

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de master Académique

Option : **Énergétique**

THÈME

**Etude et dimensionnement d'une machine frigorifique à
absorption fonctionnant avec un collecteur solaire de Fresnel sur
des sites arides**

Présentés par :

BELMOUHOU B KHELAF

BOUDJEMIA KARIM

Sous la direction de :

M. BELTAGY H.

M.KAROUA H.

Soutenu publiquement le 20/10/2022 devant le jury composé de :

Président	M. FERROUK M.	UMMTO
Promoteur	M. BELTAGY H.	UMMTO
Co-promoteur	M. KAROUA H.	CDER
Examineur	M. FOUCHANE S.	UMMTO

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions **Allah** le tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail.

Nos remerciements les plus sincères et respectueux s'adressent aussi à **Mr H. BELTAGY** qui a veillé à l'élaboration de ce travail de recherche et qui a déployé tous ses efforts pour notre réussite, il n'a cessé de nous faire profiter de sa très haute compétence, de ses conseils faisant preuve de qualité noble peu commune, nous tenons à lui témoigner notre gratitude et notre profonde reconnaissance, et nous le remercions pour l'enseignement plein, et sagesse qui nous a toujours dispensé. et notre Co-promoteur **Mr KAROUA Housseyn**, qui nous a guidés tout au long de l'élaboration de notre stage pratique, au niveau de **CDER** de **Bouzreah**, pour sa disponibilité, sa patience, ses précieux conseils et ses orientations.

A monsieur le président de jury, qui nous a fait l'honneur de présider le jury, nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance.

A monsieur l'examineur le membre de jury pour le grand honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail et assurer notre soutenance, nous les prions d'accepter tous nos remerciements et l'expression de notre haute considération.

ملخص

تهدف هذه المذاكرة إلى خصخصة تشغيل وحدة المركز الشمسي من نوع fresnel متصلة بوحدة تكييف ف مختلف المناطق الجزائرية الصحراوية. أداء ناجعة هذا النوع من الأنظمة معبر عليه عن طريق نمذجة ومحاكاة باستعمال برنامج Meetenorm و Greenuis لمختلف أجزاء الوحدة وهي الحقل الشمسي المستقبل ووحدة التكييف.

نتائج المحاكاة سمحت لنا باستنتاج أداء وناجعة النظام في مختلف الناطق المدروس بمقارنة وقراءة النتائج، بسطنا اتخاذ القرار المناسب بتنفيذ مثل هذه المشاريع.

(مركز شمسي من نوع-الكلمات المفتاحية, fresnel) الطاقة الشمسية، التركيز الشمسي

-أداء بصري وحراري، تكييف شمسي.

Résumé

Notre travail est consacré à l'étude est caractérisation du fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption, fonctionnant avec un concentrateur solaire linéaire de Fresnel sur des sites arides au sud de l'Algérie. Les performances de ce type de système sont évaluées à travers d'une modélisation théorique à l'aide de logiciel Meeteonorm et Greenuis des différents éléments de notre système à savoir : La partie concentration solaire qui regroupe : l'ensoleillement, le système de champ solaire et l'élément récepteur : L'autre partie est la partie machine frigorifique à absorption. Les résultats de la modélisation ont permis de simuler le comportement de notre système sous climat Algérien. En comparant et interprétant les résultats on a simplifié la prise de décision pour la réalisation de tel projet.

Mots clés : énergie solaire, concentration solaire, collecteur linéaire de Fresnel, performances optiques et thermiques, froid solaire, machines à absorption.

Abstract

Our work is attributed to the study is the characterization of the operation of an absorption refrigeration machine, activated with a linear Fresnel solar concentrator on arid sites in southern Algeria. The performance of this type of system is attributed through theoretical modeling using Meeteonorm and Greenuis software of the various elements of our system, namely: The solar concentration part which includes: sunshine, the solar field system and the receiving element. The other part is the absorption refrigeration machine part. The results of the modeling made it possible to simulate the behavior of our system under the Algerian climate. By comparing and interpreting the results are simplified decision-making for the realization of such a project. Keywords: solar energy, solar concentration, linear Fresnel collector, optical and thermal performance, solar cooling, absorption machines.

Listes des Nomenclatures :

Symbole	Signification	Unité
a	Azimut solaire	[Degré(°)].
A_r	surface de l'ouverture	[m ²]
A_a	surface de l'absorbeur.	[m ²]
Φ	Latitude.	[Degré (°)].
L	Longitude	[Degré (°)].
h	Hauteur	[m].
δ	Déclinaison	[Degré (°)].
ω	Angle horaire	[Degré (°)]
G_0	Rayonnement solaire extraterrestre	[kWh/m2]
I_0	Rayonnement solaire extraterrestre	[KW/m2]
θ_z	Angle zénithal	[Degré (°)]
λ	Longueur d'onde.	-
W_0	l'angle horaire au coucher du soleil	[Degré (°)]
γ	Facteur d'interception	-
N	Numéro du jour dans l'année compté à partir du 1 ^{er} Janvier.	-
C^*	constante solaire	[w/m ²].
i	Angle incidence	[Degré °]
C	Décalage horaire	[Degré °]
C_R	Concentration ponctuelle	
E_a	Surface de l'absorbeur	[m ²]
E_r	L'éclairement d'ouverture	
A_r	Surface d'ouverture	[m]
A_a	Surface de l'absorbeur	[m]
P_a	Puissance absorbée	[MW]
DNI	Direct normal d'irradiation	[W/m ²]
S_{champ}	Surface de champ solaire	[m ²]
P_{fluid}	Energie utile	[W]
$\eta_{optique}$	Rendement du collecteur optique	-
$\eta_{thermique}$	Le rendement thermique	-
\dot{m}	Débit massique d'entrée	[kg/s]

C_p	Chaleur spécifique du fluide caloporteur	[J/Kg.k]
T_s	Température de sortie	[k]
T_e	Température d'entrée	[k]
w	travail	[J]
h	L'enthalpie spécifique	[Kj/Kg]
\dot{Q}_c	la puissance calorifique cédée par le fluide au milieu extérieur.	[W]
\dot{Q}_F	la puissance calorifique cédée par le fluide au milieu inférieur.	[W]
Q_c	Quantité de chaleur fourni par la source chaud.	[J/Kg.K]
Q_F	Quantité de chaleur fourni par la source froide	[J/Kg.K]
COP	le coefficient de performances de la machine	-
COP_c	le coefficient de performances de Carnot	-
Q_b	Puissance calorifique de bouilleur	[W]
Q_c	Puissance calorifique de condenseur	[W]
Q_E	Puissance calorifique de l'évaporateur	[W]
Q_{ab}	Puissance calorifique de l'absorbeur	[W]
Q_e	Transfert de chaleur reçu par évaporateur	[kj/kg]
Q_{Col}	Puissance produite par l'absorbeur	[MW].
Q_{Cool}	puissance frigorifique produite .	[MW].
Q_{Field}	Puissance absorbée par le fluide.	[MW].
η_{Sol}	Efficacité	[%].
Q_{abs}	Puissance absorbée par l'absorbeur	[MW].
T_{amb}	Température ambient	[C°].

Q_s	l'énergie solaire disponible	[w].
Q_u	la puissance utile délivrée par le récepteur	[w].
ρ	facteur de réflexion du miroir	-
τ	facteur de transmission de la vitre	-
α	facteur d'absorption de l'absorbeur.	-
h	coefficient d'échange par convection	[w/m ² .K]
ΔT	la différence de température	[k]
S	surface d'échange	[m ²].

Abréviations	Signification
TSV	Temps Solaire Vrai
TSM	Temps Solaire Moyen
Et	Equation du temps
TU	Temps Universel
GMT	Meridian de Greenwich (Greenwich Mean Time)
TL	Temps Légal
ASA	Agence Spatiale Allemande
PV	Energie Solaire Photovoltaïque
EPC	Engineering Procurement Construction
LFR	Concentrateurs solaires types Fresnel
CCP	Concentrateur Cylindro – Parabolique
ORC	Cycle Organique de Rankine
ETM	Energie Thermique des Mers
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
BTU	British Thermal Unit
DNI	Irradiation Normale Directe.
ONM	Office National de météorologique
DLR	Instituted of solar research
LEC	Levelized Electricity cost
CDER	Centre de Développment des Energies Renouvelables
RST	Réservoir de stockage thermique.

LISTES DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I-1 : Différents type des énergies renouvelables	3
Figure I-2 : Structure du soleil [2].....	4
Figure I-3 : Schéma représentant le mouvement de la terre autour du soleil [4].	5
Figure I-4 : Longitudes et latitudes sur le globe [5].	6
Figure I-5: Repère horizontal [7].....	7
Figure I-6 :Mouvement de la Terre autour du soleil [12].....	9
Figure I-7 :Position du soleil par rapport à une surface inclinée : angle d'incidence et angle zénithal [13].....	9
Figure I-8:Angle d'incidence [9].....	10
Figure I-9 : Constante solaire [14].....	12
Figure I-10 :Composantes du rayonnement solaire : extraterrestre, global = direct + diffus +albédo [15].	13
Figure I-11 :Différentes formes de conversion de l'énergie solaire [16].	13
Figure I-12 :Fonctionnement d'un panneau solaire PV [17].....	14
Figure I-13 : Constituant d'un capteur solaire plan [18].	15
Figure I-14 :Capteur solaire à tubes sous vide [19].....	15
Figure I-15 : Capteur solaire à air.....	16
Figure I-16 : Schéma du Principe de fonctionnement d'une centrale CSP [20].....	16
Figure I-17: Différents types des concentrateurs solaires.	17
Figure I-18 :. Gisement solaire en Algérie	17
Figure I-19 : gisement solaire en Algérie [21].	18

Chapitre II:

Figure II-1 :la base de fonctionnement des centrales solaire thermodynamique [22].....	20
Figure II-2 :Les systèmes de concentration de l'énergie solaire [23].....	22
Figure II-3 :centrale solaire à tour (Californie) [25].....	23
Figure II-4 : principe de fonctionnement d'une centrale a tour	24
Figure II-5 : Centrale solaire parabolique (projet DISH-STIRLING à Font-Romeu-Odeillo) [26].	25
Figure II-6 : Principe de fonctionnement d'un capteur à miroirs paraboliques.....	25
Figure II-7 : Centrale solaire cylindro-parabolique.....	26

Figure II-8 :Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale cylindro-parabolique.	27
Figure II-9 : Centrale solaire a miroirs de Fresnel.....	28
Figure II-10 : Principe de fonctionnement Centrale solaire à collecteur linéaire de Fresnel. .	29
Figure II-11 : Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique	31
Figure II-12 :Principe de stockage de l'énergie par adsorption/désorption.....	33
Chapitre III:	
Figure III-1: Représentation schématique d'un concentrateur de type Fresnel [31].	35
Figure III-2 : Les miroirs réflecteurs.	36
Figure III-3 : le récepteur thermique [32].....	37
Figure III-4 : Récepteur monotube sous vide	38
Figure III-5 :. Le récepteur multitube	38
Figure III-6 : récepteur multitube [34].	39
Figure III-7 :Pertes dû à l'ombre des miroirs.	40
Figure III-8 :Schéma synoptique d'une centrale de Fresnel.....	41
Figure III-9 : Principe d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel.....	42
Figure III-10 : compresseur.	45
Figure III-11 : condenseur.....	45
Figure III-12 : Détendeur.....	46
Figure III-13 : évaporateur.	46
Figure III-14 : Machine frigorifique à compression.....	46
Figure III-15 : schéma synoptique d'une machine frigorifique à adsorption.....	48
Figure III-16 :schéma optique d'une machine frigorifique à absorption.....	51
Figure III-17 :Description schématique du cycle à absorption NH ₃ -H ₂ O-H ₂ solaire [38]	52
Chapitre IV:	
Figure IV-1 : schéma de principe de notre installation	56
Figure IV-2 : Les profils des DNI pour les 5 site.	57
Figure IV-3 :Logiciel Meteonorm [39].	59
Figure IV-4 : Processus de fonctionnement du logiciel de Greenuis.[40].....	60
Figure IV-5 :Page de couverture du logiciel Greenuis [40].	61
Figure IV-6 :Fenêtre d'Assistant (Wizard) [41]	62
Figure IV-7 : localisation de site se Meteonorm.	62
Figure IV-8 : coordonnées géographiques du site.....	63
Figure IV-9 : le choix de l'extension de l'application.....	63

Figure IV–10 :Résultats et illustration des paramètres.	64
Figure IV–11 :Fenêtre du nouveau projet.[41].....	65
Figure IV–12 : Fenêtre du choix de la technologie.....	65
Figure IV–13 :la fenêtre des Données météorologiques du site.....	66
Figure IV–14 : Interface de l'écran principale sur Greenuis.....	67
Figure IV–15 : le champ solaire.....	68
Figure IV–16 :Fenêtre Greenuis du collecteur IS-LF11-Modules [42].	70
Figure IV–17 :Fenêtre Greenuis avec les paramètres du collecteur [42].	71
Figure IV–18 :Fenêtre Greenuis avec les paramètres du collecteur.....	72
Figure IV–19 :le choix de la machine frigorifique.....	73
Figure IV–20 : Fenêtre du système d'appoint (Boiler) pour le site	73
Figure IV–21 :Fenêtre du système d'appoint (Boiler) pour le site.	74
Figure IV–22 :les centrales solaires à concentration sont caractérisées.....	74
Figure IV–23 :la fenêtre stockage de système pour le site.....	74
Figure IV–24 : la fenêtre de lancement de calcul et les résultats finaux obtenus.	75
Figure IV–25 : la fenêtre de lancement de calcul et les résultats finaux obtenus (suite).	75
Figure IV–26 : les répartitions des puissances au niveau de l'absorbeur pour le site Béchar.	76
Figure IV–27 : l'évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site de Béchar	77
Figure IV–28 : l'évolution de l'efficacité de site de Béchar	77
Figure IV–29 :La variation des températures au niveau de l'absorbeur pour le site de Béchar.....	78
Figure IV–30 :La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante	78
Figure IV–31 :Les répartitions des puissances au niveau de l'absorbeur pour le site Laghouat	79
Figure IV–32 : l'évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site de Laghouat.....	79
Figure IV–33 :La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site de Laghouat	80
Figure IV–34 :l'évolution de l'efficacité de site de Laghouat	80
Figure IV–35:la variation des températures au niveau de l'absorbeur pour le site de Laghouat.	81

Figure IV–36 : Les répartitions des puissances au niveau de l’absorbeur pour le site Ouargla.	81
Figure IV–37 : La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site d’Ouargla.	82
Figure IV–38 : l’évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site d’Ouargla.	82
Figure IV–39 : l’évolution de l’efficacité de site d’Ouargla	83
Figure IV–40 : la variation des températures au niveau de l’absorbeur pour le site d’Ouargla	83
Figure IV–41 : l’évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site de Touggourt.....	84
Figure IV–42 :les répartitions des puissances au niveau de l’absorbeur pour le site Touggourt	84
Figure IV–43 : La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site de Touggourt	85
Figure IV–44 :l’évolution de l’efficacité de site de Touggourt.....	85
Figure IV–45 :la variation des températures au niveau de l’absorbeur pour le site de Touggourt	86
Figure IV–46 :les répartitions des puissances au niveau de l’absorbeur pour le site EL Oued	86
Figure IV–47 : l’évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site d’El Oued.	87
Figure IV–48 :La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site d’El Oued.....	87
Figure IV–49 : l’évolution de l’efficacité de site d’El Oued.....	88
Figure IV–50 :la variation des températures au niveau de l’absorbeur pour le site d’El Oued.	88

Listes des tableaux

Chapitre I :

Tableau I-1 :Caractéristique principale du soleil. [2]..... 4

Tableau I-2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [22]..... 18

Chapitre II :

Tableau II-1: Les fluides caloporteurs utilisés en fonction de la température de la source
Chaude..... 30

Chapitre III:

Tableau III-1 :les caractéristiques de cycle du réfrigérant. 44

Chapitre IV:

Tableau IV-1 : Les données et les paramètres pour la réalisation de projet 55

Tableau IV-2 : Le tableau ci-dessus représente les paramètres de ces sites. 58

Tableau IV-3 :les différents paramètres du collecteur IS-LF11..... 69

Tableau IV-4 :Caractéristiques de la tuyauterie utilisé dans le champ solaire des deux Sites. 70

Tableau IV-5 :Données du champ solaire. 71

Tableau IV-6 :Propriétés du fluide l'eau évaporateur 72

Sommaire

Résumé

Remerciement

Dédicace

Listes des Nomenclatures

Listes des abréviations

Chapitre I.....	3
I.1 Différents types des énergies renouvelables :.....	3
I.2 Introduction :	3
I.3 Généralité sur le soleil :	4
I.4 Cordonnées géométriques :	4
I.4.1 La terre et son mouvement autour de soleil :	4
I.5 Coordonnées géographiques (terrestres) :	5
I.5.1 Longitude (L) :	5
I.5.2 Latitude(φ) :	6
I.5.3 L'altitude :	6
I.6 Les coordonnées horizontales :	6
I.6.1 Hauteur du soleil :	7
I.6.2 Azimut du soleil :	7
I.7 Les coordonnées horaires :	8
I.7.1 Angle horaire ω :	8
I.7.2 La déclinaison (δ) :	8
I.7.3 Angle zénithale (θ_z) :	9
I.7.4 Angle incidence :	10
I.8 Les temps solaires :	10
I.8.1 Le temps solaire moyenne :	10
I.8.2 Le temps universel :	10
I.8.3 Le temps légal	11

I.8.4	Le temps solaire vrai	11
I.9	Le rayonnement solaire :	11
I.9.1	Constante solaire :	11
I.9.2	Les composants du rayonnement solaire :	12
I.9.3	Le rayonnement direct (I) :	12
I.9.4	Le rayonnement diffus (D) :	12
I.9.5	Le rayonnement global (G) :	12
I.9.6	Rayonnement réfléchi (albédo)	12
I.10	Application de l'énergie solaire :	13
I.11	Système solaire photovoltaïque :	14
I.12	Système solaire thermique :	14
I.12.1	Système basse température :	14
I.12.2	Les équipements utilisés dans la conversion (systèmes) :	14
I.12.3	Capteur solaire plan :	14
I.12.4	Capteur solaire à tube sous vide :	15
I.12.5	Capteur solaire à air :	16
I.13	Systèmes à concentration du rayonnement solaire (CSP) :	16
I.14	Gisement solaire en Algérie :	17
I.15	Conclusion :	19
Chapitre II		20
II.1	Introduction :	20
II.2	Les centrales solaires thermodynamiques :	20
II.3	Classification des systèmes à concentration :	20
II.4	Quelques définitions	21
II.4.1	L'ouverture du concentrateur r :	21
II.4.2	La concentration ponctuelle C_r :	21
II.4.3	La concentration géométrique C	21
II.4.4	Le facteur d'interception α :	21
II.5	Différent systèmes à concentration :	22
II.6	Les concentrateurs ponctuels :	23
II.6.1	Centrale solaire à tour :	23
II.6.2	Principe de fonctionnement :	23

II.6.3	Avantage :	24
II.6.4	Inconvénients :	24
II.7	Centrales à capteurs paraboliques (Dish-Stirling) :	24
II.7.1	Principe de fonctionnement :	25
II.7.2	Avantages :	26
II.7.3	Inconvénients :	26
II.8	La concentration linéaire	26
II.8.1	Centrales à miroirs cylindro-paraboliques :	26
II.8.2	Principe de fonctionnement :	27
II.8.3	Avantage :	27
II.8.4	Inconvénient :	27
II.8.5	Centrale solaire de Fresnel :	27
II.8.6	Le principe de fonctionnement :	28
II.8.7	Avantage :	29
II.8.8	Inconvénients :	29
II.9	Les fluides caloporteurs [28] :	29
II.9.1	L'eau liquide :	29
II.9.2	Les huiles :	30
II.9.3	Les sels fondus :	30
II.9.4	Les gaz :	30
II.9.5	Les fluides organiques :	30
II.9.6	L'air :	30
II.10	Le stockage thermique dans les centrales CSP :	31
II.10.1	Introduction :	31
II.10.2	Le stockage de l'énergie par voie sensible :	32
II.10.3	Le stockage par chaleur latente :	32
II.10.4	Le stockage thermochimique :	32
II.10.5	Stockage indirect et direct :	33
II.11	Conclusion :	34
 <i>Chapitre III</i>		34
III.1	Les concentrateurs solaires linéaires de Fresnel	35
III.1.1	Introduction :	35

III.1.2	Éléments d'un concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel :	35
III.1.3	Les miroirs réflecteurs (concentrateurs) :	35
III.1.4	Le récepteur :	36
III.1.5	La surface absorbante :	37
III.1.6	Le réflecteur secondaire :	37
III.1.7	La plaque de verre :	37
III.2	Différents types des récepteurs :	38
III.2.1	Récepteur monotube sous vide :	38
III.2.2	Le récepteur multitube :	38
III.3	Les pertes optiques dans les concentrateurs linéaires de Fresnel :	39
III.3.1	Pertes dû à l'ombre des miroirs :	39
III.4	Pertes par débordement de rayon réfléchis :	40
III.5	Description du système de suivi du soleil :	40
III.5.1	Principe de fonctionnement :	41
III.6	Les différents rendements :	42
III.6.1	Le rendement optique :	42
III.6.2	Le rendement thermique :	42
III.7	: Technique de rafraîchissement de l'air.	43
III.7.1	Introduction :	43
III.7.2	Les différents types des machines frigorifiques :	43
III.8	Machine frigorifique à compression de vapeur :	44
III.8.1	Le compresseur :	45
III.8.2	Le condenseur :	45
III.8.3	Le détendeur :	45
III.8.4	L'évaporateur :	46
III.8.5	Performance d'une machine frigorifique à compression de vapeur :	46
III.8.6	Rendement d'une machine frigorifique à compression :	47
III.9	Les différents types des machines frigorifiques solaires :	47
III.9.1	Machine à adsorption :	47
III.9.2	Principe de fonctionnement :	48
III.9.3	Avantage :	49
III.9.4	Inconvénients :	49
III.10	Les machines frigorifiques à absorption :	50

III.10.1	Principe de fonctionnement :.....	51
III.11	Bilan énergétique d'une machine frigorifique du mélange NH ₃ -H ₂ O-H ₂ :	52
III.11.1	Bilan énergétique dans le bouilleur :.....	53
III.11.2	Bilan énergétique dans le condenseur :	53
III.11.3	Bilan énergétique dans l'évaporateur :.....	53
III.11.4	Bilan énergétique dans l'absorbeur :	53
III.11.5	Coefficient de performance COP de la machine :	54
III.12	Conclusion :	54
<u>ChapitreIV.</u>		53
IV.1	Introduction :.....	54
IV.2	Présentation du projet :	54
IV.3	Description des sites :	56
IV.4	Outil de modélisation :.....	59
IV.4.1	Présentation du logiciel METEONORM	59
IV.4.2	Présentation du logiciel GREENIUS :	60
IV.4.3	Assistant (Wizard) :.....	61
IV.5	Les étapes à suivre pour la simulation de projet :.....	62
IV.5.1	Création d'un nouveau projet :.....	64
IV.5.2	Écran Principal :	66
	67
IV.6	Dimensionnement de la mini-centrale :	68
IV.6.1	Collecteur :	68
IV.6.2	Champ solaire :.....	70
IV.6.3	Fluide de transfert.....	72
IV.7	Résultats et interprétation :	76
V.Conclusion Générale :		92

Référence

Introduction générale

De nos jours, la conservation des ressources énergétiques est devenue une priorité à l'échelle planétaire. D'autre part, vue l'épuisement des combustibles fossiles ainsi que la pollution atmosphérique et le réchauffement global de la terre dû aux gaz à effet de serre, les spécialistes ont optés pour la recherche de nouvelles source énergétiques, telles que les énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse et géothermie, etc.)

Dans l'optique de la production d'électricité, la production de froid, au le chauffage, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale. Ces technologies se basent sur deux types de concentration, linéaire (concentrateur Fresnel et (cylindro-parabolique) et ponctuelle (centrale à tour et le Dish Stirling). Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés, L'Algérie est parmi les pays les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies, car elle bénéficie d'un gisement solaire important ; l'irradiation directe totale annuelle est de 2100 kWh /m².an [3] avec une durée d'ensoleillement de plus de 3500 heures par an.

La production du froid par un concentrateur solaire linéaire de Fresnel couplés avec une machine frigorifique à absorption est plus en plus intéressante, les performances de ces derniers et leur bonne productibilité demandent encore à être étudiées.

Notre travail consiste à étudier et dimensionner le comportement de notre système sous climat Algérien. En comparant et interprétant les résultats obtenus à l'aide de logiciel Greenius et Meeteonorm. Pour cela nous avons établi le plan de travail suivant :

Chapitre 1 : présente les différents types des énergies renouvelables et leurs applications, quelques généralités sur le gisement et potentiel solaire, le rayonnement solaire et ses modèles d'estimation et les applications de l'énergie solaire.

Chapitre 2 : est consacré aux centrales solaires thermodynamiques, où sont décrites les technologies existantes dans la filière du solaire à concentration.

Chapitre 3 : est consacré à l'étude bibliographique et l'état de l'art des concentrateurs linéaires de Fresnel et l'état de l'Art des machines frigorifiques.

Introduction générale

La modélisation optique et thermique fait l'objet du chapitre 4, où sont donnés les différents modèles utilisés lors de la détermination des diverses performances de la centrale, puis la méthodologie suivie lors de couplage de notre concentrateur avec notre machine à absorption est donnée, et enfin les résultats de la simulation sur différents sites Algérien sont présentés. Enfin, on termine par une conclusion générale regroupant les conclusions sur les différents chapitres, clôturés par quelques recommandations afin d'enrichir ce travail dans le futur.

Chapitre I

Gisement solaire

Différents types des énergies renouvelables :

Une énergie est dite renouvelable, lorsque le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future, c'est une énergie propre, inépuisable et durable dans le temps. Ce sont des énergies inépuisables, fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes.

Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel.

L'organigramme suivants illustre les différents types des énergies renouvelables.

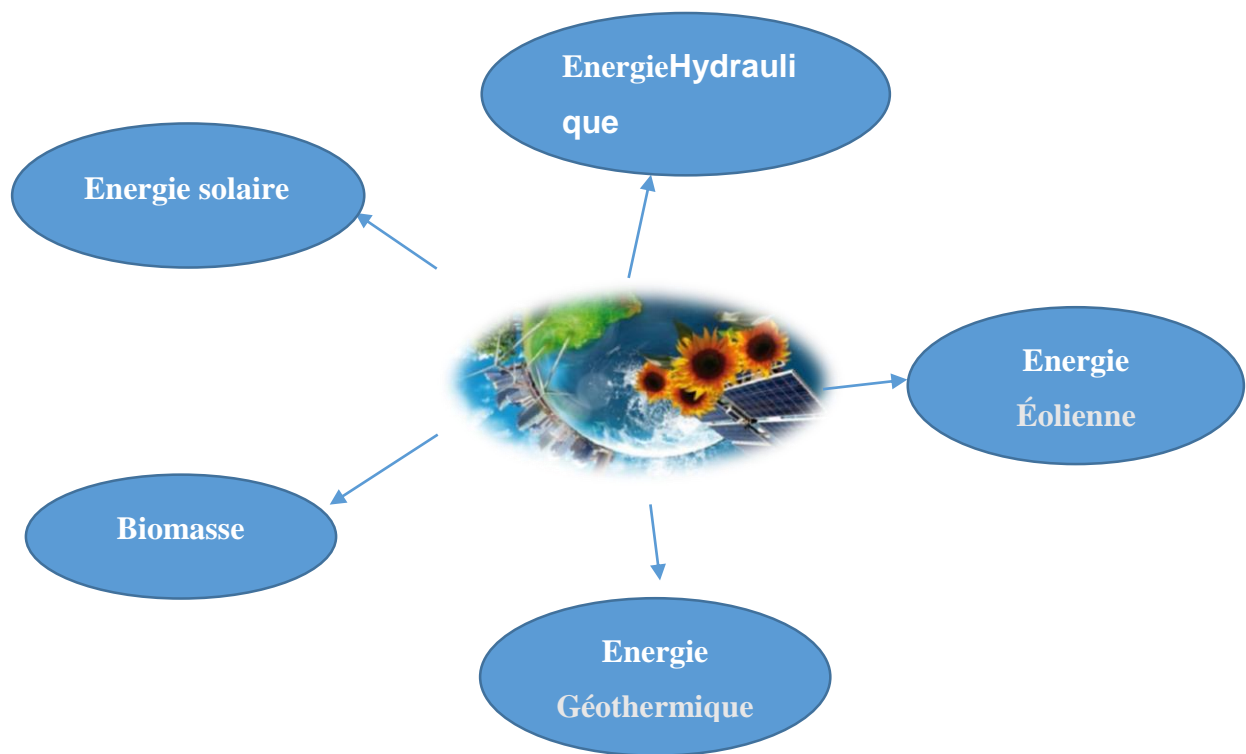


Figure I-1 : Différents type des énergies renouvelables.

Introduction :

L'énergie solaire est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse.

Alors dans ce chapitre il est nécessaire de présenter quelque notion sur les gisements et potentiel solaires.

Généralité sur le soleil :

Le soleil est une étoile dont l'énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en se transformant en hélium, C'est l'étoile la plus proche de la terre avec une distance de 150 millions de kilomètres Agé de 5 milliards d'années, est tourne lentement autour du centre galactique en 240 millions d'années. On trouve quelques généralités sont présentées dans le tableau suivant [1] :

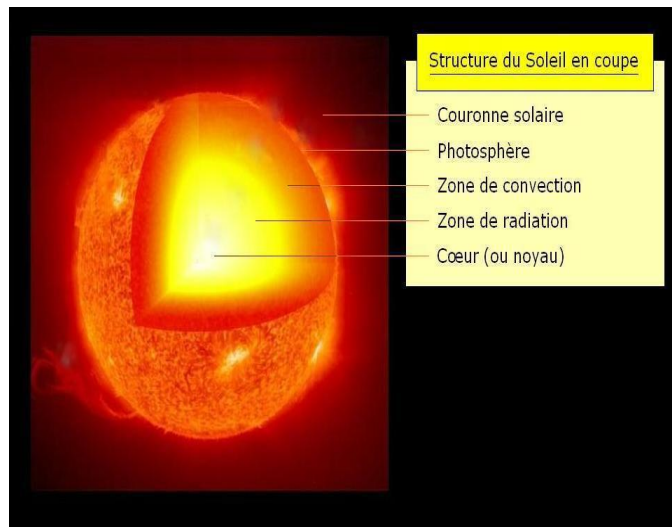


Figure I-2 : Structure du soleil [2]

Tableau I-1 :Caractéristique principale du soleil. [2]

Diamètre (km)	Masse (kg)	Surface (km ²)	Volume (km ³)	Masse volumique moyenne (kg/m ³)	Vitesse (km/s)	Distance du centre de la voie lactée (km)
14×10 ⁵	2×10 ³⁰	6.09×10 ¹²	1.41×10 ¹⁸	1408	217	2.5×10 ⁴⁷

Cordonnées géométriques :

I.1.1 La terre et son mouvement autour de soleil :

La terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Sa superficie est de 510101.103Km², son volume est égal à 1083320.106 Km³, sa masse est 6.1021 tonnes et sa densité Moyenne est de 5.52. La terre décrit autour du soleil une ellipse presque circulaire. Ces est Située dans un plan appelé écliptique. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe

des pôles. L'axe qui passe par le centre de la terre et qui est perpendiculaire à l'axe des pôles est appelé l'équateur [3].

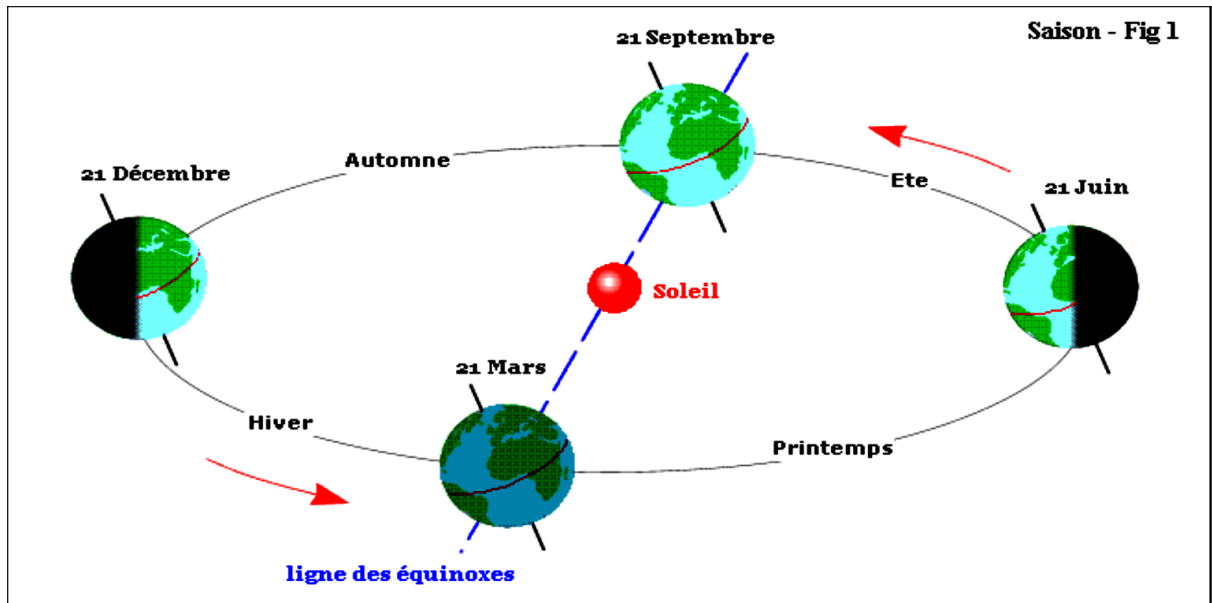


Figure I-3:Schéma représentant le mouvement de la terre autour du soleil [4].

L'énergie solaire est également réduite :

- Par l'alternance des jours et des nuits.
- Par la couverture nuageuse.
- Par la variation saisonnière

Coordonnées géographiques (terrestres) :

Tous les points sur la surface de la terre peuvent être repérés par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, à savoir : la latitude φ et la longitude L [5], [6].

I.1.2 Longitude (L) :

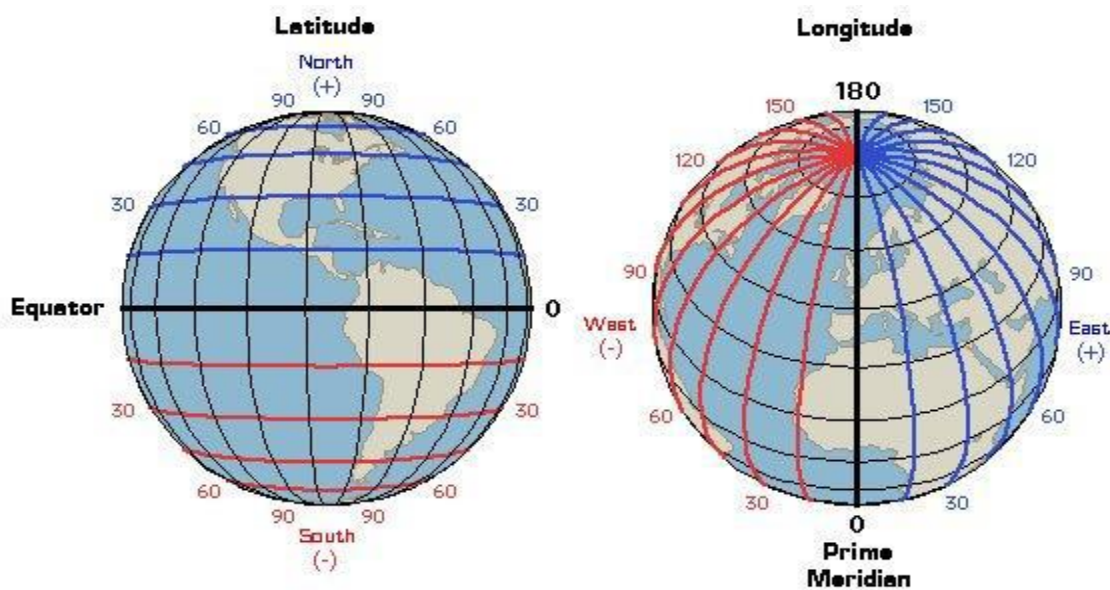
C'est l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich en Angleterre), positive à l'Est (0 à +180°) et négative à l'Ouest (0 à -180°).

I.1.3 Latitude(φ) :

Elle permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle est exprimée en degré et varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord. Et négativement de 0 à -90° vers le sud.

I.1.4 L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer=0). En mètre



Les coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur du soleil, 'h' et l'azimut 'a' [7].

