



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

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS
Mostaganem

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

MASTER 2 EN CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX ET DEVELOPPEMENT DURABLE



Projet de fin d'étude
Conçu dans le but de créer une Start-Up et d'obtenir un brevet
(Conformément aux dispositions de la circulaire n°001 du 18 mai (2023).

Présentée par :

Mr. BOUAOUINA Houssam

Titre du projet:

Développement des produits environnementaux Low-Tech

Soutenu* le 16/07/2023 devant le jury composé de

Présidente: Pr. CHERIGUENE Abderrahim (Professeur), Université de Mostaganem

Encadrante: Dr. KIES FATIMA (MCA), Université de Mostaganem

Co-encadrant: Dr. IMAKHLAF Anis (MCA), Université de Bordj Bou Arreridj

Examineur: Dr. CHIKH-DJAOUTSI Djamilia (MCB), Université de Mostaganem

Examineur: Dr. GUELLIL MOHAMMED SEGHIR (MCA), Université de Mascara

Représentant de l'incubateur: Dr. CHERRARA WALID (MCA), Université de Mostaganem

Directeur du CATI: Dr. ABSAR BELKACEM

Année Universitaire: 2022-2023

** Projet soutenu dans le cadre de l'arrêté 1275*

RESUME

La fabrication de produits économiques, écologiques, sans danger pour ses utilisateurs notamment les enfants, et qui contribuent à la réduction de la forte consommation d'énergie est devenue l'une des priorités de notre pays, ce qui nous a poussé à réfléchir au développement de produits à faible technologie (Low Tech).

Notre projet vise à fabriquer des séchoirs et fours solaires. Ce sont des produits sans impact environnemental, sans émission de carbone, fabriqués avec des matériaux simples, recyclables et moins chers.

Mots clés

Cuiseur solaire , collecteur, CSCEP+, rayons, réflecteur, entonnoir.

ملخص

أصبح تصنيع المنتجات الاقتصادية والبيئية الآمنة لمستخدميها وخاصة الأطفال والتي تساهم في تقليل الاستهلاك العالي للطاقة من أولويات بلادنا ، الأمر الذي دفعنا إلى التفكير في تطوير المنتجات منخفضة التقنية.

يهدف مشروعنا إلى تصنيع مجففات وأفران تعمل بالطاقة الشمسية. إنها منتجات ليس لها تأثير بيئي ولا انبعاثات كربونية ، مصنوعة من مواد بسيطة وقابلة لإعادة التدوير وأقل تكلفة

ABSTRACT

The manufacture of economic, ecological products, without danger for its users in particular the children, and which contribute to the reduction of the high-power consumption became one of our country's priorities, pushing us to think about the development of products to low technology (Low Tech).

Our project aims to manufacture solar dryers and ovens. They are products with no environmental impact, zero carbon emissions, made with simple, recyclable, and less expensive materials.

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il nous a donné pour achever ce travail.

Au terme de la réalisation de ce travail, nous exprimons notre très grande gratitude à notre encadrante Dr. KIES FATIMA et notre Co-encadrant Dr. IMAKHLEF ANIS et mon ami l'ingénieur du laboratoire SI MOHAMED BEN ABDALLAH qui a largement contribué à l'évolution de ce travail.

Mes sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail de fin d'Etudes.

Nous remercions particulièrement tous nos enseignants du cursus universitaire.

Nous remercions l'Université de Bordj Bou Arreridj et surtout le laboratoire de génie mécanique pour l'accompagnement durant la réalisation des prototypes.

Nous remercions nos familles, nos amis, qu'ont sus nous supporter et encourager tout au long de notre vie ainsi que pour leur aide inestimable, leur patience et leur soutien indéfectible.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Ce mémoire représente l'aboutissement du soutien, du sacrifice et des encouragements et j'espère de trouver dans ce mémoire toute ma reconnaissance et mon amour.

DEDICACES

Avant tout, nous remercions nos parents qui ne cessent de se sacrifier pour notre bonheur.

A ma mère qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Sans elle, je n'aurais certainement pas fait d'études supérieures.

A mon père qui s'est toujours sacrifié pour ma réussite.

A mes frères: Salah , Khalil

A tous les membres de la famille BOUAOUINA pour l'encouragement et le dévouement dont ils ont fait preuve.

A mes très chères amies Sid Ali, Fatah, Omar, Akram ...

A mes très chère amis de ma classe Abdel Ghani, Abdel Hadi, Yassine.

A tous mes amis de cité universitaire: Makdour, Yahia, Abdou, Imad, Adem, Moatez, Yakine, Bilel, Abdalah, Habibou, Nems, Sidali, Hossam, Amine, Morsli, Sid Ahmed, Akram, Chabane, Zied, Walid, Chabaka, Mohamed, Ahmed,.....

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Mécanisme de l'effet de serre [5].....	- 3 -
Figure 2. Différence de température moyenne mondiale de 1850-1900 en degrés Celsius [6]..	- 4 -
Figure 3. Concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone (CO2)	- 8 -
Figure 4. Concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de Carbone (CO2) Pendant la période de 1970 au 2020	- 8 -
Figure 5. Critères de basses technologie Low-Tech	- 13 -
Figure 6. Les trois piliers de basses technologie Low-Tech	- 15 -
Figure 7. Les principaux composants et des matériaux la conception du capteur thermique [43]. .	- 24 -
Figure 8. A). Schéma du séchage solaire en plein air, B). Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle, C). Schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée, D). Schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle [44]	- 26 -
Figure 9. A). Schéma de principe d'un cuiseur de type boîte, B). Schéma de principe d'un cuiseur à panneaux, C). Schéma de principe d'un cuiseur parabolique [46].	- 27 -
Figure 10. Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [46].....	- 29 -
Figure 11. Heures propices à la cuisson solaire [53]	- 30 -
Figure 12. Capture ou réflexion des rayons du soleil [53].....	- 30 -
Figure 13. Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique [55]	- 31 -
Figure 14. Cuiseurs solaires boîtes avec: a) quatre; b) huit réflecteurs additionnels [55].	- 32 -
Figure 15. Cuiseurs solaires concentrant la lumière par-dessus: a). cuiseur à panneaux, b). cuiseur à entonnoir.....	- 32 -
Figure 16. Cuiseurs solaires concentrant la lumière par-dessous: a). cuiseur sphérique, b). cuiseur à miroirs de Fresnel, c). cuiseur parabolique.	- 33 -
Figure 17. Les cuiseurs solaires à capteurs en verre plat.....	- 33 -
Figure 18. Cuiseurs solaires à stockage de chaleur sensible avec support de stockage: a). l'huile à moteur; b). l'huile végétale.	- 34 -

Figure 19. Schéma d'un cuiseur solaire à stockage de chaleur latente de type boîte avec PCM intégré en mode indirect [58].	- 35 -
Figure 20. Schéma de cuiseurs solaires à stockage de chaleur latente avec PCM intégré en mode indirect utilisant: (a) des capteurs plans; (b) des capteurs sous vides [46].	- 36 -
Figure 21. Cuiseurs solaires boîte fabriqué et testé par [47] : a). avec un seul réflecteur, b). avec deux réflecteurs.	- 37 -
Figure 22. Schéma du cuiseur boîte avec réflecteurs: (a) exposés par la face supérieur. ; (b) exposés par la face inférieure.	- 37 -
Figure 23. a). Cuiseur séchoir- pyramide, b). cuiseur chauffe-eau	- 38 -
Figure 24. Schéma du cuiseur boîte avec un récipient mis sur support	- 39 -
Figure 25. a). Cuiseur cylindro-parabolique, b). schéma du cuiseur cylindro-parabolique.	- 39 -
Figure 26. a). Cuiseur parabolique avec des miroirs de Fresnel, b). cuiseur parabolique composé	- 40 -
Figure 27. a). Cuiseur parapluie, b). cuiseur parabolique	- 40 -
Figure 28. Schéma de l'unité de stockage de chaleur latente de forme cylindrique du cuiseur boîte avec PCM.	- 41 -
Figure 29. a). Schéma du cuiseur solaire parabolique indirect, b). Schéma du cuiseur solaire cylindro-parabolique indirect.	- 41 -
Figure 30. a). Schéma du cuiseur solaire indirect contenant des réfrigérants.	- 42 -
Figure 31. Mouvement de la terre autour du soleil [89].	- 53 -
Figure 32. Repérage de la position du soleil [89]	- 53 -
Figure 33. Sphère céleste [90]	- 54 -
Figure 34. Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil) [92].	- 55 -
Figure 35. Cordonnée terrestre [56]	- 56 -
Figure 36. Analyse spectrale du rayonnement solaire [93]	- 56 -
Figure 37. Constante solaire [93]	- 57 -
Figure 38. Composants du rayonnement solaire [92]	- 58 -
Figure 39. Trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné [94]	- 59 -
Figure 40. Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m ² /jour sur un plan horizontal [95]	- 60 -

Figure 41. Spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [97].....	- 61 -
Figure 42. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5.....	- 61 -
Figure 43. Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle [95].....	- 62 -
Figure 44. Système et bilan énergétique [97]	- 64 -
Figure 45. Schéma du transfert de chaleur convectif [100]......	- 65 -
Figure 46. Schéma du transfert de chaleur radiatif [71].	- 66 -
Figure 47. Schéma de Principe d'un capteur plan vitré [101]	- 69 -
Figure 48. Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire couvert de fluide caloporteur [97].....	- 72 -
Figure 49. Les capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [100].	- 73 -
Figure 50. Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement Sélectif [101]......	- 73 -
Figure 51. Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert à air [100] -	73
-	
Figure 52. Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [101].	- 74 -
Figure 53. Concentrateur parabolique [65]......	- 75 -
Figure 54. Concentrateur cylindro-parabolique [65].	- 75 -

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Principaux gaz à effet de serre et leurs sources [7, 8]	- 5 -
Tableau 2. Différents énergies et leurs émissions de CO2.....	- 9 -
Tableau 3. Potentiel solaire en Algérie par région [10]	- 10 -
Tableau 4. Eléments fondamentaux d'un capteur solaire [43].....	- 25 -
Tableau 5. Synthèse des émissions de CO2 du bois de feu	- 48 -
Tableau 6. Les émissions indirectes de CO2	- 49 -
Tableau 7. Caractéristiques de la terre.	- 55 -
Tableau 8. Valeurs énergétiques des photos issues spectre solaire [86].....	- 57 -

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

Nomenclature

Notation	Unités
D_1 : Diamètre du soleil	Km
D_2 : Diamètre de la terre	Km
D_3 : Distance soleil-terre	Km
h : Altitude	m
TSM : Temps Solaire Moyen	Heure
TU : Temps Universel	Heure
TL : Temps Légal	Heure
TSV : Temps solaire vrai	Heure
TL : Temps légal	Heure
ET : Equation du temps	Minute
h : Hauteur du soleil	Degré
a_z : Azimut du soleil	Degré
Υ : Hauteur du plan	Degré
B' : Inclinaison du plan	Degré
i : Angle d'incidence	Degré
I_c : la constante solaire corrigée	(W/m ²)
I_0 : la constante solaire	(W/m ²)
m : Le numéro de mois dans l'année	Mois
N : Le numéro du jour dans le mois	Jour
K_t : Incidence de clarté	/
E : Module de Young	Pa
\acute{O} : Coefficient de Poisson	/
A : Surface d'échange	m ²
T_p : Température de la paroi solide	K
T_f : Température du fluide	K
q : Densité de flux de chaleur	W/ m ²
e_i : Epaisseur de l'isolant	M
e_b : Epaisseur du boîtier	M
e_{lat} : Epaisseur de l'isolant latérale	M
P_b : Périmètre du boîtier	m ³

Nomenclature (Suite)

U_{pt} : Coefficient globale des pertes de chaleur	W/m^2K
U_{arr} : Coefficient des pertes de chaleur par l'arrière du capteur	W/m^2K
U_{lat} : Coefficient des pertes de chaleur latérales	W/m^2K
U_{av} : Coefficient des pertes de chaleur par l'avant	W/m^2K
R_i : Résistance intérieure	m^2K/W
R_e : Résistance extérieure	m^2K/W

Lettres grecques

Symboles	Unités
δ : Déclinaison solaire	Degré
ω : Angle horaire	Degré
a : Azimut du soleil	Degré
Φ : Latitude du lieu	Degré
i : Angle d'incidence	Degré
α : Coefficient d'absorption	/
λ : Conductivité thermique	$W/m.K$
: Emissivité	/
: Coefficient de Stefan Boltzmann	$W/m^2.K^4$
ρ : La masse volumique	kg/m^3
η : Rendement d'un capteur	%
: Facteur de transmission de la vitre	/
: Facteur de réflexion de la vitre	/
: facteur d'absorption de la plaque absorbante	/
: Facteur de réflexion de la plaque absorbante	/
λ_i : Conductivité thermique de l'isolant	$W/m.K$
$\lambda_{i,lat}$: Conductivité thermique de l'isolant latéral.	$W/m.K$
\emptyset : Flux de chaleur	W

SOMMAIRE

RESUME	i
ملخص.....	ii
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
DEDICACES	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES	x
Chapitre I. Emissions de CO2 et les changements climatiques	- 1 -
1. Introduction.....	- 1 -
2. Effet de serre	- 2 -
2.1. Définition de l'effet de serre	- 2 -
2.2. Mécanisme de l'effet de serre	- 2 -
2.3. Les principaux gaz à effet de serre et leurs sources	- 4 -
3. Changement climatique	- 5 -
3.1. Principales causes du changement climatique.....	- 6 -
3.1.1. Causes humaines.....	- 6 -
4. Energie Solaire.....	- 10 -
4.1. Potentiel de l'énergie solaire en Algérie	- 10 -
Conclusion	- 11 -
Chapitre II. Low tech ou basse technologie.....	- 12 -
1. Introduction.....	- 12 -
2. Définition du Low-tech ou basse technologie	- 12 -
3. Les critères de basses technologie	- 13 -
4. Concepts proches	- 16 -
5. Les principes de low-tech	- 18 -
5.1. Concepts distincts.....	- 20 -
6. Débat low-tech et high tech	- 21 -
Conclusion	- 22 -

