

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University, of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية لديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة محمد بوضياف، المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER 2

En Génie Mécanique

Option : Énergétique

Présenté par : CHOUKI Seid

ZIANE Belkacem

Thème

Modélisation mathématique d'un capteur solaire plan
à air opérant sous les conditions météorologiques de la
ville de M'Sila en Algérie.

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
		Président
KHAMA Réda	MCA	Encadreur
ZERGANE Said	MCA	Co-Encadreur
		Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre: GM/...../2022

Résumé :

L'objectif de ce travail de fin d'études en Master est de faire des calculs par simulation sur un capteur solaire classique. Le dispositif a été simulé tout étant opérant sous le climat de la ville de M'Sila dans la région du Hodna en Algérie. La thématique touchée est en rapport avec les énergies renouvelables, à savoir l'énergie solaire thermique. En plus de cela, les calculs mathématiques et le travail de modélisation et de simulation en est une enceinte. Par une telle recherche, des phénomènes physiques vont être pris en considération afin de résoudre pas mal de choses.

Les résultats ont montré que l'inclinaison optimale du capteur solaire durant l'année, sous le climat de la ville de M'Sila, variait de 0° à 60° . Une idée sur la température de l'air à la sortie du capteur solaire a été également obtenue. En outre, la variation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié pour la journée du 15 Juin, à M'Sila avec 30° comme inclinaison optimale, a montré que la température moyenne de l'air à la sortie du capteur solaire est voisine de 42.61°C , variant entre 34.93°C et 48.92°C . La variation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié pour la journée du 15 Juillet, à M'Sila avec 0° comme inclinaison optimale, a montré que la température moyenne de l'air à la sortie du capteur solaire est voisine de 46.12°C , variant entre 37.30°C et 52.71°C .

Mots clés : Capteur solaire – M'Sila – Rayonnement solaire globale – Température ambiante - Inclinaison – Modélisation.

Introduction générale

L'objectif de ce travail de fin d'études en Master est de faire des calculs par simulation sur un capteur solaire classique. La thématique touchée est sans doute en rapport avec les énergies renouvelables, à savoir l'énergie solaire thermique. En plus de cela, les calculs mathématiques et le travail de modélisation et de simulation en est une enceinte. Par une telle recherche, des phénomènes physiques vont être pris en considération afin de résoudre pas mal de choses.

Pour ce faire, ce mémoire a été divisé en trois chapitres :

Le chapitre 1 est consacré à une recherche bibliographique où les notions de base et les définitions nécessaires pour le thème sont présentées.

Le chapitre 2 est consacré aux équations qui concernent le capteur solaire étudié.

Le chapitre 3 contient les résultats qui ont été obtenus à travers ce travail théorique. Des commentaires et des explications y ont été reportés.

Enfin, une conclusion générale et une liste de références bibliographiques clôturent le mémoire.

CHAPITRE I :
Recherche bibliographique

CHAPITRE I : Recherche bibliographique

1 Introduction

De nos jours les énergies renouvelables sont très prisées, il en existe plusieurs : énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique, Biomasse, Géothermie.

Dans ce travail de mémoire nous allons nous intéresser à l'énergie solaire qui est issu directement de la captation du rayonnement solaire. Ce rayonnement solaire est absorbé en utilisant des capteurs solaires ce qui est le point essentiel de ce travail, de telle manière que l'énergie sera captée en vue de production d'électricité (Solaire Photovoltaïque) ou encore le solaire thermique (chauffe-eau, chauffage). [7]

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez. [7]

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus. Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct". [7]

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 °C et 1000 °C.

La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'héliothermodynamie.

- Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration : Concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.
- Centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.
- Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire.

Dans ce chapitre, nous allons nous pencher sur l'étude du capteur solaire plan à air et ceci en faisant intervenir les paramètres climatiques comme la température de l'air à la sortie du capteur solaire, la température ambiante et le rayonnement solaire.

2 Définition de l'énergie solaire

Les conditions résidentes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7 \cdot 10^{26}$ J/s [1].

Classification

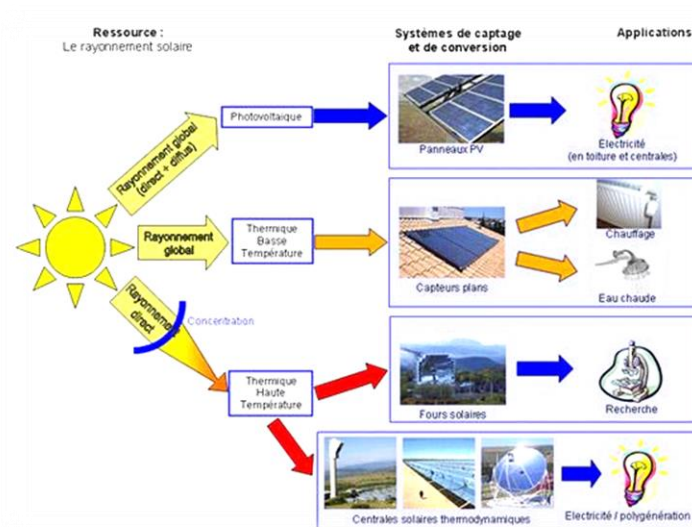


Figure I.1 : Classification de l'exploitation de l'énergie solaire

(Source : <https://nrjsolaires.com/blogs/guide-de-formation-sur-le-solaire/la-ressource-solaire>)

Points forts

L'exploitation de cette énergie solaire nous permettra de résoudre une grande partie de nos problèmes de d'environnement et d'approvisionnement en énergie dans le monde.

Par conséquent l'énergie solaire présente de nombreux atouts, à savoir : [8]

- C'est une énergie gratuite et inépuisable donc vous gagnerais en indépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie.
- Comme c'est énergie renouvelable l'installation ne dégagera donc pas de gaz à effet de serre.
- En fonction du type d'installation, vous assurez une partie de vos besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- Les panneaux solaires sont recyclables à 94,7 %.
- En produisant votre propre électricité, vous faites jusqu'à 40 % d'économies sur vos factures.

3 Gisement solaire

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. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.2 : [9]

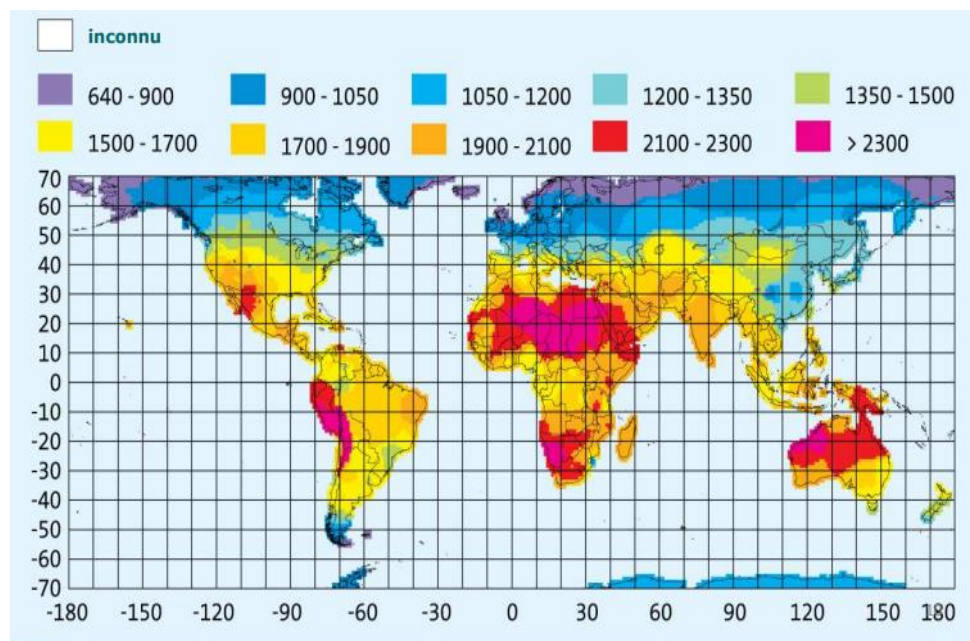


Figure I.2 : Énergie solaire au sol dans le monde [kWh/m²/an]. [9]

L'irradiation solaire annuelle sur l'ensemble de la planète au niveau de la mer (754 million de TWh) représente plus de 5 000 fois l'énergie que nous consommons. Sur le long terme, le potentiel extractible des différentes sources d'énergie renouvelable pourrait en pratique couvrir la consommation mondiale actuelle : La photosynthèse en premier avec 6 Gtep (70000 TWh), puis le vent avec 1.7 Gtep, l'hydraulique 14 à 20 000 TWh, dont le potentiel théorique mondial est d'environ 40 000 TWh, le solaire installé sur les toits des bâtiments industriels, commerciaux, tertiaires et domestique 0.25 Gtep (2 900 TWh) et la géothermie des couches profondes 0.2 Gtep (2 300 TWh) [2].

4 Capteurs solaires

Comme l'eau et l'air, le soleil est à la base de la vie sur Terre, à laquelle il apporte chaleur et lumière. Inépuisable, disponible, non polluante, l'énergie solaire fournit toutes les 50 minutes de quoi répondre à la consommation annuelle des habitants de la Planète. [10]

Il existe deux grandes technologies pour en tirer le meilleur profit : d'une part le solaire photovoltaïque, qui transforme directement le rayonnement du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de cellules de semi-conducteurs, d'autre part le solaire thermique qui capte la chaleur du soleil. La chaleur collectée est utilisée comme telle ou bien transformée en énergie mécanique, puis en électricité. Dans ce dernier cas, on parle de solaire thermodynamique.

Le capteur solaire plan de la figure I.3 est constitué de :

- Une couverture en polycarbonate ayant des coefficients de transmission et d'émission égaux respectivement à 83 % et 90 %, avec des longueurs d'onde différentes.
- Un absorbeur en aluminium peint en noir ayant des coefficients d'absorption et de conductivité thermique égaux respectivement à 95 % et 205 W/m.K.
- Un isolant en polystyrène résistant aux températures plus grandes que 90 °C et ayant un coefficient de conductivité thermique = 0.04 W/m.K [3].

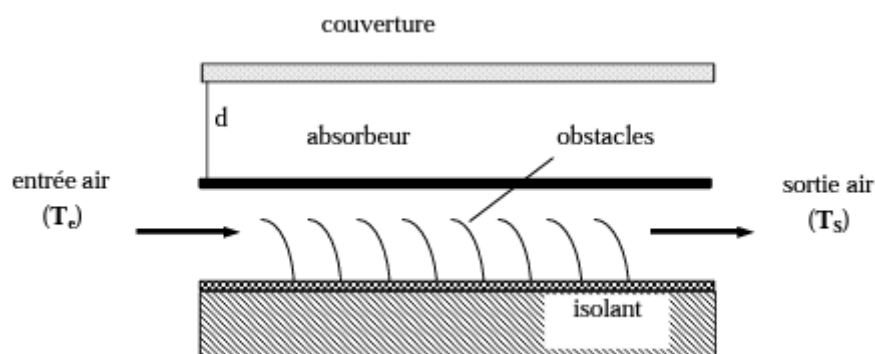


Figure I.3 : Composants du capteur solaire à chicanes. [3]

Le système utilisé (Figure I.4) est un séchoir solaire indirect qui opère en convection forcée, c'est un système simple ne possédant pas de source de chaleur auxiliaire et d'installation de recyclage d'air. Afin d'éviter les zones inactives dans le capteur, la géométrie de l'entrée et de la sortie (détails A et B) doit être bien choisie [3].

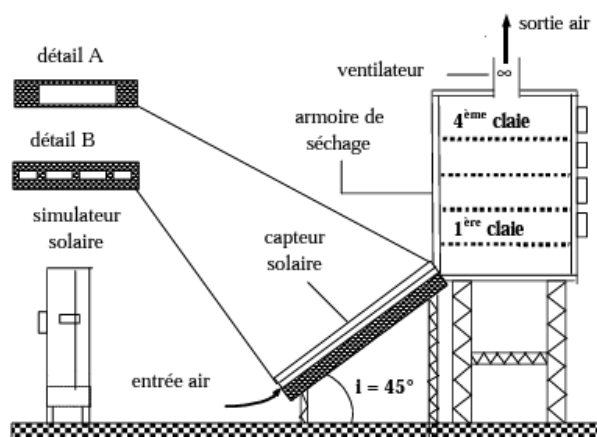


Figure I 4 : Installation expérimentale. [3]

5 Différents types des capteurs solaires thermiques

Capteurs plans vitrés

Les capteurs plans vitrés représentent la majorité des installations de panneaux solaires thermiques chez les particuliers. La surface absorbant les rayons du soleil est en contact avec les tubes contenant le fluide caloporteur. Ce dernier est constitué d'eau et d'antigel.

Le vitrage permet, avec l'effet de serre, d'accentuer le phénomène de chauffage dans le caisson. Un isolant est mis en place sous l'ensemble des éléments pour éviter les pertes de chaleur. Il est capable de résister à de très fortes températures pour éviter tout risque d'incendie [4].

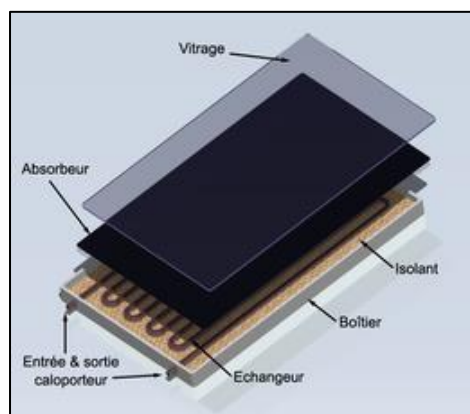


Figure I.5 : Capteur plan vitré.

(Source : <https://www.2es.fr/fr/nos-compétences/le-solaire-thermique/>)

Capteurs plans non vitrés

Le capteur solaire thermique non vitré, comme son nom l'indique, n'est pas pourvu d'une vitre. Il est donc plus fragile et moins performant que le précédent.

Normalement, ils n'ont pas de revêtement sélectif et n'ont ni cadre ni isolation en arrière. Ils sont simplement posés sur un toit ou sur un support en bois. Ces capteurs de faible coût captent bien l'énergie solaire, cependant les pertes thermiques vers l'environnement augmentent rapidement avec la température de l'eau, particulièrement dans les endroits venteux en conséquence.

Les capteurs sans vitrage sont couramment utilisés pour des applications demandant une fourniture d'énergie à basse température (piscines, eau d'appoint en pisciculture, chaleur industrielle, etc.) dans les climats froids, ils sont habituellement utilisés exclusivement durant l'été à cause de leurs pertes thermiques élevées [4].

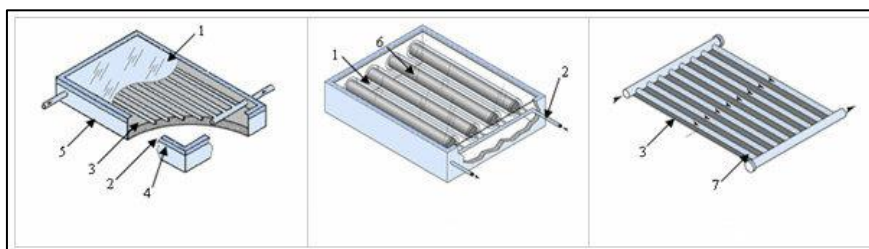


Figure I.6 : Capteur plan non vitré.

(Source : https://www.researchgate.net/figure/Figure21-Les-types-de-capteur-solaire-a-Capteur-plan-vitre-b-Capteur-sous-vide-c_fig4_274837646)

Capteurs solaires thermiques sous vide

Le principe de fonctionnement des capteurs solaires thermiques sous vide est similaire à celui des capteurs plans vitrés. Le système de tubes où circulent le fluide caloporteur et la surface captant les rayons du soleil sont similaires. Or, la différence entre les deux systèmes réside dans le fait que les tubes sont dépourvus d'air. C'est ce qui lui donne son nom de « sous vide ». L'absence d'air dans les tubes permet de limiter et minimiser les pertes de chaleur. C'est un système plus performant que celui des plans vitrés et il est donc plus performant si l'ensoleillement est moins bon. [4]

Capteurs solaires thermiques à concentration

Le capteur solaire thermique à concentration figure parmi les modèles de panneaux solaires thermiques les plus performants. Tout est mis en œuvre pour maximiser l'apport de chaleur au

fluide caloporteur. Pour cela, un système de réflexion des rayons solaires est mis en place. Ainsi, ils sont concentrés sur l'absorbeur et la quantité de chaleur transmise est maximale. Il est donc nécessaire d'avoir un système d'appoint qui assure le chauffage de l'eau lorsque la météo ne le permet pas. On constate de manière très évidente que leur utilisation restera très limitée. On distingue trois types de capteurs à concentration [4] :

5.1.1 Capteurs cylindro-paraboliques

La surface réfléchissante du concentrateur est un cylindre de section parabolique. Lorsqu'ils sont bien orientés vers le soleil, ils concentrent le rayonnement direct sur une ligne focale où se trouve le récepteur. Le mécanisme de poursuite du soleil se fait suivant un seul axe.

Les concentrateurs cylindro-paraboliques peuvent être orientés suivant l'axe Est-Ouest ou l'axe Nord-Sud. Les concentrateurs orientés suivant l'axe Nord-Sud permettent de collecter plus d'énergie pendant l'été. L'orientation Est-Ouest permet une collecte d'énergie généralement supérieure. Les températures de travail varient de 270°C à 450°C et les rendements de conversion de ces capteurs sont voisins de 70% en régime nominal. Dans la pratique, les angles d'ouverture sont inférieurs à 20-30°. C'est la technologie la utilisée dans les centrales thermodynamiques.

