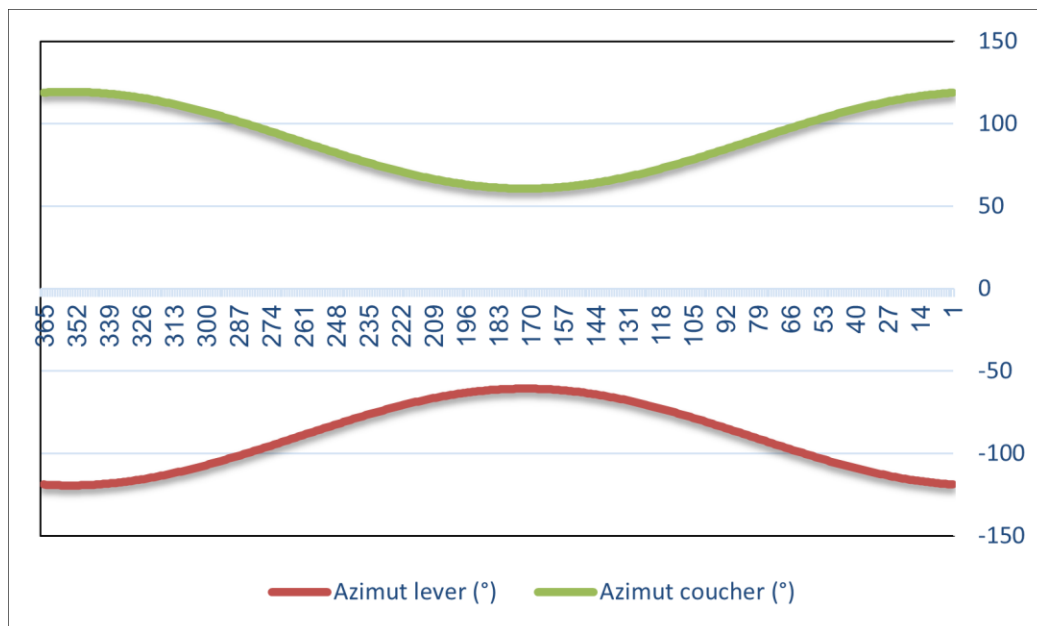


Figure III. 7 Position du soleil au lever et au cocher par rapport à l'est et à l'ouest à Relizane

L'azimut solaire est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du sud (dans l'hémisphère nord) ou du nord (dans l'hémisphère sud), jusqu'à la projection horizontale de la ligne reliant la Terre au Soleil.

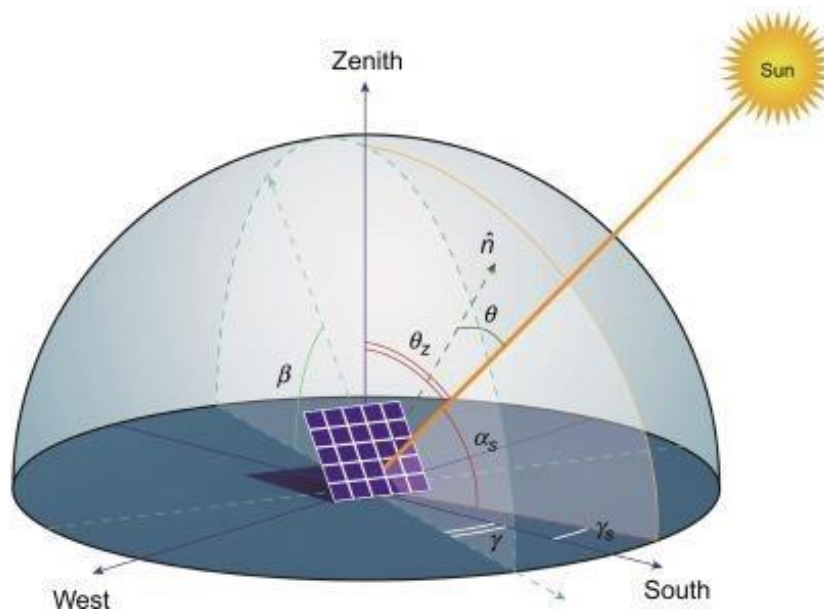


Figure III. 8 Azimut solaire [Web 3]

À Relizane, la Figure III.7 montre comment l'azimut solaire change au lever et au coucher du soleil tout au long de l'année. L'azimut solaire est négatif le matin (c'est-à-dire que la direction du lever du soleil est vers l'est), il est nul au midi solaire, puis devient positif l'après-midi (la direction du coucher du soleil est vers l'ouest), comme l'indiquent les deux courbes représentées sur le graphique.

On remarque à partir de la courbe rouge que le soleil ne se lève pas exactement à l'est véritable (azimut -90°) que pendant deux périodes spécifiques de l'année, à savoir les équinoxes de printemps et d'automne, autour du 21 mars et du 21 septembre. La même chose est observée dans la courbe du coucher du soleil, où le soleil ne se couche pas exactement à l'ouest véritable (azimut $+90^\circ$) à ces mêmes dates.

