

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université HAMMA Lakhdar El-Oued
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



PROJET DE FIN D'ÉTUDES
Pour l'obtention du diplôme de master 2
En Génie Mécanique
Option : Energies Renouvelables
Intitulé

**La concentration solaire pour la production
du froid étude pour les régions chaudes
(sahariennes)**

Réalisé par :

BENNOUI Ismail

AOUADI Abdallah

DAOUDI Abdelbasset

Supervisé par :

Dr. KAROUA Housseyn

Année Universitaire : 2020/2021

Résumé

Les centrales solaires à concentrations sont une excellente alternative à celles conventionnelles surtout dans les pays qui se situent dans la ceinture solaire.

Dans notre mémoire, nous proposons une simulation à l'aide du logiciel GREENIUS et une étude comparative sur le plan technique d'une minicentrale solaire à concentrateurs cylindro-parabolique par l'utilisation de deux types des collecteurs (LS-2 Cermet Vacuum (commercial) et de type de ET2 with schott HCE).

Le site a été retenus pour la simulation à savoir DJAMAA (El Meghair) dont les données météorologiques sont fournies par le logiciel METEONORM.

Suite aux différentes résultats obtenus et en se basant particulièrement sur les données météorologiques, la production thermique du champ solaire et la puissance frigorifique annuellement sans système d'appoint, nous ont permis de retenir que l'installation avec type de collecteur ET2 with schott HCE est plus adapté pour les bons résultats.

Mots clés : *GREENIUS, Mini-centrale solaire à concentration cylindro-parabolique, METEONORM*, collecteur solaire, climatisation solaire.

Remerciements

Nous remercions avant tout DIEU Allah tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous donne afin de réaliser ce modeste travail.

A Monsieur KAROUA Houseyn, docteur maitre de recherche aux centre développement des énergies renouvelables bouzeriaa Alger, qu'il soit remercions d'abord pour avoir accepté de diriger ce travail, ensuite pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier les enseignants du département de génie mécanique pour leurs aides et conseils.

Nous tenons également à remercions toutes les personnes qui nous ont permis de réaliser cette recherche et nous ont fait bénéficier de leur aides, conseils et encouragements, et en particulier nos enseignants, amis et collègues du département de génie mécanique de l'université d'eloued, toutes les personnes que nous ne peut citer qui nous ont aidé de près ou de loin, qu'ils trouvent tous ici, mes sincères remerciements et reconnaissances.

Nous tenons à remercions nos proches. Merci et pardon à nos mères, nos sœurs, nos femmes et nos enfants pour les moments difficiles.

Table des matières

Sommaire.....	Erreur ! Signet non défini.
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Liste des abréviations	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures.....	x
Introduction	1
Chapitre 1 Le gisement solaire.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur le soleil.....	4
1.2.1 Le soleil	4
1.2.2 La constante solaire	5
1.2.3 Mouvement apparent du soleil	6
1.2.4 La sphère céleste	8
1.2.5 Les coordonnées célestes	9
1.2.6 Les temps solaires	14
1.2.7 Gisement solaire en Algérie	15
1.3 Conclusion.....	17
Chapitre 2 Etat de l’art des centrales solaires à concentration.....	18
2.1 Introduction	18
2.2 Centrale solaire thermodynamique	18
2.2.1 Principe de fonctionnement d’une centrale solaire thermodynamique	19
2.2.1.1 Génération directe de l’électricité	19
2.2.1.2 Génération indirecte de l’électricité	19
2.3 Centrale solaire hybride.....	20
2.3.1 Description de la centrale hybride de Hassi R’mel	21
2.4 Les centrales solaires à concentrations	22

2.4.1	Le facteur de concentration	23
2.4.2	Facteur de concentration géométrique	23
2.4.3	Le facteur d'interception (γ).....	24
2.4.4	Le facteur de l'angle d'incidence modifié (K)	24
2.5	Les capteurs solaires à concentrations.....	24
2.5.1	Définition d'un capteur a concentration.....	24
2.5.2	Les différents types de capteurs à concentrations	24
2.5.3	Centrale à Tour.....	25
2.5.4	Les concentrateurs solaires types Fresnel (LFR)	26
2.5.5	Les concentrateurs solaires paraboliques	27
2.5.6	Les concentrateurs cylindro-paraboliques (CCP)	28
2.5.7	Le système de suivi solaire.....	36
2.6	Conclusion.....	38
Chapitre 3 Etat de l'art des techniques de rafraichissement de l'air.....		39
3.1	Partie 1 : Climatisation conventionnelle.....	39
3.1.1	Les systèmes à détente directe	39
3.1.2	Climatiseurs individuels.....	39
3.1.3	Les armoires de climatisation.....	41
3.1.4	Les systèmes tout air	41
3.1.5	Systèmes de climatisation à débit d'air variable	42
3.1.6	Les systèmes tout eau ventilo-convecteurs	43
3.2	Partie 2 :.....	45
3.2.1	Climatisation Solaire	45
3.2.2	Climatisation Solaire Electrique (Photovoltaïque).....	46
3.2.3	Climatisation solaire thermique	46
3.2.4	Refroidissement solaire par absorption	46
3.2.5	Climatisation Solaire Par Dessiccation.	48
3.3	Conclusion.....	52
Chapitre 4 Simulation d'une microcentrale		53
4.1	Introduction	53
4.2	Présentation des logiciels de simulation.....	53
4.3	Présentation du logiciel GREENIUS.....	53
4.3.1	Assistant (Wizard).....	54
4.3.2	Création d'un nouveau projet.....	55
4.3.3	Écran Principal	56

4.4	Présentation du logiciel METEONORM 8.....	57
4.5	Méthodologie.....	58
4.5.1	Coordonnées géographiques et météorologiques du site ville de Djamaa (Wilaya d'El Mghayer)	58
4.5.2	Données météorologiques	59
4.5.3	Dimensionnement de la minicentrale	60
4.5.4	Collecteur :	60
4.5.5	Champ solaire.....	62
4.5.6	Site de Djamaa (El Meghair).....	63
4.5.7	Fluide de transfert.....	65
4.5.8	Stockage	67
4.5.9	L'hybridation.....	67
4.6	Résultats et interprétations.....	69
4.6.1	Données Météorologiques.....	69
4.6.2	Simulation avec hybridation.....	70
4.6.3	Simulation sans hybridation :	73
4.7	Conclusion	74
	Conclusion.....	75
	Bibliographie	77

Liste des abréviations

Nomenclature

a	Azimut solaire [Degré(°)].
A_a	Surface d'ouverture [m ²]
A_r	Surface du récepteur [m ²]
C°	Facteur de concentration
E_{PH}	Energie de chaque photon [J]
F	Distance focale [m]
G	Irradiation solaire reçue sur un plan horizontal [kWh/m ²]
G_0	Rayonnement extraterrestre [kWh/m ²]
h	Hauteur [m]
h	Constante de Planck [J.s]
I_0	Rayonnement solaire extraterrestre [kW/m ²]
k	Facteur d'angle d'incidence
K_T	Indice de clarté
L	Longitude [Degré(°)]
n_j	Numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier
S_0	Durée d'insolation[h]
Φ	Latitude [Degré(°)].
δ	Déclinaison [Degré(°)]
ω	Angle horaire [Degré(°)]
θ_z	Angle zénithal [Degré(°)]
λ	Longueur d'onde.
ω_0	L'angle horaire au coucher du soleil [Degré (°)]
γ	Facteur d'interception
η_{opt}	Rendement du collecteur optique

Ψ Angle d'ouverture [Degré (°)]

Abréviations

TSV	Temps Solaire Vrai
TSM	Temps Solaire Moyen
Et	Equation du temps
TU	Temps Universal
GMT	Meridian de Greenwich (Greenwich Mean Time)
TL	Temps Légal
ASA	Agence Spatiale Allemande
CSP	Concentrated Solar Power
LFR	Concentrateurs solaires types Fresnel
CCP	Concentrateur Cylindro – Parabolique
DNI	Irradiation Normale Directe
Hdn	Quantité de chaleur solaire
ONM	Office National de météorologique
DLR	Institut of solar research
AV	Unité Astronomique
COP	Coefficient de performance (Coefficient Of Performance)
VC	Compression de vapeur
CFC	Gaz <i>Chlorofluorocarbons</i>
Qcool	Puissance thermique de chiller
CTA	Centrale de traitement d'air

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Durée des saisons [3].....	7
Tableau I-2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [6].....	16
Tableau III-1 : différents types des climatiseurs conventionnels	40
Tableau IV-1 : Données géographiques de site.....	60
Tableau IV-2 : Données du champ solaire [42].	65
Tableau IV-3 : Propriétés du Fluide Therminol VP-1 [46].....	66

Liste des figures

Figure I-1 : La structure du soleil [1].	5
Figure I-2 : La divergence de l'énergie du soleil vers la terre [3].	6
Figure I-3 : Schématisation du mouvement de la terre autour du Soleil [3].	6
Figure I-4 : Variations de la durée du jour et de la hauteur du soleil [3].	8
Figure I-5 : La sphère céleste [3].	9
Figure I-6 : Les coordonnées géographiques [3].	10
Figure I-7 : Les coordonnées horaires [3].	11
Figure I-8 : Azimut solaire [4].	12
Figure I-9 : Coordonnées horizontales [4].	12
Figure I-10 : Angle zénithal [4].	13
Figure I-11 : Angle incident [4].	13
Figure I-12 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [5].	15
Figure I-13 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné la latitude du lieu [6].	16
Figure I-14 : Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie [6].	17
Figure II-1 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration thermodynamique [9].	19
Figure II-2 : Cycle d'une centrale à collecteurs cylindro-parabolique [9].	20
Figure II-3 : Schéma de principe d'une centrale hybride [10].	21
Figure II-4 : Centrale hybride de HassiR'mel [12].	22
Figure II-5 : Comparaison des technologies solaires à concentration [07].	22
Figure II-6 : Les types de capteurs à concentrations [17].	25
Figure I-7 : Schéma de principe d'une centrale à tour [8].	26
Figure I-8 : Centrale à tour en Andalousie (Espagne).	26
Figure I-9 : Schéma de principe d'une centrale solaire à réflecteur linéaire de Fresnel [8].	27
Figure I-10 : Réflecteurs linéaire de Fresnel à Liddell (Australie).	27
Figure II-11 : Principe de fonctionnement d'un capteur parabolique [8].	28
Figure II-12 : Schéma de fonctionnement d'une centrale à concentrateurs cylindro-parabolique [8].	29
Figure II-13 : les principaux composants d'un panneau cylindro-parabolique [20].	30

Figure II-14 : Réflexion des rayons solaires sur le tube absorbeur [20].	30
Figure II-15 : Schéma principale des composantes du tube récepteur [20].	31
Figure II-16 : structure métallique d'un capteur cylindro-parabolique [20].	32
Figure II-17 : Les paramètres géométriques d'un cylindro parabolique [21].	33
Figure II-18 : Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique [21].	33
Figure II-19 : Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f [21].	34
Figure II-20 : Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante [21].	35
Figure II-21 : Surface d'ouverture du collecteur et Surface d'ouverture du récepteur [21].	35
Figure II-22 : Les modes de poursuite solaire d'un CCP [22].	36
Figure II-23 : Le concentrateur cylindro parabolique en position de suivi [21].	37
Figure II-24 : Angle d'incidence sur un capteur cylindro-parabolique [23].	37
Figure III-1 : Climatiseur monobloc [25].	41
Figure III-2 : Centrale de traitement d'air [25].	42
Figure III-3 : Schéma de principe d'une installation à 2 conduits [24].	44
Figure III-4 : Schéma de principe d'un ventilo-convecteur [25].	44
Figure III-5 : Refroidissement à dessiccation solide avec capteur solaire [32].	50
Figure III-6 : Refroidissement à dessiccation liquide avec capteur solaire [32].	52
Figure IV-1 : Processus de fonctionnement du logiciel de Greenius [42].	54
Figure IV-2 : Page de couverture du logiciel Greenius.	54
Figure IV-3 : Fenêtre d'Assistant (Wizard)	55
Figure IV-4 : Fenêtre du nouveau projet.	55
Figure IV-5 : Fenêtre du choix de la technologie.	56
Figure IV-6 : Interface de l'écran principal.	56
Figure IV-7 : Logo du logiciel Meteonorm 8.	58
Figure IV-8 : Géolocalisation de lavile de Djamaa wilaya d'El Meghiyer.	59
Figure IV-9 : Fenêtre du logiciel Meteonorm.	60
Figure IV-10 : Fenêtre Greenius du collecteur LS-2 Cermet Vacuum.	61
Figure IV-11: Fenêtre Greenius du collecteur ET2 with schott HCE.	62
Figure IV-12 : configuration du champ solaire Nombre de capteurs/ligne (boucle) [42].	63
Figure IV-13 : Fenêtre Greenius avec les paramètres du collecteur ET2 with schott HCE.	64
Figure IV-14 : Fenêtre Greenius avec les paramètres du collecteur LS-2 Cermet Vacuum.	64
Figure IV-15 : Fenêtre Greenius pour choisir le Fluide caloporteur.	66
Figure IV-16 : Fenêtre du stockage pour les deux types de collecteurs.	67
Figure IV-17 : Fenêtre du système d'appoint (Boiler) pour ET2 with schott HCE.	67
Figure IV-18 : Fenêtre du système d'appoint (Boiler) LS-2 Cermet Vacuum.	68
Figure IV-19 : Fenêtre du système d'absorption chiller Broad BY 100.	68

Figure IV-20 : Variation de l'irradiation directe normale DNI (rayonnement solaire direct) pendant une année pour le site de travail (djamaa).....	69
Figure IV-21 : Variation des températures ambiantes pendant une année pour le site de Djamaa 70	
Figure IV-22 : Variation de quantité de chaleur produite par le champ solaire et la puissance thermique fourni par le boiler en fonction des jours de l'année (ET2 with schott HCE) 71	
Figure IV-23 : Variation de quantité de chaleur produite par le champ solaire et la puissance thermique fourni par le boiler en fonction des jours de l'année (LS-2 Cermet Vacuum)71	
Figure IV-24 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et le rendement obtenu en fonction des jours de l'année avec ET2 with schott HCE.	72
Figure IV-25 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et le rendement obtenu en fonction des jours de l'année avec LS-2 Cermet Vacuum	72
Figure IV-26 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et la production thermique à la sortie du (chiller Q cool) en fonction des jours de l'année avec ET2 with schott HCE.....	73
Figure IV-27 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et la production thermique à la sortie du (chiller Q cool) en fonction des jours de l'année (LS-2 Cermet Vacuum).....	74

Introduction

Les besoins et la consommation énergétique à augmenter considérablement ces dernières années avec l'élargissement rapide dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel. Pour le moment la demande énergétique en Algérie est assurée par les grands gisements d'hydrocarbures et surtout de gaz. Les empreintes engendrées par l'utilisation des énergies fossiles sont bien connues : émissions des gaz à effet de serre, pollution de l'air, particulièrement le CO₂ (la responsable principale de l'échauffement climatique), ont amenés la préoccupation mondiale dont l'Algérie a s'intéresser à ce sujet et à établir un programme de développement d'énergies renouvelables parmi elles la production d'énergie solaire.

Pour toute application d'énergie solaire, il est obligé de connaître de manière détaillée les caractéristiques de l'ensoleillement et du rayonnement sur le site géographique choisi, ces caractéristiques qui constituent le gisement solaire peuvent être déduites des mesures régulières réalisées pendant plusieurs années par une station météorologique locale, dans le cas où il n'existe pas de telles stations on peut extrapoler les mesures des stations voisines en utilisant une procédé de calcul fondée sur des corrélations statistiques ou bien le traitement d'images des satellites. Les complications majeures des mesures du rayonnement solaire proviennent à la fois des fluctuations climatiques et du mouvement apparent du soleil au lieu d'observation ; de toute façon, l'énergie solaire est transformée une solution accessible pour garantir les besoins d'énergie tenant compte de l'aspect environnemental.

Les systèmes solaires, surtout les systèmes à la concentration solaire sont de plus en plus sollicités pour contribuer à la satisfaction des besoins d'énergie. La technologie des concentrateurs solaires vient d'atteindre un niveau très remarquable, en utilisant des réflecteurs afin de la concentration les rayons du soleil sur une petite surface. Il existe quatre types principaux des concentrateurs solaires ; les miroirs de Fresnel, les tours solaires et les concentrateurs paraboliques les concentrateurs cylindro-paraboliques (CCP). Cette dernière technologie est actuellement la plus éprouvée parmi des techniques de concentration solaire.

Notre travail consiste à étudier et simuler à l'aide du logiciel Greenius et Excel une minicentrale solaire cylindro-parabolique pour but de production du froide.

A ce propos, le manuscrit est constitué de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons résumé les données bibliographiques relatives au gisement solaire en général, et en spécifique le potentiel solaire en Algérie, le deuxième chapitre, nous avons présentés un état de l'art sur les centrales solaires à concentration et au troisième chapitre nous

avons concentré sur l'état de l'art des techniques de rafraîchissement de l'air par la climatisation conventionnel et la climatisation solaire.

Dans le dernier chapitre, nous avons simulés une minicentrale solaire cylindro-parabolique sur le site de djamaa wilaya d'El Mghaier pour la production de froid.

Enfin, nous avons soldé notre travail par une conclusion générale et un ensemble de recommandations et de perspectives.

Chapitre 1

Le gisement solaire

1.1 Introduction

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible durant une période donnée. Il est exploité dans des domaines aussi divers que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

Dans les systèmes de conversion de l'énergie solaires, le besoin des données sur l'insolation est d'une importance primordiale tant dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leur performance. L'existence d'une base des données solide et fiable est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collecte et de conversion de l'énergie solaire. Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du champ solaire, le nombre d'arrêts est très limité. En Algérie, seulement sept stations mesurent la composante globale et diffuse du rayonnement solaire depuis 1970. Le nombre de ces stations est insuffisant et c'est pourquoi différents modèles ont été proposés pour estimer le champ solaire à l'échelle locale ou régionale. Ces modèles vont des codes de calcul les plus complexes et sophistiqués aux relations empiriques simples. Le choix du modèle est dicté par la nature des données et la précision recherchée.

Un modèle de l'atmosphère basé fondamentalement sur la connaissance du désordre atmosphérique pour la détermination des différents composants du rayonnement solaire d'un site donné, en particulier l'éclairage solaire direct est très essentiel dans la concentration solaire.

La ressource de base la plus importante pour tout le potentiel d'énergie renouvelable est l'énergie solaire, le rayonnement émis dans toutes les directions par le Soleil et que la Terre reçoit une puissance moyenne de $1,4 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, pour une zone perpendiculaire à la direction Terre-Soleil. Ce flux solaire est atténué lors du passage de l'atmosphère par absorption ou diffusion, en fonction des conditions météorologiques et de la latitude du lieu au niveau du sol.

Afin de faire le meilleur usage de cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie solaire disponible à un endroit spécifique à chaque moment de la journée et de l'année.

1.2 Généralités sur le soleil

1.2.1 Le soleil

Le Soleil est une sphère avec un matériau extrêmement chaud et gazeux avec un diamètre de 1,39.109m et est à une distance moyenne de 1.49.1011m de la Terre. Vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, mais il ne tourne pas comme un corps solide ; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 dans les régions polaires [1]. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777 K. La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de 8,106 à 40,106 K et la densité est estimée à 100 fois celle de l'eau. Le soleil est en effet, un réacteur de fusion continue avec ses constituants sous forme gazeuse retenus par les forces gravitationnelles, plusieurs réactions de diffusion sont déclenchées pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par un réactif nucléaire. Cependant, la masse du noyau d'hélium étant plus légère que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie [1].

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure, puis transférée par rayonnement dans l'espace. Les processus radiatifs et convectifs sont le résultat d'états successifs d'émission, d'absorption et de rayonnement ; la gamme du spectre de rayonnement dans le noyau du Soleil se situe entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons gamma, avec une longueur d'onde de rayonnement qui augmente à mesure que la température diminue à diverses distances. Dans la structure schématique du Soleil montrée à la Figure I.1, on estime que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire entre 0 et 0.23R, où R le rayon du soleil, qui représente 40% de la masse du Soleil. A une distance de 0,7R du centre, la température est d'environ 130000 K et la densité de 70 kg/m³. Dans cette zone, la température diminue d'environ 5000 K et la densité d'environ 10-5 kg/m³ [1].

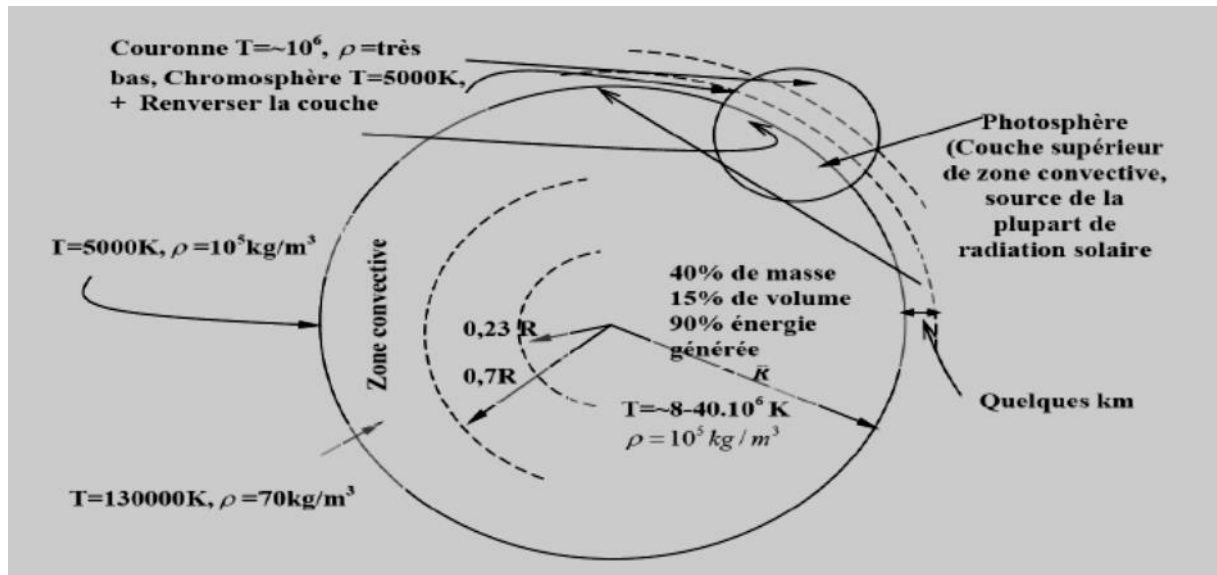


Figure 1-1 : La structure du soleil [1].

La surface apparente du soleil est constituée de granulés (cellules convectives irrégulières), de dimensions de l'ordre de 1000 à 3000 km et leur durée de vie est estimée à quelques minutes. D'autres formes à la surface du soleil sont de petites zones opaques appelées pores. Aux dimensions équivalentes à celles des cellules convectives, il existe d'autres zones opaques aux dimensions variables qui sont appelées taches solaires. La couche extérieure de la zone convective est appelée photosphère, sa densité est très faible (environ 10^{-4} celle de l'air au niveau de la mer). Cette couche est composée de gaz à forte ionisation qui peuvent absorber et émettre un rayonnement à spectre continu. La photosphère est la source de la majeure partie du rayonnement solaire [1].

Il est généralement admis que le rayonnement solaire est produit par un phénomène thermonucléaire contrôlé de transformation de l'hydrogène en hélium (à partir d'hélios = soleil) : les noyaux des atomes de deutérium et de tritium (isotopes d'hydrogène) fusionnent pour libérer de l'énergie [1]. La réaction est schématiquement la suivante :



1.2.2 La constante solaire

Le flux de rayonnement à la surface du soleil est d'environ $6,33 \cdot 10^7 \text{W/m}^2$. Une surface plane, d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire, située au bord de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée en fonction de la distance Soleil-Terre ($149\,597\,870 \cdot 10^3 \text{ m}$ ou 1UA représente la distance Soleil-Terre moyenne). Cette distance varie légèrement au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, qui est d'environ 1,7 % [1]. La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu au sommet supérieur de l'atmosphère terrestre, estimée à 1367 W/m^2 (Fröhlich et Brusa, 1981, et Iqbal, 1983) [2]. La représentation schématique du système Soleil-Terre est présentée à la figure I.2 [3].

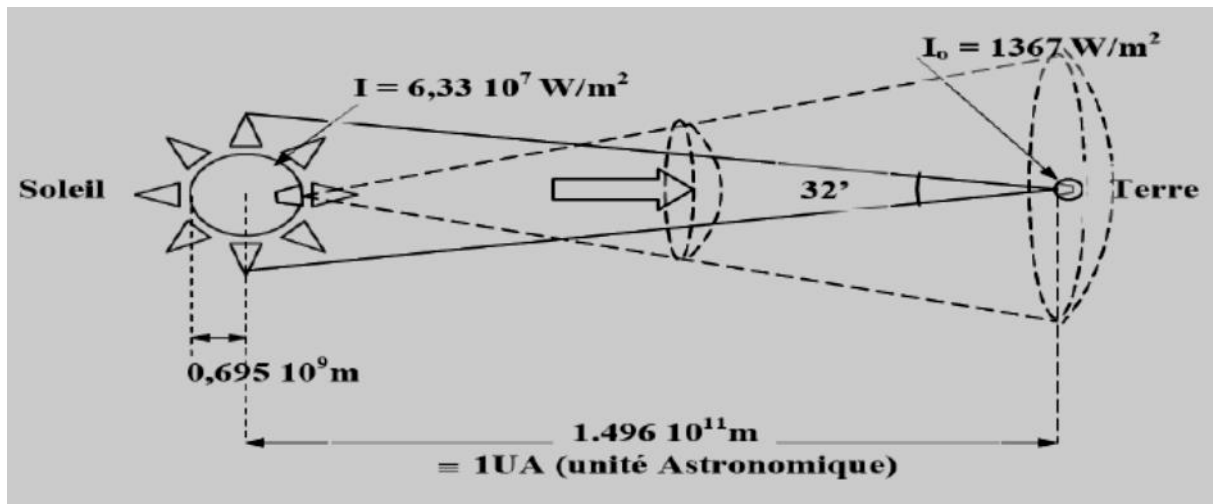


Figure 1-2 : La divergence de l'énergie du soleil vers la terre [3].

La valeur du rayonnement solaire " I_c ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placés à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (environ 80 Km au-dessus du niveau de la mer) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m-2. Comme première approximation, nous pouvons calculer la valeur de " I_c " selon le nombre du jour de l'année " n_j " par la relation suivante [2] :

$$I_c = I_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 n_j)] \quad (I.1)$$

1.2.3 Mouvement apparent du soleil

Les mouvements de la terre autour du soleil et autour de son axe sont illustrés dans la figure I.3.

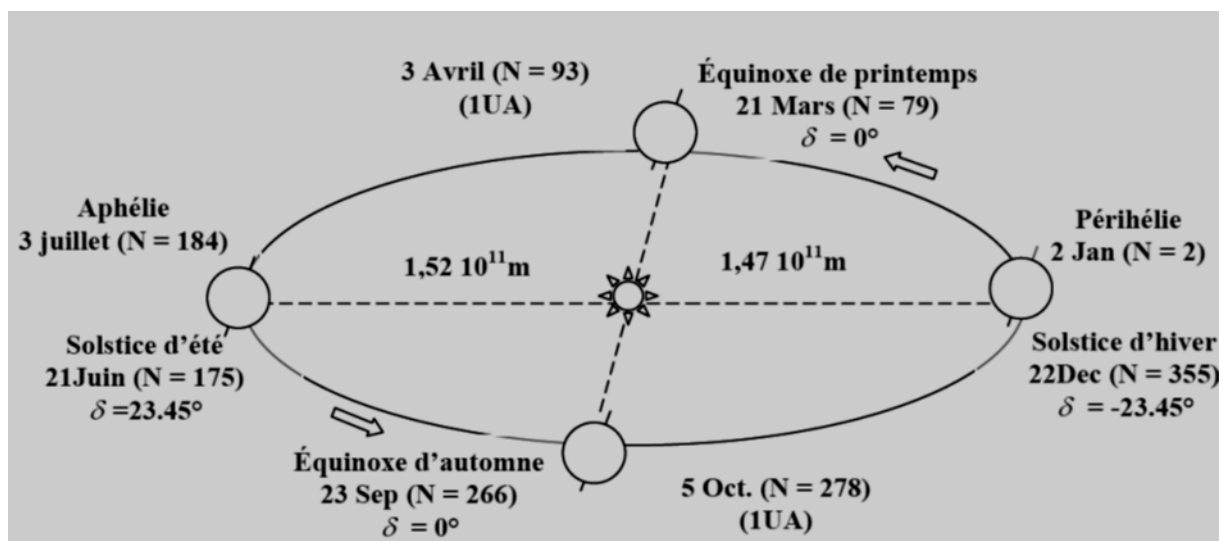


Figure 1-3 : Schématisation du mouvement de la terre autour du Soleil [3].

1.2.3.1 Translation et rotation de la Terre

Les mouvements de la terre peuvent être décomposés en considérant séparément le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (traduction) [2].

1.2.3.2 Rotation de la Terre

En vingt-quatre heures, la terre tourne d'ouest en est autour de son axe; c'est la base de notre système de temps. De cette rotation suit la succession des jours et des nuits [2].