Les coordonnées horaires :

I.1.7 Angle horaire ω :

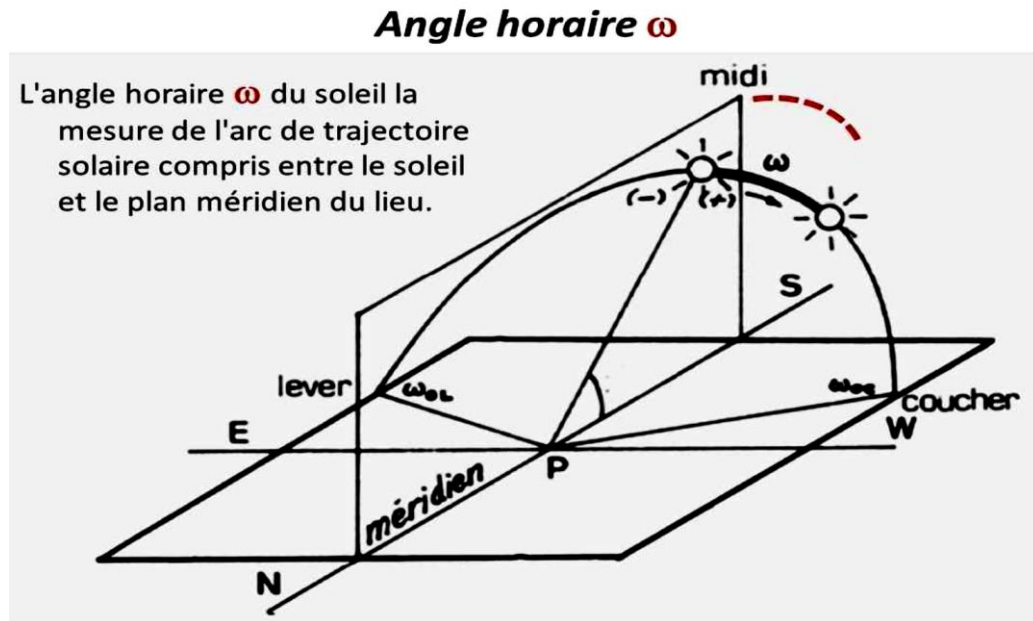


Figure I-6 : Les coordonnées horaires

Elle est donnée par :

$$\omega = 150 \times (TSV - 12) \dots \dots \dots (I-5) [10].$$

Avec TSV est le temps solaire vrai exprimé en heure [8].

I.1.8 La déclinaison (δ) :

La déclinaison solaire δ est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie en fonction des saisons de $-23,45^\circ$ à $+23,45^\circ$.

Equinoxe de printemps : 21 Mars $\delta = 0^\circ$

Solstice d'été : 22 Juin $\delta = +23,45^\circ$

Equinoxe d'automne : 23 Septembre $\delta = 0^\circ$

Solstice d'hiver : 22 Décembre $\delta = -23,45^\circ$

δ prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par les relations suivantes :

$$\delta = 23,45 \times \left(\frac{360}{365} \times (n - 81) \right) \dots \dots \dots (I-6)$$

N : numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier [11].

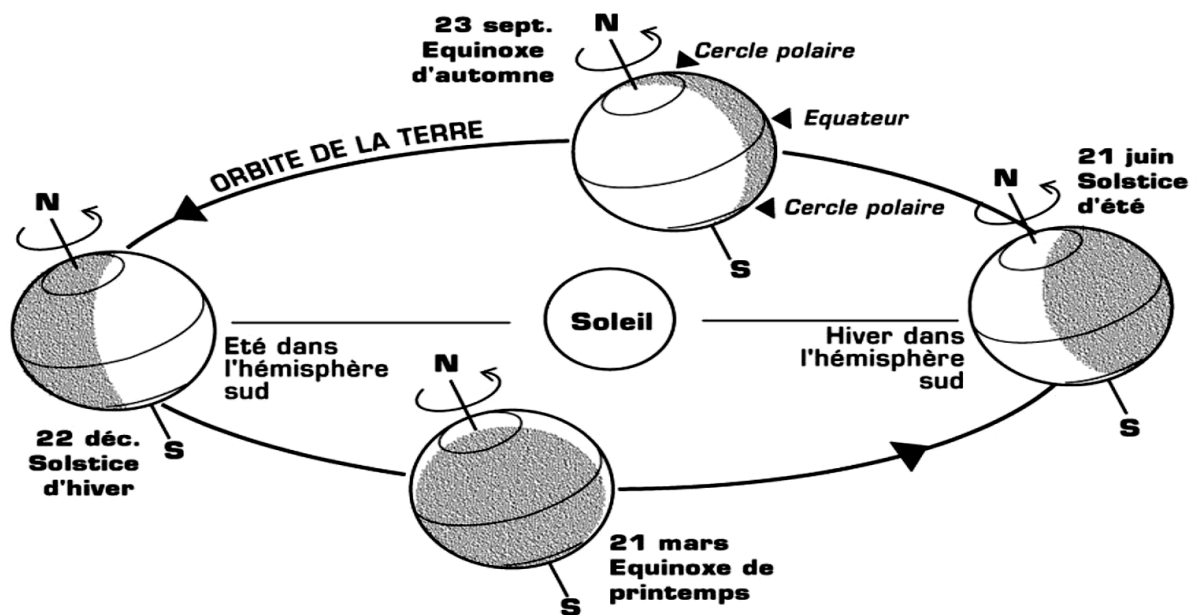


Figure I-7 :Mouvement de la Terre autour du soleil [12].

I.1.9 Angle zénithale (θ_z) :

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de 0 à 90°. Cet angle est donné par la relation ci-dessous :

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\varphi) + \sin(\delta)\sin(\varphi) \quad [13].$$

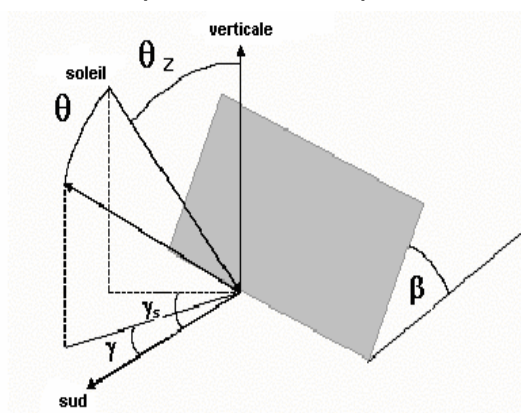


Figure I-8 :Position du soleil par rapport à une surface inclinée : angle d'incidence et angle zénithal [13].

I.1.10 Angle incidence :

L'angle d'incidence i , c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan.



Figure I-9:Angle d'incidence [9].

Les temps solaires :

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui est calculé en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local. [13].

I.1.11 Le temps solaire moyenne :

La rotation de la terre autour d'elle-même introduit la notion du temps solaire moyen ou TSM. On le définit comme étant le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs par le méridien du lieu, une rotation complète de la terre autour d'elle-même prend 24 heures.

I.1.12 Le temps universel :

Le temps universel (TU) est défini par l'heure du passage du soleil au méridien origine. Le méridien retenu comme origine et celui de Greenwich et le TSM correspond au temps universel (c'est le TSM à la longitude 0°). La différence entre le temps solaire moyen et le temps universel est appelée correction de longitude, le temps universel est lié au temps solaire moyen (local) par la relation :

$$TU = TSM \pm \frac{L}{15} \dots \dots \dots (I-8).$$

L : longitude du lieu, (+) pour longitude Est, (-) pour longitude Ouest.

I.1.13 Le temps légal

Le temps légal (ou local) est le temps officiel de l'Etat, il diffère par rapport au temps mondial de Greenwich par un décalage exprimé en heures.

$$TL=TU+C.....(I-9).$$

C étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

(C=1 heure pour l'Algérie).

I.1.14 Le temps solaire vrai

C'est le temps mis par le soleil entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu (direction Nord-Sud). Le temps solaire vrai et le temps solaire moyen diffèrent. Cette différence est appelée équation du temps, elle varie en fonction du jour :

$$TSV = TSM+ E_t.....(I-10)$$

E_t est l'équation de temps

Le rayonnement solaire :**I.1.15 Constante solaire :**

On appelle la constante solaire noté C, la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre. Où : C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère Terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire. Cette valeur déterminée à partir des mesures réalisées à l'aide des satellites. La valeur moyenne annuelle est 1367 W/m². Cette valeur est en fonction de la distance Terre - Soleil, qui varie quelque peu au cours de l'année [14].

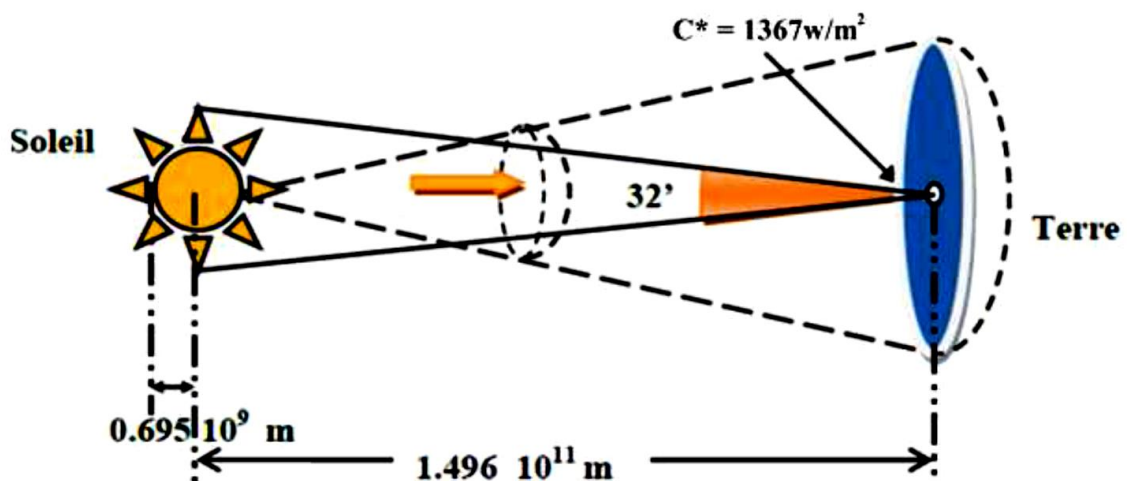


Figure I-10 : Constante solaire [14].

I.1.16 Les composants du rayonnement solaire :

C'est l'énergie reçue pendant une certaine durée. On distingue plusieurs composantes qui sont principalement [15]:

I.1.17 Le rayonnement direct (I) :

C'est le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux.

I.1.18 Le rayonnement diffus (D) :

C'est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols,). Il n'a pas de direction privilégiée.

I.1.19 Le rayonnement global (G) :

C'est la somme des rayonnements direct et diffus.

I.1.20 Rayonnement réfléchi (albédo)

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

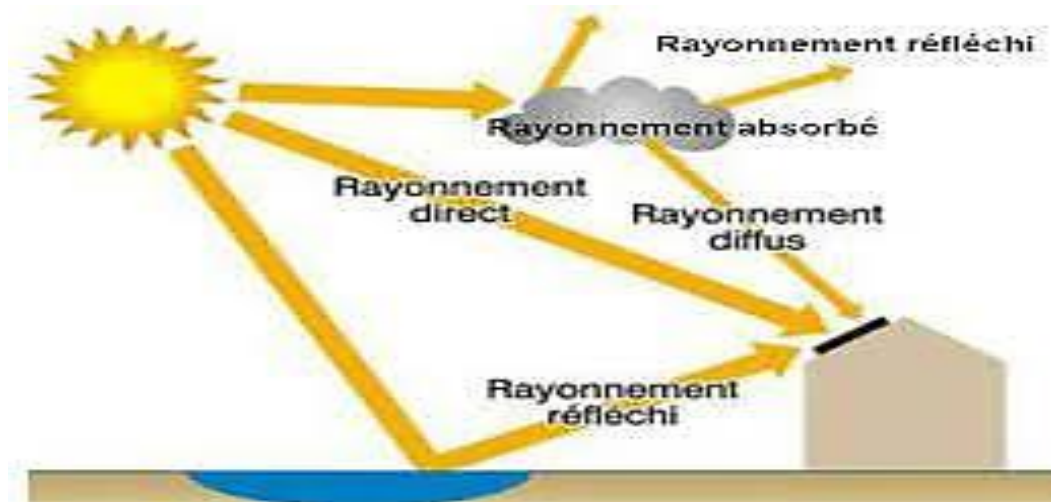


Figure I-11 : Composantes du rayonnement solaire : extraterrestre, global = direct + diffus + albédo [15].

Application de l'énergie solaire :

Dans le domaine de l'énergie solaire, on distingue plusieurs filières à savoir, le solaire Thermique et le solaire photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement de ces filières diffère d'une technologie à une autre. Dans chaque filière on utilise des composants bien appropriés.

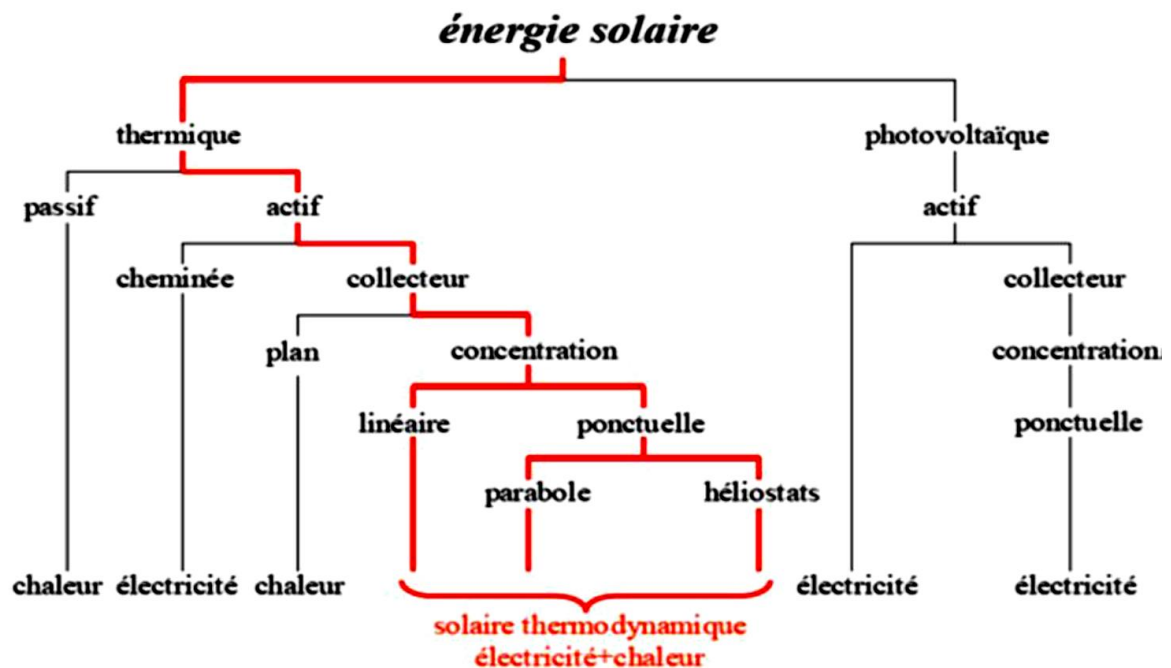


Figure I-12 : Différentes formes de conversion de l'énergie solaire [16].

Systeme solaire photovoltaïque :

Des modules solaires produisent de l'électricité à partir de la lumière du soleil. Ils alimentent des sites Isolés ou le réseau de distribution général. L'intégration à l'architecture est l'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés.

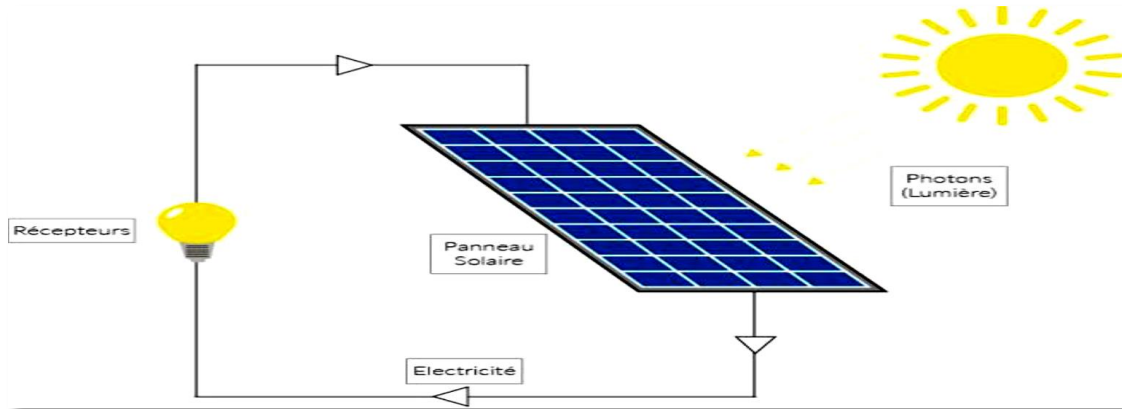


Figure I-13 : Fonctionnement d'un panneau solaire PV [17].

Systeme solaire thermique :

La conversion thermique du rayonnement solaire se fait par l'intermédiaire des capteurs solaires. On distingue deux systèmes : basse température et haute température (CSP).

I.1.21 Système basse température :

Des capteurs solaires absorbent les rayons du soleil qui transmettent leur énergie à un fluide (eau ou air), afin d'être utilisée pour un besoin spécifique comme le chauffage,

La production d'eau chaude sanitaire, et la climatisation solaire utilisée pour la production du froid.

I.1.22 Les équipements utilisés dans la conversion (systèmes) :

I.1.23 Capteur solaire plan :

Un capteur solaire plan est composé d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant (l'absorbeur), et d'un système de transfert de chaleur par le fluide « caloporteur », d'une isolation thermique arrière et latérale, une couverture transparente qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en le protégeant du vent.

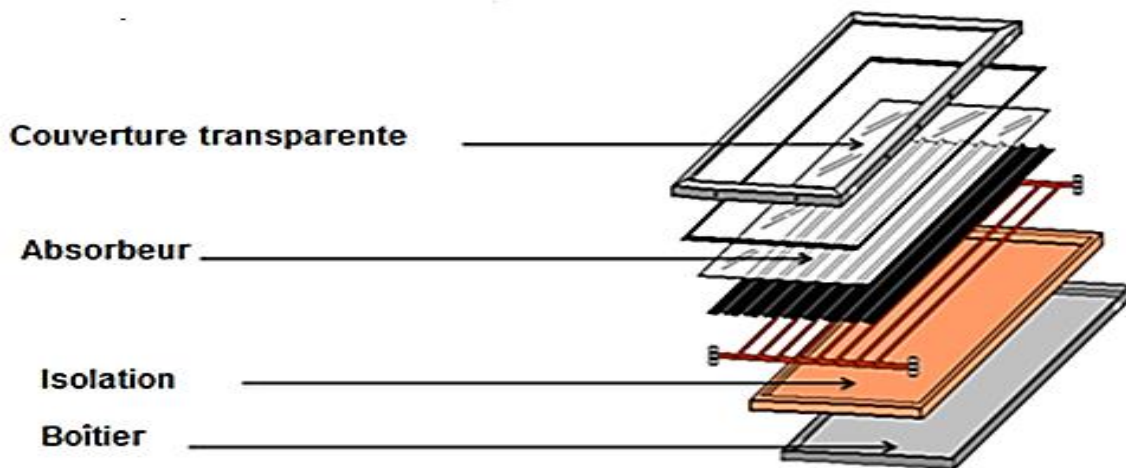


Figure I-14 : Constituant d'un capteur solaire plan [18].

I.1.24 Capteur solaire à tube sous vide :

Un capteur solaire « sous vide » est composé d'une série de tubes transparents en verre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et à l'intérieur de ces tubes un fluide caloporteur circule (l'eau) qui est chauffé par le Rayonnement absorbé. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les pertes thermiques convectives de l'absorbeur, et pour augmenter le rendement.

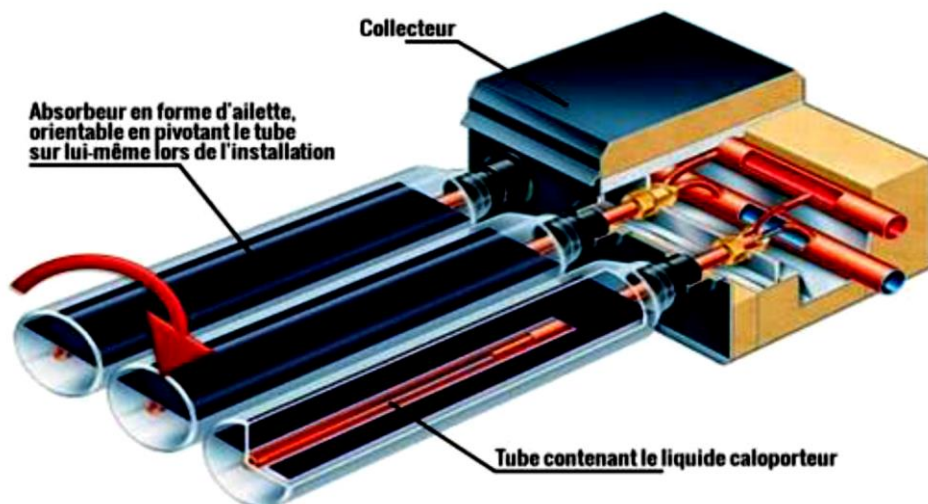


Figure I-15 : Capteur solaire à tubes sous vide [19].

I.1.25 Capteur solaire à air :

L'utilisation des capteurs solaires à air pour le chauffage et le séchage de différents produits (riz, tabac fèves, café, the ...etc.), reste le secteur le plus promettant vu qu'il est facile d'obtenir les températures nécessaires. Il permet aussi d'encourager les petites entreprises et les fabrications artisanales (vu que le coût des panneaux est abordable et la facilité de son installation).



Figure I-16 :Capteur solaire à air.

Systèmes à concentration du rayonnement solaire (CSP) :

Le système CSP (Concentrated Solar Power) désigne L'ensemble des technologies solaire thermodynamiques visent à transformer l'énergie des rayons solaires en énergie thermique (chaleur a température élevée), qui est ensuite utilisée pour produire une énergie mécanique puis électrique à travers un cycle thermodynamique couplé à une génératrice électrique.

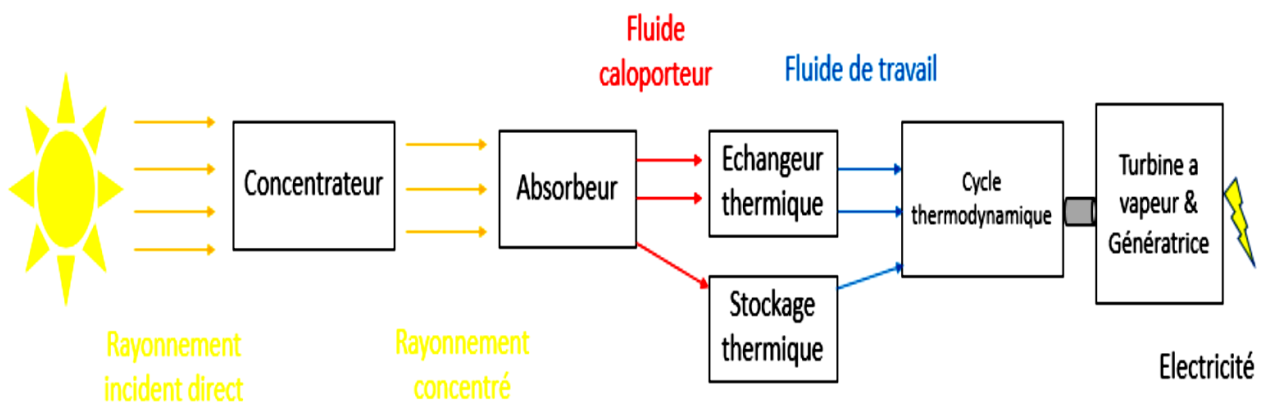


Figure I-17 :Schéma du Principe de fonctionnement d'une centrale CSP [20].

Il existe deux types de systèmes à concentration :

- Les systèmes de concentration linéaire : les concentrateurs cylindre-parabolique Les concentrateurs linéaires de Fresnel.
- Les systèmes de concentration ponctuels : les centrales solaires à tour et le Parabole-Stirling.

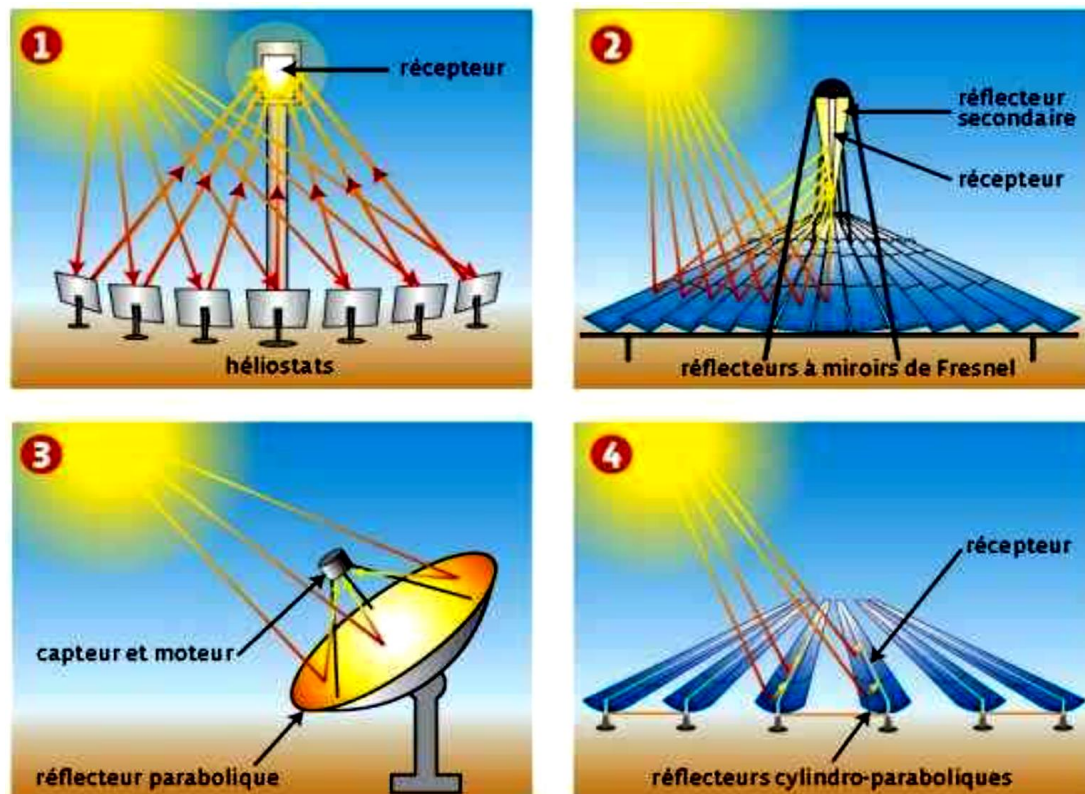


Figure I-18: Différents types des concentrateurs solaires.

Gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour évaluer le fonctionnement d'une installation énergétique solaire et vérifier la demande à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la Figure 0-19.

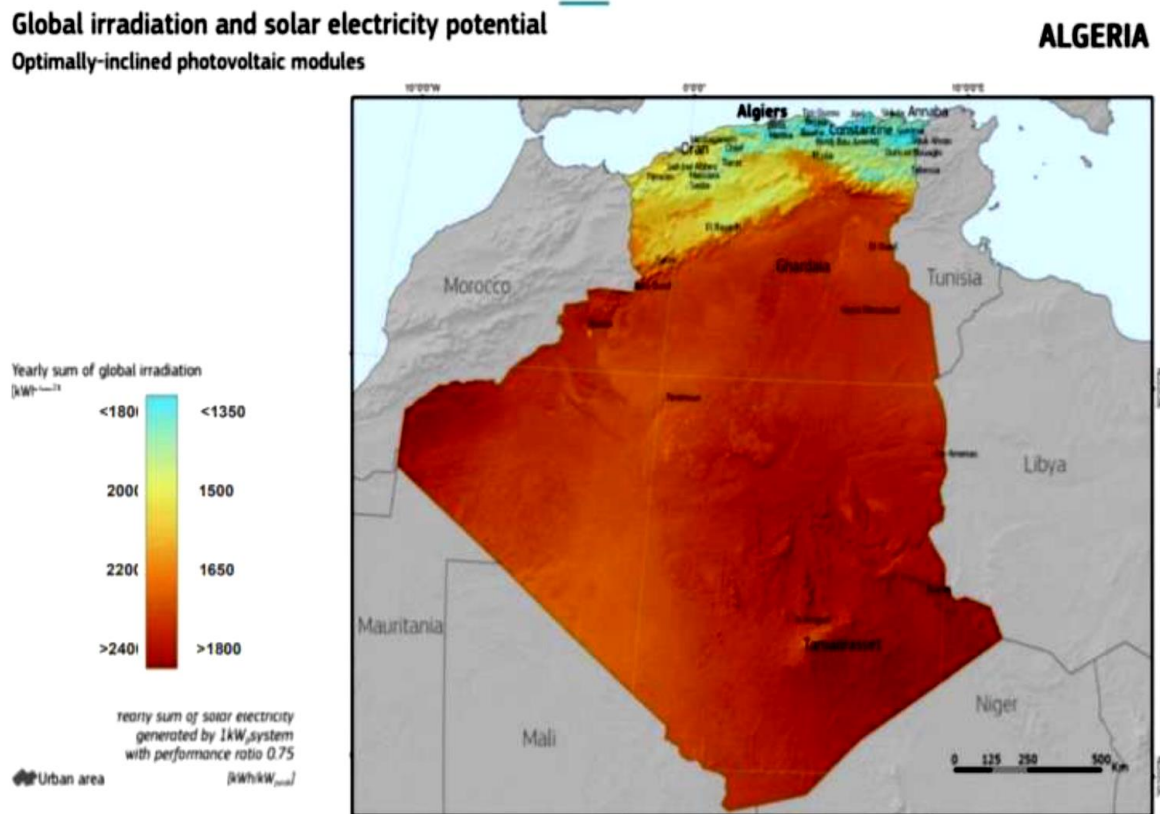


Figure I-19 :Gisement solaire en Algérie [21].

De par sa situation géographique, l’Algérie dispose d’un des gisements solaires les plus élevés au Monde.

La durée d’insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement Et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

Tableau I-2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [22].

Régions	Régions côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d’ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kWh/m ² .an)	1700	1900	2650

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'introduire les notions de base nécessaires pour l'étude du gisement solaire. Nous y avons abordé les différents paramètres astronomiques et Géographiques ainsi que les caractéristiques du rayonnement solaire. Il nous a permis Aussi de définir les diverses applications de l'énergie solaire à savoir : basses températures et CSP. Dans le deuxième chapitre nous avons détailler les centrales Solaires thermodynamiques (CSP).

Chapitre II

*Les centrales solaires à
concentration (CSP)*

II.1. Introduction :

Le processus de production d'une centrale CSP est similaire à celui des centrales thermiques classiques dont la seule différence c'est que la chaleur ne provient pas du charbon, du gaz ou du combustible, mais plutôt du soleil. Des réflecteurs ou des miroirs sont utilisés pour réfléchir et concentrer les rayons du soleil sur un tube absorbeur appelé récepteur solaire. La concentration de l'énergie solaire sur le récepteur génère de la chaleur à haute température. Un fluide caloporteur (HTF) circule dans ce tube pour absorber l'énergie thermique augmentant ainsi sa température. Le caloporteur est ensuite utilisé pour alimenter directement un cycle thermodynamique ou indirectement en circulant dans des réservoirs de stockage. Ensuite générée pour la production à travers un cycle thermodynamique.

II.2. Les centrales solaires thermodynamiques :

Le solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels.

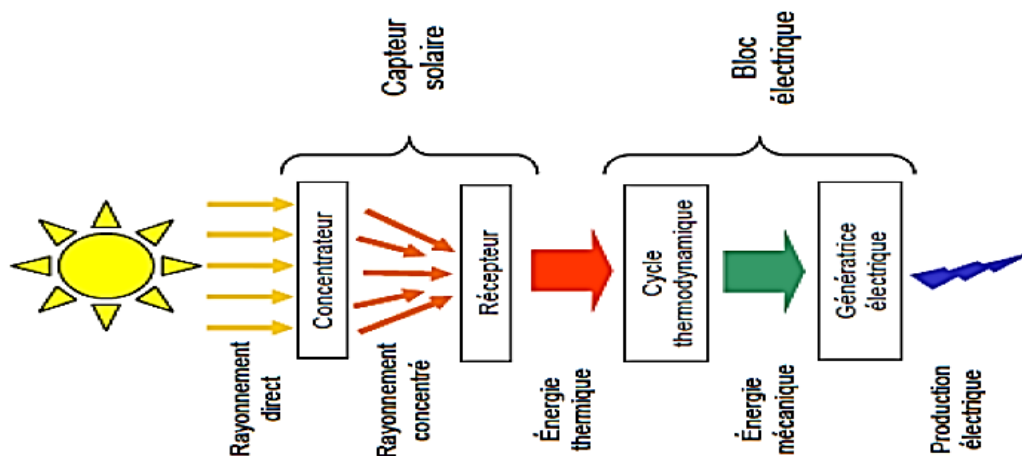


Figure II-1: la base de fonctionnement des centrales solaire thermodynamique [22].

II.3. Classification des systèmes à concentration :

- Les caractéristiques optiques :
 1. A miroirs
 2. A lentilles

- Les caractéristiques géométriques :

1. A une dimension.
2. A deux dimensions.
3. A trois dimensions.

➤ Mode de pointage :

1. Fixes ou périodiquement orientés.
2. Mobiles autour d'un axe.
3. Mobile autour de deux axes.

➤ Concentration :

1. Faibles concentrations $C = 1$ à 10 .
2. Moyennes concentrations $C = 10$ à 100 .
3. Fortes concentrations $C > 100$.

II.4. Quelques définitions

II.4.1. L'ouverture du concentrateur r :

L'ouverture est la surface plane à travers laquelle passe le rayonnement incident.

II.4.2. La concentration ponctuelle C_r :

La concentration ponctuelle est le rapport de l'éclairement moyen sur la surface de l'absorbeur \bar{E}_a à l'éclairement à l'ouverture \bar{E}_r .

$$C_r = \frac{E_a}{E_r}$$

II.4.3. La concentration géométrique C

La concentration géométrique est le rapport entre la surface d'ouverture A_r à celle de l'absorbeur A_a

$$C = \frac{A_r}{A_a}$$

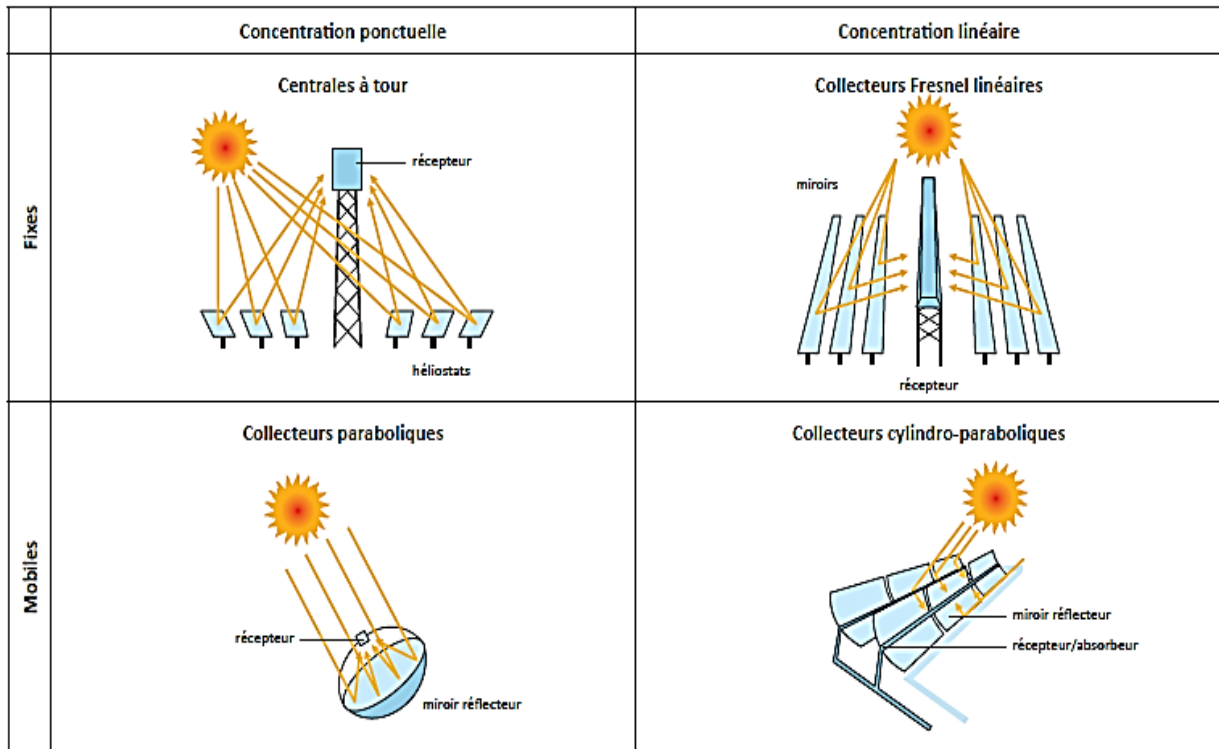
II.4.4. Le facteur d'interception α :

Le facteur d'interception est le rapport entre la puissance absorbée P_a et la puissance incidente P_i sur un récepteur.

$$\alpha = \frac{P_a}{P_i}$$

II.5. Différent systèmes à concentration :

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchié par le miroir et la transfère au fluide caloporteur. Les systèmes à concentration linéaires ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels.



source : AIE

Figure II–2 : Les systèmes de concentration de l'énergie solaire [23]

II.6. Les concentrateurs ponctuels :

II.6.1. Centrale solaire à tour :

Dans ce type de centrales, des miroirs concentrent le rayonnement solaire sur une chaudière placée en haut d'une tour. Ces derniers sont appelés aussi « héliostats » qui sont conçus pour tourner avec le Soleil et ainsi, réfléchir ses rayons sur le foyer de la chaudière. Le rayonnement solaire doit être dirigé vers le foyer en haut de la tour avec une grande précision afin de concentrer le rayonnement solaire qui va être transformé en énergie pour atteindre des températures près de 600°C. [24]



Figure II-3 :centrale solaire à tour (Californie) [25].