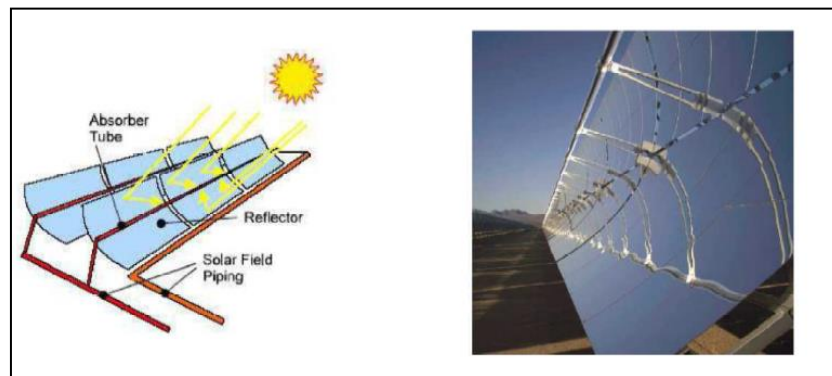


Figure I.7 : Capteurs cylindro-paraboliques. [4]

5.1.2 Capteurs paraboliques

Ils sont des concentrateurs ponctuels ayant une symétrie de révolution parabolique.

Les rayons solaires réfléchis par la parabole convergent vers le foyer. Ils sont orientés grâce à des montures mobiles autour de deux axes (monture azimutale et monture équatoriale).

La nécessité de mobiliser la parabole suivant deux axes pour suivre la course du soleil est la limite principale de ce type de système.

Le concentrateur parabolique couplé avec un moteur sterling (Dish-Stirling) est la technologie la plus utilisée pour la production d'électricité de faible puissance par conversion solaire thermodynamique. Les rendements des capteurs sont voisins de 75 %, les puissances des installations correspondent à la gamme 1-100 kWth, les taux de concentration de 6000 à 10000 permettent d'obtenir des températures de travail de 600°C à 1200°C. Le rendement instantané de conversion énergie solaire-électricité est supérieur à 22% (29 % pour le module de 25 kW du constructeur américain SES (Stirling Energy Systems) mais les coûts d'exploitation et de maintenance restent élevés.

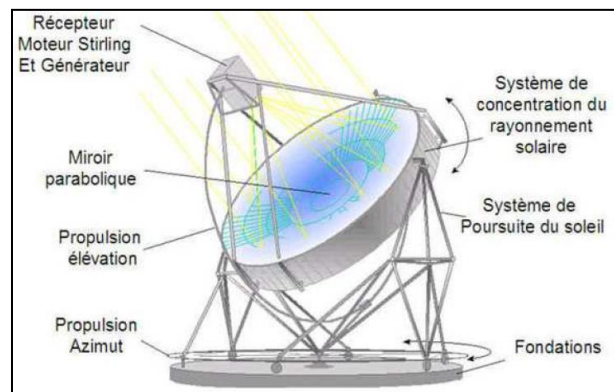


Figure I.8 : Concentrateur parabolique avec un moteur Stirling. [4]

5.1.3 Capteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel

Ils sont constitués de miroirs plans ou faiblement paraboliques disposés en lames parallèles qui sont susceptibles d'être inclinés sur un axe de manière à réfléchir et à concentrer les rayons lumineux vers une ligne où se trouve le récepteur. Comparativement aux autres, les LFR sont plus faciles à fabriquer, le système de suivi utilise des moteurs plus petits, la ligne focale est fixe, le montage du champ solaire est facilité et mieux utilisé (70% du sol peut être couvert de miroirs) [4].



Figure I.9 : Concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel. [4]

6 Présentation de quelques travaux antérieurs concernant les séchoirs solaires et les capteurs solaires plans à air

OUMAYA SAADIA : [2010] Dans ce travail ils ont introduit des données dans le simulateur FLUENT, pour étudier l'écoulement de l'air dans la même géométrie de séchoir indirect à convection naturelle, actuellement disponible dans le laboratoire [6].

Les résultats obtenus de cette étude nous ont montré qu'il existe des zones où l'on ne trouve pas d'homogénéité de la température.

Pour les modifications dès la forme géométrique de séchoir :

- ♦ Cas 1 : Amélioration de la section de la cheminée (120 mm), on remarque une homogénéité de la distribution de la température dans le séchoir ; il y'a toujours une zone froide au bas du chambre de séchage.
- ♦ Cas 2 : L'élimination de zone latérale froide et amélioration de la section de la cheminée, une homogénéité pour la distribution de la température aux tous points de séchoir (chambre de séchage et la cheminée)

Babahani Amhamed : [2013] ils ont procédé dans le travail de ce mémoire on s'intéresse à rechercher les moyens d'amélioration des conditions opératoires et des formes géométriques menant à une meilleure qualité du produit séché, et ce par exploration expérimentale d'une part et par voie de simulation numérique d'autre part. L'exploitation des résultats attendus de cette étude se permettent de proposer certaines modifications de conception du séchoir, notamment sur la géométrie de la chambre de séchage et les dimensions de la cheminée d'évacuation de l'air [6].

Les résultats obtenus numériquement pour les distributions des températures sont satisfaisants comparés aux valeurs mesurées ce qui offre une forte raison pour des conceptions à base de cette simulation. D'après les modifications conceptuelles simulées numériquement, les meilleurs résultats en matière d'homogénéité des températures ont été constatés en cas d'utilisation d'un convergent au niveau d'échappement de l'air et aussi en cas d'agrandissement de la section de la cheminée.

Amraoui Mohammed Amine : [2012] Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est les faibles échanges thermiques réalisé avec l'air dans la veine dynamiques du capteur solaire. Par contre l'introduction de chicane (obstacles) disposées en rangées dans les conduits de ces systèmes améliore nettement les transferts thermiques. Dans ce travail, ils ont ajouté des rugosités au niveau de l'isolant permettant d'augmenter la surface d'échange et par voie de conséquence donner aux particules fluide une trajectoire très important pour capter le

maximum d'énergie. On fait une étude numérique à l'aide de code du calcul « Fluent » pour étudier le comportement dynamique et thermique de l'écoulement d'air dans ces différents capteurs solaire plan (capteur solaire plan muni des chicane sans rugosité, avec rugosité rectangulaire, avec rugosité triangulaire, avec rugosité circulaire) [6].

Ferahta Fatima Zohra :[2012] ont mené leur étude dans l'objectif comprendre les mécanismes d'écoulement et de transfert en convection naturelle interne d'un capteur solaire thermique, en géométrie tridimensionnelle dans la lame d'air dont le but est de trouver la conception optimale qui permet un contrôle thermique adéquat et une performance énergétique acceptable. Est consacré à la simulation numérique basée sur l'utilisation d'un modèle de la convection naturelle dans la lame d'air de forme parallélépipédique fermée contenant de l'air et inclinée d'un angle α , les simulations ont été faites afin de déterminer les champs de température et de vitesse sous l'influence de la variation de l'épaisseur de la lame d'air et la présence d'obstacles dans la lame d'air. Ces simulations ont été effectuées avec et sans prise en compte du rayonnement dans la lame d'air. Le logiciel de calcul utilisé pour cette étude est le CFD FLUENT, basé sur la méthode des volumes finis [6].

Les résultats obtenus montrent l'influence de l'épaisseur de lame d'air sur le régime d'écoulement ; ce dernier peut être stationnaire stable ou instationnaire. Les valeurs du coefficient du transfert thermique ont été calculées pour tous les cas étudiés et une comparaison de l'écoulement avec et sans rayonnement a été faite. Ce travail numérique a été poursuivi par une étude expérimentale sur des capteurs solaires thermiques. Ainsi pour réduire les pertes, des essais ont été réalisés en évaluant le comportement thermique du capteur sur une journée en fonction des conditions extérieures (ensoleillement, température...) et bien sûr du débit d'écoulement du fluide caloporteur. Les résultats obtenus montrent l'influence de l'épaisseur sur le rendement thermique et la nécessité de trouver une épaisseur optimale pour un meilleur rendement. De même l'introduction des obstacles a contribué aussi à améliorer le rendement du capteur.

7 Conclusion

L'énergie solaire est une énergie qui a de beaux jours devant elle. Avec les avancées technologiques qui ont lieu chaque année dans le secteur, il est probable que les innovations permettront de pallier ses défauts actuels tout en la rendant accessible au plus grand nombre. Le solaire fera donc sans doute partie du paysage de la production d'énergie dans les années futures, surtout dans les régions où le soleil ne manque pas.

CHAPITRE II :
Équations du capteur solaire étudié

CHAPITRE II : Équations du capteur solaire étudié

1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, le capteur solaire étudié est décrit avec présentation de toutes les équations mathématiques au niveau de ses parties et constituants. Il y a également les données les plus importants qui sont utiles quant au rayonnement solaire qui est indispensable dans une telle étude, ainsi que la manière avec laquelle il est déterminé et calculé.

2. Rayonnement solaire

2.1 Données utiles

2.1.1 Longitude

La longitude est une coordonnée géographique. L'angle utilisé pour un tel paramètre donne le positionnement Est-Ouest d'un point sur notre planète. Le méridien de Greenwich est considéré comme référentiel.

Il faut noter que la longitude est utilisée avec la latitude pour indiquer la position précise d'un objet sur notre planète [14].

2.1.2 Latitude

La latitude est une autre coordonnée géographique représentée également par un angle. Par cette coordonnée un point sur notre Terre est positionné au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. La latitude varie entre 0° (à l'équateur) et 90° (aux pôles).

Il faut noter que la latitude est utilisée avec la longitude pour indiquer la position précise d'un objet sur notre Terre [15].

2.1.3 Altitude

L'altitude est une coordonnée géographique qui désigne la hauteur géométrique verticale entre un point et le niveau de la mer [16].

2.1.4 Albédo

L'albédo est une coordonnée géographique qui exprime la part du rayonnement solaire qui est renvoyé vers l'atmosphère. Grâce à un facteur entre 0 et 100, ce paramètre permet de calculer le rayonnement solaire réfléchi par une surface.

Pour une surface qui absorbe tous les rayons solaires, l'albédo = 0.

Pour une surface qui renvoie tous les rayons solaires, l'albédo = 100 [17].

2.1.5 Déclinaison du soleil

La déclinaison du soleil est une autre coordonnée géographique. Il s'agit de l'angle entre les rayons solaires et le plan de l'équateur terrestre [18].

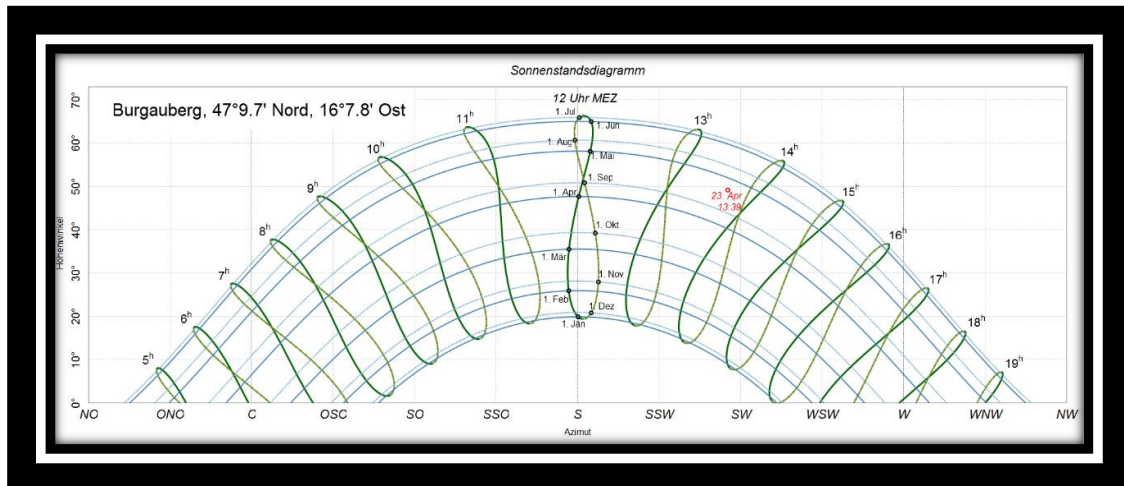


Figure II.1 : Diagramme de la position du soleil dans le ciel.

(Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Position_du_Soleil#/media/Fichier:Sonnenstand.png)

Dans cette étude, les calculs sont faits par rapport à la ville de M'Sila, Algérie. Les données utiles qui sont utilisées dans le calcul du rayonnement solaire sont [19] :

Longitude = 4.5°

Latitude = 35.67°

Altitude = 411 m

Albédo = 0.2

Déclinaison du soleil = Variable

2.2 Description du logiciel utilisé [19,20]

Les valeurs instantanées du rayonnement solaire durant les journées de séchage ont été obtenues à partir du site officiel du centre de développement des énergies renouvelables "CDER" [calcul du rayonnement solaire \(cder.dz\)](http://calcul.du.rayonnement.solaire.cder.dz). ((Conception et méthodologie : Mohamed Rédha Yaiche & Abdellah Bouhanik. Développement informatique : Bouzeriba Sara Aicha, Nadjeh Gueriba & Samiha Mansour Khodja)). [19,20]

Selon les deux chercheurs M. Mohamed Redha Yaiche et M. Abdellah Bouhanik, l'objectif de cette application consiste en la simulation des différents flux du rayonnement solaire. Pour ce faire, deux approches théoriques ont été adoptées et choisies, valables pour un ciel clair. (Source : [Application Web pour le calcul du rayonnement solaire en Algérie - Centre de Développement des Energies Renouvelables \(cder.dz\)](#)).

En effet, et afin de faciliter l'utilisation et l'application de la réglementation algérienne, l'équipe Bioclimatique du CDER a développé une application baptisée RETA – Réglementation Thermique Algérienne. Cette application est un logiciel libre d'accès qui se présente sous forme d'interface graphique accessible via l'adresse web (reta.cder.dz). L'application présente à

l'utilisateur une interface ergonomique et facile d'utilisation lui permettant de décrire les différents composants d'un bâtiment et d'effectuer les calculs thermiques nécessaires afin de vérifier la conformité du projet vis-à-vis de la réglementation thermique (DTR C3-2 et DTR C3-4). L'application offre aussi la possibilité de dimensionner un système de chauffage conformément aux exigences de confort thermique intérieur. [19,20]

Comme tout logiciel, l'application RETA sert à éviter à l'utilisateur un calcul fastidieux pouvant engendrer à la fois des erreurs de calcul et une perte de temps. Il détaille les données de base communes à toutes les autres entités. Il s'agit principalement des données géographiques : altitude, latitude, wilaya, commune, etc. Une fois le projet définit, la deuxième étape sera de créer les volumes thermiques conformément aux définitions du DTR. A chaque enveloppe ou volume thermique il faut alors définir les parois qui le composent de façon à créer un espace fermé. [19,20]

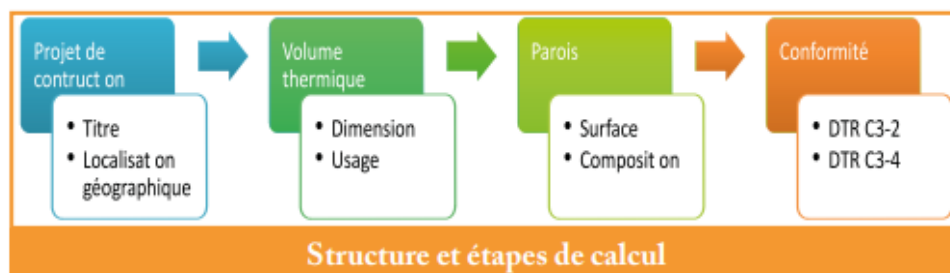


Figure II.2 : Structure et étapes de calcul. [19,20]

Les étapes essentielles pour l'élaboration d'un projet sous RETA sont : [19,20]

Étape 1 : Introduction des données.

- Données relatives au projet (Localisation géographique, Description).
- Données relatives à l'enveloppe du bâtiment (volume, usage du bâtiment, conditions de confort interne).
- Définition des parois opaques et vitrées (surface nette, orientation, composition, etc).
- Description du dispositif de renouvellement d'air et de chauffage. Calcul et récupération des résultats.

Étape 2 :

Une fois les données introduites, l'application permet de vérifier la conformité du projet de construction par rapport à la réglementation thermique algérienne, et de dimensionner le système de chauffage. L'application offre la possibilité de générer un rapport détaillé. Le

rapport affiche une synthèse des différentes valeurs et les résultats de la vérification réglementaire.

3. Présentation du capteur solaire étudié

Dans cette étude, nous avons opté pour un capteur solaire plan à air dont la configuration est classique. Il est composé des constituants suivants : (Figure I.1)

- Une couverture en verre.
- Un conduit pour la circulation de l'air.
- Une plaque absorbante noire ou absorbeur.
- Une couche formée d'un isolant thermique à l'arrière de notre capteur solaire.

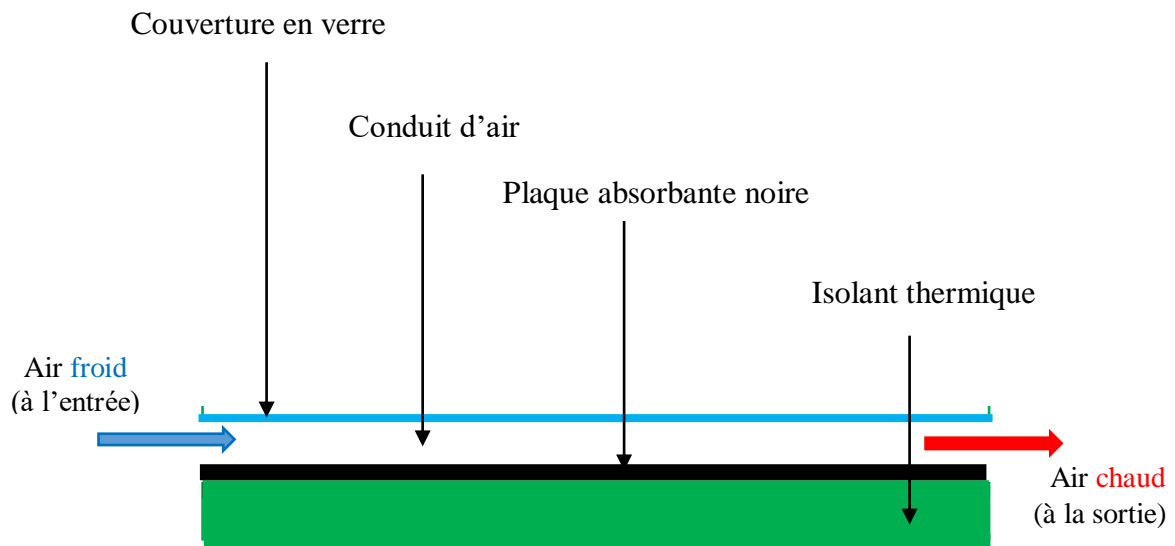


Figure II.3 : Configuration du capteur solaire étudié.