1.2.3.3 Révolution de la terre

La Terre effectue un tour complet autour du Soleil en 365,25 jours suivant une orbite elliptique, alors que la vitesse moyenne de ce mouvement est d'environ 30 km/s. La distance entre les centres de ces deux étoiles varie d'une valeur minimale à Perihelion (1.47.10¹¹m), vers le 2 janvier, a une valeur maximale, à Aphelion (1.52 .10¹¹m), vers le 3 juillet, la valeur moyenne étant appelée unité astronomique (AU) [2]. Le tableau (I.1) montre la durée des saisons associées à ce mouvement.

Tableau 1-1 : Durée des saisons [3].

Saison (Hémisphère N)	Durée moyenne	Du	Au
Printemps	92 jours 20 heures	21/3	21/6
Eté	93 jours 15 heures	21/6	23/9
Automne	89 jours 19 heures	23/9	22/12
Hiver	89 jours	22/12	21/3

En effet, le trajet parcouru par rayonnement solaire le même jour est à son maximum dans les premières heures du matin et en fin d'après-midi. Cependant, il est à son minimum lorsque le soleil est à son zénith. Pour la même raison, l'intensité du rayonnement est variable au cours des saisons et avec la latitude. Ainsi, le rayonnement solaire total reçu au cours d'une journée peut varier de 0,5 kWh/m² pour une journée d'hiver ensoleillée dans les régions nordiques, à plus de 6,0 kWh/m² pour une journée ensoleillée dans les régions tropicales.

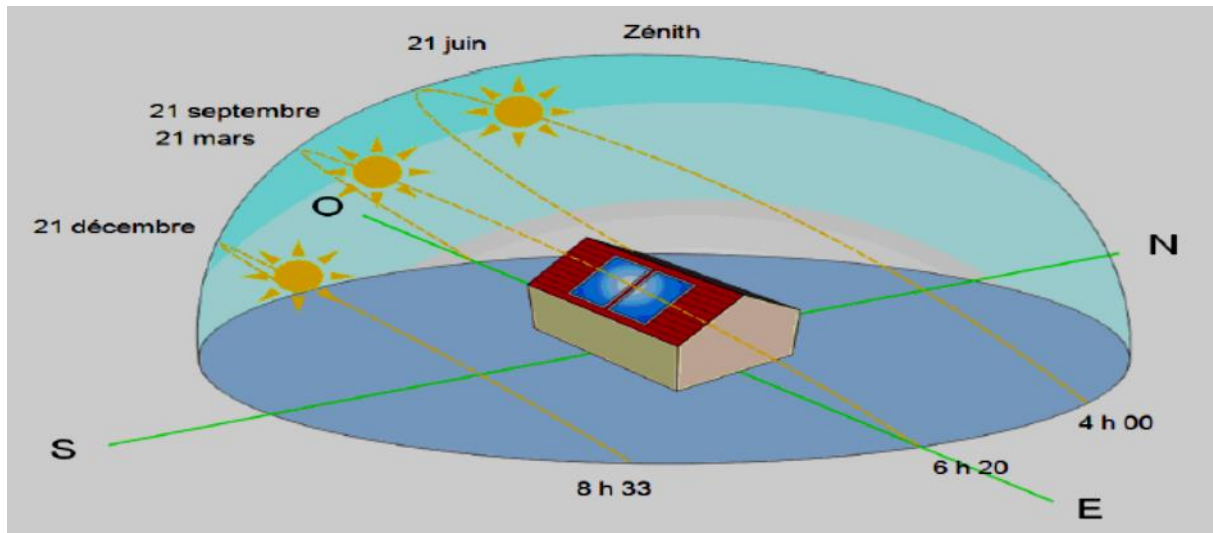


Figure 1-4 : Variations de la durée du jour et de la hauteur du soleil [3].

Évidemment, par temps couvert, le rayonnement solaire au sol peut tomber à pratiquement zéro. D'autre part, pour une journée ensoleillée et un ciel parfaitement clair, le rayonnement solaire diffus qui tombe sur le sol peut atteindre 15 à 20% du rayonnement global, mais avec un ciel nuageux, le rayonnement qui atteint le sol est entièrement diffus [2]. Les centrales solaires concentrées ne sont donc productives que par beau temps. Leur productibilité est proportionnelle au nombre d'heures de présence annuelle du soleil. Ce paramètre est donc nécessaire pour une réflexion sur l'étendue du dépôt pour un projet de centrale solaire thermique (la limite inférieure des zones utilisables est d'environ 2500 heures de présence annuelle du soleil) [2].

Toute étude, application ou conversion de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et détaillée du rayonnement solaire sur ce site. Ceci est généralement possible grâce aux stations de mesure météo. Cependant, dans la plupart des cas, il n'y a pas de mesures locales du rayonnement solaire et l'utilisation de certaines méthodes appropriées pour prévoir et estimer les caractéristiques du rayonnement solaire est nécessaire [3].

1.2.4 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). Tous les objets visibles dans le ciel sont considérés comme se trouvant à la surface de la sphère céleste [3]. Les diverses caractéristiques de la sphère elle-même peuvent être résumées comme le montre la figure I.5.

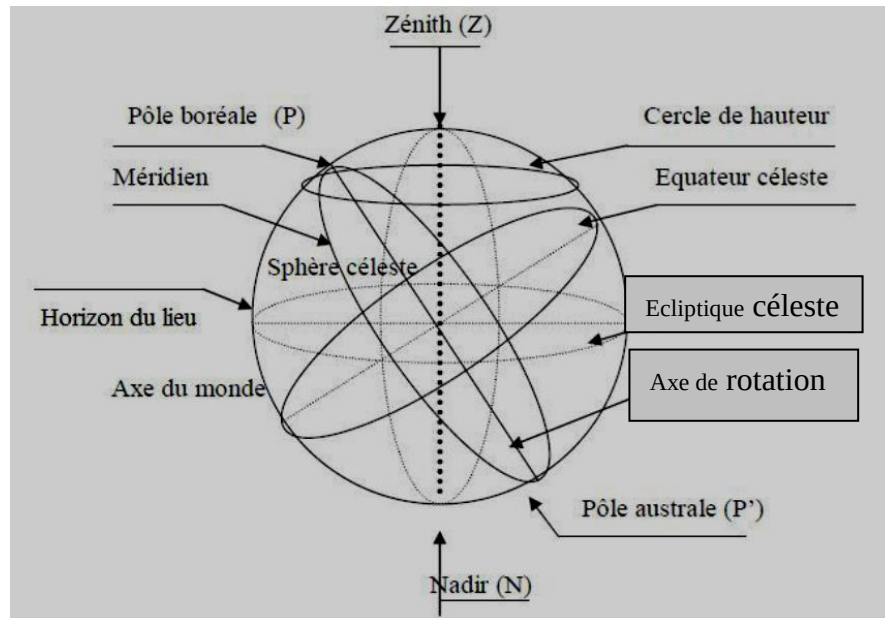


Figure 1-5 : La sphère céleste [3].

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système des coordonnées célestes.

1.2.5 Les coordonnées célestes

1.2.5.1 Coordonnées géographiques

La Terre est séparée par l'équateur en deux demi-sphères, l'hémisphère nord pour celle du pôle nord et l'hémisphère sud pour celle du pôle sud. D'autre part, il est partagé d'Ouest en Est, par le méridien original qui passe par Greenwich (près de Londres en Angleterre) [3].

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent l'emplacement d'un point sur la terre (Figure I.6).

1.2.5.1.1 Longitude (L)

C'est la distance du méridien de Greenwich, mesurée en degré. Il est compté positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien de Greenwich [3].

1.2.5.1.2 Latitude (Φ)

C'est la distance d'un point sur la surface de la terre de l'équateur, mesurée en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de localiser la distance angulaire de n'importe quel point à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud [3].

1.2.5.1.3 L'altitude

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètres [3].

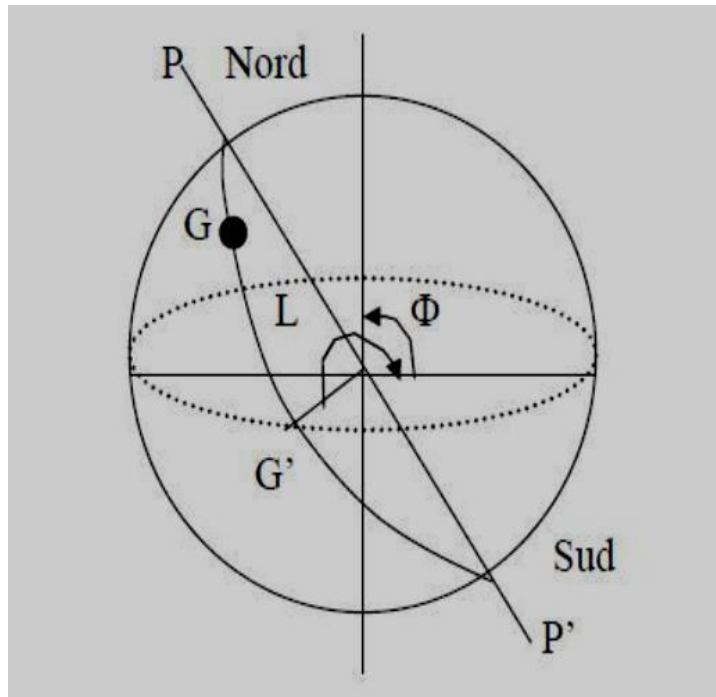


Figure 1-6 : Les coordonnées géographiques [3].

1.2.5.2 Les coordonnées horaires

1.2.5.2.1 La déclinaison (δ)

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Il varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine la durée inégale des jours [3]. Il est obtenu à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin [(284+nj)/365 \times 360] \text{ [Degré]} \quad (\text{I.2})$$

nj : Le nombre du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

1.2.5.2.2 L'angle horaire (ω)

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté Positivement dans la direction rétrograde de 0° à 360° (Figure I.7), une heure sidérale est donc de 15° à un angle et $\omega = 0^{\circ}$ (12h.00) au méridien de Greenwich [3]. L'angle de temps est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15^{\circ} (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I.3})$$

Ou le TSV est le vrai temps solaire.

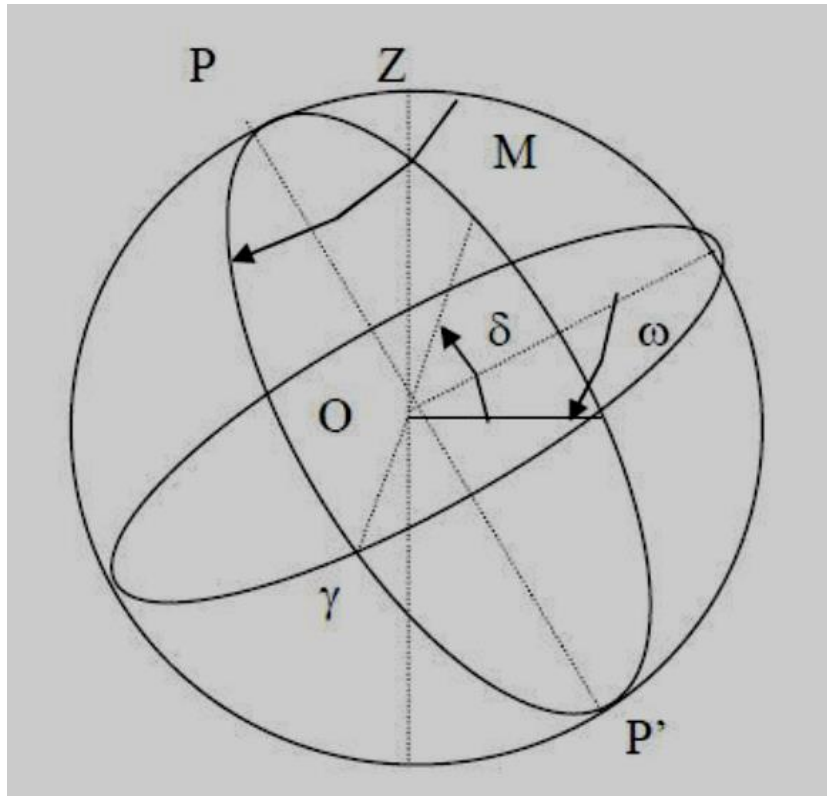


Figure 1-7 : Les coordonnées horaires [3].

1.2.5.3 Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

1.2.5.3.1 L'azimut solaire (a)

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la Terre au Soleil. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° du sud en ouest [4].

Remarque : l'azimut solaire (figure I.8) est négatif le matin (vers l'est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (vers l'ouest), partout dans le monde. Il diffère de l'azimut géographique, qui est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord, quel que soit l'hémisphère du point d'observation.

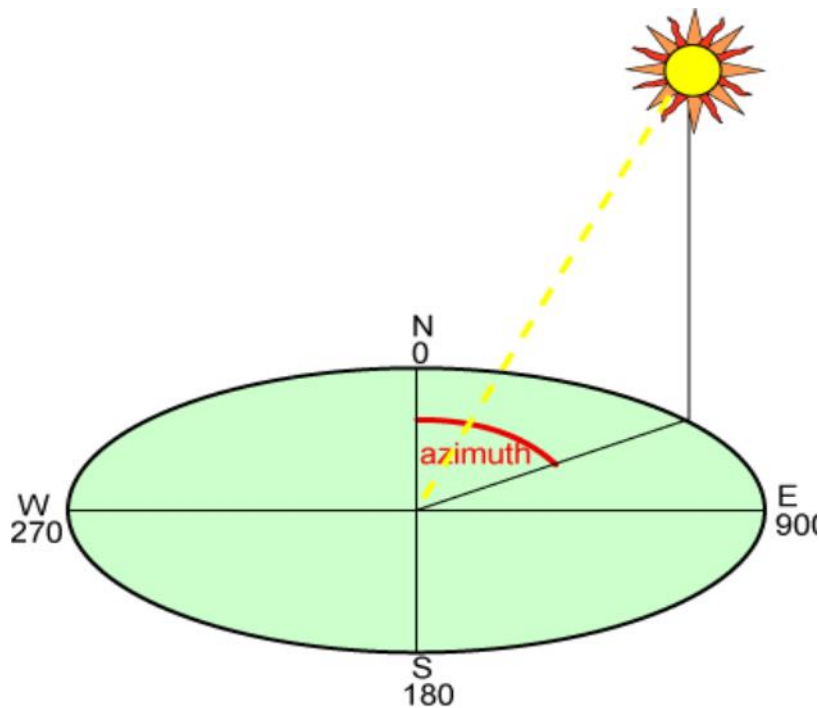


Figure 1-8 : Azimut solaire [4].

1.2.5.3.2 La hauteur (h)

C'est l'angle que la direction du soleil fait avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir, parfois appelé distance zénith le complément de l'angle

$h : z + h = 90^\circ$ [4]. Voir (Figure I.9).

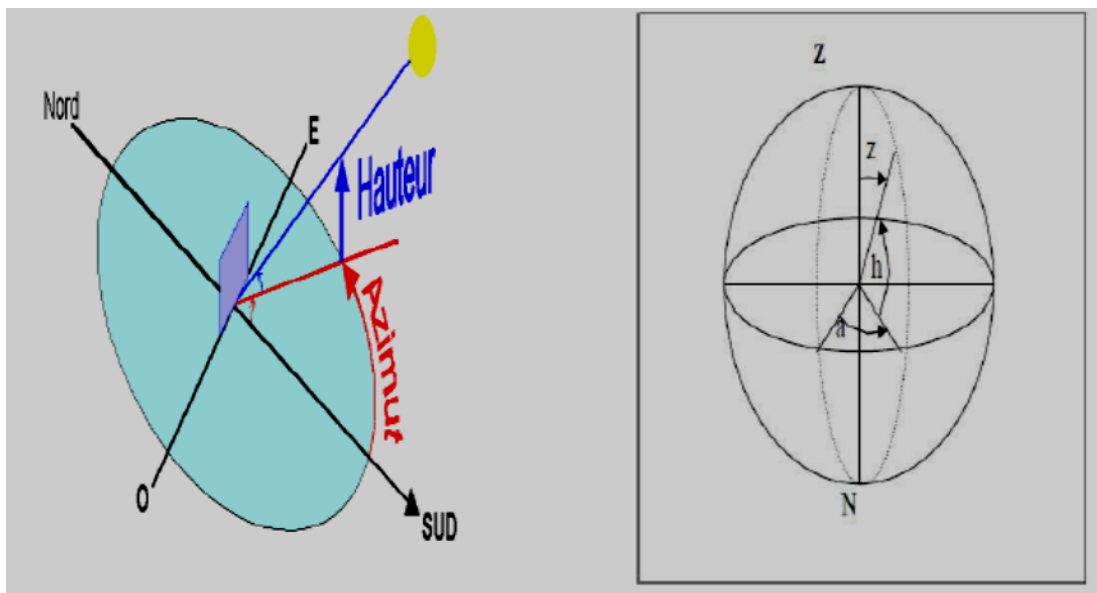


Figure 1-9 : Coordonnées horizontales [4].

L'équation de passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires est :

$$\sin(a) \cos(h) = \cos(\delta) \sin(\omega)$$

$$\cos(a) \cos(h) = \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\Phi) - \cos(\Phi) \sin(\delta) \dots\dots\dots(I.4)$$

$$\sin(h) = \cos(\Phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\Phi) \sin(\delta)$$

1.2.5.3.3 Angle zénithal θ_z

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de 0 à 19° [4].

$$\cos\theta_z = \cos\delta\cos\omega\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi \quad (I.5)$$

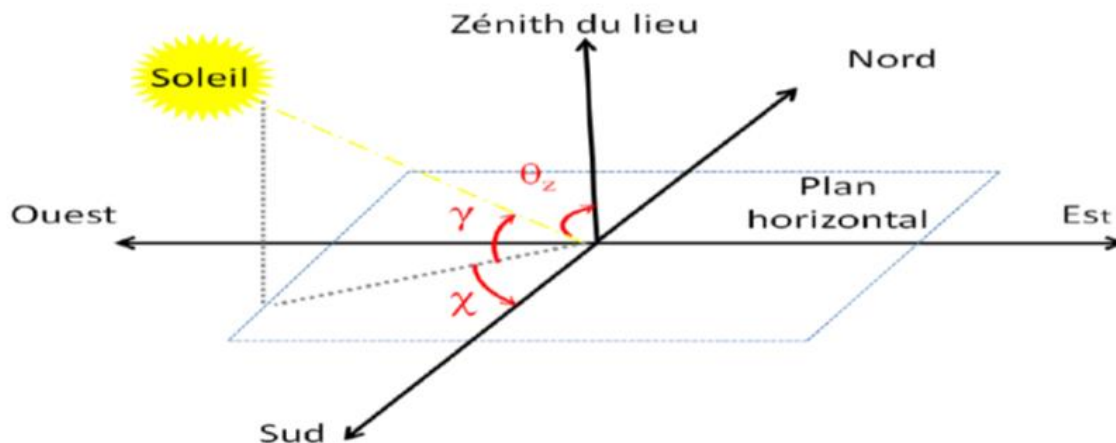


Figure 1-10 : Angle zénithal [4].

1.2.5.3.4 Angle incident

C'est l'angle formé par les rayons du soleil et la normale du plan [4], comme illustré sur la figure I.11.

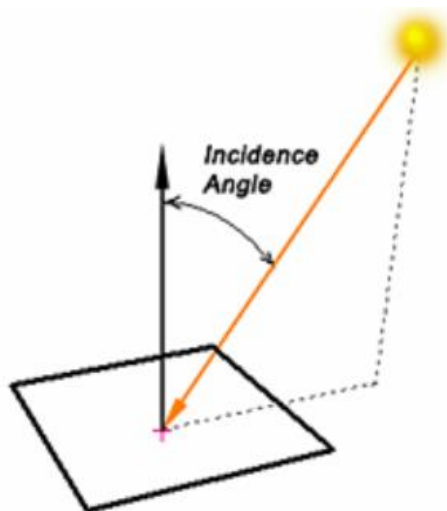


Figure 1-11 : Angle incident [4].

1.2.6 Les temps solaires

1.2.6.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, dans un moment et un endroit donné, est l'angle horaire du soleil w [4]. Il est donné dans la forme suivante

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (I.6)$$

ω : En degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

1.2.6.2 Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Parfois il est appelé temps locale (TSM)[4], Il est donné par la relation :

$$Et = TSV - TSM \quad (I.7)$$

Avec :

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad (I.8)$$

Où : $N' = (n_j - 81) \times 360/365$

Où : n_j est le numéro du jour dans l'année.

1.2.6.3 Le Temps Solaire Universel (T.U)

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore Greenwich Mean Time (GMT) [4]:

$$TU = TSM - (L/15) \quad (I.9)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

1.2.6.4 Le Temps Légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.10)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

1.2.6.5 Le Temps Civil

C'est le temps qui a pour origine minuit.

1.2.6.6 L'équation du temps

C'est une équation qui prend en compte la variation de la vitesse de rotation de la Terre [4], elle est donnée par

$$E_t = 0.0002 - 0.4797 \cos(\omega'j) + 3.224 \cos(2\omega'j) - 0.0903 \cos(3\omega'j) - 7.3509 \sin(\omega'j) + 9.3912 \sin(2\omega'j) + 0.3361 (3\omega'j). \quad (I.11)$$

Avec : j est le numéro du jour dans l'année, à partir du premier janvier

$\omega' = 0.98$

E_test en minute

1.2.7 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible sur une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système d'énergie solaire et rendre un dimensionnement aussi précis que possible compte tenu de la demande à satisfaire [5].

En raison de sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un énorme réservoir solaire, comme le montre la figure I.12.

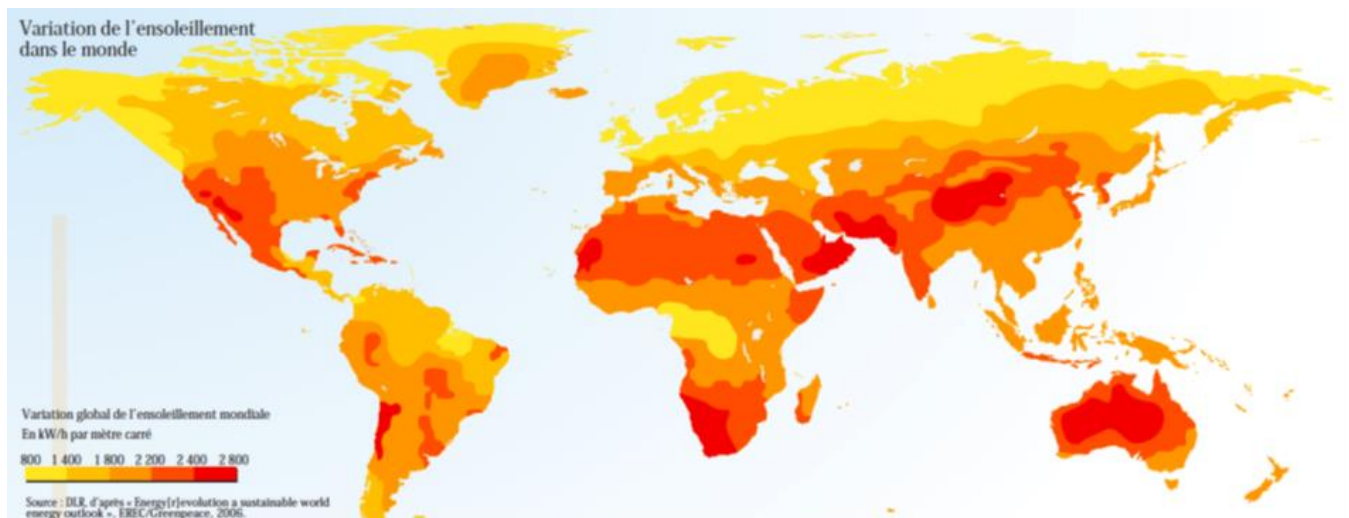


Figure 1-12 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [5].

Suite à une évaluation par satellite, l'Agence spatiale allemande (ASA) a conclu que l'Algérie représente le plus grand potentiel solaire de tout le bassin méditerranéen, à savoir 169000 TWh/an pour l'énergie solaire thermique, 13,9 TWh/an pour l'énergie solaire photovoltaïque. Le potentiel

solaire algérien équivaut à 10 grands gisements de gaz naturel découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée au tableau I.2 en fonction de l'ensoleillement reçu annuellement :

Tableau 1-2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [6].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue	1700	1900	2650

La durée d'insolation au Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus grande au monde, elle est toujours supérieure à 8h/jour et peut atteindre jusqu'à 12h/jour pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle descend jusqu'à 6h/jour pendant la période estivale [6].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel dans toute l'Algérie (figure I.13)

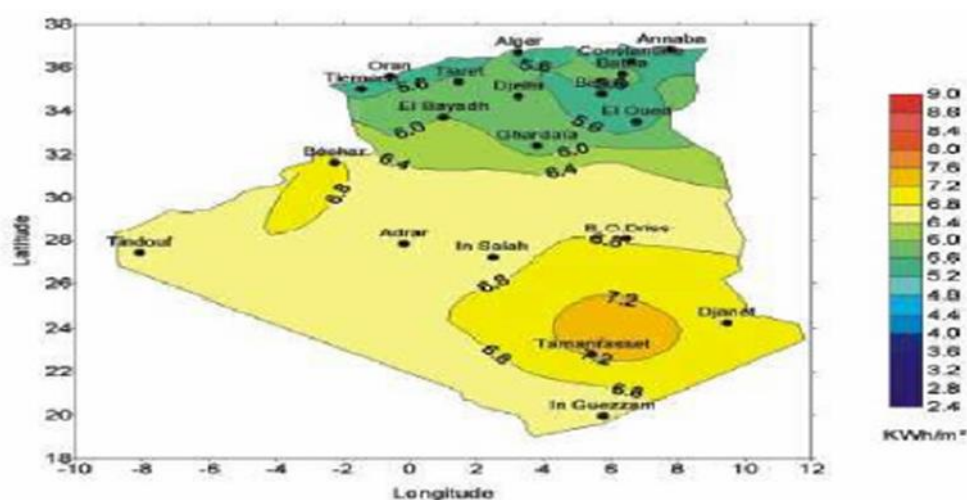


Figure 1-13 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné la latitude du lieu [6].

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologique de l'ONM réparties dans toute l'Algérie (figure I.14). Toutefois, seules 7 stations météorologiques mesurent les composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu horizontalement, soit en raison du manque de fiabilité des appareils de mesure, soit en raison du coût élevé de ces équipements. La durée de

l'insolation, par contre, est mesurée par un héliographe³ dans la majorité des stations de l'O.N.M en raison de la facilité de sa mise en œuvre [6].

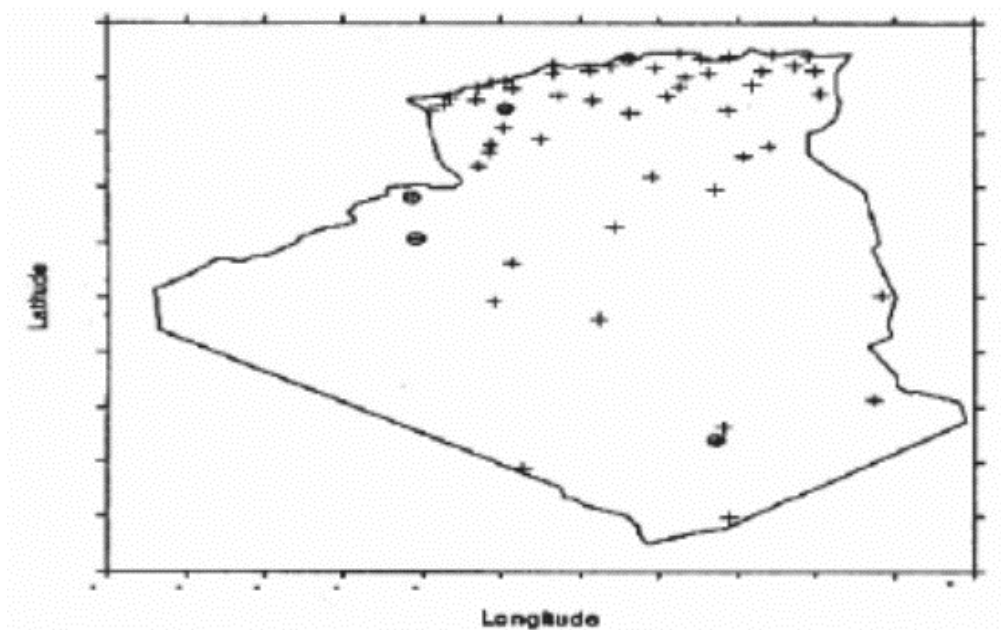


Figure 1-14 : Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie [6].

1.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude théorique sur le champ solaire et les données sur l'évolution du rayonnement solaire, et d'autre part nous nous sommes concentrés sur le potentiel solaire de l'Algérie. Dans le chapitre suivant, nous discuterons de l'état de l'art des centrales solaires à concentration.

Chapitre 2

Etat de l'art sur les centrales solaires à concentration

2.1 Introduction

C'est à la fin du 19^{ème} siècle que les premières expériences, sous leurs formes actuelles, apparaissent dans le domaine du solaire concentré (exposition universelle de 1878). Au 20^{ème} siècle, les premiers systèmes paraboliques produisant de la vapeur ont été conçus. À la fin des années 1970, des projets pilotes pour des centrales solaires concentrées ont été développés aux États-Unis, en Russie, au Japon et en Europe. Les années 1980 marquent le début de la construction massive de ces centrales dans le désert californien. Aujourd'hui, la technologie solaire thermodynamique a considérablement évolué et de nombreux projets l'utilisent [7].