Chapitre III. Low-Tech de l'énergie solaire thermique et leurs avantages écologiques...	- 23 -
1. Introduction.....	- 23 -
1.1. La conversion photothermique.....	- 23 -
1.2. Type des capteurs solaires thermiques.....	- 24 -
2. Les séchoirs solaires.....	- 25 -
2.1. Les séchoirs solaires directs	- 25 -
2.2. Les séchoirs solaires indirects	- 26 -
3. Les cuiseurs solaire.....	- 26 -
3.1. Types de cuissons solaires.....	- 27 -
3.2. Facteurs essentiels pour la cuisson solaire	- 28 -
3.2.1. Températures de cuisson solaire.....	- 28 -
3.2.2. Temps de cuisson solaire.....	- 29 -
3.2.3. Localisation de la cuisson solaire	- 29 -
3.2.4. Moment d'utilisation du cuiseur solaire	- 30 -
3.3. Classification des cuiseurs solaires	- 31 -
3.3.1. Cuiseurs solaires sans stockage	- 31 -
3.3.2. Cuiseurs solaires avec stockage.....	- 34 -
3.4. Conception et le développement des cuiseurs solaires à travers le monde	- 37 -
3.4.1. Les cuiseurs solaires de type boîte	- 37 -
3.4.2. Cuiseurs solaires à concentration	- 39 -
3.4.3. Cuiseurs stockeurs d'énergie.....	- 40 -
3.5. Évaluation économique et environnemental du cuisson solaire	- 42 -
3.5.1. Contribution des cuiseurs solaires à la réduction du dioxyde de carbone.....	- 42 -
3.5.2. L'impact de cuiseur solaire low tech sur l'environnement.....	- 43 -
3.5.3. Classification de cuisson	- 44 -
3.5.4. Cuiseur solaire et la diminution de déforestation	- 46 -
Conclusion	- 50 -
Chapitre IV. Généralités sur le gisement et le captage solaire.....	- 51 -
1. Introduction.....	- 51 -
2. Soleil	- 51 -
2.1. Caractéristiques générales	- 51 -

2.2. Mouvement de la terre.....	52 -
2.3. Cordonnées du soleil	54 -
2.3.1. Coordonnées équatoriales.....	54 -
2.3.2. Coordonnées horizontales du soleil.....	54 -
2.4. Caractéristiques de la terre	55 -
2.4.1. Coordonnées terrestres	55 -
2.5. Rayonnement solaire	56 -
2.5.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire	56 -
2.5.2. Constante solaire.....	57 -
2.5.3. Types de rayonnements solaires	58 -
2.6. Eclaircement et l’irradiation.....	59 -
2.6.1. Irradiation ou rayonnement	59 -
2.6.2. Eclaircement ou irradiation	60 -
2.6.3. Situation de l’Algérie.....	61 -
3. Captage solaire.....	62 -
3.1. Rappels sur les transferts de chaleur	63 -
3.1.1. Définitions	63 -
3.1.2. Formulation d’un problème de transfert de chaleur	64 -
3.1.3. Flux de chaleur lié à un débit massique.....	67 -
3.1.4. Stockage d’énergie	67 -
3.1.5. Génération d’énergie	67 -
4. Capteur solaire thermique	68 -
4.1. Composantes d’un système de conversion thermique.....	68 -
4.2. Définition et principe d’un capteur solaire plan.....	68 -
4.3. Types des capteurs solaires thermiques.....	68 -
4.3.1. Capteurs plan vitré.....	68 -
4.3.2. Capteur solaire couvert de fluide caloporteur.....	72 -
4.3.3. Capteurs plans non vitrés.....	72 -
4.3.4. Capteur solaire non-vitré à air	73 -
4.3.5. Capteurs à tube sous vide	74 -
4.3.6. Capteur concentrateurs paraboliques.....	74 -

4.3.7. Concentrateurs cylindro-paraboliques	- 75 -
4.4. Constituants d'un capteur solaire plan	- 76 -
Conclusion	- 77 -
Référencés bibliographiques	- 78 -

Chapitre I. Emissions de CO2 et les changements climatiques

1. Introduction

La lutte contre les changements climatiques passe inévitablement par la décarbonisation, soit l'abandon rapide des énergies fossiles et la transition vers l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, et non seulement par la réduction des émissions à la marge d'un mode de développement qui demeurerait inchangé [1].

Pour l'ensemble des filières industrielles, les Gaz à Effet de Serre (GES) et notamment le CO2 sont considérés comme des polluants à part entière dont il est nécessaire de contrôler et réduire les émissions. Le captage puis le stockage de CO2 (CSC) est une solution envisagée pour la réduction des émissions de GES de l'industrie (production d'électricité, sidérurgies, cimenteries) [2].

La décarbonisation des énergies fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables, l'énergie nucléaire sont des mesures qui nous permettent d'obtenir une énergie propre et respectueuse de l'environnement. Réduisant ainsi les émissions de GES .

La baisse du réchauffement climatique passe par une réduction de la dépendance aux énergies fossiles. Autre avantage par rapport à la combustion de ressources fossiles : l'exploitation des énergies renouvelables est peu carbonée. En raison de leurs jeux d'impacts environnementaux, elles sont aussi appelées « énergies vertes », et parmi ces technique on a choisi les basses technologie écologique tel que les basses technologie à base d'énergie solaire thermique.

L'économie mondiale fonctionne à l'énergie et l'énergie fonctionne aux combustibles carbonés. Pratiquement tous les biens et services nécessitent leurs apports tandis, que la demande pour ces biens et services ne cesse de croître et la quantité de combustibles carbonés consommée augmente également. En raison du rôle le plus critique que les combustibles carbonés ont joué et continuent de jouer dans la création et le maintien de notre civilisation industrielle. Cette dernière est souvent appelée civilisation du carbone [3].

La Terre se réchauffe plus rapidement de nos jours avec une augmentation de la quantité de gaz à effet de serre, qui comprennent le dioxyde de carbone, le méthane et certains autres gaz dans

l'atmosphère, et c'est ce qu'on appelle le phénomène de réchauffement climatique qui a de nombreux impacts sur notre planète et notre vie en général.

Le réchauffement climatique a de nombreux effets, comme moins de pluie, de sécheresse, et d'élévation du niveau de la mer. En plus des tempêtes et des impacts négatifs sur la santé humaine et l'environnement naturel, économique, sanitaire, et environnemental.

2. Effet de serre

2.1. Définition de l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel provoquant une élévation de la température à la surface de notre planète. Indispensable à notre survie, ce fragile équilibre est menacé. Les activités humaines affectent la composition chimique de l'atmosphère et entraînent l'apparition d'un effet de serre additionnel, responsable en grande partie du changement climatique actuel [4].

On peut dire que les causes de l'effet de serre en un mot sont principalement humaines et secondairement naturelles, car certains scientifiques disent que la pollution est l'une des raisons les plus importantes, tandis que d'autres disent qu'il s'agit d'un changement de nature, et 97% du climat. Les scientifiques ont convenu qu'un grand réchauffement climatique se produit à ce degré. Actuellement, il est provoqué par l'homme.

2.2. Mécanisme de l'effet de serre

L'effet de serre est la rétention de chaleur dans la couche inférieure de l'atmosphère due à l'absorption et à la réémission par les nuages et certains gaz. La Terre reçoit son énergie du soleil sous forme de rayonnement solaire. Le rayonnement solaire (visible) à ondes courtes traverse l'atmosphère sans rencontrer d'obstacles, et réchauffe la surface terrestre. Le rayonnement thermique à ondes longues émis par la surface réchauffée de la Terre est partiellement absorbé par un certain nombre de gaz à l'état de trace ou "à effet de serre" (GES). Ces gaz sont présents en petites quantités dans l'atmosphère et réfléchissent le rayonnement thermique à ondes longues dans toutes les directions. Une partie du rayonnement est dirigée vers la surface de la Terre (Figure 1).

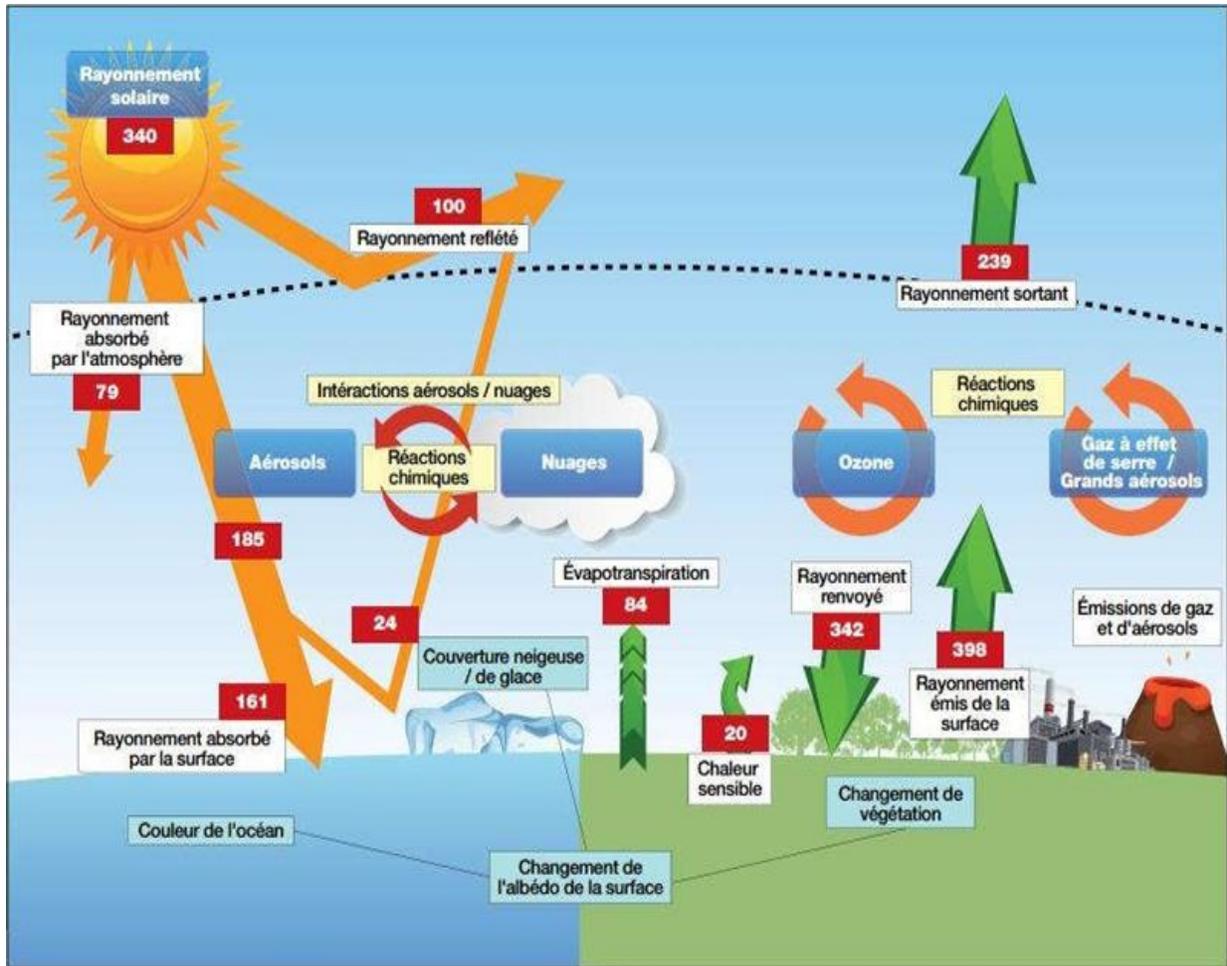


Figure 1. Mécanisme de l'effet de serre [5]

Le principe de l'effet de serre est comparable à celui de serres utilisées pour couvrir les plantes. Les rayons du soleil vont frapper la Terre (auparavant freinés par l'atmosphère) mais certains d'entre eux vont se retrouver piégés par les gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les deux tiers de l'énergie en provenance du soleil sont absorbés par l'atmosphère, les sols, et l'océan. Le tiers restant est directement réfléchi vers l'espace par les nuages, les aérosols, l'atmosphère et la surface terrestre. L'atmosphère et la surface terrestre émettent en retour un rayonnement infrarouge que les nuages et les gaz à effet de serre (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, ozone et méthane principalement) absorbent et réémettent en grande partie vers le sol [5]. Les gaz à effet de serre (vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane...) sont pratiquement transparents au rayonnement solaire (longueur d'onde du visible) et opaques au rayonnement infrarouge émis par la Terre. La chaleur est piégée.

L'effet de serre piège une partie du rayonnement solaire et permet à la température de la basse atmosphère de se maintenir autour de 15°C en moyenne ce qui a permis le développement de la vie. Sans cet effet de serre, principalement dû à la vapeur d'eau, la température moyenne serait de - 18°C et la vie sur Terre n'aurait pas connu un développement sous ses formes actuelles [5]. C'est-à-dire, Si les gaz à effet de serre n'existaient pas, les températures sur terre seraient inférieures à – 18o C. La quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère peut influencer sur les températures globales. Si ces gaz devaient augmenter, les températures pourraient s'élever. S'ils devaient diminuer, les températures globales s'abaisseraient.

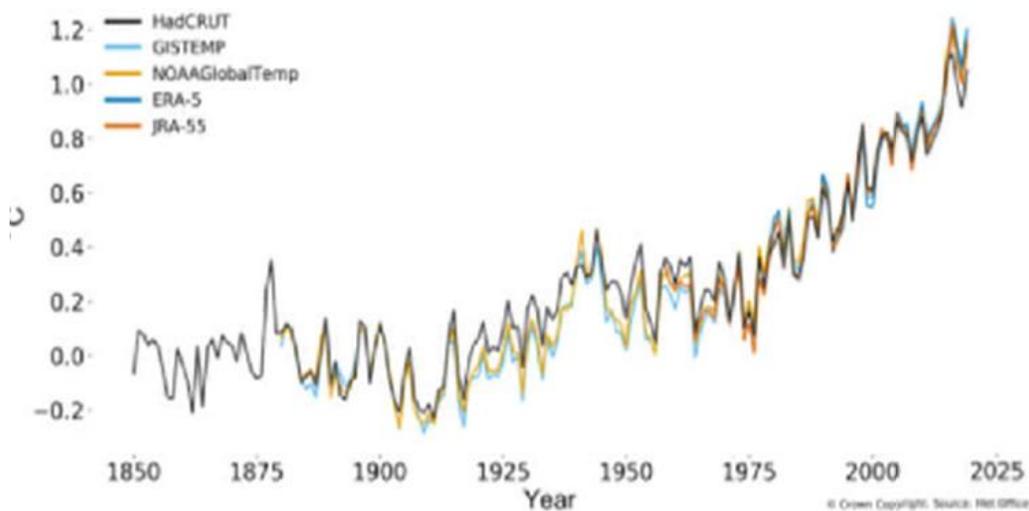


Figure 2. Différence de température moyenne mondiale de 1850-1900 en degrés Celsius [6]

La période 2015-2019 (Figure 2) représente les cinq années les plus chaudes jamais enregistrées et la période 2010-2019 est la décennie aux températures les plus élevées (L'année 2019 se classe deuxième en matière de températures enregistrées). Au regard de l'évolution actuelle des émissions de dioxyde de carbone, la température devrait augmenter de 3 à 5 °C d'ici à la fin du siècle [6].