Durant l'été, le soleil se lève du nord-est et se couche au nord-ouest, ce qui prolonge la durée du jour en raison de l'augmentation du temps que le soleil passe au-dessus de l'horizon. En revanche, durant l'hiver, il se lève du sud-est et se couche au sud-ouest, ce qui raccourcit la durée du jour en raison de la trajectoire plus basse du soleil et de sa proximité avec l'horizon sud.

La position du lever et du coucher du soleil change continuellement au cours de l'année en raison de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre autour du Soleil, ce qui rend l'expression traditionnelle "le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest" inexacte, sauf dans les deux cas particuliers mentionnés pendant l'année.

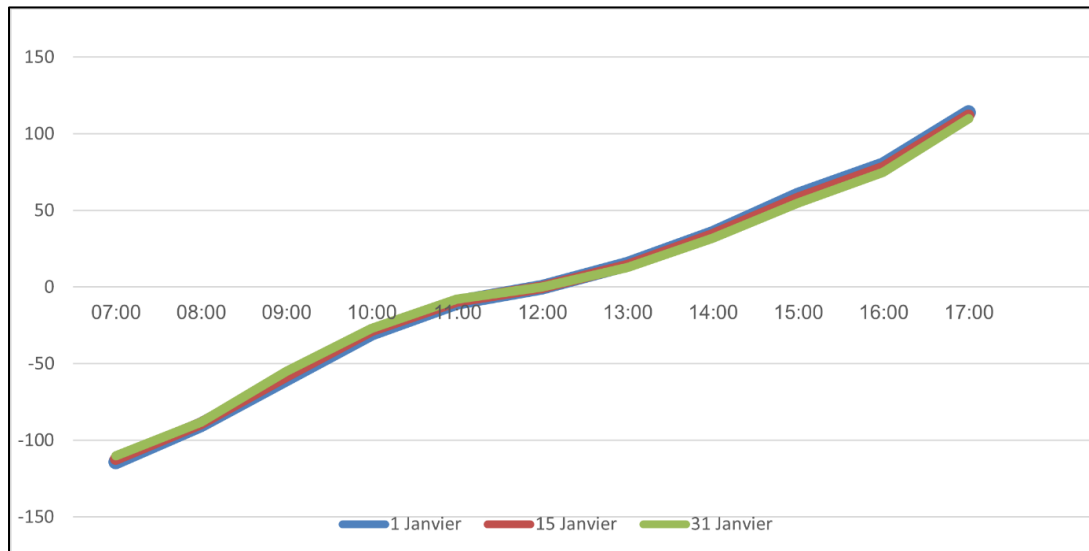


Figure III. 9 Evolution de l'azimut solaire à Relizane au mois de Janvier.

La Figure III. 9 montre la variation de l'azimut solaire au cours de la journée à trois dates différentes du mois de janvier : le 1er janvier, le 15 janvier et le 31 janvier.

Le 1er janvier, l'azimut solaire commence à l'est (azimut négatif), se dirige vers le sud à midi, puis vers l'ouest (azimut positif) au coucher du soleil.

Au fil des jours, le parcours s'élargit progressivement. Le 15 janvier, on remarque une légère expansion par rapport au 1er janvier, ce qui signifie que le soleil se lève plus tôt et se couche plus tard, augmentant ainsi la durée du jour.

Le 31 janvier, le parcours devient encore plus large, indiquant une augmentation notable de la longueur du jour, avec un lever du soleil plus tôt et un coucher plus tard par rapport aux jours précédents. Cette expansion du parcours est le résultat du mouvement apparent du soleil après le solstice d'hiver (21 décembre), où les jours commencent progressivement à s'allonger en préparation du printemps.