2.2 Centrale solaire thermodynamique

La thermodynamique solaire (ou CSP : Concentrated Solar Power) est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Comparé au photovoltaïque, il est plus polyvalent dans ses utilisations. La technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température (entre 200 et 500 °C) et produire de la vapeur qui sera récupérée sous forme d'électricité, de froid, de chaleur industrielle ou dans des applications plus spécifiques telles que le dessalement de l'eau de mer.

L'un des principaux avantages du solaire thermodynamique est qu'il peut produire de l'électricité en continu grâce aux systèmes de stockage thermique auxquels il peut être associé. Cela permet de couvrir les pics de consommation situés avant le lever du soleil ou après le coucher du soleil. L'autre avantage est l'hybridation. Le principe est d'associer une centrale solaire à une autre source de chaleur issue de l'énergie fossile ou de la biomasse, garantissant ainsi une production continue. Cela permet des systèmes de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur) qui peuvent améliorer la rentabilité des projets. L'hybridation offre donc des capacités fermes, prévisibles et non seulement relatives, fondées sur la vitesse et la qualité de l'ensoleillement [8].

2.2.1 Principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique

Les centrales thermodynamiques se basent sur deux modes de fonctionnement :

2.2.1.1 Génération directe de l'électricité

Dans le cas de la production directe, le fluide circulant dans le champ solaire est le même que celui qui entraîne la turbine.

2.2.1.2 Génération indirecte de l'électricité

Dans le cas de la génération indirecte, le fluide caloporteur circulant dans le champ solaire chauffe un fluide de travail qui alimente la turbine.

Ce transfert de chaleur se fait par un échangeur de chaleur. Un schéma global de la thermodynamique solaire est présenté sur (Figure II.1) [9].

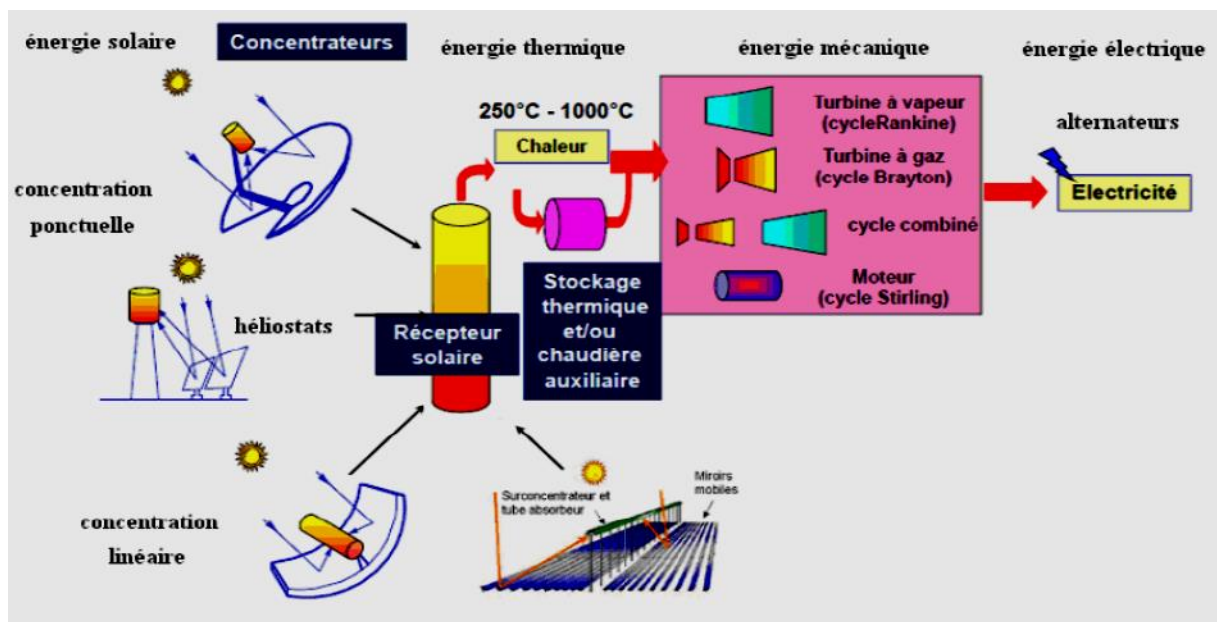


Figure 2-1 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration thermodynamique [9].

Une centrale solaire thermodynamique est généralement composée de trois blocs, comme le montre la (figure II.2) :

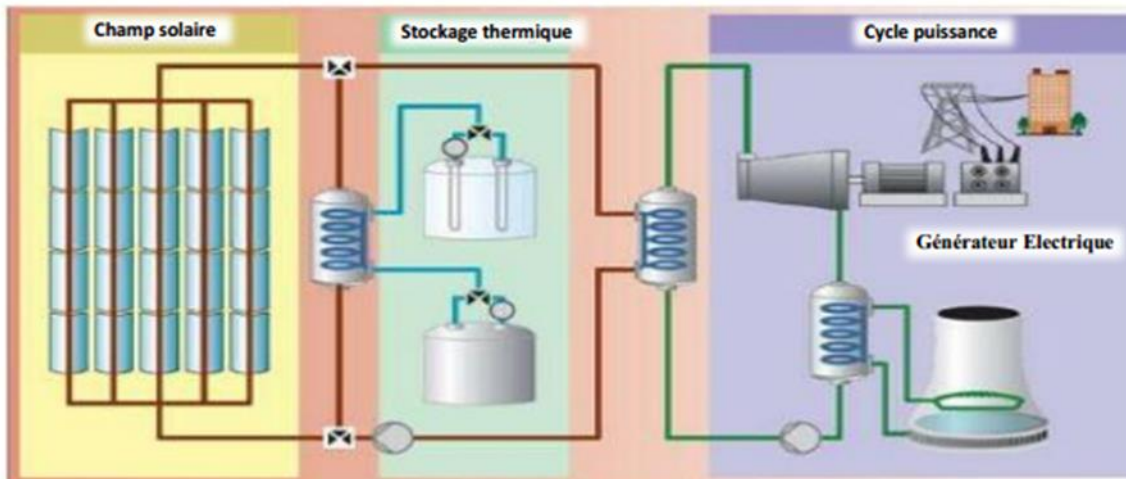


Figure 2-2 : Cycle d'une centrale à collecteurs cylindro-parabolique [9].

- Le premier bloc est un système de captage solaire composé d'un réflecteur/concentrateur, communément appelé champ solaire. Il capte le rayonnement solaire direct et le concentre sur un récepteur dans lequel un liquide de refroidissement s'écoule. Au cours de cette étape, le rayonnement solaire est converti en énergie thermique [9].
- Le deuxième bloc (stockage thermique) est un système de stockage et de retour d'énergie thermique qui permet la production d'électricité à partir de la ressource solaire et de pallier ainsi à son intermittence [9].
- Le troisième bloc (Cycle de Puissance) est un système de conversion thermodynamique composé de deux éléments : l'élément principal est une turbine qui transforme l'énergie thermique du fluide de travail en énergie mécanique. La turbine couplée à un générateur électrique convertit l'énergie mécanique en électricité. L'électricité produite peut être injectée dans le réseau de transport et de distribution [9].

Les systèmes de génération d'électricité sont divers : turbine à gaz, cycle Rankine, moteur Stirling, cycle Rankine organique sont généralement des options choisies.

2.3 Centrale solaire hybride

Une autre solution pour obtenir un bon taux d'utilisation des groupes électrogènes est d'hybrider l'installation : un groupe auxiliaire gaz ou pétrole est utilisé pendant les périodes nuageuses ou à la fin de la journée pour assurer une production continue. Une centrale solaire hybride (figure II.3)

comprend donc une centrale solaire thermique qui convertit la chaleur des concentrateurs solaires ou d'un brûleur à combustibles fossiles (gaz, pétrole, etc.) en électricité. La sauvegarde permet de satisfaire la demande électrique lorsque le rayonnement solaire est trop faible (passage nuageux, voile lumineux, etc.). Ou inexistante (la nuit). Ce concept permet de produire en permanence, la nuit ou lorsque les conditions météorologiques ne sont pas optimales [10].

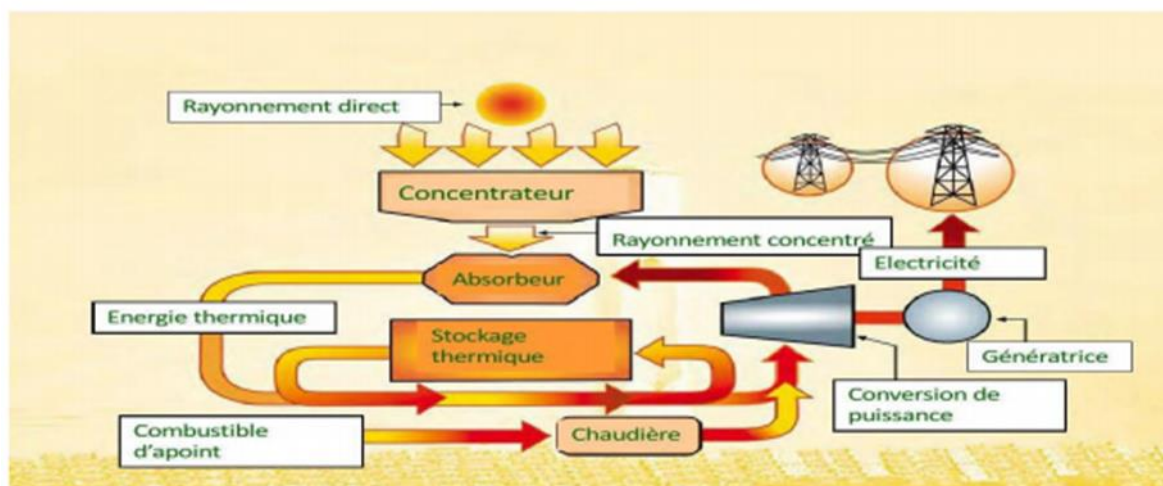


Figure 2-3 : Schéma de principe d'une centrale hybride [10].

2.3.1 Description de la centrale hybride de Hassi R'mel

La première centrale hybride solaire-gaz en Algérie a été inaugurée le 14 juillet 2011. Située à Hassi R'mel (figure II.4), cette centrale a été nommée SPP I, d'après la société qui l'a construite, Solar Power Plant One. Cette centrale, réalisée par NEAL en partenariat avec la société espagnole ABENER, combine la technologie à cycle combiné avec des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques. Il s'agit du premier cycle combiné déployé loin de la côte, grâce à la technologie de refroidissement à la vapeur par condenseurs d'air. Le contrat de réalisation de la centrale a été attribué à ABENER, qui est en charge l'Engineering Procurement Construction (EPC) et des opérations de maintenance. La structure du capital de cette unité pilote est répartie entre NEAL : 20 %, SONATRACH : 14 %, ABENER : 51 % et COFIDES : 15 %. Le coût est estimé à 315 millions d'euros, dont 252 millions d'euros (80%) fournis par un consortium de banques algériennes (Banque Extérieur d'Algérie, Banque Nationale d'Algérie et Crédit Populaire d'Algérie) et 20% (63 millions d'euros) en fonds propres. Le temps d'achèvement de la centrale hybride est de 36 mois ~ en 2011 [11].



Figure 2-4 : Centrale hybride de HassiR'mel [12].

2.4 Les centrales solaires à concentrations

L'énergie solaire n'étant pas peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures utilisables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchiée par le miroir et le transfert vers le fluide thermodynamique. Les systèmes de concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels [7]. La figure II.5 ci-dessous montre les différences entre les technologies solaires à concentration.

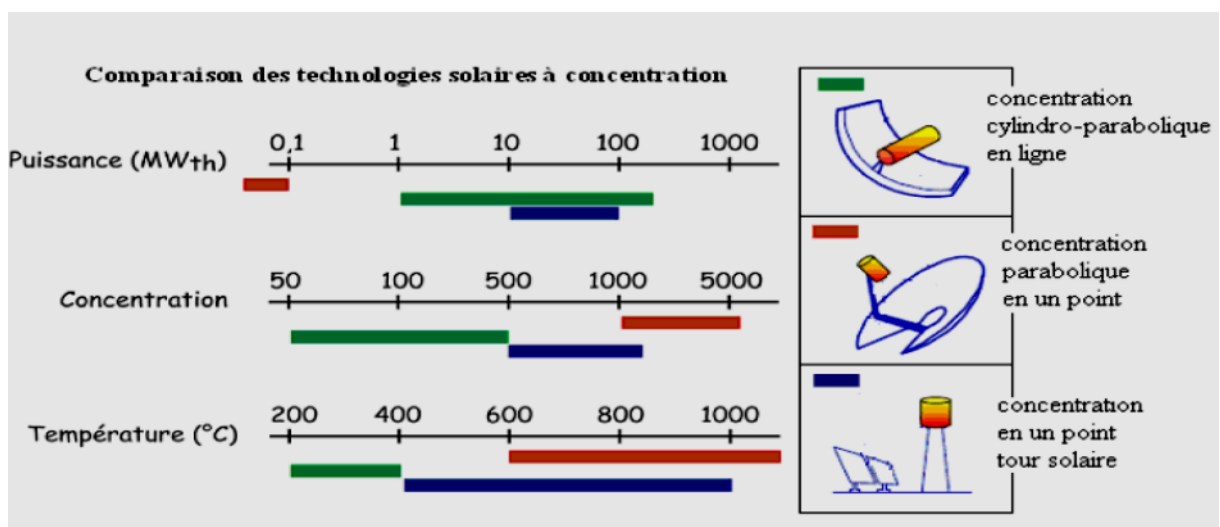


Figure 2-5 : Comparaison des technologies solaires à concentration [7].

2.4.1 Le facteur de concentration

Une caractéristique du système est son facteur de concentration. Ce coefficient permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire : plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte est élevée [7]

$$\textbf{Facteur de concentration} = \frac{\text{surface du miroir}}{\text{surface du récepteur}}$$

Facteur de concentration optique Est égal au rapport entre l'énergie reçue à l'ouverture du concentrateur et l'énergie reçue à l'ouverture du récepteur.

Est égale au rapport de l'énergie reçue à l'ouverture de concentrateur à l'énergie reçue à l'ouverture du récepteur.

$$C_0 = \frac{I_0}{I_r} \quad (\text{II.1})$$

2.4.2 Facteur de concentration géométrique

La définition la plus commune du facteur de concentration (taux) est basée sur la notion de surface. Il s'agit du rapport entre la surface de l'ouverture et la surface du récepteur [13].

$$C_0 = \frac{A_0}{A_r} \quad (\text{II.2})$$

Il est clair que la surface de l'ouverture du capteur est beaucoup moins claire, ce qui doit compter comme l'ouverture du récepteur. Dans de nombreux cas, il s'agit de la surface projetée du tube absorbeur, de sorte que la surface d'ouverture du récepteur est un rectangle de $D_{ab.ext} \cdot L$, où $D_{ab.ext}$ le diamètre du tube absorbeur. Le rapport de concentration est [14] :

$$C_{rc} = \frac{A_0}{A_r} = \frac{W \cdot L}{D_{ab.ext} \cdot L} = \frac{W}{D_{ab.ext}} \quad (\text{II.3})$$

Une autre possibilité est de prendre la surface de l'absorbeur irradié comme surface d'ouverture du récepteur. Pour un collecteur industriel, cela signifie que toute la surface du tube absorbeur $\pi \cdot D_{ab.ext}$

surface de l'ouverture du récepteur et zone de capture du collecteur $(W - D_{ab.ext}) \cdot L$ [15] : est $(- D_{ab.ext}) \cdot L$ [15]

$$C_{rc} = \frac{(W - D_{ab.ext}) \cdot L}{\pi \cdot D_{ab.ext} \cdot L} = \frac{W - D_{ab.ext}}{\pi \cdot D_{ab.ext}} \quad (\text{II.4})$$

2.4.3 Le facteur d'interception (γ)

Qui représente la relation entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes. Les principaux facteurs qui influent sur le facteur d'interception sont [16] :

- L'erreur de suivi solaire.
- La précision géométrique du réflecteur.
- La réflectivité du réflecteur.
- La Poussière sur l'absorbeur et le réflecteur

2.4.4 Le facteur de l'angle d'incidence modifié (K)

Décrit comment l'efficacité optique du concentrateur change lorsque l'angle d'incident change. La valeur de ce facteur est toujours inférieure à l'unité et diminue avec l'augmentation de l'angle d'incidence.

2.5 Les capteurs solaires à concentrations

2.5.1 Définition d'un capteur a concentration

Est un capteur solaire avec un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu (d'où le nom de collecteur de concentration). Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques ou cylindro-paraboliques (miroirs) pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer spot ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer localisé ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire concentrée [17].

Les capteurs de concentration permettent d'obtenir une température élevée au foyer, mais ils n'utilisent que les rayons directs du soleil et il est nécessaire que les capteurs soient constamment orientés vers le soleil.

2.5.2 Les différents types de capteurs à concentrations

Il existe quatre principaux types de concentrateurs, comme l'illustre la figure (II.6).

- Les concentrateurs ponctuels (suivi du soleil sur deux axes) avec :

- Un seul miroir : ce sont les paraboles
 - Plusieurs miroirs : il s'agit des centrales à tour et champ d'héliostats.
- Les concentrateurs linéaires (suivi du soleil sur un axe) avec :
- Un seul miroir : ce sont les collecteurs cylindro-paraboliques,
 - Plusieurs miroirs : ce sont les Réflecteurs Linéaires de Fresnel.

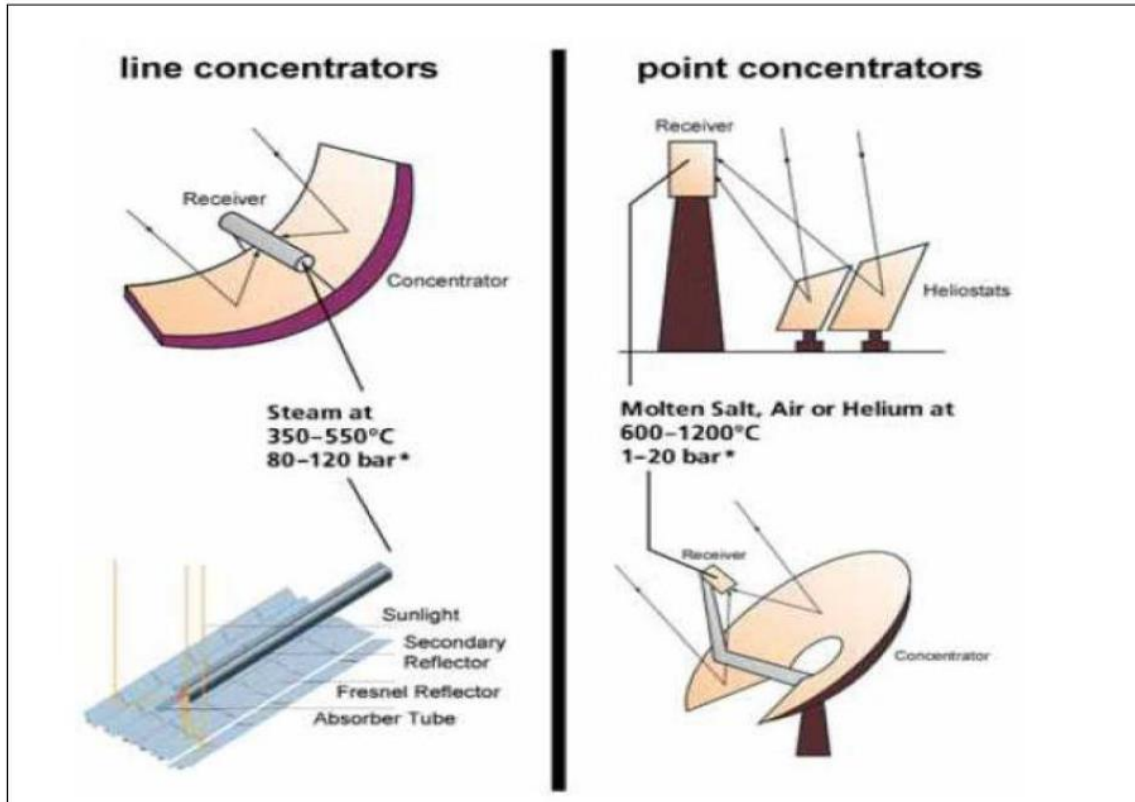


Figure 2-6 : Les types de capteurs à concentrations [17].

2.5.3 Centrale à Tour

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaires à deux axes qui dirigent l'énergie solaire vers un grand absorbeur situé dans une tour. A ce jour, la seule application du capteur héliostat est la production d'énergie dans un système appelé « tour centrale ».

Une centrale à tour est un ensemble de grands miroirs qui suivent le mouvement du soleil, les miroirs concentrent les rayons du soleil sur le récepteur au sommet de la grande tour. Un ordinateur maintient les miroirs alignés de sorte que les rayons du soleil qui sont réfléchis, toujours cibler le récepteur où la température peut dépasser 1000°C. De la vapeur à haute pression est générée pour produire de l'électricité [8], Voir figure (II.7-8).

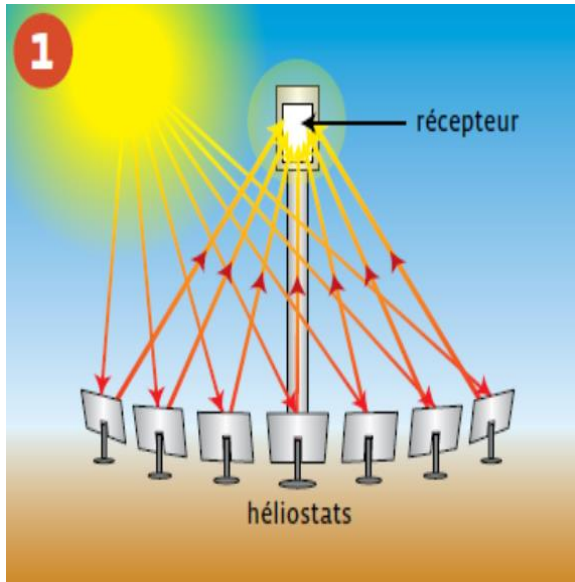


Figure 2-7 : Schéma de principe d'une centrale à tour [8].



Figure 2-8 : Centrale à tour en Andalousie (Espagne) [8].

2.5.4 Les concentrateurs solaires types Fresnel (LFR)

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques est le façonnage du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de réduire ce coût, plusieurs groupes de recherche travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel linéaires. L'idée est de rapprocher la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plats. Un premier réflecteur de scène est installé sur le sol. Le rayonnement se reflète dans le foyer, la parabole approchée par le jeu des miroirs. Un deuxième stade de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Voir figure (II.9-10)

Ce deuxième étage de réflecteurs, en plus du rayonnement réfléchissant, sert également d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une grande couche d'isolation dans sa partie supérieure. Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux concentrateurs traditionnels sont [18] :

- Réduction du coût des miroirs.
- Aucun vide à l'intérieur du tube de réception, ce qui facilite sa conception et sa durabilité.
- Les contraintes mécaniques dues au vent sont réduites par la disposition l'agencement plat des rétroviseurs.

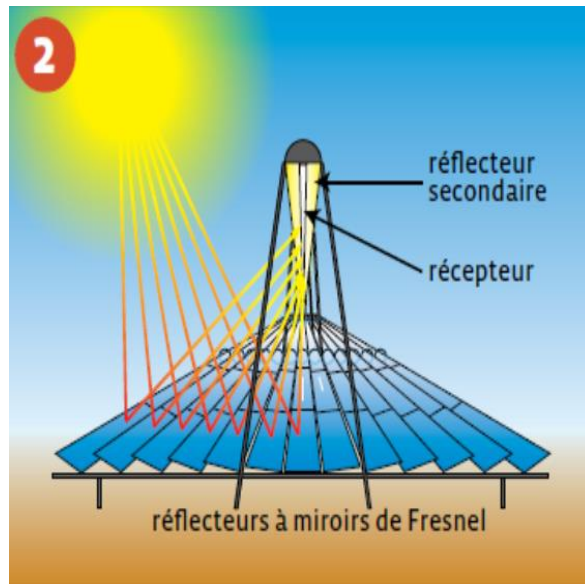


Figure 2-9 : Schéma de principe d'une centrale solaire à réflecteur linéaire de Fresnel [8].



Figure 2-10 : Réflecteurs linéaire de Fresnel à Liddell (Australie) [8].

2.5.5 Les concentrateurs solaires paraboliques

Le Concentrateur parabolique ou sphérique et aussi appelé assiette. Les rayons solaires reflétés par le miroir parabolique convergent vers un seul point, le foyer de la parabole. Le système doit être orienté en tout temps vers le soleil, ce qui implique une motorisation précise en deux axes. Le facteur de concentration moyen dépasse 1 000, ce qui permet au fluide de monter à une température très élevée au-dessus de 700 °C [19]. Voir figure (II.11)

Il existe plusieurs modèles de ces assiettes, de 50 à 100 m², bien adaptées aux puissances modestes (5 à 25 kW électriques). La concentration maximale de ce capteur est $C_{\text{max}} = 46165$ et le rendement maximal est $\eta_{\text{max}} = 25 \%$.

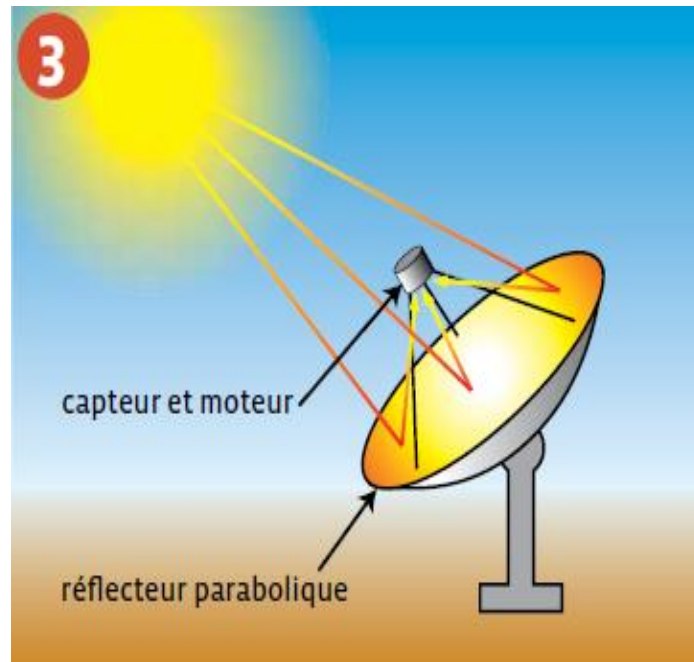


Figure 2-11 : Principe de fonctionnement d'un capteur parabolique [8]

2.5.6 Les concentrateurs cylindro-paraboliques (CCP)

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus approuvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, certaines dans les années 80. Il est composé d'un réflecteur parabolique (miroir), d'un tube récepteur, du système de poursuite solaire et d'une structure métallique. Voir figure (II.12)

Aussi appelés concentrateurs linéaires, ces miroirs paraboliques concentrent les rayons du soleil vers une ligne focale. Le récepteur est un tube placé sur ce foyer linéaire, au-dessus de l'auge, et dans lequel circule un fluide caloporteur.

Avantage de ces miroirs paraboliques, le suivi du soleil est simplifié : il est effectué sur un seul axe au lieu de deux pour les héliostats. Les concentrateurs sont généralement orientés du nord au sud et tournent d'est en ouest pour suivre la trajectoire du soleil [19].

La concentration maximale de ce capteur est $C_{max} = 215$ et le rendement maximal est

$\eta_{max} = 50 \%$.

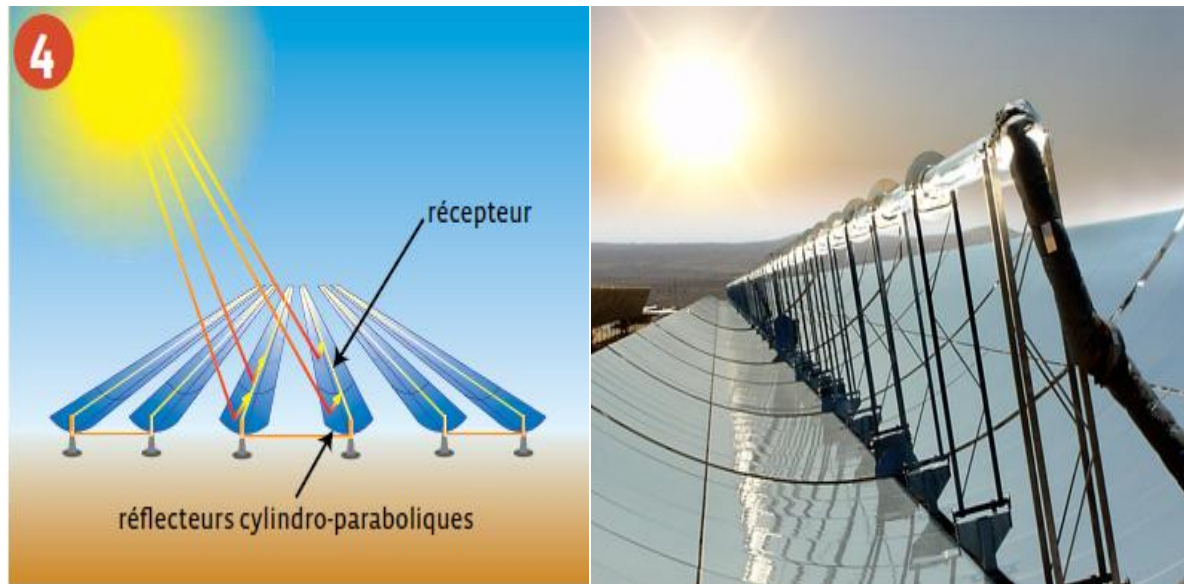


Figure 2-12 : Schéma de fonctionnement d'une centrale à concentrateurs cylindro-parabolique [8].