2.3. Les principaux gaz à effet de serre et leurs sources

Il existe de nombreux gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère (Tableau 1), naturellement, mais leurs concentrations varient du fait des activités humaines.

Leurs impacts sur le climat dépendent de leurs capacités à absorber et émettre du rayonnement infrarouge, de leurs concentrations dans l'atmosphère et de leurs durée de vie. Les gaz à effet de serre les plus courants sont : la vapeur d'eau H₂O (55%), le dioxyde de carbone CO₂ (39%), le méthane CH₄ (2%), le protoxyde d'azote N₂O (2%), l'ozone O₃. (2%), En plus de tout l'Hydrofluorocarbures (HFC), le Per fluorocarbures (PFC), et l'Hexafluorure de soufre (SF₆) avec de faibles concentrations.

Tableau 1. Principaux gaz à effet de serre et leurs sources [7, 8]

Gaz à effet de serre	Source naturelle	Source humaine
La vapeur d'eau (H ₂ O)	Evaporation de l'eau surtout au-dessus des océans	Centrales électriques – Irrigation
Le dioxyde de carbone (CO ₂)	Respiration des êtres vivants – Feux de forêt - Volcans...	Utilisation massive d'énergies fossiles pour les transports, les bâtiments et l'agriculture Déforestation
Le méthane (CH ₄)	Digestion des herbivores – Décomposition des végétaux- Volcans	Intensification des élevages (bovin) et des cultures (riz) - Décharge d'ordures
Le protoxyde d'azote (N ₂ O)	Marécages	Utilisation d'engrais azotés
Ozone de basse atmosphère (O ₃)	Foudre	Industrie – Circulation automobile
Les gaz fluorés (CFC, HFC, PFC)	N'existent pas dans la nature	Gaz des bombes aérosols et des climatiseurs

3. Changement climatique

Au cours du dernier million d'années, la Terre a connu une série d'âges glaciaires et de périodes plus chaudes. Les périodes glaciaires et interglaciaires cyclent environ tous les 100000 ans, causées par des changements dans l'orbite de la Terre autour du soleil.

Cependant, depuis la révolution industrielle dans les années 1800, la température mondiale a augmenté à un rythme beaucoup plus rapide.

En brûlant des combustibles fossiles et en changeant notre façon d'utiliser les terres, l'activité humaine est rapidement devenue la principale cause des changements de notre climat. Selon la définition de l'organisation météorologique mondiale (OMM), le climat est la "*synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère*". Les changements saisonniers, comme le passage de l'hiver au printemps, à l'été, et à l'automne dans les zones tempérées et de l'humidité à la sécheresse dans les régions tropicales font aussi partie du climat [2]. Il existe de nombreuses preuves du changement climatique dont: augmentation de la température mondiale, augmentation de la température dans les océans, les calottes glaciaires rétrécissent, acidité des océans, élévation du niveau de la mer...

3.1. Principales causes du changement climatique.

3.1.1. Causes humaines.

L'homme est l'une des principales causes du changement climatique, en raison de ses activités qui conduisent à l'émission de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'air. Aujourd'hui, il y a plus de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qu'il n'y en a jamais eu au cours des 800 000 dernières années (Figure 3). Au cours des 20^{ème} siècle et 21^{ème} siècle, le niveau de dioxyde de carbone a augmenté de 40 %.

Le dioxyde de carbone atmosphérique moyen mondial en 2019 était de 409,8 parties par million (ppm en abrégé), avec une plage d'incertitude de plus ou moins 0,1 ppm. Les niveaux de dioxyde de carbone sont aujourd'hui plus élevés qu'à n'importe quel moment au cours des 800 000 dernières années au moins.

Concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) en parties par million (ppm) au cours des 800 000 dernières années. Les pics et les vallées suivent les périodes glaciaires (faibles teneurs en CO₂) et les interglaciaires plus chauds (plus élevée en CO₂). Au cours de ces cycles, le CO₂ n'a jamais été supérieur à 300 ppm. Sur l'échelle des temps géologiques, l'augmentation (ligne pointillée orange) semble pratiquement instantanée. En fait, la dernière fois que les quantités de CO₂ atmosphérique ont été aussi élevées, c'était il y a plus de 3 millions

d'années, lorsque la température était de 2 à 3 °C (3,6 à 5,4 °F) plus élevée que pendant l'ère préindustrielle et que le niveau de la mer était de 15 à 25 mètres (50 à 80 pieds) plus haut qu'aujourd'hui. Les points suivants représentent les pratiques humaines les plus importantes qui ont conduit au changement climatique :

1_ Déforestation (couper des arbres) : les forêts contribuent à l'élimination du dioxyde de carbone de l'atmosphère en l'absorbant et en le stockant dans les arbres. Par conséquent, abattre des arbres provoque une accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et leurs combustions libèrent du dioxyde de carbone stocké à l'intérieur dans l'atmosphère.

2_ Agriculture et élevage : ces deux types de gaz émettent différents types de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, par exemple le méthane, qui est produit par les animaux, qui est environ trente fois plus puissant que le dioxyde de carbone comme gaz à effet de serre, en plus de l'oxyde d'azote, qui est utilisé dans la fabrication d'engrais, il est 300 fois plus puissant que le dioxyde de carbone.

3_ Combustibles fossiles brûlants : Les concentrations de dioxyde de carbone augmentent principalement à cause des combustibles fossiles que les gens brûlent pour produire de l'énergie. Les combustibles fossiles qui existent sous terre depuis des milliers d'années, comme le pétrole, le charbon ou le gaz, contiennent du dioxyde de carbone que les plantes ont extrait de l'atmosphère par photosynthèse sur une période de plusieurs millions d'années, nous renvoyons ce carbone dans l'atmosphère en quelques centaines d'années seulement. L'extraction du carburant du sol et sa combustion libèrent du dioxyde de carbone stocké dans l'air. De 1850 à 2018, 440 ± 20 Pg C ($1 \text{ Pg C} = 10^{15} \text{ g C}$) ont été émis sous forme de CO_2 par la combustion de combustibles fossiles. Pour la seule année 2018, les émissions mondiales de combustibles fossiles ont atteint $10 \pm 0,5$ Pg C an⁻¹ pour la première fois de l'histoire. Environ la moitié du CO_2 émis depuis 1850 reste dans l'atmosphère. Le reste s'est partiellement dissous dans les océans du monde. Alors que la biosphère terrestre est actuellement un cumulée de CO_2 dues aux puits pour le CO_2 des combustibles fossiles, les émissions changements d'utilisation des terres tels que la déforestation annulent l'absorption terrestre au cours de la période 1850-2018. Dans les années 1960, le taux de croissance mondial du dioxyde de carbone atmosphérique était d'environ $0,6 \pm 0,1$ ppm par an. Entre 2009-2018, cependant, le taux de croissance a été de 2,3 ppm par an. Le dioxyde de carbone atmosphérique mondial était de $409,8 \pm 0,1$ ppm en 2019, un nouveau record.

Il s'agit d'une augmentation de $2,5 \pm 0,1$ ppm par rapport à 2018, identique à l'augmentation entre 2017 et 2018 (Figures 3, 4).

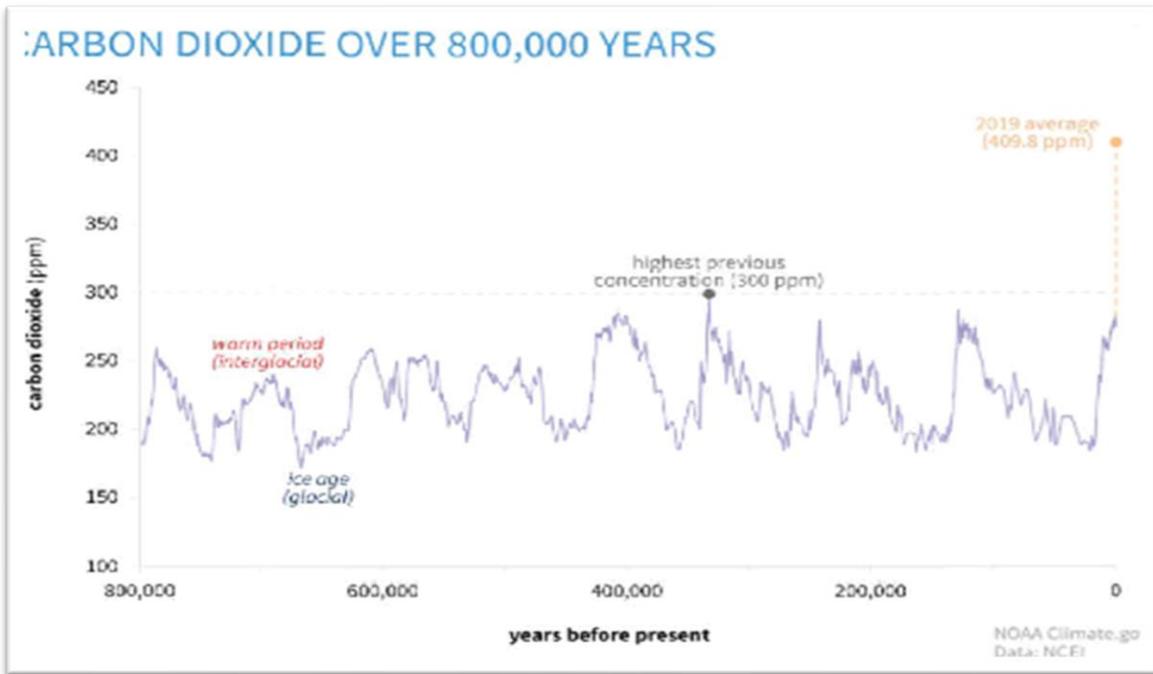


Figure 3. Concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone (CO₂)

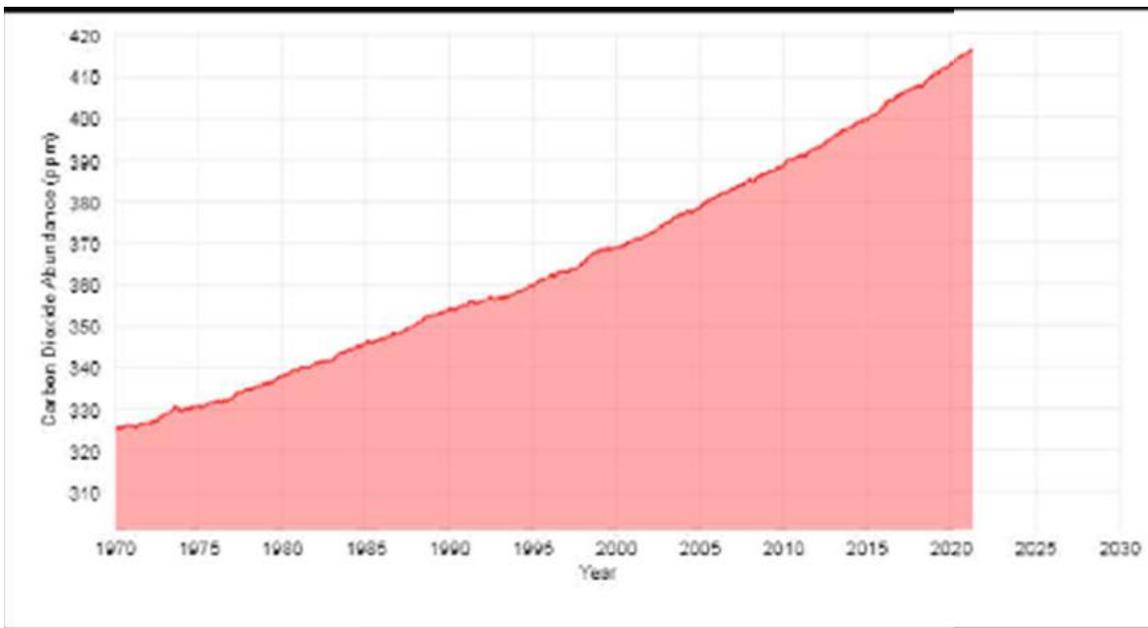


Figure 4. Concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de Carbone (CO₂) Pendant la période de 1970 au 2020

Le taux annuel d'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique au cours des 60 dernières années est environ 100 fois plus rapide que les augmentations naturelles précédentes, telles que celles qui se sont produites à la fin de la dernière période glaciaire il y a 11 000 à 17 000 ans.

Les énergies renouvelables et les émissions de CO2

L'exploitation des énergies renouvelables génère théoriquement peu de polluants : notamment, l'électricité d'origine renouvelable émet très peu de CO2 notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Les énergies renouvelables sont considérées comme un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique et en même temps comme un facteur de résilience car elles permettent des productions décarbonées et décentralisées. Pour mesurer les émissions de CO2 des énergies renouvelables, on utilise l'outil d'ACV (Analyse de Cycle de Vie) qui permet de connaître les émissions de CO2 par kWh d'électricité produite, en intégrant les émissions de CO2 issues de la fabrication des infrastructures, de l'extraction des ressources et de la fin de vie. D'après le rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Étude du Climat), les énergies renouvelables bénéficient d'ACV favorables par rapport à beaucoup d'énergies (Tableau 2). Voici la liste des énergies en fonction de leurs émissions de CO2 d'après le rapport du GIEC/Annexe 3 (de la moins polluante à la plus polluante, en valeurs médianes) :

Tableau 2. Différents énergies et leurs émissions de CO2

Les différents énergies	lurs émissions de CO ₂ (gCO ₂ eq/kWh)
Éolien terrestre	11
Nucléaire	12
Hydroélectricité	24
Solaire thermodynamique	27
Géothermique	38
Solaire photovoltaïque	41-48
Biomasse	230
Gaz naturel	490
Charbon	820

4. Energie Solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. c'est une énergie verte car sa production n'émet pas directement de CO₂. le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière en électricité [9].