II.6.2. Principe de fonctionnement :

Cœur du dispositif, la tour est alimentée par des centaines d'héliostats disposés au sol, ici concentriquement. Les miroirs pointent le rayonnement solaire sur le capteur placé au sommet où circule le fluide caloporteur. Selon un principe commun à tous les systèmes de centrales thermodynamiques, le fluide transfère son énergie à un circuit d'eau qui crée la vapeur permettant d'actionner la turbine.

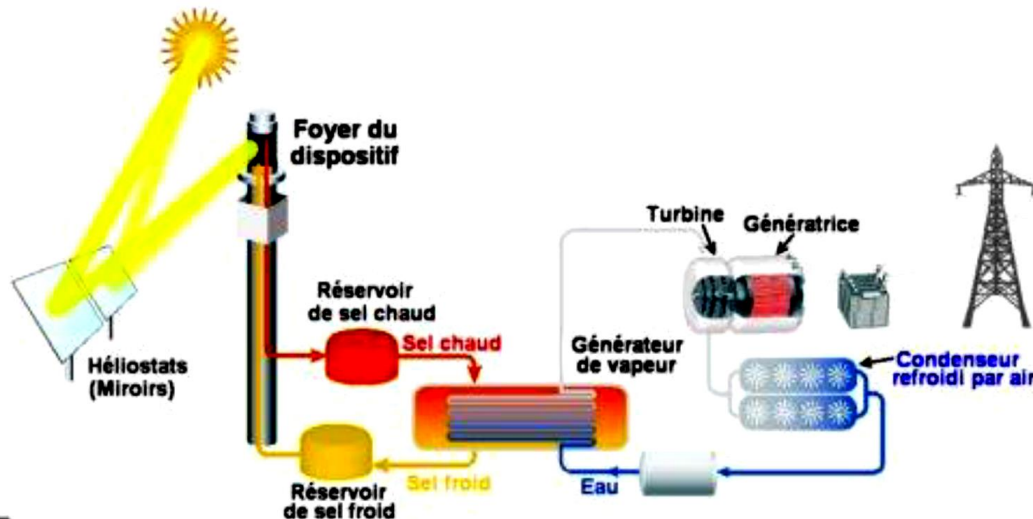


Figure II-4: principe de fonctionnement d'une centrale a tour.

II.6.3. Avantage :

- Source d'énergie inépuisable.
- Pas d'émission polluante.
- Permet de valoriser des zones désertiques

II.6.4. Inconvénients :

- Nécessite un fort ensoleillement.
- Ces centrales ont besoin d'un espace vaste et une surface au sol importante

II.7. Centrales à capteurs paraboliques (Dish-Stirling) :

Ce type de centrale utilise des capteurs paraboliques, on trouve que ces capteurs suivent le soleil sur deux axes afin de concentrer et de réfléchir les rayons du soleil sur un foyer en son point focal afin d'actionner un moteur dit « moteur Stirling ». Une fois chauffé dans un circuit fermé, le gaz qu'il contient actionne un piston qui récupère l'énergie mécanique produite.

Ce genre des centrales peuvent atteindre jusqu'à 1000 °C sur le récepteur, ainsi des rendements dépassant ceux des autres technologies thermo solaire. [25].

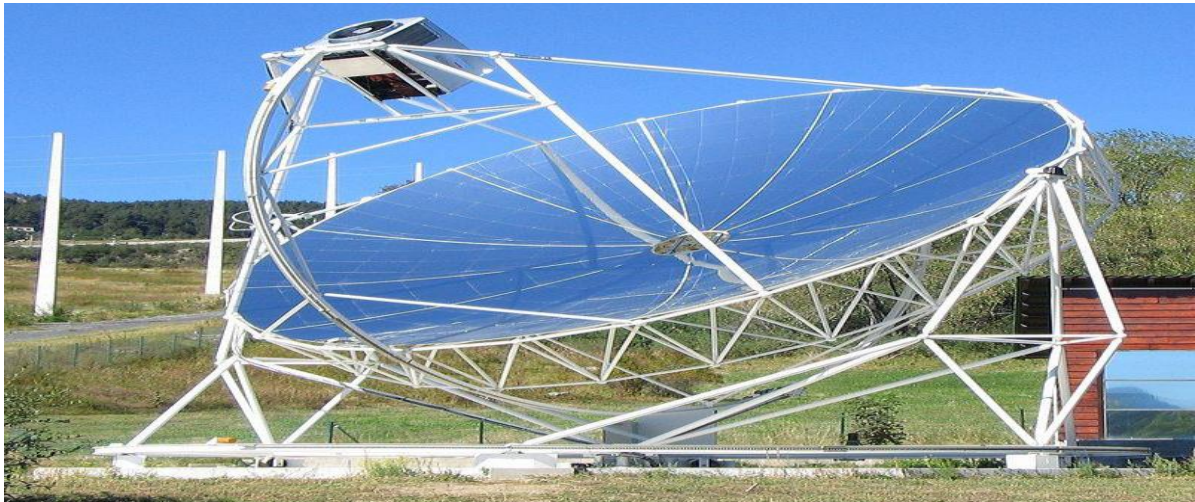


Figure II-5 : Centrale solaire parabolique (projet DISH-STIRLING à Font-Romeu-Odeillo) [26].

II.7.1. Principe de fonctionnement :

Le miroir parabolique réfléchit les rayons du soleil vers un point de convergence, le rayonnement solaire est concentré sur le récepteur qui monte en température. Le récepteur en question est un moteur Stirling qui fonctionne grâce à la montée en température et en pression d'un gaz contenu dans une enceinte fermée. Ce moteur convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique et ensuite en électricité. Tout au long de la journée, le socle de la parabole s'oriente automatiquement face au soleil pour suivre sa course et ainsi profiter d'un ensoleillement maximum.

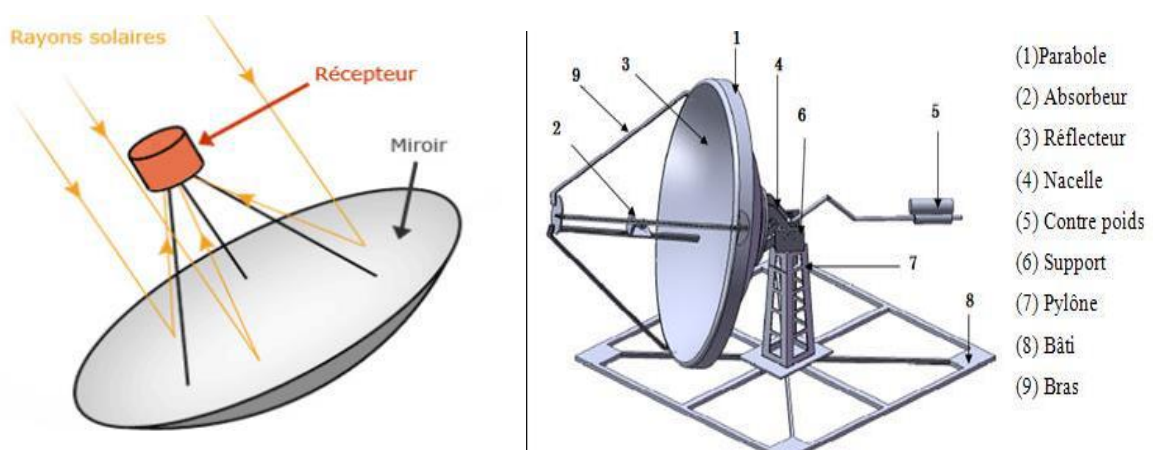


Figure II-6 : Principe de fonctionnement d'un capteur à miroirs paraboliques.

II.7.2. Avantages :

- Source d'énergie inépuisable et gratuite.
- Pas d'émissions polluantes.
- Bon rendement.
- Petites unités indépendantes.

I.7.1 Inconvénients :

- Fonctionnement par intermittences.

II.8. La concentration linéaire**II.8.1. Centrales à miroirs cylindro-paraboliques :**

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du Soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers le bloc de puissance ou un échangeur de chaleur. la température du fluide peut atteindre 500° C., la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité [27].



Figure II-7 :Centrale solaire cylindro-parabolique.

II.8.2. Principe de fonctionnement :

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, orientés sur l'axe nord-sud qui tournent autour de ce dernier pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers des échangeurs de chaleur. La température du fluide peut monter jusqu'à 400°C ou plus. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne des turbines qui produisent de l'électricité. Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente à base d'une réaction réversible.

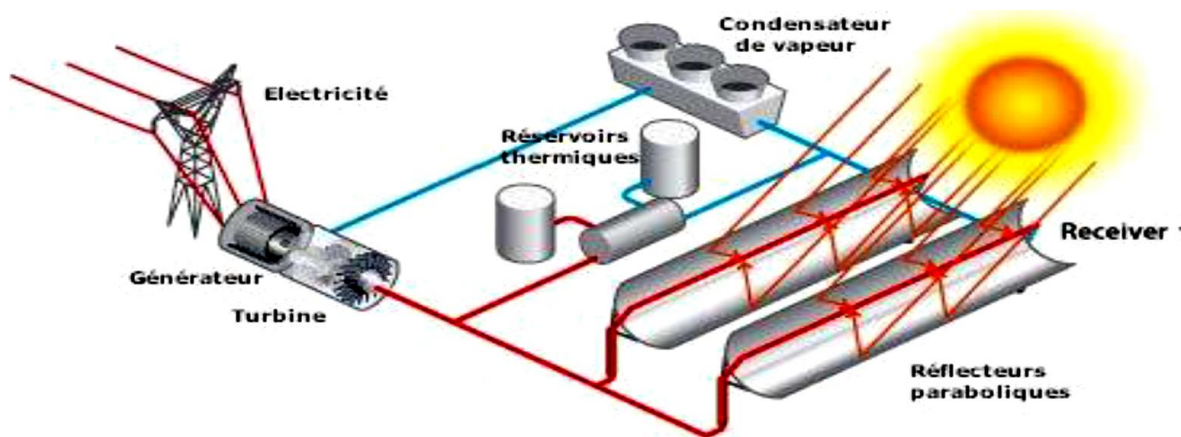


Figure II–8:Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale cylindro-parabolique.

II.8.3. Avantage :

- Source d'énergie inépuisable et gratuite.
- Pas d'émission polluante.
- Peu fonctionner sans intermittence grâce à un système de stockage thermique.

II.8.4. Inconvénient :

- Nécessite un fort ensoleillement et une zone chaude.
- Surface au sol importante.

II.8.5. Centrale solaire de Fresnel :

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.

C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide caloporteur peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500°C. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. [28]. [29].



Figure II-9 : Centrale solaire a miroirs de Fresnel.

II.8.6. Le principe de fonctionnement :

Ce type de capteur à concentration repose sur un système de miroirs plans dont l'orientation de chacun de ces miroirs vers un récepteur en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayonnements solaires directs vers un ou deux tubes absorbeurs fixes ou mobiles.

L'énergie solaire concentrée sert à chauffer un fluide caloporteur circulant dans un tube horizontal ou la température de travail peut atteindre 500°C, ensuite grâce à un cycle de Rankine nous pouvons produire de l'électricité ou l'utiliser directement dans divers procédés tels que le chauffage et le séchage. Un fluide caloporteur généralement l'eau est chauffée entre 200 et 500°C en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie thermique est transférée à un autre circuit par des échangeurs pour produire de la vapeur, ce dernier sert à fonctionner une turbine qui produit de l'électricité.

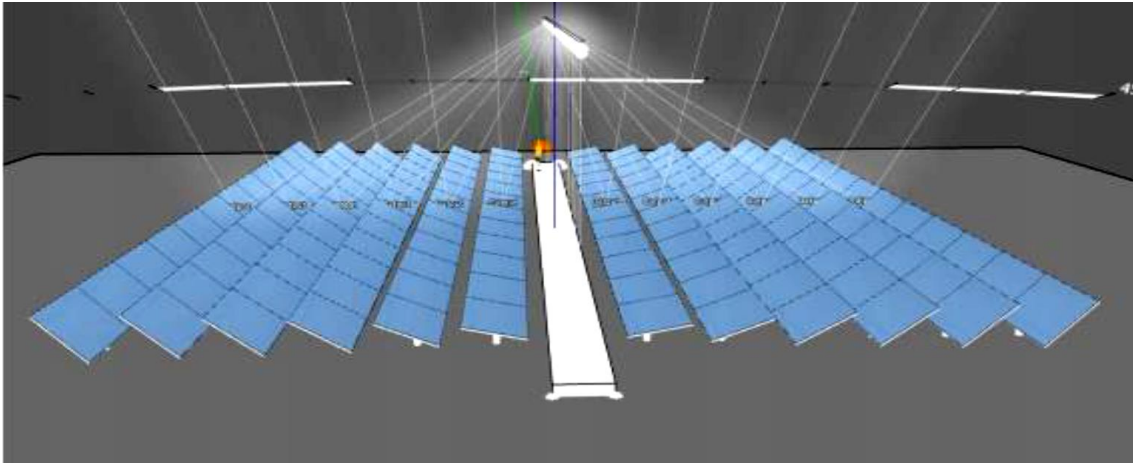


Figure II–10 :Principe de fonctionnement Centrale solaire à collecteur linéaire de Fresnel.

II.8.7. Avantage :

- Les miroirs plans sont plus simples à fabriquer et meilleur marché que les capteurs paraboliques et cylindro-paraboliques.
- Les contraintes mécaniques imposées par la poussée du vent sont réduites grâce à la disposition plane des miroirs, infrastructure moins importante.

II.8.8. Inconvénients :

- Performances optiques inférieures d'environ 30% par rapport aux réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques.

II.9. Les fluides caloporteurs [28] :

L'énergie thermique provenant du rayonnement solaire collecté et convertie grâce à un fluide caloporteur puis un fluide thermodynamique. Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et conditionne la possibilité et la commodité du stockage.

II.9.1. L'eau liquide :

Est un fluide de transfert idéal. Elle offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. En outre, elle peut être utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Cependant son utilisation implique de travailler à

des pressions très élevées dans les récepteurs en raison des hautes températures atteintes, ce qui pose problème pour les technologies cylindro-paraboliques.

II.9.2. Les huiles :

Sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à environ 400°C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

II.9.3. Les sels fondus :

À base de nitrates de sodium et de potassium offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée. Ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de sortie peut atteindre 650°C. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà éprouvée.

II.9.4. Les gaz :

Tels l'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.

II.9.5. Les fluides organiques :

(Butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique.

II.9.6. L'air :

Peut être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique dans les turbines à gaz.

Tableau II-3 : Les fluides caloporteurs utilisés en fonction de la température de la source Chaude.

Température de la source chaude	De 150 à 500	De 250 à 550	De 500 à 1000 et plus	De 500 à 1000 et plus
Capteur	Fresnel	Cylindro-parabolique	Parabolique	À tour
Fluide caloporteur utilisé	Les huiles de synthèses, sels fondus, vapeur d'eau	Les huiles de synthèses, sels fondus, vapeur d'eau, air	Air, vapeur d'eau, sels fondus	Air, vapeur d'eau, sels fondus

II.10. Le stockage thermique dans les centrales CSP :

II.10.1. Introduction :

La nature de l'énergie solaire impose certaines limitations aux procédés solaires concentrés : l'intermittence (nuit, soleil occulté par les nuages) et le décalage offre/demande

Demeurent des contraintes importantes. L'alternance jour/nuit implique la mise en place de systèmes relais qui compense la faiblesse ou l'absence d'ensoleillement. Donc, pour atteindre l'objectif de production à 100% énergie issue du solaire, nous sommes contraints à avoir recours au stockage de chaleur. Dans les centrales CSP le stockage de l'énergie se fait sous forme de chaleur. Cette chaleur peut être stockée pendant plusieurs heures ou plusieurs jours, et être transformée en électricité quand le temps est nuageux ou lors des pics de consommation, soit en général à la tombée de la nuit.

Il existe actuellement trois grandes familles de stockage d'énergie :

le stockage sensible, le stockage latent et le stockage thermochimique, elles-mêmes divisibles en plusieurs catégories.

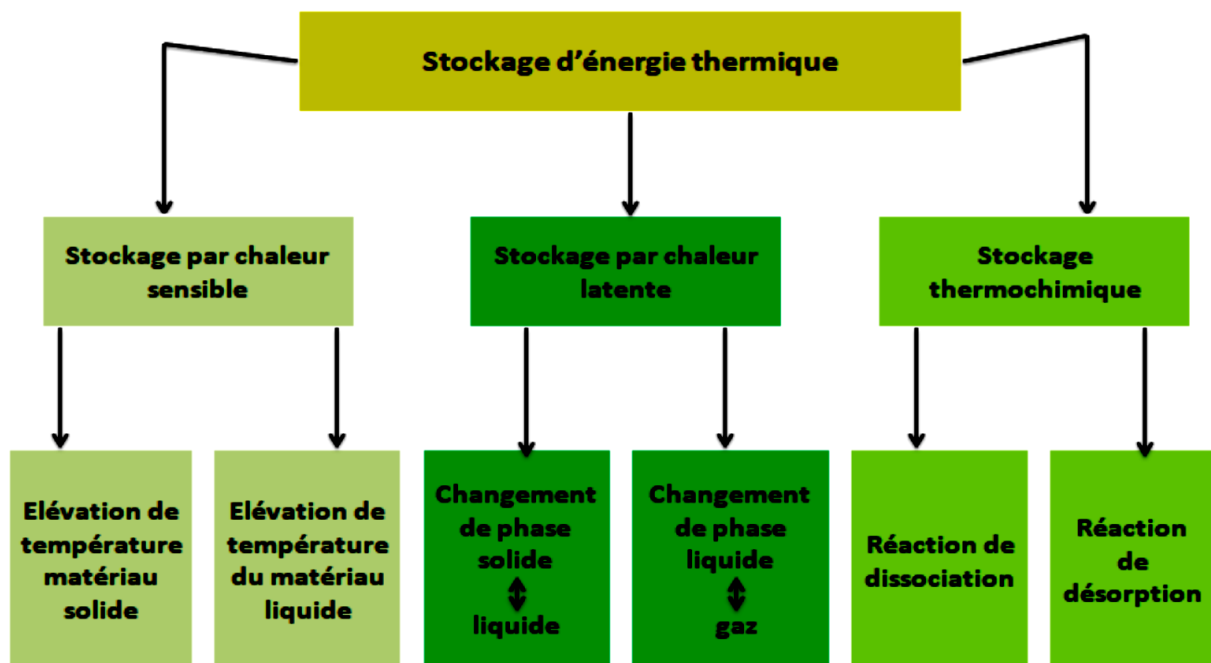


Figure II-11 : Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique .

II.10.2. Le stockage de l'énergie par voie sensible :

Ce type de stockage consiste à chauffer un milieu liquide ou un solide sans changement de phase (accumuler l'énergie sous la forme d'une élévation de température d'un ou de plusieurs liquides ou solides). Ce milieu est choisi en fonction du niveau de température requis par l'application. Le stockage et la restitution de la chaleur ne se fait pas à température constante. Pour des températures inférieures à 100 °C, l'eau liquide est le composé le plus largement utilisé. Pour des températures supérieures à 100 °C, le stockage de chaleur se réalise dans d'autres milieux liquides comme les sels fondus ou les huiles organiques. Ces composés permettent d'atteindre des températures élevées (jusqu'à environ 350 °C pour les huiles et 800 °C pour les sels fondus). Ils nécessitent cependant l'utilisation d'un fluide intermédiaire et le coût des matériaux et échangeurs peut être élevé.

Actuellement, toutes les centrales solaires à concentration commerciales utilisent la technologie de stockage de l'énergie par chaleur sensible, car c'est la technologie la plus maîtrisée et la moins onéreuse.

II.10.3. Le stockage par chaleur latente :

Ce type de stockage exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP), autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur. L'énergie de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restituée lors de sa solidification. Cette solution nécessite l'utilisation d'un fluide caloporteur pour transférer la chaleur de la source à l'unité de stockage.

Le MCP subissant des cycles de fusion/solidification, il ne peut être utilisé directement comme fluide de transfert. Il existe différents types de MCP :

- ❖ Les MCP organiques, comme les paraffines, les acides gras et les mélanges organiques,
- ❖ Les MCP inorganiques, les sels hydratés et mélanges de sels hydratés.

II.10.4. Le stockage thermochimique :

Ce type de stockage consiste à emmagasiner de l'énergie en dissociant deux corps ou en forçant la désorption d'un corps piégé par un autre (réactions endothermiques). L'énergie peut ensuite être restituée par mise en contact des deux corps, donnant respectivement une recombinaison et une sorption (absorption si un fluide pénètre dans un corps, ou adsorption si le fluide se fixe

sur la surface d'un solide). La figure ci-dessous schématise le principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption.

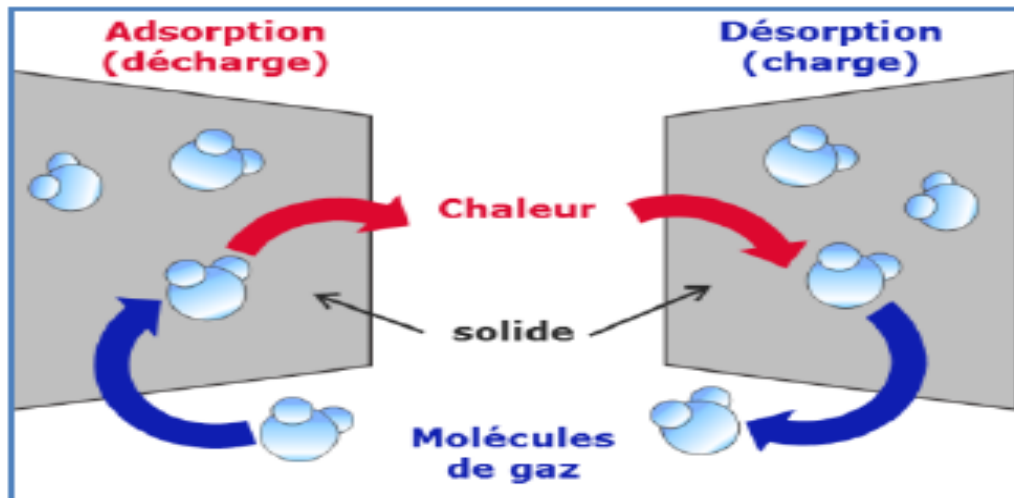


Figure II-12 : Principe de stockage de l'énergie par adsorption/désorption.

II.10.5. Stockage indirect et direct :

Deux configurations générales existent pour un système de stockage par chaleur sensible. Pour une meilleure compréhension, la description de ces configurations sera appliquée au stockage dit « à deux cuves », qui est généralement utilisé dans les CSP.

Le principe de fonctionnement du stockage deux-cuves est relativement simple [30] :

- ❖ Pour stocker l'énergie thermique disponible, le fluide à la température basse du système est pompé de la première cuve, appelée « cuve froide », pour être envoyé dans le champ solaire ou vers un échangeur, chauffé jusqu'à la température haute, puis injecté (ou stocké) dans la seconde cuve, nommée « cuve chaude »
- ❖ Pour déstocker l'énergie initialement chargée, le fluide chaud est pompé de la cuve chaude, envoyé vers un échangeur (du groupe de puissance ou du procédé nécessitant de la chaleur), l'énergie emmagasinée est utilisée, puis le fluide revenu à sa température basse est réinjecté dans la cuve froide.

Le choix de l'utilisation du stockage direct ou indirect se fait selon la nature des fluides utilisés dans la centrale. Le choix de ces derniers résulte lui-même de l'analyse de critères technico-économiques qu'il est nécessaire de détailler.

II.11. Conclusion :

Dans Ce chapitre nous avons présenté les principes fondamentaux des systèmes CSP en retraçant le Flux d'énergie solaire depuis la collecte initiale jusqu'à la conversion finale en électricité, et a Examiné les limitations qui apparaissent dans chacun des sous-systèmes : concentrateur, Récepteur, transport, stockage et conversion.

Chapitre III

*Etat de l'art des
concentrateurs solaires
Fresnel et technique de
rafraîchissement de l'air.*

III.1. Les concentrateurs solaires linéaires de Fresnel

III.1.1 Introduction :

La technologie de type Fresnel utilise les miroirs plans qui sont disposés de façon à reproduire la forme cylindro-parabolique, les miroirs plans sont équipés d'un système de motorisation qui permet de suivre le soleil sur un seul axe EST-OUEST afin de concentrer les rayons vers un récepteur linéaire situé sur la ligne focale. La température de fonctionnement varie de 270 °C à 550 °C, avec un facteur de concentration allant de 25 à 100. Dans cette centrale, le fluide de travail est soit de l'huile, soit de l'eau.

III.1.2. Éléments d'un concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel :

Un collecteur de type linéaire de Fresnel, comme l'indique la figure est composée de trois éléments à un rôle particulier. C'est la combinaison de leur action qui permet de convertir le rayonnement solaire en chaleur.

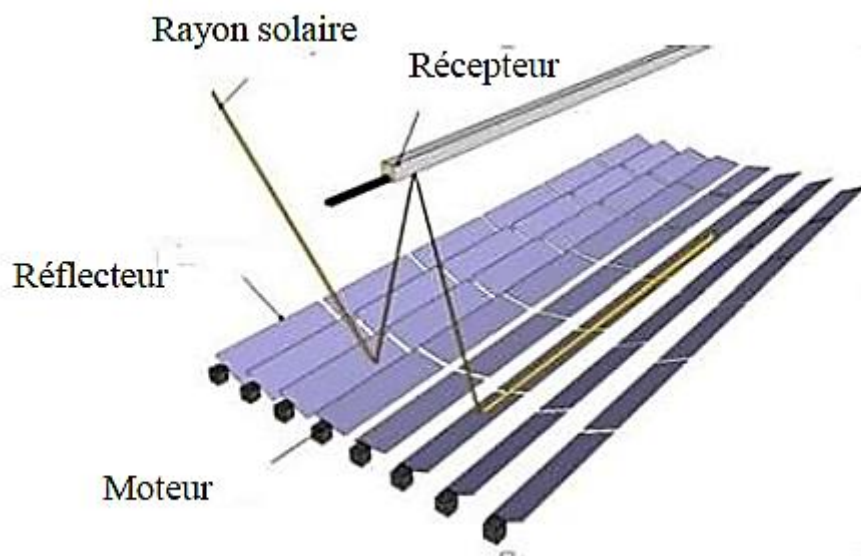


Figure III- 1 : Représentation schématique d'un concentrateur de type Fresnel [31].

I.11.1 Les miroirs réflecteurs (concentrateurs) :

Le concentrateur de type linéaire de Fresnel est en substance, un concentrateur de type cylindro-parabolique où le miroir est segmenté en adoptant le principe de segmentation de Fresnel avec

les lentilles comme illustré. Tous les segments, appelés réflecteurs, sont ramenés sur un même axe.

Un concentrateur de type linéaire de Fresnel est ainsi constitué de plusieurs réflecteurs. Les réflecteurs sont disposés de façon à réfléchir tout rayon solaire incident, à leur surface, vers le récepteur situé en haut du concentrateur [32].

s

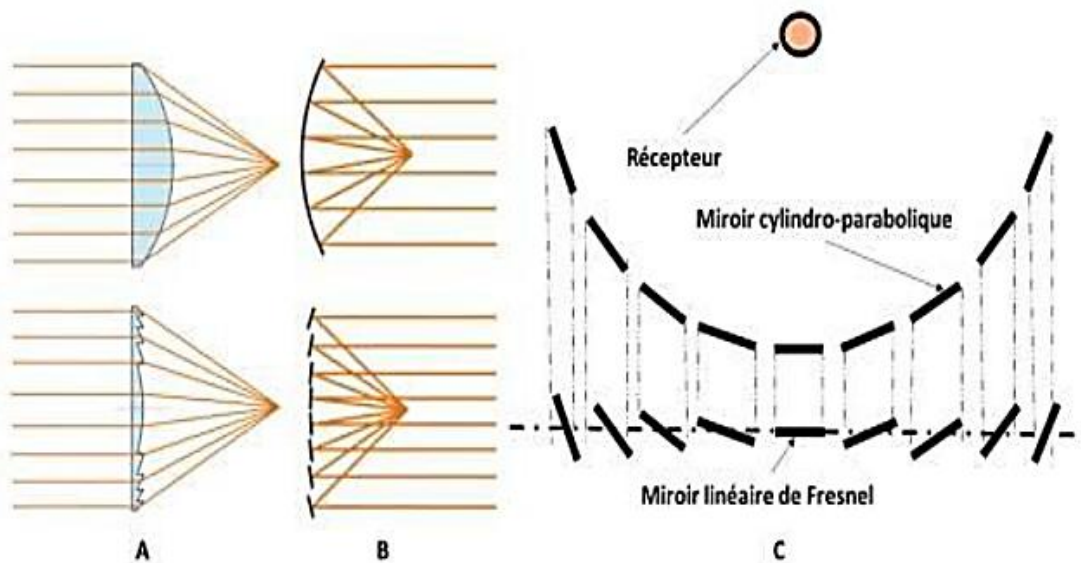


Figure III-1 : Les miroirs réflecteurs.

- A : lentille de Fresnel
- B : miroirs de Fresnel
- C : schéma illustrant le passage du miroir cylindro-parabolique au miroir linéaire de Fresnel

III.1.3. Le récepteur :

Un récepteur linéaire est composé d'une partie absorbante, c'est le cœur des échanges thermiques du récepteur et de différents dispositifs destinés à limiter les pertes thermiques [33] comme l'illustre la figure suivante :

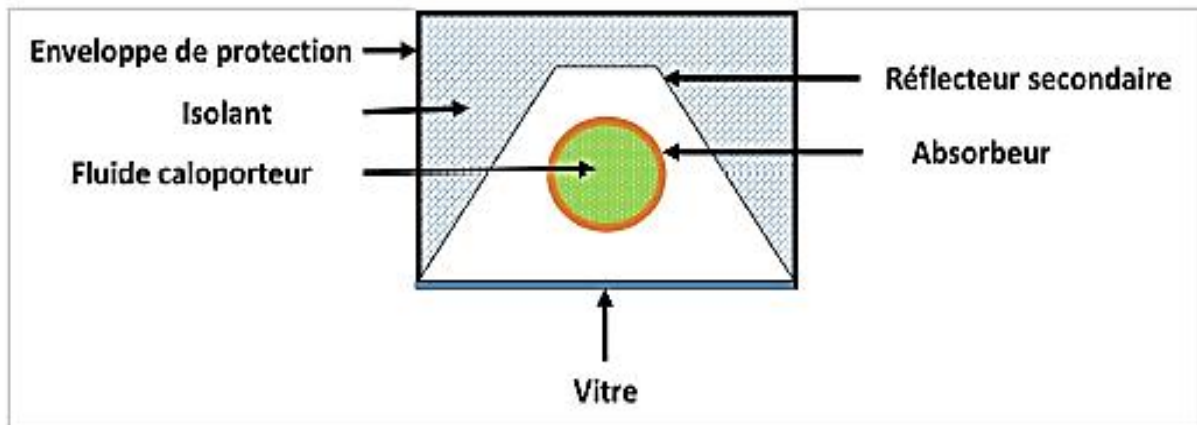


Figure III–2 : le récepteur thermique [32].

III.1.4. La surface absorbante :

La surface absorbante est l'élément fondamental du récepteur qui est soumis à une température élevée. Le fluide de travail circule à travers cette surface pour absorber la puissance thermique. Le matériau constitutif doit avoir un coefficient d'absorption élevé et d'émission faible afin de limiter les pertes par rayonnement. On utilise donc la peinture sélective pour améliorer ses propriétés optiques.

III.1.5. Le réflecteur secondaire :

Le réflecteur secondaire est placé au-dessus de la partie absorbante afin de réduire les pertes optiques. Il réfléchit sur l'absorbeur les rayons ayant raté l'absorbeur. Le réflecteur secondaire augmente le facteur de concentration. Et permet aussi de mieux répartir la puissance incidente de manière homogène sur les tubes. Il s'agit d'un organe facultatif.

III.1.6. La plaque de verre :

La plaque de verre est utilisée pour limiter les pertes radiatives. Elle est définie par son épaisseur et sa forme plane pour fermer la cavité du récepteur secondaire. Elle laisse passer le rayonnement solaire mais bloque les rayonnements infrarouges et réduit les pertes thermiques. Pour accroître les échanges thermiques à ce niveau il convient juste à dépoussiérer la vitre.

III.2. Différents types des récepteurs :

III.2.1. Récepteur monotube sous vide :

Le récepteur est composé d'un tube absorbeur, d'une plaque en verre, d'un réflecteur secondaire. Les récepteurs mono-tubes sous vide sont utilisés principalement dans les centrales cylindro-paraboliques. Ils sont parfois utilisés dans les petites centrales de type de Fresnel. Le réflecteur secondaire a pour caractéristique d'accepter tous les rayons réfléchis par le concentrateur [34].

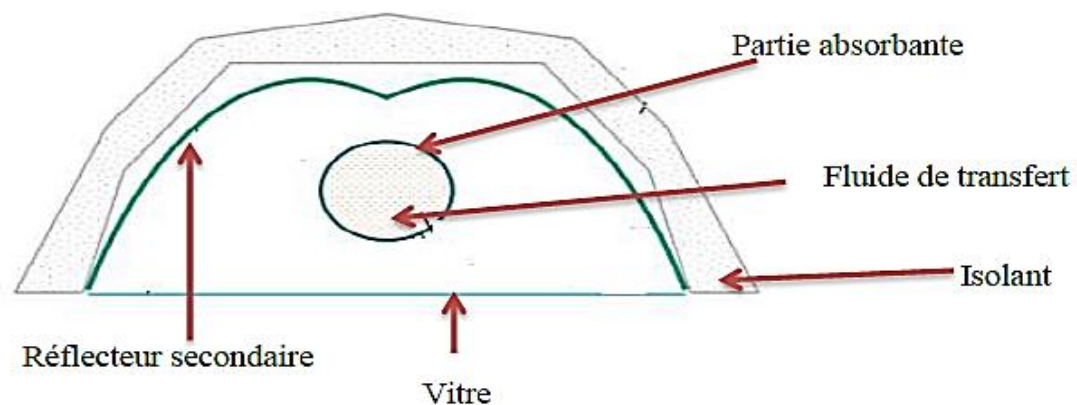


Figure III-3 : Récepteur monotube sous vide

III.2.2. Le récepteur multitube :

La conception multitube la plus conventionnelle consiste en une série de tubes parallèles disposés horizontalement dans une cavité, généralement de section trapézoïdale et donc sans concentrateur secondaire comme la Figure 0-6.

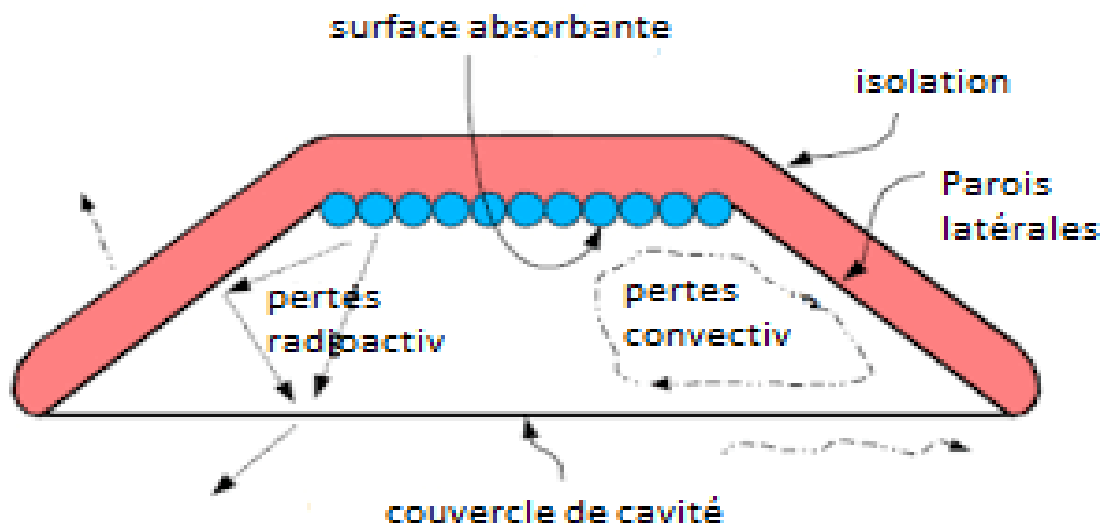


Figure III-4 : récepteur multitube [34].

III.3. Les pertes optiques dans les concentrateurs linéaires de Fresnel :

III.3.1. Pertes dû à l'ombre des miroirs :

Lorsque récepteur est mal positionné, quelques rayons réfléchis sont interceptés par le récepteur et les autres sont perdus, la puissance diminue considérablement. Cette diminution est due à l'effet d'ombre créé par les miroirs dû à leur grande inclinaison et empêchant les autres miroirs de réfléchir vers le récepteur. Un autre facteur est que plus le récepteur est bas, plus il crée de l'ombre sur les miroirs.

III.3.1.1. Pertes par ombrage :

Un miroir primaire est à l'ombre d'un autre élément et ne reçoit pas de rayonnement solaire incident. Cela se produit particulièrement quand le soleil est bas sur l'horizon.

III.3.1.2. Pertes par blocage :

La lumière réfléchie sur les miroirs primaires est parfois bloquée sur son chemin vers le récepteur, par un miroir voisin. Cela se produit si les miroirs sont trop proches les uns des autres.