2.5.6.1 Les composants d'un concentrateur cylindro - parabolique

La conception d'un collecteur à effet de concentration nécessite des techniques plus ou moins complexes dont le principe est de focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduit, afin d'augmenter la concentration du rayonnement à l'absorbeur [19], les différentes parties de la CCP sont illustrées à la figure (II.13) :

Structure support

Moteurs (hydraulique, moteur électrique + réductions)

Miroir (verre épais, mince)

Contrôleurs (boucles ouvertes ou fermées)

Tube absorbeur (sélectif, sous vide, connectiques)

Suivi solaire

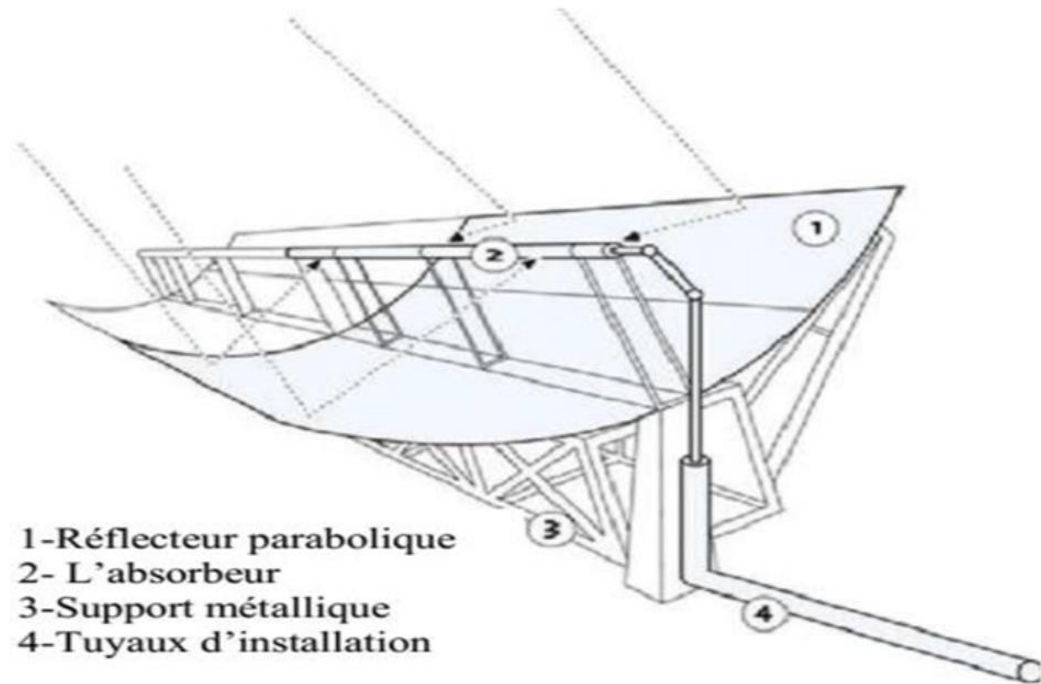


Figure 2-13 : les principaux composants d'un panneau cylindro-parabolique [20].

2.5.6.2 Les miroirs

Pour un collecteur cylindro-parabolique, le miroir est une surface réfléchissante qui recueille et concentre le rayonnement solaire incident au foyer du système. Ces miroirs (voir figure II.14) sont généralement composés de verre à faible teneur en fer avec une bonne transmissivité. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent dans sa partie inférieure, et d'un revêtement de protection spécial. Un bon réflecteur peut réfléchir 97 % du rayonnement incident [20]

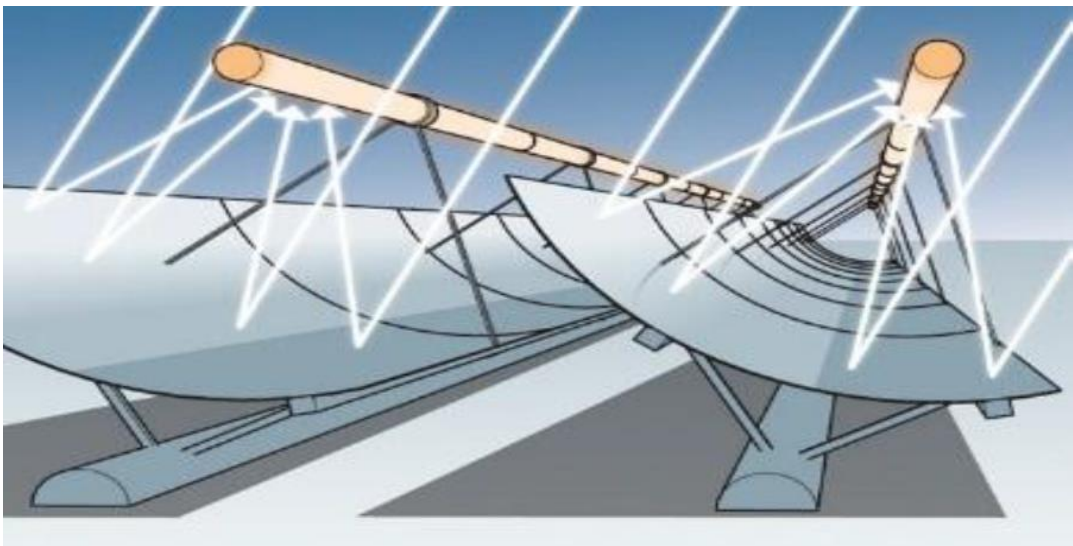


Figure 2-14 : Réflexion des rayons solaires sur le tube absorbant [20].

2.5.6.3 Le tube collecteur

Le tube absorbant doit présenter les caractéristiques suivantes [20] :

- Bonne absorption du rayonnement (il s'agit d'une couche cermet d'un composé métallique projeté dans la céramique/le plasma) qui agit comme un absorbeur sélectif (absorptivité de 96 % pour une émissivité de 14 % à la température de travail), son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible pour éviter la réflexion du rayonnement incident.
- Pertes de chaleur limitées : La température du tube dépasse généralement 400 °C, les pertes dues aux échanges convectifs et radiatifs peuvent être très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe en verre sous vide.

La figure (II.15) suivante illustre les principales composantes du tube collecteur.

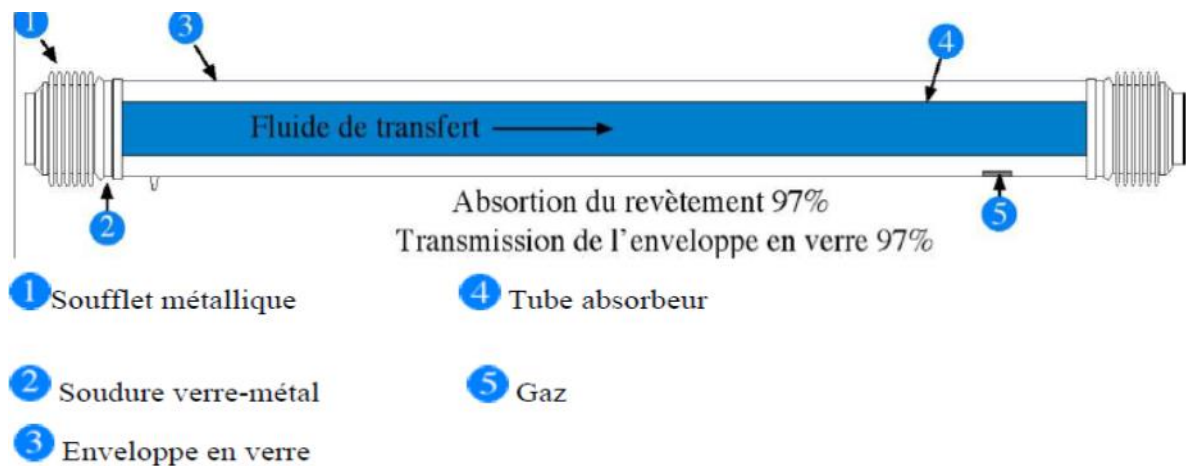


Figure 2-15 : Schéma principale des composantes du tube récepteur [20].



Figure 2-16 : structure métallique d'un capteur cylindro-parabolique [20].

2.5.6.4 La structure métallique

C'est l'élément sur lequel reposent toutes les autres composantes du champ solaire. Doit être suffisamment solide pour résister à d'importantes contraintes mécaniques liées au vent. Il doit également être muni d'extrémités assurant la compatibilité entre la dilatation thermique inégale de l'acier et du verre [20]. La figure (II.16) suivante représente la structure métallique d'un capteur cylindro-parabolique.

➤ La géométrie et l'optique des concentrateurs cylindro-parabolique

Pour pouvoir choisir un réflecteur cylindro-parabolique, le concentrateur cylindro-parabolique est caractérisé par deux paramètres principaux. Paramètres géométriques et optiques.

➤ Les paramètres géométriques

Les quatre paramètres suivants sont utilisés pour caractériser la forme et la taille d'un cylindre parabolique : la longueur du cylindre-parabolique, la largeur de l'ouverture et l'angle d'ouverture et la distance focale [21]. Les paramètres géométriques d'un cylindre parabolique. La figure (II.17) suivante illustre les paramètres géométriques d'un cylindre parabolique.

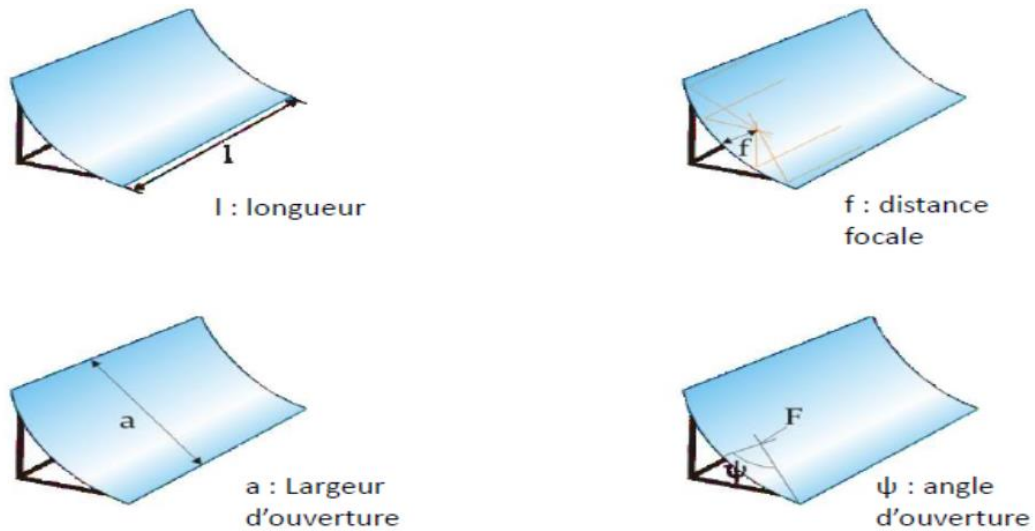


Figure 2-17 : Les paramètres géométriques d'un cylindro parabolique [21].

➤ La longueur de cylindro parabolique

C'est la longueur du miroir, elle peut atteindre les 4.06 m.

➤ La distance focale

C'est la distance entre le point focal et la courbe de la parabole. La longueur focale de la parabole (f ou F) représente dans la figure (II.18) est le paramètre qui décrit la forme de la parabole. L'équation de parabole est [21] :

$$y = \frac{1}{4f} x^2 \quad (\text{II.5})$$

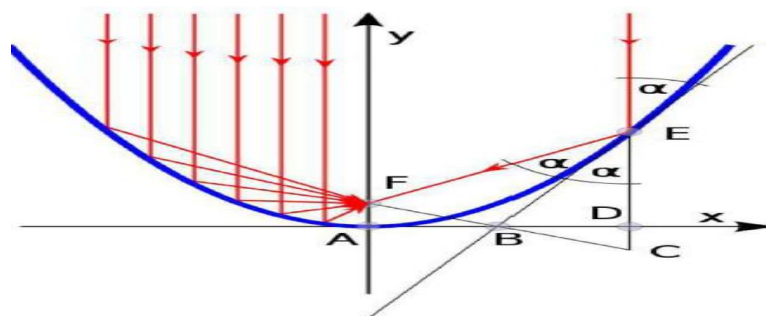


Figure 2-18 : Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique [21].

➤ L'angle d'ouverture (ψ)

Il s'agit de l'angle au point focal entre l'axe optique (Y) et le segment reliant le point focal au bord du miroir [21].

Deux des trois paramètres de l'angle d'ouverture, de la largeur d'ouverture et de la longueur focale sont suffisants pour déterminer complètement la section transversale d'une cylindro-parabolique, c'est-à-dire la forme et la taille. Cela signifie également que deux d'entre eux sont suffisants pour calculer le troisième, ψ peut être exprimé en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la longueur focale :

$$\tan\psi = \frac{\frac{a}{f}}{2 - \frac{1}{8}\left(\frac{a}{f}\right)^2} \quad (\text{II.6})$$

Le rapport de la largeur de l'ouverture à la distance focale peut également être exprimé en fonction de l'angle d'ouverture :

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan\psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2\psi} + 16} \quad (\text{II.7})$$

La figure (II.19) suivante représente le rapport a/f en fonction de l'angle d'ouverture

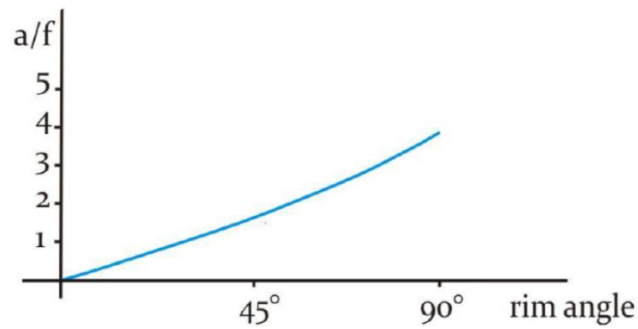


Figure 2-19 : Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f [21].

L'angle d'ouverture est lié à la distance entre les différentes parties des miroirs et la ligne focale (voir figure II-20). En prenant une largeur d'ouverture fixe, la figure représente cette relation. Il y a un angle d'ouverture optimal qui prend également en compte le prix du miroir proportionnel à sa surface. L'angle d'ouverture du cylindre parabolique réel est d'environ 80°.

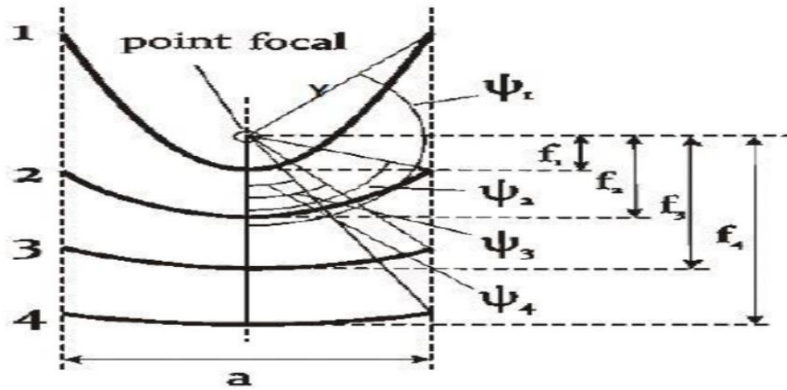


Figure 2-20 : Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante [21].

➤ **La largeur de l'ouverture (a) :**

La plupart des collecteurs actuels ont une largeur d'ouverture d'environ 6 m, la longueur focale est (environ à l'angle d'ouverture et la largeur d'ouverture) d'environ 1,75 m et la longueur du module est comprise entre 12 et 14 m. Il y a des collecteurs qui ont plus petit (Solarlite) ou plus grand (Skyfuel, Heliotric) largeurs d'ouverture avec différentes longueurs focales correspondantes [21].

➤ **Les paramètres Optiques**

- La surface du miroir et la surface d'ouverture (Voir figure II.21)

Pour un DNI donné (rayonnement normal direct) et position solaire, la surface d'ouverture du miroir est calculée comme le produit de la largeur de l'ouverture et de la longueur du collecteur.

$$A_a = a \cdot l \quad (\text{II.8})$$

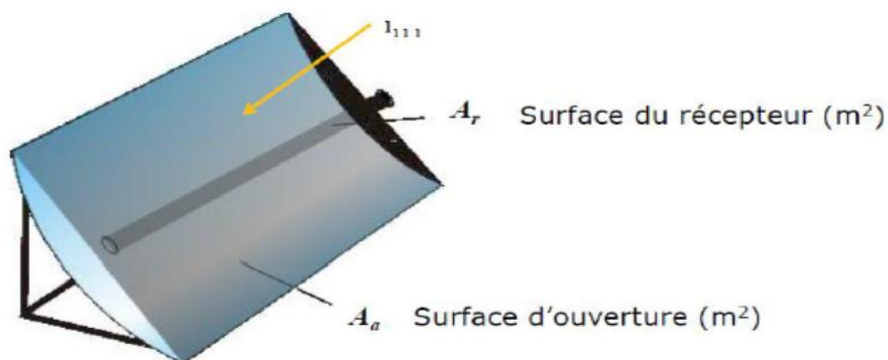


Figure 2-21 : Surface d'ouverture du collecteur et Surface d'ouverture du récepteur [21].

La surface d'un cylindro parabolique peut être importante pour déterminer le besoin de matériau pour la fabrication. La surface est calculée comme suit

$$A = \left(\frac{a}{2} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2 \cdot f \cdot \ln \left(\frac{a}{4 \cdot f} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) \cdot l \quad (\text{II.9})$$

2.5.7 Le système de suivi solaire

Le rôle du mécanisme de suivi est d'ajuster l'inclinaison du concentrateur de sorte que le rayonnement solaire incidente soit toujours perpendiculaire au plan d'ouverture du concentrateur (angle d'incidence zéro) [22]. Le pilotage de la poursuite du soleil s'effectue par une régulation en boucle ouverte ou fermée :

- La régulation en boucle ouverte utilise un algorithme qui positionne l'axe du concentrateur dans la direction du soleil à chaque instant, en fonction des coordonnées calculées du soleil.
- La commande en boucle fermée corrige une première position approximative sur la base d'une mesure effectuée par un capteur thermique (thermocouple) ou optique (pyrhéliomètre). La poursuite solaire peut être sur un seul axe ou autour de deux axes. Dans le premier cas, le mouvement peut être de trois façons :

Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud.

Nord-Sud horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Est-Ouest.

Est-Ouest polaire, le mouvement doit être le long de l'axe de la Terre avec une inclinaison égale à la latitude du lieu.

La figure II.22 ci-dessous illustre Les modes de poursuite solaire d'un CCP.

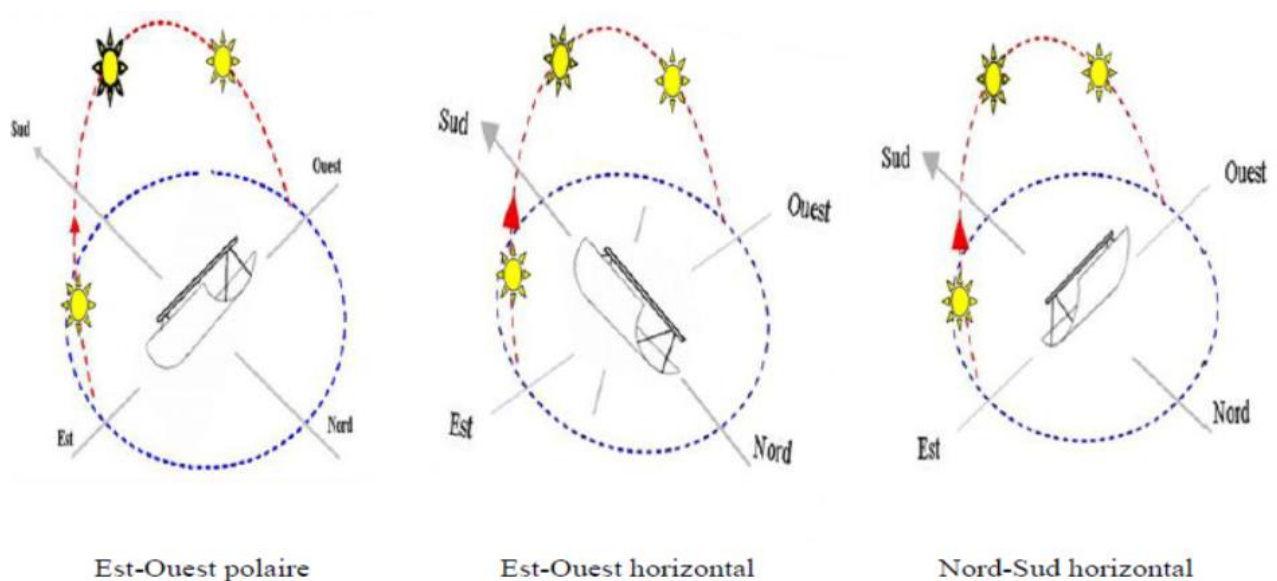


Figure 2-22 : Les modes de poursuite solaire d'un CCP [22].

La figure II.23 ci-dessous illustre le capteur cylindro-parabolique en position de suivi solaire.

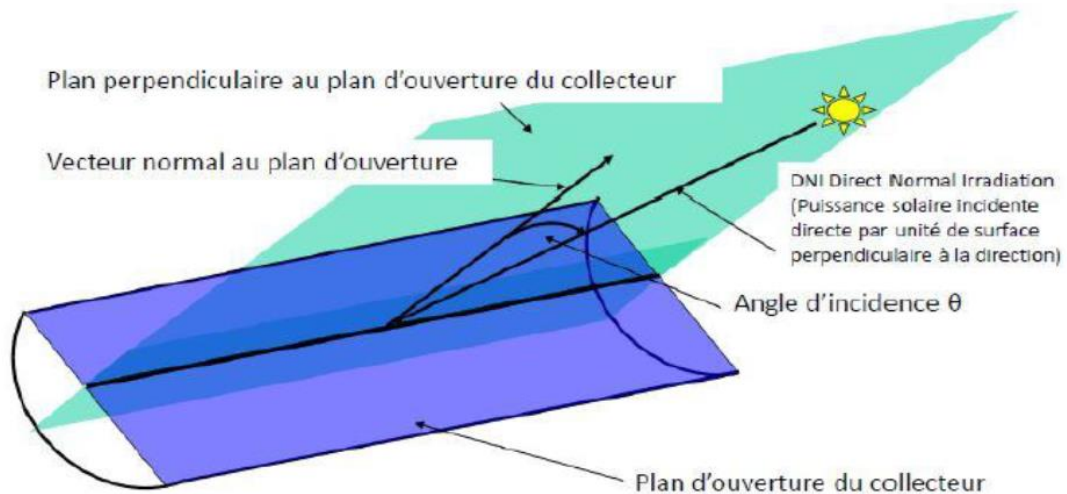


Figure 2-23 : Le concentrateur cylindro parabolique en position de suivi [21].

➤ Angle d'incidence d'un collecteur cylindro-parabolique

L'angle d'incidence (figure II.24) montre l'angle entre le rayonnement solaire direct incident et la normale à la surface d'ouverture du concentrateur. Pendant la journée, seul le plan focal du collecteur est orienté vers le soleil, le rayonnement solaire est reçu à un angle d'incidence qui varie tout au long de la journée. Un capteur est utilisé pour contrôler la position du soleil par rapport à la ligne du collecteur. Ces informations sont transmises au système de commande central qui ajuste l'angle d'inclinaison en conséquence. Il est à noter que nous considérons un système mono-axial de suivi du soleil [23].

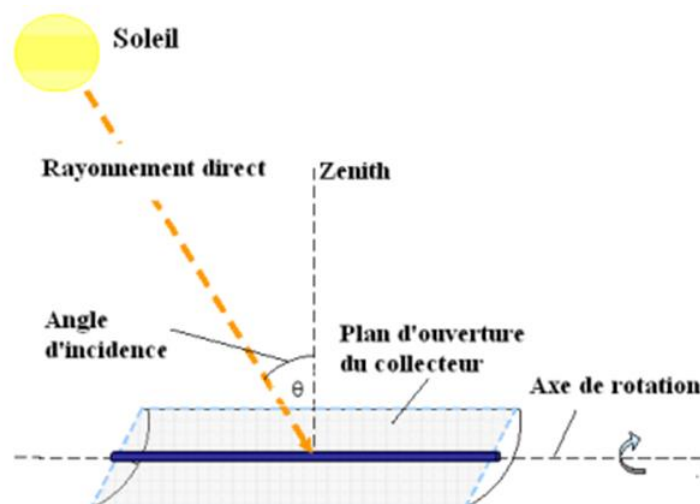


Figure 2-24 : Angle d'incidence sur un capteur cylindro-parabolique [23].

Une fois l'angle horaire, l'angle de déclinaison et l'angle zénith calculé, l'angle d'incidence peut être calculé. L'angle d'incidence d'un plan de rotation est-ouest, orienté nord-sud avec un système de poursuite est-ouest, est donné par la relation suivante :

$$\cos \theta = \sqrt{\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega} \quad (\text{II.10})$$

2.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur le solaire thermodynamique avec les types de technologies utilisées, et en particulier le concentrateur cylindro-parabolique.

Chapitre 3

Etat de l'art des techniques de rafraîchissement de l'air

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'état de l'art des techniques de rafraîchissement de l'air. Ce chapitre se compose de deux parties, la première partie explique les types de climatisation conventionnelle, tels que les systèmes à libération directe, les systèmes tout-air, les systèmes tout-eau et d'autres systèmes. La deuxième partie est consacrée aux différentes technologies de climatisation solaire. Après un examen, une conclusion est présentée avec des perspectives d'avenir.

3.1 Partie 1 : Climatisation conventionnelle

Le tableau (III.1) nous donne les différents types des climatiseurs conventionnels comme suit :

- Les systèmes à détente directe ;
- Les systèmes tout air ;
- Les systèmes tout eau ;
- Les autres systèmes.

3.1.1 Les systèmes à détente directe

Comme ces systèmes permettent de rafraîchir l'air avec un évaporateur placé dans le local à refroidir. Ils sont utilisés pour de petits locaux de l'ordre de 2 à 10 kW [24]. Il existe deux types principaux, les climatiseurs individuels et les armoires de climatisation [25].

3.1.2 Climatiseurs individuels

On trouve dans ce type les climatiseurs suivants : climatiseurs de fenêtre, climatiseurs monoblocs, climatiseurs mobiles et climatiseurs à éléments séparés.

3.1.2.1 Les climatiseurs de fenêtre

Les avantages des climatiseurs de fenêtre sont d'un prix très compétitif, Ils sont alimentés avec une seule phase 230 V. Les inconvénients de ce type de climatiseurs sont En dehors des bâtiments, leur esthétique n'est pas favorable, l'air de du local n'est pas agité de façon homogène, Leur niveau de pression acoustique est élevé, Ils ne permettent pas le contrôle de l'hygrométrie [25].

3.1.2.2 Les climatiseurs mobiles

Ils permettent la déshumidification et le refroidissement du milieu ambiant. Ils comprennent un réservoir de récupération de condensat. Une alarme sonore et/ou visuelle indique le niveau maximum, l'appareil est alors automatiquement éteint lorsque le réservoir recevant le condensat est plein. Ces dispositifs doivent être raccordés à l'extérieur par une gaine flexible pour permettre l'évacuation de la chaleur de condensation [25].

Tableau 3-1 : différents types des climatiseurs conventionnels [25]

Climatiseur conventionnel					
Système à détente directe		Système tout air		Système tout eau	Autres systèmes
Climatiseurs individuels	Armoire de climatisation	Clim à débits d'air constant	Clim à débits air variable	ventilo-convecteur	Modules de traitement air
-clim de fenêtre		-centrales traitement air uni zone	-centrale traitement air à débit variable		
-clim mobiles		-centrales traitement air multizone	-installation à 2 conduits		
-clim monobloc					
-clim à éléments séparés		-climatiseur toiture			
					Pompe à chaleur Volume réfrigérant Système mixte

3.1.2.3 Les climatiseurs monoblocs

Les climatiseurs monoblocs ont pour principal avantage d'être faciles à installer, ils sont généralement équipés de ventilateurs à plusieurs vitesses. Ils permettent de chauffer et de refroidir selon la figure (III.1) [25].

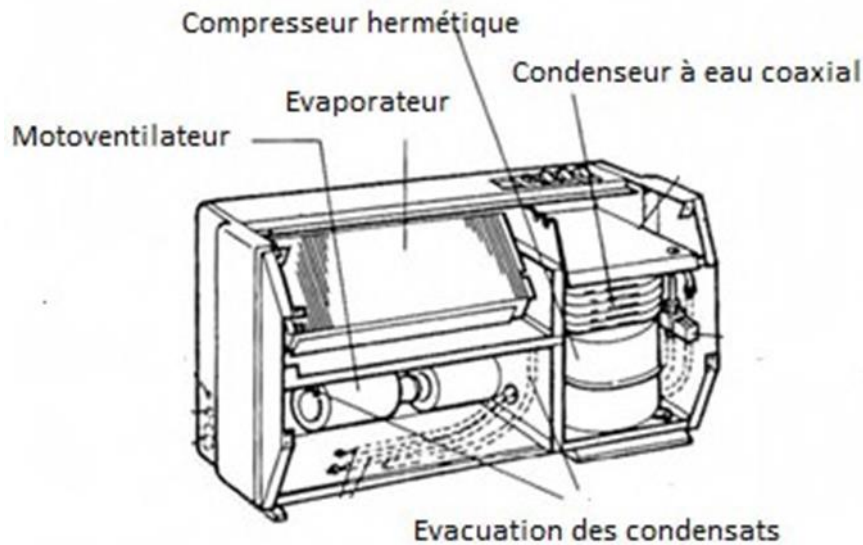


Figure 3-1 : Climatiseur monobloc [25].