4.1. Potentiel de l'énergie solaire en Algérie

L'Algérie est considérée comme l'un des gisements solaires les plus élevés au monde (Tableau 3). En effet, vue sa position géographique, ce pays dispose d'un potentiel qui dépasse les cinq (5) milliards GW h /an, avec plus de 2500 heures d'ensoleillement en moyenne par an sur une partie très importante de sa la quasi-totalité du territoire national. Cette durée peut dépasser 3800 heures d'ensoleillement dans les hauts plateaux et Sahara [11].

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KW / h sur la majeure partie du territoire national, ce potentiel est décomposé comme suit : au nord, près de 1 700 KW h / m²/ an et 2263 KW h /m²/an au sud. Si on compare le potentiel solaire au gaz naturel en Algérie, le potentiel solaire Algérien est équivalent à un volume de 37000 milliards de mètre cubes, soit plus de huit 8 fois les réserves du gaz naturel du pays, notant que le potentiel solaire est renouvelable contrairement au gaz naturel.

Tableau 3. Potentiel solaire en Algérie par région [10]

Regions	Côte	H. Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Energie solaire thermique

On désigne par « l'énergie solaire thermodynamique » l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur élevée, puis celle-ci en énergie mécanique à travers un cycle thermodynamique.

Conclusion

Les émissions de carbone ont un impact énorme sur notre planète, car ce sont les gaz à effet de serre qui ont les niveaux d'émissions les plus élevés dans l'atmosphère, ce qui provoque bien sûr le réchauffement climatique et éventuellement le changement climatique. Le carbone est un type d'émissions de gaz à effet de serre qui se produit lorsque du dioxyde de carbone est libéré dans l'air après une activité ou un processus humain. Le dioxyde de carbone est libéré dans l'atmosphère lorsque des combustibles fossiles - charbon, gaz naturel, et pétrole sont brûlés, mais en brûlant d'autres matériaux libèrent également du dioxyde de carbone, comme les déchets solides et les arbres. Les émissions de carbone contribuent au changement climatique, qui peuvent avoir de graves conséquences pour l'homme et son environnement, car le rejet de carbone dans l'atmosphère (dioxyde de carbone et méthane) entraîne une augmentation de la température. Cette augmentation cause de nombreux problèmes (maladies respiratoires telles que l'asthme, la pollution de l'air, la désertification, les pluies torrentielles et les inondations, dommages aux appareils de refroidissement), et la présence de dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis des milliers d'années et en grande quantité, met en danger notre planète, et donc afin de préserver et de sécuriser Notre environnement Nous devons trouver des solutions qui permettront de réduire les émissions de carbone dans l'atmosphère. La solution la plus importante est la décarbonisation des combustibles fossiles, qui permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, notamment de dioxyde de carbone.

Chapitre II. Low tech ou basse technologie

1. Introduction

Alors que beaucoup pensent encore que les progrès technologiques sont la principale solution pour contenir le réchauffement climatique, un rapport publié fin mai par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) appelle à une prise de conscience: *il est nécessaire de pousser beaucoup plus loin l'innovation et d'accélérer le déploiement des technologies de rupture pour atteindre la neutralité carbone en 2050, donc face au réchauffement climatique et à l'urgence de trouver des solutions pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre, les Low tech représentent une alternative intéressante et viable.* Bien qu'elles ne soient pas considérées comme des technologies de rupture, elles ont le potentiel nécessaire pour jouer un rôle important dans la transition écologique : réduction des émissions de CO₂, alternatives viables et abordables, implication et motivation des communautés locales, et facilité de déploiement. Ces raisons font de ces technologies simples et peu onéreuses un véritable levier pour la protection de l'environnement. Ces dernières années, le numérique a pris de plus en plus de place dans l'innovation environnementale. Et c'est justement pour mettre en avant toutes ces solutions que les Low tech jouent un rôle clé dans la transition écologique. Mais quel est exactement ce rôle? Quelles sont les caractéristiques des Low tech?

2. Définition du Low-tech ou basse technologie

Les Low tech (ou basse technologie) font écho à un ensemble de techniques simples, pratiques, et économiques. Elles s'opposent, par définition, aux technologies high-tech. Le concept de Low tech regroupe des solutions techniques qui, aujourd'hui, sont tombées dans l'oubli. Ces solutions sont souvent le fruit d'une fabrication locale, plus proche de l'artisanat que de la production industrielle.

La low-tech n'est pas une démarche technophobe, mais techno-critique. Autrement dit, même si elle s'oppose à l'obsession de la high-tech, celle-ci s'accorde du principe de techno-discernement [12], la low-tech est donc complémentaire à la high-tech dite utile. La Low-Tech désigne tout type de produits, de services, de procédés ou autres systèmes permettant, via une transformation technique, organisationnelle et culturelle, le développement de nouveaux modèles de société

intégrant, dans leurs principes fondamentaux, les exigences de durabilité forte et de résilience collective [13]. L'objectif principal de la Low-Tech est d'initier un mouvement global en inspirant le maximum de personnes, ceci afin de baisser le plus rapidement possible notre empreinte écologique et anticiper la descente énergétique et matérielle des années et des décennies à venir [14].

3. Les critères de basses technologie

L'utilité: répondre aux besoins essentiels, comme l'énergie, l'alimentation, l'accès à l'eau ou la santé

L'accessibilité: être abordable et appropriable par le plus grand nombre.

La durabilité: optimiser les impacts tant écologiques que sociaux ou sociétaux à toutes les étapes du cycle de vie (Figure 5).

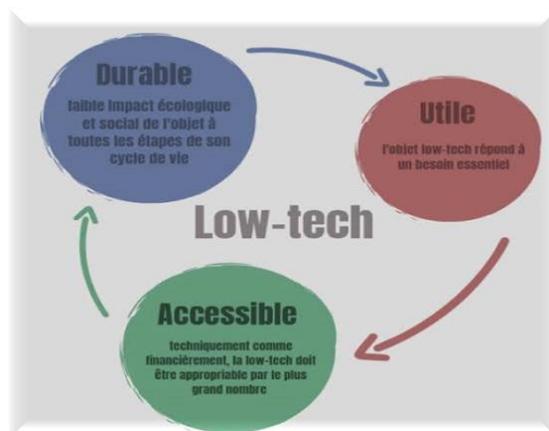


Figure 5. Critères de basses technologie Low-Tech

On peut prendre l'exemple du vélo qui semble Low-Tech au sens strict, pourtant sa fabrication nécessite de nos jours beaucoup et sans doute trop de high-tech [15]. On pourrait donc dire que les low-tech au sens strict (lowest-tech : biens et services, ayant entre autres atteint l'optimum technologique), découlent de la démarche low-tech (lower-tech). Les métropoles, par leurs complexités, et les villes moyennes et les petites villes, de par le fait qu'elles comporteraient, elles aussi, encore un nécessaire mélange low-tech/high-tech, afin par exemple de conserver de la high-tech dans la santé, la recherche et la défense, ne seraient des villes low-tech au sens strict, mais pourraient être d'abord des villes hybrides techno-discernées, puis des villes dans une démarche low-tech. Leur objectif serait donc surtout, une fois recentrées sur l'essentiel, de viser entre autres l'optimum technologique : plus basse intensité et plus grande simplicité technologique permettant

de répondre aux besoins avec un haut niveau de fiabilité [16]. On comprend alors que cette logique s'appliquerait ainsi à la high-tech dite utile (ou essentielle) pour la rendre un peu plus low-tech. L'on ne pourrait pas pour autant dire qu'une high-tech utile serait alors low-tech au sens strict (lowest-tech) ou dans une démarche low-tech (lower-tech), mais l'on pourrait dire qu'une high-tech utile, en ayant atteint entre autres l'optimum technologique, serait le plus low-tech possible (lowest-high-tech), ou en le visant serait dans une démarche low-tech (lower-high-tech). Sur les mêmes principes ou presque Lower-tech et Lower-high-tech formeraient une démarche globale vers un monde plus low-tech.

Les low-tech sont donc bien plus que des solutions techniques ressorties du passé [17] ou bricolées, elles portent en elles des dimensions organisationnelles, systémiques, culturelles, voire politiques et philosophiques [18]. Cela rejoint en ce sens les propos d'Arthur Keller, pour qui la démarche low-tech est *«une approche, une méthode, une vision, une philosophie, presque une culture, dépassant largement la question technologique stricte. Une démarche d'ensemble qui permet de se remettre en conformité avec les limites planétaires, c'est-à-dire de ne pas consommer davantage d'énergie, de matériaux et de ressources que ce que la Terre peut durablement fournir»* [19]. Dans le cas Français, il s'agirait de faire de la France la première Low-tech Nation [20], championne de la réparation, du réemploi et du zéro-déchet [18].

Lorsqu'il s'agit de biens, ces technologies cherchent à être simples, bien pensées, bien dimensionnées et réparables. Elles sont issues d'une fabrication la plus locale possible, favorisant l'emploi, plus proche de l'artisanat que de la production industrielle. Ce sont des technologies issues majoritairement de matériaux de réemploi, réutilisés, recyclés ou de matériaux biosources et géosources "premiers" et utilisent le moins possible de ressources matériaux rares [21].

Les low-tech visent aussi à remettre l'homme au centre des activités par son savoir-faire et son sens pratique. Surtout, ces techniques évitent de développer une complexité interne qui serait cachée par une apparente simplicité d'utilisation : le processus menant à l'action voulue doit être le plus direct possible. Il s'agit d'être ingénieux dans la conception et de limiter l'effet rebond ou *«paradoxe de Jevons»*. La low-tech est aussi un concept à caractéristiques humanistes quelquefois proche du *«Do it by your self»*, philosophie qui incite les individus à fabriquer leurs propres objets à partir de pièces détachées ou de composants simples [17].

Les low-tech sont utilisées dans une volonté de s'affranchir des hautes technologies et de se réappropriier les objets. Les low-tech sont une solution là où la maintenance dépend de systèmes sophistiqués [22].

Les low-tech sont présentes dans la vie quotidienne [17]. Par exemple, aller au travail à vélo, en skate, ou en roller, réparer soi-même ses appareils au lieu de les jeter, jardiner bio ou tendre vers le zéro-déchet [18] correspondent entre autres à la philosophie low-tech [23].

Dès le début de son histoire, l'humanité a utilisé des matériaux et des techniques « low-tech », à savoir naturellement recyclables, biodégradables abondants, et surtout peu polluants : la terre, la paille, la pierre, la laine, le bois, les moulins à vent, à eau et la traction animale. Cette période préindustrielle est une bonne illustration de ce concept. A contrario, le monde moderne utilise massivement les énergies fossiles, les machines, et des matériaux comme l'acier, le béton et le plastique [24]. La Low Tech Nation résume les principes de la démarche low tech telle que décrite dans la note de la Fabrique Écologique (Figure 6):

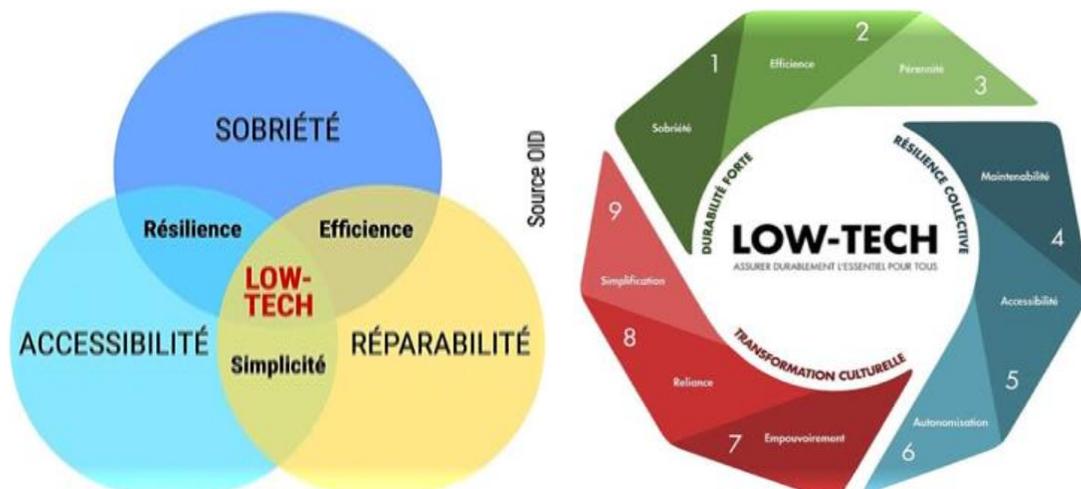


Figure 6. Les trois piliers de basses technologie Low-Tech

Sobriété: Recentre sur l'essentiel et tend vers l'optimum technologique : plus basse intensité et plus grande simplicité technologiques permettant d'assurer les besoins avec un haut niveau de fiabilité.

Efficience : Minimise la consommation d'énergie et de ressources, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie en passant par la production, la distribution, et l'utilisation

Pérennité: Présente une viabilité technique, fonctionnelle, écologique et humaine maximale à court, moyen et long terme

Maintenabilité: Peut être entretenu et réparé par les utilisateurs eux-mêmes autant que possible, avec des pièces et matériaux standards

Accessibilité: Offre une simplicité d'utilisation maximum

Autonomisation: Est fabriqué à partir de ressources exploitées et transformées le plus localement possible

Empouvoirement: Facilite l'appropriation par le plus grand nombre, confère du pouvoir aux citoyens et aux territoires

Reliance: Favorise le partage de savoirs et de savoir-faire, la coopération, la solidarité, la cohésion sociale et les liens entre collectivités

Simplification: Décomplexifie la société aux niveaux socio-économique et organisationnel à partir d'une réflexion sur les besoins et les vulnérabilités.

4. Concepts proches

De nombreux concepts peuvent parfois se rapprocher du concept de la démarche low-tech, se voulant plus précis car restreints à une caractéristique particulière :

retro-tech : il s'agit d'inventorier et évaluer des ressources technologiques existantes (idées, concepts ou brevets écologiques et résilients ou non) et de les mettre à jour, par exemple avec des technologies contemporaines comme le numérique. Ce type d'innovation, dit « rétro-tech », se revendique comme une « innovation frugale » à la différence de la démarche low-tech et cherche à répondre à des besoins en utilisant un minimum de moyens [25],[26],[27].

Wild-tech: par-delà l'opposition high-tech/low-tech, elle entend donner des "outils pour mieux penser ces manières de fabriquer et qui échappent à toute classification.

Inclassables: Est aussi assimilable au "rebel tech [28].