III.3.1.3. Pertes par débordement :

La lumière réfléchie sur les miroirs primaires peut être perdue par débordement lorsque les rayons passent à côté du tube récepteur et sont perdus dans l'environnement. Le rayon peut

passer à côté du réflecteur secondaire ou être perdu après une ou plusieurs réflexions sur le réflecteur secondaire.

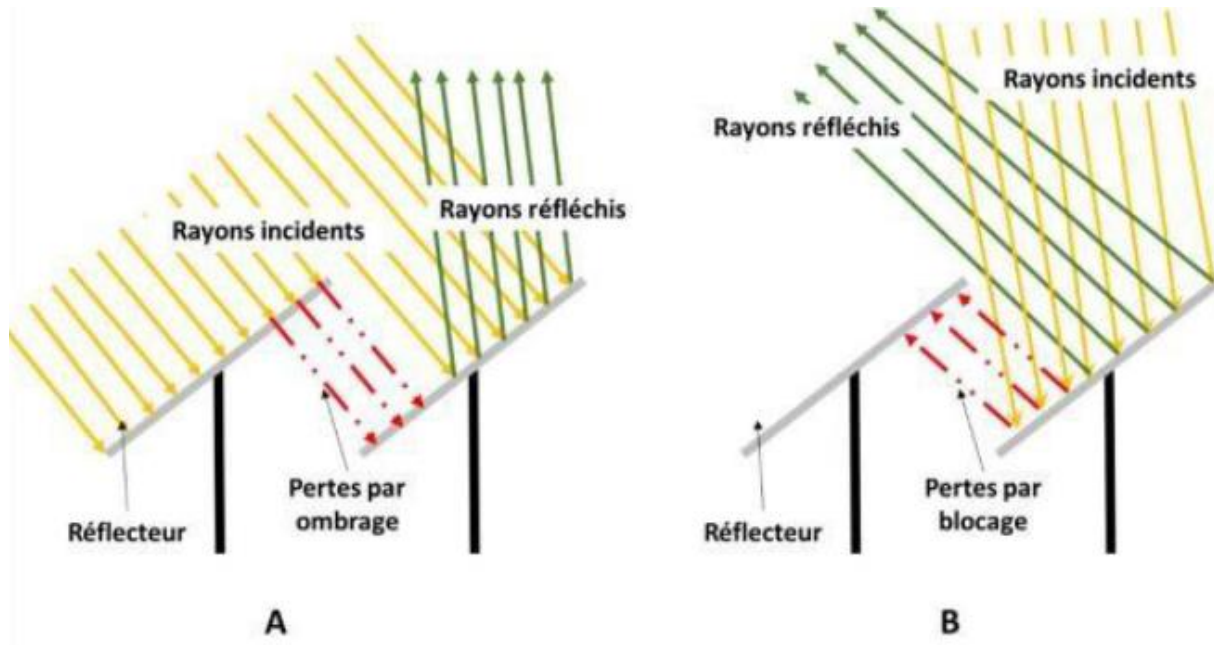


Figure III-5 : Pertes dû à l'ombre des miroirs.

- A : Illustrations des pertes par ombrage.
- B : Illustration des pertes par blocage.

III.4. Pertes par débordement de rayon réfléchis :

On parle de pertes par débordement lorsque les rayons réfléchis manquent la cible. Il y a deux cas qui se présentent :

- ❖ Lorsque le rayon réfléchi vers le récepteur manque le réflecteur secondaire, ce type de débordement diminue avec la hauteur.
- ❖ Lorsque le rayon réfléchi par les miroirs secondaires rate le tube absorbeur.

III.5. Description du système de suivi du soleil :

Dans les CSP, le concentrateur est constitué de miroirs. Les miroirs sont choisis en raison de leur forte réflectivité spéculaire (>70 %). Lors d'une réflexion spéculaire, l'angle de

réflexion et l'angle d'incidence sont symétriques par rapport à la normale à la surface réfléchissante. C'est cette propriété du miroir qui permet d'orienter les rayons solaires réfléchis vers le récepteur. Connaissant l'angle d'incidence du soleil et la position du récepteur, il est possible de déterminer l'angle adéquat des réflecteurs afin que tout rayon incident soit réfléchi vers le récepteur. L'angle d'incidence du soleil varie en fonction de la course apparente du soleil dans le ciel. L'angle de réflexion est imposé par la position du réflecteur par rapport au récepteur ; cet angle est fixe. Afin de toujours réfléchir les rayons incidents vers le récepteur, la normale du réflecteur doit être constamment orientée en fonction du nouvel angle d'incidence du soleil : c'est le suivi solaire. Le suivi solaire des collecteurs de type linéaire de Fresnel se fait suivant un seul axe.

III.5.1. Principe de fonctionnement :

Le rayonnement solaire direct est réfléchi sur plusieurs rangées de miroirs de suivi à axe unique sur un récepteur fixe. Il s'agit d'un tube sous vide très efficace avec revêtement sélectif. La chaleur est collectée dans ce tube absorbant et est acheminée vers l'application au moyen d'un fluide caloporteur. Une partie de la lumière du soleil réfléchie par les miroirs primaires frappe l'un des miroirs secondaires positionnés au-dessus de l'absorbeur et est réfléchie de là sur l'absorbeur.

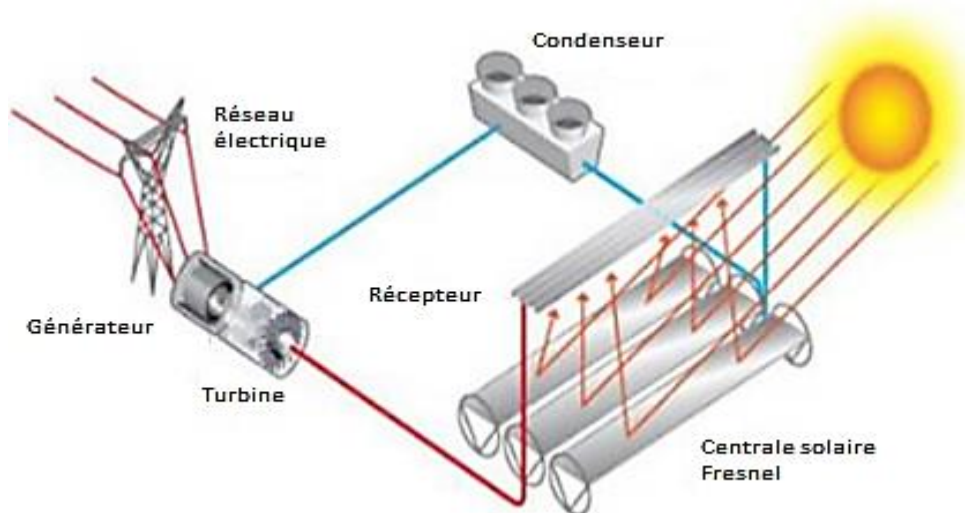


Figure III-6 :Schéma synoptique d'une centrale de Fresnel.

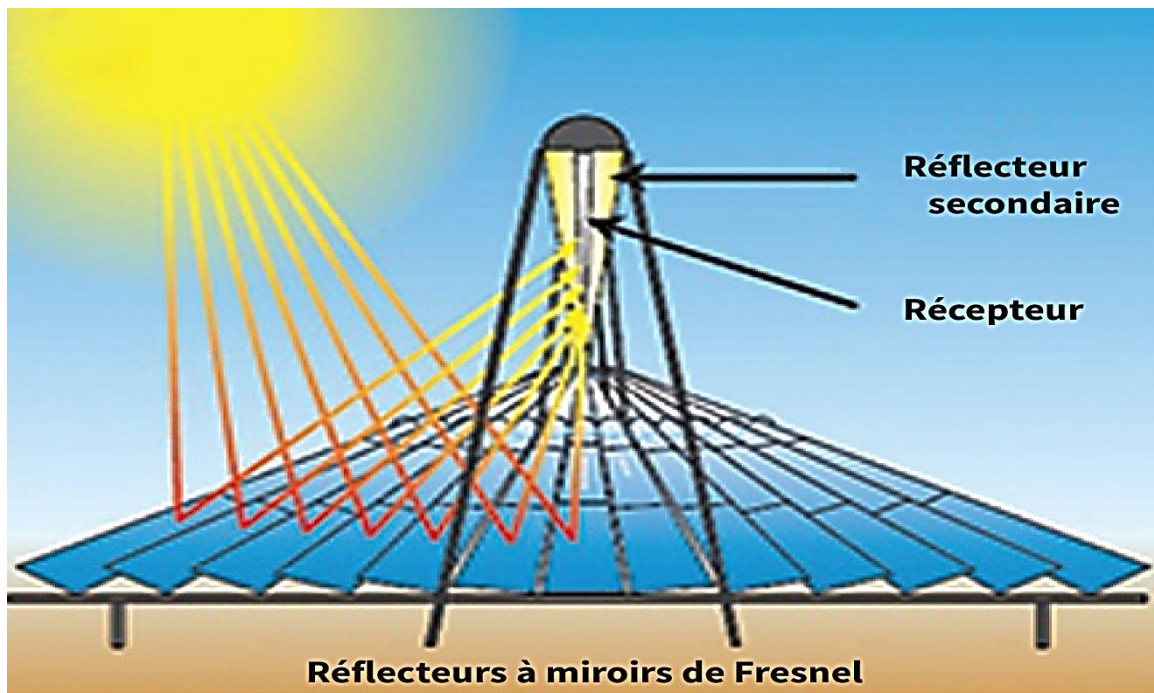


Figure III-7 : Principe d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel.

III.6. Les différents rendements :

Afin de réaliser l'étude de performance, et voir le comportement de notre centrale, on doit définir les différents rendements :

III.6.1. Le rendement optique :

C'est le rapport entre la puissance totale absorbée par le tube P_a et la puissance solaire disponible sur la surface des miroirs :

$$\eta_{\text{optique}} = \frac{P_a}{\text{DNI} \times S_{\text{champ}}} \dots \dots \dots (\text{III-1})$$

III.6.2. Le rendement thermique :

c'est le rapport entre la puissance thermique transmise au fluide caloporteur P_{fluide} ou l'énergie utile et la puissance totale absorbée par le tube P_a .

$$\eta_{\text{thermique}} = \frac{P_{\text{fluide}}}{P_a} \dots \dots \dots (\text{III-2})$$

$$\text{Et : } P_f = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \dots \dots \dots (\text{III-3})$$

Le rendement global du champ :

$$\eta_{\text{globale du champ}} = \eta_{\text{optique}} \times \eta_{\text{thermique}} \dots\dots (III-4)$$

$$\eta_{\text{globale champ}} = \frac{P_{\text{fluide}}}{\text{DNI} \times S_{\text{champ}}} \dots\dots\dots (III-5)$$

III.7. Technique de rafraîchissement de l'air.

III.7.1. Introduction :

Les machines de rafraîchissement solaire par sorption semblent une voie prometteuse pour l'amélioration des conditions de vie du point de vue environnemental et économique, apparaissent comme pouvant représenter une alternative prometteuse aux systèmes de refroidissement par compression de vapeur classique, avec certains avantages : la consommation d'électricité peut être jusqu'à 20 fois inférieure à celle d'un système classique à compression, les fluides frigorigènes employés n'ont pas d'impact sur la couche d'ozone et sur l'effet de serre, un faible niveau sonore.

Plusieurs travaux dans le domaine du rafraîchissement par absorption ont été effectués, à base de ces derniers, d'autre recherche se font toujours pour développer et enrichir ce domaine.

Une installation frigorifique c'est l'ensemble des composants avec lesquels une machine de production de froid fonctionne, elle englobe les systèmes d'échange de chaleur, les différentes sources d'énergie...etc.

III.7.2. Les différents types des machines frigorifiques :

Ce sont ces systèmes qui sont les plus développés et utilisés. Ils se décomposent en deux grandes familles : les cycles ouverts et les cycles fermés.

III.7.2.1. Les cycles fermés :

Les machines à cycle fermé utilisent un procédé de refroidissement à sorption (absorption si l'agent de sorption est liquide, ou adsorption s'il est solide) pour produire de l'eau glacée. Ces machines utilisent généralement de l'eau comme réfrigérant, mais d'autres fluides peuvent être utilisés comme l'ammoniac par exemple.

III.7.2.2. Les cycles ouverts :

Les machines à cycle ouvert sont en contact avec l'atmosphère et agissent directement sur l'air. En d'autres termes, ces installations produisent directement de l'air froid et non pas de l'eau glacée comme pour les cycles fermés. En conséquence, ces systèmes utilisent toujours l'eau comme réfrigérant. La technologie la plus utilisée pour les cycles ouverts utilise les roues à dessiccation en rotation. La dessiccation par procédé liquide est commercialement disponible mais très limitée en termes de solutions disponibles.

Tableau 0I-1 :les caractéristiques de cycle du réfrigérant.

Cycle du réfrigérant	Réfrigérant en cycle fermé		Réfrigérant en cycle ouvert, en contact direct avec l'air	
Principe	Production d'eau glacée		Dés humidification de l'air et refroidissement par évaporation	
Phase du sorbant	Solide	Liquide	Solide	Liquide
Couple réfrigérant / absorbant habituellement utilisés	Eau / Silica gel ; Eau / Zéolite	Eau / Bromure de lithium ; Ammoniac / Eau	Eau / Silica gel ; Eau / Chlorure de lithium	Eau / Chlorure de calcium ; Eau / Chlorure de lithium
Technologie disponible	Machines à adsorption	Machines à absorption	Systèmes à dessiccation (DEC)	Bientôt introduit sur le marché
Capacité frigorifique	5,5 – 500 kW	10 kW – 5 MW	20 – 350 kW (par module)	-
Coefficient de performance	0,4 – 0,7	0,6 – 0,75 (simple effet)	0,5 - >1	> 1
Température de fonctionnement	65 – 90 °C	70 – 110 °C	50 – 95 °C	50 – 70 °C
Capteurs solaires	Capteurs plans ou sous vide	Capteurs sous vide ou plans	Capteurs plans ou à air	Capteurs plans ou à air

III.8. Machine frigorifique à compression de vapeur :

Une machine frigorifique à compression de vapeur est composée de quatre éléments essentiels, elle décrit un cycle avec une transformation importante au niveau de chaque élément, les composants d'une installation [35] sont :

III.8.1. Le compresseur :

Aspire le fluide frigorigène à la sortie de l'évaporateur avec une pression et température basses :

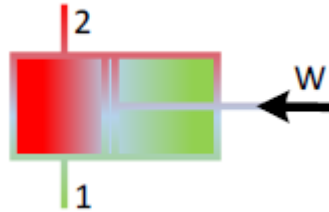


Figure III-8 :compresseur.

❖ Bilan énergétique :

$$\dot{m}h_1 + W = \dot{m}h_2 \dots\dots\dots(III-6)$$

III.8.2. Le condenseur :

Va extraire de la chaleur du fluide frigorigène et l'évacuer vers le milieu extérieur :

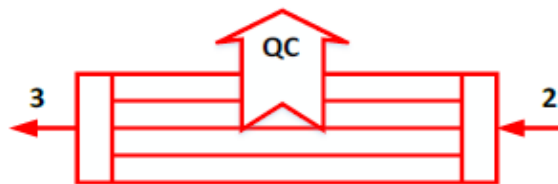


Figure III-9: condenseur.

❖ Bilan énergétique :

$$\dot{m}h_2 = \dot{Q}_C + \dot{m}h_3 \dots\dots\dots(III-7)$$

III.8.3. Le détendeur :

Est alimenté en fluide frigorigène à l'état liquide va réduire la pression pour obtenir à la sortie un mélange de liquide et de vapeur.



Figure III-10 :Détendeur.

❖ Bilan énergétique :

$$\dot{m}h_3 = \dot{m}h_4 \dots \dots \dots (III-8)$$

III.8.3. L'évaporateur :

Va permettre au fluide frigorigène d'absorber de la chaleur et de passer de l'état de mélange à l'état de vapeur saturée et ensuite de vapeur surchauffée :

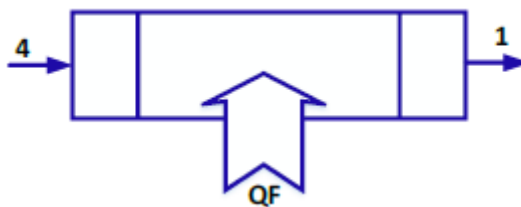


Figure III-11 : évaporateur.

❖ Bilan énergétique :

$$\dot{m}h_4 + \dot{Q}_F = \dot{m}h_1 \dots \dots \dots (III-9)$$

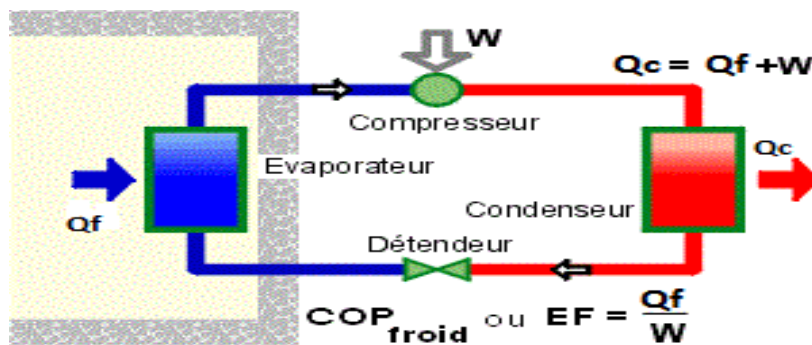


Figure III-12 : Machine frigorifique à compression.

III.8.4. Performance d'une machine frigorifique à compression de vapeur :

$$COP = \frac{Q_F}{W} \dots \dots \dots (III-10)$$

$$Q_f = (h_1 - h_4) \dots \dots \dots (III-1)$$

$$W=(h_2-h_1).....(III-12)$$

III.8.5. Rendement d'une machine frigorifique à compression :

Les performances d'une MF sont comparées à celles de la machine de Carnot fonctionnant dans mêmes conditions :

$$\eta = \frac{\text{cop}}{\text{cop}_c}.....(III-13)$$

$$\text{Avec : } \text{cop}_c = \frac{T_f}{T_c - T_f}.....(III-14)$$

III.9. Les différents types des machines frigorifiques solaires :

III.9.1. Machine à adsorption :

Les machines à adsorption font intervenir essentiellement un phénomène d'adsorption physique par lequel un solide fixe les molécules d'un gaz sur sa surface sous l'action d'un champ de forces de liaisons. L'adsorption est un phénomène de surface, où le gaz peut recouvrir les surfaces inter et intra particulaire du solide poreux [36].

Le fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption se décompose en deux phases :

- a. Phase de régénération - condensation.
- b. Phase d'adsorption – évaporation

III.9.2. Principe de fonctionnement :

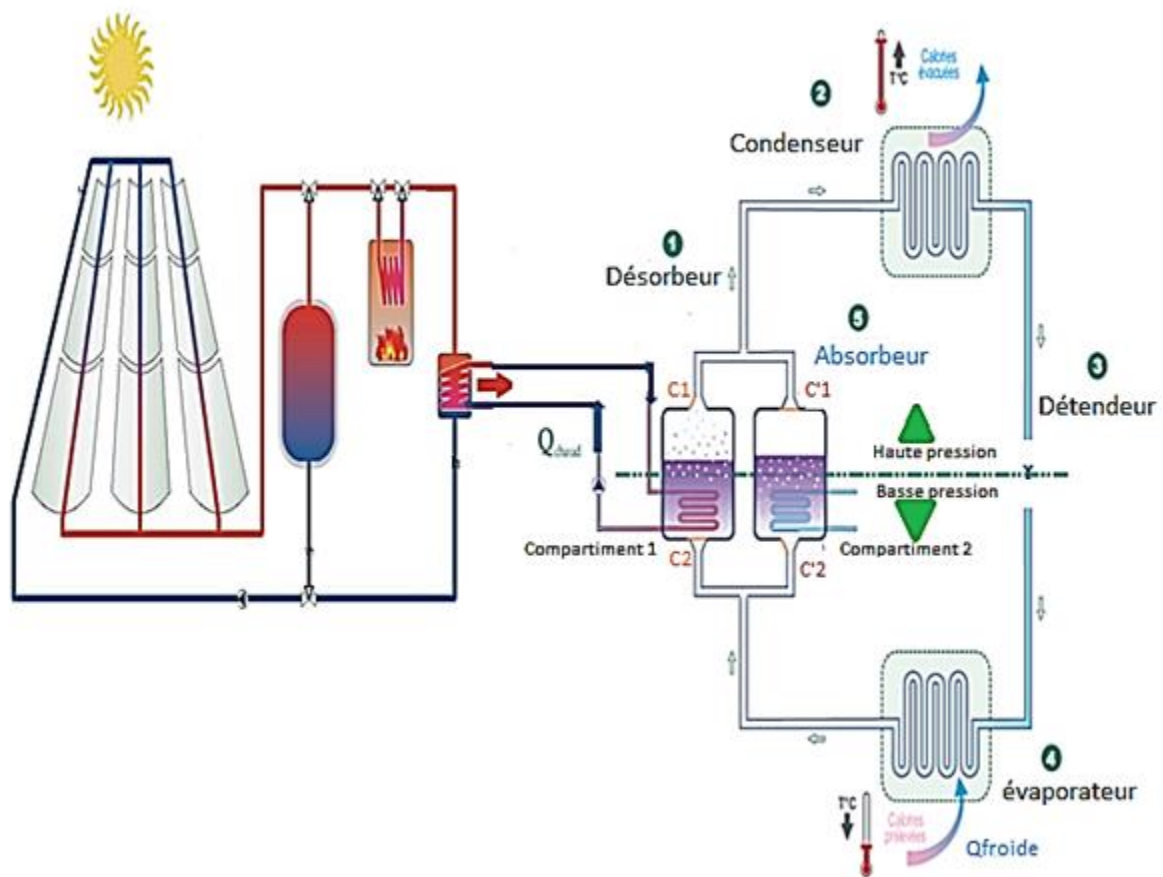


Figure III- 14 : schéma synoptique d'une machine frigorifique à adsorption.

1-Un premier compartiment contenant le solide adsorbant en équilibre thermodynamique avec le fluide réfrigérant reçoit l'apport calorifique de panneaux solaires thermique. L'adsorbant s'échauffe, ce qui provoque la désorption du réfrigérant et une élévation de pression, lorsque la pression de vapeur du réfrigérant atteint la valeur correspondant à la pression du condenseur, le clapet **C1** est ouvert et les vapeurs sont connectées au condenseur.

2-Dans le condenseur, les vapeurs du réfrigérant cèdent leur chaleur par refroidissement au contact de l'air ambiant.

3-Les condensas du réfrigérant sont détendus pour accéder à la zone basse pression de l'installation.

4-Le réfrigérant à l'état liquide est dirigé dans l'évaporateur où il se vaporise instantanément en prélevant les calories du local à refroidir.

5- L'absorbant du deuxième compartiment est refroidi au contact d'un circuit d'eau et maintient la basse pression. Le clapet C'2 est ouvert afin de permettre l'adsorption des vapeurs stockées dans l'évaporateur. Un nouveau cycle peut alors recommencer.

6-La fonction désorbeur-adsorbeur de chaque compartiment est permutée à chaque cycle par ouverture et fermeture des clapets C1 C'2 et C'1 C2.

III.9.3. Avantage :

- L'absence de compression mécanique, donc pas de vibrations et de bruits.
- La possibilité d'utiliser une énergie calorifique disponible et d'éviter ainsi la consommation électrique du compresseur. Donc, ce sont des machines poly-énergie
- La parfaite autonomie.
- Le procédé classique des machines à adsorption opère avec un seul adsorbeur, il présente certes l'avantage d'être simple technologiquement, ce qui lui confère les qualités de facilité d'entretien et de fiabilité dans le temps.
- L'intermittence du cycle de base associé à ces machines représente une caractéristique utile dans les applications solaires où l'énergie solaire n'est que discontinuement disponible.
- Le fonctionnement intermittent permet de diminuer le nombre de composant du système.
- Des coûts de fonctionnement et d'entretien très réduits.
- La durée de vie de ces machines peut être longue, si l'on s'est prémuni contre la décomposition du frigorigène et contre les phénomènes de corrosion

III.9.4. Inconvénients :

- Le coefficient de performance thermique de ces machines est limité (< 0.5), Donc ce coefficient est plus faible que ceux des systèmes à compression et à absorption.
- Fortes puissances thermiques à évacuer vers l'extérieur.
- Basses pressions de vapeur avec les frigorigènes utilisés.
- Avec l'eau, l'impossibilité de produire du froid au-dessous de 0 °C.
- Les performances du système de captation des machines frigorifiques solaires à adsorption sont particulièrement sensibles aux conditions environnementales (vent,

température ambiante et rayonnement solaire), ce qui renforce le caractère aléatoire de la production frigorifique provenant du caractère fluctuant de l'énergie solaire.

- La production discontinue de froid imposant un accumulateur externe pour le stockage de l'énergie. Cette solution permet de pallier la nature intermittente et aléatoire de l'énergie solaire, mais n'a pas encore reçu de succès économique satisfaisant.

III.10. Les machines frigorifiques à absorption :

Le chiller est l'élément essentiel de l'installation, c'est le responsable de la production du froid, l'objectif est de fournir l'eau glacée, dans un circuit lié à des ventilo-convecteurs de l'espace que nous voulons refroidie.

Le procédé de base de production de froid est la compression d'un fluide frigorigène ce qui provoque l'évaporation du liquide à des basse températures et pression, et de condensation de la vapeur à des températures et des pressions plus élevées. Au lieu de la compression mécanique comme dans les équipements électriques des climatiseurs, les refroidisseurs utilisent l'énergie thermique pour la compression du fluide, Le principe de base de la compression thermique est l'absorption du réfrigérant dans un liquide comme NH_3 , et le réfrigérant c'est l'eau, ce qui entraîne que la tâche technique doit être exploitée à des pression très faibles dans une enceinte de confinement étanche au vide [37]

III.10.1. Principe de fonctionnement :

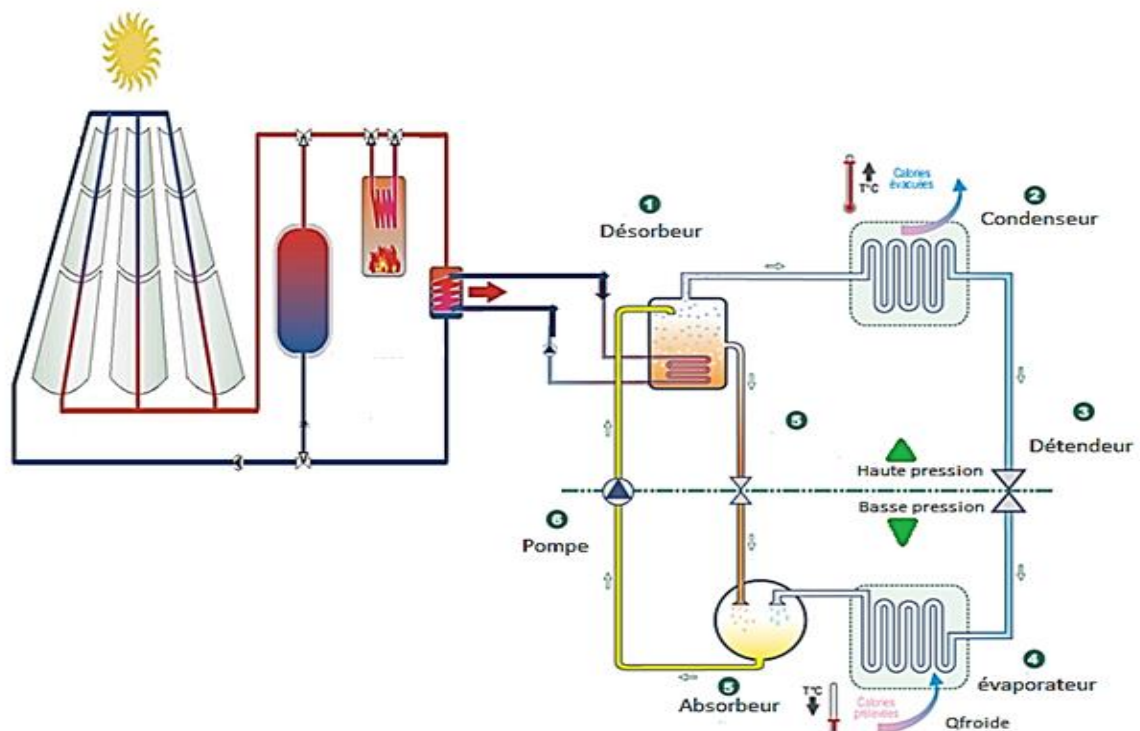


Figure III- 15 :schéma synoptique d'une machine frigorifique à absorption.

1. Une solution composée d'un couple liquide réfrigérant et liquide absorbant est portée à ébullition à l'intérieur du désorbeur grâce à l'apport calorifique de panneaux solaires thermique. La pression augmente et le réfrigérant s'évapore en se séparant de l'absorbant.
2. Les vapeurs du réfrigérant sont dirigées vers le condenseur où elles cèdent leur chaleur par refroidissement au contact de l'air ambiant.
3. Les condensats du réfrigérant sont détendus pour accéder à la zone basse pression de l'installation.
4. Le réfrigérant à l'état liquide est dirigé dans l'évaporateur où il se vaporise instantanément en prélevant les calories du local à refroidir.
5. Conjointement, la solution absorbante « pauvre en réfrigérant » est soutirée du désorbeur via une vanne de détente pour alimenter l'absorbeur. Les vapeurs du réfrigérant mises en contact avec la solution sont alors absorbées.
6. Le couple réfrigérant-absorbant ainsi régénéré est ramené vers le désorbeur par une pompe. Le cycle peut alors recommencer.

III.11. Bilan énergétique d'une machine frigorifique du mélange NH₃-H₂O-H₂

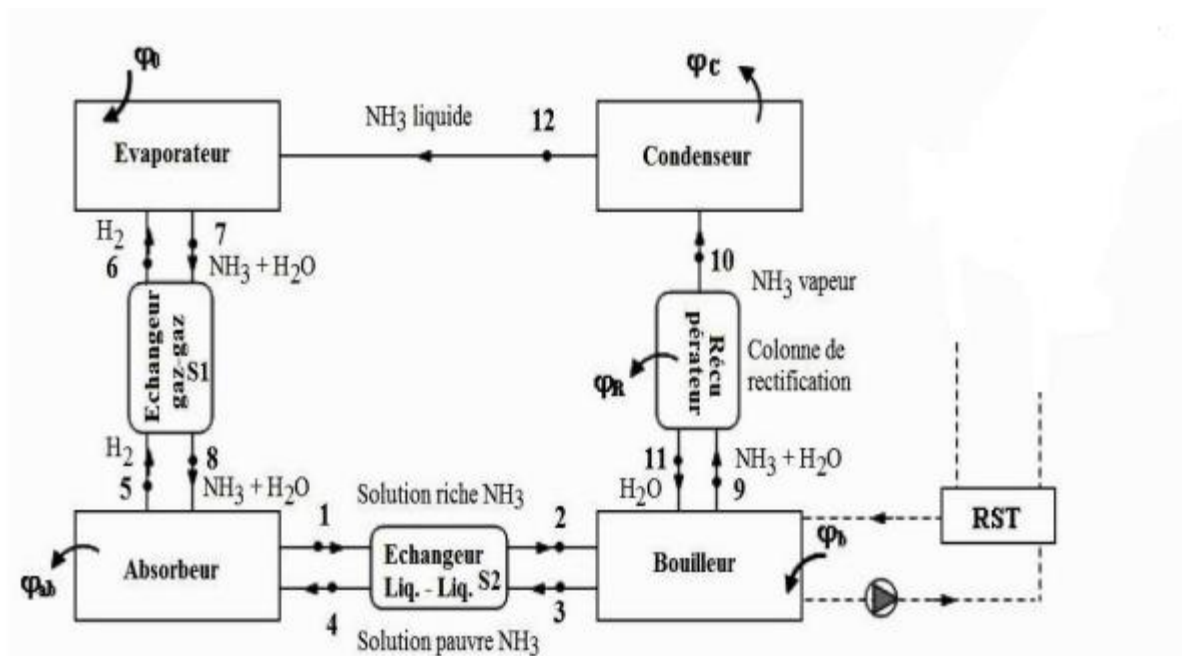


Figure III- 16 :Description schématique du cycle à absorption NH₃-H₂O-H₂ solaire [38]

Principe de fonctionnement Une machine à absorption (NH₃/H₂O-H₂) fonctionne selon le cycle suivant :

- 1/ Un générateur-Rectificateur, qui reçoit de la source chaude un flux de chaleur, et dans lequel entre la solution riche à haute pression préchauffée dans l'échangeur de solution (point 2)
- 2/ Un condenseur, d'où sort la vapeur condensée et éventuellement sous-refroidie (point 3), la chaleur extraire étant rejetée à l'environnement ;
- 3/ Un détendeur de réfrigérant, qui réduit la pression du réfrigérant, qui en sort à l'état diphasique à basse température (point 4).
- 4/ Un évaporateur, dans lequel le réfrigérant à basse pression et température est vaporisé et éventuellement légèrement surchauffé (point 5), en prélevant à la source froide le flux de chaleur utile (effet frigorifique).

5/ Un absorbeur, dans lequel entrent le réfrigérant vaporisé et la solution pauvre refroidie dans l'échangeur de solution, et duquel sort la solution riche (point 7), la chaleur extraite étant rejetée à l'environnement.

6/ Un échangeur de solution, qui permet d'effectuer une régénération interne entre la solution riche et la solution pauvre ;

7/ Une pompe est nécessaire pour pressuriser la solution riche avant son entrée dans l'échangeur

8/ Un détendeur en sortie d'échangeur ramène la solution pauvre à la pression de l'absorbeur

9/ Il en sort d'une par la vapeur de réfrigérant NH3 presque pure (point 1), et d'autre part la solution appauvrie et le cycle recommence

III.11.1. Bilan énergétique dans le bouilleur :

$$\dot{m}_9 + \dot{m}_3 = \dot{m}_{11} + \dot{m}_2 \dots \dots \dots (III-15)$$

$$Q_b = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_3 h_3 - (\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_2 h_2) \dots \dots \dots (III-16)$$

III.11.2. Bilan énergétique dans le condenseur :

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{12} \dots \dots \dots (III-17)$$

$$Q_c = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{12} h_{12} \dots \dots \dots (III-18)$$

III.11.3. Bilan énergétique dans l'évaporateur :

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{12} \dots \dots \dots (III-19)$$

$$Q_E = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{12} h_{12} - \dot{m}_7 h_7 \dots \dots \dots (III-20)$$

III.11.4. Bilan énergétique dans l'absorbeur :

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_5 = \dot{m}_4 + \dot{m}_8 \dots \dots \dots (III-21)$$

$$Q_{ab} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_8 h_8 - (\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_5 h_5) \dots \dots \dots (III-22)$$

III.11.5. Coefficient de performance COP de la machine :

$$\text{cop} = \frac{Q_e}{Q_b} \dots \dots \dots \text{(III-23)}$$

Avantage :

- Technologie sensiblement plus mature que les autres technologies de froid solaire ;
- Coefficient de performance plus élevé (de l'ordre de 0,6 à 0,8) ;

Inconvénients :

- Nécessité de plus hautes températures au générateur ;
- Les éléments mobiles sont plus nombreux (pompe) d'où une consommation électrique légèrement plus importante.

III.12. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de faire une étude bibliographique détaillée, dans laquelle nous avons présenté un état de l'art détaillés sur les concentrateurs linéaire de Fresnel, et les différents machines frigorifiques (à compression de vapeur et solaire), nous avons présenté l'aspect technique des différentes technologie et leurs bilan énergétique de chaque éléments constituant la machine, les schéma synoptiques de chaque système, enfin le principe de fonctionnement de chaque système ainsi que l'avantage et inconvénients ont été présentés .

Chapitre VI

Modélisation et simulation

IV.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est d'étude les performances d'une machine à absorption couplée avec un champ solaire à concentrateur linéaire de Fresnel destiné à la production du froid (climatisation). Pour cette raison, une investigation comparative est réalisée à sur différents sites Algériens à savoir (Bechar (Beni Ounnif), Ouargla (Ain Beida), Laghouat (HassiDelaa), El oued (El foulia), Touggourt (Tamacine). Ce travail prendre en considération le projet lancé par le ministère de l'énergie (Projet Solar 1000), ce dernier est visé à produire 1000 [MW] électrique dans ces derniers, notre objectif principal est de reproduire le même projet et de remplacer la production électrique par une production frigorifique (machine frigorifique à absorption), et voir le comportement de ces systèmes au site choisi par le ministère de l'énergie.

IV.1.1. Présentation du projet :

Le projet en question vise d'établir un cahier des charges qui permet de dimensionner le système dans les différentes localisations, ce dimensionnement dedéterminer la puissance et le nombre de climatiseur à installer ce qui va permettre de satisfaire les besoins de ces sites en production frigorifique, pour se faire nous avons effectué un calcul manuel qui permet de déterminer la puissance nécessaire ainsi que le nombre de climatiseur pour chaque site. Notre projet consiste à reproduire les puissance électriques données par le ministère de l'énergie (Solar 1000) en puissance frigorifique sur différents sites au sud de l'Algérie.

Nous avons reproduit les mêmes puissances électriques est les introduire dans le logiciel de simulation (Greenuis) et comme ce dernier est limité, nous avons configuré chaque puissance électrique à son équivalent en puissance frigorifique pour commencer la modélisationet la simulation de chaque site étudié.

Comme les sites choisis sont tous favorable alors certainement on aura un surplus d'énergie thermique produite alors nous avons configurénotre modèle mené d'un système de stockage thermique pour tous les sites et éliminer la chaudière de sauvegarde (Hybridation).