3.1.2.4 Les climatiseurs à éléments séparés

Le grand avantage de ce système est que la principale source de bruit se trouve à l'extérieur de du local climatisée. Ce choix technologique implique généralement de longues longueurs de tuyauterie liquide et d'aspiration qui induit des pertes de pression importantes, entraînant une dégradation de l'efficacité énergétique de la machine [25]. Les systèmes multi-plis sont conçus pour combiner, à partir d'une seule unité externe, 2,3 ou 4 unités internes (mur, console, plafond) [24].

3.1.3 Les armoires de climatisation

Ils permettent le refroidissement d'une ou de plusieurs locaux, le contrôle de la température et l'hygrométrie de l'air ambiant. Ces condenseurs sont équipés de condenseurs d'air ou d'eau [24].

On trouve Les variantes disponibles suivantes [25] :

Refroidissement uniquement à partir d'une batterie à détente directe ; Refroidissement uniquement à partir d'une batterie à eau glacée ; Refroidissement et chauffage

3.1.4 Les systèmes tout air

Ils contiennent les systèmes à débit d'air constant et les systèmes à débit d'air variable.

3.1.4.1 Systèmes de climatisation à débit d'air constant

Ils contiennent des unités de traitement d'air à zone unique, des unités de traitement d'air à zones multiples et des climatiseurs de toiture (ROOFTOP).

3.1.4.2 Centrales de traitement d'air uni-zone

Dans ce type d'installation, l'air est traité dans une centrale puis distribué par un réseau de conduits à un ou plusieurs locaux [26]. Les composants de ce type d'installation sont présentés à la figure (III.2).

3.1.4.3 Centrales de traitement d'air multizones

Les Centrales de traitement de l'air à zone unique présentent l'inconvénient d'une distribution de l'air avec des caractéristiques identiques à toutes les salles traitées. Cela n'est pas possible seulement lorsque l'apport de chaleur des locaux raccordés est le même [26].

Les centrales de traitement de l'air à zones multiples assurent la climatisation des locaux ayant des apports de chaleur différents [24].

3.1.4.4 Les climatiseurs de toiture (ROOFTOP)

Le Roof-Top est une unité de climatisation et de chauffage monobloc, qui peut être positionnée sur le toit ou le plancher, selon le cas. Ils sont le plus souvent utilisés pour la climatisation de grandes surfaces [24].

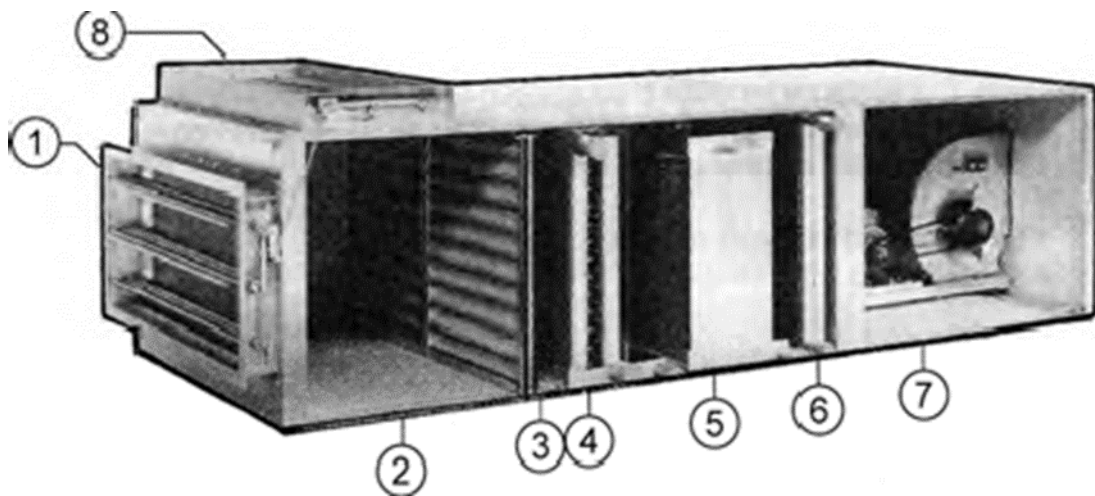


Figure 3-2 : Centrale de traitement d'air [25].

La légende : 1 : Registre d'air neuf ; 2 : Boîte de mélange ; 3 : Filtre ; 4 : Batterie froide ; 5 : Humidificateur ; 6 : Batterie de chauffage ; 7 : Bloc ventilateur ; 8 : Registre d'air recyclé.

3.1.5 Systèmes de climatisation à débit d'air variable

Les Systèmes de climatisation à débit d'air variable contiennent les centrales de traitement d'air à débit variable et les installations à deux conduits.

3.1.5.1 Les centrales de traitement d'air à débit variable

Dans les usines de traitement d'air à débit variable, le débit d'air change et la température est constante [27]. Le principe de ce système est d'adapter le débit de soufflage aux charges variables des locaux traités [24]. Les avantages des centrales de traitement d'air à débit variable sont : 1) des coûts d'exploitation très compétitifs, 2) des coûts d'investissement peu élevés [26].

3.1.5.2 Installation à 2 conduits

Le principe de ces systèmes est de distribuer l'air chaud et froid dans deux conduits séparés à grande vitesse et de les mélanger dans une boîte de mélange habituellement disposée en faux plafond à chaque local [24]. Chaque boîte de mélange est contrôlée par un thermostat d'ambiance qui permet de prendre en compte les besoins du local [25]. Le principe de ce type est donné à la figure (III.3) [27].

3.1.6 Les systèmes tout eau ventilo-convecteurs

La climatisation centrale à eau réfrigérée basé sur le principe de la production d'eau réfrigérée par les systèmes frigorifiques et de la distribution de cette eau par le réseau hydraulique qui rejoint les dispositifs terminaux assurant la climatisation dans les locaux à traiter. Ces bornes sont généralement des ventilo-convecteurs. Ces terminaux assurent les fonctions suivantes [25].

Refroidissement, chauffage et filtration. Les systèmes tout eau par ventilo-convecteurs (2,3 ou 4 tuyaux) installés dans les locaux sont équipés d'une ou de deux batterie (chaudes ou froides) [24].

Le mélange d'air neuf (air extérieur) et d'air recyclé (air intérieur) est filtré, chauffé en hiver ou refroidi en été, puis pulsé [24]. Les ventilo-convecteurs se composent principalement d'un boîtier [26]. : un ventilateur à moteur à vitesse variable, un échangeur de chaleur pour l'eau chaude et froide, un filtre, une grille d'aspiration et un autre pour le soufflage. L'échangeur de chaleur peut être raccordé au réseau d'eau du bâtiment par un système à 2, 3 ou 4 conduits [26]. La figure (III.4) montre un diagramme d'un ventilo convecteur pour le chauffage, le refroidissement, la filtration et l'admission d'air neuf.

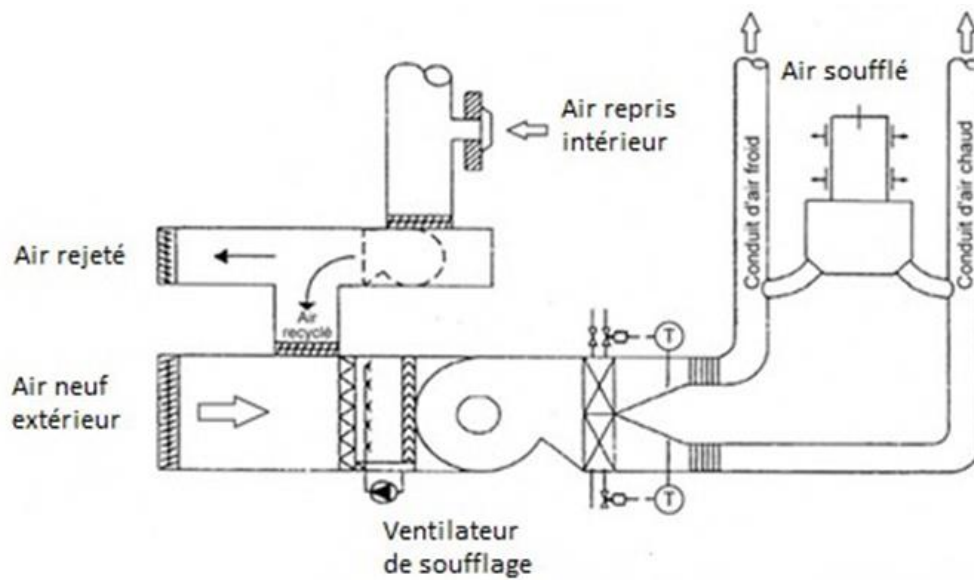


Figure 3-3 : Schéma de principe d'une installation à 2 conduits [24].

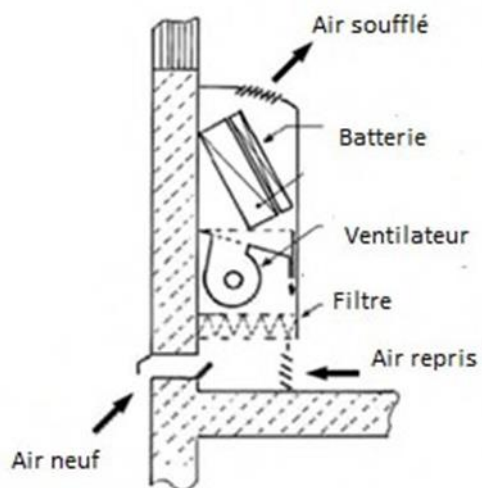


Figure 3-4 : Schéma de principe d'un ventilo-convecteur [25].

3.2 Partie 2 :

3.2.1 Climatisation Solaire

Les différents types de climatisation solaire sont donnés dans le tableau (III.2). La climatisation solaire a plusieurs avantages très importants tels que [28].

- Les machines solaires utilisent généralement des fluides frigorigènes respectueux de l'environnement, dans la plupart des cas, l'eau est utilisée qui n'a pas d'effet de serre.
- Machines solaires ont peu de pièces mobiles,
- Une longue durée de vie si conçu Correctement,
- Le réseau électrique est également soulagé,
- Les machines solaires conduit à une nouvelle réduction des émissions,
- Les émissions sonores sont plus faibles puisque la plupart des machines fonctionnent sans compresseurs.

Tableau (III.2) : Différents types de climatisation solaire [28].

Climatisation solaire				
Climatisation solaire électrique	Climatisation solaire thermique			
	absorption	adsorption	Dessiccation	
			Dessiccation solide	Dessiccation liquide

Mais d'autre part la climatisation solaire a trois inconvénients sont donnés comme suit : [28]. i) Les machines solaires ne sont pas efficaces, ii) les coûts sont élevés et iii) de nombreux systèmes nécessitent beaucoup d'entretien.

Du flux d'énergie solaire, il y a deux voies à suivre : Conversion électrique par cellules photovoltaïques photovoltaïques ou Conversion thermique [29]. Les deux familles possibles de systèmes solaires sont : i) Alimentation d'un groupe de compression conventionnelle par panneaux

photovoltaïques et ii) Production de chaleur par capteurs solaires thermiques pour faire fonctionner une machine frigorifique.

3.2.2 Climatisation Solaire Electrique (Photovoltaïque)

Un système photovoltaïque climatisé se compose de cellules photovoltaïques fournissant de l'énergie électrique pour faire fonctionner un système de compression de vapeur [28].

3.2.3 Climatisation solaire thermique

Les systèmes solaires thermiques utilisent la chaleur solaire plutôt que l'électricité solaire sont i) refroidissement solaire par absorption ii) refroidissement solaire par adsorption et iii) refroidissement solaire par dessiccation [28].

3.2.4 Refroidissement solaire par absorption

Deux grands cycles de refroidissement solaire par absorption peuvent être identifiés : le cycle d'absorption du bromure de lithium-eau et le cycle d'absorption de l'eau et de l'ammoniac [30]. Le système d'absorption à effet simple utilise des capteurs plans à tubes sous vide et fonctionne à des températures de 55 °C à 100 °C et COP autour de 0,7 pour l'eau LiBr et 0,6 pour l'eau ammoniacale [31]. Ces systèmes fonctionnent avec des capteurs à tube sous vide ou des capteurs de concentration, ils sont capables de fonctionner efficacement à environ 150 °C à 180 °C, des refroidisseurs à double effet LiBr-eau avec COP environ 1,2 et double effet ammoniac-eau refroidisseurs avec un COP autour de 0,8 [31] et [32].

Le couple H₂O-LiBr est préférable à la climatisation, Le système optimal est déterminé principalement par la performance technico-économique en termes de coûts par unité produite d'énergie de refroidissement [33]. La technologie d'absorption actuelle peut fournir diverses machines d'absorption avec COP allant de 0,3 à 1,2. Le choix d'une machine de refroidissement par absorption dépend principalement des performances du capteur solaire utilisé [32]. L'évolution des systèmes d'absorption de gaz au cours des dernières années, principalement aux Etats-Unis et le Japon, pour les refroidisseurs LiBr-eau, ont mis à disposition dans les systèmes à double effet sur le marché avec le COP dans la gamme 1,0-1,2.

Systèmes triple effet sont encore en cours de développement, mais proche du marché, avec un COP de 1,7[34].

Aujourd'hui, aussi quelques systèmes commerciaux de petite puissance, par exemple, moins de 30 kW, sont disponibles. Les refroidisseurs à absorption sont principalement utilisés si une source de chaleur 'pas cher' est disponible. Pour les applications de climatisation, des refroidisseurs à

absorption utilisant principalement le couple eau-LiBr sont appliqués. L'eau est le réfrigérant et le LiBr le sorbant [34]. Dans des conditions normales de fonctionnement, les machines à simple effet nécessitent généralement des températures de chauffe comprises entre 80 et 100 °C et le COP atteint environ 0,7. Deux générateurs fonctionnent à des températures différentes et sont exploités en série, de sorte que la chaleur condensée du réfrigérant désorbé du premier générateur est utilisée pour chauffer le deuxième générateur. Ainsi, un COP plus élevé de l'ordre de 1,1 à 1,2 est atteint. Toutefois, des températures de conduite de l'ordre de 140 à 160 °C sont généralement requises pour conduire ces refroidisseurs. Ce type de système n'est disponible que dans la gamme des grandes capacités d'environ 100 kW et plus [31]. Les systèmes à triple effet sont toujours en développement, mais près du marché, avec une COP de 1,7 [34].

3.2.4.1 Refroidissement solaire à adsorption

Les avantages du refroidisseur d'adsorption Eau/gel de silice ou Eau/Zéolite : Il n'y a aucun risque de cristallisation et donc aucune limitation de température. Il n'y a pas de pompe à solution interne et la consommation d'électricité est réduite au minimum. Le système de climatisation par adsorption du carbone Activé /méthanol a été mis au point par Wang en 2001 pour être alimenté par des sources de chaleur à des températures proches de 100 °C [26]. Le système a deux adsorbants avec 26 kg de carbone à l'intérieur de chacun d'eux et utilisé le méthanol comme réfrigérant, Le COP et le SCP de ce système ont été fortement influencés par le temps de cycle. Avec un temps de cycle de 30 minutes mène à un COP de 0,15 et une puissance de refroidissement de 3,84 kW, avec un temps de cycle de 60 minutes mène à un COP de 0,21 et la puissance de refroidissement de 3,03 kW. Dans les deux cas, la température d'évaporation était proche de 6 °C [26].

La principale différence par rapport aux systèmes d'absorption est que deux adsorbants ou plus sont nécessaires pour assurer un fonctionnement continu [28]. Les refroidisseurs à adsorption sont plus chers et leur disponibilité commerciale est encore limitée. En principe, leur COP est inférieur à celui des machines à absorption, mais elles peuvent utiliser la chaleur à basse température, de sorte qu'elles peuvent être entraînées par des capteurs solaires plus efficaces [31]. Les refroidisseurs à adsorption semblent être comparables aux refroidisseurs à absorption en termes de COP maximal réalisable. Mais leurs densités de puissance de refroidissement sont beaucoup plus faibles. La technologie d'adsorption peut être compétitive dans les grands systèmes de refroidissement solaire où sa faible densité de puissance n'est pas un problème. Pour les petits ou moyens systèmes de refroidissement solaire, il a tendance à être trop volumineux et coûteux [35].

La superficie spécifique moyenne des installations d'adsorption est de 3,49 m²/kWf alors que pour l'absorption elle est de l'ordre de 2,77 m²/kWf [36]. Les machines sont également plus grandes en raison de la faible conductivité thermique des absorbants [37].

La simplicité du procédé, la large gamme de températures de chauffage et d'autres avantages tels que le fonctionnement silencieux pourraient conduire à un grand nombre de petites applications de climatisation à énergie solaire. La recherche et le développement de nouveaux travaux sur les petites machines d'adsorption sont nécessaires pour réduire leur volume et augmenter la densité de puissance [28].

3.2.5 Climatisation Solaire Par Dessiccation.

Les systèmes de climatisation solaire par dessiccation sont des systèmes qui fonctionnent directement en déshumidifiant et en refroidissant l'air dans les locaux. Ils nécessitent des températures d'entrée faibles (45 à 95 °C). L'eau est utilisée comme liquide de refroidissement et en contact direct avec l'atmosphère. Pour cela, des capteurs d'air simples peuvent être utilisés [36].

La base du cycle de refroidissement ouvert de sorption : Tout type de cycle de refroidissement ouvert de sorption basé sur une combinaison de refroidissement par évaporation et de déshumidification de l'air par un agent dessiccateur [31].

Les systèmes de dessiccation sont des systèmes ouverts utilisant de l'eau, en contact direct avec l'air, comme réfrigérant. Le cycle de rafraîchissement est une combinaison de rafraîchissement par évaporation et de déshumidification par un matériau hygroscopique, qui peut être à la fois liquide et solide [32].

Le terme "ouvert" signifie que le réfrigérant est retiré du système après avoir eu son effet de refroidissement et qu'une nouvelle quantité de frigorigène doit être injectée, le tout en boucle ouverte. Seule l'eau peut être utilisée comme réfrigérant puisqu'elle est en contact direct avec l'air ambiant. Les systèmes disponibles utilisent de l'eau, comme déshydratant, qui absorbe un sorbant comme le gel de silice, l'alumine activée, la zéolite, le LiCl et le LiBr [32]; [38]. Ces systèmes ont une double fonction : rafraîchir et renouveler l'air hygiénique. D'autre part, dans d'autres systèmes à cycle fermé, et pour des raisons de santé, il est nécessaire d'assurer un apport d'air frais pris de l'extérieur dans le local [35].

La température de la source chaude nécessaire au fonctionnement du système est comprise entre 45 et 95 °C. Le COP nominal des systèmes de séchage est de l'ordre de 0,5 à des valeurs supérieures à 1 [35].

3.2.5.1 Climatisation Solaire Par Dessiccation solide

La plupart des systèmes de dessiccation actuellement sur le marché utilisent des matériaux solides de sorption tels que le gel de silice. Comme le déshydratant solide ne peut pas être mis en circulation par pompage, ces systèmes utilisent généralement un lit rotatif transportant le matériau sorbant, appelé 'roue de dessiccation', pour permettre un fonctionnement continu [34].

L'application actuelle de ces systèmes reste faible et se situe entre 10 et 15% des installations existantes. L'opération étant basée sur le refroidissement par évaporation, il est évident que ces systèmes sont destinés aux climats secs et chauds [35]. La figure (III.5) présente un exemple de système de refroidissement solaire à dessiccation solide. Le système dispose de deux plateaux tournant lentement et de plusieurs autres composants entre les deux flux d'air et un espace conditionné. L'air de retour de l'espace conditionné passe d'abord par un refroidisseur d'évaporateur et rentre dans l'échangeur de chaleur avec une baisse de température ($A \rightarrow B$).

Il refroidit un segment de la roue d'échange de chaleur qui passe à travers ($B \rightarrow C$). Le résultat de l'air chaud et humide est également chauffé à une température élevée par la chaleur du soleil dans le serpentin de chauffage ($C \rightarrow D$). L'air chaud et humide finit par gagner la roue dessiccante avant qu'elle ne soit rejetée dans l'air ambiant ($D \rightarrow E$). D'autre côté, l'air frais ambiant pénètre dans la partie régénérée de la roue de dessicatif ($1 \rightarrow 2$). L'air sec et chaud sort de la roue à la suite de la déshumidification. Cet air est refroidi par la roue d'échange de chaleur à une certaine température ($2 \rightarrow 3$).

Selon le niveau de température, il est fourni directement dans l'espace conditionné ou refroidi dans l'après refroidisseur ($3 \rightarrow 4$). Si, par la suite, aucune étape du refroidisseur n'est suivie, l'effet de refroidissement complet n'est créé que par la roue d'échange de chaleur, qui a déjà été refroidie par le retour d'air humide au point B de l'autre côté. La température T_3 ne peut pas être inférieure à T_B , qui, à son tour, dépend du retour de la climatisation au point A [32].

D'un point de vue thermodynamique, en principe, la COP d'un système de dessiccation ouvert est similaire à sa contrepartie fermée. Par exemple, un CDP de 0,7 a été trouvé avec un système de refroidissement par dessiccation solide. Un CDP similaire a également été signalé pour une technologie de dessiccation solide. Mais dans la pratique, la COP varie considérablement selon les conditions d'exploitation 1 Un système de déshydratation est en fait un système de climatisation. La déshumidification par dessiccation permet un contrôle plus efficace de l'humidité. Lorsqu'il y a une

forte demande de déshumidification, la solution de déshumidification solaire peut être une très bonne option [32].

Les systèmes ouverts les plus courants sont les systèmes de refroidissement à dessiccation avec une roue de déshumidification rotatif et un sorbant solide [34]. Les avantages dessiccation solide sont donnés comme [38]:

- ✓ Le coût de fonctionnement peut être considérablement diminué en raison de l'utilisation de l'énergie thermique.
- ✓ Le coût initial pour le système de refroidissement déshydratant peut également être diminué en comparaison avec d'autres systèmes de sorption.
- ✓ Ce système est très fiable et facile pour l'entretien.

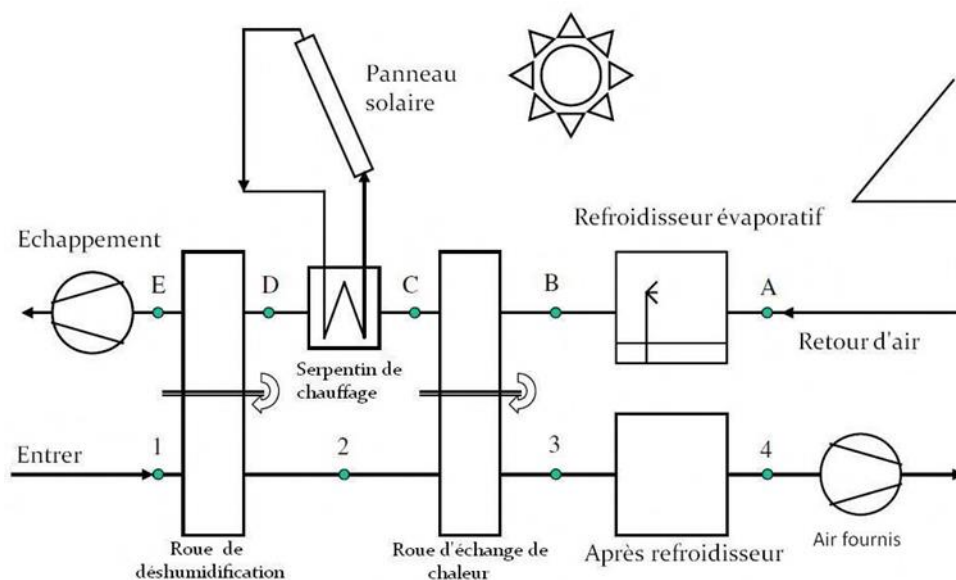


Figure 3-5 : Refroidissement à dessiccation solide avec capteur solaire [32].

- ✓ Le Système de refroidissement à déshydratant solide est une bonne alternative au système classique à compression de vapeur (VC) en raison de son économie d'énergie et les caractéristiques sans CFC.
- ✓ Si un chauffage d'appoint est utilisé, un COP thermique d'environ 1,0 peut encore être atteint (COP solaire au-dessus de 0,4 à 0,6).
- ✓ Par rapport au système dessiccant liquide, le système sera moins sujet à la corrosion. Le principal problème pourrait être la grande taille de la CTA. [38].

Afin de rendre le système de refroidissement par dessiccateur solide plus adapté aux applications résidentielles dans le marché futur, les lignes directrices suivantes sont proposées [38] :

- Développer de nouveaux matériaux desséchants pour obtenir une meilleure capacité de déshumidification à une température plus basse.
- Utiliser un capteur solaire à faible coût.
- Proposer un nouveau mode de circulation dans le système de refroidissement taille du système.
- Déterminer les stratégies optimales pour fonctionner dans diverses conditions et moyens de mise en œuvre des stratégies.

3.2.5.2 Climatisation Solaire Par Dessiccation liquide

Ils peuvent utiliser de l'eau/du chlorure de calcium ou de l'eau/du chlorure de lithium. Ces systèmes ont une température de conduite typique très basse de 50 à 70 °C [28].

L'utilisation de matériaux de sorption liquides est moins étendue mais également disponible sur le marché [28]. Ils présentent plusieurs avantages tels que la possibilité de contenir, de pomper et de filtrer le dessiccatif, de refroidir pendant l'absorption et la chaleur pendant la désorption, la possibilité de stockage d'énergie au moyen de solutions hygroscopiques concentrées et les qualités bactériostatiques [34]. Le schéma d'un système de refroidissement par dessiccation des liquides est présenté à la figure III.6. Dans le déshumidificateur de la figure, la solution concentrée est pulvérisée à travers le point A sur le serpentin de refroidissement au point B et en même temps le point d'air ambiant 1 est injecté. L'air ambiant sera déshumidifié par la solution de pulvérisation concentrée et refroidi par le serpentin de refroidissement. Le résultat est de l'air sec et frais au pont 2 et une solution diluée au point C.

Dans le régénérateur, la solution diluée du déshumidificateur est vaporisée à travers le serpentin de chauffage au point E qui est alimenté par des capteurs solaires et de l'air ambiant au point E qui est alimenté par des capteurs solaires et l'air ambiant au point 4 est soufflé à travers la solution d'écoulement. Lorsque la solution est chauffée, une partie de l'eau de la solution diluée est extraite et transportée par voie aérienne. La solution concentrée est perçue au point F, l'air chaud et humide est libéré dans l'air ambiant au point 5. Un échangeur de chaleur de récupération préchauffe la fraîcheur de la solution de déshumidificateur diluée à l'aide de la chaleur résiduelle de la solution concentrée de régénération chaude [32]. Les lignes directrices suivantes sont recommandées pour la construction du système solaire de refroidissement par dessiccation des liquides à usage résidentiel [38].

- ✓ Faible coût du capteur solaire.
- ✓ Stratégie de contrôle appropriée pour coordonner la concentration du déshydrateur liquide et le stockage d'énergie.
- ✓ Unité de refroidissement sensible sélectionnée en fonction du climat et du coût initial.
- ✓ Un système énergétique hybride utilise la thermopompe et l'énergie solaire est recommandée.

Ce système contrôle l'humidité et la température de l'air et fournit un air de haute qualité.

Ce système utilise efficacement une source de chaleur à basse température

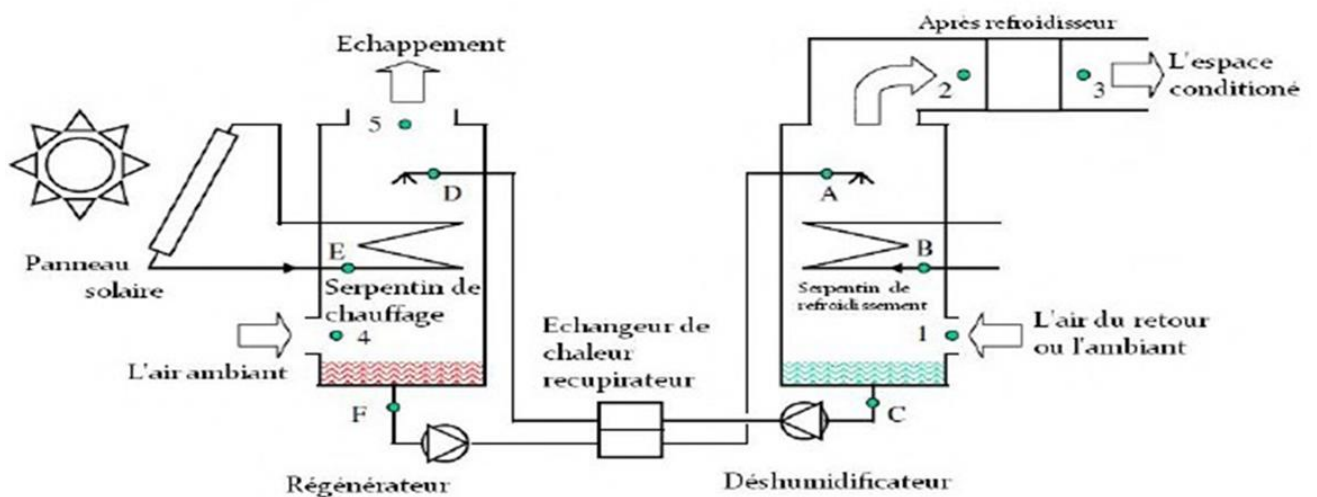


Figure 3-6 : Refroidissement à dessiccation liquide avec capteur solaire [32].