Small-tech: qui s'oppose au "Big Tech", porté entre autres par les GAFAM, se référant ainsi aux questions numériques, "dans la perspective de maintenir un haut niveau de complexité

technologique mais sur la base des notions de biens communs, de travail collaboratif et les principes de démocratie et de justice sociale" [29].

s-lowtech, ou slow-tech: exploite le jeu-de-mots (s)low - slow. But : "explorer les inconvénients de la technologie et ses effets sur la santé humaine et le développement" [30]. Désigne aussi un mouvement visant à réduire l'addiction aux technologies, surtout chez les plus jeunes [31]. Cependant la définition se rapprochant le plus du low-tech est celle se restreignant à des technologies (de tout type) permettant un mode de vie lent [32]. D'autres références définissent le slow-tech par rapport au numérique : il ne doit pas s'opposer à ces technologies, mais chercher à les rendre plus éthiques, plus "vertes", plus en phase avec l'humain, et avec le modèle du triangle de Spreng [33], mais aussi avec sobriété énergétique [34].

easy-tech: technologie facile à mettre en œuvre, à utiliser, et accessible à tous [35]. Au cœur de la définition communément admise des low-tech.

no-tech: promeut un mode de vie évitant d'utiliser la technologie, quand c'est possible. Rejoint certains écrits techno-critiques sur le bilan négatif et chronophage de la plupart des technologies "innovantes". Voir par exemple no-tech magazine [36].

Lo-Tek (ou LoTek): TEK est l'acronyme de "Traditional Ecological Knowledge" (Savoir traditionnel écologique). C'est un nom introduit par Julia Watson pour son livre "*The Power of Lo—TEK - A global exploration of nature-based technology*" [37]. L'auteur rassemble des savoirs et des pratiques multigénérationnels pour "contrer l'idée que l'innovation aborigène serait primitive et existerait isolée de la technologie".

Par conséquent, les low-tech utilisent des matériaux essentiellement recyclables ou recyclés. Les low-tech doivent être viables. Il faut qu'ils soient conçus en utilisant le moins de ressources possible, en privilégiant les matériaux biosourcés et géosourcés « premiers » [38], présents en grande quantité sur la planète. De plus, cela permet aussi qu'ils puissent être réalisés à un prix abordable, et ce toujours dans l'optique d'accessibilité et de démocratisation qui les caractérise.

L'aspect écologique des low-tech ne s'arrête pas là. Alors que la biodiversité est de plus en plus menacée sur Terre, notamment à cause de la destruction des habitats naturels dû à l'extraction de métaux rares, les low-tech sont garants d'un monde écologique. En utilisant des matériaux 3R de Réemploi, Réutilisés, ou Recyclés, et en privilégiant la durabilité dans le temps, le problème des décharges publiques et de la détérioration de l'environnement semble se réduire. De manière plus

large, il faudrait que les entreprises réduisent leurs utilisations en pesticides, et l'usage abusif des emballages, des colorants. Alors que la course à la technologie et à la complexité des appareils se fait de plus en plus féroce, les low-tech se posent comme des technologies accessibles à tous, et réparables par tous. De plus, les métiers en rapport avec les low-tech sont amenés à apparaître dans les années à venir [39]. D'ici 2026, de nombreux métiers low-tech pourraient apparaître avec un fort impact social [40]. Les low-tech étant des technologies accessibles au plus grand nombre, les métiers créés grâce à eux seraient donc accessibles à tous et qui ne nécessiteraient pas forcément de prestigieux diplômes. Elles s'imposent donc comme un modèle social, visant à être accessible à tous peu importe le niveau d'étude ou les moyens financiers. Le low-tech oblige aussi le consommateur à repenser son implication dans la chaîne de production. L'un des principaux atouts des low-tech est de créer des profils de consommateurs qui vont être plus responsables et soucieux de leurs empreintes écologiques sur l'environnement à travers le réemploi, la réutilisation et le recyclage. De plus, les low-tech visent à être localement réparables et donc à faire évoluer le commerce de proximité et les artisans, en créant des liens sociaux entre les gens. Cela permettrait aussi de faire resurgir beaucoup de métiers qui sont en voie de disparition sous la pression des grands groupes.

5. Les principes de low-tech

La low-tech est axée sur sept principes majeurs qui sont:

La diminution de la consommation de ressources naturelles: La low-tech vise à offrir des solutions qui limitent la consommation de ressources naturelles. Le concept clé à retenir est la sobriété via le développement de technologies peu ou pas consommatrices de ressources non-renouvelables (produits issus de l'industrie pétrochimique, énergies fossiles...).

La prolongation de la durée de vie des produits: L'utilisation de systèmes robustes créés pour durer le plus longtemps possible. Ces systèmes sont également conçus dans l'optique de pouvoir être réparables et recyclables afin de repartir dans l'économie circulaire. Cela permet de créer une économie résiliente plus apte à évoluer dans un environnement restreint par un manque de ressources matérielles et financières.

L'appropriation des technologies par tous: L'adoption des low-tech permet de réduire la dépendance de la société à des technologies complexes dont seules quelques personnes possèdent l'expertise. Une large partie des innovations low-tech repose sur la création de produits simplifiés à l'extrême nécessitant peu de technologies complexes et des connaissances élémentaires. La notion “*do-it-by your self*” est très présente.

La création de communautés locales: Grâce à un réseau d'associations et de collectifs, la low-tech se voit également comme un projet social à l'échelle locale/régionale. Les entités low-tech privilégient les échanges de flux locaux (matières premières, énergie) et embrassent une vision globalisée du partage de connaissances et pratiques low-tech. Les notions de coopération et de partage sont essentielles, c'est pourquoi les technologies développées sont majoritairement disponibles en ‘open source’.

Un retour aux bases: Pour atteindre la sobriété, un véritable arbitrage est effectué entre les besoins primaires et secondaires sur la base de 3 critères : la performance, le confort, et l'utilité.

Limiter la dépendance externe: La dépendance des communautés locales vis-à-vis de la chaîne de production de hautes technologies (high-tech) est le plus gros défi à relever. Cette dépendance aux énergies fossiles, aux métaux rares et à la volatilité des prix de marchés rend la société vulnérable. La low-tech offre une alternative aux failles des systèmes high-tech notamment grâce à un maillage territorial de petites industries locales.

Prendre en compte les limites environnementales locale: La low-tech repose sur des outils sophistiqués qui sont fabriqués localement et qui mobilisent le circuit court pour se procurer les matières premières et les ressources nécessaires. Cela veut dire qu'il n'existe pas de standardisation des procédés low-tech car chaque région satisfait ses besoins en fonction des ressources locales à disposition. Les low-tech s'imposent aussi face aux high-tech au niveau humain. En effet, pour obtenir des matériaux rares présents dans les hautes technologies, des

mineurs très jeunes sont envoyés par des mafias rechercher ces matériaux [41]. Les low-tech apparaissent donc comme des garants des droits humains en n'utilisant aucun matériau issu de ces pratiques. Par certains aspects, les low-tech pourraient se rapprocher au niveau écologique de la décroissance. La philosophie des low-tech comme la décroissance pousse à repenser les indicateurs économiques de richesse ainsi que la place du travail dans la vie : recentrer l'attention sur l'Homme. Cependant elle vise surtout à réduire les dépenses énergétiques et matérielle.

Bien que l'aspect réemployable, réutilisable et recyclable des matériaux soit important, la philosophie low-tech veut aussi repenser notre façon de consommer. En effet, malgré le recyclage des matériaux, la perte d'énergie et de matière lors du recyclage est inévitable car le recyclage total n'est pas encore possible. Aussi, dans la philosophie low-tech, on va se poser des questions sur les réels besoins du consommateur. Le modèle économique de la société de consommation qui est notre modèle économique aujourd'hui serait donc à revoir, afin de recentrer nos consommations sur nos besoins réels. Avec le phénomène des low-tech, la société de consommation tend à disparaître mais pas seulement. Les low-tech privilégient les artisans locaux, et les commerces de proximité aux grandes enseignes de vente. Les produits gagnent en valeur brute à être produits localement et développent donc une économie rentable pour de nombreux artisans [14].

5.1. Concepts distincts

Plusieurs concepts s'approchent du concept de Low-tech. Ils ne doivent cependant pas être confondus.

Green tech: Beaucoup confondent les low-tech et les green tech, pourtant ces deux concepts sont plutôt éloignés : les green tech sont des techniques de pointe issues des techniques de pointe (high-tech) qui cherchent à améliorer une partie d'un problème environnemental, mais souvent de façon uniquement local et partiel ; en délocalisant la pollution par exemple c'est un concept qui émerge dans la Silicon Valley et en Allemagne, principalement dans les domaines de l'éolien et du solaire. Les smart cités sont un exemple de green tech régulièrement mis en avant. Ces technologies vertes représenteraient une troisième révolution industrielle, et seraient à but écologique. Cependant, elles sont fabriquées avec des matériaux issus de ressources non renouvelables, notamment des métaux plus ou moins rares, ce qui rend leur bilan peu écologique. La différence entre les deux technologies est donc la notion de durabilité. Alors que les green-tech présentent une solution

viable sur le court terme, les low-tech présentent des solutions moins avancées technologiquement mais viables à long terme, en ne s'appuyant que sur des matériaux recyclés. Par exemple, les constructeurs de voitures électriques ou d'éoliennes ont besoin de matériaux rares tels que le dysprosium (présent dans les aimants de certaines éoliennes) et le néodyme qui sont des terres présentes en très faibles quantités à la surface du globe. L'acier, présent dans la nacelle et le mât, est l'un des matériaux les plus énergivores. Le bilan carbone de ces éléments (voitures électriques, panneaux solaires, éoliennes...) reste cependant faible. Ils représentent une solution viable à moyen terme. Il ne pourrait cependant pas survivre à une expansion importante. Par exemple, l'utilisation des éoliennes comme source d'énergie principale, aux vues de consommations actuelles, est compliquée à mettre en place. Entre ces deux technologies, se dressent donc deux écoles. Ceux qui pensent que l'avenir de la planète passe par une avancée de plus en plus poussée de la technologie et ceux qui pensent que nous devons changer notre manière de faire et nous tourner vers une nouvelle façon de vivre et d'envisager le monde des low-tech. Les low-tech s'opposent donc frontalement aux green tech en ce que les green tech poursuivent l'idée du progrès par la technologie et sont généralement très gourmandes en high-tech.

Low-cost: Dans le contexte économique actuel, low-tech ne signifie pas Low-cost, car l'innovation low-tech nécessite parfois de lourds investissements en recherche et développement, de plus les low-tech souvent plus intensives en main d'œuvre.

6. Débat low-tech et high tech

Les low-tech sont présentées parfois à tort comme des mouvements rétrogrades, qui ne sont pas progressistes. Les défenseurs des high-tech prônent une technologie toujours plus poussée qui permettrait de répondre aux problèmes écologiques. Ils dénoncent dans les low-tech un manque de fonctionnalités et de développement. Les anti low-tech critiquent aussi le retour à petite échelle fait avec cette technologie. Cependant d'autres estiment qu'avec les low-tech, la recherche et le développement seraient extrêmement sollicités, simplement orientés vers des directions différentes comme l'agriculture biologique. En effet, celle-ci requiert peu d'intrants, mais de solides compétences en agronomie, microbiologie... De plus, des adaptations doivent être faites à tous les climats.

Conclusion

Les Low tech sont un véritable atout pour la transition écologique. Elles permettent de diviser par deux, voire trois, les émissions de CO₂ liées à nos activités quotidiennes. Par ailleurs, elles proposent des alternatives viables et abordables pour les personnes à faibles revenus qui n'ont pas les moyens d'investir dans des technologies plus sophistiquées. De plus, les Low tech sont relativement faciles à implémenter. Beaucoup de technologies peuvent être fabriquées artisanalement, à l'aide de matériaux locaux. Ainsi, les communautés locales sont directement impliquées et motivées à participer à la transition écologique. Les hautes et basses technologies ont de nombreux avantages, mais aussi des inconvénients. Au vu des fortes contraintes actuelles, particulièrement environnementales, il nous semble important de bien réfléchir au rôle des technologies, à leurs usages et à leurs impacts sur le climat et nos ressources. Les basses technologies ont l'avantage de pouvoir subvenir à nos besoins essentiels tout en limitant fortement notre impact sur l'environnement lors de leurs productions, leurs utilisations, et leurs fin de vie. Toutefois, des secteurs clés comme la médecine, mais aussi l'informatique ou la communication, ont besoin de haute technologie pour leurs fonctionnements. Les hautes et les basses technologies peuvent ainsi être complémentaires. En résumé, il est important d'évaluer les avantages et les inconvénients avant de choisir une technologie. Il y'a une tendance générale à trop souvent privilégier les hautes technologies sans même se demander si une solution de basse technologie existe.

Chapitre III. Energie solaire thermique et leurs avantages écologiques pour Low-Tech

1. Introduction

L'une des manières d'utilisation et de l'exploitation de l'énergie solaire est la transformation de cette énergie sous forme chaleur. Cette technique est donc appelée solaire thermique. On peut de cette manière utiliser l'énergie solaire pour le chauffage, le séchage, ou la distillation de l'eau. Une autre application consiste à concentrer le rayonnement Solaire pour obtenir des hautes températures et produire ainsi de l'énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine thermique (turbine à gaz ou à vapeur): c'est la technique solaire thermodynamique. Dans ce chapitre on parler sur la conversion solaire thermique, ces types, et ces applications.

1.1. La conversion photothermique

La conversion photo thermique est actuellement la plus facile à mettre en œuvre et la plus répandue. Toutes ces applications sont réalisées suivant deux types de procédés; soit les capteurs plans soit les capteurs à concentration selon la température demandée. Donc la conversion photothermique consiste à une transformation directe du rayonnement solaire, alors ce type de conversion est la première voie. L'effet photothermique comme le décrit Charles Genaudeau est l'histoire de deux couleurs qui ne figurent pas dans l'arc-en-ciel: le Noir et le Blanc, la première absorbe la totalité de la lumière alors que la seconde la réfléchit. Lorsque le rayonnement de la lumière du soleil (photons ou grains de lumière) franchit un obstacle transparent (verre ou plastique) et qu'il arrive sur une surface enfermée dans un caisson et si cette dernière aux propriétés physiques d'un corps noir, il est entièrement absorbé. La surface ou "absorbeur" s'échauffe et réémet dans les grandes longueurs d'onde $2 < \lambda < 10 \mu m$. Ce rayonnement ne peut ressortir et se trouve piégé dans le caisson "une serre" le transparent, alors devient un "corps blanc". On peut augmenter l'énergie captée par l'utilisation d'un double vitrage et/ou de surfaces sélectives (dépôts de multicouches soigneusement choisies) qui présentent un intérêt surtout pour les surfaces captatrices à haute température, ou encore des structures cellulaires anti rayonnantes. Par ailleurs une isolation arrière et latérale est primordiale afin de limiter les pertes par transmission vers

l'extérieur. On peut également placer l'absorbeur sous vide. La conversion thermique est actuellement la plus facile à réaliser et à mettre en œuvre, donc la plus répandue. Elle est réalisée suivant deux types de procédés; soit les capteurs plans soit les capteurs à concentration [42].