4. Équations du capteur solaire étudié

En se référant au schéma du capteur solaire plan à air (figure II.2) et selon les travaux de [21, 22,23,24,25,26,27,28,29,30,31], avec l'hypothèse que le régime soit stationnaire et que l'écoulement soit unidirectionnel, la modélisation de notre dispositif solaire utilise les équations mathématiques suivantes. Il s'agit d'un ensemble d'équations qui reposent sur les transferts de chaleur et de matière.

4.1 Équation au niveau de la vitre

$$h_{r,pv}(T_p - T_v) + h_{c,av}(T_{air} - T_v) + h_{vent,va}(T_{amb} - T_v) + h_{r,vciel}(T_{ciel} - T_v) + \alpha_v \cdot R_{ay} = 0$$

[21]

où :

$h_{r,pv}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre ($W/m^2.K$).

$h_{c,av}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air dans le capteur solaire et la vitre ($W/m^2.K$).

$h_{vent,va}$: Coefficient de perte de chaleur par convection de la vitre causée par le vent ($W/m^2.K$).

$h_{r,vciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la vitre et le ciel ($W/m^2.K$).

T_p : Température de la plaque absorbante (K).

T_v : Température de la vitre (K).

T_{air} : Température de l'air qui traverse le capteur solaire (K).

T_{amb} : Température ambiante (K).

T_{ciel} : Température du ciel (K).

α_v : Absorbance de la couverture (-).

R_{ay} : Rayonnement solaire incident sur le capteur solaire (W/m^2).

La température ambiante peut être calculée par l'équation suivante [28] :

$$T_{amb} = \frac{T_{amb}^{max} + T_{amb}^{min}}{2} + \frac{T_{amb}^{max} - T_{amb}^{min}}{2} \cdot \sin\left(\pi \frac{t - 1}{12}\right)$$

où :

T_{amb}^{max} : Température ambiante maximale (K).

T_{amb}^{min} : Température ambiante minimale (K).

t : Heure solaire (h).

Durant notre étude, l'heure du lever et l'heure du coucher du soleil à M'Sila pour n'importe quelle journée de l'année a été obtenue via le site : <https://fr.planetcalc.com/300/>.

Quant aux températures maximale et minimale, elles ont été obtenues sur le site : Simulation de données climatiques et météorologiques historiques pour M'sila - meteoblue

4.2 Équation au niveau de l'air (entre l'absorbeur et la vitre)

Il s'agit de l'équation différentielle totale de premier ordre suivante [21] :

$$d_{vp} \cdot G_a \cdot C_a \frac{dT_{air}}{dx} = h_{c,va}(T_v - T_{air}) + h_{c,pa}(T_p - T_{air})$$

où :

d_{vp} : Distance entre la vitre et la plaque absorbante du capteur solaire (m).

G_a : Débit massique spécifique de l'air qui traverse le capteur solaire ($kg/s.m^2$).

C_a : Chaleur spécifique de l'air ($J/kg.K$).

T_{air} : Température de l'air dans le capteur solaire (K)

x : Distance selon l'écoulement de l'air dans le capteur solaire (m).

$h_{c,va}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'air dans le capteur solaire ($W/m^2.K$).

T_v : Température de la vitre (K).

T_{air} : Température de l'air qui traverse le capteur solaire (K).

$h_{c,pa}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire ($W/m^2.K$).

T_p : Température de la plaque absorbante (K).

4.3 Équation au niveau de l'absorbeur (plaque absorbante)

$$h_{c,pa}(T_{air} - T_p) + h_{r,pv}(T_v - T_p) + U_{bas}(T_{amb} - T_p) + (\tau\alpha).R_{ay} = 0 \quad [21]$$

où :

$h_{c,pa}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire ($W/m^2.K$).

T_{air} : Température de l'air qui traverse le capteur solaire (K).

T_p : Température de la plaque absorbante (K).

$h_{r,pv}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre ($W/m^2.K$).

T_v : Température de la vitre (K).

U_{bas} : Coefficient de pertes de chaleur par le bas du capteur solaire à l'air ambiant ($W/m^2.K$).

T_{amb} : Température ambiante (K).

$(\tau\alpha)$: Produit Transmission-absorption du système Vitre/Absorbeur (-).

R_{ay} : Rayonnement solaire incident sur le capteur solaire (W/m^2).

4.4 Pertes de chaleur par le bas du capteur solaire à l'air ambiant

Le coefficient de pertes de chaleur par le bas du capteur solaire à l'air ambiant peut être déterminé simplement par l'équation suivante [23,30] :

$$U_b = \frac{1}{\frac{d_{isolant}}{\lambda_{isolant}} + \frac{d_{tôle}}{\lambda_{tôle}} + \frac{1}{h_{vent}}}$$

où :

U_b : Coefficient de pertes de chaleur par le bas du capteur solaire à l'air ambiant ($W/m^2.K$).

$d_{isolant}$: Épaisseur de l'isolant du capteur solaire (m).

$\lambda_{isolant}$: Conductivité thermique de l'isolant du capteur solaire ($W/m.K$).

$d_{tôle}$: Épaisseur du matériau du bas du capteur solaire (m).

$\lambda_{tôle}$: Conductivité thermique du matériau du bas du capteur solaire ($W/m.K$).

h_{vent} : Coefficient de transfert convectif dû au vent ($W/m^2.K$). Il est calculée à partir de l'équation [21]:

$$h_{vent} = 5.7 + 3.8 V_{vent}$$

où :

h_{vent} : Coefficient de perte de chaleur par convection dû au vent ($W/m^2.K$).

V_{vent} : Vitesse du vent (m/s).

4.5 Équations des coefficients d'échange de chaleur

4.5.1 Échange de chaleur par rayonnement entre la vitre et le ciel

Selon [21], le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre la vitre et le ciel (veloute céleste) est calculé à partir de l'équation suivante :

$$h_{r,vciel} = \varepsilon_c \sigma (T_v^2 + T_{ciel}^2) (T_v + T_{ciel})$$

où :

$h_{r,vciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la vitre et le ciel ($W/m^2.K$).

ε_v : Émissivité de la vitre (-) (Pour un verre standard, $\varepsilon_c = 0.84$).

σ : Constante de Stefan–Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$.

T_v : Température de la vitre (K).

T_{ciel} : Température du ciel (K) qui est calculée à partir de l'équation [21] :

$$T_{ciel} = 0.552 T_{amb}^{3/2}$$

où :

T_{amb} : Température ambiante (K).

4.4.2 Échange de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre

Le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre est donné par [21] :

$$h_{r,pv} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_v^2)(T_p + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1}$$

où :

$h_{r,pv}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre ($W/m^2.K$).

σ : Constante de Stefan–Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$.

T_p : Température de la plaque absorbante (K).

T_v : Température de la vitre (K).

ε_p : Émissivité de la plaque absorbante (-) (Pour une plaque noire mat, $\varepsilon_p = 0.95$).

ε_v : Émissivité de la vitre (-) (Pour un verre standard, $\varepsilon_v = 0.84$).

4.4.3 Perte de chaleur par convection de la vitre causée par le vent

Le coefficient de perte de chaleur par convection de la vitre causée par le vent est pris comme étant le coefficient de perte de chaleur par convection dû au vent :

$$h_{vent,va} = h_{vent}$$

4.4.4 Échange de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire

Le coefficient d'échange de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire est calculé à partir de la formule [21] :

$$h_{c,pa} = \frac{IN_u \lambda_a}{d_h}$$

où :

$h_{c,pa}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire ($W/m^2.K$).

IN_u : Nombre de Nusselt (-).

λ_a : Conductivité thermique de l'air ($W/m.K$).

d_h : Diamètre hydraulique (m).

Selon [21], Kays et Crawford ont proposé la formule suivante pour le calcul du nombre de Nusselt :

$$IN_u = 0.0158 IR_e^{0.8}$$

où :

IR_e : Nombre de Reynolds (-), déterminé à partir des formules classiques.

4.4.5 Transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'air dans le capteur solaire

En raison de la similitude des matériaux et de la géométrie des deux milieux : air-vitre et plaque absorbante-air, le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'air dans le capteur solaire est considéré égal au coefficient d'échange de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire [21] :

$$h_{c,va} = h_{c,pa}$$

où :

$h_{c,va}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'air dans le capteur solaire ($W/m^2.K$).

$h_{c,pa}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire ($W/m^2.K$).

5. Rendement thermique instantané du capteur solaire étudié

D'après [22,32,33] et selon les équations précédentes de notre capteur solaire plan à air, le rendement thermique instantané de ce dernier peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\eta = \frac{C_a \cdot G_a \cdot A_{capt} (T_{air(s)} - T_{amb})}{S_{capt} \cdot R_{ay}}$$

où :

η : Rendement thermique instantané du capteur solaire (-).

C_a : Chaleur spécifique de l'air ($J/kg.K$).

G_a : Débit massique spécifique de l'air qui traverse le capteur solaire (kg/s.m^2).

A_{capt} : Section transversale du capteur solaire (m^2).

$T_{\text{air(s)}}$: Température de l'air à la sortie du capteur solaire (K).

T_{amb} : Température ambiante (K).

S_{capt} : Surface du capteur solaire (m^2).

R_{ay} : Rayonnement solaire incident sur le capteur solaire (W/m^2).

Le rendement thermique du capteur solaire peut être caractérisée également par le nombre F' dont l'expression classique utilisée est [24,25,30,34] :

$$F' = \frac{h_{c,pa} \cdot (U_b + 2 h_{r,pv} + h_{c,pa})}{(U_b + h_{c,av} + h_{r,pv}) (h_{c,av} + h_{r,pv}) - h_{r,pv}^2}$$

où :

F' : Coefficient d'efficacité local du transfert air-absorbeur (-).

$h_{c,pa}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire ($\text{W/m}^2.\text{K}$).

U_b : Coefficient de pertes de chaleur par le bas du capteur solaire à l'air ambiant ($\text{W/m}^2.\text{K}$).

$h_{r,pv}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre ($\text{W/m}^2.\text{K}$).

$h_{c,va}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'air dans le capteur solaire ($\text{W/m}^2.\text{K}$).

6. Résolution

Dans cette modeste recherche, on s'intéresse aux variations de la température de l'air à la sortie du capteur solaire plan à air étudié et du rendement thermique instantané du dispositif thermique lui-même. En outre, la simulation du rayonnement solaire incident sur l'appareil pour plusieurs inclinaisons fait bien partie de l'objectif de cette investigation théorique.

Pour ce faire, d'autres équations trouvées dans la littérature et dans des travaux antérieurs sont nécessaires pour la résolution des équations du capteur solaire. En effet [24, 25, 30] :

$$\Delta T_{\text{air}} = T_{\text{air(s)}} - T_{\text{air(e)}} = \frac{P_u}{G_a \cdot A_{\text{capt}} \cdot C_a}$$

où :

ΔT_{air} : Variation de température de l'air dans le capteur solaire (K).

$T_{\text{air(s)}}$: Température de l'air à la sortie du capteur solaire (K).

$T_{\text{air(e)}}$: Température de l'air à l'entrée du capteur solaire (K).

P_u : Gain d'énergie utile fournie par le capteur solaire (W).

G_a : Débit massique spécifique de l'air qui traverse le capteur solaire (kg/s.m^2).

A_{capt} : Section transversale du capteur solaire (m^2).

C_a : Chaleur spécifique de l'air (J/kg.K).

Le gain d'énergie (ou puissance utile) fournie par le capteur solaire est donné par [24, 25, 30,34] :

$$P_u = S_{\text{capt}} F_R [R_{\text{ay}} (\tau\alpha) - U_L (T_{\text{air}(e)} - T_{\text{amb}})]$$

où :

P_u : Gain d'énergie fournie par le capteur solaire (W).

S_{capt} : Surface du capteur solaire (m^2).

F_R : Coefficient global de transfert air-absorbeur (-).

R_{ay} : Rayonnement solaire incident sur le capteur solaire (W/m^2).

$(\tau\alpha)$: Produit Transmission-absorption du système Vitre/Absorbeur (-).

U_L : Coefficient global des pertes thermiques du capteur solaire ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$).

$T_{\text{air}(e)}$: Température de l'air à l'entrée du capteur solaire (K).

T_{amb} : Température ambiante (K).

Afin de calculer le gain d'énergie fournie par le capteur solaire, les trois calculs ci-dessous sont indispensables :

Il y a le coefficient global des pertes thermiques du capteur solaire qui est utilisé par la plupart des chercheurs, dans le calcul des capteurs solaires, à travers l'équation suivante [23,24, 25, 30,34] :

$$U_L = U_b (h_{c,pa}^2 + h_{c,pa} \cdot h_{r,pv} + h_{c,pa} \cdot h_{r,pv})$$

où :

U_L : Coefficient global des pertes thermiques du capteur solaire ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)

U_b : Coefficient de pertes de chaleur par le bas du capteur solaire à l'air ambiant ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$).

$h_{c,pa}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la plaque absorbante et l'air dans le capteur solaire ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$).

$h_{r,pv}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$).

Il y a également le coefficient global de transfert air-absorbeur (-) qui est calculé par [23,24, 25, 30,34] :

$$F_R = \frac{C_a \cdot G_a \cdot A_{\text{capt}}}{S_{\text{capt}} \cdot U_L} \left[1 - e^{\left(\frac{-F' \cdot U_L \cdot S_{\text{capt}}}{C_a \cdot G_a \cdot A_{\text{capt}}} \right)} \right]$$

où :

F_R : Coefficient global de transfert air-absorbeur (-).

C_a : Chaleur spécifique de l'air ($\text{J}/\text{kg}.\text{K}$).

G_a : Débit massique spécifique de l'air qui traverse le capteur solaire ($\text{kg}/\text{s}.\text{m}^2$).

A_{capt} : Section transversale du capteur solaire (m^2).

S_{capt} : Surface du capteur solaire (m^2).

F' : Coefficient d'efficacité local du transfert air-absorbeur (-).

U_L : Coefficient global des pertes thermiques du capteur solaire ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$).

Le coefficient F_R est utilisé également par la plupart des chercheurs, dans le domaine des capteurs solaires.

Enfin, la température de l'air à la sortie du capteur solaire est déduite comme suit :

$$T_{\text{air}(s)} = \frac{P_u}{G_a \cdot A_{\text{capt}} \cdot C_a} - T_{\text{air}(e)}$$

ou encore :

$$T_{\text{air}(s)} = \frac{P_u}{G_a \cdot A_{\text{capt}} \cdot C_a} - T_{\text{amb}}$$

tout en considérant l'approximation :

$$T_{\text{air}(e)} \approx T_{\text{amb}}$$

La température de l'air à la sortie du capteur solaire peut être déterminée à partir de l'équation du rendement thermique instantané, vue précédemment :

$$T_{\text{air}(s)} = \frac{\eta \cdot S_{\text{capt}} \cdot R_{\text{ay}} + C_a \cdot G_a \cdot A_{\text{capt}} \cdot T_{\text{amb}}}{C_a \cdot G_a \cdot A_{\text{capt}}}$$

où :

$T_{\text{air}(s)}$: Température de l'air à la sortie du capteur solaire (K).

η : Rendement thermique instantané du capteur solaire (-).

S_{capt} : Surface du capteur solaire (m^2).

R_{ay} : Rayonnement solaire incident sur le capteur solaire (W/m^2).

C_a : Chaleur spécifique de l'air ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$).

G_a : Débit massique spécifique de l'air qui traverse le capteur solaire ($\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$).

A_{capt} : Section transversale du capteur solaire (m^2).

T_{amb} : Température ambiante (K).

CHAPITRE III :
Résultats et discussion

CHAPITRE III : Résultats et discussion

1. Introduction

Dans ce dernier chapitre (chapitre 3), on va présenter les résultats de la modélisation présentée dans le chapitre précédent (chapitre 2). Il s'agit des variations de principales grandeurs qui concernent le capteur solaire étudié dans ce travail, à savoir le rayonnement solaire global que reçoit notre dispositif solaire sous des inclinaisons différentes, la température de l'air ambiant à M'Sila durant les douze mois de l'année et enfin la température de l'air qui sort du capteur solaire. Toutes les variations trouvées et représentées tiennent en compte la durée d'ensoleillement pendant des journées représentatives.

2. Variation de la température ambiante à M'Sila

2.1. Variations des températures ambiantes maximale et minimale à M'Sila

Les deux courbes de la figure III.1 représentent les variations des températures maximale et minimale de l'air ambiant (air extérieur). Il s'agit d'une évolution annuelle allant du premier mois (Janvier) au dernier mois (Décembre), dans la ville de M'Sila, Algérie. La figure III.1 indique que 39 °C est la plus grande valeur de température et est obtenue en Juillet, et que la plus petite valeur est obtenue pendant les deux premiers mois de l'année (Janvier et Février) et est voisine de 4 °C. La troisième courbe (en gris) représente la variation de la différence entre la maximale et minimale. La différence est presque stable pendant l'année où la différence est entre 10 et 13 °C, cependant elle est plus importante (jusqu'à 17 °C) aux mois de Juin, Juillet et août.