3.3 Conclusion

Si les systèmes sont bien conçus, la climatisation solaire peut entraîner des économies d'énergie primaire remarquables, les conditions permettant de réaliser des économies d'énergie primaire, la taille du collecteur et la taille du stockage d'énergie sont appropriées [31]. Il est essentiel de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire thermique en fournissant d'autres services tels que le système de chauffage ou la production d'eau chaude domestique avec la chaleur solaire, autant que possible afin d'optimiser les économies d'énergie.

Chapitre 4

Simulation d'une microcentrale

4.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour notre simulation à l'aide du logiciel Greenius afin de faire une étude comparative sur le plan technico-économique d'une minicentrale solaire à deux collecteurs cylindro-parabolique différents. La centrale a été dimensionnée pour alimenter en électricité un site de 200 foyers à la ville de djamaa (wilaya d'l Meghair) situé dans la région sud du pays. Les données météorologiques ont été relevées à l'aide du logiciel Meteonorm 8

4.2 Présentation des logiciels de simulation

4.3 Présentation du logiciel GREENIUS

Greenius est un puissant logiciel de simulation pour le calcul et l'analyse de projets d'énergie renouvelable à alimentation de l'électricité ou de la chaleur. C'est un logiciel gratuit [39], qui nous permet de simuler des centrales solaires thermiques, des cylindro-paraboliques, des systèmes photovoltaïques, des centrales éoliennes ou des concentrateurs paraboliques avec moteur Stirling. Ce programme offre une combinaison de calculs techniques et économiques détaillés nécessaires à la planification et à l'installation de projets d'énergie renouvelable. Les résultats du calcul sont détaillés et les simulations s'exécutent très rapidement avec la possibilité d'enregistrer les résultats dans un fichier Excel. Greenius a été développé au Centre aérospatial allemand (DLR). Dr. Rainer Kastner, Winfried Ortmanns, Dr. Volker Quaschnig et Dr. Jürgen Dersch. La vente, la distribution et le service sont effectués en vertu de la licence du DLR [40], [41].

Les figures IV.1 et IV.2 montrent respectivement le processus d'exploitation et la page couverture du logiciel Greenius.

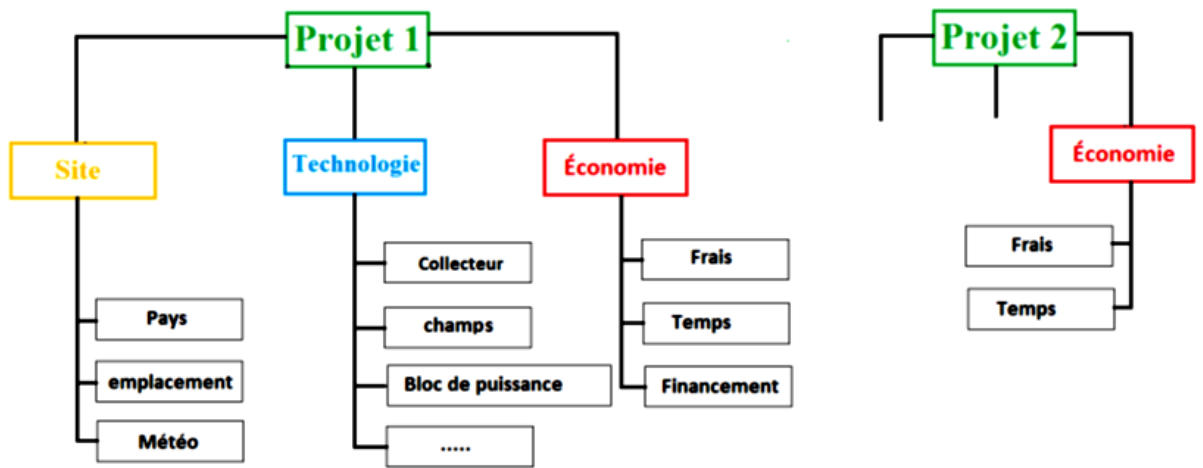


Figure 4-1 : Processus de fonctionnement du logiciel de Greenius [42].



Figure 4-2 : Page de couverture du logiciel Greenius.

4.3.1 Assistant (Wizard)

Lors de l'exécution du logiciel, la fenêtre de l'assistant illustrée à la figure IV.3 apparaît automatiquement sur le bureau. Il permet aux utilisateurs de créer de nouveaux projets ou d'ouvrir des projets existants. Avec la commande ESC, nous pouvons fermer la fenêtre de l'assistant. A l'entrée du menu Fichier/Assistant respectivement la commande F12, et ensuite nous pouvons recommencer avec l'Assistant (Wizard) à tout moment



Figure 4-3 : Fenêtre d'Assistant (Wizard)

4.3.2 Création d'un nouveau projet

Pour créer un nouveau projet, il suffit de cliquer sur le bouton New project dans la fenêtre de l'assistant (figure IV.3), puis la fenêtre de la figure IV.4 s'ouvre. Dans cette fenêtre, le projet reçoit un nom pour le distinguer des autres. Une fois le projet défini, une fenêtre de sélection de technologie s'ouvre automatiquement (voir figure IV.5), cette fenêtre nous montre la technologie sélectionnée sur laquelle nous allons étudier. Enfin, les données météorologiques du site doivent être chargées, cette étape est essentielle pour toutes les technologies d'énergie renouvelable.



Figure 4-4 : Fenêtre du nouveau projet.

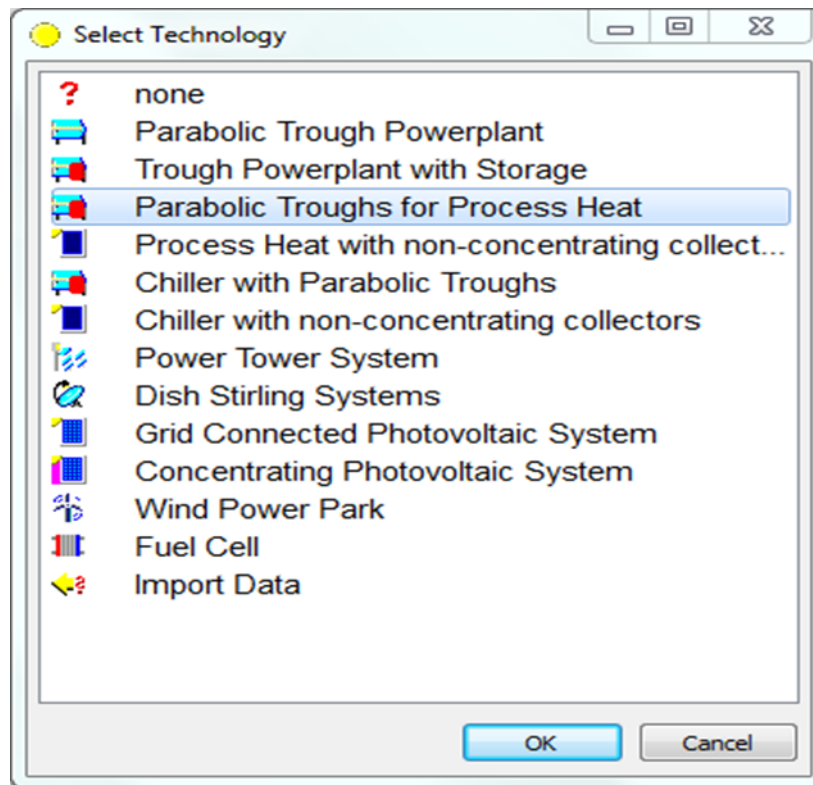


Figure 4-5 : Fenêtre du choix de la technologie

4.3.3 Écran Principal

Si aucun projet n'est disponible, seul le menu standard et un écran d'arrière-plan sont visibles. Si un projet est ouvert ou un nouveau projet créé, le menu standard du projet et l'écran standard du projet sont visibles, comme le montre la figure IV.4.

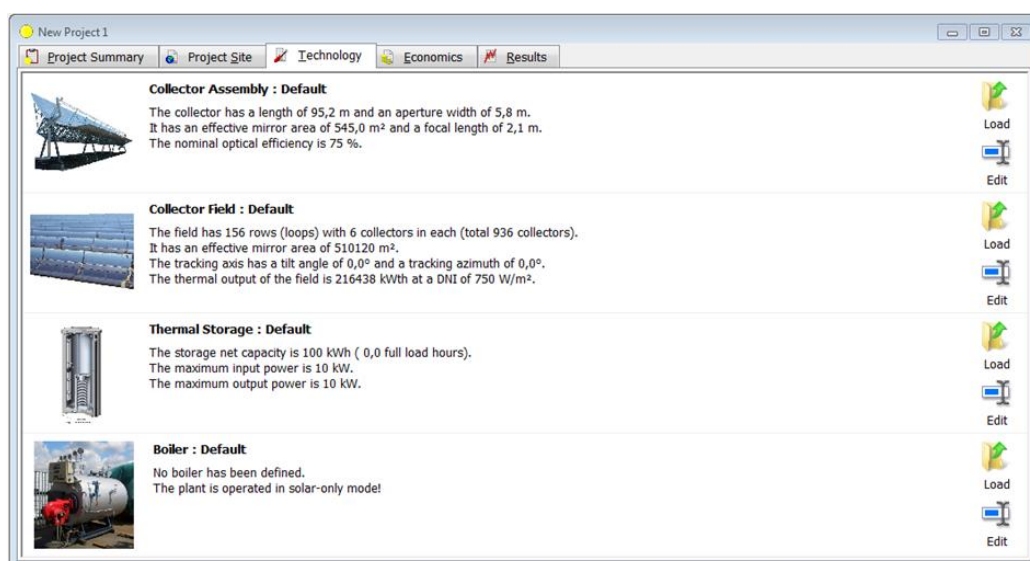


Figure 4-6 : Interface de l'écran principal.

Dans cette fenêtre, nous pouvons choisir la technologie, Lorsque le logiciel prend en charge les technologies suivantes :

- ✓ Centrales thermiques à cellules solaires
- ✓ Systèmes solaires paraboliques
- ✓ Parcs d'alimentation électrique par conversion éolienne
- ✓ Parcs d'énergie éolienne
- ✓ Systèmes paraboliques de cuvette de stockage

4.4 Présentation du logiciel METEONORM 8

METEONORM 8, dont le logo est illustré à la figure VI.7, est un logiciel qui offre une collection complète de données météorologiques, développée par la société suisse Meteotest, leader dans les domaines de la météo, du climat, de l'environnement et des technologies de l'information. Il contient également des algorithmes pour créer à partir de valeurs mesurées de fichiers météorologiques de n'importe où dans le monde, il contient :

- Base de données : Une base de données contenant plus de 8 325 stations météorologiques.
- Paramètres mesurés : moyenne mensuelle du rayonnement mondial, température, humidité, précipitations, jours de précipitations, vitesse et direction du vent, durée de l'ensoleillement.

Ce logiciel est destiné aux ingénieurs, architectes, enseignants, designers et toute personne intéressée par l'énergie solaire et la climatologie.

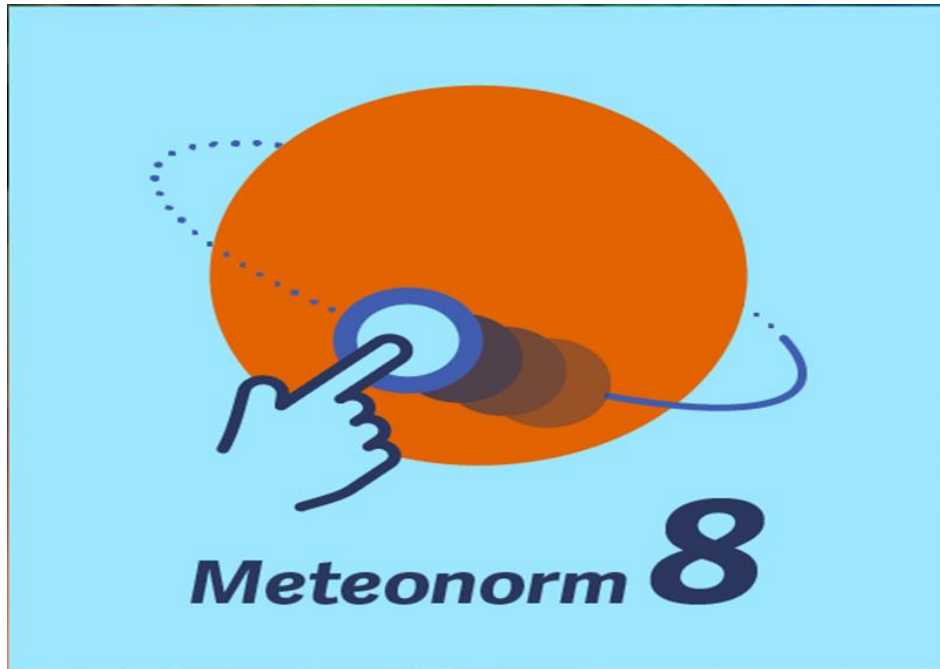


Figure 4-7 : Logo du logiciel Meteonorm 8.

4.5 Méthodologie

Nous avons considéré une mini-centrale solaire à concentration cylindro-parabolique pour assurer la production de froid à l'aide d'une processus absorption dans une région saharien, on se basant dans notre étude sur la puissance frigorifique nécessaire pour un habitat ordinaire, pour la suit nous avons multiplié la puissance frigorifique pour avoir une puissance d'une cité de 300 foyers, à base de cette puissance nous avons dimensionné le chan solaire.

Par la suite, nous avons estimé une puissance annuelle pour déterminer la puissance frigorifique de la centrale, sur la base de cette puissance, nous avons dimensionné le champ solaire nécessaire. Finalement, les outils utilisés sont Excel pour le traitement des données de simulation, métronome pour avoir données météorologiques de site en question, logiciel Greenius pour la simulation et le dimensionnement du champ solaire.

4.5.1 Coordonnées géographiques et météorologiques du site ville de Djamaa (Wilaya d'El Mghayer)

La ville de djamaa est située au nord-est du Sahara algérien. Elle est délimitée :

- ✓ Au nord, par d'El Mghayer
- ✓ Au ouest par la comune de Merrara

- ✓ Au sud et au sud-est par la wilaya de Touggourt
- ✓ Et à l'est par Ettaybat

Sa superficie est de 780 [km²] elle se situe à (33,53°N 6°E), altitude 38[m] (ville) fuseau horaire (GMT+1) [44], sa géolocalisation est montrée dans la figure IV.8.

La Température min (1,3C°, max 49C°), la somme annuelle de l'irradiation globale est de 1790 [kWh/m²]), et la somme de l'irradiation normale direct DNI est 1521 [kWh/m²], la somme annuelle de l'irradiation diffuse est de 843([kWh/m²]). La vitesse du vent est 11.6 [m/s], la moyenne 2.6 [m/s]. [m/s].[42].

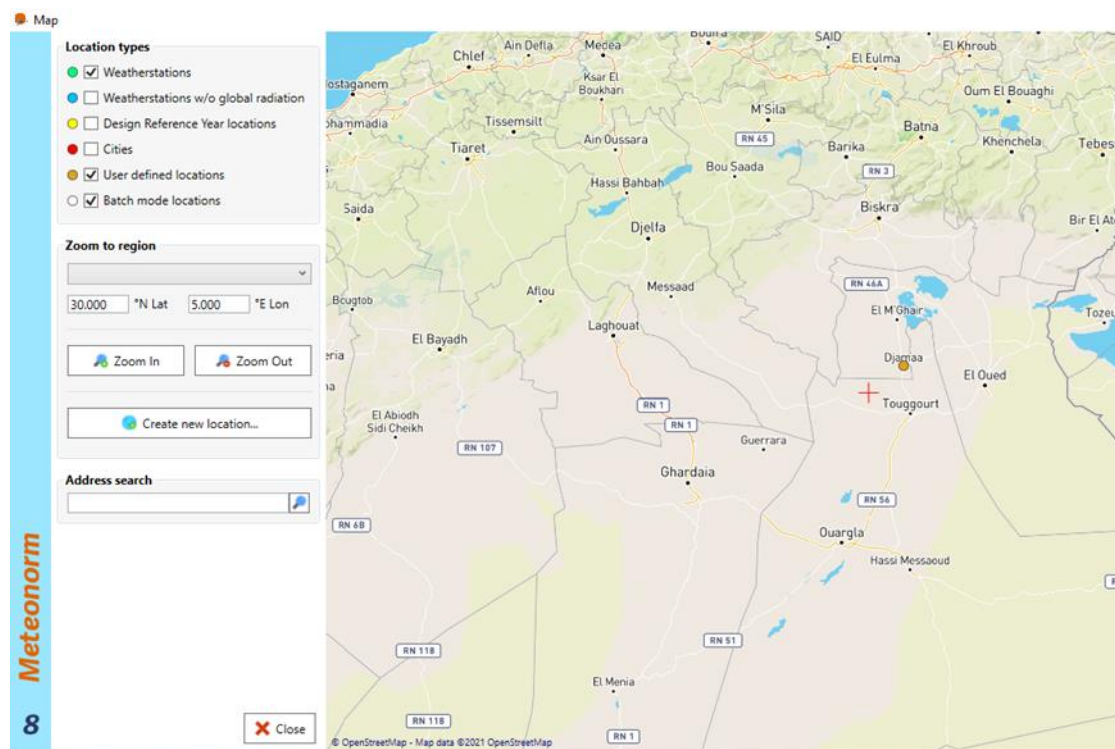


Figure 4-8 : Géolocalisation de la ville de Djamaa wilaya d'El Meghiyer.

4.5.2 Données météorologiques

A l'aide du logiciel Meteonorm 8, les données météorologiques peuvent être obtenues à partir de n'importe quel site géographique sur la Terre, en fait pour notre étude nous avons inséré les données géographiques dans le logiciel, que nous avons présenté dans le tableau IV.1 et indiqué dans la figure IV.9.

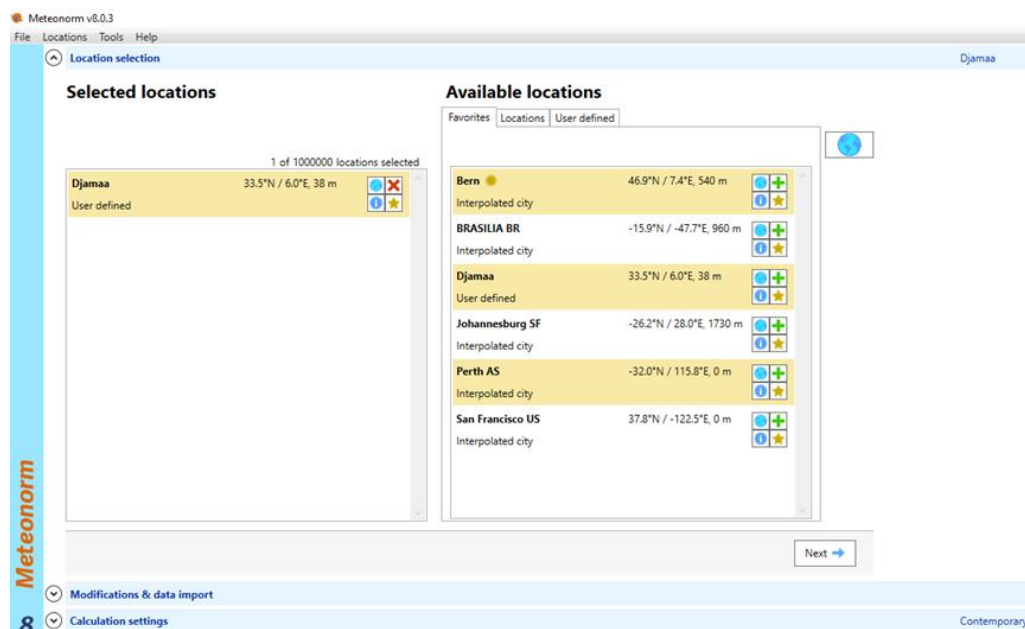


Figure 4-9 : Fenêtre du logiciel Meteonorm.

Tableau 4-1 : Données géographiques de site.

Site	Latitude	Longitude	Altitude[m]
Djamaa (ElMeghair)	33,5N	6.0E	38

4.5.3 Dimensionnement de la minicentrale

4.5.4 Collecteur :

On a choisi deux collecteurs de type LS-2 Cermet Vacuum (commercial) et de type de ET2 with schott HCE d'après la liste des collecteurs disponibles dans Greenius (commercial), dont les caractéristiques sont données dans le tableau IV.2 et la figure IV.10 et IV.11

Tableau IV.2: Paramètres du collecteur LS-2 Cermet Vacuum et ET2 with schott HCE[46]

Paramètre	Valeur	
	LS-2 Cermet Vacuum	ET2 with schott HCE
Longueur du collecteur	47,1[m]	148.5[m]
Longueur focale	1,84[m]	1.7[m]
Zone miroir effective	235[m]	817.85 [m]
Ouverture du collecteur	5[m]	5.8 [m]
Diamètre extérieur du tube absorbeur	0,0655[m]	0.0655[m]
La masse volumique spécifique de l'absorbeur	2[kg/m]	3.78[kg/m]
La capacité thermique de l'absorbeur	0,121[Wh/kg-K]	0.136 [Wh/kg-K]
Rendement optique nominal	71,5%	75%

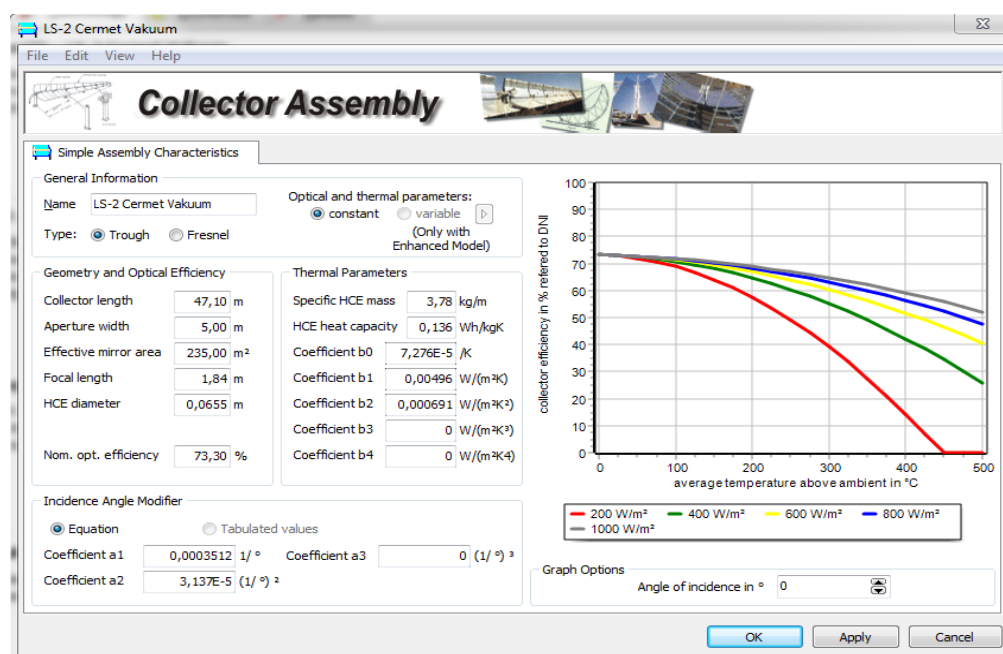


Figure 4-10 : Fenêtre Greenius du collecteur LS-2 Cermet Vacuum.

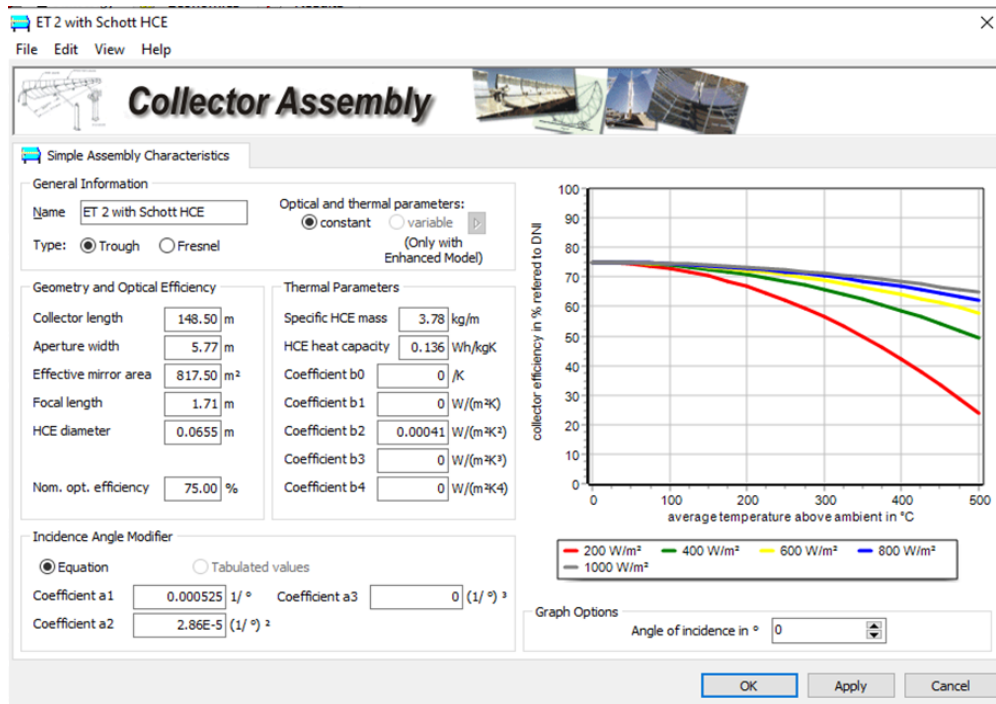


Figure 4-11: Fenêtre Greenius du collecteur ET2 with schott HCE.

4.5.5 Champ solaire

Le champ solaire est composé de capteurs solaires cylindro-paraboliques connectés en série pour former de longues lignes qui à leur tour sont connectés en parallèle, d'ailleurs nous avons dimensionné le champ solaire en fonction de :

- La température du fluide de transfert à la sortie.

Les valeurs d'entrée pour Nombre de lignes dans le champ et Nombre de capteurs/lignes (boucle) définissent la taille du champ solaire.

La figure IV.12 montre la signification de ces paramètres. Les rangées sont un groupe de collecteurs connectés en série entre le collecteur froid et le collecteur chaud. Ceci est souvent appelé une boucle lorsque l'on considère la conception par défaut du champ solaire H. En particulier pour les champs solaires de chaleur industriels, la disposition d'une rangée peut différer considérablement d'une boucle [42].

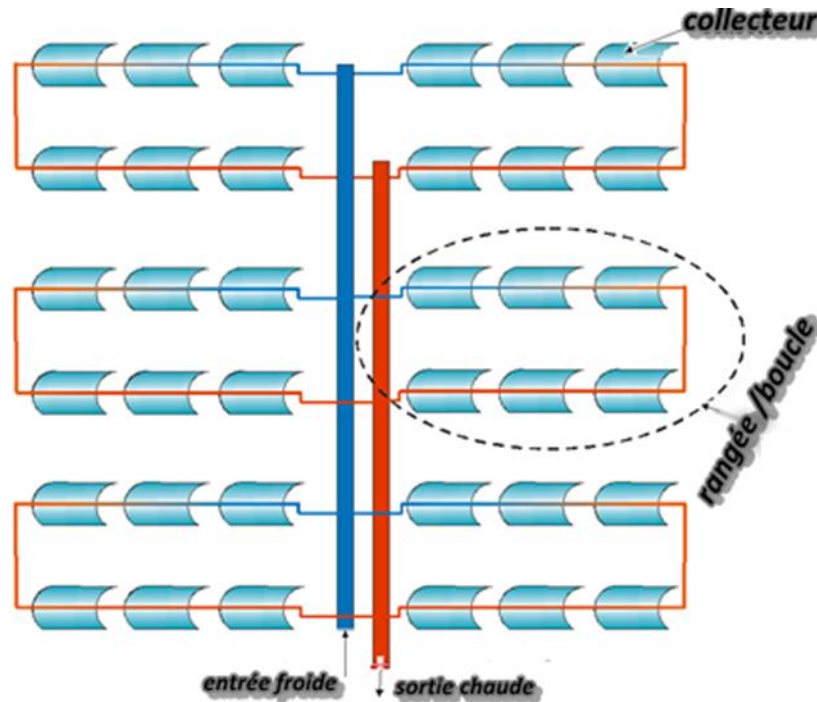


Figure 4-12 : configuration du champ solaire Nombre de capteurs/ligne (boucle) [42].

4.5.6 Site de Djamaa (El Meghair)

À base de la puissance frigorifique fournie par un climatiseur 18000 Btu/h nous avons calculé la puissance nécessaire pour une cité de 200 foyers.

Calcule et Conversion :

$$1\text{Btu} \longrightarrow 0,0002931 \text{ Kw}$$

$$18000 \text{ Btu} \longrightarrow 5,275 \text{ Kw}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (01) \text{ Foyer} \longrightarrow 5,275[\text{Kw}] \\ (200) \text{ foyers} \longrightarrow 1055 [\text{kW}] \end{array} \right.$$

Avec cette puissance de 1055 [kW] nous avons choies les paramètres de notre champ solaire.