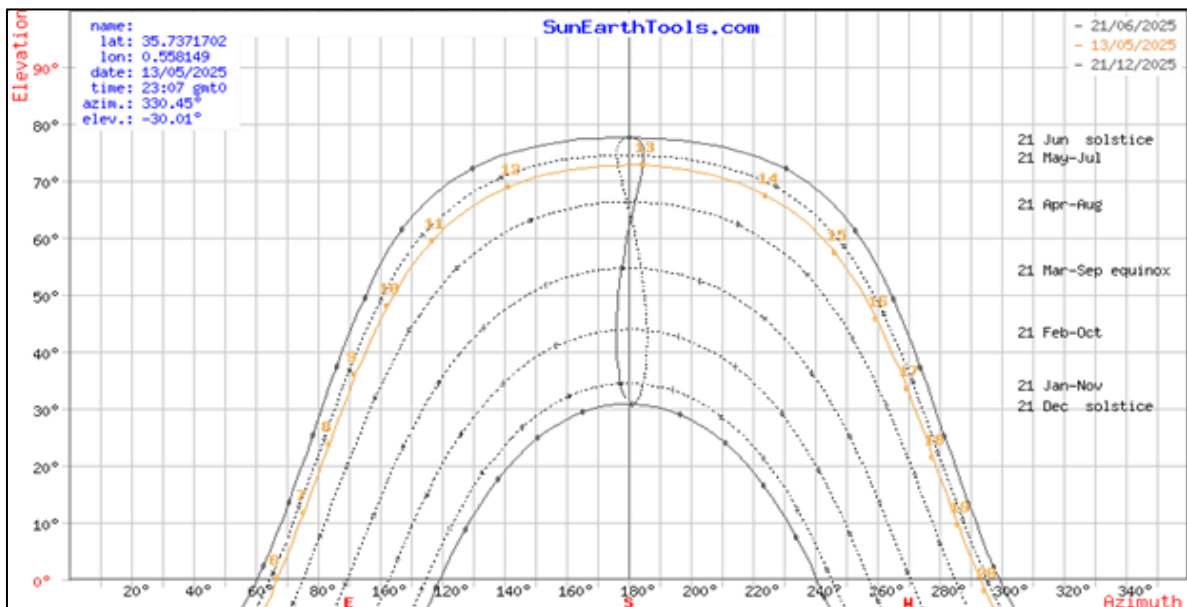


Figure III. 10 Evolution de l'azimut solaire à Relizane au cours de l'année.

La ville de Relizane est située au nord-ouest de l'Algérie, à une latitude d'environ $35^{\circ}44'$ Nord et une longitude de $0^{\circ}33'$ Est. Elle s'élève à environ 98 mètres au-dessus du niveau de la mer, ce qui la place dans une zone intérieure à faible altitude de la région nord-ouest du pays.

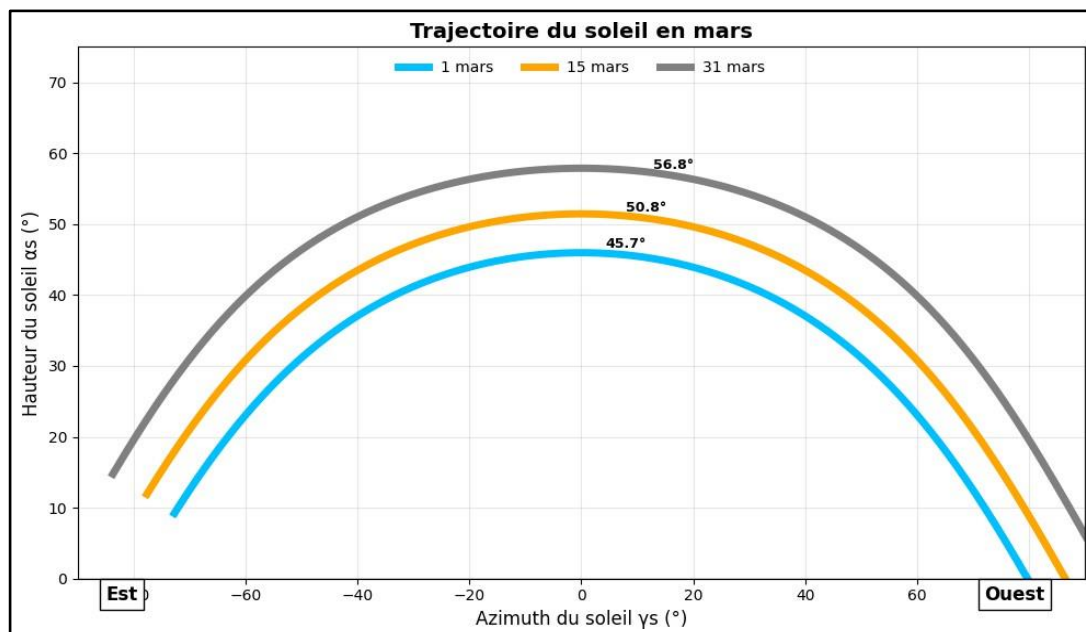
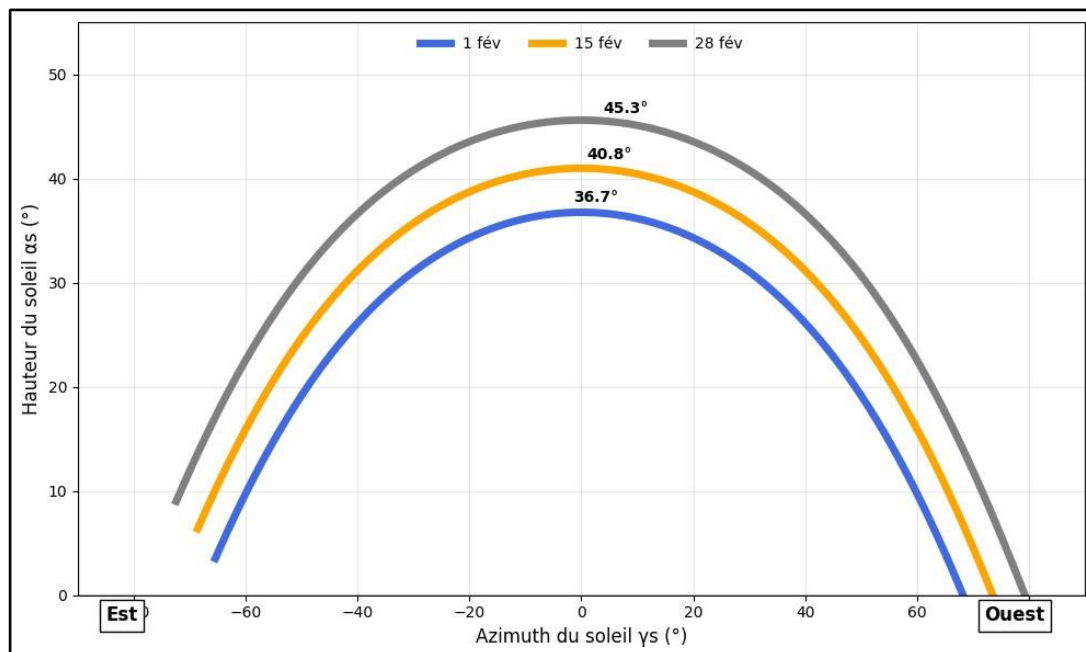
Le jour du solstice d'été, le 21 juin, le diagramme solaire (Figure III.10) montre que le soleil se lève vers 05h42 (heure solaire vraie), en direction du nord-est, avec un azimut d'environ 59° (soit environ $+29^{\circ}$ par rapport à l'est géographique). Il atteint son point culminant à midi solaire avec une hauteur maximale d'environ 77° , puis se couche vers 20h17, en direction du nord-ouest à un azimut avoisinant les 300° (soit $+30^{\circ}$ par rapport à l'ouest).