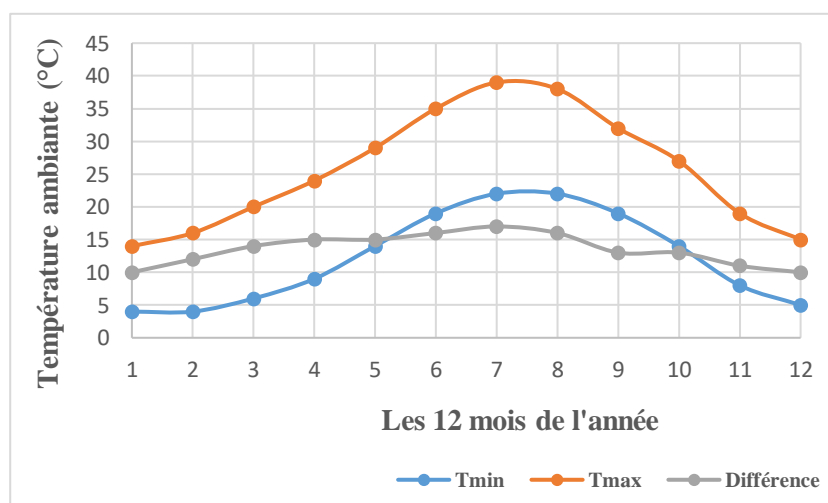


Figure III.1 : Variations des températures ambiantes minimales et maximales pendant une année à M'Sila.

On peut voir également la variation de la température ambiante pour chaque mois de l'année, sur la figure III.2, ci-dessous. On peut quantifier alors les températures maximale (rectangles rouges) et minimale (rectangles bleus) pour chaque mois. En effet, le plus grand écart entre la maximale et la minimale est obtenu au mois de Juillet où la valeur est de 17 °C, alors que le petit écart est obtenu aux mois de Janvier et Décembre où la valeur est de 10 °C.

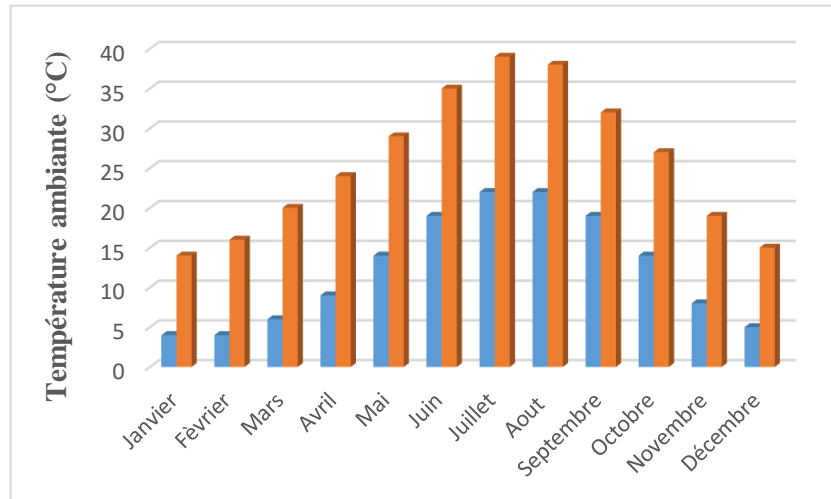


Figure III.2 : Écart mensuel entre les températures maximale et minimale de l'air ambiant, à M'Sila.

2.2. Variation de la température ambiante à M'Sila

Les cinq figures qui suivent (Figures III.3, III.4, III.5, III.6 et III.7) montrent les variations de la température de l'air extérieur pour cinq journées représentatives (15 Juin ; 15 Juillet ; 15 Août ; 15 Septembre et 15 Décembre). Pour chacune des courbes, le premier point correspond au lever du soleil et le dernier correspond au coucher du soleil. Les courbes ont une forme d'une cloche et sont symétriques, sauf pour les deux journées de Septembre et de Décembre où la durée d'ensoleillement est plus courte : Le coucher de soleil vient tôt.

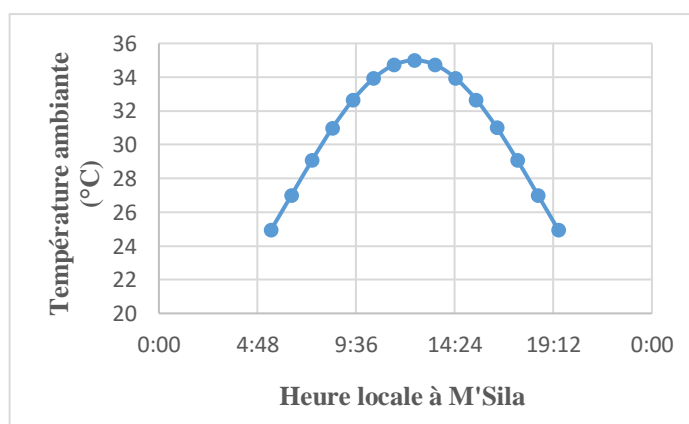


Figure III.3 : Variation de la température ambiante durant le 15 Juin, à M'Sila.

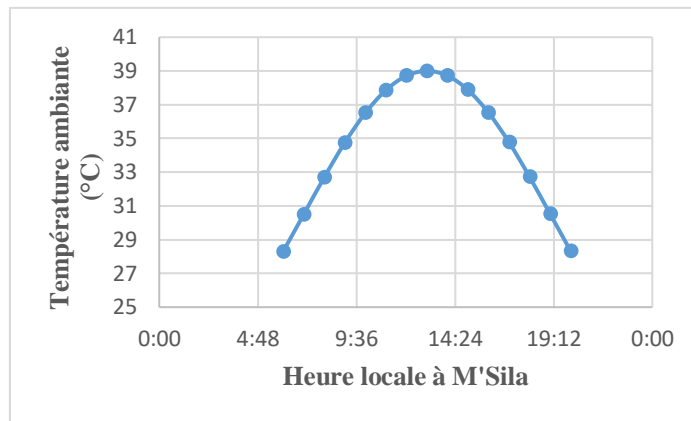


Figure III.4 : Variation de la température ambiante durant le 15 Juillet, à M'Sila.

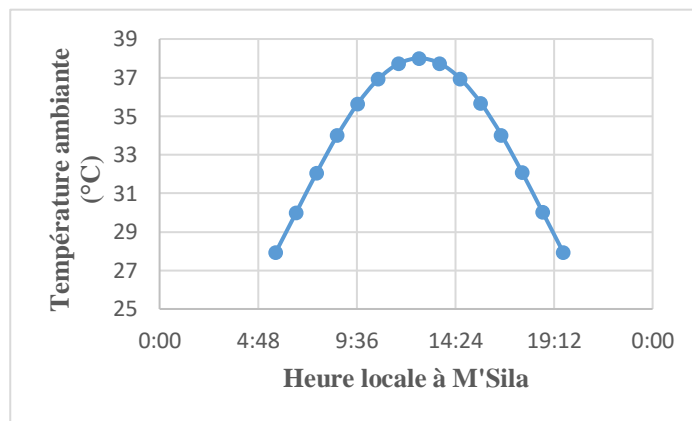


Figure III.5 : Variation de la température ambiante durant le 15 Août, à M'Sila.

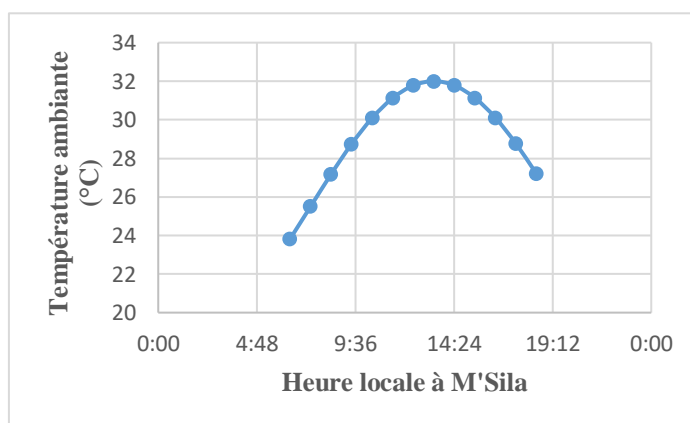


Figure III.6 : Variation de la température ambiante durant le 15 Septembre, à M'Sila.

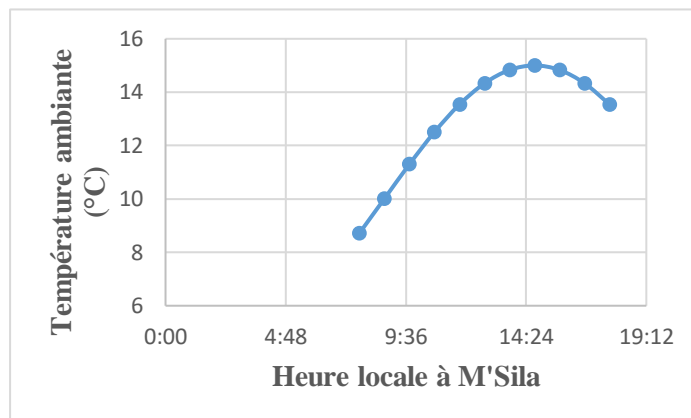


Figure III.7 : Variation de la température ambiante durant le 15 Décembre, à M'Sila.

3. Variation du rayonnement solaire global à M'Sila

3.1. Effet de l'inclinaison du capteur solaire étudié

Dans ce qui suit, on présente les résultats qui concernent le rayonnement solaire global que reçoit notre capteur solaire étudié. En effet, les différentes variations de ce paramètre physique important sont forme de graphes et dont les valeurs sont portées dans des tableaux.

Le lieu est la ville de M'Sila, bien entendu, et le dispositif solaire est simulé pour quatre inclinaisons : 0° (position horizontale) ; 30° ; 35 ; 45° et 60°. Les calculs ont concerné trois journées dans chaque mois, durant l'année. Les valeurs maximales sont mentionnées en couleur jaune.

Mois de Janvier à M'Sila, Algérie

Tableau III.1 : Valeurs du rayonnement solaire du 1^{er} janvier à M'Sila.

heures	0°	30°	45°	60°
8	112	274	331	368
9	286	533	611	651
10	429	729	817	853
11	522	852	944	976
12	554	894	987	1018
13	522	852	944	976
14	429	729	817	853
15	286	533	611	651
16	112	274	331	368

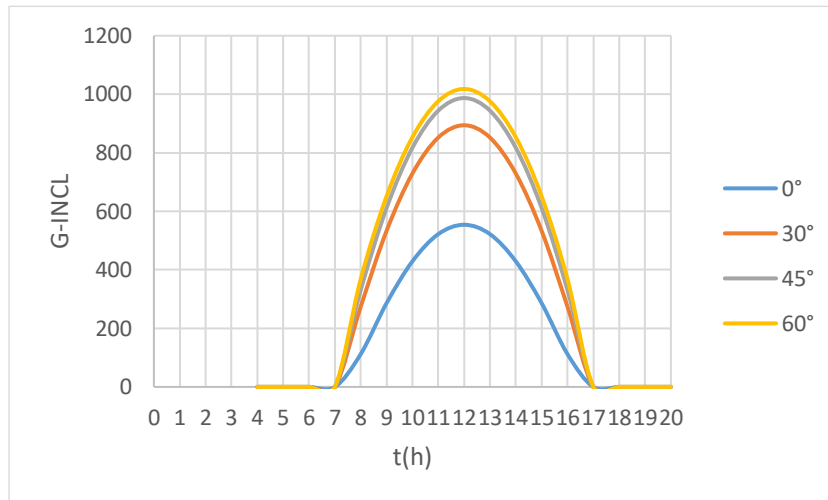


Figure III.8 : Variation du rayonnement solaire pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Janvier à M'Sila)

Tableau III.2 : Valeurs du rayonnement solaire du 15 janvier à M'Sila.

heures	0°	30°	45°	60°
8	136	303	361	396
9	316	562	637	672
10	463	759	842	872
11	557	883	969	995
12	589	925	1012	1037
13	557	883	969	995
14	463	759	842	872
15	316	562	637	672
16	136	303	361	396

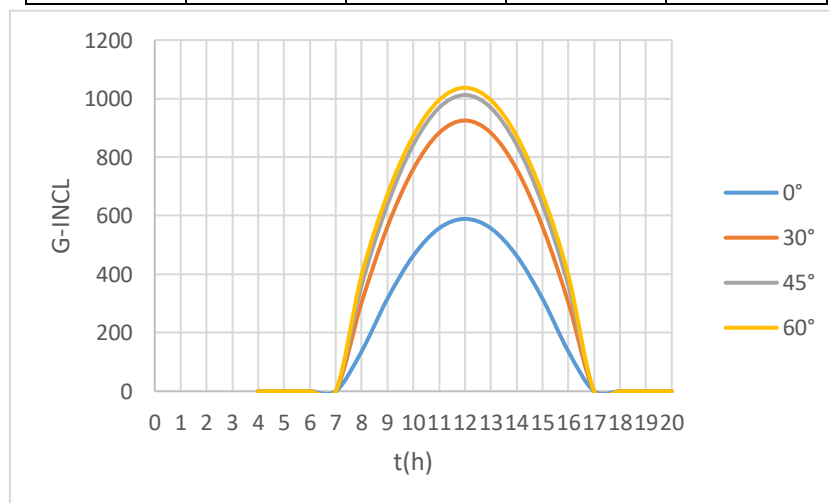
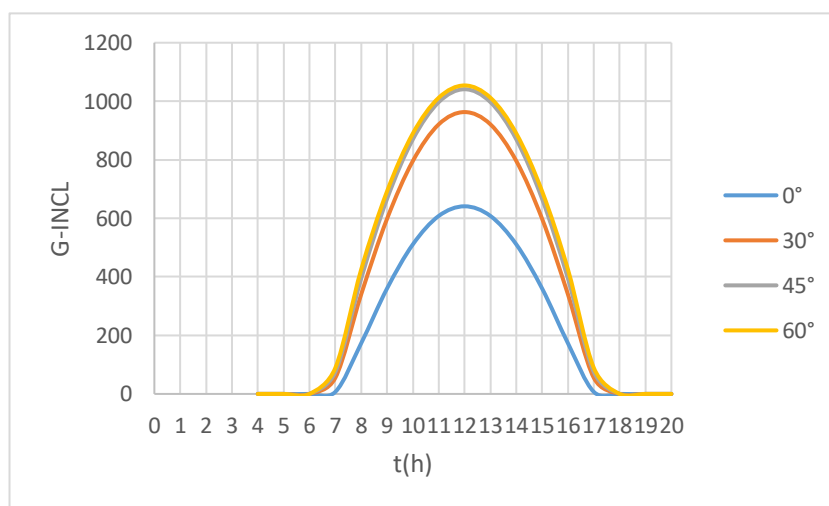


Figure III.9 : Variation du rayonnement solaire pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Janvier à M'Sila)

Tableau III.3 : Valeurs du rayonnement solaire du 28 Janvier à M'Sila.

heures	0°	30°	45°	60°
7	7	55	75	89
8	173	340	394	425
9	360	598	666	692
10	511	796	870	890
11	608	921	997	1012
12	641	963	1041	1054
13	608	921	997	1012
14	511	796	870	890
15	360	598	666	692
16	173	340	394	425
17	7	55	75	89

**Figure III.10** : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Janvier à M'Sila)

A travers les courbes et les données du mois de Janvier, nous remarquons que durant le mois de Janvier à Msila, la valeur du rayonnement solaire reçu par notre capteur solaire est plus importante lorsque l'angle d'inclinaison de ce dernier est égal à 60°.