Les figures IV.13 et IV.14 représente les fenêtre Greenius avec les paramètres du collecteurs ET2 with schott HCE et LS-2 Cermet Vacuum,et on a situé dans le tableau IV.3 les données du champ solaire.

Default
File Edit Costs Help

Collector Field

Field Data Field Operation

General
☒ Simple field model ☐ Enhanced field model

General and Dimensions

Name: Default
 Collector name: ET 2 with Schott HCE ▶

Land use: 1581372 m²
 Reference Irradiation: 650 W/m²
 Nominal Thermal Output ¹: 1302 kWth
¹ Reference direct irradiation at amb. temp = 25 °C

Orientation

Distance between rows: 17.30 m
 Distance between collectors: 0.50 m
 Tracking axis tilt angle: 0.00 °
 Tracking axis azimuth: 0.00 ° North-South
☒ End gain possible

Field parameters

Number of rows in the field: 4
 No. of collectors/row (loop): 1
 Field size (effective mirror area): 3270 m²
 Total header length: 495.0 m
 Mean header diameter: 0.2545 m
 Header specific mass: 60.29 kg/m
 Length fraction cold header: 0.50
 Pipe length in loops: 120.0 m
 Pipe diameter in loops: 0.0525 m
 Pipe specific mass: 5.44 kg/m
 Drum length:
 Drum diameter:
 Drum spec. mass:
 Recirculation rate:
 Heat capacity ²: 0.136 Wh/(kgK) ☒ Automatic calculation of pipe length

Field/Superheater

OK Apply Cancel

Figure 4-13 : Fenêtre Greenius avec les paramètres du collecteur ET2 with schott HCE.

LS-2 Cermet Vakuum
File Edit Costs Help

Collector Field

Field Data Field Operation

General
☒ Simple field model ☐ Enhanced field model

General and Dimensions

Name: LS-2 Cermet Vakuum
 Collector name: LS-2 Cermet Vakuum ▶

Land use: 1581372 m²
 Reference Irradiation: 650 W/m²
 Nominal Thermal Output ¹: 1209 kWth
¹ Reference direct irradiation at amb. temp = 25 °C

Orientation

Distance between rows: 17.30 m
 Distance between collectors: 0.50 m
 Tracking axis tilt angle: 0.00 °
 Tracking axis azimuth: 0.00 ° North-South
☒ End gain possible

Field parameters

Number of rows in the field: 5
 No. of collectors/row (loop): 3
 Field size (effective mirror area): 3525 m²
 Total header length: 512.0 m
 Mean header diameter: 0.2545 m
 Header specific mass: 60.29 kg/m
 Length fraction cold header: 0.50
 Pipe length in loops: 187.0 m
 Pipe diameter in loops: 0.0525 m
 Pipe specific mass: 5.44 kg/m
 Drum length:
 Drum diameter:
 Drum spec. mass:
 Recirculation rate:
 Heat capacity ²: 0.136 Wh/(kgK) ☒ Automatic calculation of pipe length

Field/Superheater

OK Apply Cancel

Figure 4-14 : Fenêtre Greenius avec les paramètres du collecteur LS-2 Cermet Vacuum.

Tableau 4-2 : Données du champ solaire [42].

Technologie utilisé	Puissance thermique nominale [kWh]	Nombres de lignes dans le champ	Nombres de collecteurs /rangée (Boucle)	Température d'entrée du champ [°C]	Température de sortie du champ [°C]
LS-2 Cermet Vacuum	1209	5	3	295	385
ET2 with schott HCE	1302	4	1	295	385

4.5.7 Fluide de transfert

Nous avons choisi Therminol VP-1 comme fluide de transfert à base de ses propriétés thermodynamiques. Voir figure IV.15

Therminol VP-1 est une huile thermique en phase gaz/liquide à haute température avec une excellente stabilité thermique. Therminol-VP-1 est conçu pour des températures allant jusqu'à 400 [°C] pour les phases gazeuse et liquide d'un système thermique. Une pression statique d'environ 10 [bar] est nécessaire pour travailler en état liquide à des températures élevées, ses principales propriétés sont données aux Tableau IV.4.

Tableau 4-3 : Propriétés du Fluide Therminol VP-1 [46]

Caractéristiques	Valeurs
Aspect	Clair, incolore comme l'eau
Composition	Mélange eutectique de 26,5 % de biphenyle et de 73,5% de diphényle
Température d'ébullition normale	257[°C]
Température maximale du fluide	400 °C]
Température minimale du fluide	15[°C]
Plage d'utilisation optimale (Liquide)	12 [°C]-400 [°C]
Plage d'utilisation optimale (Vapeur)	260 [°C] -400 [°C]

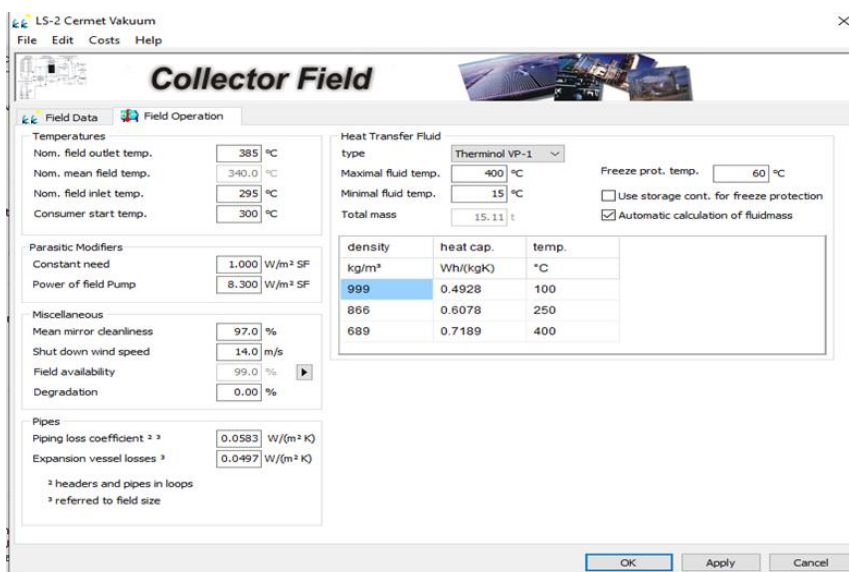


Figure 4-15 : Fenêtre Greenius pour choisir le Fluide caloporteur.

4.5.8 Stockage

Pour les installations de site, nous avons utilisé le système de stockage standard avec les deux types de collecteurs, comme il est déjà indiqué sur la figure IV.16

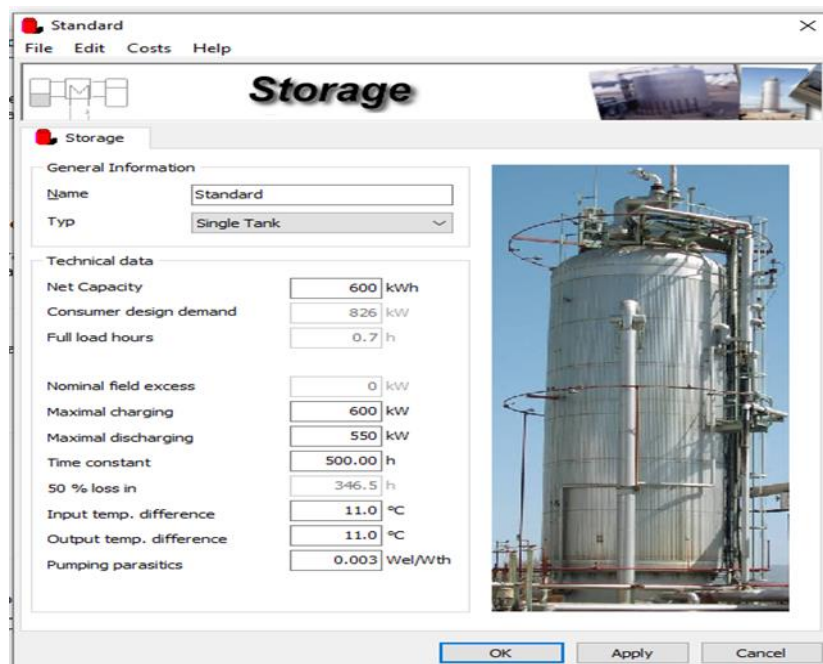


Figure 4-16 : Fenêtre du stockage pour les deux types de collecteurs.

4.5.9 L'hybridation

Dans notre simulation pour les deux types de collecteurs à savoir LS-2 Cermet Vacuum et ET2 with schott HCE, nous avons ajouté à notre installation un système d'appoint (Boiler) à base du gaz naturel, comme le montre la figure IV.17 et la figure IV.18 et leurs rôles principaux est d'assurer une production continue quand y a moins de rayonnement solaire ou bien durant la nuit.



Figure 4-17 : Fenêtre du système d'appoint (Boiler) pour ET2 with schott HCE.

Auxiliary Boiler

General Information

Name: Standard

Technical Data

Fuel: Natural Gas

Nominal Power: 1209 kW

Efficiency: 90.0 %

Net calorific value: 43500 kJ/kg

Fuel

Price of kWh: 0.050 €/kWh

Emissions of CO₂: 0.215 kg/kWh

Emissions of SO₂: 0.000 kg/kWh

Parasitic Modifiers

Spec. parasitics: 0.003 W/Wth

OK Apply Cancel

Figure 4-18 : Fenêtre du système d'appoint (Boiler) LS-2 Cermet Vacuum.

Le système de production de froid : nous avons choisis système d'absorption chiller Broad BY 100 qui fournit une puissance frigorifique de 1163 kWh comme montré la figure IV.19.

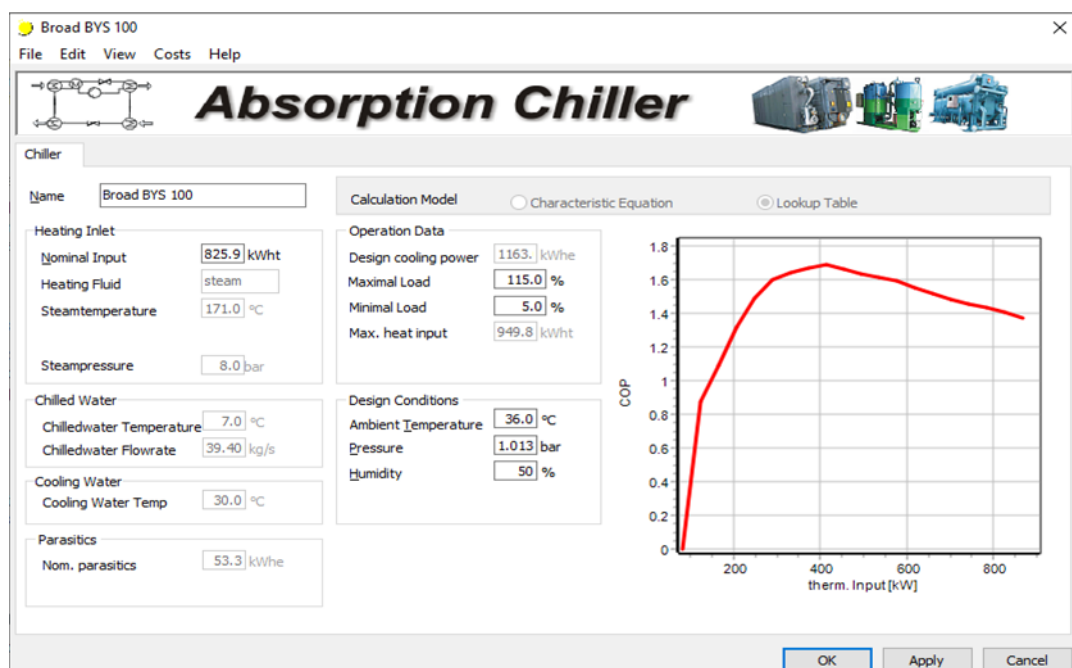


Figure 4-19 : Fenêtre du système d'absorption chiller Broad BY 100.

4.6 Résultats et interprétations

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d'un mini central solaire, avec deux types de collecteurs pour le même site. On a choisi de comparer les deux sites pour une centrale avec et sans hybridation

4.6.1 Données Météorologiques

Rayonnement normal direct (DNI) :

La figure IV.20 nous montre la variation de l'irradiation normale directe (DNI) en fonction des jours de l'année pour le site de travail

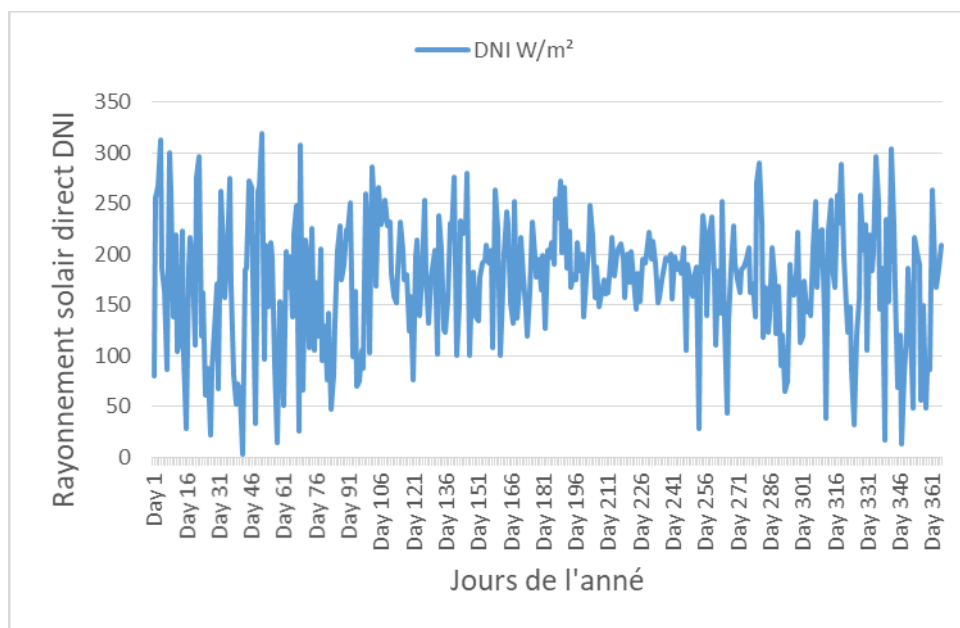


Figure 4-20 : Variation de l'irradiation directe normale DNI (rayonnement solaire direct) pendant une année pour le site de travail (djamaa).

On observe un rayonnement solaire direct important en fonction des jours de l'année pour le site de travail, et on enregistre une valeur maximale de 320 ($[W](m^2)$) le 51ème jour (20 Février). Par ailleurs on constate un DNI presque stable à partir du 71ème jour (12 Mars) jusqu'au 241ème jour (29 Aout).

Températures ambiantes (T_{amb})

La figure IV.21 nous illustre la variation des températures ambiantes annuelles de site. on constate une variation progressive de température de $10[^\circ C]$ jusqu'à ce qu'elle atteigne sa température

maximale de 35[°C] le mois de juillet, en quelque peu elle reste constante jusqu'au mois d'Aout, puis elle décroît jusqu'à 12[°C] enregistrée au mois de décembre

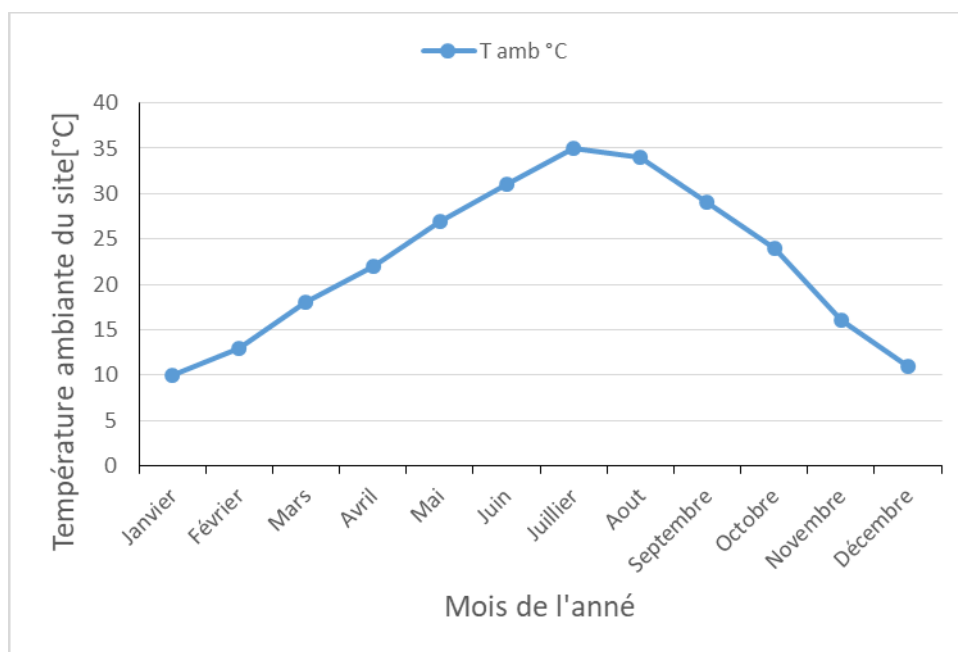


Figure 4-21 : Variation des températures ambiantes pendant une année pour le site de Djamaa

4.6.2 Simulation avec hybridation

Quantité de chaleur produite par le champ solaire

Les figures IV.22 et IV.23 illustrant la variation de la quantité de chaleur produite par les deux types de champ solaire et le boiler qui compense la faible production thermique pendant les jours moins ensoleillés.

pour les deux types de collecteurs la production maximale du champ solaire est importante et stable entre le 95ème jour (05 Avril) et le 245ème jour (2 Septembre), dont elle atteint son maximum le 140ème jour (20 Mai) avec une production de 10341 kWh avec une production de l'ordre de 12454 [kWh] par le boiler pour ET2 with schott HCE et 9064 kWh de production avec une production de l'ordre de 12506 [kWh] par le boiler pour LS-2 Cermet Vacuum avec une diminution de production de l'ordre de 1247Kwh par rapport de type ET2 with schott HCE.

Cela est dû à l'intensité d'irradiation solaire directe importante enregistrée dans cet intervalle.

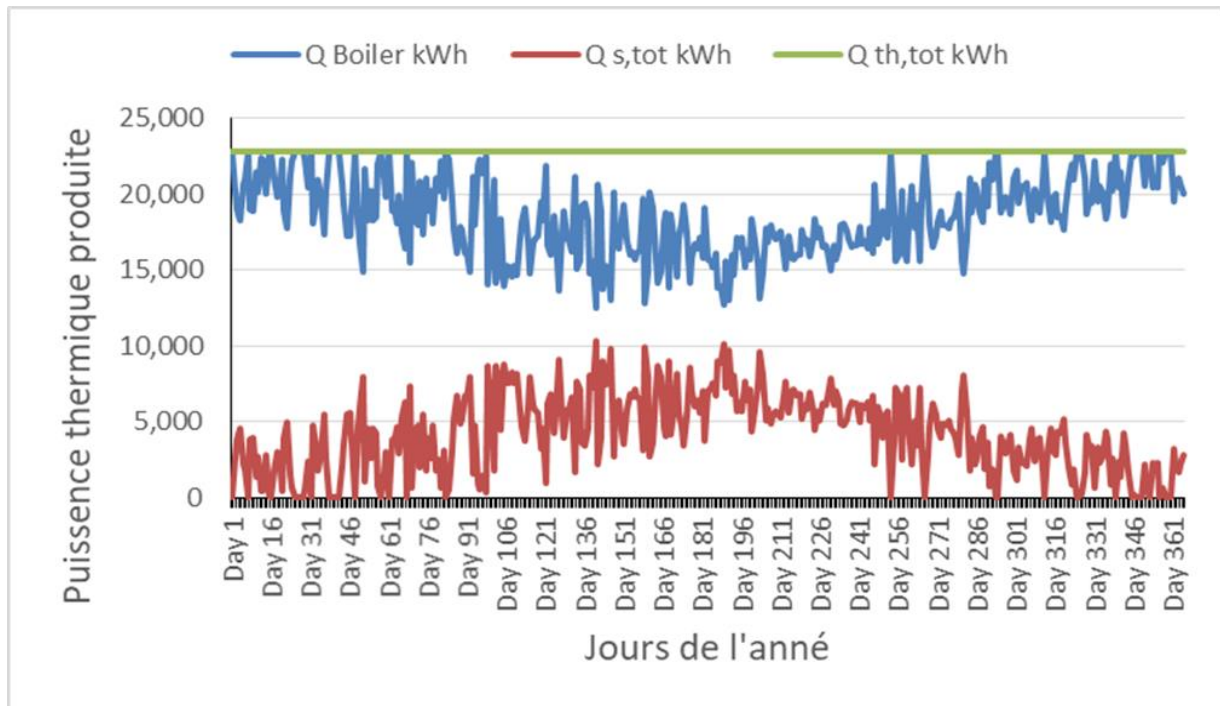


Figure 4-22 : Variation de quantité de chaleur produite par le champ solaire et la puissance thermique fourni par le boiler en fonction des jours de l'année (ET2 with schott HCE)

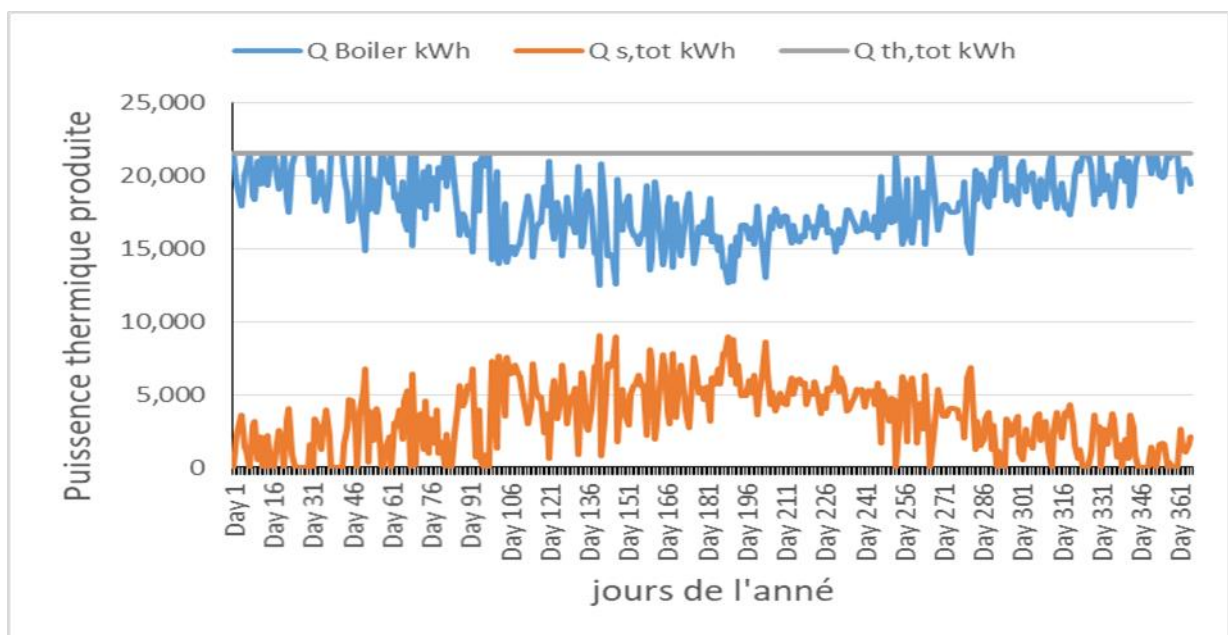


Figure 4-23 : Variation de quantité de chaleur produite par le champ solaire et la puissance thermique fourni par le boiler en fonction des jours de l'année (LS-2 Cermet Vacuum)

Les figures IV.24 et IV.25 nous montrent la variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (H_{dn}) et le rendement obtenu en fonction des jours de l'année avec les deux types de collecteurs.

On remarque que le rendement est relatif à la quantité de chaleur solaire pour les deux types, et le grand rendement est pour le type ET2 with schott HCE.

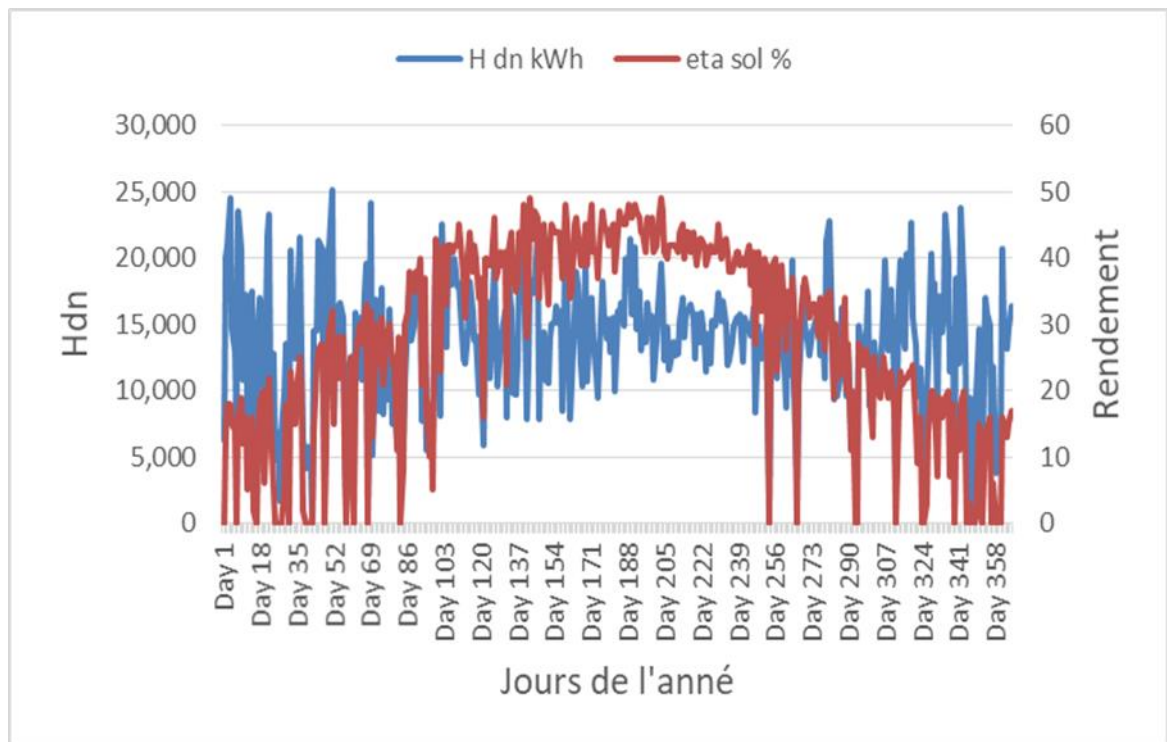


Figure 4-24 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et le rendement obtenu en fonction des jours de l'année avec ET2 with schott HCE.

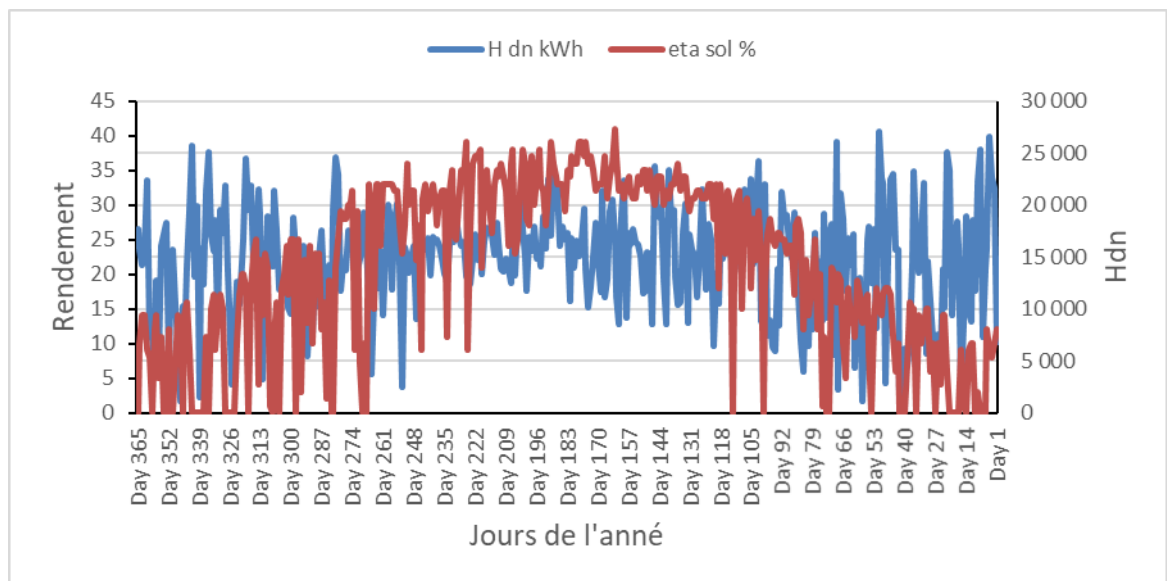


Figure 4-25 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et le rendement obtenu en fonction des jours de l'année avec LS-2 Cermet Vacuum

4.6.3 Simulation sans hybridation :

Production du froid annuelle

Les figures IV.26 et IV.27 nous montrent variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et la production thermique à la sortie du chiller (Q cool) en fonction des jours de l'année avec les deux types de collecteurs.

pour les deux types de collecteurs la production thermique à la sortie du chiller (Q cool) est importante et stable entre le 95ème jour (05 Avril) et le 245ème jour (2 Septembre), dont elle atteint son maximum le 140ème jour (20 Mai) avec une production de 13863 [kWh] avec quantité de chaleur solaire de l'ordre de 21625 [kWh] pour ET2 with schott HCE et 12475 [kWh] de production avec quantité de chaleur solaire de l'ordre de 23311 [kWh] pour LS-2 Cermet Vacuum avec une diminution de production de l'ordre de 1388 [kWh] par rapport de type ET2 with schott HCE.