1.2. Type des capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires sont caractérisés par leurs mouvements (stationnaire, à poursuite simple et à poursuite double) et par leurs températures opératoires. Les capteurs stationnaires ont une position fixe et ne suivent pas la position du soleil dans le ciel. On en distingue trois types qui sont généralement un capteur plan, capteur parabolique, et capteur parabolique composé [43]. Dans ce qui suit, on présentera les détails du capteur plan utilisé dans ce travail, la figure 8 montre un capteur plan typique.

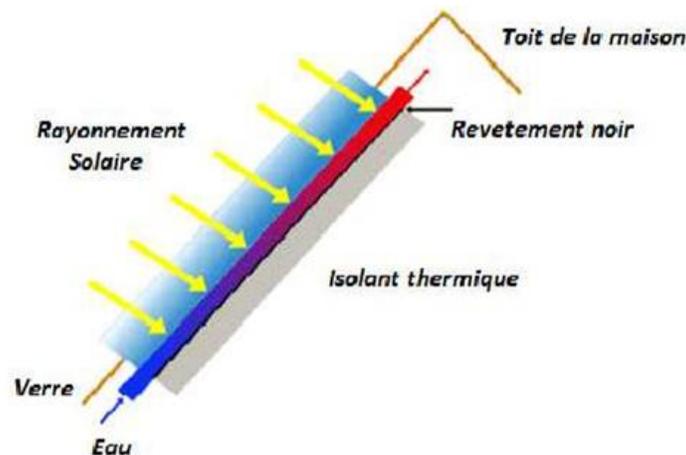


Figure 7. Les principaux composants et des matériaux la conception du capteur thermique [43].

Quand l'énergie solaire passe à travers la couverture transparente et entre en contact avec la surface noire de l'absorbeur, une grande partie est absorbée et transférée au fluide circulant dans les tubes vers le ballon de stockage ou vers d'autres utilisations. La partie arrière de l'absorbeur est généralement constituée d'une couche isolante qui réduit les pertes par conduction. Les tubes peuvent être soudés à la plaque absorbante ou ils peuvent faire partie intégrale de la plaque.

Un capteur thermique se compose des éléments fondamentaux suivants [43]:

Tableau 4. Eléments fondamentaux d'un capteur solaire [43].

Couverture	Transparente: crée un effet de serre au-dessus de la plaque absorbante: en général un verre trempé dit solaire, présentant une faible teneur en fer pour permettre un haut degré de transmission lumineuse;	<ol style="list-style-type: none"> 1. simple vitrage 2. panneau solaire composé 3. plaques ou feuilles en matière plastique
Absorbeur	Noire: permet la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique transportée par le fluide;	<ol style="list-style-type: none"> 1. Métaux (Cu, Al, Fe) 2. Plastique (polypropylène, polyéthylène)
Transporteur de chaleur	Fluide: le fluide caloporteur qui évacue la chaleur jusqu'à l'extérieur du capteur;	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eau 2. Air
Isolation	Matériau: réduit la déperdition de chaleur par la face arrière et les côtés du capteur;	<ol style="list-style-type: none"> 1. Polyuréthane 2. Laine minérale 3. Laine de fibres de Verre
Boîte (Box)	Matériau: contient tous les éléments constitutifs fragiles du capteur comme les tubes, la plaque absorbante...	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aluminium 2. Acier galvanisé 3. Plastique 4. Bois

2. Les séchoirs solaires

2. 1. Les séchoirs solaires directs

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes. Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet de cheminée), ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles [44].

Ce type de séchage présente deux avantages: Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes. Ils sont soumis à un effet de serre, au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement, les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels. Parmi les inconvénients de ce type d'appareil, on peut noter la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit, dues à la partie des ultra-violets transmise par la couverture, et au risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

Pour la construction de ces séchoirs, on dispose d'une gamme variée de possibilité. Les matériaux et techniques employés doivent être compatibles avec l'air chaud humide et les produits à sécher. S'il s'agit d'améliorer des procédés traditionnels, ceux-ci fourniront une base de solutions classiques et adaptées [44].

Ces appareils conviennent bien à une production artisanale, dispersée et diversifiée. Leurs productivités sont assez faibles, de l'ordre de 5 à 10 kg de produits frais par mètre carré de claies. Les durées d'exposition, selon les conditions météorologiques locales et les produits à traiter, varient entre quelques heures, et trois à quatre jours. Les bannes de séchages sont de petites unités, transportables, destinées le plus souvent à la cellule familiale, pour la conservation de ses produits. Des surchauffes peuvent y apparaître du fait de leurs faibles volumes et du faible débit d'air qui les traverse en convection naturelle. Les séchoirs "serres", sont une version à grande échelle des bannes de séchage; leur utilisation est à envisager lorsqu'il faut sécher une grande quantité de produits frais. Pour être efficaces, les surfaces de séchage doivent être limitées à quelques mètres carrés [44].

2.2. Les séchoirs solaires indirects

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher (Figure 8). L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé [44].

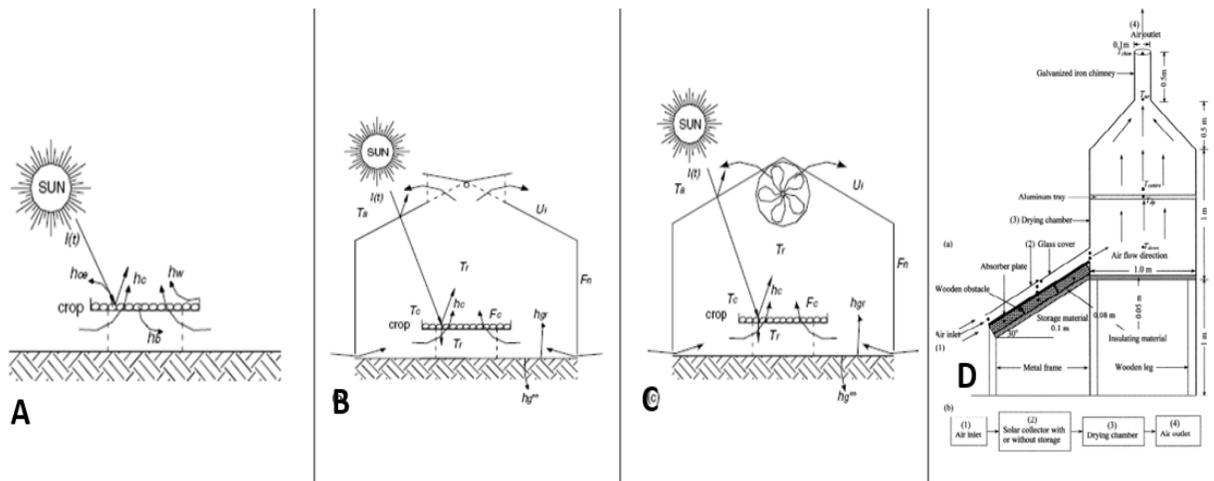


Figure 8. A). Schéma du séchage solaire en plein air, B). Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle, C). Schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée, D). Schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle [44]

3. Les cuiseurs solaire

Plusieurs modèles de cuiseurs solaires ont été construits et distribués dans le monde rural à travers la planète. En Afrique et dans la région sub-saharienne, la vulgarisation de la cuisson solaire est

soutenue par plusieurs organisations gouvernementales et non gouvernementales pour la lutte contre la déforestation et afin de répondre aux besoins des populations des régions dépourvues des ressources énergétiques conventionnelles comme le Tchad, le Mali, le Niger, le Burkina-Faso, et autres. Cette forme d'énergie n'est issue ni d'une mine, ni d'une raffinerie, ou encore d'une centrale nucléaire. Elle est gratuite et disponible en tout lieu. Certes, la cuisson solaire est lente et ne peut être pratiquée à tout moment surtout par ciel couvert ou à la tombée de la nuit, mais elle a une alternative non polluante à l'utilisation des énergies fossiles [45]. Avec la demande énergétique sans cesse croissante et les prix élevés des énergies conventionnelles notamment le pétrole et le gaz; il devient plus que jamais nécessaire de développer et vulgariser la cuisson solaire dans le monde, en général et dans les régions rurale isolées en particulier. entré sur une chaudière cylindrique où de la vapeur est produite pour cuire les repas à grande échelle [46], [47].

3.1. Types de cuissons solaires

Il existe 3 types de cuissons solaires disponibles sur le marché [48].

Cuiseur de type boîte: Solide et performant, le cuiseur boîte (Figure 9) est construit avec une caisse en bois isolée contenant une caisse plus petite dont le fond est noir et les parois intérieures recouvertes d'aluminium (Figure 9-A).

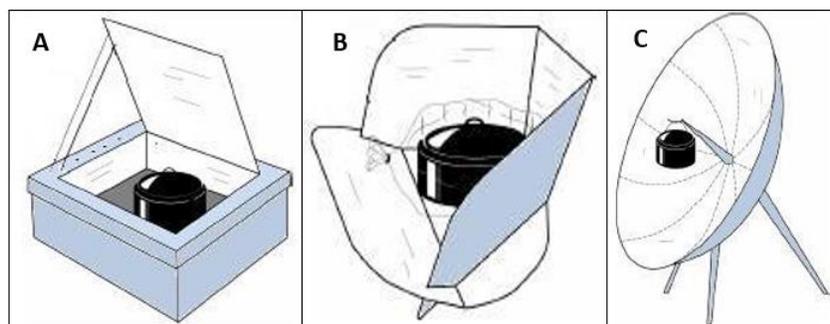


Figure 9. A). Schéma de principe d'un cuiseur de type boîte, B). Schéma de principe d'un cuiseur à panneaux, C). Schéma de principe d'un cuiseur parabolique [46].

Un double vitrage recouvre l'ensemble et permet de produire un effet de serre. Pouvant être fabriqué avec des matériaux locaux (bois, laine de mouton, etc.), il permet d'atteindre facilement des températures de 120 à 150 °C. Facile à fabriquer, le cuiseur boîte est le plus utilisé.

Cuiseur à panneaux: Les cuiseurs à panneaux (Figure 9-B) combinent les éléments du cuiseur boîte et du cuiseur parabolique. Très facile à construire, le cuiseur à panneaux ce n'est ni équipé, sans vitre, absence de système d'isolation. Ses surfaces réfléchissantes sont sans danger pour les yeux. Ses températures étant régulières, il n'a pas besoin d'être ajusté pendant la cuisson. Pour le ranger, il suffit de le plier.

Cuiseur parabolique: Également appelés «cuiseurs paraboliques» (Figure 9-C), les cuiseurs à concentrateur incurvé atteignent rapidement de très hautes températures, mais nécessitent un ajustement fréquent et de nombreuses précautions concernant la sécurité. D'une puissance estimée à 400 W, ils sont les plus chers. La parabole permet de tout cuire et de réaliser des fritures

3.2. Facteurs essentiels pour la cuisson solaire

3.2.1. Températures de cuisson solaire

La cuisine solaire est un moyen écologique et économique de préparer les aliments. Le fonctionnement des cuiseurs solaires dépend uniquement de la quantité de lumière du soleil et non de la température extérieure [46]. La température atteinte par les cuiseurs à cuisson et à panneaux dépend tout d'abord du nombre et de la taille des réflecteurs utilisés. Un cuiseur "boîte" et les cuiseurs à panneaux réfléchissants avec généralement une température entre 100 et 200 °C et dépend tout d'abord du nombre et de la taille des panneaux utilisés. La température atteinte par d'autres types de cuiseurs (les cuiseurs paraboliques) varie entre 150 et 250 °C en fonction du diamètre du réflecteur [46]. Beaucoup de gens préfèrent cuisiner à des températures plus basses parce que cela leur permet de mijoter pendant qu'ils sont occupés ailleurs. Avec un cuiseur "boîte" à réflecteur unique, une fois les aliments cuits, ils restent chauds sans brûler. Il est bon de savoir qu'aucun aliment ne peut de toute façon dépasser 100°C tant que toute son eau ne s'est pas évaporée. Les températures élevées indiquées dans les livres de recettes des cuiseurs traditionnels ne sont utilisées que pour une cuisson plus rapide et pour des effets spéciaux tels que le brunissement des aliments [49]. Les températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs sont données sur la figure 10.

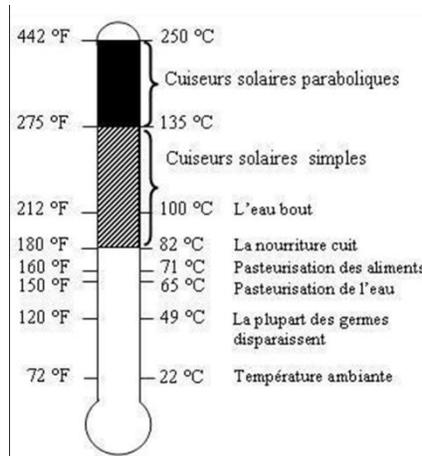


Figure 10. Températures de cuisson pour les différents types de cuiseurs [46]

3.2.2. Temps de cuisson solaire

En général, la cuisson dans un cuiseur "boîte" avec réflecteur prend deux fois plus de temps que dans un cuiseur traditionnel. Cependant, comme il est impossible de brûler réellement les aliments, il n'est pas nécessaire de surveiller le cuiseur ou de remuer les aliments pendant la cuisson. Il est possible de mettre plusieurs contenants avec différents aliments et de revenir plus tard pour trouver les aliments cuits correctement et gardés au chaud jusqu'à ce qu'ils soient retirés du cuiseur. Dans les cuiseurs à panneaux, les petites portions sont souvent cuites dans un seul récipient, ce qui accélère la cuisson. Certains utilisateurs ont exprimé le besoin de remuer les aliments pour s'assurer qu'ils cuisent également (mais pas nécessairement) partout. La cuisson dans un cuiseur parabolique est très similaire à la cuisson sur un feu ordinaire. Comme la lumière solaire concentrée va directement au fond du récipient, le récipient se réchauffe et cuit très rapidement. Mais pour éviter que les aliments ne brûlent, il est nécessaire de remuer et de surveiller attentivement, même si cela signifie "ralentir" en orientant le plat d'une manière non optimale [50].