Mois de Février à M'Sila, Algérie

Tableau III.4 : Valeurs du rayonnement solaire du 1^{er} Février à M'Sila.

heures	0°	30°	45°	60°
7	13	67	89	105
8	187	352	405	432
9	377	610	675	697
10	528	808	878	894

11	626	933	1006	1016
12	659	976	1049	1058
13	626	933	1006	1016
14	528	808	878	894
15	377	610	675	697
16	187	352	405	432
17	13	67	89	105

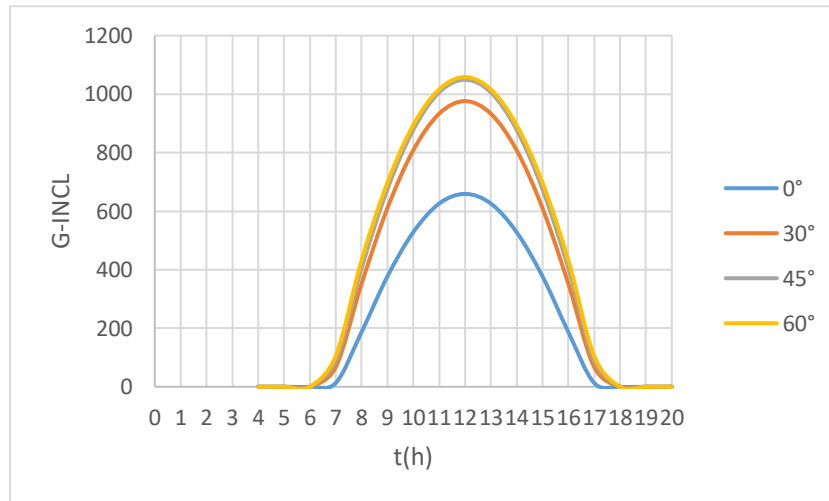


Figure III.11 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Février à M’Sila)

Tableau III.5 : Valeurs du rayonnement solaire du 15 janvier à M’Sila.

heures	0°	30°	45°	60°
7	46	112	136	152
8	244	395	438	453
9	440	652	702	708
10	596	850	904	902
11	695	976	1031	1023
12	730	1019	1075	1065
13	695	976	1031	1023
14	596	850	904	902
15	440	652	702	708
16	244	395	438	453
17	46	112	136	152

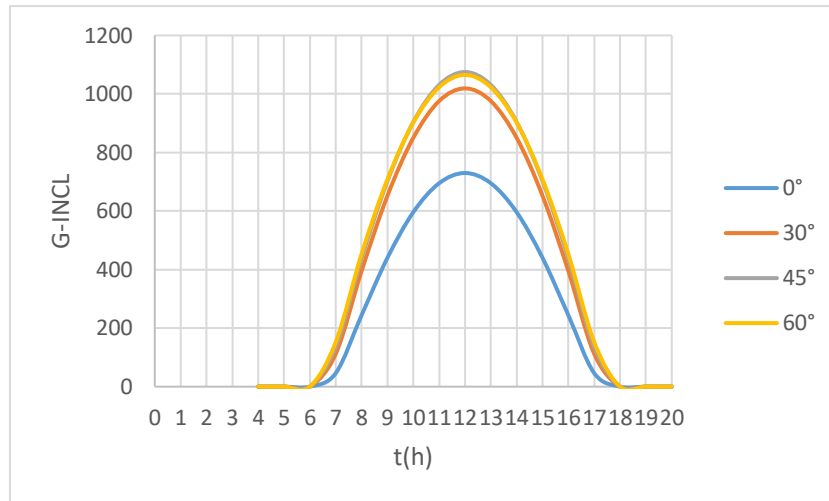


Figure III.12 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Février à M’Sila)

Tableau III.6 : 28 Février

heures	0°	30°	45°	60°
7	90	152	171	180
8	302	432	460	460
9	503	686	718	707
10	662	884	918	897
11	763	1010	1045	1017
12	798	1053	1089	1058
13	763	1010	1045	1017
14	662	884	918	897
15	503	686	718	707
16	302	432	460	460
17	90	152	171	180

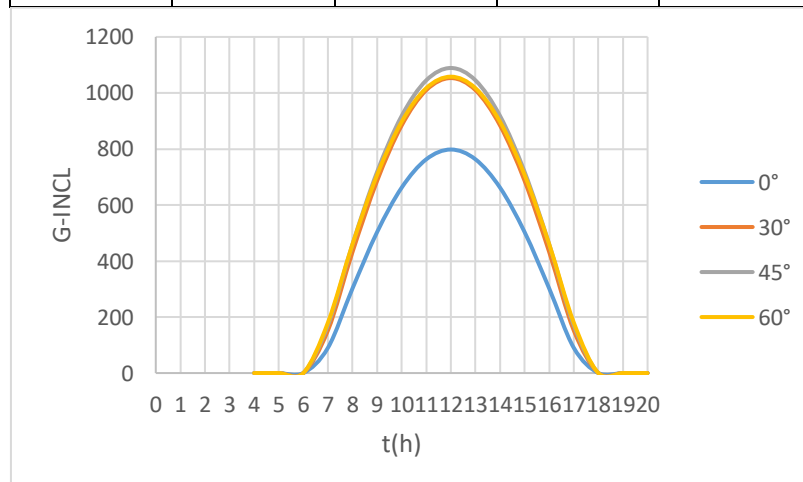


Figure III.13 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Février à M’Sila)

A travers les courbes et les données dont nous disposons, nous remarquons qu'au 1^{er} Février dans la ville de Msila, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 60°, mais pour les jours 15 et 28, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 45°.

Mois de Mars à M'Sila, Algérie

Tableau III.7 : 1^{er} Mars

heures	0°	30°	45°	60°
7	93	155	173	181
8	307	434	461	460
9	508	688	719	706
10	667	886	919	896
11	768	1012	1046	1016
12	803	1055	1089	1057
13	768	1012	1046	1016
14	667	886	919	896
15	508	688	719	706
16	307	434	461	460
17	93	155	173	181

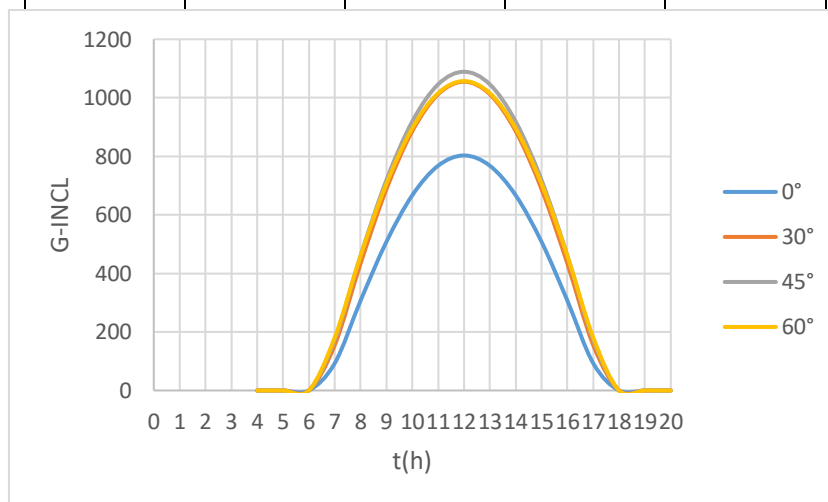


Figure III.14 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Mars à M'Sila)

Tableau III.8 : 15 Mars

heures	0°	30°	45°	60°
7	148	191	196	191
8	371	465	472	452
9	574	715	724	689
10	734	911	921	875
11	836	1036	1046	993
12	871	1079	1089	1034
13	836	1036	1046	993
14	734	911	921	875
15	574	715	724	689
16	371	465	472	452
17	148	191	196	191

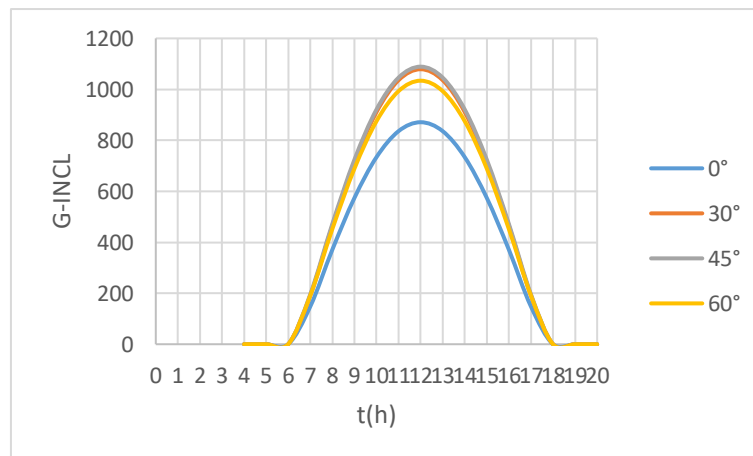


Figure III.15 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Mars à M'Sila)

Tableau III.9 : 28 Mars

heures	0°	30°	45°	60°
6	12	6	5	5
7	201	217	208	187
8	425	485	473	434
9	628	730	718	663
10	788	923	911	844
11	889	1047	1034	960
12	924	1089	1076	999
13	889	1047	1034	960
14	788	923	911	844
15	628	730	718	663
16	425	485	473	434
17	201	217	208	187

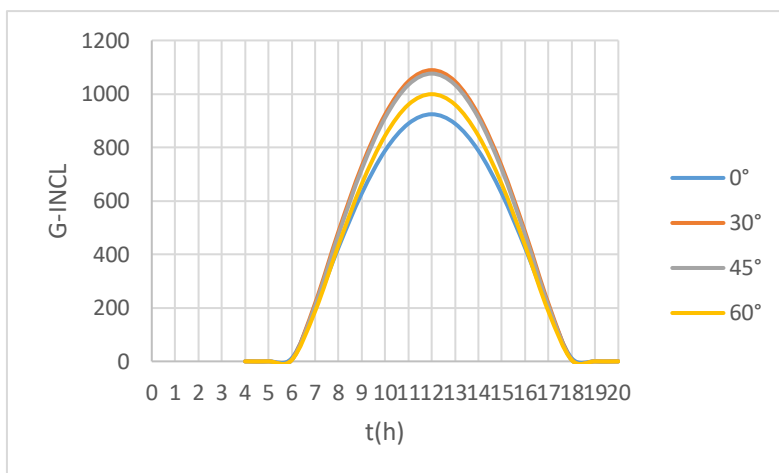


Figure III.16 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Mars à M’Sila)

A travers les courbes, nous remarquons que les 1^{er} et 15 mars dans la région de M’Sila, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 45°, mais pour le 28^{ème} jour, la valeur du rayonnement solaire le rayonnement est plus importante lorsque l'angle d'inclinaison est de 30°.

Mois d’Avril à M’Sila, Algérie

Tableau III.10 : 1^{er} Avril

heures	0°	30°	45°	60°
6	21	11	8	8
7	216	224	209	183
8	441	490	472	427
9	643	733	714	653
10	802	925	905	833
11	904	1048	1028	947
12	939	1090	1070	987
13	904	1048	1028	947
14	802	925	905	833
15	643	733	714	653
16	441	490	472	427
17	216	224	209	183
18	21	11	8	8

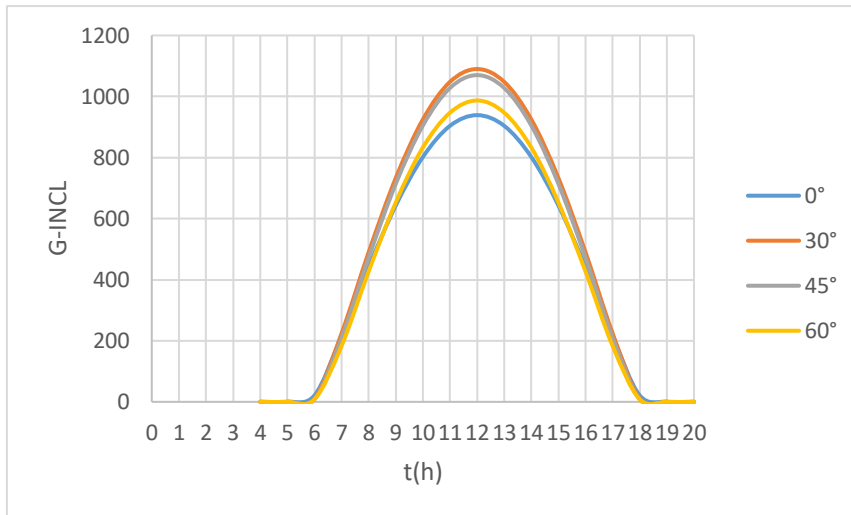


Figure III.17 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Avril à M'Sila)

Tableau III.11 : 15 Avril

heures	0°	30°	45°	60°
6	58	26	18	18
7	266	243	211	168
8	489	500	463	399
9	689	736	696	616
10	845	923	881	789
11	945	1043	1000	900
12	980	1084	1041	938
13	945	1043	1000	900
14	845	923	881	789
15	689	736	696	616
16	489	500	463	399
17	266	243	211	168
18	58	26	18	18

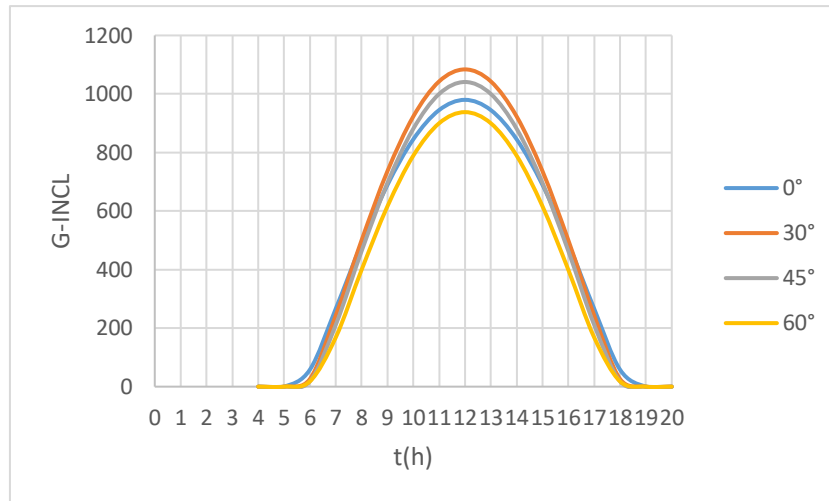


Figure III.18 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Avril à M'Sila)

Tableau III.12 : 28 Avril

heures	0°	30°	45°	60°
6	94	39	27	26
7	306	255	208	152
8	525	503	450	371
9	720	732	674	579
10	873	913	854	745
11	971	1030	969	853
12	1005	1070	1009	890
13	971	1030	969	853
14	873	913	854	745
15	720	732	674	579
16	525	503	450	371
17	306	255	208	152
18	94	39	27	26

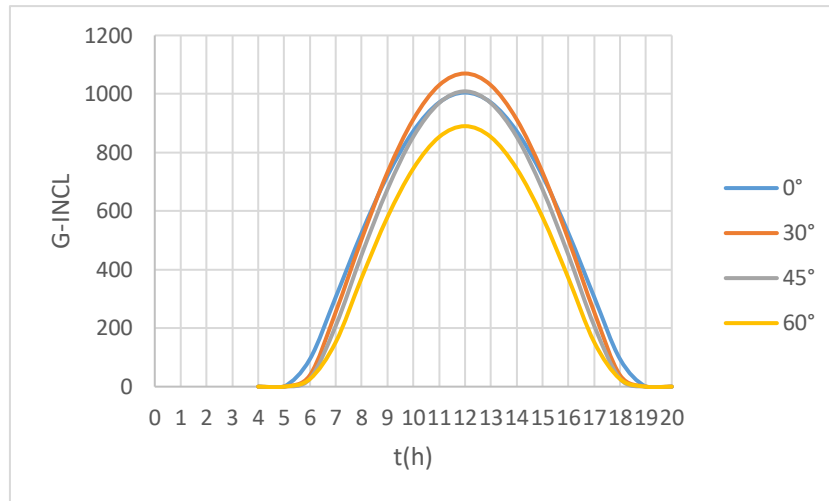


Figure III.19 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Avril à M’Sila)

A travers les courbes, nous remarquons que les jours 1, 15 et 28 du mois d'avril dans la région de Msila, la valeur du rayonnement solaire est supérieure lorsque l'angle d'inclinaison est de 30°.

Mois de Mai à M’Sila, Algérie

Tableau III.13 : 1^{er} mai

heures	0°	30°	45°	60°
6	101	41	29	28
7	313	257	207	148
8	531	503	446	365
9	725	730	669	570
10	878	910	847	736
11	975	1026	962	842
12	1009	1066	1001	879
13	975	1026	962	842
14	878	910	847	736
15	725	730	669	570
16	531	503	446	365
17	313	257	207	148
18	101	41	29	28

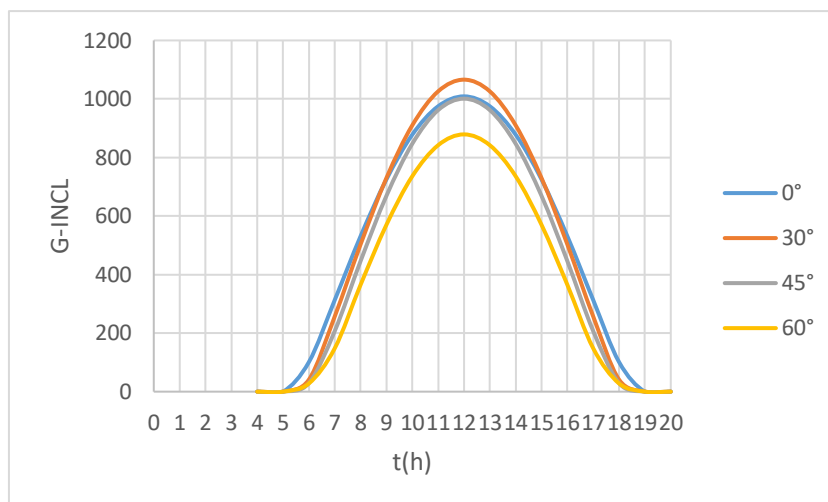


Figure III.20 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Mai à M’Sila)

Tableau III.14 : 15 Mai

heures	0°	30°	45°	60°
6	133	53	36	35
7	344	264	202	131
8	556	501	431	338
9	745	720	645	534
10	894	894	816	693
11	989	1006	927	795
12	1022	1045	965	831
13	989	1006	927	795
14	894	894	816	693
15	745	720	645	534
16	556	501	431	338
17	344	264	202	131
18	133	53	36	35

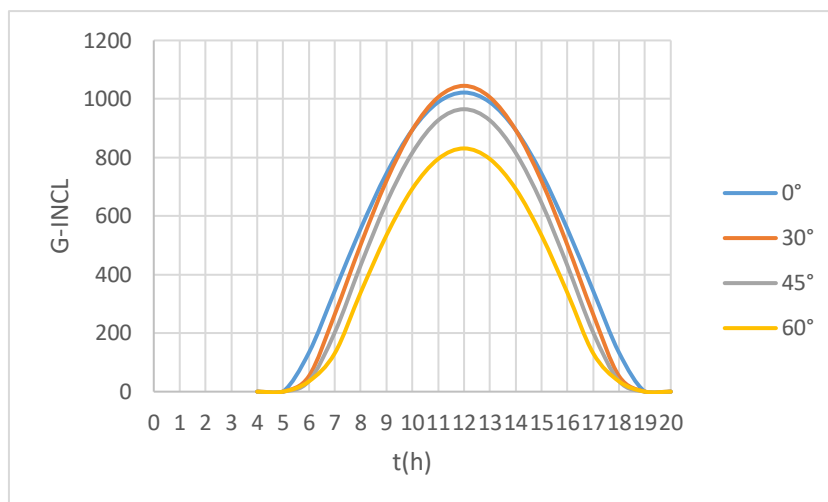


Figure III.21 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Mai à M’Sila)

Tableau III.15 : 28 Mai

heures	0°	30°	45°	60°
5	6	3	3	3
6	155	61	61	39
7	362	267	267	119
8	570	497	497	318
9	755	709	709	507
10	900	879	879	661
11	994	988	988	760
12	1026	1026	1026	795
13	994	988	988	760
14	900	879	879	661
15	755	709	709	507
16	570	497	497	318
17	362	267	267	119
18	155	61	61	39
19	6	3	3	3

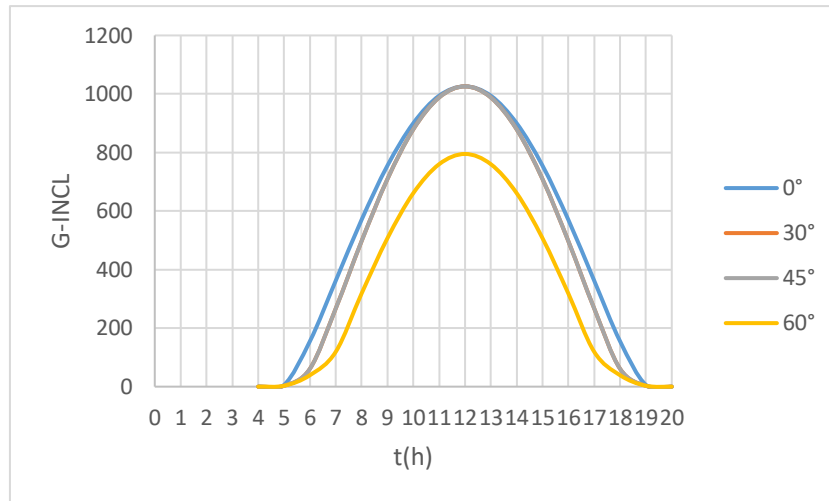


Figure III.22 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Mai à M'Sila)

A travers les courbes, nous constatons que les 1^{er}, 15 et 28 mai dans la ville de M'Sila, le rayonnement solaire est plus important lorsque l'angle d'inclinaison du capteur solaire est de 30°.