On remarque que la production thermique à la sortie du chiller (Q cool) est proportionnel à la quantité de chaleur solaire pour les deux types, et cette quantité de chaleur solaire dépend seulement de l'ensoleillement car ici on n'a pas un système d'appoint (boiler), qui compense la production quand y'a un faible ensoleillement (nuages) ou l'orsque le soleil se couche. Le manque de production est assuré par le système de stockage.

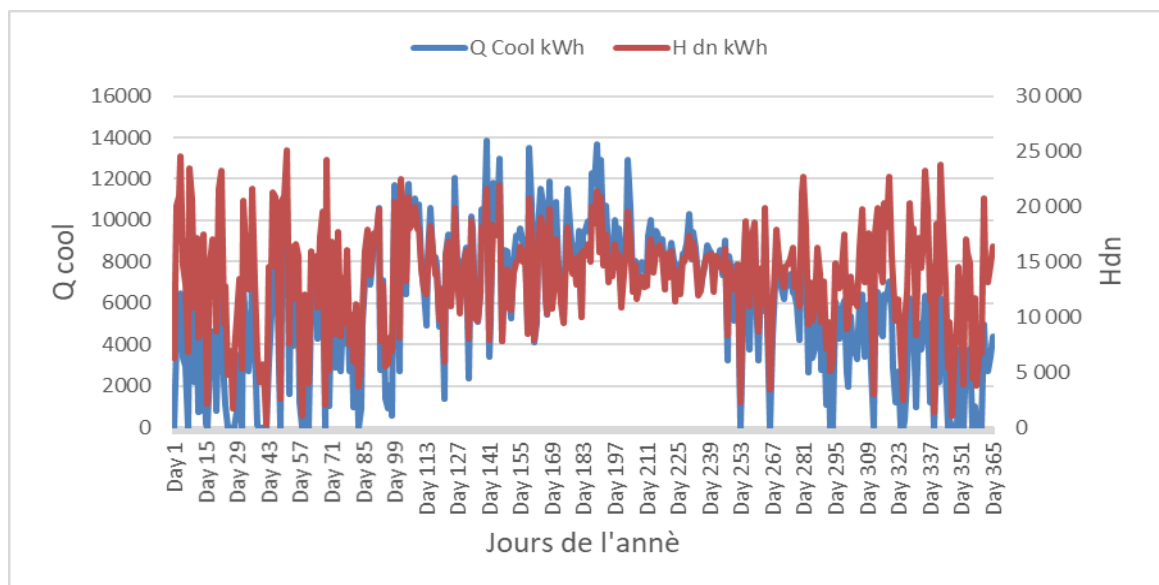


Figure 4-26 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et la production thermique à la sortie du (chiller Q cool) en fonction des jours de l'année avec ET2 with schott HCE

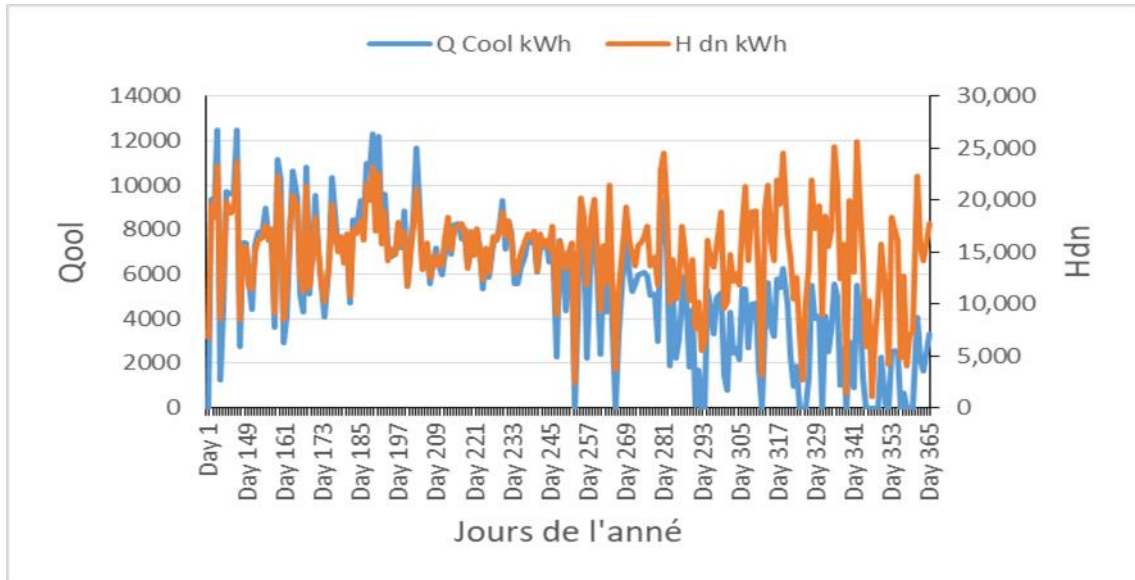


Figure 4-27 : variation de la quantité de chaleur solaire sans pertes (Hdn) et la production thermique à la sortie du (chiller Q cool) en fonction des jours de l'année (LS-2 Cermet Vacuum)

4.7 Conclusion

Dans ce présent chapitre, tous les résultats obtenus dans le cadre de notre simulation ont été traités par Greenius à l'aide des données météorologiques fournies par Meteonorm.8, en outre ces résultats analysés sous Excel nous a permis de déduire que les facteurs météorologiques tels que : l'irradiation direct normal (DNI) et la température ambiante du site influencent sur les performances du système étudiés.

D'après nos analyses des résultats de la simulation, on conclut que le type de collecteur ET2 with schott HCE est le plus efficace que le type LS-2 Cermet Vacuum

Conclusion

Actuellement, l'exploitation d'énergie solaire, ressource inépuisable et non polluante, ne cesse de se développer. Un raisonnement majeur qui empêche l'utilisation grosse de cette énergie est lié à deux facteurs, dont le premier est le prix élevé des investissements, notamment pour les centrales thermiques, le second est sa fluctuation qui dépend des facteurs météorologiques tels que la température ambiante du site et l'irradiation normale directe (DNI) qu'est induit donc une production discontinue.

Pour les pays qui reçoivent des rayonnements solaires important comme l'Algérie, l'application de systèmes d'énergie solaire renouvelables, en spécifique les systèmes de concentration solaire, pourrait être la solution idéale pour satisfaire les besoins énergétiques locale, qui a connu une accroissement significative ces dernières années (la consommation électrique), ainsi ces systèmes pourront répondre aux enjeux et défis de la transition énergétique.

Dans ce travail, nous avons étudiés le comportement d'une minicentrale solaire à concentration destinée pour la production de froid. Une simulation numérique a été menée à l'aide du logiciel Greenuis avec et sans hybridation, afin de faire une étude comparative sur le plan technique et répondre aux besoins de la consommation d'énergie frigorifique dans la région saharienne Djamaa (El Meghair).

A partir de la comparaison entre les différents résultats obtenus par les deux types de collecteurs nous ont permis de tirer quelques conclusions :

- Pour le site de djamaa la production de froid à base d'énergies renouvelables par les deux types de collecteurs est considérable et presque stable pendant tous les jours de bon ensoleillement avec une différence efficacité, car l'intensité et le taux de rayonnement normal direct reçus par cette région nord saharienne est plus important, ce qu'est y engendre l'utilisation minime d'une source à base d'un combustible fossile.
- D'après les différents résultats, on synthétise que l'installation d'une minicentrale avec ce type de technologie dépend des données météorologique et climatiques (DNI, Température ambiante, vitesse du vent...).

Finalement, ce travail n'est qu'une initiation à l'étude et à la simulation des centrales thermique à collecteurs cylindro-parabolique, où il incite l'état Algérienne à recourir à ce type de technologie

pour répondre aux besoins énergétiques de plus en plus croissants et de parer à toute dégradation environnementale.

Bibliographie

- [1]: J.A. Duffie, and J.W. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed, Inc, 1991.
- [2]: M. Iqbal, An Introduction to solar Radiation, Academic Press, Toronto (1983).
- [3]: M. Geyer, and, W.B. Stine, Power from the Sun (Powerfromthesun.net). J.T. Lyle Center, 2001.
- [4]: Ralph C. Temps, K.L. Coulson .Solar radiation incident upon slopes of different orientations. . SolarEnergy 1977.19(2):179-184.
- [5] : J. Bernard. Energie solaire Calculs et optimisation. Edition ellipses, 2004.
- [6] : M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [7] : Document « énergies solaires thermodynamique » en ligne, syndicat des énergies renouvelables, France, mise à jour juin 2012.
- [8] : Observ, E. R. (2017). Le baromètre 2017 des énergies renouvelables électriques en France. Observ'ER.
- [9] : « Feuille de route Solaire Thermodynamique » guide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) Version finale Juin 2010.
- [10] : Jean-Bernard Michel, Centrales Solaires Thermique à concentration(CSTC) Etat de l'art, le 05.12.2010
- [11] : A. Sokhal, NEAL, Entrepreneur de technologies liées aux énergies nouvelles et renouvelables. Présentation de la 1ère centrale hybride solaire/gaz de Hassi R'Mel, Réunion d'Experts UNECA, Rabat, 12-13 janvier 2012.
- [12] : M.Mekhloufi et M.Salhi, « Etude technico-économique et environnementale de la centrale hybride de Hassi R'mel, Filiere énergies renouvelables spécialité énergies renouvelables en mécanique, encadré par M. A.Zerrouati, 2018/2019.

- [13] : Hamani Nadjette, Mémoire de magister, « Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident », Université de Biskra, 2005.
- [14] : Günther M.; Joemann M.; Hirsch T., Parabolic Trough Technology, enerMENA, Université de Kassel, 2010.
- [15]: Fauziah Sulaiman, Nurhayati Abdullah, and Balbir Singh Mahinder Singh, A Simulated Design and Analysis of a Solar Thermal Parabolic Trough Concentrator, World Academy of Science, Engineering and Technology 72, 2012 (Numéro 74).
- [16]: Padilla Ricardo.V, Demirkaya.G, Goswami.D.Yogi, Stefanakos.E, Muhammad M. Rahman, 2011. Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver. Applied Energy 88, 5097-5110.
- [17]: Regue Hanane Maria, « Etude expérimentale d'un capteur cylindro-parabolique à double réflexion » Magister en génie mécanique option : systèmes thermiques et énergétiques, université de Laghouat. Encadré par A.Benchatti.promotion 2013.
- [18] : Ameghchouche Merzaka , Magister en Mécanique, Option : énergétique, « Simulation et prédiction des pertes thermiques d'un absorbeur pour un concentrateur cylindro-parabolique ». Université de Batna. Juin 2004.
- [19]: K.Heinloth. «Energy technologies: Renewable energy». USA:Springer, 2006
- [20] : B.Haddouche, L.Chergui. « Simulation d'une centrale à capteur cylindro-parabolique » mémoire de master professionnel en génie mécanique spécialité énergies renouvelables. Encadré par G.Medjkane. UMMTO. 2016/2017.
- [21]: Cyril caliot, Giles Flamant. Formation CSP, Ouarzazate 25-26Mai 2016. « Techniques de concentrateurs cylindro-parabolique », Laboratoire de procédés, matériaux et énergie solaire, CNRS.
- [22]: Marif.Y, Benmoussa. H, Bouguettaia. H, Belhadj. M. M, Zerrouki. M, 2014. Numericalsimulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Saharanregion. Energy Conversion and Management 85, 521–529.
- [23]: A.M.PATNODE, “Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants”, Master of Science thesis, university of CRANFIELD, 2007, Libya.
- [24] : Zotto, P. D., J.-M. Larre, et al. (2000). Mémotech Génie Energétique.

- [25] : Desmons, J. (2009). Aide-mémoire de génie climatique-2e édition, Dunod.
- [26] : Recknagel, H., Sprenger, E., SCHRAMEK, E. R., & HONMANN, W (1995). Le Recknagel-Manuel pratique du génie climatique, Pyc.
- [27] : Fong, K., T. T. Chow, et al. (2009). "Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city." *Solar Energy* 84(2): 227-244.
- [28] : Shashi Reddy , P. S. (2011). "Future Air Conditioning with Solar Technology: A Technical Overview." *International Journal of Engineering, Science and Metallurgy* 1: 348-356.
- [29] : Wang, L., H. Bao, et al. (2009). "A comparison of the performances of adsorption and resorption refrigeration systems powered by the low grade heat." *Renewable Energy* 34(11): 2373-2379.
- [30] : Al-Alili, A., Y. Hwang, et al. (2014). "Review of solar thermal air conditioning
- [31] : Henning, H.-M. (2007). "Solar assisted air conditioning of buildings an overview." *Applied Thermal Engineering* 27(10): 1734-1749.
- [32] : Kim, D. and C. I. Ferreira (2008). "Solar refrigeration option-a state-of-the-art review." *International Journal of refrigeration* 31(1): 3-15.
- [33] : Djebiret, M. A. (2012). Etude de faisabilité d'un climatiseur solaire adapté à la région de Biskra., Université Mohamed Khider de Biskra.
- [34] : Balaras, C. A., G. Grossman, et al. (2007). "Solar air conditioning in Europe-an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* 11(2): 299-314.
- [35] : Rouag, A. (2017). Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption Doctorat LMD, Mohamed kheidher.
- [36] : Le Pierrès, N. (2005). Procédé solaire de production de froid basse température (-28 C) par sorption solide-gaz Doctorat, Université de Perpignan.
- [37] : Allab, F. (2008). Etude Et Conception d'un Dispositif de Réfrigération Magnétique Base Sur L'effet Magnétocalorique Geant Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [38] : Wang, R., T. Ge, et al. (2009). "Solar sorption cooling systems for residential applications: options and guidelines." *International Journal of Refrigeration* 32(4): 638-660.

- [39]: Greenius, DLR –Institute of Solar Research, Software/Download https://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-11688/23056_read-53432/
- [40] : Schulte-Fischedick, J.; Tamme, R.; Herrmann, U.: CFD Analysis of the Cool Down Behaviour of Molten Salt Thermal Storage Systems; Proceedings of the ES 2008, Energy Sustainability 2008, August 10-14, 2008, Jacksonville, Florida.
- [41]: Theunissen, P.-H.; Beckman, W.A.: Solar Transmittance Characteristics of Evacuated Tubular Collectors with Diffuse Back Reflectors. In: Solar Energy Vol. 35 (1985) Nr. 4, S. 311-320.
- [42]: Greenius. DLR-Institute of Solar Research. <http://freegreenius.dlr.de/software>
- [43]: METEOTEST, <http://meteotest.ch/produkt/meteonorm>.
- [44]: Coordonnées géographiques (en ligne) source : wikipédia Site web : <http://fr.wikipedia.org/wiki>
- [45]: Greenius, DLR- Institute of Solar Research [http://freegreenius.dlr.de/software/help_and_manual/components/technology/parabolic trough power plants](http://freegreenius.dlr.de/software/help_and_manual/components/technology/parabolic_trough_power_plants)
- [46]: Technical bulletin 7239115B, Therminol VP-1 Heat Transfer Fluid by Solutia; web: <http://therminol.com/products/TherminolVP-1>

ANNEXE A

Les données de Load curve data et Operating strategy

Default

File Edit View Help

Load Curve

Load Curve Data Operating Strategy

General

Name: Default

Year sum 0 MWh Average 0 kW
Minimum 0 kW Maximum 0 kW

Nominal output: 1302 kW

Jan. is: الإثنين

Temporal Resolution: 60min

View Graph

Edit Table

Copy horizontal Copy vertical

Interpolate hori. Interpolate vert.

Fill grid with data of first week

Factor: 1.0 Multiply

Value: 1 Set All Set Selection

electr.	day	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
05- ديسمبر	الأربعاء	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06- ديسمبر	الخميس	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
07- ديسمبر	الجمعة	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
08- ديسمبر	السبت	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
09- ديسمبر	الأحد	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10- ديسمبر	الاثنين	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11- ديسمبر	الثلاثاء	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12- ديسمبر	الأربعاء	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13- ديسمبر	الخميس	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14- ديسمبر	الجمعة	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15- ديسمبر	السبت	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16- ديسمبر	الأحد	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17- ديسمبر	الاثنين	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18- ديسمبر	الثلاثاء	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19- ديسمبر	الأربعاء	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20- ديسمبر	الخميس	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21- ديسمبر	الجمعة	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22- ديسمبر	السبت	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23- ديسمبر	الأحد	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

OK Apply Cancel

Default

File Edit View Help

Operating Strategy

Load Curve Data Operating Strategy

Edit Table

Copy horizontal Copy vertical

Value: 1 Set All Set Selection

day	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00
01- جانيه	الاثنين	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02- جانيه	الثلاثاء	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
03- جانيه	الأربعاء	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
04- جانيه	الخميس	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
05- جانيه	الجمعة	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
06- جانيه	السبت	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
07- جانيه	الأحد	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Strategy	Discharge THR	Discharge >THR	Discharge <THR	Charge THR	Charge prio. until	Min PB Input	Max PB Input	Gas support up to	Storage Loss Comp.	Fossil Storage Loss Comp.	Gas: Gapfill	Gas: Only boost
1	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	☒	☐	☐	☐
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	☐	☐	☐	☐

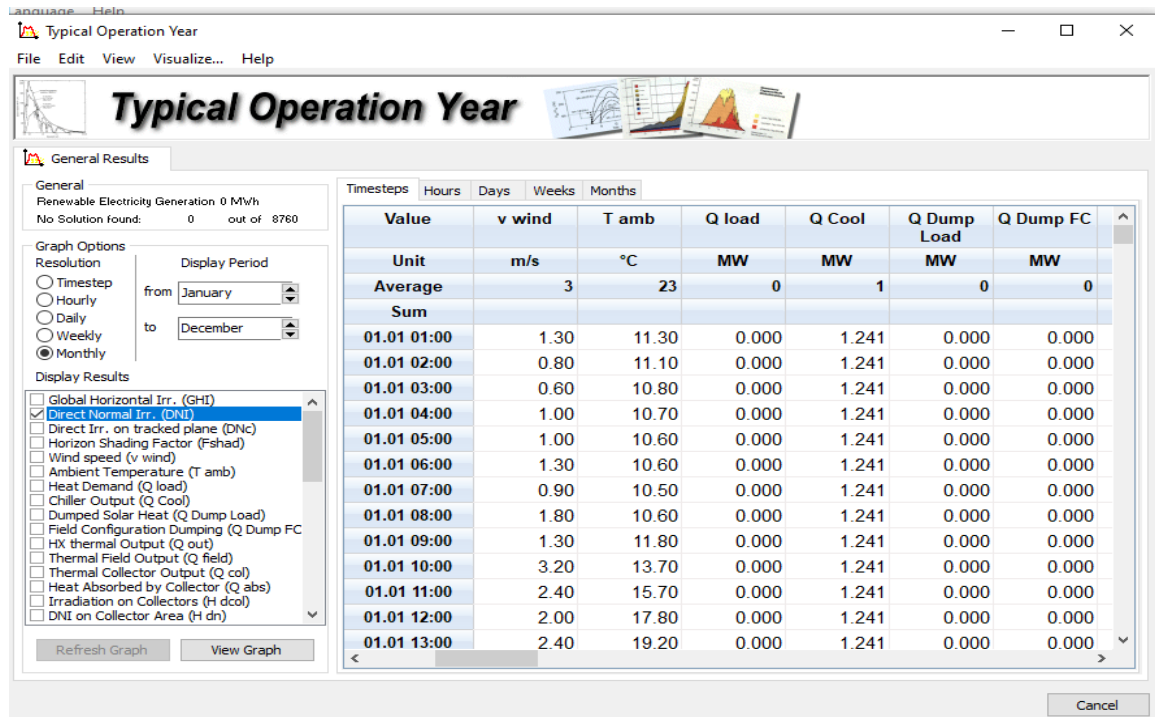
OK Apply Cancel

ANNEXE B

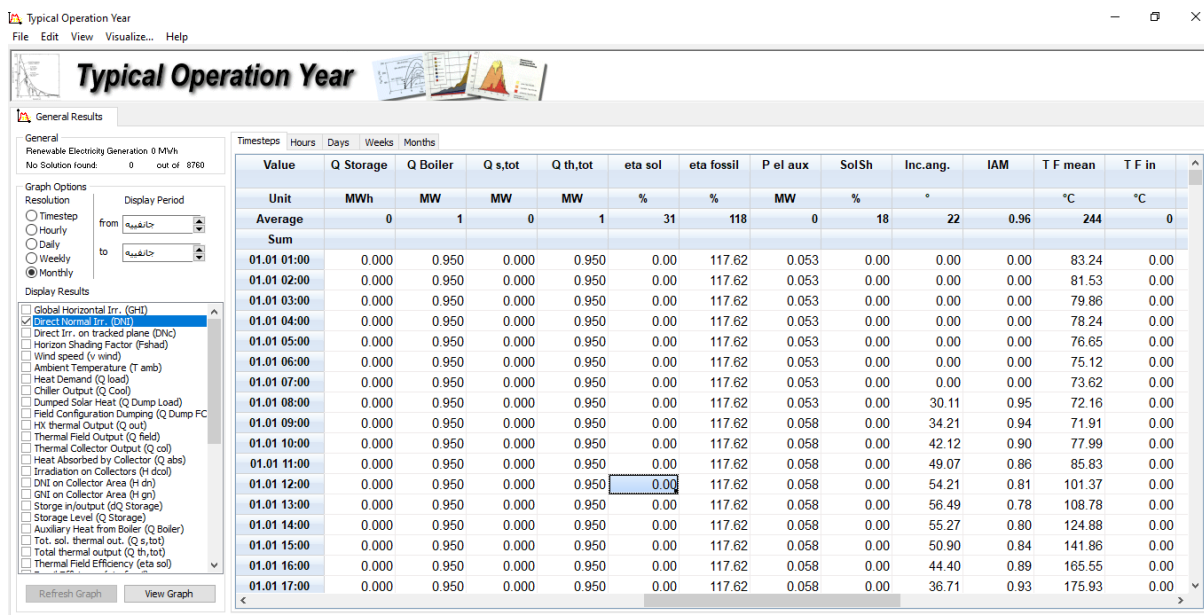
Resultalt du logiciel Greenuis apres la simulation pour les deux types de colecteurs

Avec boiler

Type LS-2 Cermet Vacuum (commercial)

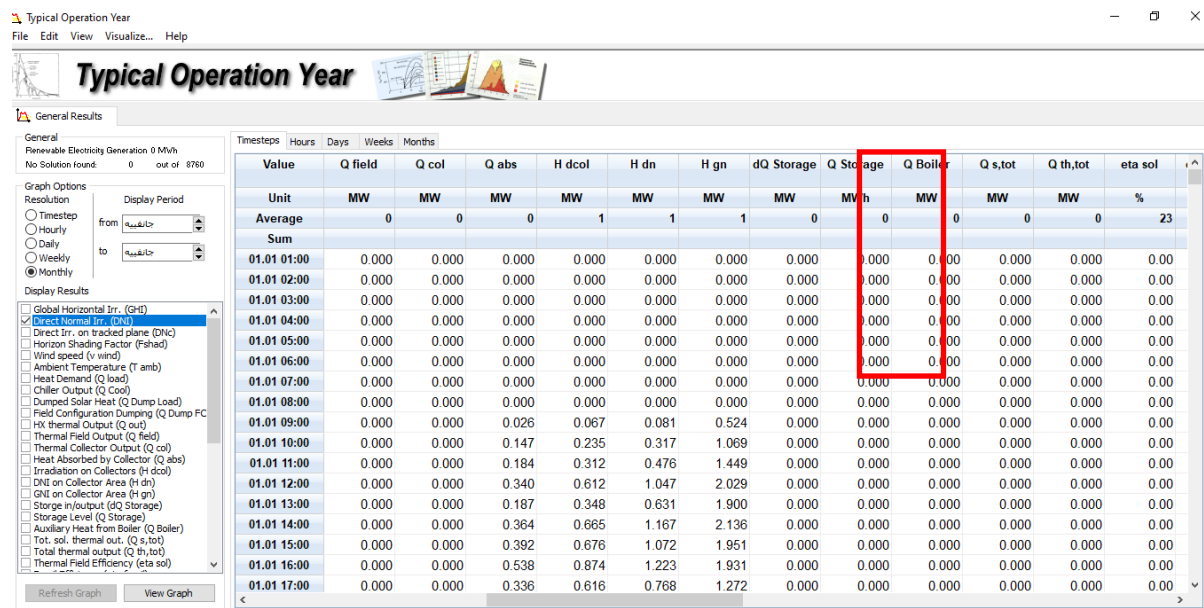


Type de ET2 with schott HCE

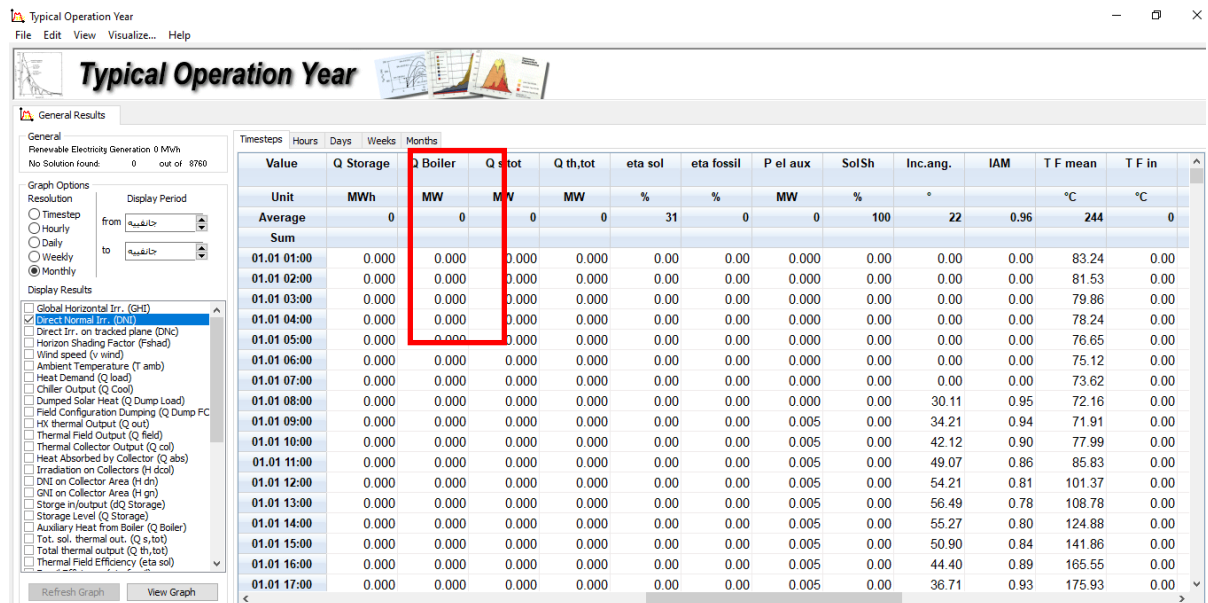


Sans Boiler

Type LS-2 Cermet Vacuum (commercial)



Type de ET2 with schott HCE



Annexe C

Propriétés physique de huile synthétique Therminol VP-1

Appearance	Clear, water-white liquid
Composition	Biphenyl and diphenyl oxide
Moisture Content, Maximum	300 ppm
Chlorine	< 10 ppm
Sulfur	< 10 ppm
Neutralization Number	< 0.2 mg KOH/g
Copper Corrosion (ASTM D-130)	<< 1 a
Flash Point, Open Cup (ASTM D-92)	124 °C (255 °F)
Closed Cup (Pensky-Martens)	110 °C (230 °F)
Fire Point (ASTM D-92)	127 °C (260 °F)
Autoignition Temperature (ASTM D-2155)	621 °C (1150 °F)
Kinematic Viscosity at 40 °C	2.48 mm ² /s (cSt)
at 100 °C	0.99 mm ² /s (cSt)
Density at 25 °C	1060 kg/m ³ (8.85 lb/gal)
Specific Gravity (60 °F/60 °F)	1.069
Coefficient of Thermal Expansion at 200 °C	0.000979/°C (0.000544/°F)
Average Molecular Weight	166
Crystallization Point	12 °C (54 °F)
Volume Contraction Upon Freezing	6.27%
Volume Expansion Upon Melting	6.69%
Surface Tension in Air at 25 °C	36.6 dyn/cm
Heat of Fusion	97.3 kJ/kg (41.8 Btu/lb)
Normal Boiling Point	257 °C (495 °F)
Heat of Vaporization at Maximum Use Temperature 400 °C	206 kJ/kg (88.7 Btu/lb)
Specific Resistivity at 20 °C	6.4 x 10 ¹¹ ohm-cm
Optimum Use Range, Liquid	12 °C-400 °C (54 °F-750 °F)
Vapor	260 °C-400 °C (500 °F-750 °F)
Maximum Film Temperature	425 °C (800 °F)
Pseudocritical Temperature	499 °C (930 °F)
Pseudocritical Pressure	33.1 bar (480 psia)
Pseudocritical Density	327 kg/m ³ (20.4 lb/ft ³)