Nous présentons un exemple de calcul pour le site de Bechar par exemple

❖ BECHAR :

On a

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ BTU/h} \longrightarrow 0.0002931 \text{ kW} \\
 X \longrightarrow 583 \text{ kW} \\
 x = \frac{585 * 1}{0.0002931} = 19989082.22 \text{ BTU/h}
 \end{array}$$

On choisit un climatiseur d’une puissance de 18000 BTU alors :

Le nombre de climatiseur pour ce site = $\frac{19989082.22}{18000} = \mathbf{110}$ climatiseurs

Le même calcul est effectué pour les autres sites

Le tableau suivant montre les résultats finaux obtenu au sud de l’Algérie.

Tableau IV-1 : Les données et les paramètres pour la réalisation de projet

Wilaya	Zone	Puissance [MW]	Puissance frigorifique [kW]	Dans Greenuis	Nombre des climatiseurs 18000 BTU
Bechar	Beni ounnif	50	583	50	110
Ouargla	Ain Beida	100	1163	100	220
Laghouat	HassiDelaa	300	11630	1000	2204
El oued	Elfoulia	300	11630	1000	2204
Touggourt	Tamacine	250	5815	500	1102

La figure ci-dessous présente un schéma synoptique de notre installation

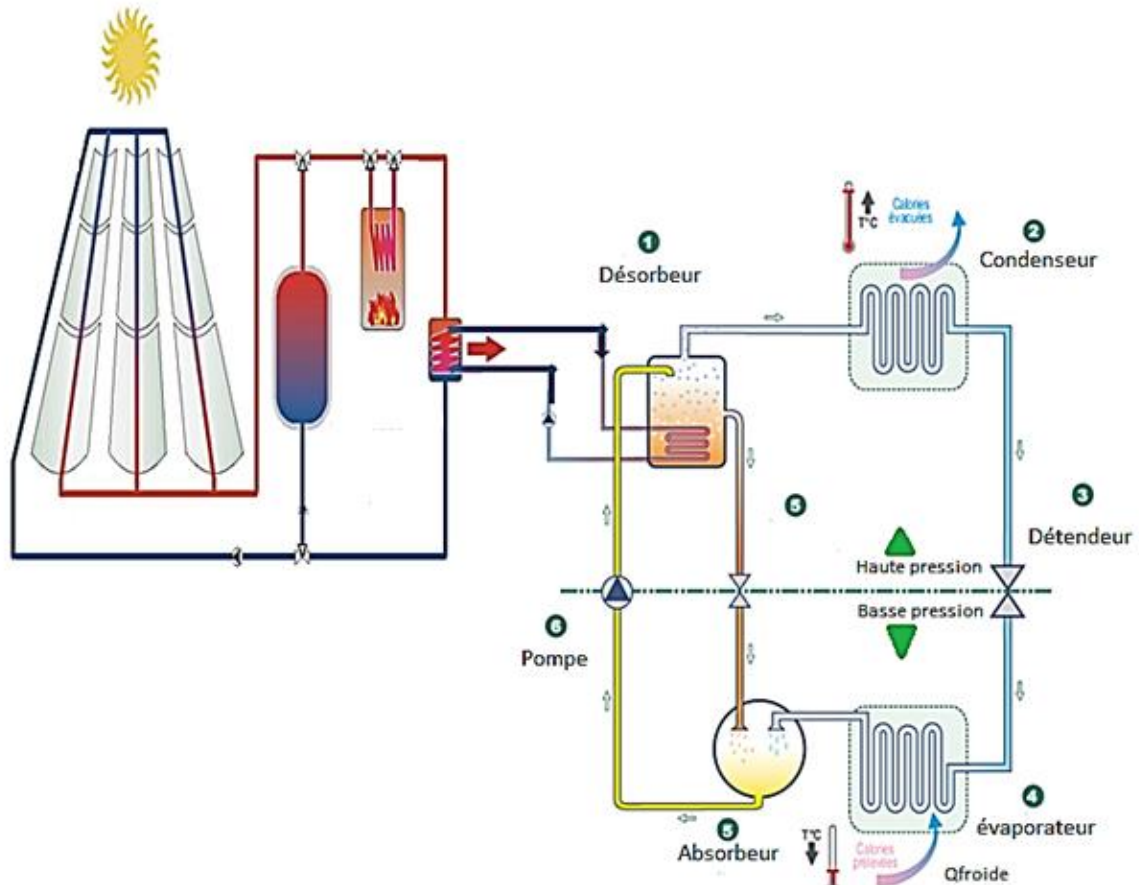


Figure IV-1 : schéma synoptique de principe de notre installation

IV.2. Description des sites :

Nous avons repris les mêmes sites du projet Solar 1000 qui se trouve au sud Algérien. Les sites choisis sont caractérisés par un important potentiel solaire qui dépasse les 2000 [W/m².ans], et un éclairage direct qui dépasse les 850 [W/m²] (par année), ainsi qu'une température ambiante importante, ce qui rend ces sites tous favorable à implantation de ce genre d'installations. Les données métrologiques de ces sites comme le DNI et la température ambiante sont triées de la base de données NREL (données satellitaires), les figures ci-dessus représentent l'éclairage direct de ces sites.

Les figures ci-dessous représentent l'évolution des irradiations normales directes dans les sites choisis :

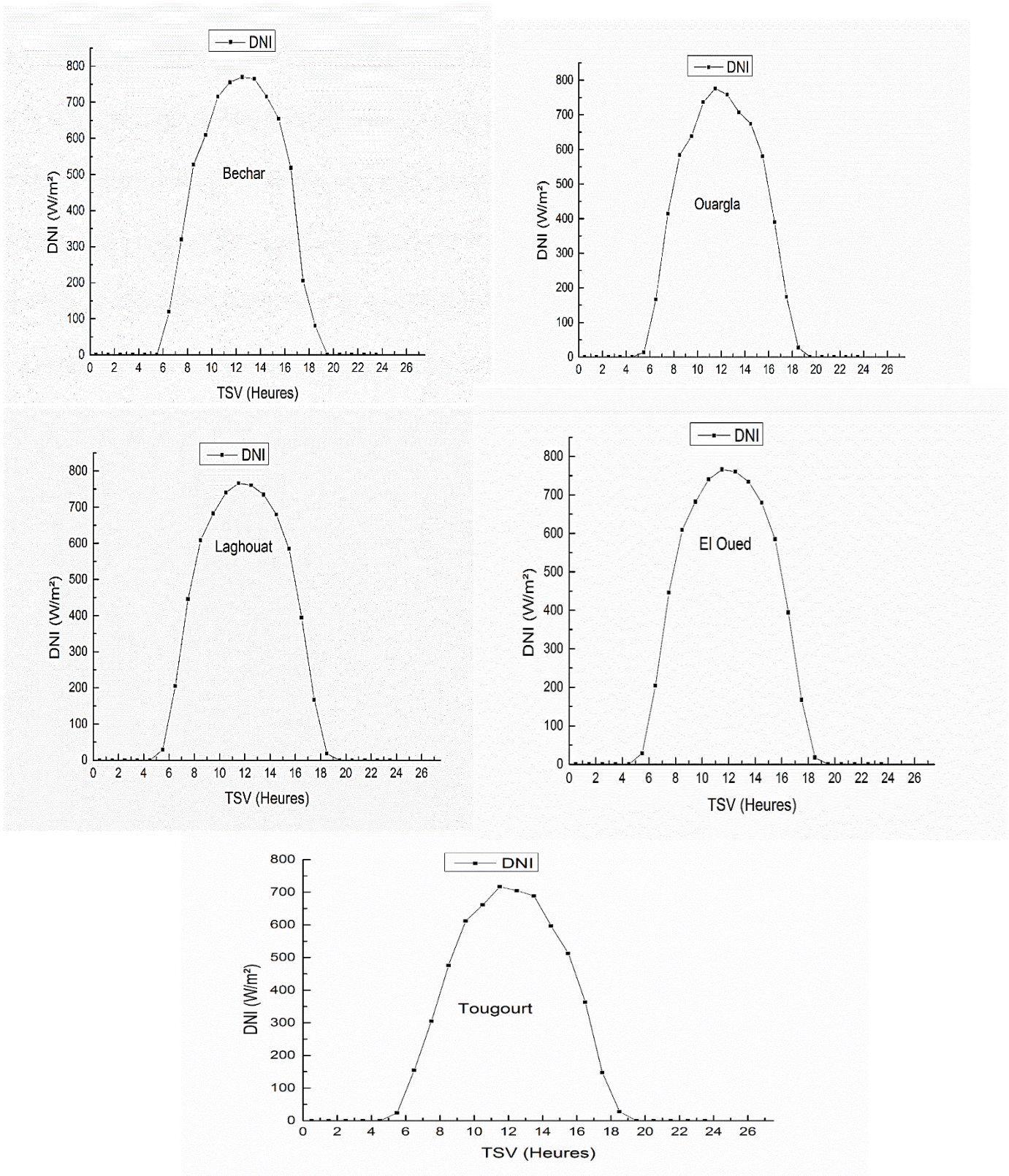


Figure IV-2 : Moyennes annuelles des profils de DNI pour les 5 site.

Tableau IV-1 : Le tableau ci-dessus représente les paramètres de ces sites.

Paramètre	Bechar	El Oued	Laghouat	Ouargla	Tougourt
Latitude(°)	32.043	33.36	33.413	31.935	33.01
Longitude(°)	-1.239	6.865	3.571	5.393	6.012
Altitude(m)	820	81	751	141	81
Température ambiante(°C)	20	21.6	19.4	23.2	22
Vitesse de vent (m/s)	3.2	4.2	4.4	4.1	4.1
DNI (kWh/m².an)	2467.5	2485.0	2338	2423.1	2185.3

Les Critères de choix des sites pour les centrales CSP :

- Longue durée de mesure de l'ensoleillement direct.
- L'irradiation normale directe supérieure ou égale à 1800KWh/m².an
- Topographie du site : plate, de pente inférieure à 5%
- Prix du terrain
- Nature du terrain
- Climat : chaud et sec
- Proximité du réseau électrique et gazier
- Proximité du réseau de gaz (pour l'appoint)
- Proximité aux infrastructures
- Prix de KWh électrique du conventionnelle élevé
- Disponibilité de sources d'eau
- Site éloigné des sources de poussière et des zones industrielles
- L'inexistence ou faible fréquence de vent de sable
- Site pas trop venté (-30 jours /an)
- Pas d'obstacle vers l'hémisphère sud
- Eloignement de résidences publiques

IV.3.Outil de modélisation :

Pour mener cette étude nous avons utilisé deux logiciels à savoir métronome et Greenuis. Donc le premier sert pour la création de fichier météorologique d'abord en déterminant la localisation puis en introduisant les différentes données : température, DNI, humidité.

Après la création de fichier météo on va l'introduire dans Greenuis pour effectuer la simulation

IV.3.1. Présentation du logiciel METEONORM

METEONORM est un logiciel qui offre un recueil très complet de données météorologiques, développé par la société Suisse Meeteotest leader dans les domaines de la météo, du climat, de l'environnement et des technologies de l'information. Il contient également des algorithmes permettant de créer à partir des valeurs Mesurées des fichiers météos depuis n'importe quel endroit sur le globe, il contient :

- Base de données : Base de données contenant plus de 8 325 stations météo.
- Paramètres mesurés : moyennes mensuelles du rayonnement global, température, Humidité, précipitation, jours avec précipitation, vitesse et direction du vent, durée D'insolation.

Ce logiciel s'adresse aux ingénieurs, architectes, enseignants, concepteurs et toute personne Qui s'intéresse à l'énergie solaire et à la climatologie.

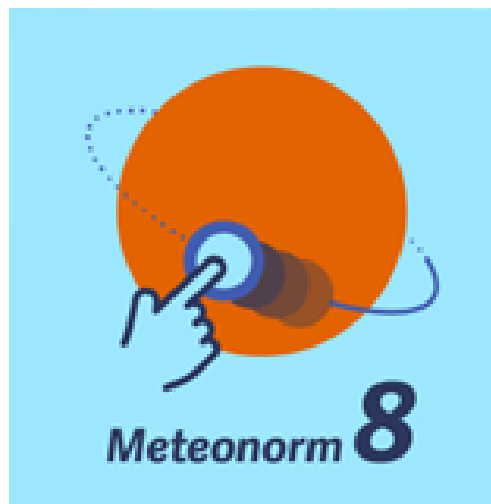


Figure IV-4 :Logiciel Meteonorm [39].

IV.3.2. Présentation du logiciel GREENIUS :

Greenius est un logiciel puissant de simulation pour le calcul et l'analyse de projets des Énergies renouvelables pour la production d'électricité ou de la chaleur. C'est un logiciel Gratuit [40], qui nous permet de simuler les fonctionnements des centrales solaires thermodynamiques des systèmes photovoltaïques, les systèmes à climatisation solaire. Ce programme offre une combinaison des calculs techniques et économiques détaillés comme ils sont nécessaires pour la planification et l'installation des projets à énergies renouvelables. Les résultats de calculs 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 Kistner, WinfriedOrtmanns, Dr. Volker Quaschning et Dr. Jürgen Dersch. La vente, la distribution et le service sont faits sous le permis du DLR.

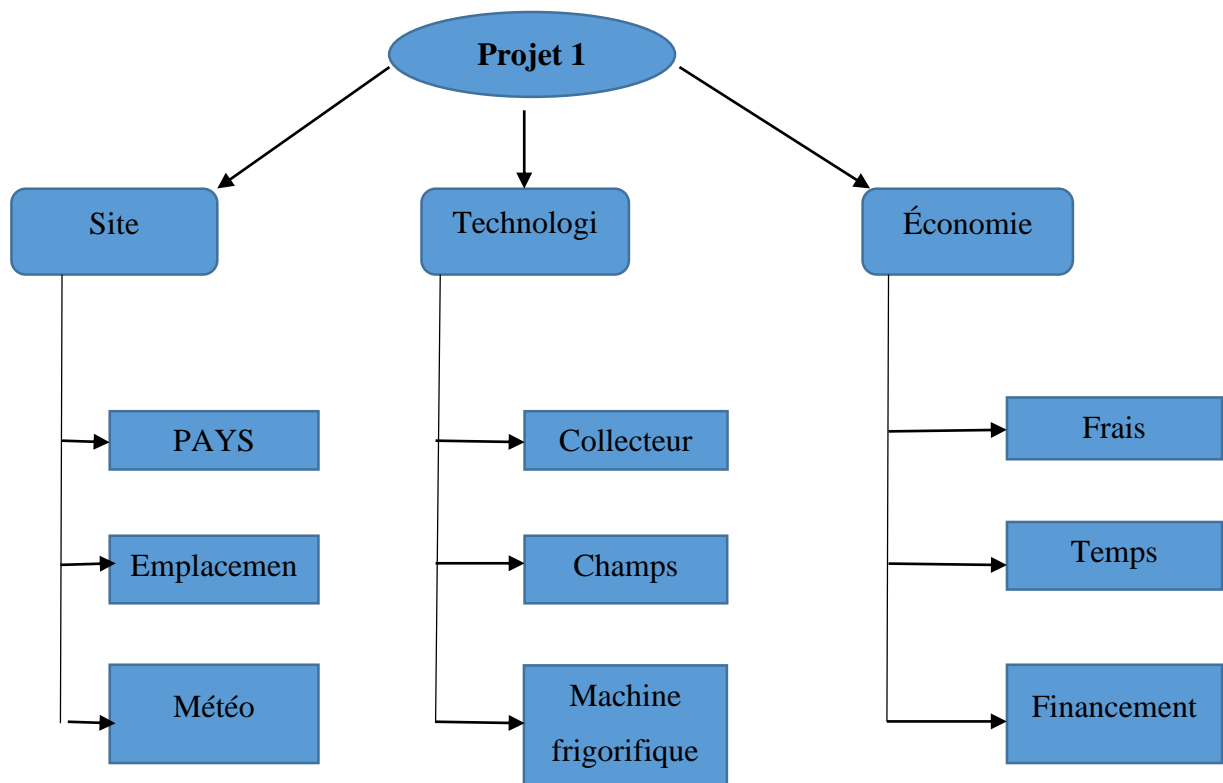


Figure IV-5: Processus de fonctionnement du logiciel de Greenius.[40]

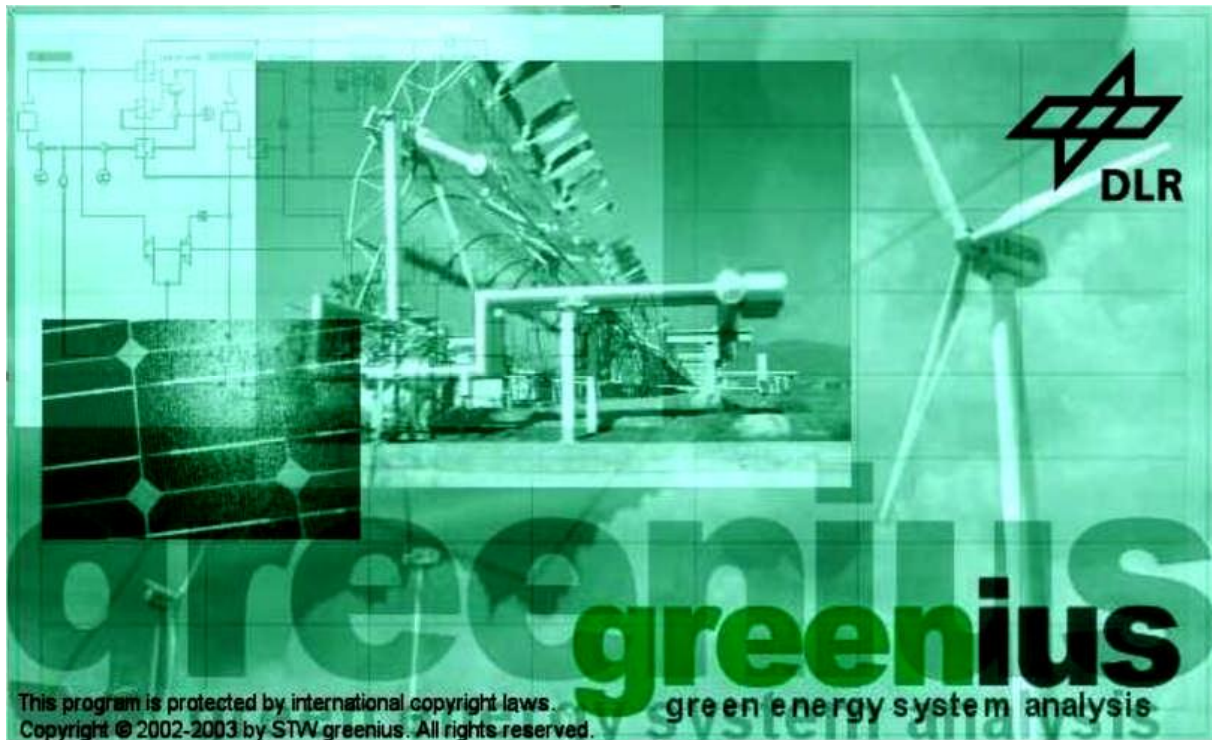


Figure IV–6 :Page de couverture du logiciel Greenius [40].

IV.3.3. Assistant (Wizard) :

Quand on exécute le logiciel, la fenêtre d'assistant illustrée dans la figure-20- apparaît automatiquement sur le bureau. Elle permet aux utilisateurs de créer de nouveaux projets ou l'ouverture des projets existants. Avec la commande ESC nous pouvons fermer la fenêtre Assistant. À l'entrée de menu Fichier/Assistant respectivement la commande F12, et par la suite nous pouvons recommencer avec l'Assistant (Wizard) à n'importe quel moment.



Figure IV-7 :Fenêtre d'Assistant (Wizard) [41]

IV.4.Les étapes à suivre pour la simulation de projet :

Dans ce que suite on va expliquer brièvement les différentes étapes de notre modélisation.

Dans la première étape nous avons déterminé la localisation du site à étudier

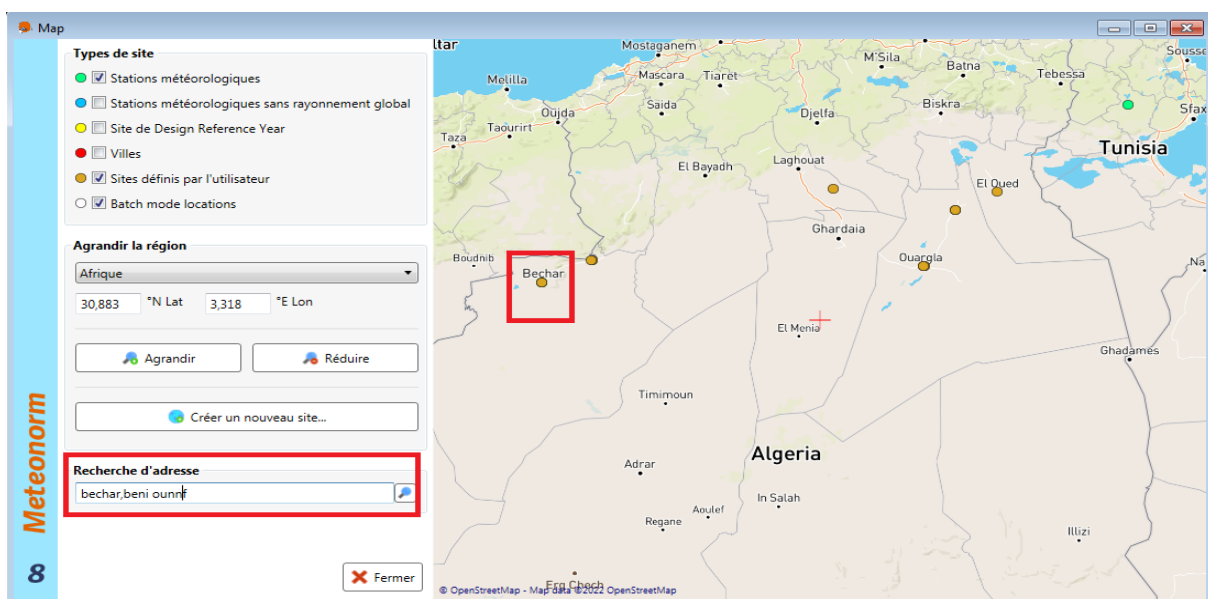


Figure IV-8: localisation de site se Meteonorm.

Après avoir définis le site et la détermination des coordonnées géographiques tel que (longitude, latitude), nous avons sélectionné le site pour et l’ajouté à la liste des projets.

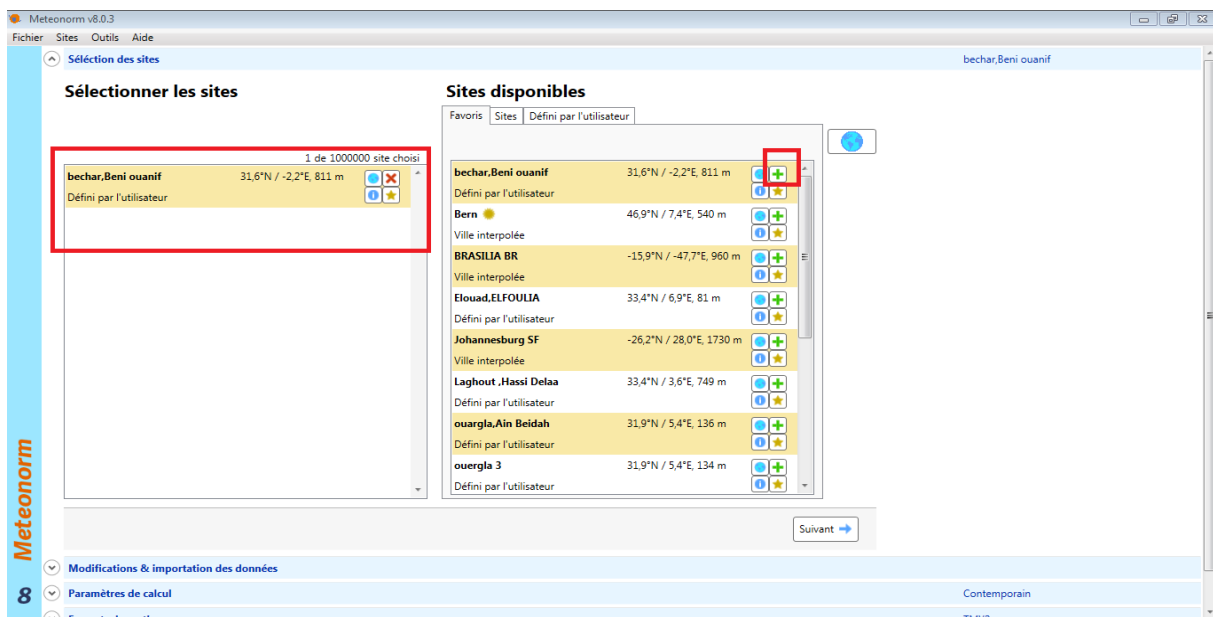


Figure IV-9 : coordonnées géographiques du site.

La troisième étape sert à choisir l’extension de fichier météo à générer et l’application à étudier, cette dernière va être introduite dans Greenuis

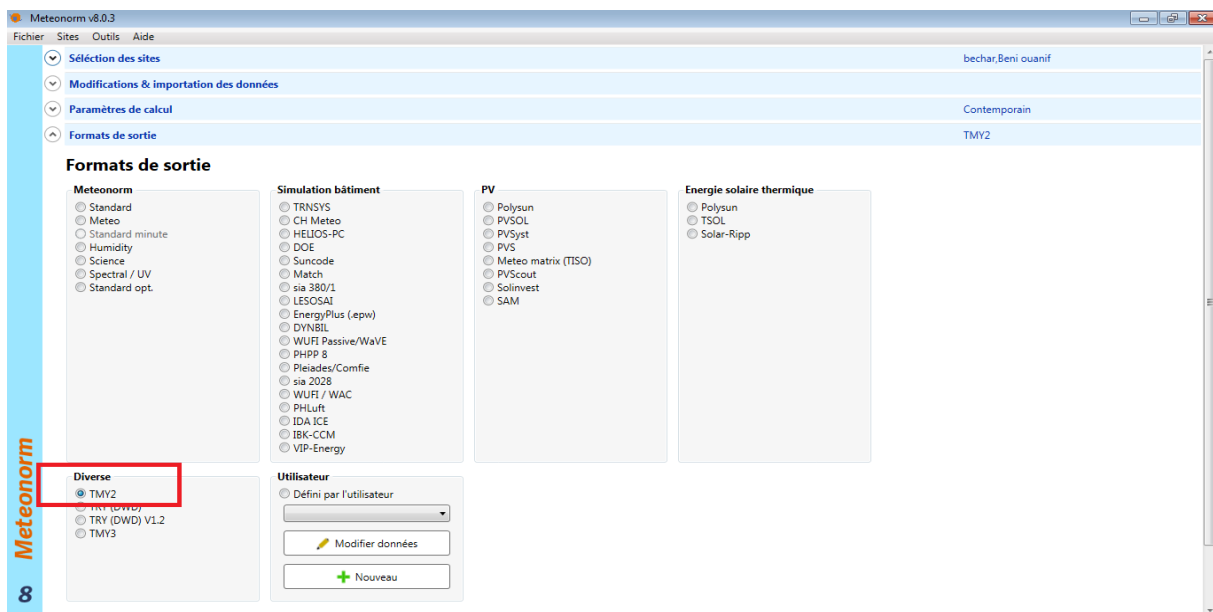


Figure IV-10 : le choix de l’extension de l’application.

La dernière étape est l’illustration des défèrent paramètre météorologiques du site considéré.

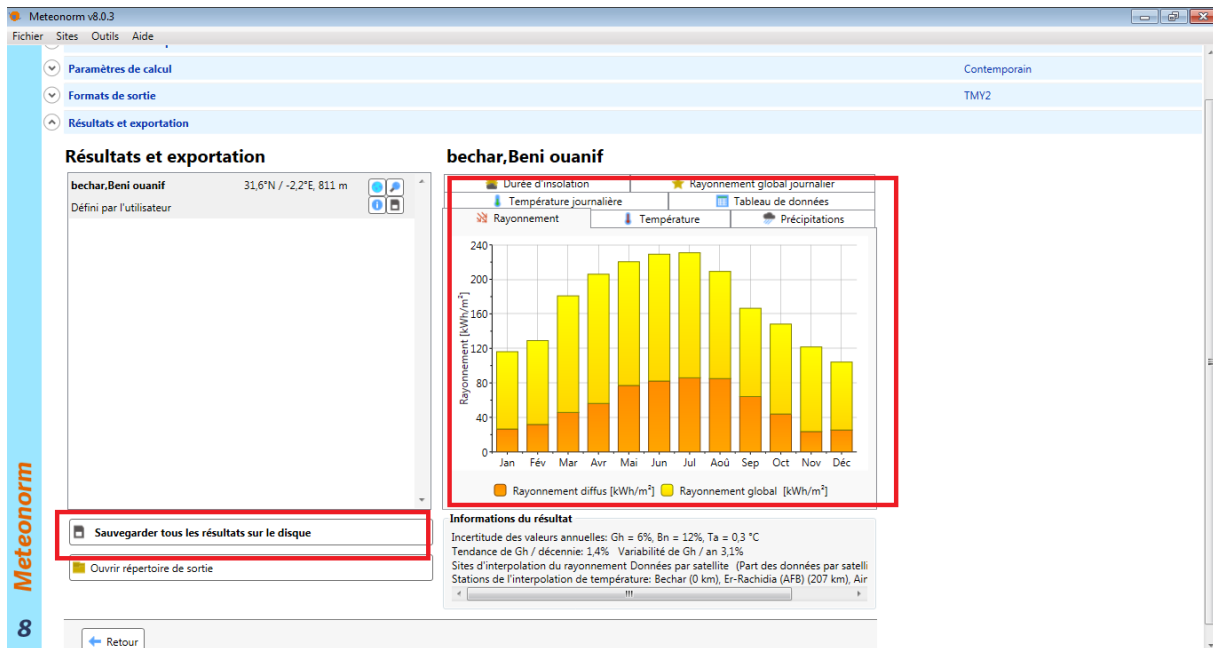


Figure IV-11 : Résultats et illustration des paramètres.

Après avoir créé les fichiers météorologiques, on les a introduits dans le deuxième outil de modélisation (Greenius) afin de déterminer les performances de notre système dans les différents sites, on va présenter brièvement les étapes suivies lors de la modélisation sous Greenius.

IV.4.1. Création d'un nouveau projet :

Pour créer un nouveau projet, il suffit de cliquer sur le bouton New Project dans la Fenêtre d'assistant (figure 5), ensuite la fenêtre présentée sur la (figure 0-6) s'ouvre. Dans Cette fenêtre on attribue un nom au projet afin de le distinguer des autres. Une fois le projet est défini, une fenêtre de sélection de technologie s'ouvre automatiquement (voir figure 0-7), Cette fenêtre nous montre la technologie choisie sur laquelle nous allons faire notre étude.

Enfin les données météorologiques du site doivent être chargées, cette étape est essentielle pour toutes les technologies des énergies renouvelables.



Figure IV-12 :Fenêtre du nouveau projet.[41]

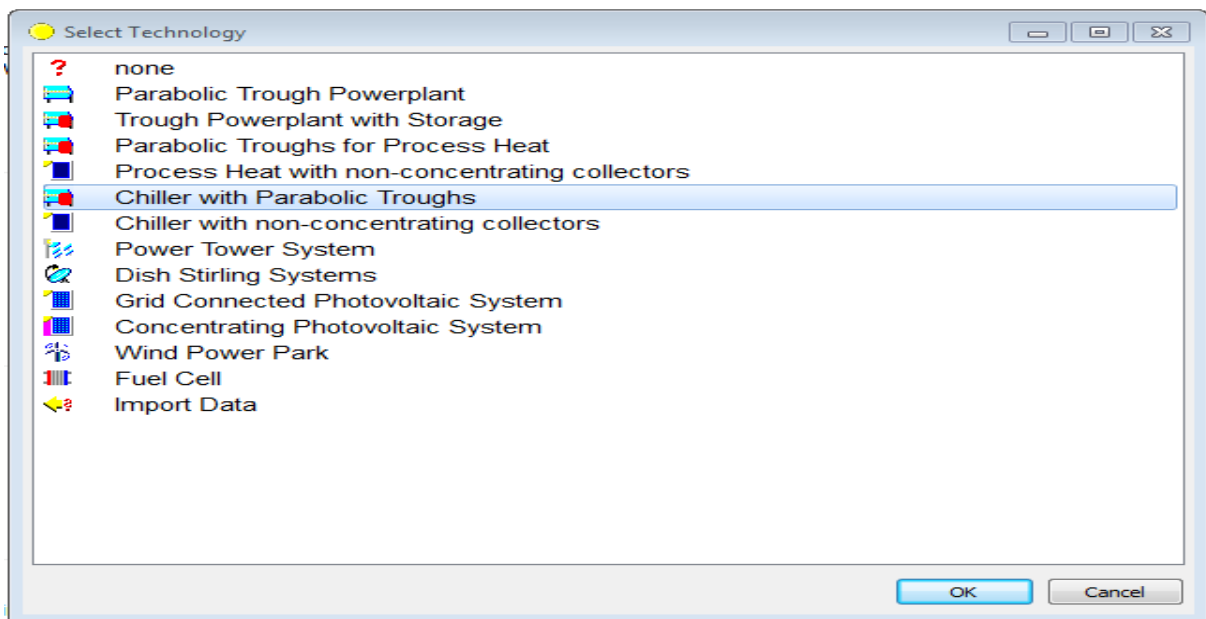


Figure IV-13 :Fenêtre du choix de la technologie

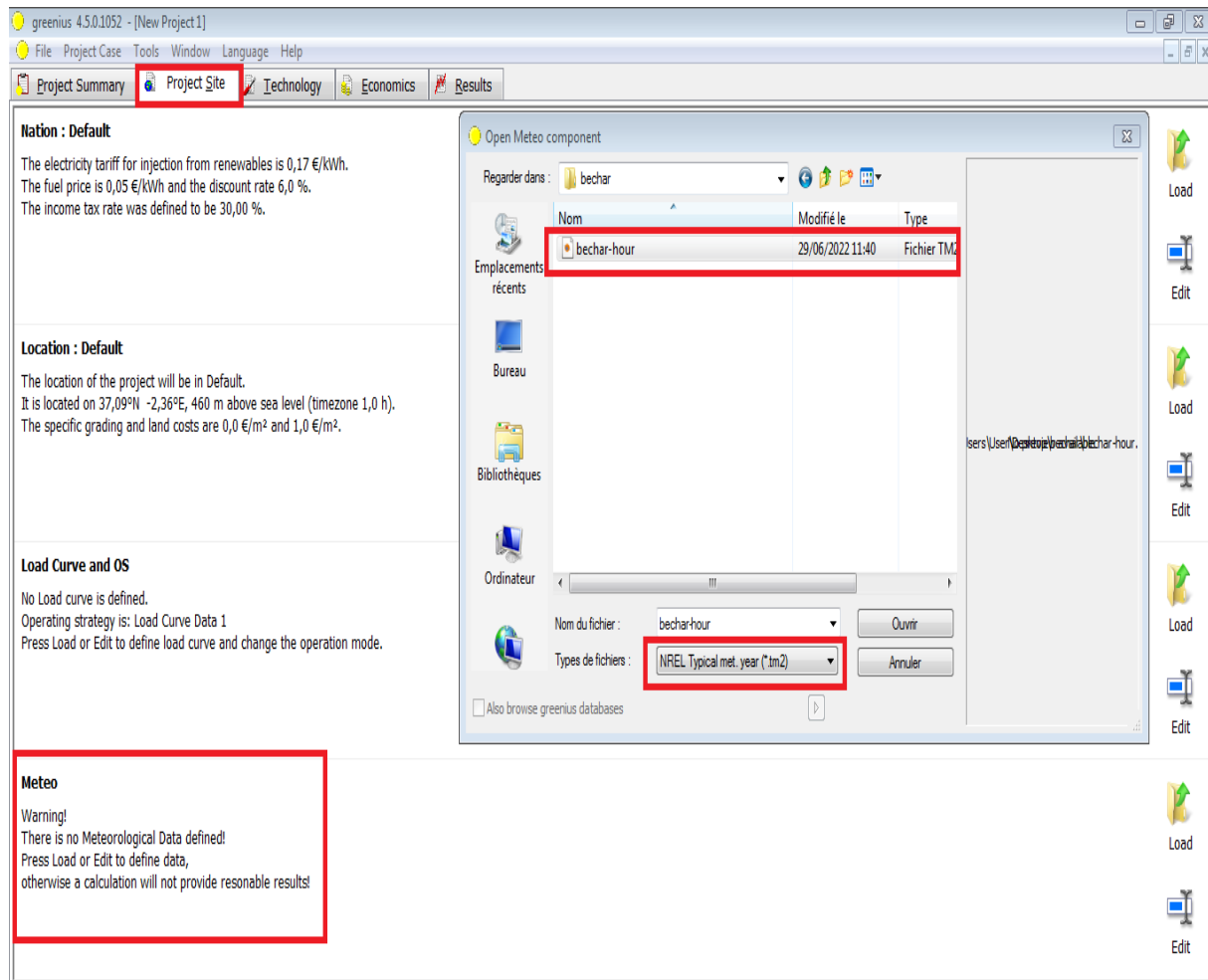


Figure IV-14 : la fenêtre des Données météorologiques du site.

IV.4.2. Écran Principal :

Dans cette fenêtre nous pouvons choisir la technologie, Au moment où le logiciel supporte les technologies suivantes :

- Centrales solaires thermodynamique.
- Les systèmes photovoltaïques à concentration.
- Les fermes éoliennes.
- Centrales solaires avec systèmes de stockage thermiques.