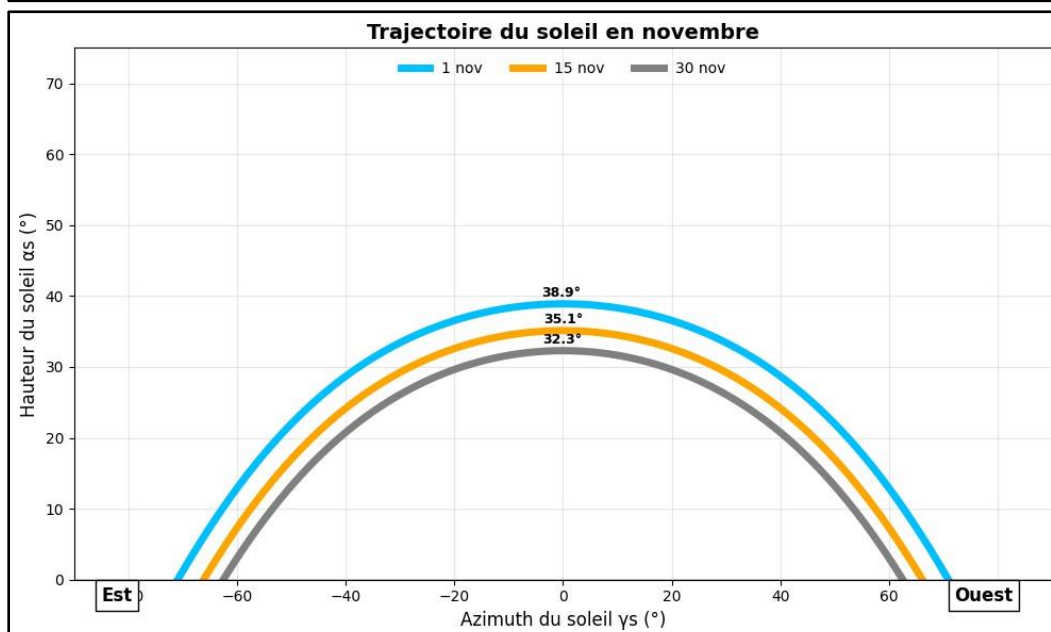
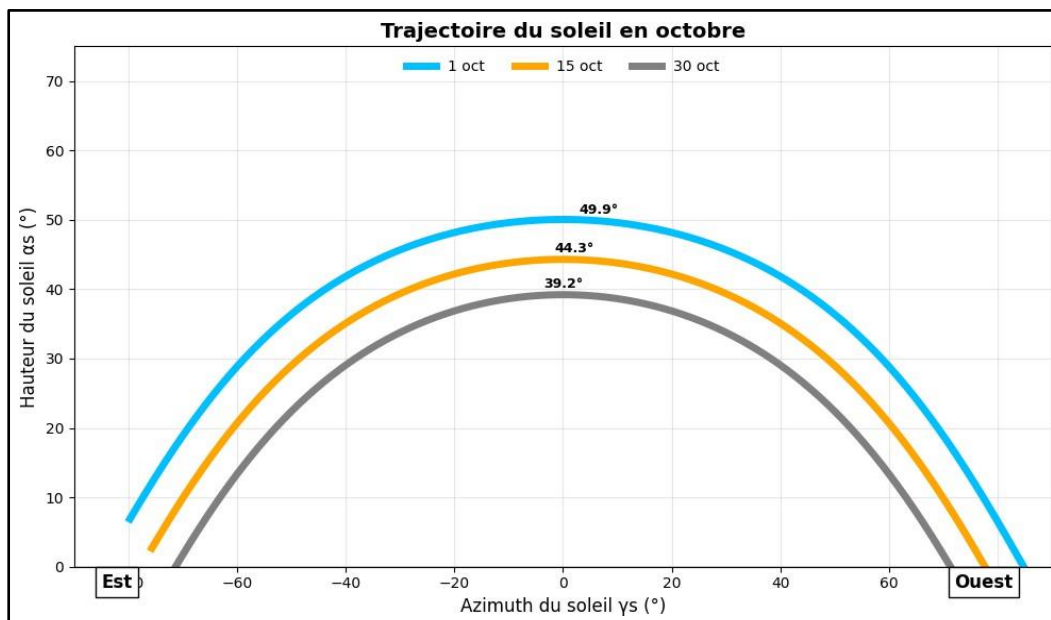
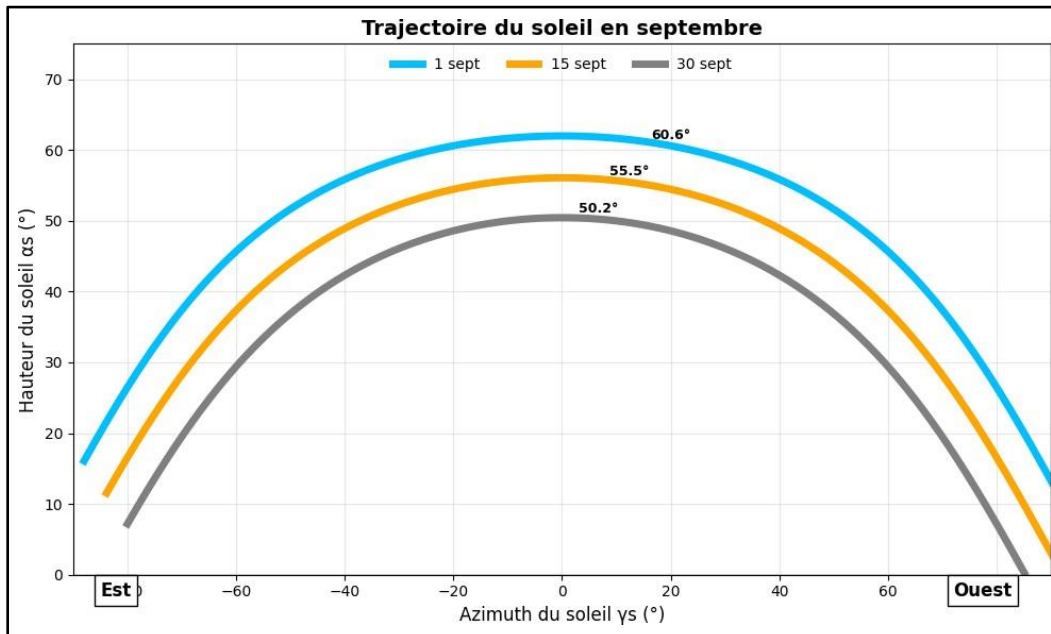
En revanche, lors du solstice d'hiver, le 21 décembre, le lever du soleil a lieu plus tard dans la matinée, vers 08h04, en direction du sud-est, à un azimut d'environ 118° (soit -28° par rapport à l'est). Le soleil atteint alors une hauteur maximale d'environ 30° à midi solaire, avant de se coucher vers 17h48 en direction du sud-ouest, à un azimut d'environ 241° (soit -29° par rapport à l'ouest).