Mois de Juin à M'Sila, Algérie

Tableau III.16 : 1^{er} juin

heures	0°	30°	45°	60°
5	8	5	5	4
6	160	62	42	41
7	366	268	196	116
8	573	496	415	313
9	756	706	620	501
10	901	875	786	653
11	994	983	892	752
12	1026	1020	929	786
13	994	983	892	752
14	901	875	786	653
15	756	706	620	501
16	573	496	415	313
17	366	268	196	116
18	160	62	42	41
19	8	5	5	4

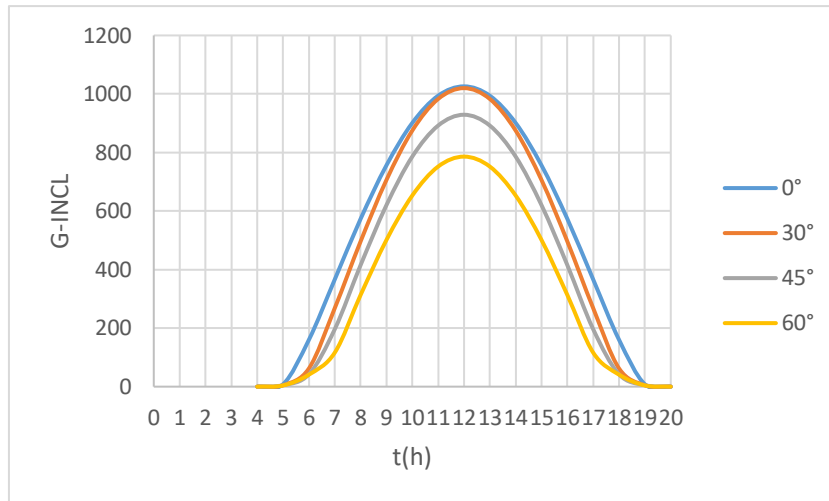


Figure III.23 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Juin à M'Sila)

Tableau III.17 : 15 Juin

heures	0°	30°	45°	60°
5	15	8	8	7
6	169	66	45	43
7	373	268	193	110
8	576	491	407	302
9	757	698	608	485
10	900	863	770	635
11	991	970	875	731
12	1023	1006	911	765
13	991	970	875	731
14	900	863	770	635
15	757	698	608	485
16	576	491	407	302
17	373	268	193	110
18	169	66	45	43
19	15	8	8	7

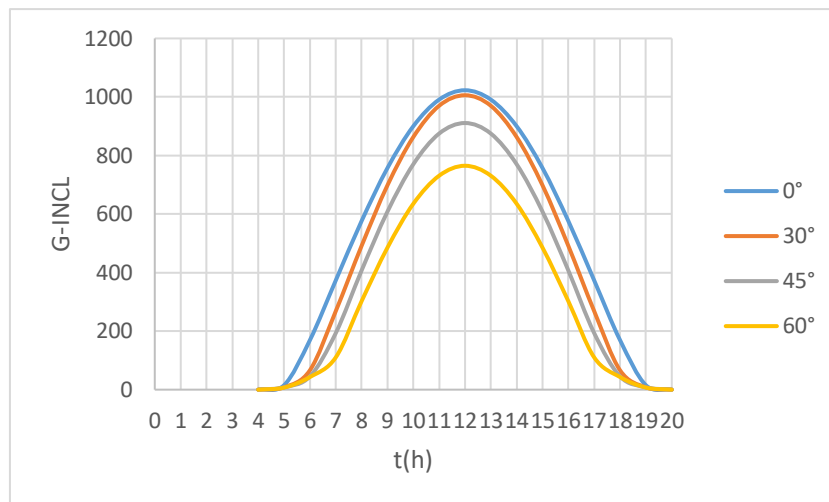


Figure III.24 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Juin à M'Sila)

Tableau III.18 : 28 Juin

heures	0°	30°	45°	60°
5	15	9	8	8
6	168	67	45	44
7	370	266	192	110
8	572	488	404	300
9	752	693	604	482
10	894	857	765	630
11	986	964	869	727
12	1017	1000	905	760
13	986	964	869	727
14	894	857	765	630
15	752	693	604	482
16	572	488	404	300
17	370	266	192	110
18	168	67	45	44
19	15	9	8	8

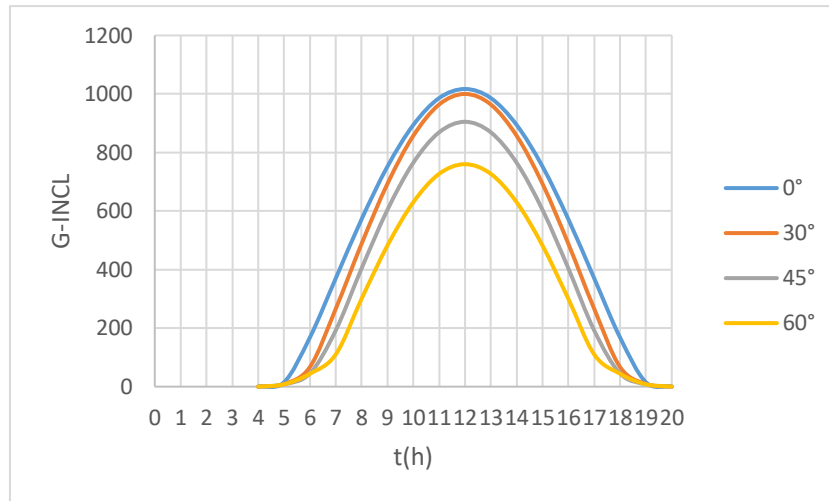


Figure III.25 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Juin à M’Sila)

A travers les courbes et les données dont nous disposons, nous remarquons que les 1^{er}, 15 et 28 juin à M’Sila, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l’angle d’inclinaison est de 0° (position horizontale).

Mois de Juillet à M’Sila, Algérie

Tableau III.19 : 1^{er} Juillet

heures	0°	30°	45°	60°
5	14	8	8	7
6	166	67	45	44
7	368	265	192	111
8	570	487	404	301
9	751	692	604	483
10	893	857	765	631
11	984	963	870	728
12	1016	1000	906	761
13	984	963	870	728
14	893	857	765	631
15	751	692	604	483
16	570	487	404	301
17	368	265	192	111
18	166	67	45	44
19	14	8	8	7

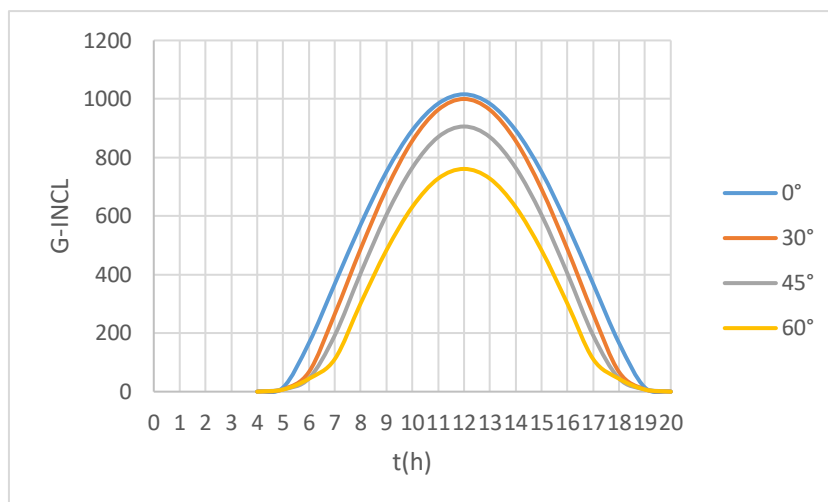


Figure III.26 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Juillet à M’Sila)

Tableau III.20 : 15 Juillet

heures	0°	30°	45°	60°
5	7	5	4	4
6	151	63	43	42
7	353	261	193	118
8	557	484	407	309
9	739	692	609	494
10	882	858	772	644
11	974	965	878	741
12	1006	1002	914	775
13	974	965	878	741
14	882	858	772	644
15	739	692	609	494
16	557	484	407	309
17	353	261	193	118
18	151	63	43	42
19	7	5	4	4

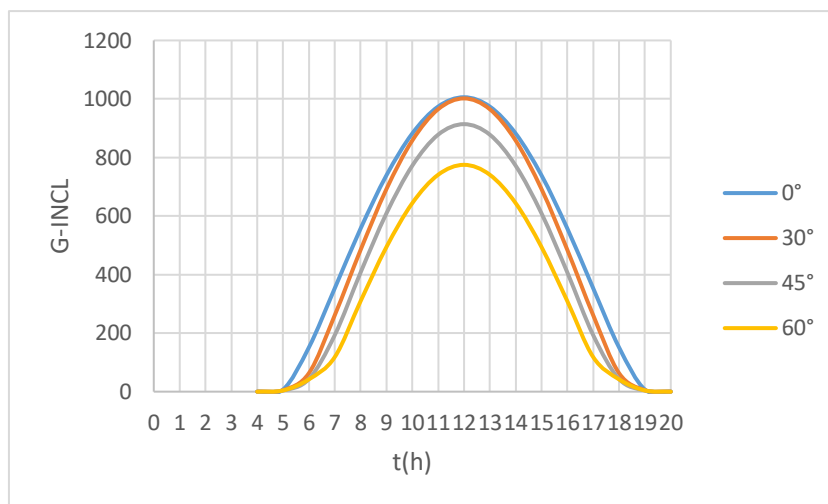


Figure III.27 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Juillet à M’Sila)

Tableau III.21 : 28 Juillet

heures	0°	30°	45°	60°
6	129	56	40	38
7	331	254	195	128
8	537	482	413	324
9	722	693	620	512
10	867	862	786	666
11	961	972	894	765
12	993	1010	931	800
13	961	972	894	765
14	867	862	786	666
15	722	693	620	512
16	537	482	413	324
17	331	254	195	128
18	129	56	40	38

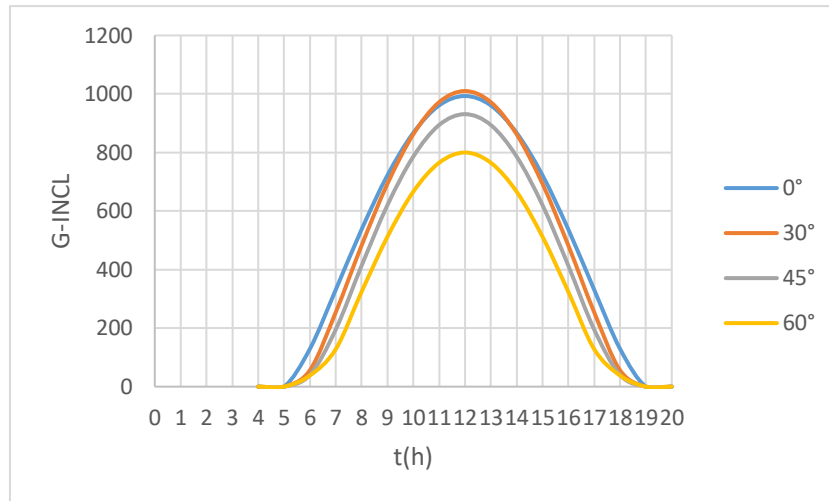


Figure III.28 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Juillet à M’Sila)

A travers les courbes et les données dont nous disposons, nous remarquons que les 1^{er} et 15 Juillet dans la région de Msila, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 0°, mais pour le 28^{ème} jour, la valeur du rayonnement solaire le rayonnement est plus important lorsque l'angle d'inclinaison est de 30°.

Mois d’Août à M’Sila, Algérie

Tableau III.22 : 1^{er} Août

heures	0°	30°	45°	60°
6	121	53	38	36
7	323	252	196	131
8	530	481	416	329
9	715	694	623	519
10	862	864	791	674
11	956	974	900	775
12	988	1012	937	809
13	956	974	900	775
14	862	864	791	674
15	715	694	623	519
16	530	481	416	329
17	323	252	196	131
18	121	53	38	36

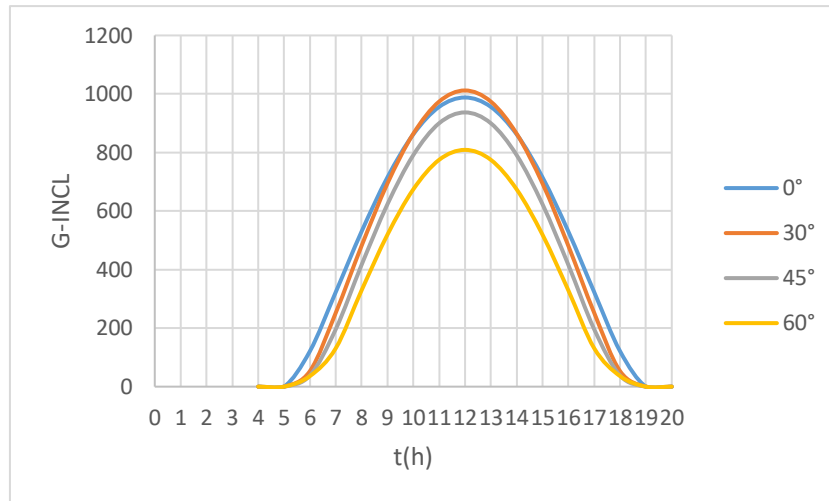


Figure III.29 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Août à M'Sila)

Tableau III.23 : 15 Août

heures	0°	30°	45°	60°
6	88	41	31	29
7	288	240	197	145
8	498	475	424	350
9	687	694	638	547
10	837	869	811	707
11	932	982	923	811
12	966	1021	961	847
13	932	982	923	811
14	837	869	811	707
15	687	694	638	547
16	498	475	424	350
17	288	240	197	145
18	88	41	31	29

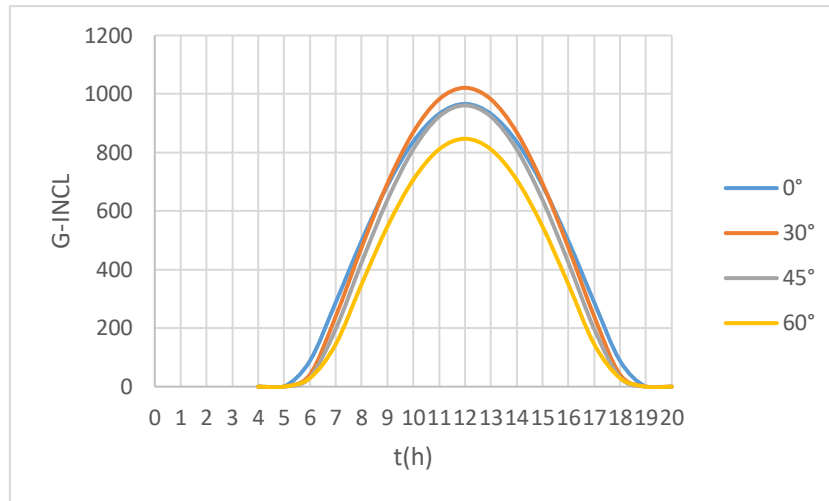


Figure III.30 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Août à M'Sila)

Tableau III.24 : 28 Août

heures	0°	30°	45°	60°
6	55	28	22	21
7	249	225	195	156
8	461	466	430	370
9	653	691	651	575
10	805	871	829	740
11	903	987	944	847
12	936	1027	984	884
13	903	987	944	847
14	805	871	829	740
15	653	691	651	575
16	461	466	430	370
17	249	225	195	156
18	55	28	22	21

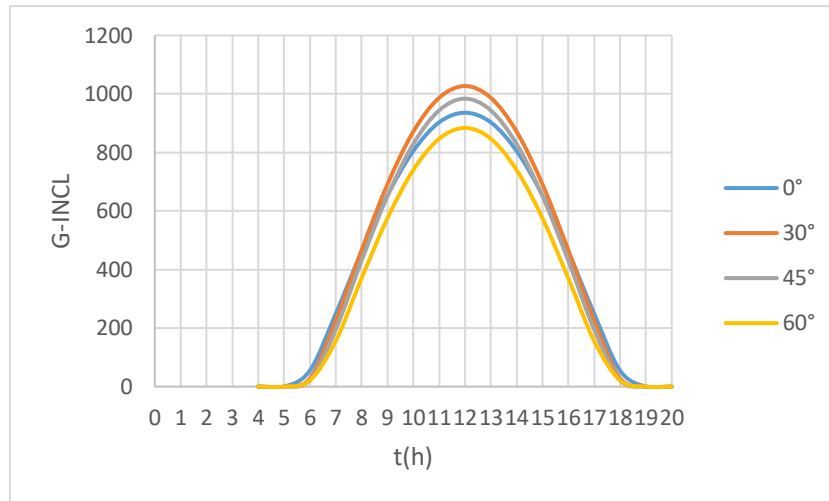


Figure III.31 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Août à M'Sila)

A travers les courbes et les données dont nous disposons, nous constatons que les jours 1^{er}, 15 et 28 Août à M'Sila, la valeur du rayonnement solaire est supérieure lorsque l'angle d'inclinaison est de 30°.