3.2.3. Localisation de la cuisson solaire

Le cuiseur solaire doit être installé à l'extérieur, dans un endroit ensoleillé, exposé au vent, mais à l'abri des vents forts, des nuages, du brouillard, de la poussière et de l'ombre possible des arbres ou des bâtiments voisins, ce qui réduit le rayonnement et prolonge le temps de cuisson. Le site choisi doit être à l'extérieur des sites où sont déposés les déchets humains, les déchets animaux et

les eaux usées. Il est préférable de clôturer le site pour éviter la présence d'animaux domestiques [48].

3.2.4. Moment d'utilisation du cuiseur solaire

Le cuiseur solaire doit être utilisé lorsque la longueur de l'ombre au sol est inférieure à la taille réelle du cuiseur (Figure 11). Le soleil doit donc être assez haut dans le ciel pour permettre la cuisson. La cuisson solaire ne doit pas être faite tôt le matin ou après le coucher du soleil. Il est donc idéal pour cuire entre 9 et 15 heures [51, 52].



Figure 11. Heures propices à la cuisson solaire [53]

Types de récipients utilisés pour la cuisson des aliments

Il est préférable d'utiliser des contenants de couleur foncée qui absorbent mieux la chaleur, tandis que les contenants de couleur claire reflètent les rayons du soleil [54] (Figure 12). Et doit de la peinture noir mat avec mention "non toxique" quand elle est sèche [50].

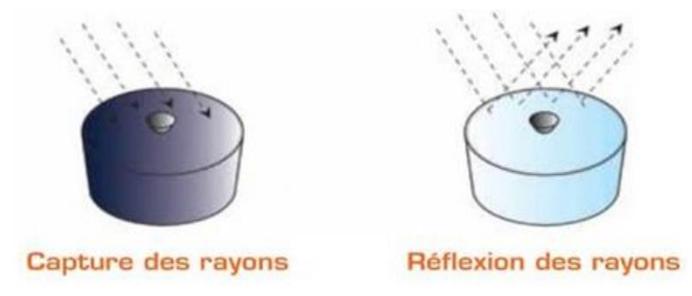


Figure 12. Capture ou réflexion des rayons du soleil [53].

3.3. Classification des cuiseurs solaires

Les cuiseurs solaires sont classés en deux grandes catégories : les cuiseurs solaires sans stockage et les cuiseurs solaires avec stockage. Le classement des cuiseurs dans chaque groupe est illustré sur la figure 13.

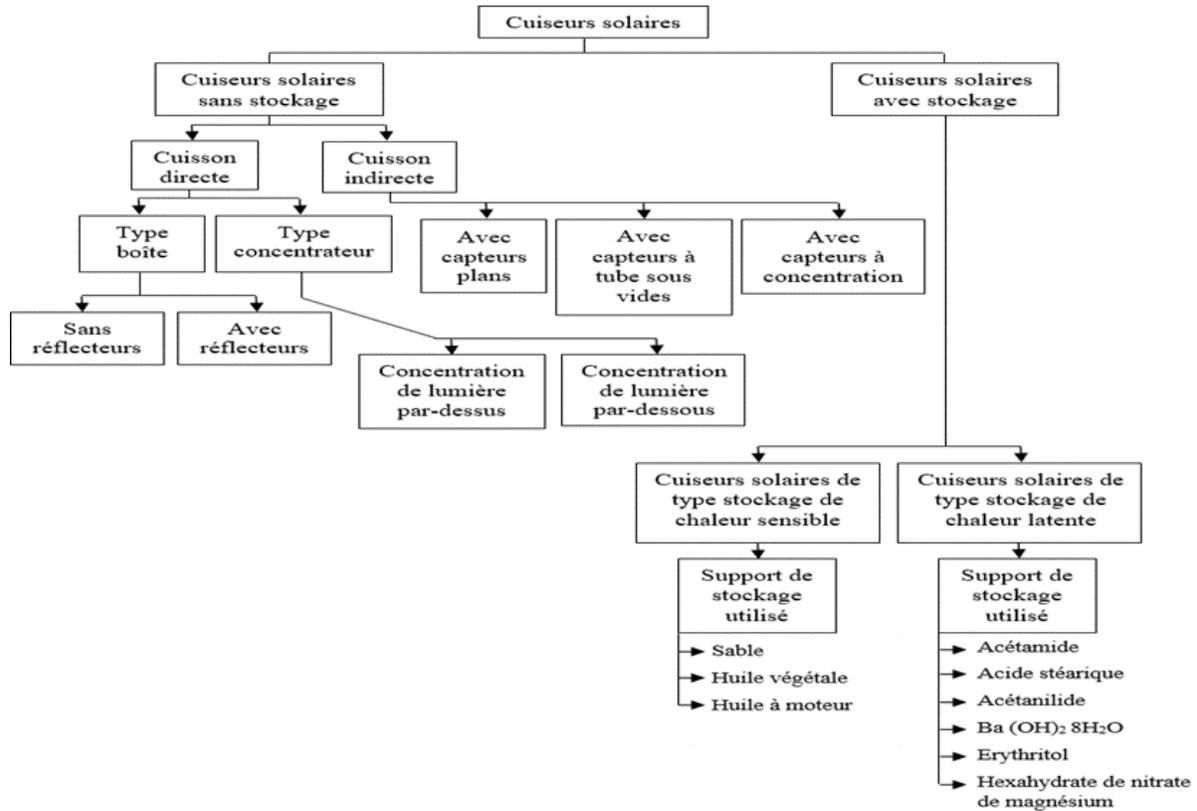


Figure 13. Classification des cuiseurs solaires sans et avec stockage thermique [55]

3.3.1. Cuiseurs solaires sans stockage

Les cuiseurs solaires sans accumulation sont classés en cuiseurs solaires directs et indirects selon le mécanisme de transfert de chaleur vers la marmite. Les cuiseurs solaires de type direct utilisent le rayonnement solaire directement dans le processus de cuisson tandis que les cuiseurs indirects utilisent un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du collecteur à l'unité de cuisson [55].

Cuisson directe: Les cuiseurs solaires fonctionnant en mode directe commercialement réussis sont de type boîte et de type concentrateur [46]. Le cuiseur solaire à cuisson est, comme son nom l'indique, un caisson isolé à simple ou double vitrage. Ce type de cuisson ne dépend que de l'effet de serre dans lequel le verre transparent permet le passage du rayonnement solaire à ondes courtes

et est opaque à la partie rayonnement à ondes longues. L'isolation à double paroi peut également être utilisée pour retenir plus de chaleur à l'intérieur de la cuisine. Des miroirs peuvent être ajoutés pour réfléchir plus de rayonnement solaire dans la marmite (Figures 14 a-b).

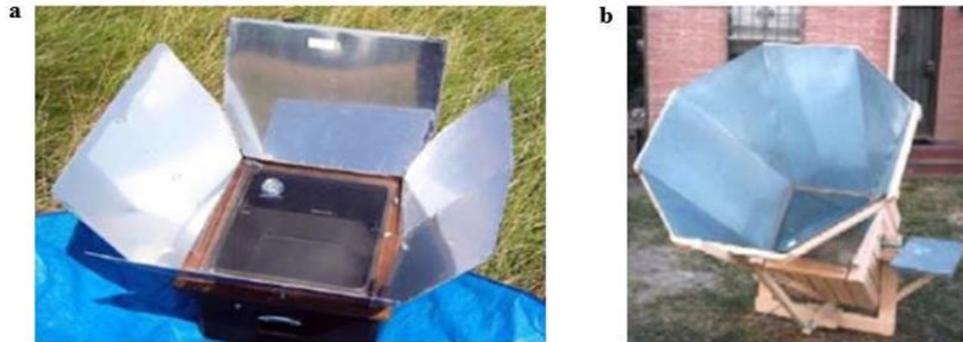


Figure 14. Cuiseurs solaires boîtes avec: a) quatre; b) huit réflecteurs additionnels [55].

Dans le premier type (Figures 15 a-b), la lumière est concentrée depuis le haut du récipient et ce mode de concentration d'énergie n'est pas très souhaitable pour faire cuire. Pour le deuxième type (Figures 16 a-b-c), la lumière est concentrée au-dessous du pot et ce mode est le plus commode pour la cuisson [46].

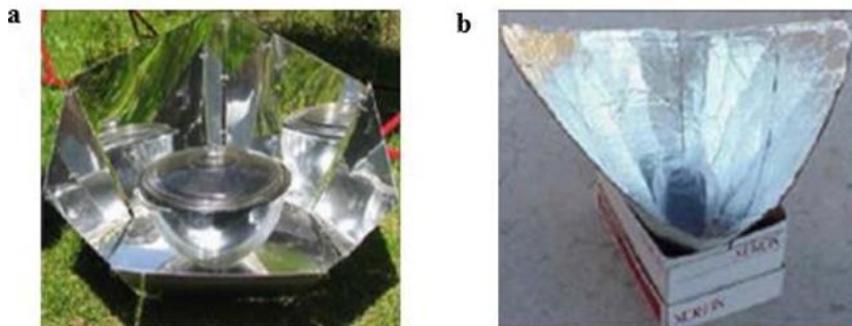


Figure 15. Cuiseurs solaires concentrant la lumière par-dessus: a). cuiseur à panneaux, b). cuiseur à entonnoir.



Figure 16. Cuisseurs solaires concentrant la lumière par-dessous: a). cuisseur sphérique, b). cuisseur à miroirs de Fresnel, c). cuisseur parabolique.

Cuisson indirecte: Dans les cuisseurs solaires indirects, le récipient de cuisson est physiquement séparé du collecteur et un vecteur d'énergie est nécessaire pour transférer la chaleur du collecteur au récipient. Les cuisseurs solaires avec des capteurs en verre plat, des capteurs à tubes sous vide et des capteurs à concentration sont les plus connus sous cette catégorie [46]. Les cuisseurs solaires à capteurs en verre plat (Figure 17) sont généralement équipés de deux casseroles avec la possibilité d'intégrer le poêle dans la construction du poêle, l'huile de tournesol est utilisée comme transfert thermique. Les avantages de ce type de cuisine sont les grandes dimensions des récipients, la vitesse de cuisson, et la cuisson dans la maison. Les inconvénients des poêles à accumulation conventionnels sont la détérioration des performances due au cycle réversible pendant la nuit et les périodes nuageuses du jour, ainsi que la grande capacité de chauffage, et les casseroles fixes qui les rendent difficiles à nettoyer [46, 55].



Figure 17. Les cuisseurs solaires à capteurs en verre plat.

3.3.2. Cuiseurs solaires avec stockage

Le stockage de l'énergie thermique est essentiel chaque fois qu'il existe un décalage entre l'offre et la demande d'énergie. Les cuiseurs solaires doivent contenir un matériau accumulateur de chaleur pour stocker l'énergie thermique afin de résoudre le problème de la cuisson à l'extérieur et l'impossibilité de cuire les aliments en raison des nuages fréquents pendant la journée ou en dehors des heures de pointe. L'énergie thermique peut être stockée sous la forme d'une modification de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, latente et thermochimique, ou d'une combinaison de ces éléments [56].

Stockage de chaleur sensible: Dans les cuiseurs solaires du type stockage de chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée en augmentant la température d'un solide ou d'un liquide. L'huile à moteur est généralement utilisée comme moyen de stockage dans les cuiseurs à boîtes (Figure 20 a), où pendant la journée, la température maximale de stagnation à l'intérieur du cuiseur avec le matériau de stockage est identique à la température à l'intérieur du cuiseur sans stockage mais est supérieure de plus de 20 degrés entre fin, après-midi, et minuit. L'autre moyen de stockage thermique possible est le sable. En effet, du sable a été utilisé comme support de stockage pour la cuisson à l'intérieur des locaux, 6 heures de cuisson à l'extérieur ont été enregistrées et environ 3 heures par jour à l'intérieur ont été effectuées [46].

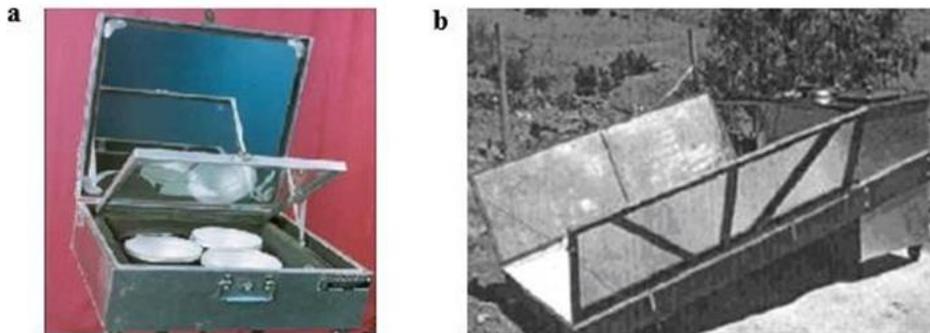


Figure 18. Cuiseurs solaires à stockage de chaleur sensible avec support de stockage: a). l'huile à moteur; b). l'huile végétale.

L'huile végétale est également utilisée comme fluide de stockage, généralement en combinaison avec des collecteurs plats et un réservoir de stockage thermique (Figure 18), où l'huile végétale est utilisée comme fluide de transfert thermique, est chauffée au niveau du collecteur, puis acheminée vers le récipient de cuisson ou l'unité de stockage par un système de régulation bien adapté.

L'avantage de ce type d'entreposage est de garder les aliments au chaud le plus longtemps possible. Les principales limites des matériaux accumulateurs de chaleur sensibles sont la faible capacité calorifique spécifique et la diminution de l'efficacité de cuisson lorsque la température du matériau accumulateur diminue pendant le déchargement.

Stockage de chaleur latente: Le stockage de la chaleur latente utilise l'énergie stockée dans un matériau lorsqu'il change d'état d'une phase à l'autre. L'utilisation de matériaux à changement de phase pour stocker l'énergie sous forme de chaleur latente a été reconnue comme l'une des meilleures solutions pour fournir un moyen efficace de stockage en raison de sa haute densité de stockage et de sa température de fonctionnement constante. Les différents types de cuiseurs solaires intégrés avec des PCM comme moyens de stockage thermique.