Durant le reste de l'année, les points de lever et de coucher du soleil varient progressivement, restant dans un intervalle compris entre -30° et $+30^{\circ}$ autour des points cardinaux est et ouest. Aux équinoxes de printemps et d'automne, le soleil se lève presque exactement à l'est (azimut $\approx 90^{\circ}$) et se couche à l'ouest (azimut $\approx 270^{\circ}$). Les variations

d'azimut sont relativement symétriques et régulières entre les saisons. Cette symétrie se traduit par une similitude des trajectoires solaires entre des mois opposés dans l'année, comme : mai et juillet, avril et août, février et octobre, janvier et novembre, en termes d'azimut de lever/coucher et de hauteur solaire.

Cette analyse repose sur un diagramme solaire précis, téléchargé depuis le site SunEarthTools.com, qui fournit des données fiables sur les horaires et les directions du soleil en fonction des coordonnées locales. Il convient de noter que des erreurs ont été constatées lors du calcul manuel de l'azimut solaire pour certains mois. Faute de temps pour les corriger, l'utilisation du diagramme solaire complet a été nécessaire pour garantir l'exactitude des valeurs utilisées dans cette étude.





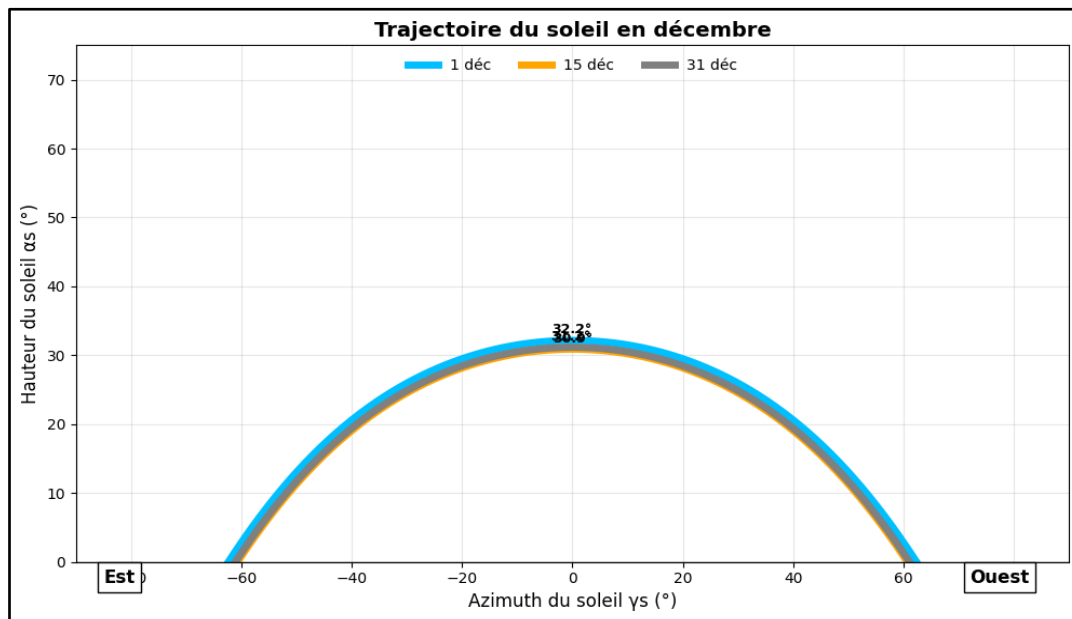


Figure III. 11 Trajectoire du soleil calculée à Relizane

III. 6 Conclusion

Nous avons préparé un fichier d'information spécial pour la ville de Relizane en utilisant le programme MATLAB, où un algorithme a été développé pour calculer la position du soleil avec précision chaque minute selon l'heure locale.

Et pour atteindre le plus haut degré de précision et organiser les résultats, les données ont été exportées vers Excel afin de les analyser et de les présenter de manière plus claire.

Ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

La durée du jour à Relizane varie entre 9 heures, 34 minutes et 30 secondes pendant le solstice d'hiver, et 14 heures, 25 minutes et 17 secondes pendant le solstice d'été.

Lors des équinoxes (printemps et automne), la nuit et le jour sont égaux, chacun durant environ 12 heures.

En moyenne, la période de présence du soleil au-dessus de l'horizon dans le ciel de Relizane dure environ 12 heures par jour tout au long de l'année.

Le soleil atteint son point culminant (le zénith) au milieu de la période entre le lever et le coucher du soleil, et à ce moment-là, l'angle horaire solaire est égal à zéro, ce qui rend l'ombre des objets aussi courte que possible.

Lors du solstice d'été, le soleil se lève 30 degrés avant l'est et se couche 30 degrés après l'ouest.

Quant au solstice d'hiver, il se lève à 30 degrés à l'est et se couche à 30 degrés à l'ouest.

Quant aux autres jours de l'année, le lever et le coucher du soleil se situent dans une plage angulaire allant de -30° à $+30^\circ$ par rapport à l'est et à l'ouest.

Remarque : Ce fichier a été développé en se basant sur les coordonnées géographiques précises de la ville de Relizane (latitude : $35,74^\circ$ N, longitude : $0,56^\circ$ E, altitude : 98 mètres), ce qui a permis d'obtenir des résultats de haute précision en utilisant la puissance de traitement de MATLAB et la précision d'affichage et d'analyse d'Excel.

Conclusion générale

En conclusion, l'étude de la position du soleil dans la ville de Relizane, basée sur une modélisation précise utilisant MATLAB et une analyse via Excel, révèle des détails importants sur le mouvement du soleil et ses impacts sur l'environnement local.

Il a été constaté que la durée du jour varie clairement entre 9 heures, 34 minutes et 30 secondes lors du solstice d'hiver et 14 heures, 25 minutes et 17 secondes lors du solstice d'été, tandis que la durée du jour et de la nuit est égale à 12 heures pendant les équinoxes de printemps et d'automne.

Tout comme le mouvement du soleil au cours de l'année n'est pas fixe, le soleil se lève et se couche à des points variables ; lors du solstice d'été, le soleil se lève environ 30 degrés avant l'est et se couche après l'ouest au même angle, tandis que lors du solstice d'hiver, il se lève environ 30 degrés après l'est et se couche avant l'ouest au même angle. Pendant le reste de l'année, les positions de lever et de coucher du soleil se situent dans une plage angulaire allant de -30° à $+30^\circ$ par rapport à l'est et à l'ouest.