Mois de Septembre à M'Sila, Algérie

Tableau III.25 : 1^{er} Septembre

heures	0°	30°	45°	60°
6	45	24	19	18
7	236	220	194	159
8	449	463	431	376
9	641	690	655	583
10	794	871	834	750
11	892	987	950	858
12	925	1028	990	896
13	892	987	950	858
14	794	871	834	750
15	641	690	655	583
16	449	463	431	376
17	236	220	194	159
18	45	24	19	18

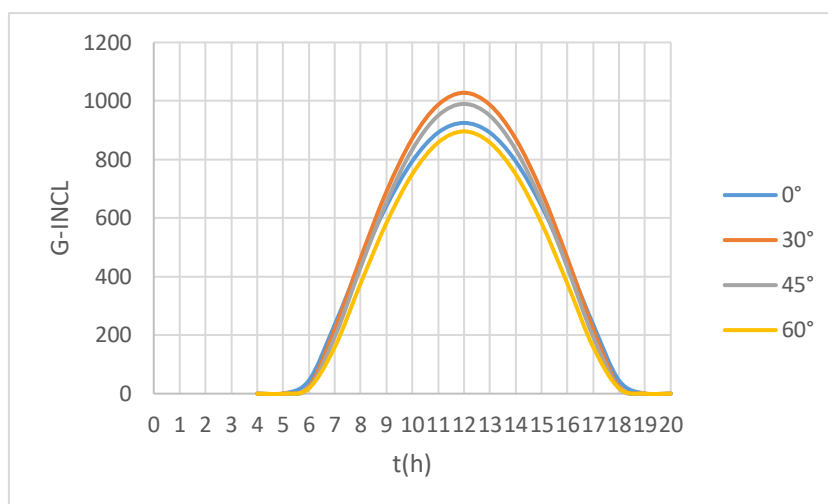


Figure III.32 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Septembre à M'Sila)

Tableau III.26 : 15 Septembre

heures	0°	30°	45°	60°
6	14	9	7	7
7	187	196	186	165
8	399	446	432	394
9	594	679	664	610
10	748	864	848	783
11	847	983	967	894
12	881	1024	1008	933
13	847	983	967	894
14	748	864	848	783
15	594	679	664	610
16	399	446	432	394
17	187	196	186	165
18	14	9	7	7

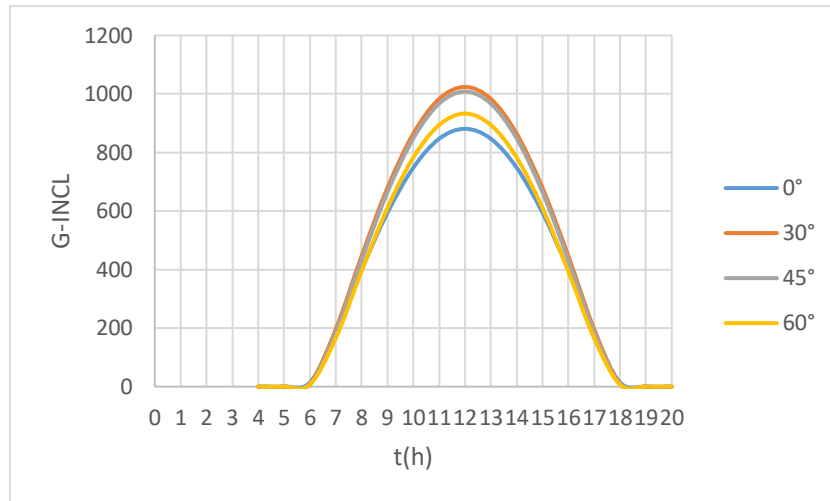


Figure III.33 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Septembre à M'Sila)

Tableau III.27 : 28 Septembre

heures	0°	30°	45°	60°
7	139	169	171	164
8	348	424	427	405
9	543	662	666	630
10	697	851	855	808
11	796	972	976	922
12	830	1013	1017	961
13	796	972	976	922
14	697	851	855	808
15	543	662	666	630
16	348	424	427	405
17	139	169	171	164

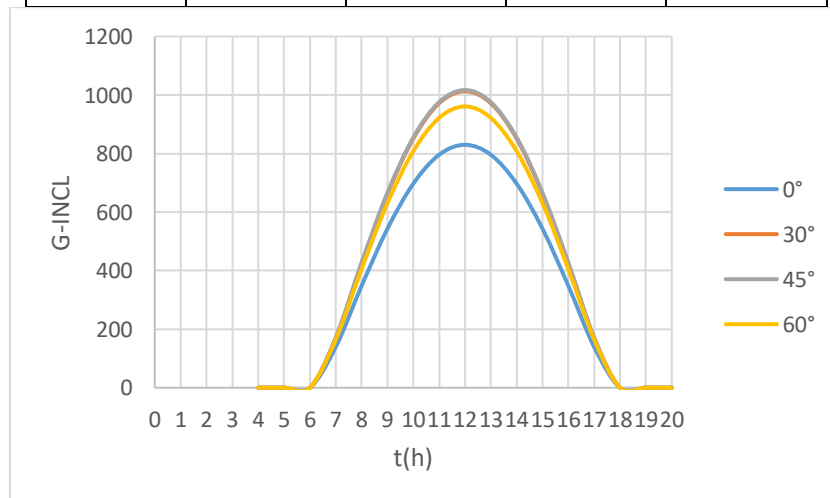


Figure III.34 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Septembre à M'Sila)

A travers les courbes et les données dont nous disposons, nous remarquons qu'au 1^{er} Septembre dans à M'Sila, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 30°.

Mois d'Octobre à M'Sila, Algérie

Tableau III.28 : 1^{er} Octobre

heures	0°	30°	45°	60°
7	128	162	167	162
8	336	419	425	407
9	530	657	665	634
10	684	847	855	813
11	783	968	977	928
12	817	1009	1018	967
13	783	968	977	928
14	684	847	855	813
15	530	657	665	634
16	336	419	425	407
17	128	162	167	162

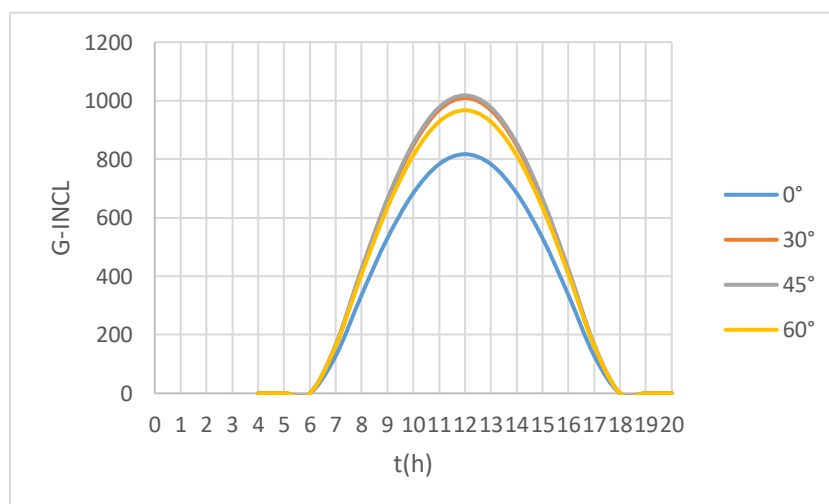


Figure III.35 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Octobre à M'Sila)

Tableau III.29 : 15 Octobre

heures	0°	30°	45°	60°
7	79	127	141	146
8	277	387	410	409
9	469	631	658	646
10	622	822	852	830
11	720	944	975	947
12	754	986	1017	987
13	720	944	975	947
14	622	822	852	830
15	469	631	658	646
16	277	387	410	409
17	79	127	141	146

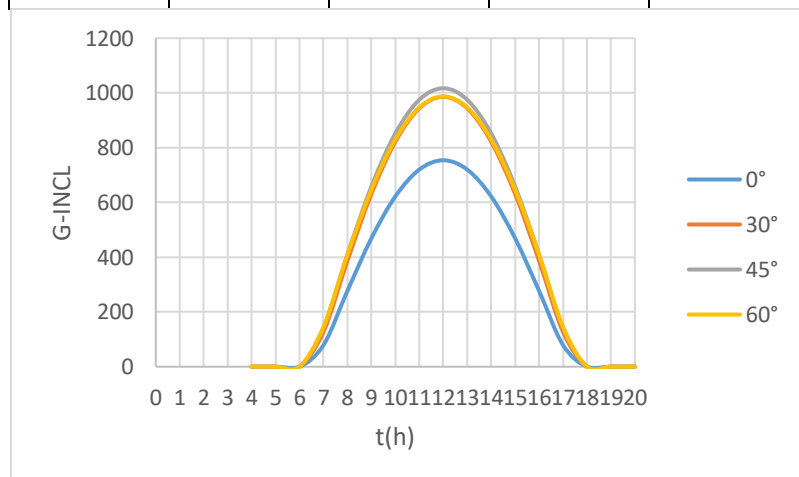


Figure III.36 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Octobre à M'Sila)

Tableau III.30 : 28 Octobre

heures	0°	30°	45°	60°
7	41	91	108	119
8	225	355	390	402
9	413	601	644	649
10	563	794	841	837
11	660	916	965	956
12	693	958	1008	996
13	660	916	965	956
14	563	794	841	837
15	413	601	644	649
16	225	355	390	402
17	41	91	108	119

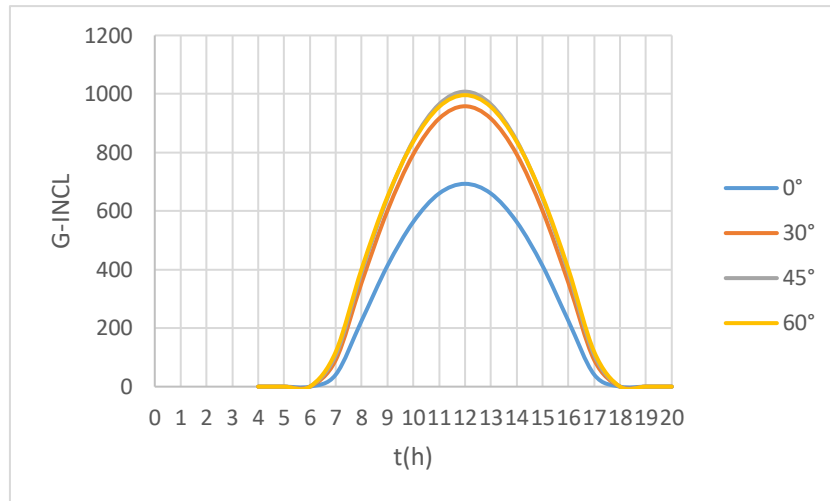


Figure III.37 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Octobre à M’Sila)

A travers les courbes et les données dont nous disposons, nous remarquons qu'au 1^{er} Octobre dans la région de Msila, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 30°, mais pour les 15^{ème} et 28^{ème} jours, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 45°.

Mois de Novembre à M’Sila, Algérie

Tableau III.31 : 1^{er} Novembre

heures	0°	30°	45°	60°
7	31	79	97	109
8	210	344	383	398
9	396	592	639	648
10	546	785	837	838
11	642	907	961	957
12	675	949	1004	998
13	642	907	961	957
14	546	785	837	838
15	396	592	639	648
16	210	344	383	398
17	31	79	97	109

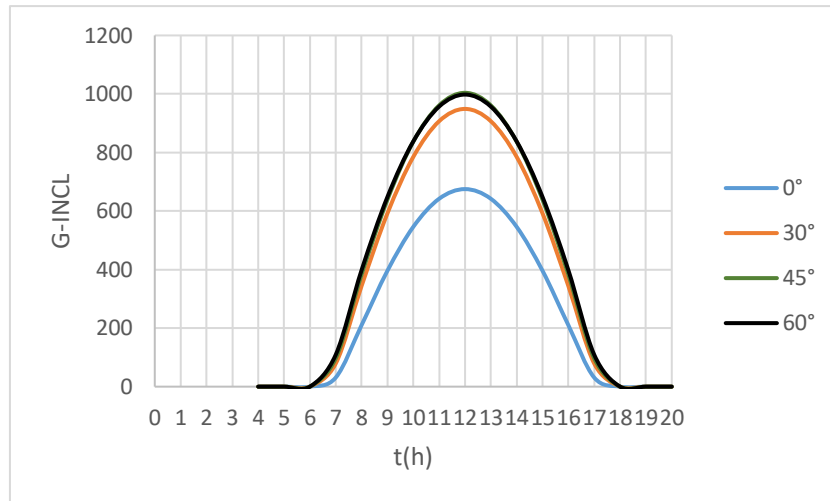


Figure III.38 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Novembre à M'Sila)

Tableau III.32 : 15 Novembre

heures	0°	30°	45°	60°
7	7	42	57	67
8	163	308	356	381
9	343	559	620	643
10	490	753	820	837
11	584	875	946	958
12	617	917	988	999
13	584	875	946	958
14	490	753	820	837
15	343	559	620	643
16	163	308	356	381
17	7	42	57	67

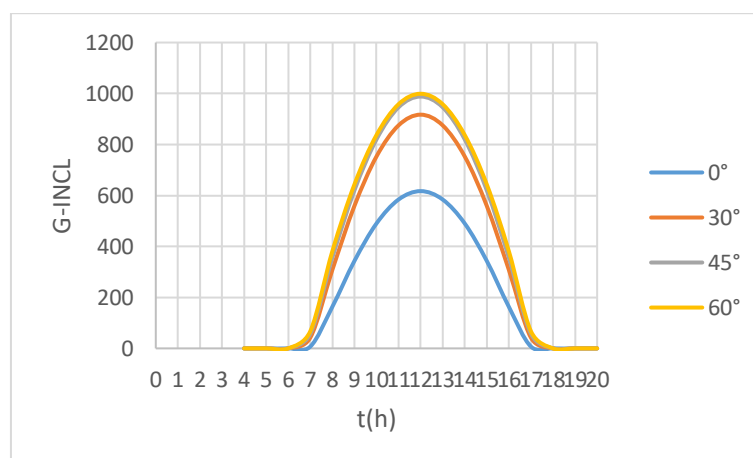
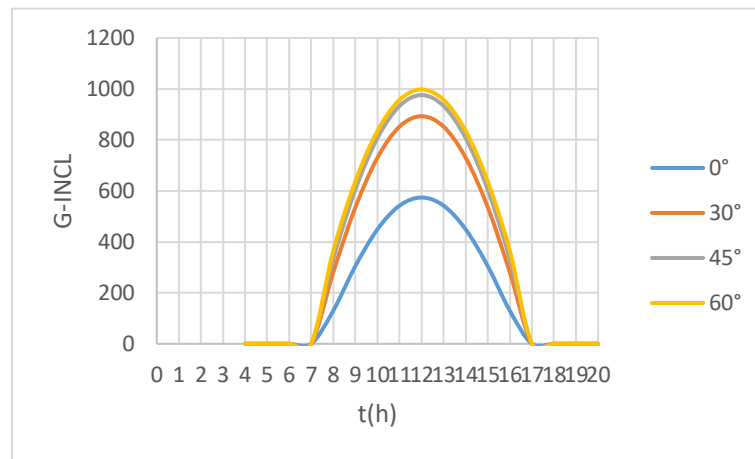


Figure III.39 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Novembre à M'Sila)

Tableau III.33 : 28 Novembre

heures	0°	30°	45°	60°
8	130	281	333	365
9	305	535	605	637
10	449	730	807	835
11	542	852	933	957
12	574	893	976	998
13	542	852	933	957
14	449	730	807	835
15	305	536	605	637
16	130	281	333	365

**Figure III.40** : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Novembre à M'Sila)

A travers les courbes, nous remarquons qu'au 1^{er} Novembre à M'Sila, la valeur du rayonnement solaire est plus grande lorsque l'angle d'inclinaison est de 45°, mais pour les 15^{ème} et 28^{ème} jours, la valeur du rayonnement solaire le rayonnement est plus important lorsque l'angle d'inclinaison est de 60°.