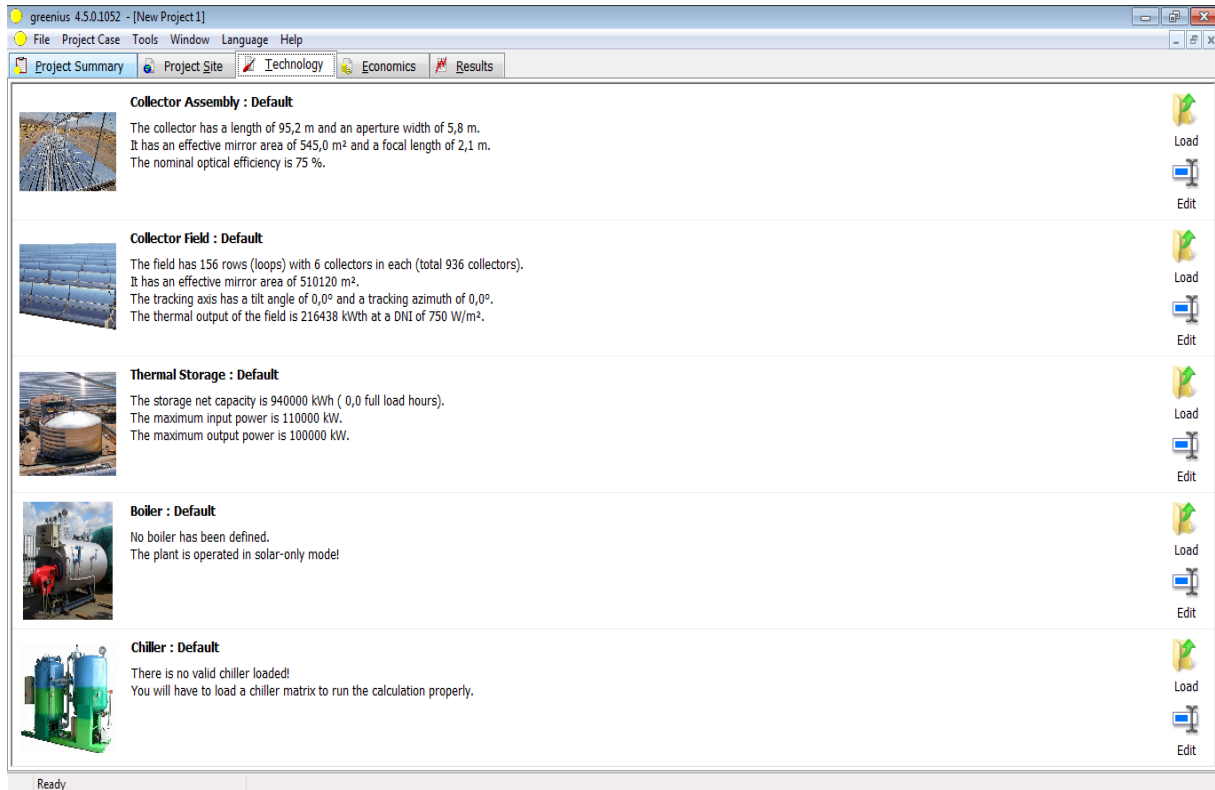
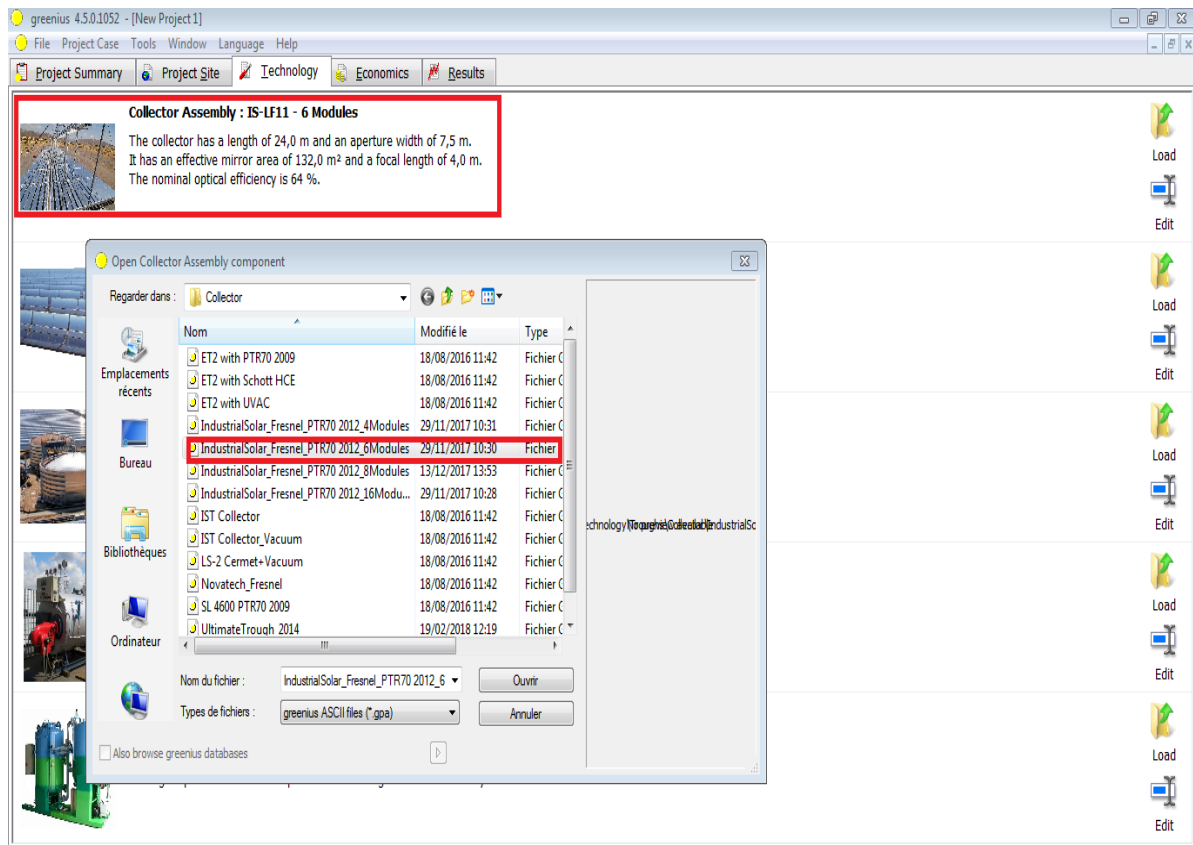


Figure IV-15 :Interface de l'écran principale sur Greenius.

Une fois nous avons introduit le fichier météo dans logiciel (Greenius), nous avons choisi la technologie des concentrateurs solaires de Fresnel couplé avec une machine frigorifique à absorption, et puis configurer les paramètres de fonctionnement de notre système :

Il s'agit de sélectionner les caractéristiques du champ solaire (nombre de modules et les dimensions), et sur la base du cahier des charges nous avons sélectionné la puissance de notre système afin de satisfaire la demande en puissance dans les différents sites, puis nous avons choisi un modèle de champ solaire amélioré, où on a introduit les paramètres d'entrés du champ solaire (nombre de ligne, nombre de rangé et le nombre de boucle....), enfin nous avons opté pour une génération direct de vapeur (Water/Steam).



FigureIV-16 : le champ solaire.

IV.5. Dimensionnement de la mini-centrale :

IV.5.1. Collecteur :

Dans les différents sites on a choisi le type de collecteur (industriel solaire –fresnel-PTR70 avec ces différents modules) d’après la listes des collecteurs disponibles dans Greenius. Dont les caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV-2 :les différents paramètres du collecteur IS-LF11.

Sites	Bechar	Ouargla	Tougourt	Laghouat	Elouad
Paramètre	Valeur				
Module de collecteur	IS-LF11 - 4 Modules	IS-LF11 - 6 Modules	IS-LF11 - 8 Modules	IS-LF11 - 16 Modules	IS-LF11 - 16 Modules
Longueur du collecteur (m)	16	24	32	64	64
Longueur focale (m)	4	4	4	4	4
Zone miroir effective (m ²)	88	132	176	352	352
Ouverture du collecteur (m)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Diamètre extérieur du tube absorbeur (m)	0.0655	0.0655	0.0655	0.0655	0.0655
La masse spécifique de l'absorbeur (kg/m)	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
La capacité thermique de l'absorbeur (Wh/kg.k)	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
Rendement optique nominal (%)	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5

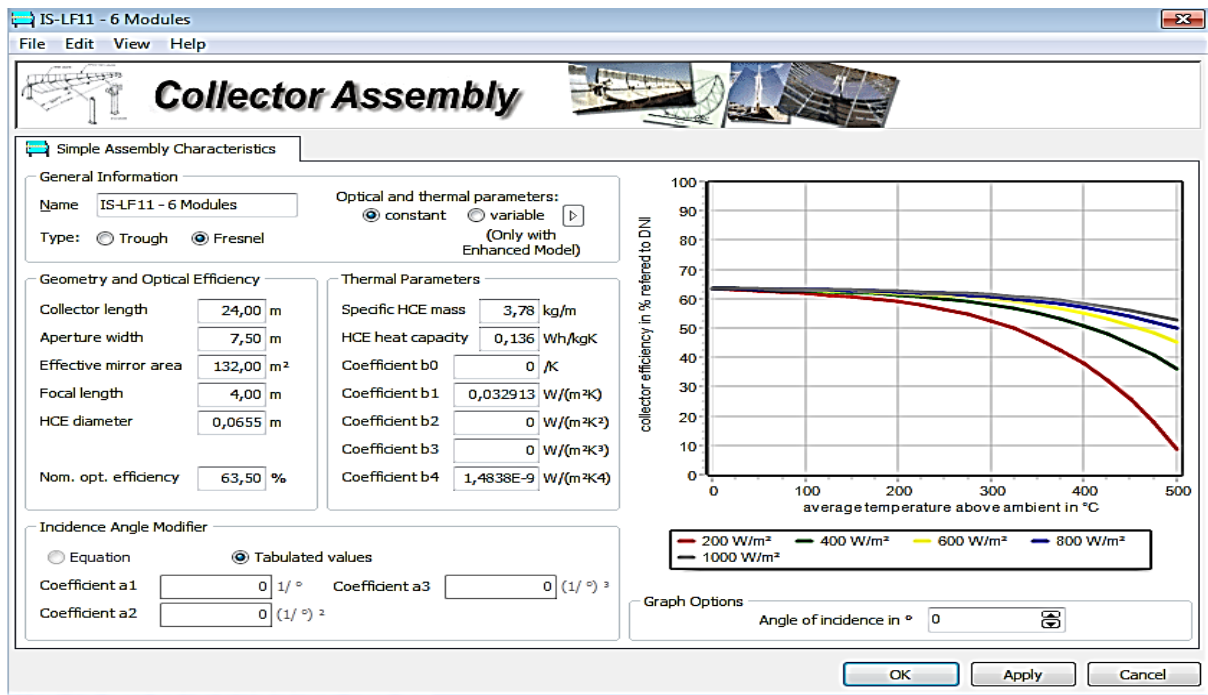


Figure IV–17 :Fenêtre Greenuis du collecteur IS-LF11-Modules [42].

IV.5.2. Champ solaire :

Le champ solaire est composé de collecteurs solaires linéaire de Fresnel connectés entre eux en série pour former de longues files qui à leur tour sont connectées en parallèle, par ailleurs nous avons dimensionné le champ solaire selon :

- La température du fluide de transfert en sortie.
- La puissance désirée (tout dépend des besoins du site et de la machine frigorifique).

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

Le tableau suivant indique les caractéristiques du tube en acier sans soudure utilisé dans le dimensionnement du champ solaire pour les cinq sites tels que : le diamètre et la masse spécifique.

Tableau IV-4 : Caractéristiques de la tuyauterie utilisé dans le champ solaire des deux Sites.

Diamètre nominal [m]	Diamètre Extérieur [mm]	Epaisseur de la paroi [mm]	Diamètre intérieur [mm]	Masse Spécifique [kg/s]
1	62.32	4.91	52.5	5.44

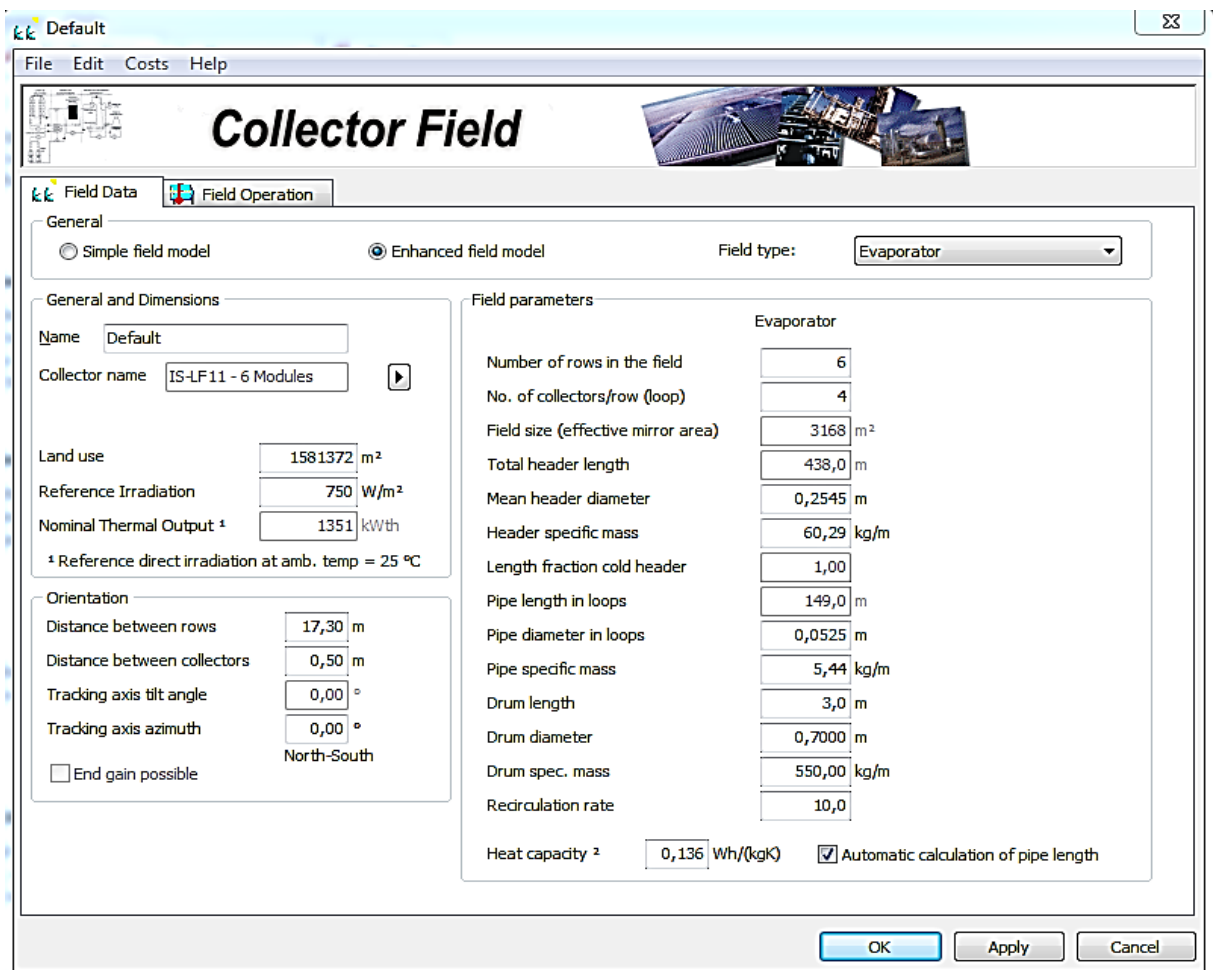


Figure IV-18 : FenêtreGreenuis avec les paramètres du collecteur [42].

Tableau IV-3 :Données du champ solaire.

Site/paramètre	Puissance thermique nominal[kWh]	Nombre des lignes dans le champ	Nombre des collecteurs /rangée (boucle)	Température d'entrée du champ [C°].	Température de sortie du champ [C°]
Bechar	15249	6	3	90	170
Ouargla	30497	6	4	90	180
Tougourt	101658	10	6	90	200
Laghouat	271089	10	8	90	220
Elouad	271089	10	8	90	220

IV5.3. Fluide de transfert

Nous avons choisi water/steam comme fluide de transfert à base de ses propriétés Thermodynamiques.

Water/steam elle est en phase l'eau vaporiser à haute température avec une excellente stabilité. Water/steam est conçu pour des températures allant jusqu'à 800 [°C] pour les phases gazeuse et liquide d'un système thermique. Une pression statique d'environ 10 [bar] est nécessaire pour travailler en phase liquide à des températures élevées, ses principales propriétés sont données aux Tableau.

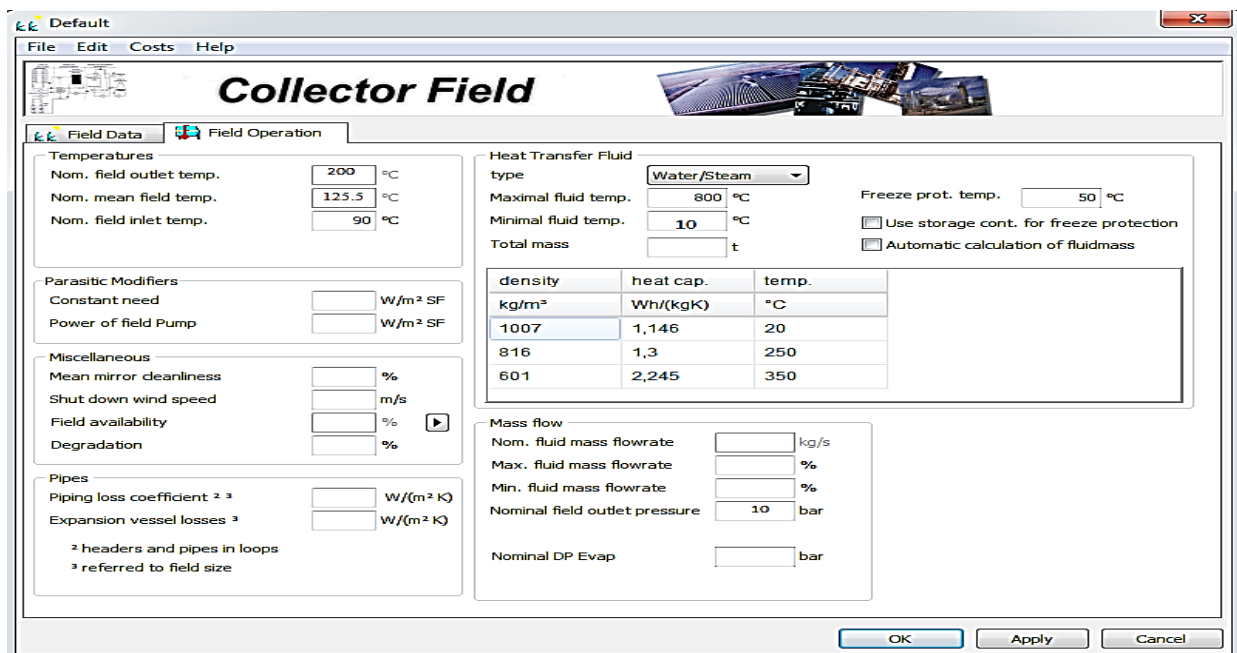


Figure IV-19 :Fenêtre Greenuis avec les paramètres du collecteur.

Tableau IV-4 : Propriétés du Fluide l'eau évaporateur .

Caractéristiques	Valeurs
Aspect	Clair, inclure comme l'eau
Composition	H ₂ O
Température d'ébullition normale	100 [C°]
Température maximale du fluide	800 [C°]
Température minimale du fluide	10 [C°]
Plage d'utilisation optimale (Liquide)	8 [C°]-800 [C°]
Plage d'utilisation optimale (Vapeur)	150 [C°]-800 [C°]

On Sélectionne dans le logiciel un système solaire à absorption pour mener notre étude

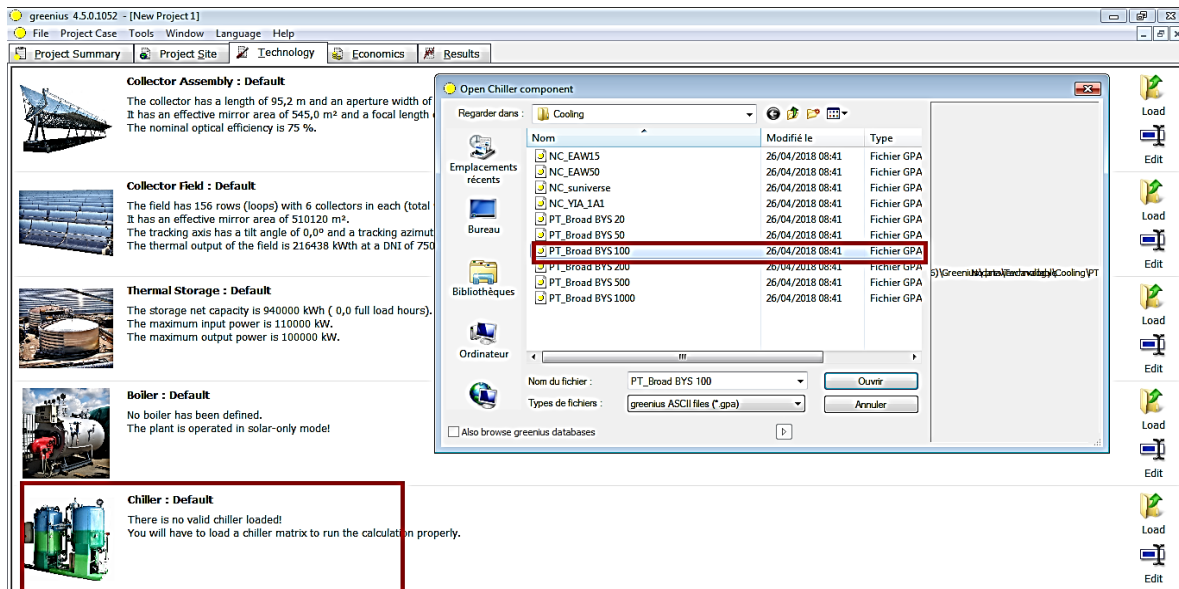


Figure IV-20 : le choix de la machine frigorifique.

Comme les sites choisis sont caractérisés par un important potentiel solaire, alors nous avons pris un système sans hybridation (sans chaudière de sauvegarde), ce qui veut dire une production 100% solaire, car notre objectif principal dans notre étude est de favoriser au maximum la production solaire. (Figure IV–21)

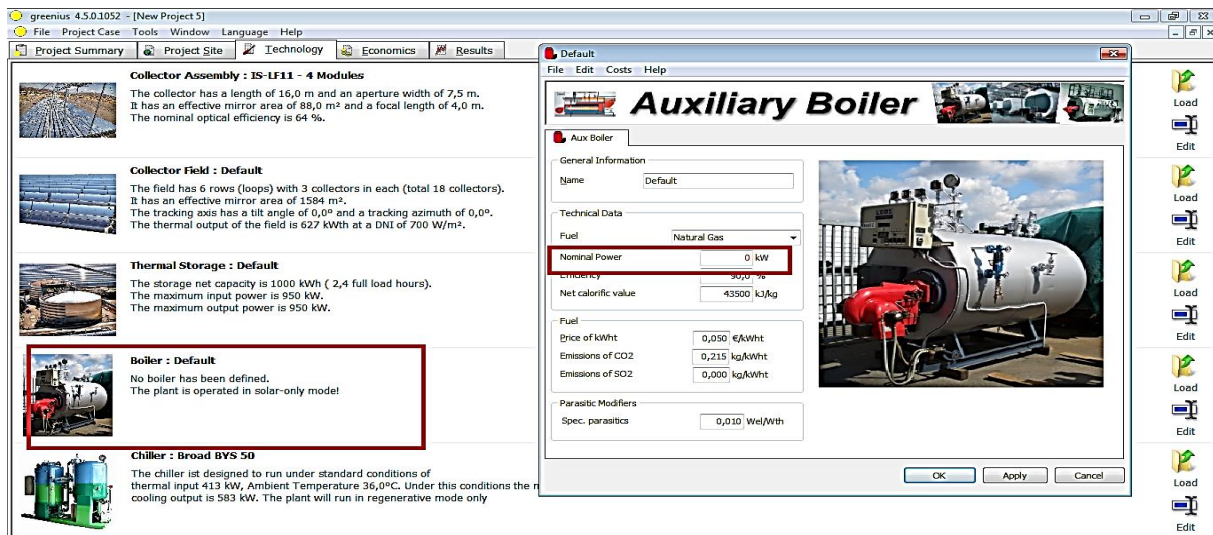


Figure IV–21 : Fenêtre du système d’appoint (Boiler) pour le site.

Comme les centrales solaires à concentration sont caractérisées par une production importante de l’énergie thermique surtout dans nos sites, ce qui va nous donner un excès d’énergie produite, alors nous avons opté pour une production solaire menée d’un système de stockage thermique, ce dernier va nous assurer une continuité de production notamment la nuit et les périodes de faibles ensoleillement. (Figure IV–22).

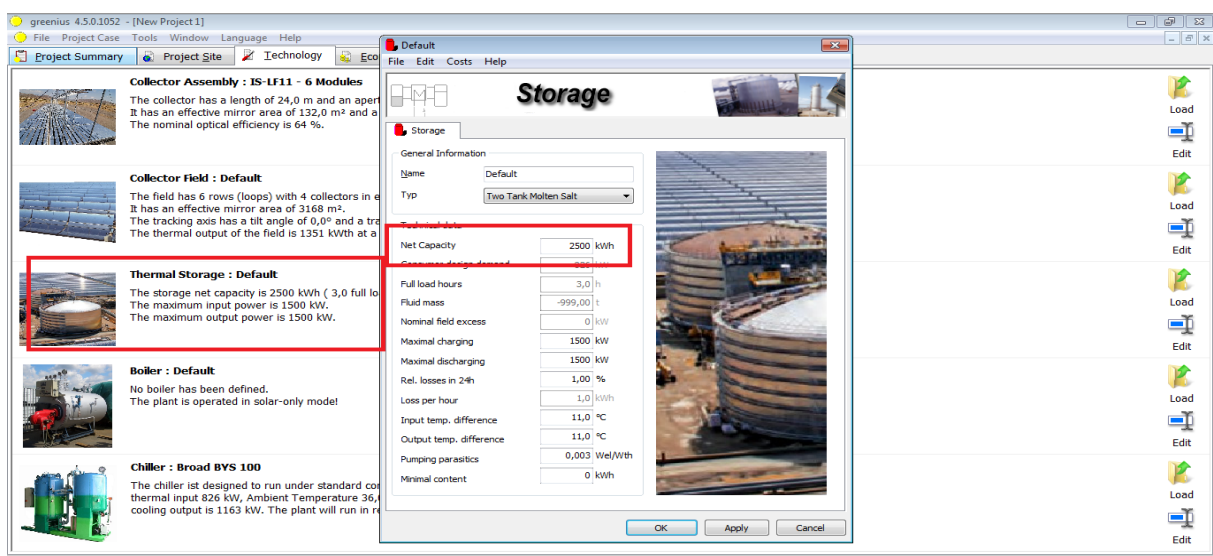


Figure IV–23 : la fenêtre stockage de système pour le site.

Une fois configurer notre modèle et introduire les différents paramètres de notre système, on lance le calcul pour déterminer les performances de notre système, les résultats concernés sont :

- La puissance absorbée par l'absorbeur
- La puissance produite par l'absorbeur
- L'énergie utile
- Le rendement optique
- Le rendement thermique
- La puissance frigorifique produite
- L'efficacité de notre système

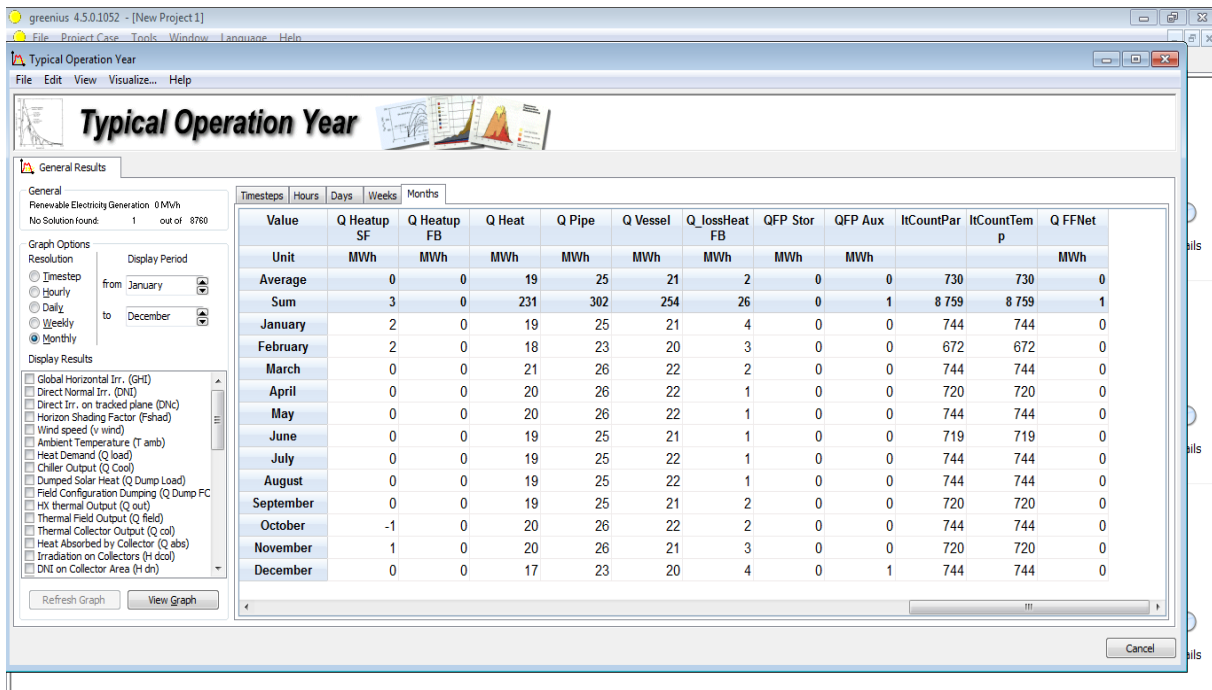


Figure IV–24 : la fenêtre de lancement de calcul et les résultats finaux obtenus.

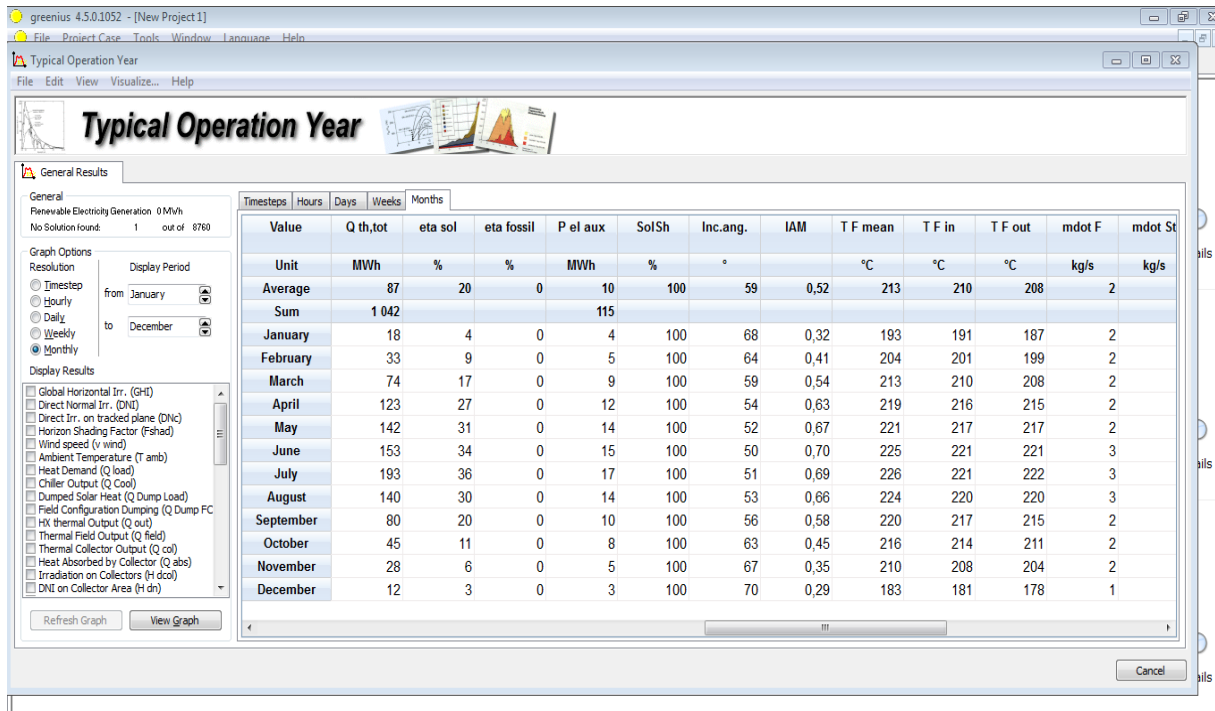


Figure IV–25 : la fenêtre de lancement de calcul et les résultats finaux obtenus (suite)

IV.6. Résultats et interprétation :

Le bilan énergétique cote thermique :

L'énergie solaire disponible :

$$Q_S = \text{DNI} \times \text{Surface d'échange} \dots \dots \dots \text{(IV-1)}$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_S \times \eta_{\text{optique}} \times p \times \alpha \times \mathcal{Z} \dots \dots \dots \text{(IV-2)}$$

$$Q_U = h \times S \times \Delta T \text{ ou bien} \dots \dots \dots \text{(IV-3)}$$

$$= m \times c_p \times \Delta T \dots \dots \dots \text{(IV-4)}$$

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d'une centrale solaire à collecteur linéaire de Fresnel couplée avec une machine frigorifique à absorption, pour plusieurs conditions de travail et sous différentes conditions climatiques

IV.6.1. Puissance produite par le champ solaire :

IV.6.1.1. Site de Béchar :

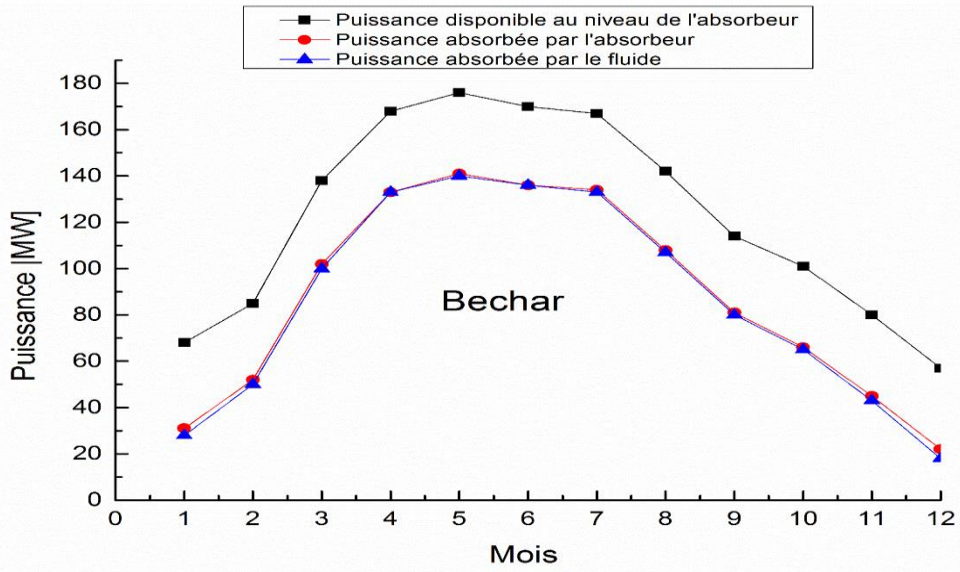


Figure IV-26 : les répartitions des puissances au niveau de l'absorbeur pour le site Béchar.