Ces changements affectent directement l'utilisation de l'énergie solaire et la conception des systèmes de chauffage et de refroidissement naturels, car comprendre les positions précises du soleil permet d'exploiter les ombres et de réduire la consommation d'énergie, tout en permettant d'orienter les panneaux solaires pour atteindre une efficacité maximale dans la production d'électricité.

De plus, l'importance de ces données s'étend au secteur agricole, où la durée du jour et les positions du soleil jouent un rôle vital dans la détermination des saisons de culture et de récolte, ainsi que dans la gestion des ressources telles que l'irrigation, contribuant ainsi à améliorer la productivité et à atteindre la durabilité.

Par conséquent, cette étude ne se limite pas à fournir des informations théoriques, mais constitue une base pratique pour la planification urbaine, la conception des systèmes écologiques et le développement de projets d'énergie renouvelable à Relizane.

Ces résultats reflètent la nécessité d'intégrer les technologies modernes avec les connaissances locales pour garantir un développement durable bénéfique pour les habitants et l'environnement, et préparer la ville à relever les défis futurs avec intelligence et sagesse.

Sources et Références

CHAPITRE I

- [1]. 1. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons.
- [2]. Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources*. Routledge.
- [3]. Green, M. A. (2016). *Solar Cells : Operating Principles, Technology, and System Applications*. University of New South Wales.
- [4]. Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering : Processes and Systems*. Academic Press.
- [5]. Kalogirou, S. A. (2014). *Advances in Solar Heating and Cooling*. Elsevier.
- [6]. BELLABACI Anouar, *THEME Contribution a la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie*, Université Mohamed Boudiaf M'sila
- [7] Charik abdeljebbar « Détermination de l'angle optimal d'inclinaison » Université de M'sila (2016).
de capteur solaire à M'Sila
- [8] Clayton, D. D. (1968). *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*. University of Chicago Press.
- [9] Stix, M. (2002). *The Sun: An Introduction*. Springer
- [10] Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press.
- [11] Hathaway, D. H. (2010). *The Solar Cycle*. Living Reviews in Solar Physics, 7(1), 1.
- [12] Sackmann, I.-J., & Boothroyd, A. I. (2003). *Our Sun. III. Present and Future*. The Astrophysical Journal, 583(2), 1024-1039
- [12] M. Salmi « Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques ».Thèse de doctorat, Université de de Sétif, (2012).
- [14] BELLABACI Anouar«Contribution a la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie» Université Mohamed Boudiaf - M'sila. 2021
- [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] Mr Bouna Ould Zeidane, *Contribution to the study of the Grid Connected Photovoltaïque System, Mémoire de magister*. 2006.

- [17] MR Maouedj Rachid, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah , Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd Faculté des Sciences Département de physique 2005.
- [18] http://www.lamap.fr/bdd_image/380_dossier_energie_solaire.pdf (consulté mois du Mars 2010). R.
- [19] r. djelloul, analyse d'un systeme de concentration solaire pour la production d'hydrogene (cas de algerie), 2012, p. 17. Magister, Université Hassiba Benbouali - CHLEF.
- [20] H. ABDELHAKIM et S. HAMMADOU, «Etude de corrélation entre l'irradiation solaire et factures météorologiques,» Mémoire Master, 2013, p. 37. UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAÏA,
- [21] T. Khaoula, «Modélisation du rayonnement solaire global pour différentes définitions de la durée du jour.,» 2023, p. 32. Mémoire master ,Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi –Bordj Bou Arreridj.
- [22] Wallace, J. M., and Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2nd Edition. Elsevier.
- [23] D. BENATIALLAH, "Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire," 2019, p. 16.
- [24] Z .DJAMAI «Caractérisation Thermo-Optique d'un Distillateur Thermo solaire à Effet-Serre à simple effet sur site d'Adrar» Mémoire de Master en physique énergétique, Université d'ADRAR (2013).
- [25] M. Iqbal, 'An Introduction to Solar Radiation', Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of, British Columbia Canada (1983).
- [26] Institut Supérieur des Métiers Polyvalents - Professeur Nabil Chahd – Spécialité Énergie et Vie – Été Juin 2011
- [27]. Salman benYahya, "Faculté des Hydrocarbures, des Énergies Renouvelables, des Sciences de la Terre et de l'Univers"Ouargla
- [28]. B. Nadiem, « Étude et Modélisation du Flux Solaire globale sur surface inclinée dans la région de Touat » Thèse de Doctorat, Université de SIDI BEL ABBES (2012).
- [29]. K. Bouchouicha. and B.Oulimar,: La chaine de mesure radiométrique à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar, International Conference on Energy and Sustainable Developmenticesd'13, Adrar - Algeria 19-20 February (2013).
- [30] Laouicha Djamel, «OPTIMISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR QUELQUES SITES ALGERIENS» Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj(2024)
- [31] P. Bessemoulin and J.Oliviéri, "Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette", La Météorologie 8e série - n° 31 – septembre (2000).
- [32] M. Capderou, « Atlas Solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger » (1985)