Mois de Décembre à M'Sila, Algérie

Tableau III.34 : 1^{er} Décembre

heures	0°	30°	45°	60°
7	124	276	329	362
8	298	531	602	636
9	442	726	805	835
10	535	848	931	957
11	567	889	974	998
12	535	848	931	957
13	442	726	805	835
14	298	531	602	636
15	124	276	329	362

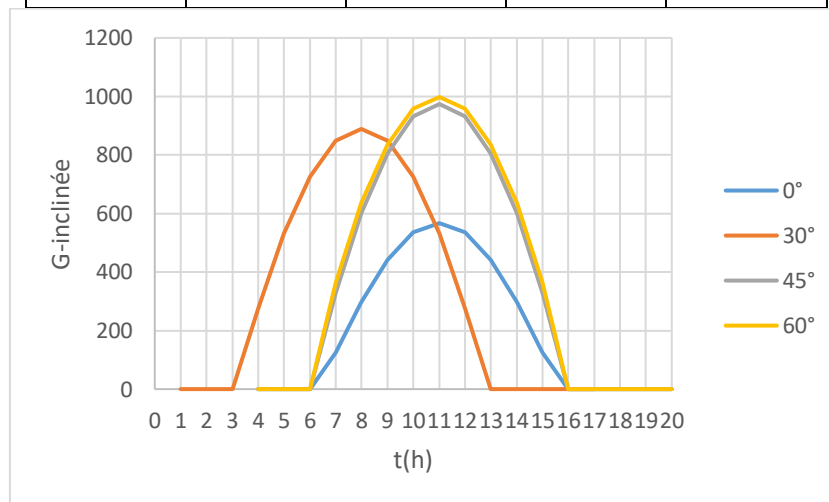


Figure III.41 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (1^{er} Décembre à M'Sila)

Tableau III.35 : 15 Décembre

HEURES TSV	0°	30°	45°	60°
8	108	263	319	354
9	279	520	597	636
10	422	716	802	838
11	513	838	928	961
12	545	880	971	1002
13	513	838	928	961
14	422	716	802	838
15	279	520	597	636
16	108	263	319	354

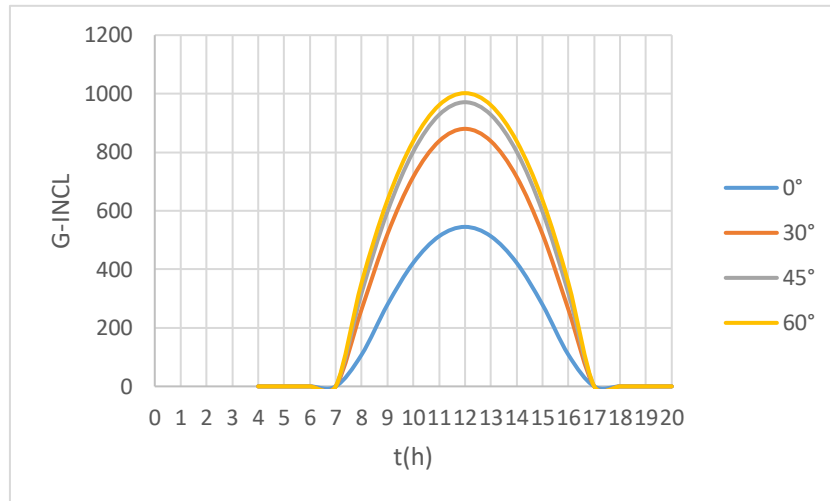


Figure III.42 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (15 Décembre à M'Sila)

Tableau III.36 : 28 Décembre

heures	0°	30°	45°	60°
8	108	268	325	362
9	280	527	605	646
10	424	723	811	848
11	516	846	938	971
12	548	887	981	1013
13	516	846	938	971
14	424	723	811	848
15	280	527	605	646
16	108	268	325	362

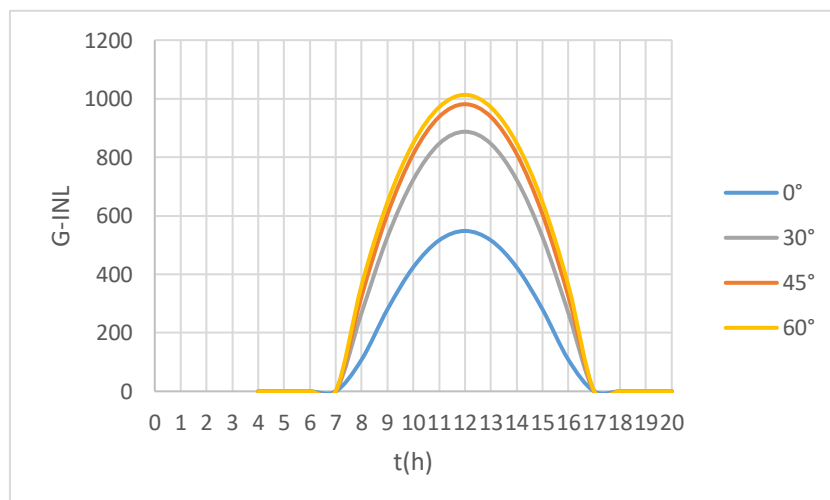


Figure III.43 : Variation du rayonnement solaire journalier pour quatre inclinaisons différentes du capteur solaire. (28 Décembre à M'Sila)

A travers les courbes et les données dont nous disposons, nous remarquons que les 1^{er}, 15 et 28 Décembre dans la ville de M'Sila, la valeur du rayonnement solaire est plus importante lorsque l'angle d'inclinaison est de 60°.

3.2. Variation du rayonnement solaire global mensuel moyen

Le tableau III.1, ci-dessous, contient les valeurs moyennes du rayonnement global que reçoit notre capteur solaire étudié sous le climat de M'Sila. Ces valeurs concernent les trois journées types choisies précédemment pour les quatre inclinaisons de notre étude (0° ; 30° ; 45° et 60°). Pour chaque mois, les inclinaisons optimales sont mentionnées en gras et en rouge avec la période correspondante.

Tableau III.1 : Valeurs moyennes journalières du rayonnement solaire (W/m^2), à M'Sila en Algérie.

Mois	Inclinaison	1 ^{er} du mois	15 ^{ème} du mois	28 ^{ème} du mois
Janvier	0°	3252	3533	3959
	30°	5670	5939	6383
	45°	6396	6630	7045
	60°	6714	6907	7270
Février	0°	4121	4772	5438
	30°	6516	3989	7381
	45°	7155	7497	7713
	60°	7346	7541	7580
Mars	0°	5489	6197	6810
	30°	7405	7715	7905
	45°	7725	7807	7774
	60°	7575	7434	7185
Avril	0°	6993	7564	7983
	30°	7952	8026	8014
	45°	7742	7579	7373
	60°	7089	6718	6342
Mai	0°	8055	8344	8510
	30°	8000	7921	7834
	45°	7321	7079	7834
	60°	6257	5783	5609
Juin	0°	8542	8585	8531
	30°	7810	7734	7688
	45°	6841	6723	6679
	60°	5546	5391	5362
Juillet	0°	8508	8332	8087
	30°	7678	7658	7648
	45°	6682	6726	6827
	60°	5371	5479	5666

Août	0°	8002	7626	7188
	30°	7648	7623	7563
	45°	6865	7009	7126
	60°	5737	6025	6302
Septembre	0°	7039	6459	5876
	30°	7538	7378	7169
	45°	7156	7216	7207
	60°	6384	6639	6819
Octobre	0°	5739	5088	4497
	30°	7115	6808	6472
	45°	7196	7089	6904
	60°	6855	6943	6922
Novembre	0°	4325	3791	3426
	30°	6363	5991	5689
	45°	6838	6586	6332
	60°	6898	6771	6586
Décembre	0°	3365	3189	3204
	30°	5651	5554	5615
	45°	6308	6263	6339
	60°	6578	6580	6667
Mois	Inclinaison	1^{er} du mois	15^{ème} du mois	28^{ème} du mois

4. Variation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié

La variation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié pour la journée du 15 Juin, à M'Sila avec une inclinaison = 30° (valeur trouvée dans les résultats précédents), est représentée sur la figure III.44. La température moyenne de l'air à la sortie du capteur solaire est voisine de 42.61 °C, variant entre 34.93 °C et 48.92 °C.

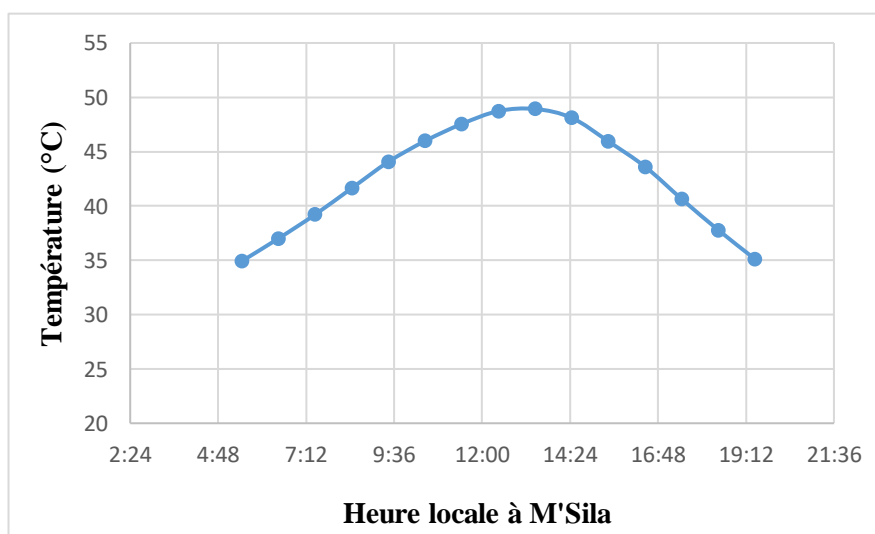


Figure III.44 : Variation de la température de l'air à la sortie du capteur étudié (Inclinaison = 30° ; M'Sila, le 15 Juin)

La variation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié pour la journée du 15 Juillet, à M'Sila avec une inclinaison = 0° (valeur trouvée dans les résultats précédents), est représentée sur la figure III.45. La température moyenne de l'air à la sortie du capteur solaire est voisine de 46.12°C , variant entre 37.30°C et 52.71°C .

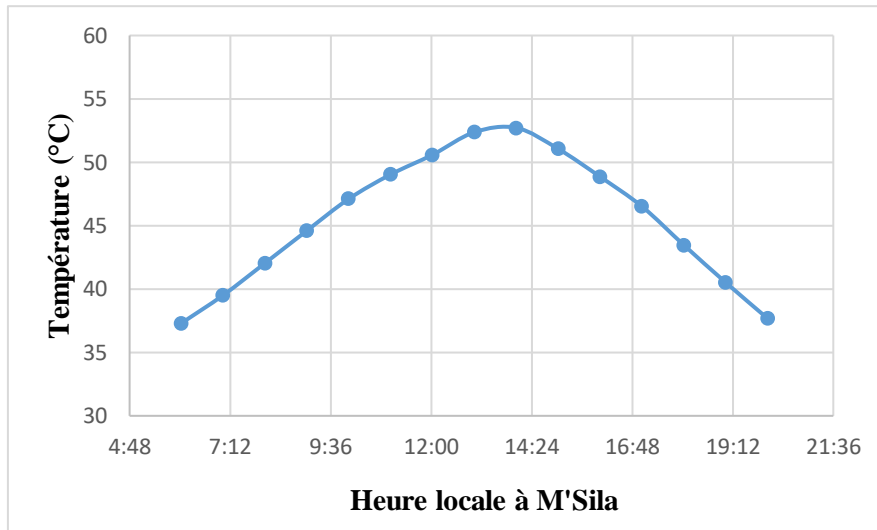


Figure III.45 : Variation de la température de l'air à la sortie du capteur étudié (Inclinaison = 0° ; M'Sila, le 15 Juillet)

5. Conclusion

En fin de ce chapitre, on a pu arriver à déterminer par simulation l'inclinaison optimale de notre capteur solaire durant l'année, sous le climat de la ville de M'Sila. En plus de cela, on a eu l'idée sur la température de l'air à la sortie du capteur solaire. Parmi les facteurs qui nous ont aidés dans tout cela est la simulation du rayonnement solaire global et de la température de l'air extérieur où notre dispositif solaire pourrait être installé.

Conclusion générale

Ce travail de fin d'études en Master est une étude théorique qui a traité un capteur solaire classique. Le dispositif a été simulé tout étant opérant sous le climat de la ville de M'Sila dans la région du Hodna en Algérie. Les plus importants des résultats sont comme suit :

- Le mois qui possède la plus grande valeur de température (39 °C) est Juillet.
- C'est en Janvier et Février que la ville de M'Sila enregistre la plus petite valeur de température (4 °C).
- Le plus grand écart entre la température maximale et minimale est obtenu au mois de Juillet où la valeur est de 17 °C, alors que le petit écart est obtenu aux mois de Janvier et Décembre où la valeur est de 10 °C.
- L'inclinaison optimale de notre capteur solaire durant l'année, sous le climat de la ville de M'Sila, varie de 0° à 60°.
- On a eu l'idée sur la température de l'air à la sortie du capteur solaire et parmi les facteurs qui sont nécessaires dans tout cela est la simulation du rayonnement solaire global et de la température de l'air extérieur où notre dispositif solaire pourrait être installé.
- La variation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié pour la journée du 15 Juin, à M'Sila avec 30° comme inclinaison optimale, a montré que la température moyenne de l'air à la sortie du capteur solaire est voisine de 42.61 °C, variant entre 34.93 °C et 48.92 °C.
- La variation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire étudié pour la journée du 15 Juillet, à M'Sila avec 0° comme inclinaison optimale, a montré que la température moyenne de l'air à la sortie du capteur solaire est voisine de 46.12 °C, variant entre 37.30 °C et 52.71 °C.
- Enfin, beaucoup d'autres résultats peuvent être trouvés par les équations mathématiques qui ont été utilisées dans ce modeste travail.

Références bibliographiques

- [1] N. Morel et E. Gnansounou, *Energétique du bâtiment*, École Polytechnique, Fédérale de Lausanne, (2007).
- [2] I. Traore, *Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois*, thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré – Nancy Université en Mécanique et Energétique, (2011).
- [3] Météo-France, Direction Régionale. Villeneuve d'Ascq, Lille, France, (1996).
- [4] H. P. Garg, R. Chandra, U. Rani. Transient analysis of solar air heaters using finite differences technique. *Energy Research* 1981; 5:243–52.
- [5] A. A. Mohamad. High efficiency solar air heater. *Solar Energy* 1997 ; 60(2) :71–6.
- [6] A. Arbia et O. Chaoubi. Contribution à la simulation des transferts thermiques dans un capteur solaire plan pour application de séchage. Université Kasdi Merbah Ouargla Département Génie mécanique ; (2015).
- [7] <http://www.energies-renouvelables.org>
- [8] <https://www.calculo.fr/eco-travaux/les-travaux-d-economies-d-energie/energie-solaire-avantages-inconvenients>
- [9] https://energypedia.info/images/c/c1/Le_Gisement_Solaire.pdf
- [10] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaïque-et-le-solaire-thermique>
- [11] <https://www.cder.dz/spip.php?article3525>
- [12] <https://www.dsnsolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-35229172.html>
- [13] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/panneaux-solairesphotovoltaïques/rendement>
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonnées_géographiques
- [15] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Latitude#:~:text=La%20latitude%20est%20une%20coordonnée,et%2090°%20aux%20pôles.>
- [16] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Altitude#:~:text=L%27altitude%20\(du%20latin%20%3A,point%20par%20rapport%20au%20géοide.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Altitude#:~:text=L%27altitude%20(du%20latin%20%3A,point%20par%20rapport%20au%20géοide.)
- [17] <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/albedo>
- [18] <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/determination-latitude-Soleil-etoiles.xml>
- [19] calcul du rayonnement solaire (cder.dz).
- [20] Application Web pour le calcul du rayonnement solaire en Algérie - Centre de Développement des Energies Renouvelables (cder.dz).
- [21] R. Smitabhindu, S. Janjai, V. Chankong, Optimization of a solar – assisted drying system for drying bananas. *Renewable Energy* 33, (2008) 1523-1531.
- [22] R. Khama, (2016). Conception, réalisation et simulation d'un séchoir solaire opérant en mode convectif utilisé pour le séchage de produits agroalimentaires. Thèse de Doctorat en Génie Chimique, Département Génie des procédés. Université Abderrahmane Mira Bejaia, Algérie.

- [23] M. Daguene, Les séchoirs solaires : théorie et pratique, UNESCO (1985).
- [24] S. Oudjedi, A. Boubghal, W. Braham Chaouch, T. Chergui, A. Belhamri. Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire à air destiné au séchage (Partie : 1). Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008) 237 – 248.
- [25] S. Oudjedi, A. Boubghal, W. Braham Chaouch, T. Chergui, A. Belhamri. Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie : 2). Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008) 255 – 266.
- [26] D. Semmar, S. Betrouni, D. Lafri. Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air. Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique (1998) 33 – 38.
- [27] A. Benkhelifa. Optimisation d'un Capteur Solaire Plan. Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique (1998) 13-18.
- [28] A. Iberraken, R. Alili. Modélisation Mathématique et Simulation de Capteurs Solaires. Mémoire de Master en Informatique Option : Réseaux et Systèmes Distribués, (2012). Faculté des Sciences Exactes Département d'Informatique. Université A/Mira de Béjaïa.
- [29] A. T. Ferdjani. Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans. Mémoire de Magister en Génie mécanique, Option : systèmes thermiques et maîtrise d'énergie, (2013). Université de Biskra.
- [30] M. T. Baissi, A. Brima, N. Moummi, K. Aoues, H. Karoua. Etude paramétrique théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air. Revue des Energies Renouvelables. SIENR'14 Ghardaïa (2014), 147-154.
- [31] A. Labeled, N. Moummi, K. Aouès, M. Zellouf, A. Moummi. Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle. Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 551 – 561.
- [32] R. Khama, F. Aissani, R. Alkama, 2016. Design and performance testing of an industrial-scale indirect solar dryer. Journal of Engineering Science and Technology, 11(9) : 1263-1281.
- [33] Réda Khama, Farida Aissani, Rezak Alkama. Étude d'un capteur plan à air destiné à un séchoir solaire : Comparaison du mode passif au mode actif. Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables. Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016.
- [34] Livre: Design of Thermal Energy Systems. Chapter 6 : Analysis and Design of Solar Collector and Solar Thermal System. Auteur du livre : Pradip Majumdar. <https://doi.org/10.1002/9781118956922.ch6>.