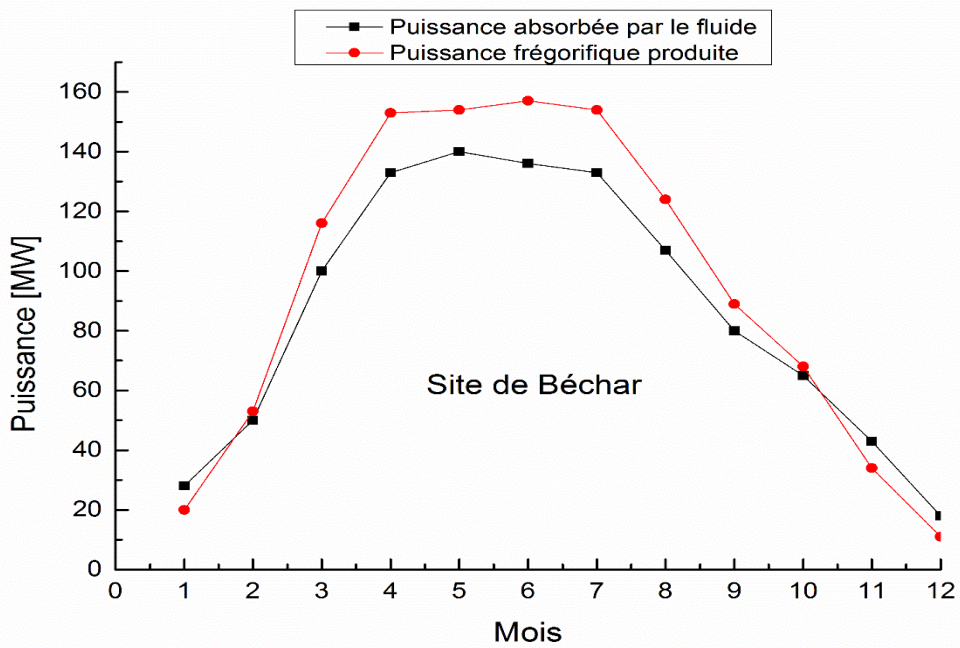


Figure IV-27 : l'évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site de Béchar

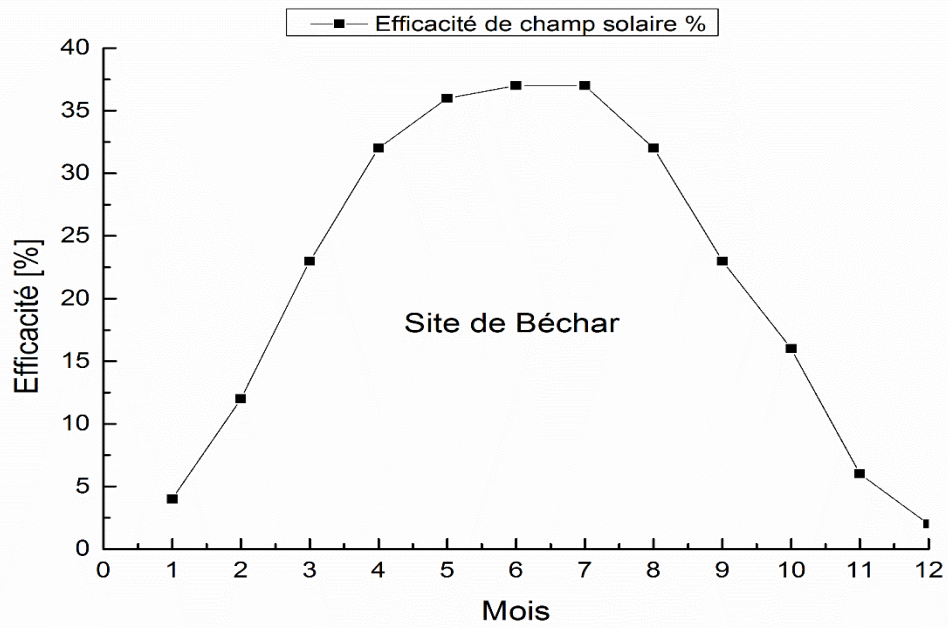


Figure IV-28 : l'évolution de l'efficacité de site de Béchar

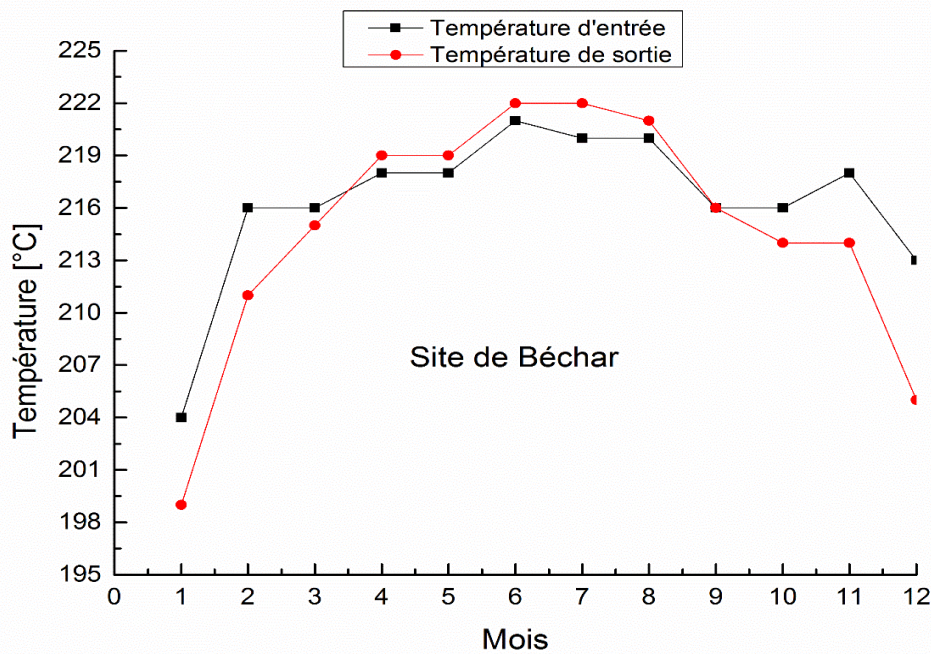


Figure IV-29 :La variation des températures au niveau de l'absorbeur pour le site de Béchar

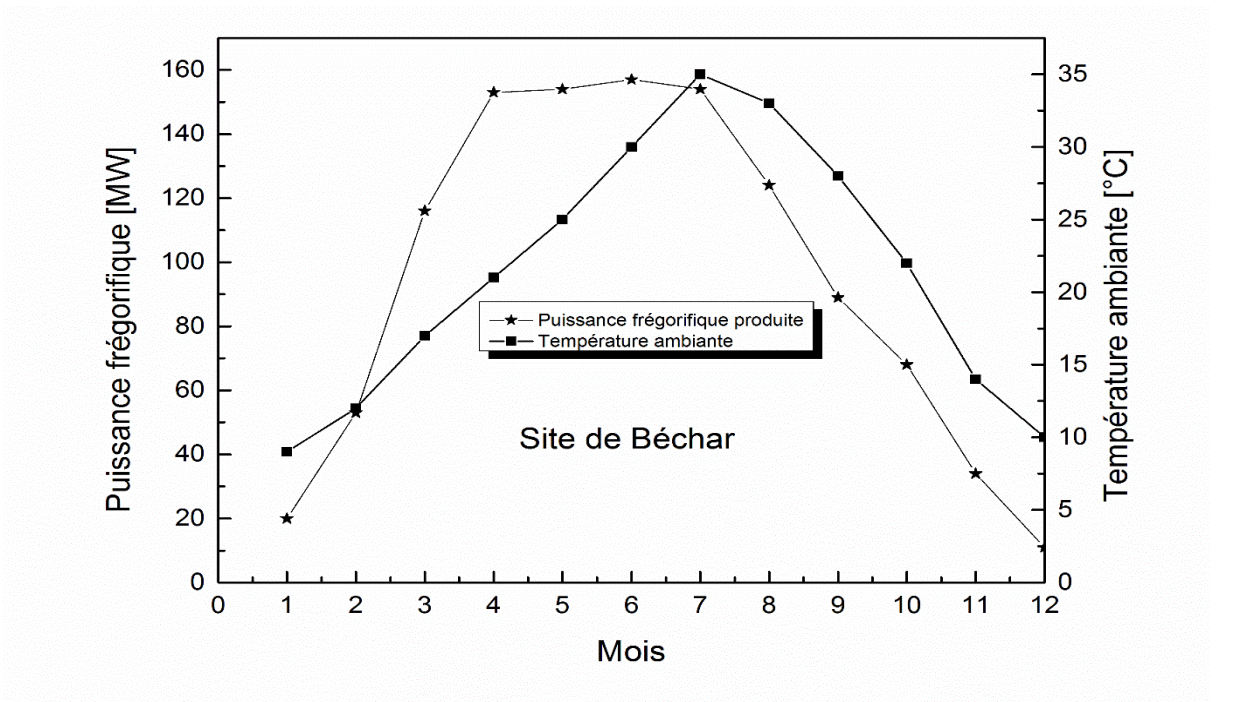


Figure IV-30 :La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante

Site de Leghouat :

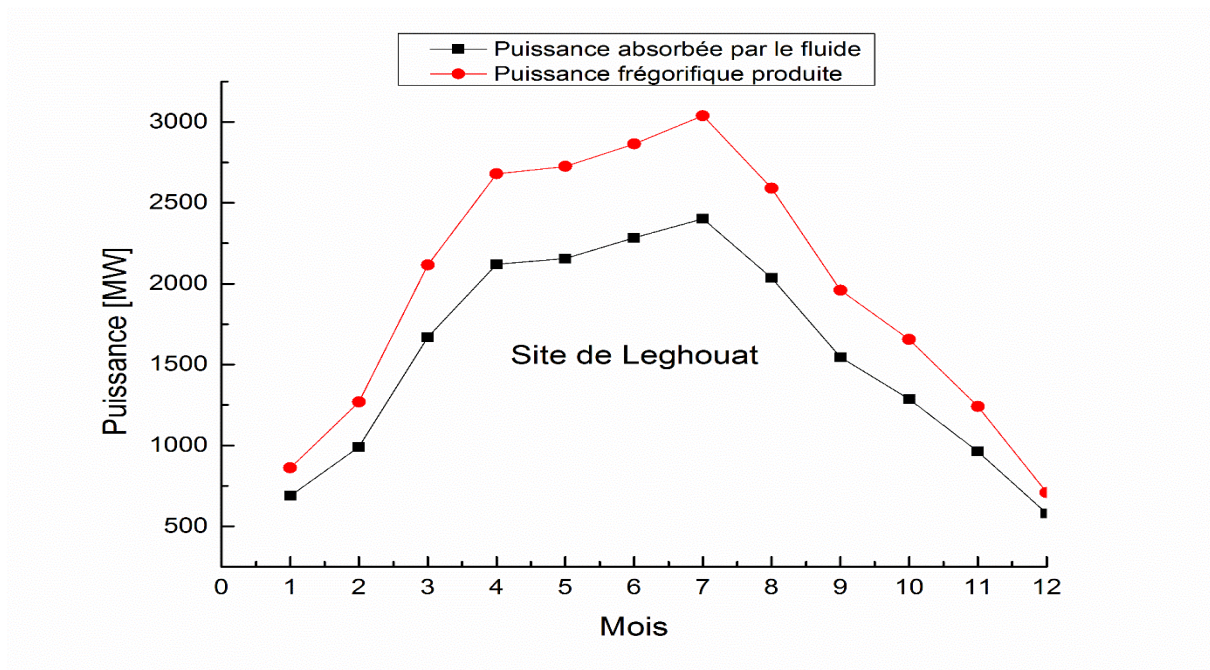


Figure IV-31 :Les répartitions des puissances au niveau de l'absorbeur pour le site Laghouat

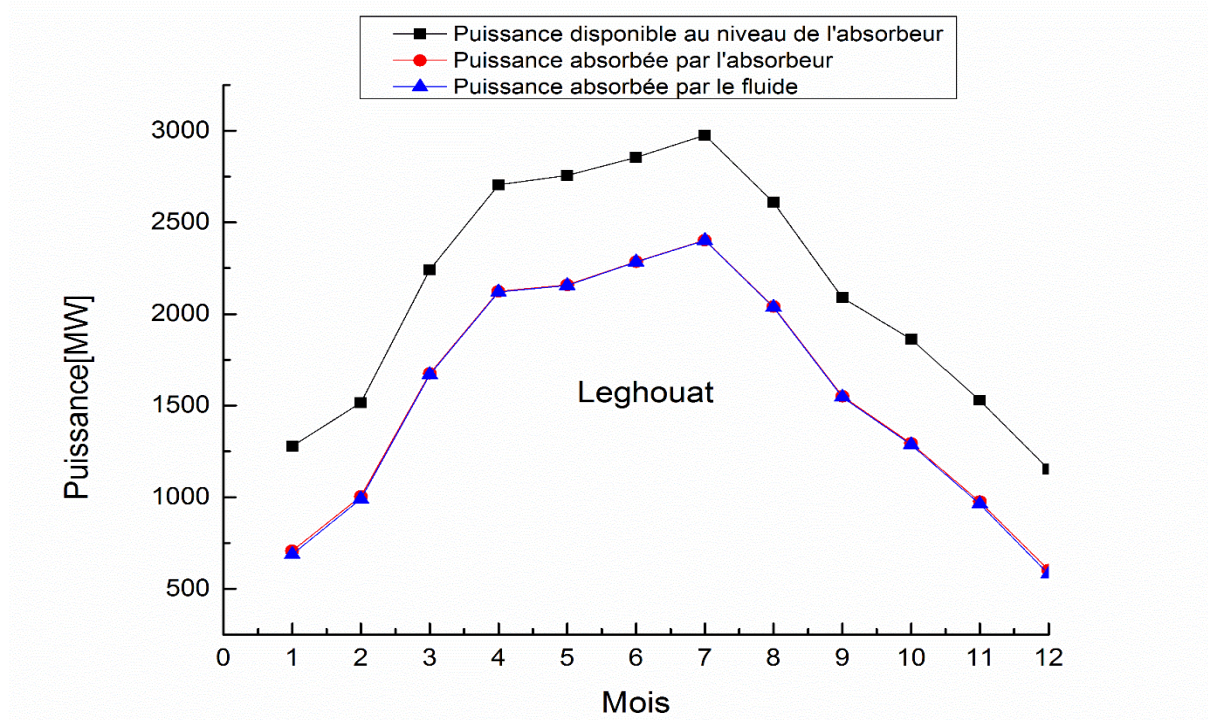


Figure IV–32 : l'évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site de Laghouat

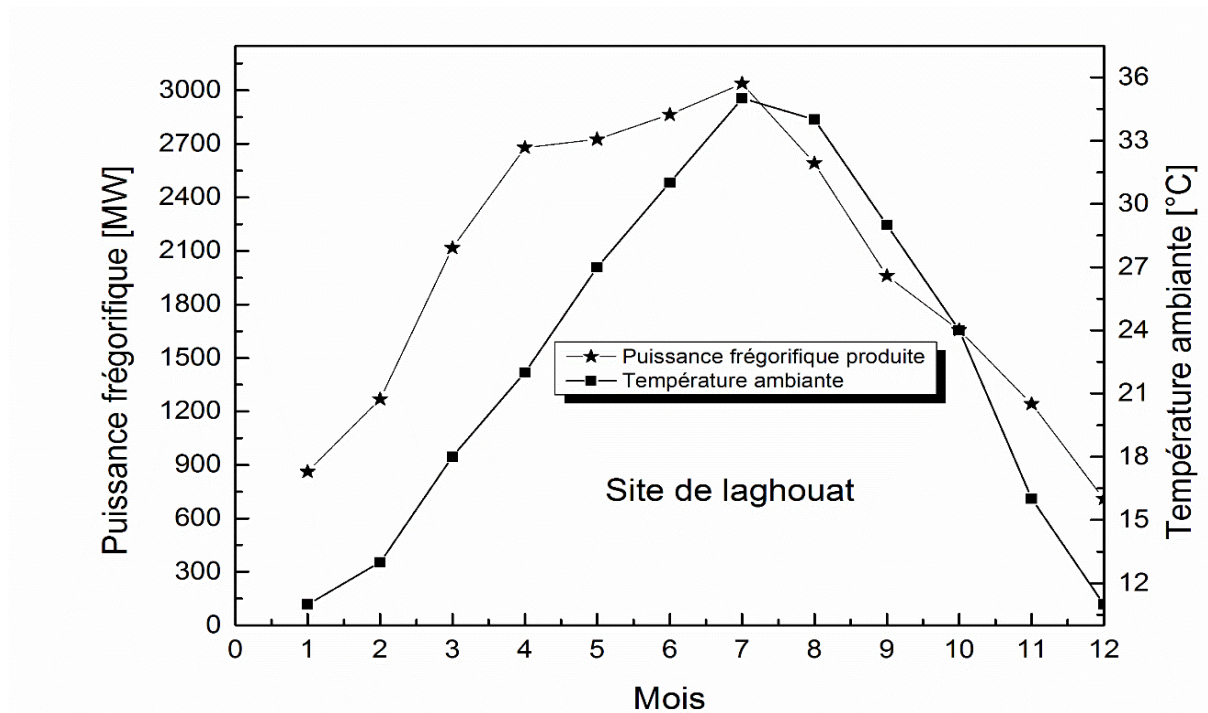


Figure IV–33 :La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site de Laghouat

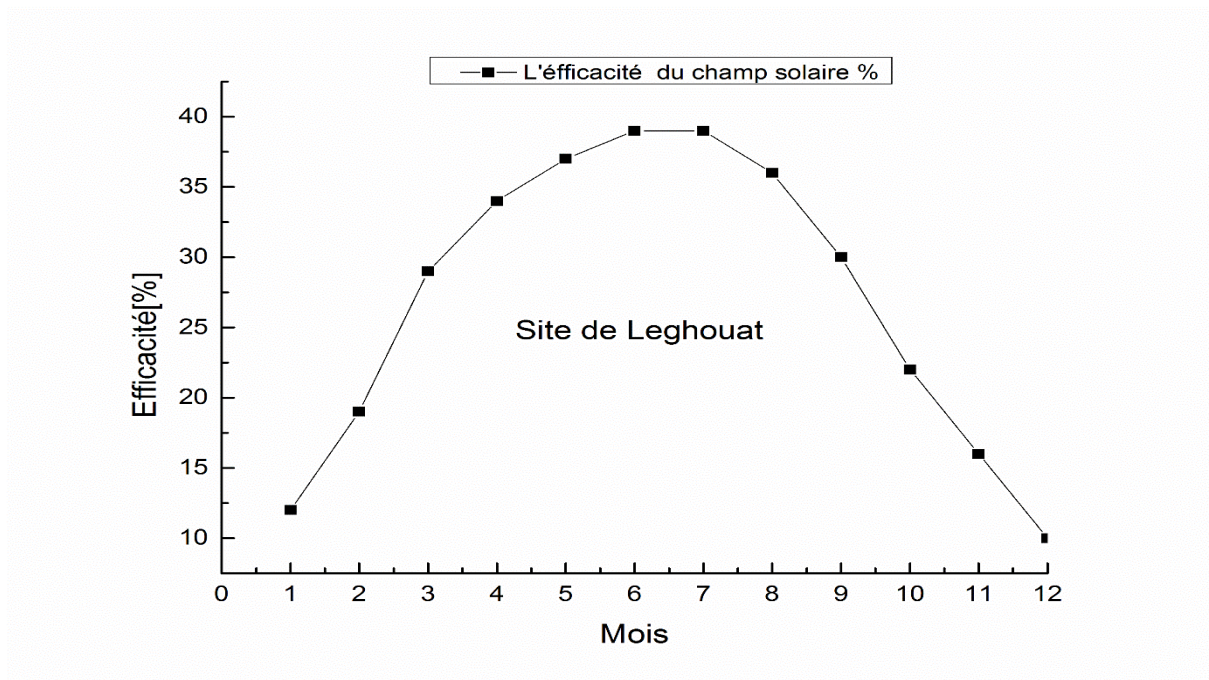


Figure IV-34 :l'évolution de l'efficacité de site de Laghouat

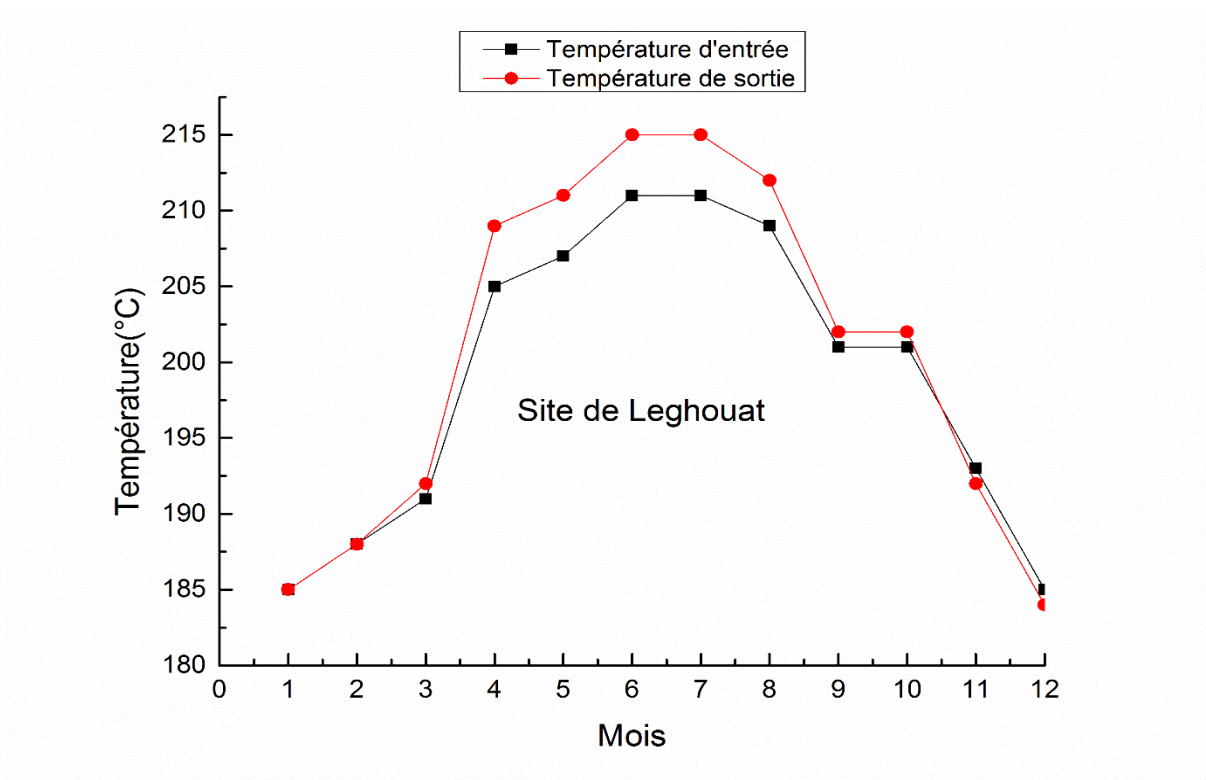


Figure IV-35:la variation des températures au niveau de l'absorbeur pour le site de Laghouat.

Site de Ouargla :

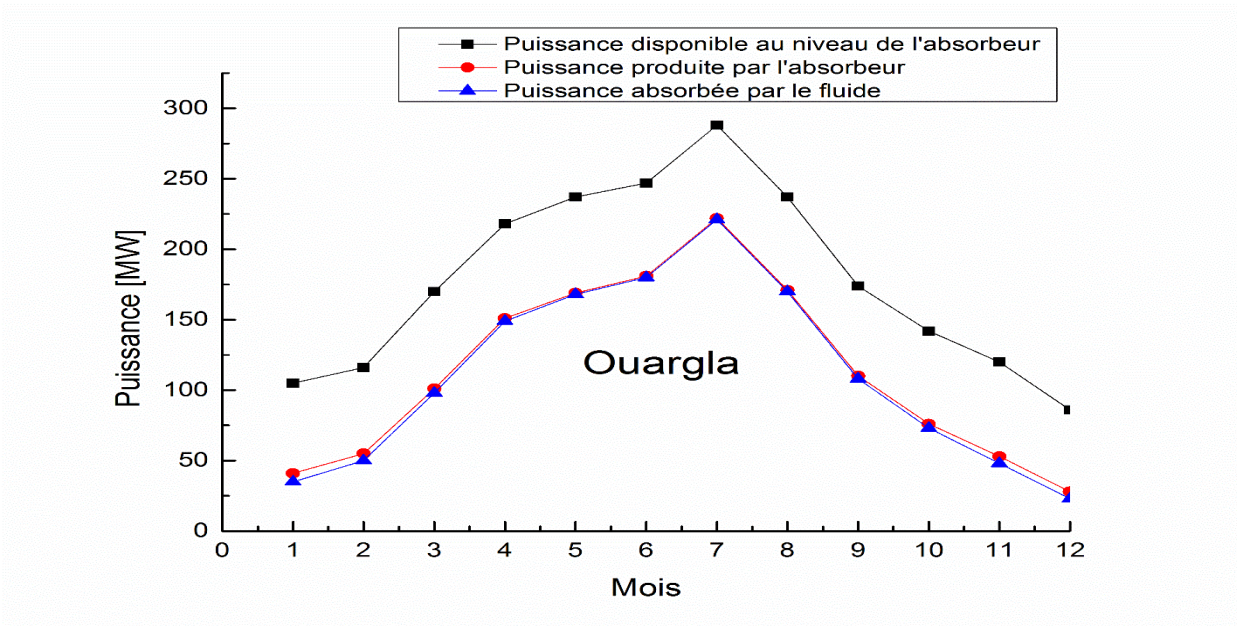


Figure IV-36 : Les répartitions des puissances au niveau de l'absorbeur pour le site Ouargla.

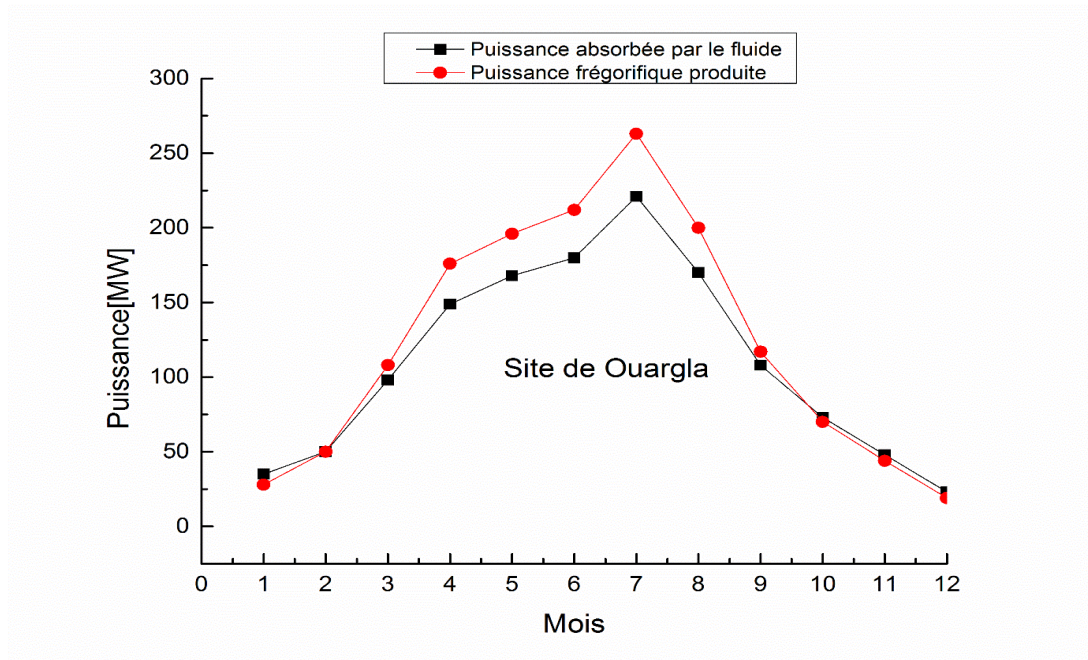


Figure IV-37 : La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site d'Ouargla.

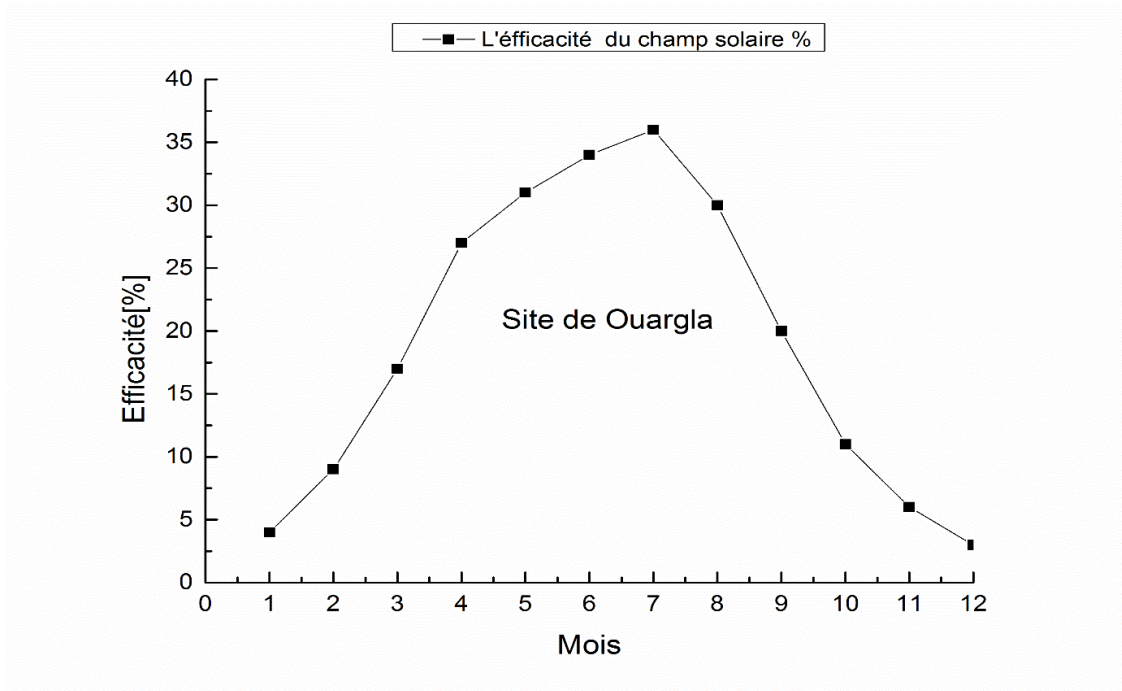


Figure IV–38 : l'évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site d'Ouargla.

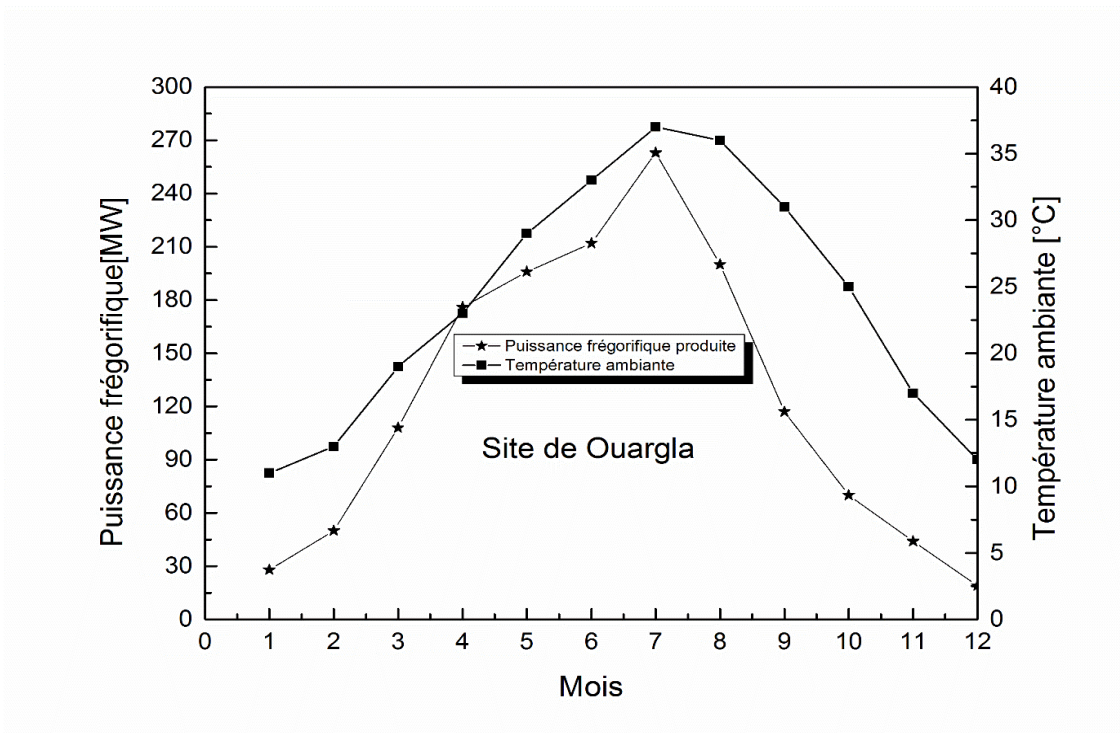


Figure IV–39 : l'évolution de l'efficacité de site d'Ouargla

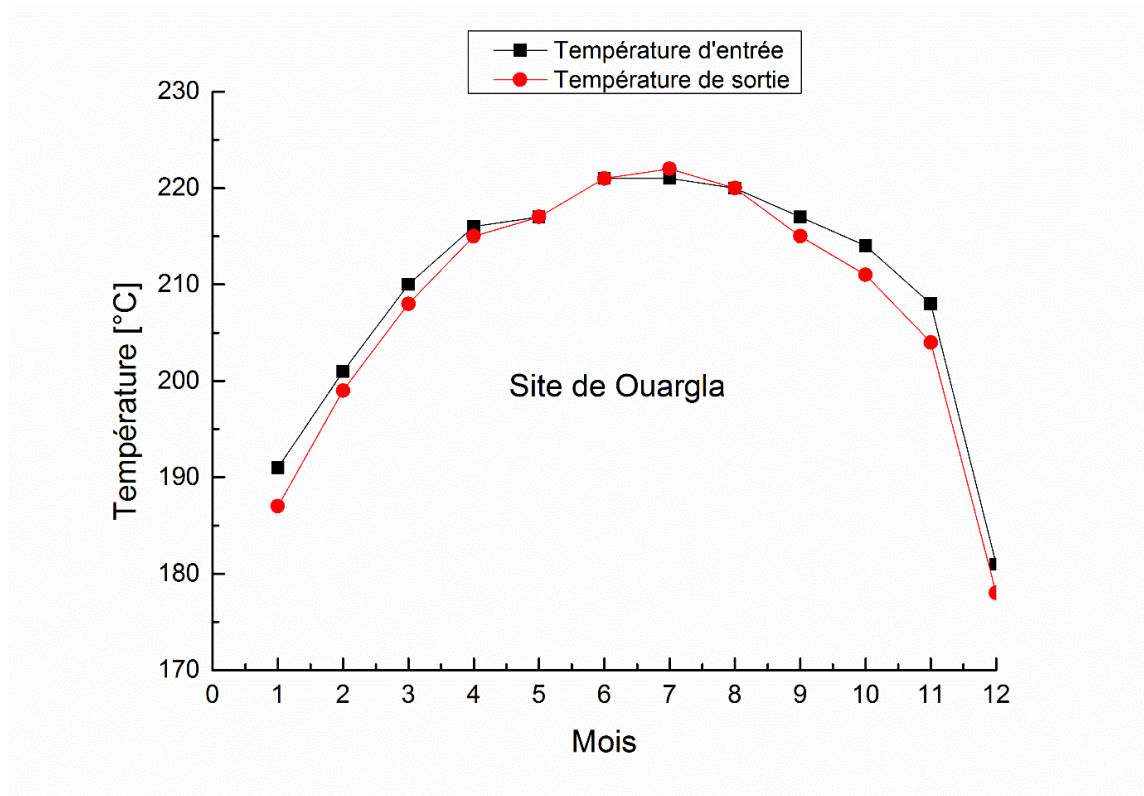


Figure IV-40 : la variation des températures au niveau de l'absorbeur pour le site d'Ouargla

Site de Touggourt :

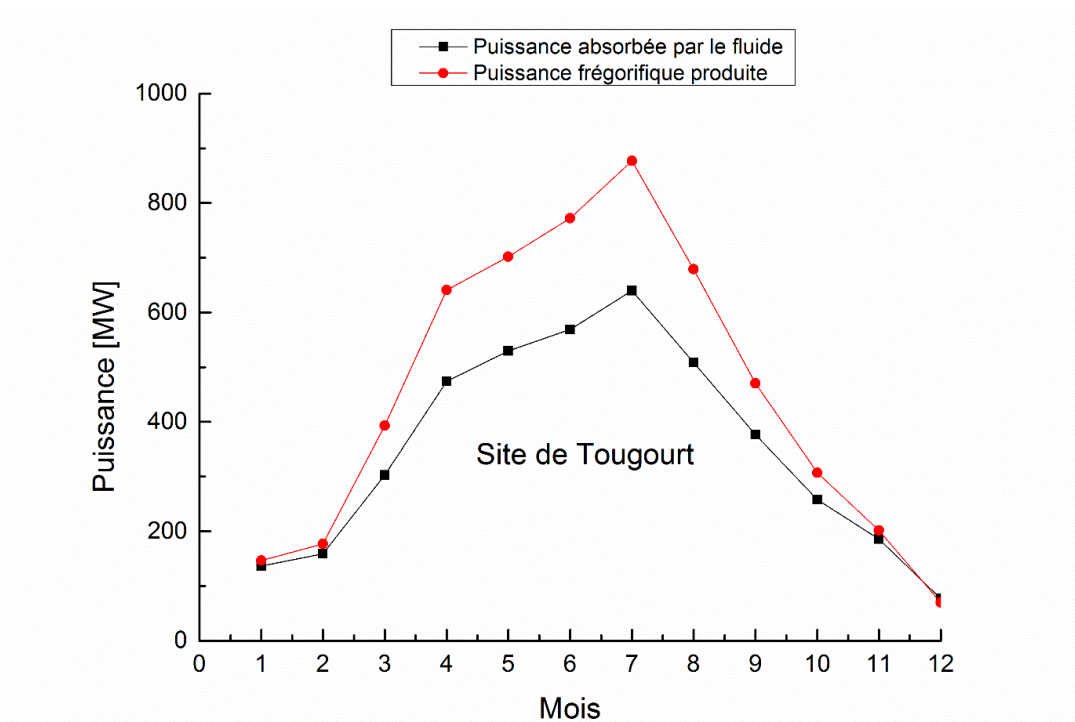


Figure IV-41 : l'évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site de Touggourt