- [33] A. Mefti, M.Bouroubi et A.Khellaf, « Analyse Critique du Modèle de l'Atlas de l'Algérie » Revue des Energies Renouvelables, 2(2), 69 – 85 (1999).
- [34]. Portail Ministère de l'Énergie, www.energy.gov.dz , Consulté en Février (2018).
- [35]. A. Mefti, M.Bouroubi et H.Mimouni, « Evaluation du potentiel énergétique solaire »
- [36] BOUMELIT Zine laabidine, Activité Solaire, Vent Solaire et Géomagnétisme durant les Cycles Solaires N°23 et24, mémoire magistère, option géophysique Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène.
- [37] "Monthly and Smoothed Monthly Sunspot Numbers (1750–2025)", accessed 2025.
- [38]. BOUKENAOUI RIM HIDAYET «ETUDE DES SURSAUTS RADIO SOLAIRES DE TYPE II ASSOCIES A DES ORAGES GEOMAGNETIQUES EN UTILISANT LE RADIOTELESCOPE CALLISTO (BOUMERDES) ET LE RESEAU E-CALLISTO» UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE. 2021
- [39] BOUMELIT Zine laabidine, Activité Solaire, Vent Solaire et Géomagnétisme durant les Cycles Solaires N°23 et24, mémoire magistère, option géophysique Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène
- [40]. Jean Lilien et Pierre-Louis Blelly. Du Soleil à la Terre. Collection Grenoble France, 1999.
- [41] Gasmi, Assia, Hebbir, Nacer, Et Al. L'Étude Expérimentale De L'influence De L'inclinaison Et De Vent Sur Le Rendement D'une Cellule Pv. Université L'Arbi Ben M'hidi -Oum El Bouaghi, soutenu le 11.Juin.2019.
- [42] Ademe (Agence de la transition écologique), France. "Les différentes formes d'énergie solaire." 2024
- [43]. Benrabah, A., & Djaidja, F., Détermination De La Position Du Soleil A M'sila , Thèse De Doctrat, Université De Msila, S.D., Consulté Le 20.04 2022
- [44] Ben Massoud, Sofiane. *Étude de faisabilité de l'utilisation de l'énergie solaire thermique pour le chauffage de l'eau domestique*. Mémoire de fin d'études, Université de Batna 1, 2020.
- [45] Cherif, Lamia. *Fondements de l'énergie solaire thermique et ses applications*. Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2021.
- [46] CDER (Centre de Développement des Énergies Renouvelables), *Guide de l'énergie solaire en Algérie*, Édition 2018.
- [47] REN21, *Renewables 2023 Global Status Report*, Paris : REN21 Secretariat, 2023.
- [48] Werner Copppe, Introduction To Photovoltaic, «Engineering Sustainableenergy Future», UCL Cours Energie Renouvelable, 2003.Consulté Le 16/04/2022.

CHAPITRE II

- [1] Hamdani Maamar 89 Etude et Effet l'orientation de Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa 89. Mémoire de Magister Energie Renouvelables. Université Abou Bakar Belkid Tlemcen.2011.
- [2] T. ABDELKADER «Étude du rayonnement solaire en vue de l'optimisation des systèmes photovoltaïques» Mémoire de master en physique énergétique, Université d'ADRAR.
- [3] S. BOURAS, Z. DJILAT, « Méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque, application à la région de M'sila», Mémoire de fin d'étude, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA (2019).
- [4] A. BOUZIANE, « Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour des applications photovoltaïques», Mémoire de fin d'étude, Faculté des sciences, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA (2015).
- [5] ABBASS Hadda, «Angle d'orientation du panneau PV et son influence sur l'énergie solaire captée» Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA (2020).
- [6] M. MISSOUM, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie», Thèse de Magistère en génie mécanique, Université Hassiba Benbouali de CHLEF (2011).
- [7] M. CHÉDALA. R. MERIKHI «Conception et réalisation d'un concentrateur cylindro parabolique pour production d'énergie thermique» de Master. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued (2016).
- [8] BENRABAH ATMANE DJAIDJA FOUAD«DETERMINATION DE LA POSITION DU SOLEIL A M9SILA» Mohamed Boudiaf University of M'sila, (2020 / 2021).
- [9] KH. NAJMI, « Une approche hybride d'optimisation pour l'estimation de l'énergie Solaire », Mémoire de Master en Informatique, Université d'ADRAR, Algérie (2019).
- [10][Online]. Available: https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/M99BACASABLE/sorm/M4_BaseIG_scorm2004_Aurora_161116/co/20_SystemeCoordonnees.html. [accessed on 07 July 2018].

CHAPITRE III

[Web1]

<https://www.slate.fr/story/198352/solstice-hiver-astronomie-soleil-lune-terre-dynamique-angles-parametres-milankovic-climat>

[Web2]

<https://www.xpair.com/images/gefen/123-05.jpg>

[Web3]

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Ftopics%2Fengineering%2Fsolar-azimuth-angle&psig=AOvVaw24nJLFUw24CregMkPm1oRc&ust=1747171427306000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCMiE-Pzuno0DFQAAAAAdAAAAABAL>