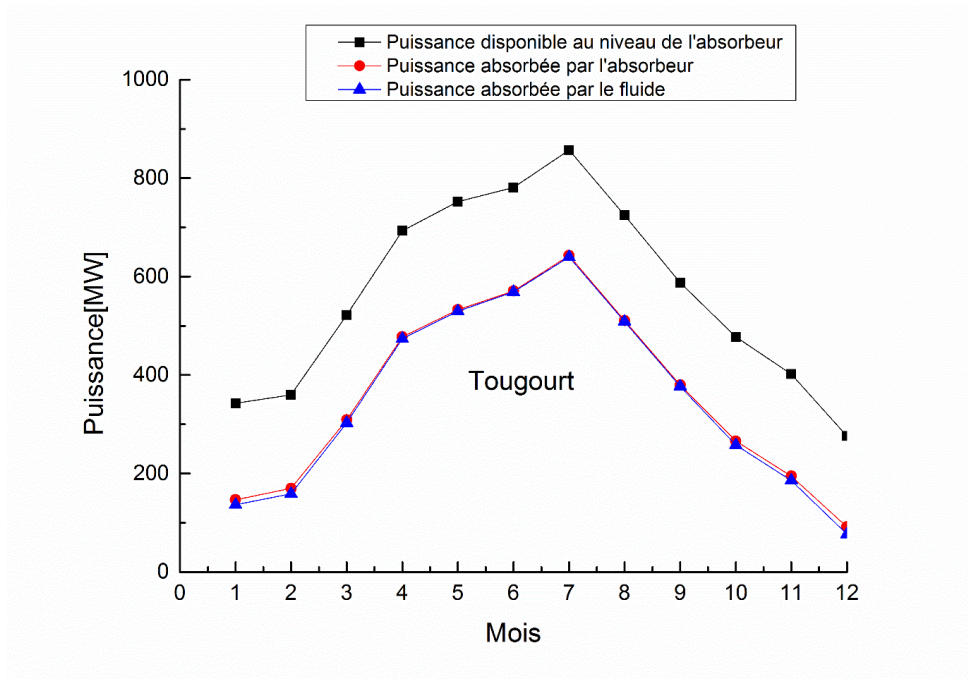


Figure IV-42 : les répartitions des puissances au niveau de l'absorbeur pour le site Touggourt

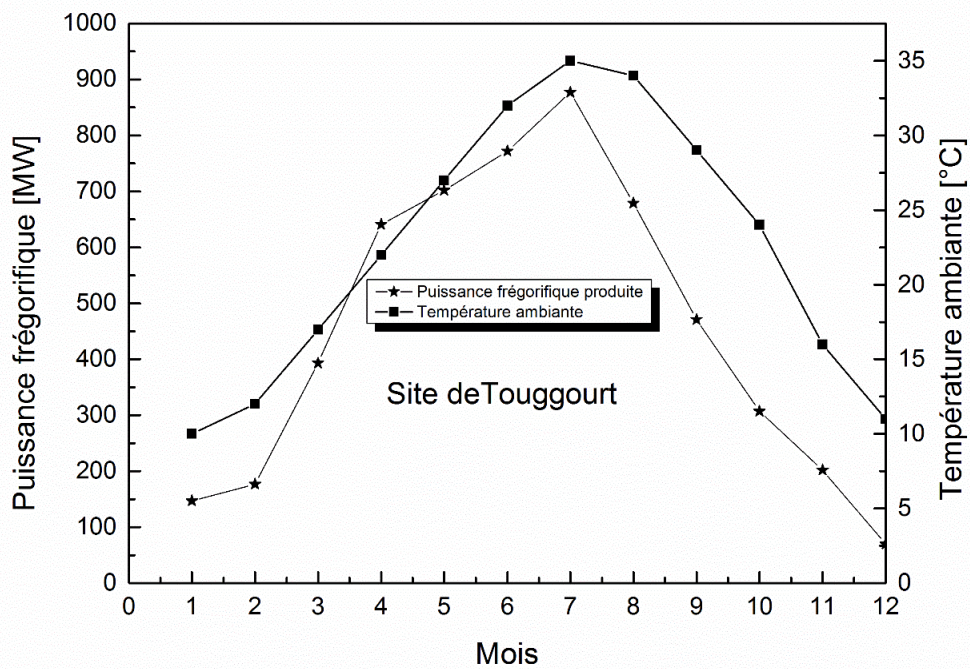


Figure IV-43 : La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site de Touggourt

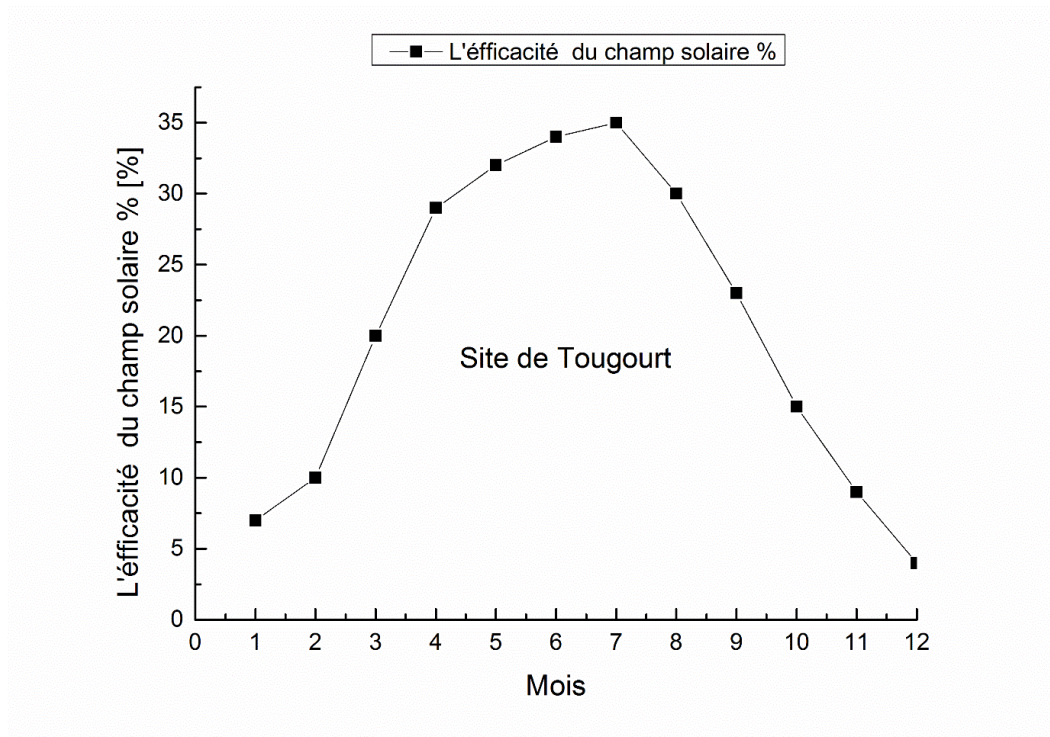


Figure IV-44 :l'évolution de l'efficacité de site de Tougourt.

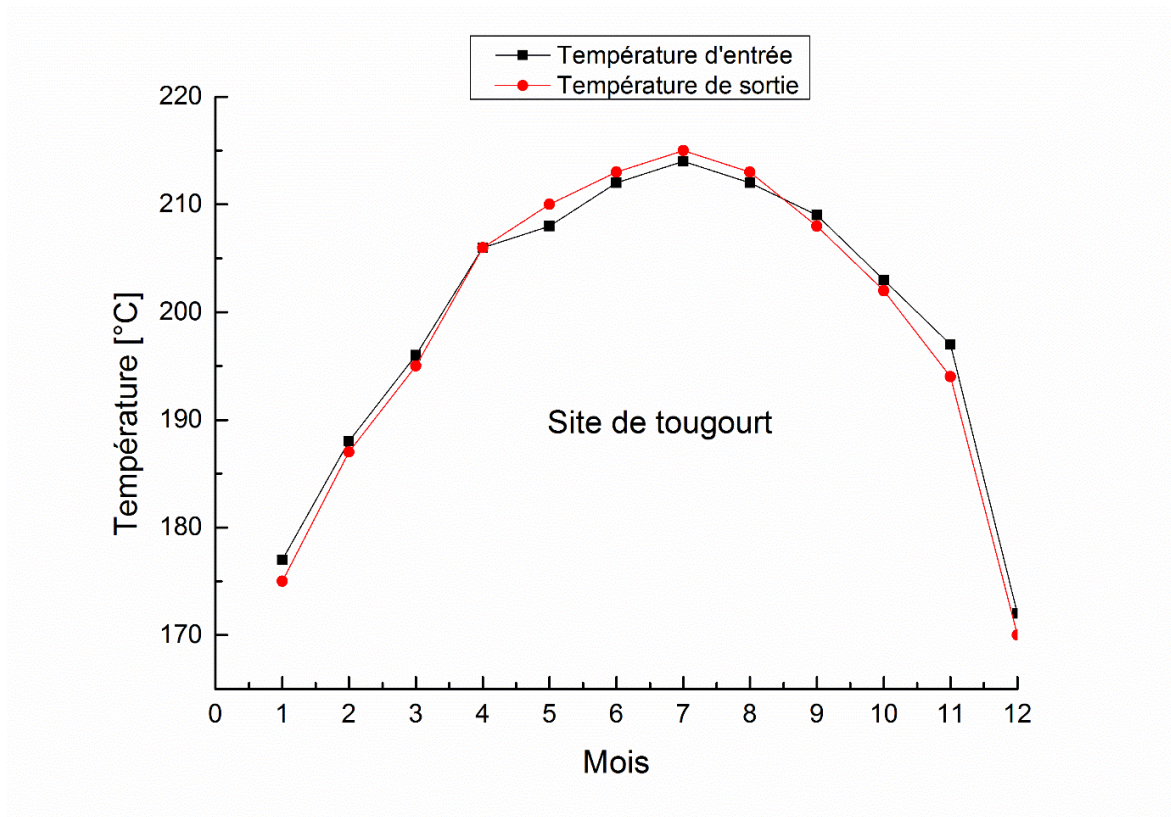


Figure IV-45 :la variation des températures au niveau de l'absorbeur pour le site de Tougourt

Site El oued :

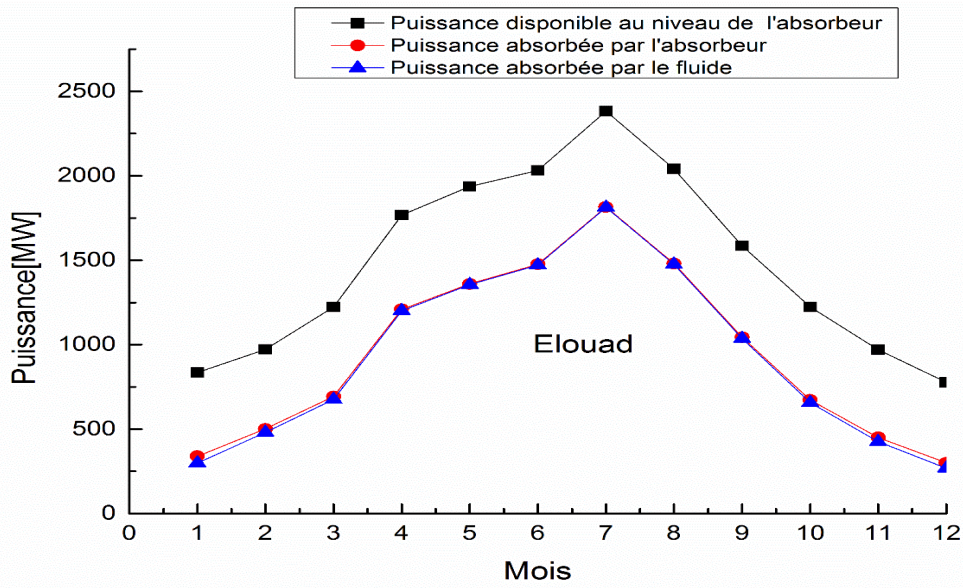


Figure IV- 46 :les répartitions des puissances au niveau de l’absorbeur pour le site EL Oued

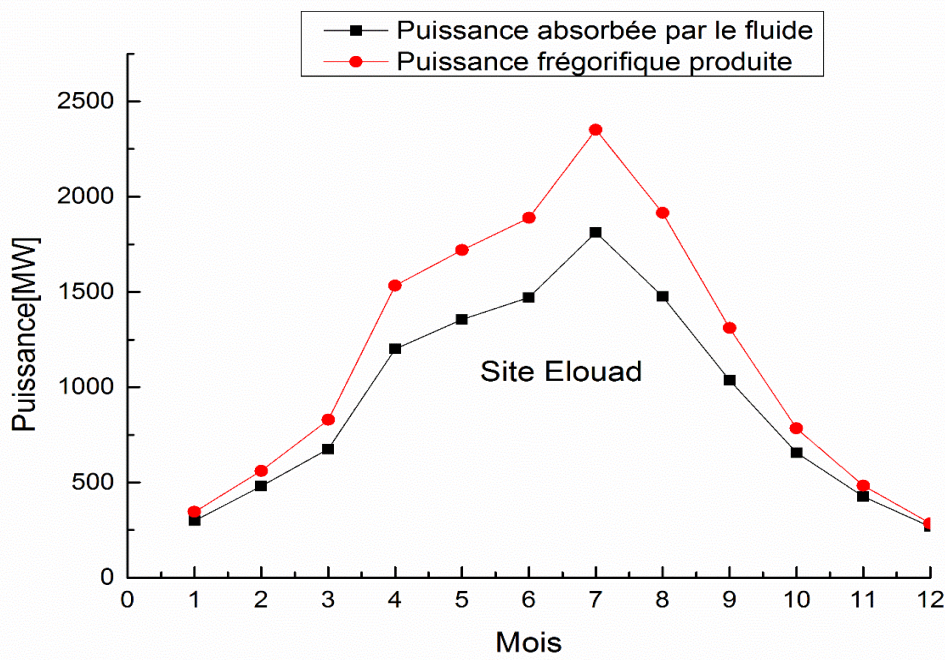


Figure IV-47 : l'évolution de la production frigorifique par rapport à la production solaire pour le site d'El Oued.

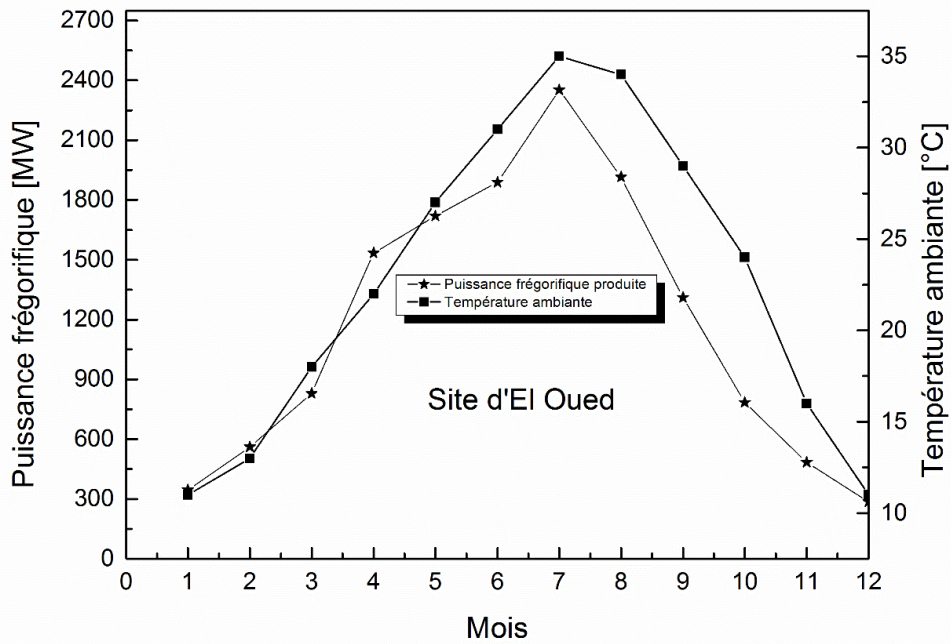


Figure IV-48 : La variation de la production frigorifique par rapport à la température ambiante pour le site d'El Oued

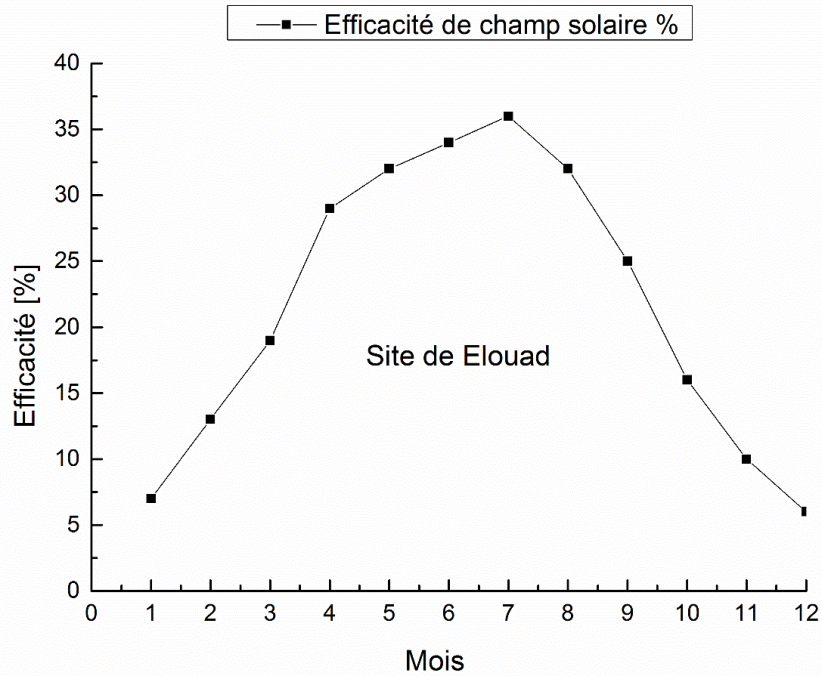


Figure IV-49 : l'évolution de l'efficacité de site d'El Oued.

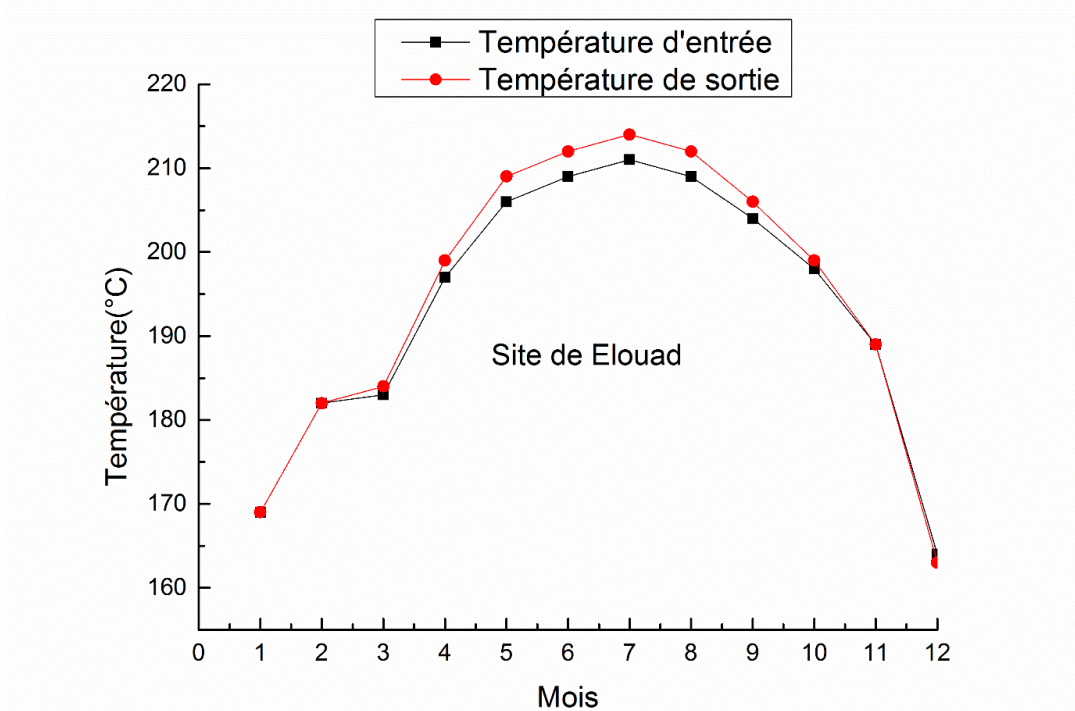


Figure IV-50 : la variation des températures au niveau de l'absorbeur pour le site d'El Oued.

D'après la Figure IV-26 qui représente la répartition des puissances au niveau de l'absorbeur pour le site de Béchar, on voit clairement que l'allure des graphes suit celui du DNI concernant la puissance disponible au niveau de l'absorbeur qui représente la puissance réémise par les miroirs après avoir éliminé les différentes pertes optique, blocage, atténuations atmosphériques et débordement, où elle atteint les 2300 MW pour le site de Laghouat Figure IV-31.

Concernant le deuxième courbe qui représente la puissance absorbé par l'absorbeur ,cette dernière représente la puissance transmise par conduction entre la paroi externe de l'absorbeur et celle interne, on voit clairement que l'écart entre les deux puissance est un peu important ,cela est dû aux pertes thermiques par convection (l'air qui circule ou dessous de l'absorbeur ce qui va refroidir ce dernier) et aussi aux pertes par rayonnement (l'émissivités de l'absorbeur dans l'infrarouge),cette perte est pratiquement non évitable ,mais on peut le réduire considérablement en faisant une très bonne études de choix de sites(il faut choisir des sites non venté ou qui ont une faible fréquence de vent) afin de réduire des pertes importantes par convection et pour les pertes par rayonnement il faut bien choisir le matériau de l'absorbeur qui a une grande absorptivité dans le visible ,et une faible émissivité dans l'infrarouge ,comme aussi il faut bien choisir le revêtement sélectif de tube absorbeur.

Concernant la dernière puissance qui représente la puissance absorbée par le fluide au l'énergie utile, cette dernière est la puissance extraite au fluide caloporteur (l'eau dans notre cas), on remarque que l'écart entre les deux puissance (absorbée par le fluide et absorbée par l'absorbeur) est très faible y à pas beaucoup de pertes thermique à l'intérieure de l'absorbeur ce qui donne un excellent aperçu pour notre système aussi que notre modélisation.

En comparant les répartitions des puissances au niveau de l'absorbeur pour les cinq sites de notre projet on voit que le site Laghouat a de meilleures performances optiques et thermiques du champ solaire avec une valeur de la puissance utile qui atteint les 2467 MW (figure IV-32) ,cela à cause des conditions climatiques favorables pour ce site au la valeur des irradiation annuelle dépassent les 2485 kWh/m².an (Tableau IV-2)car la puissance imposé dans le cahier de charge est égale à 300 MW (Tableau IV-1),le site le plus défavorable qui a moins de performance optique et thermique est celui de Béchar avec une puissance utile qui atteint les 155 MW (figure IV-27) ,car ce dernier est moins défavorable par rapport aux autres sites avec une valeur des irradiation annuelle directe de l'ordre de 2467,5 kWh/m².an (Tableau IV-2)et la puissance imposé dans le cahier de charge est égale à 50 MW (Tableau IV-1) .

En analysent les courbes de la production frigorifique au bien la conversion de la production solaire (l'énergie solaire thermique produite par le champ en énergie frigorifique produite par notre machine à absorption Chiller.) il est très claire que la production frigorifique varié proportionnellement avec la production solaire ,ou les deux courbes ont la même allure, ce qui prouve que notre système fonctionne très bien ,et notre modélisation est très bien faite puisque notre système fonctionne sur la base que la puissance produit par le champ solaire est celle qui est injectée dans notre machine frigorifique ,donc d'après l'allure des deux puissance solaire (solaire est frigorifique) on constate que notre système fonctionne très bien et notre modélisation est correcte .

En comparant ces deux performances entre les cinq localisations de notre projet, le site le plus favorable est celui qui donne une production frigorifique importante, c'est le site de Laghouat suivi d'El Oued, puis de Touggourt, puis de Ouargla et enfin le site de Béchar avec des valeurs de production frigorifique respectivement 3000 MW (figure IV-32), 2460 MW (figure IV-47), 900 MW (figure IV-41), 260 MW (figure IV-38),155 MW (figure IV-27).

En analysant les courbes de l'efficacité pour chaque site il est très clair que ces derniers suivent l'allure du DNI et la puissance thermique produite par le champ ce rendement représente le rapport entre la puissance thermique produite par le champ (énergie utile) par le DNI fois la surface du champ, alors que à la forme d'une cloche ce qui prouve toujours que notre démarche de modélisation et simulation est correcte et que la méthode de configuration des différentes puissances est juste ce qui donne un excellent aperçu à notre modèle .

En comparant les différentes efficacités pour les différents sites, le site le plus favorable est Laghouat, puis Béchar, puis Ouargla et El Oued la même efficacité et en fin le site de Touggourt, avec des valeurs des efficacités respectivement de 39 % (figure IV-34) ,37 % (figure IV-28), 36 % (figure IV-39-49), 35 % (figure IV-44).

En analysant la courbe de la production frigorifique avec celle de la température ambiante de site le même comportement est détecté par rapport aux résultats précédents ,c'est que les deux courbes ont la forme d'une cloche ,est que la production frigorifique varie proportionnellement avec la température ambiante, la même chose avec les systèmes de climatisation conventionnelles ,ou les performances de ces systèmes augmentent lorsque la température ambiante augmente, cela est dû au gradient de température entre le milieu à refroidir et l'ambiance .

En comparant les différents résultats pour les différents sites choisis, on trouve que le site le plus favorable est celui de Laghouat (figure IV-33), puis d'El Oued (figure IV-48), Touggourt, (figure IV-43), Ouargla (figure IV-37), Béchar (figure IV-30) . Et on voit bien que l'ordre des sites est le même que la puissance thermique produite par le champ et le DNI.

En analysant les températures d'entrée et de sortie de l'eau dans le tube absorbeur , il est clair que le gradient de température entre l'entrée et la sortie de tube est faible , ceci est imposé par les conditions météorologiques du site ,donc il faut jouer sur le débit au lieu de jouer sur la différence de température pour avoir un max de puissance thermique utile $Q = \dot{m}c_p(T_{entrée} - T_{sortie})$ donc dans notre cas on essaie d'augmenter le débit ,et garder la différence de température constante sur le long du tube ,d'une part augmenter la puissance et d'autre part minimiser les pertes thermiques.

On remarque que l'évolution des températures d'entrées et de sortie est presque la même pour les cinq sites car ces sites sont caractérisés tous par un fort ensoleillement.

Conclusion :

La simulation avec logiciel Meeteonorm et Greenuis a permis de déterminer les performances de notre système pour chaque site.

En première lieu nous avons fait l'étude de site tel qu'éclairement direct ou tous les sites sont tous favorables à implanter ce genre de projet, nous avons une analyse thermique dans laquelle on a présenté sous forme de courbe à l'échelle mensuelle, les répartitions des puissances au sein de récepteur. Les caractères de comparaison nous résultats, ce sont basés sur la production frigorifique pour chaque site ainsi que la puissance thermique produite par le champ solaire. D'après cette analyse on constate que les résultats sont bien conclus, les sites étudiés sont tous favorables à une implantation d'une machine frigorifique à absorption couplée avec un concentrateur linéaire Fresnel, tout fois le site le plus favorable est celui qui donne des performances thermique et frigorifique plus élevée vient en tête (Laghouat, El oued) suivi (Touggourt), (Ouargla) et enfin (Bechar).

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons présenté une analyse détaillée d'une unité de rafraîchissement solaire composée d'un concentrateur linéaire de Fresnel couplée avec une machine à absorption sur différents sites Algériens, pour ce faire nous avons utilisé deux outils de modélisations à savoir : Meeteonorm et Greenuis.

Ce travail de recherche rentre dans le cadre d'un projet lancé par le ministère de l'énergie Algérien qui vise à produire une puissance électrique de 1000 MW sur différentes localisations Béchar, Laghouat, El oued, Ouargla, et Touggourt, notre contribution était d'adapter cette production électrique à une production frigorifique.

Dans notre modélisation, nous avons analysé les différentes parties du champ solaire où nous avons pris en considération tous les paramètres influençant sur ce dernier : partie optique avec ses pertes et la partie thermique (le récepteur thermique)

Pour atteindre cet objectif, cette étude a fait appel à plusieurs disciplines que nous avons présentées Selon la démarche suivante :

Premièrement, les énergies renouvelables et leurs applications font l'objet du **chapitre I**, où le rayonnement solaire l'acteur principal du travail, a fait l'objet de la deuxième partie de *chapitre I* Quelques définitions des paramètres astronomiques, ainsi que les modèles utilisés pour l'estimation du rayonnement solaire ont été données, ensuite, une brève présentation sur les applications de l'énergie solaire ont été présentées.

Dans le **chapitre II** les technologies des centrales solaires thermodynamiques ont été décrites et définies en détail, avec une présentation de leur principe de fonctionnement ainsi que les avantages et inconvénients.

Après avoir dressé dans le **chapitre III** une synthèse bibliographique sur l'état de l'art des concentrateurs linéaires de Fresnel, et les différentes technologies de production du froid, on a constaté que plusieurs chercheurs et entreprises s'intéressent à la technologie de Fresnel, vu à ses avantages, ainsi que son faible coût de réalisation par rapport aux autres systèmes à concentrations, on a constaté aussi que dans un temps très court, la technologie de Fresnel a connu une évolution très importante, sur tous dans son aspect technique, c'est pourquoi nous

Conclusion générale

avons eu l'idée de coupler cette technologie avec une unité de rafraîchissement de l'air, où nous avons remplacé les machines frigorifiques à compression par des machines à absorption

Dans le **chapitre VI**, nous avons présenté les résultats obtenus et leurs interprétations, les résultats obtenus sont très satisfaisant, ce qui rend ces systèmes très rentables et très performants

Perspectives :

D'après l'étude effectuée dans ce travail, sur les machines frigorifique à absorption couplée avec concentrateur de Fresnel ,et on analysent les différents résultats obtenus durant tous ce travail, nous sommes arrivés à constater que le problème majeur sur le fonctionnement de la centrale solaire reste la totale dépendance ou l'allier météorologiques (passage de nuages, temps plus venteux).pour cette raison nous proposons comme perspectives dans des futures projets de recherche afin de valider les résultats théoriques trouvés d'effectuer des tests sur le dispositif expérimental qui va être réalisés durant l'année 2023.

Nous proposons aussi de compenser le caractère intermittent de l'énergie solaire d'installer sur le dispositif expérimental un système de stockage.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] J.M Chassériau, conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod 1984. R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, le rayonnement solaire conversion thermique et application, technique et documentation. Paris 1979.
- [2] Caractéristique de soleil S. Saïd effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur plan, mémoire de magistère en physique, UMC 2010.
« [Http://fr.wikipedia.org/wiki/Energie_solaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Energie_solaire) », (consulté le 02/08/2022,10h48). Monographie de Mostaganem, www.anvedet.org.dz/Mostaganem.pdf
- [3] Portail Ministère de l'énergie, www.energy.gov.dz, Consulté en Février 2018.maison des bio énergies „“ LE SOLAIRE THERMIQUE Point sur les technologies””“.
- [4] "Solar Engineering of Thermal Processes". 2nded. New York Wiley Interscience; 1991.
- [5]Schéma Longitudes et latitudes sur le globe. A. Bouras, « Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire », mémoire de magister Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [6] <http://tpe-panneaux-photovoltaïques.e-monsite.com/pages/etudes-prealables>
- [7]http://sciencesphysiques.acdijon.fr/astronomie/lexique/lexique_astro/c/images/coordhoraires.gif (22/06/2022),
- [8] Ralph C. Temps,K.L.Coulson.Solar radiation inpes of different orientcident uponSloation. SolarEnergie 1977.19(2):179-184 **Spelling** J, Favrat D, Martin A, Augsburg G. Thermo-economic optimization of a combined-cycle solar tower power plant. *Energy* 2012 113-20. Angle horaire
- [9] S.A. Kalogirou, 'Solar Energy Engineering Processes and Systems', 2nd Edition, Elsevier. Boston-Massachusetts (USA). 819 p. 2014.
- [10] P, H, Communay. Hélio-thermique, Le gisement solaire, méthodes et calculs. Groupe deRecherche et d'Édition, France. (2002).
- [11] R, Bernard; G, Menguy ; M, Schwartz. Le rayonnement solaire, conversion thermique et Application. Technique et Documentation, Paris. (1979).

Références bibliographiques

- [12] Spelling J, Favrat D, Martin A, Augsburger G. Thermoeconomic optimization of a combined-cycle solar tower power plant. *Energy* 2012 ; 41 (1): 113-20.
- [13] Alain RICAUD, « Gisement solaire », Sept-2009, éditeur : Alain Ricaud, publiés par CYTHELIA Sarl.
- [14] constat solaire Gisement solaire – W. BELAID – 2012
- [15] les rayonnements solaires : J. J. BEZIAN, “L ’Energie Solaire
- [16] Différentes formes de conversion de l'énergie solaire
- Pierre GARCIA, “Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur”, Thèse de doctorat, université de Perpignan, 2007.
- [17] <https://www.afrik21.africa/afrique-du-sud-juwi-exploitera-la-centrale-solaire-a-concentration-de-touwsrivier/> consulter le 12/05/2022
- [18] <https://www.connaissancedesenergies.org/quelle-est-la-difference-entre-solaire-photovoltaique-et-thermique-130225>
- [19] A. Bricard, S. Chaudourne, Caloducs, Techniques de l'Ingénieur, B 9 545,
- [20] Schéma de principe du fonctionnement d'une centrale CSP (T. A. Stuetzle, “Automatic Control of the 30 MWe SEGS VI Parabolic Trough Plant by,” 2002.)
- [21] Atlas des ressources énergétiques renouvelables de l'Algérie (Gisement solaire en Algérie)
- [22] T. A. Stuetzle, “Automatic Control of the 30 MWe SEGS VI Parabolic Trough Plant by,” 2002.
- [23] <http://www.dlr.de/TT/solartherm/solargasturbine>
- [24] Arkema, Jarytherm DBT. (Page consultée le 12/05/2022).
<http://www.arkema.fr/export/shared/.content/media/downloads/productsdocumentations/hydrogen-peroxide/hydrogen-peroxide-product-tds-fr-jarytherm-dbt.pdf>

Références bibliographiques

- [25] G. Vaitilingom, Qualité combustible des carburants : influence des caractéristiques particulières des huiles végétales terrestres et marines sur leur comportement en tant que des produits pétroliers, Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Orléans, France, 2013.
- [26] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319910024997> consulter le 01/05/2022
- [27] SYLVAIN, Quoilin. Rapport sur les centrales solaires à concentration. Université de Liège, Mai 2007.
- [28] <http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=937>.
- [29] François Veynandt, Thèse Doctorat « Cogénération hélio thermodynamique avec concentrateurs linéaire de Fresnel : Modélisation de l'ensemble du procédé » INPToulouse, 1er Décembre 2011.
- [30] GIL, A. MEDRANO, M. MARTORELL, I. LÁZARO, A. DOLADO, P. ZALBA, B. and CABEZA, L.F. State of the Art on High Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1 – Concepts, Materials and Modelling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, vol. 14, p. 31-55.
- [31] Silvi C. The pioneering work on linear Fresnel reflector concentrators (LFCs) in Italy. Proc SolarPACES 2009
- [32] Gunther M, Joemann M, Csambor S, Guizani A, Kruger D, Hirsch T. Linear fresnel technology. Adv CSP Teach Mater Enermena 2011.
- Benyakhlef S, Al Mers A, Merroun O, Bouatem A, Boutammachte N, El Alj S, et al. Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. Renew Energy 2016; 89:463–74. doi: 10.1016/j.renene.2015.12.018.
- [32] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. Hoboken: Wiley; 2013
- [33] Zhu G, Wendelin T, Wagner MJ, Kutscher C. History, current state, and future of linear Fresnel Silvi C. The pioneering work on linear Fresnel reflector concentrators (LFCs) in Italy. Proc SolarPACES 2009

Références bibliographiques

- [34] François Veynandt, “Cogénération héliothermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel:modélisation de l’ensemble du procédé,” Université de toulouse, 2011
- [35]International Journal of Hydrogen EnergyVolume 45, Issue 9, 19 February 2020,
- [36] M. Makhlouf, S. Kherris, R. Chadouli et A. Asnoun, ‘ Amélioration de la Performance d’un Cycle Frigorifique à Absorption-Diffusion NH₃-H₂O-H₂’, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 215 – 224, 2009
- Zohar, M. Jelinek, A. Levy and I. Borde, ‘The Influence of DiffusionAbsorptionRefrigeration Cycle Configuration on the Performance’, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, N°13, pp. 2213 - 2219, 2007.
- [37] Jakob,U (2008) :Developement and investigation of a compact silica NH₃/water absorption chiller integrated in solar cooling systemes.VII Minsk International Seminar,Heat Pumps Refrigerators,PowerSources;Minsk ,Belarus.
- [38] M.Makhlouf, S. Kherris, R. Chadouli et A. Asnoun, ‘ Amélioration de la Performance d’un Cycle Frigorifique à Absorption-Diffusion NH₃-H₂O-H₂’, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 215 – 224, 2009.
- [39] 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.meeteonormMETEOTEST, <http://meteotest.ch/produkt/meteonorm>.
- [40] introduction Greenius, DLR –Institute of Solar Research, Software/Download https://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-11688/23056_read-53432
- [41] Greenius. DLR-Institute of Solar Research. <http://:freegreenius.dlr.de/software>
- [42] Greenius, DLR- Institute of Solar Research [http://:freegreenius.dlr.de/software/helpandmanual/components/technology/parabolic trough power plants](http://:freegreenius.dlr.de/software/helpandmanual/components/technology/parabolic%20trough%20power%20plants).