On a utilisé d'abord des PCM tel que l'acide stéarique (point de fusion 55 °C, chaleur latente de fusion 161 kJ/kg) et l'hexa hydrate de nitrate de magnésium (température de fusion 89°C) intégrés au-dessous des récipients de cuiseurs boîtes (Figure 19), l'inconvénient de ce type de conception est que le transfert thermique à partir du matériau au récipient pendant le mode de décharge est lent et plus de temps est nécessaire pour la cuisson en soirée, ce mode de stockage dépend non seulement de l'irradiation solaire et de la quantité de nourriture à cuire mais aussi des propriétés thermo physiques du PCM (modulation par impulsion et codage) [49, 57].

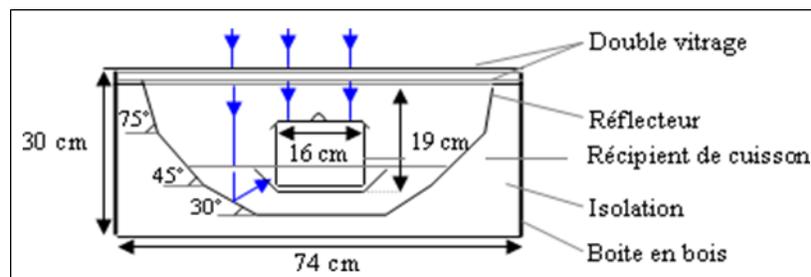


Figure 19. Schéma d'un cuiseur solaire à stockage de chaleur latente de type boîte avec PCM intégré en mode indirect [58].

Par la suite, les récipients de cuisson ont été modifiés et formés en deux cylindres intégrés pour contenir les aliments entourés par le matériau. L'acétamide est d'abord utilisé comme PCM (point de fusion 82°C, chaleur latente de fusion 263 kJ/kg) et ensuite comme acétanilide (température de fusion 118°C, chaleur latente de fusion 222 kJ/kg), le taux de transfert thermique entre le matériau et le récipient est devenu plus grand et la préparation alimentaire plus rapide. La cuisson dans la

nuit à l'intérieur de la maison, un cuiseur solaire en caisson avec stockage d'énergie a été développé, le cuiseur contenait un simple collecteur plat et des miroirs pour rediriger les rayons du soleil vers le récipient de cuisson, le PCM choisi était $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ hydrate de sel. Un cuiseur de type indirect (Figure 22a) a été développé, ce cuiseur est composé d'un capteur plat exposé à l'extérieur et d'un récipient de cuisson avec un PCM dans la pièce, le PCM était du nitrate de magnésium hexa-hydraté (température de fusion $89\text{ }^\circ\text{C}$, chaleur latente de fusion 134 kJ/kg) intégré dans l'appareil. Des tests ont été effectués sans frais et avec des frais différents à différents moments de la journée, les résultats indiquent que ce cuiseur peut être utilisée avec succès pour cuisiner différents types de repas à midi, l'après-midi, et le soir. Elle peut également être utilisée pour stocker des repas chauds pour le matin [46].

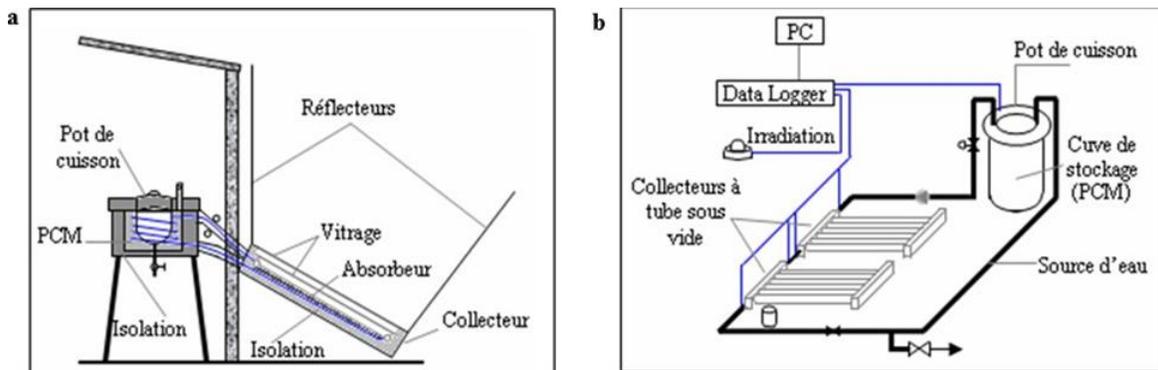


Figure 20. Schéma de cuiseurs solaires à stockage de chaleur latente avec PCM intégré en mode indirect utilisant: (a) des capteurs plans; (b) des capteurs sous vides [46].

Un autre cuiseur solaire indirect (Figure 20-b) a été développé avec des capteurs à tube sous vides. Le PCM utilisé est du erythritol (température de fusion $118\text{ }^\circ\text{C}$, chaleur latente de fusion 339.8 kJ/kg), où une pompe fait circuler un fluide caloporteur des capteurs vers l'unité de cuisson (entourée du PCM) à travers un échangeur de chaleur sous une boucle fermée, l'énergie stockée dans le PCM est utilisée pour faire cuire la nourriture durant nuit. La température maximale du PCM en stockage de chaleur pour la cuisson solaire reportée dans la littérature est seulement de $120\text{ }^\circ\text{C}$ ce qui n'est pas approprié pour faire frire et à faire cuire rapidement. Néanmoins quand le PCM est utilisé comme matériau de stockage dans la cuisson solaire, le mode indirect de chauffage est le plus approprié.

3.4. Conception et le développement des cuiseurs solaires à travers le monde

3.4.1. Les cuiseurs solaires de type boîte

Cuiseurs boîtes sans et avec réflecteurs: Beaucoup de travail ont été réalisé au cours des dernières décennies pour étudier et déterminer la performance thermique des cuiseurs solaires à caisson sans et avec réflecteurs, particulièrement en Inde, en Asie, en Europe, et en Afrique. Kumar a développé une corrélation pour le coefficient de perte de chaleur d'une boîte de cuiseur solaire qui a l'eau comme sa charge, il a également présenté une analyse thermique pour évaluer le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle du cuiseur [46]. En 2001, Nahar a conçu [47], fabriqué (Figures 21 a-b), testé et comparé les performances d'un cuiseur solaire boîte à double réflecteurs avec un matériau isolant transparent avec celle d'un cuiseur boîte possédant un seul réflecteur sans matériau isolant.

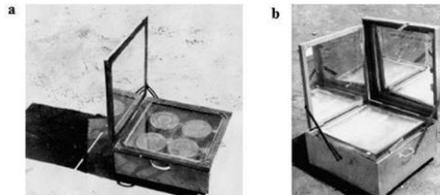


Figure 21. Cuiseurs solaires boîte fabriqué et testé par [47] : a). avec un seul réflecteur, b). avec deux réflecteurs.

Al-Saad et Jubran ont réalisé des tests sur les performances thermiques d'un cuiseur solaire type boîte (Figure 22a), utilisant des réflecteurs à concentration sans poursuite solaire [48]. Ils ont montré que le cuiseur peut donner une meilleure collecte de la chaleur d'où une cuisson plus efficace. Amer a présenté et largement étudié les performances d'un nouveau modèle de cuiseur solaire (Figure 22b), où l'absorbeur est exposé au rayonnement solaire par le haut et par la face inférieure, un ensemble de réflecteurs sont utilisés pour diriger le rayonnement sur la face inférieure de la plaque absorbante.

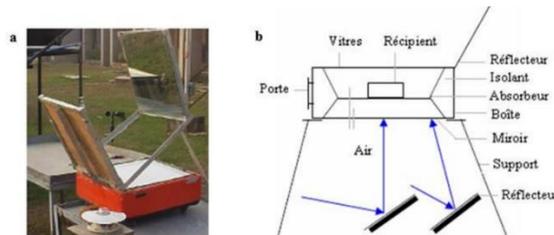


Figure 22. Schéma du cuiseur boîte avec réflecteurs: (a) exposés par la face supérieure. ; (b) exposés par la face inférieure

Cuiseurs boîtes à usage multiple: Kumar a conçu et fabriqué un cuiseur-séchoir solaire de type pyramide tronqué (Figure 23a), qui satisfait les normes prescrites par le Bureau des Standards de l'Inde concernant les cuiseurs solaires de type boîte, la géométrie tronquée de la pyramide concentre la lumière vers le bas du cuiseur. Ils ont également recommandé quelques modifications pour obtenir de plus hautes températures et des temps de cuisson réduits. Le groupe de travail ont ensuite conçu, fabriqué, et testé un dispositif de type pyramide tronqué (Figure 23b), qui pourrait être utilisé pour la cuisine domestique aussi bien que pour le chauffage de l'eau.

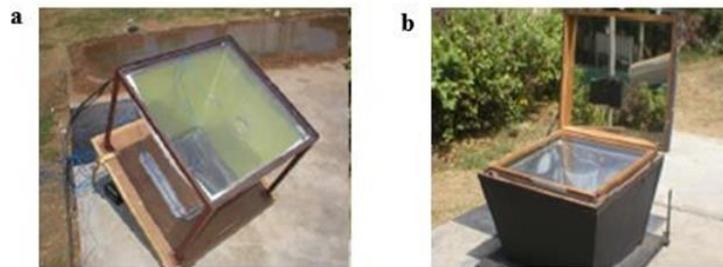


Figure 23. a). Cuiseur séchoir- pyramide, b). cuiseur chauffe-eau

Cuiseurs boîtes et récipients de cuisson: Des études et des tests ont également été réalisés ces dernières années sur le rôle du récipient à l'intérieur du cuiseur, la chaleur doit pénétrer dans le récipient et cuire les aliments de manière uniforme. Une étude sur la performance d'une boîte de cuiseurs solaires avec un changement dans la forme des couvercles des ustensiles utilisés, ils ont conclu que la performance peut être améliorée si un ustensile avec une forme concave est utilisé au lieu d'un couvercle ordinaire. Rao et Subramanyam ont étudié l'utilité de soulever le contenant sur des crochets, ce qui générera une surface de transfert thermique au fond du contenant et permettra d'atteindre plus rapidement des températures de saturation pour la cuisson, ils ont également testé un contenant (Figure 24), placé sur une cavité annulaire centrale et conclu que cette nouvelle configuration permet de diminuer le temps de cuisson.

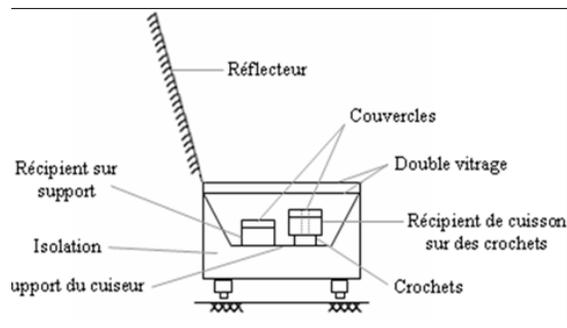


Figure 24. Schéma du cuiseur boîte avec un récipient mis sur support

3.4.2. Cuiseurs solaires à concentration

Cuiseurs à concentration de type cylindro-parabolique: Figure 25a montre une analyse théorique de l'énergie d'un cuiseur solaire cylindro-parabolique, ainsi que la distribution des pertes exégétiques dans le cuiseur et l'analyse exégétique de la surface exposée au rayonnement solaire qui absorbe le flux radiatif des différentes températures. Certains chercheurs ont appliqué les Normes Internationales pour tester les performances d'un cuiseur solaire et les a exploité à la détermination expérimentale des rendements de l'énergie et de l'énergie d'un cuiseur solaire cylindro-parabolique (Figure 25b).

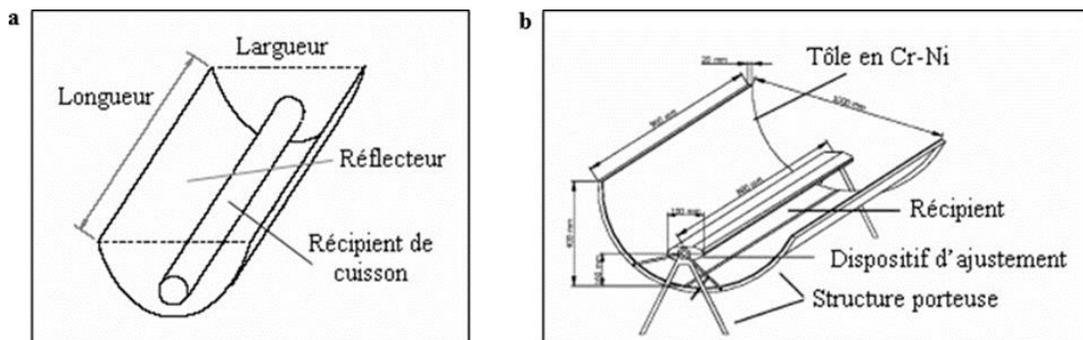


Figure 25. a). Cuiseur cylindro-parabolique, b). schéma du cuiseur cylindro-parabolique.

Cuiseurs à concentration de type parabolique: Figure 26a montre un cuiseur solaire domestique à concentration de type Fresnel, qui fournit une température adéquate nécessaire pour la cuisson et la friture. La Figure 26b montre les modifications apportées au cuiseur solaire composé de deux unités séparées: un concentrateur parabolique d'un côté et une boîte isolée contenant le récipient d'un autre côté.

Le but étant d'améliorer sa capacité de travail et ceci en utilisant trois différents types d'absorbeurs optimisés [46].

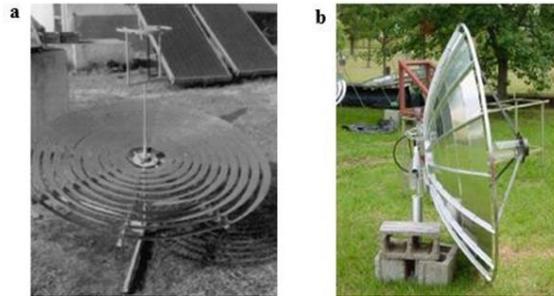


Figure 26. a). Cuiser parabolique avec des miroirs de Fresnel, b). cuiser parabolique composé

Figure 26a décrit la conception, la fabrication et le test d'un nouveau cuisier solaire portable, avec un grand réflecteur parabolique pliable. Les résultats obtenus avec ce prototype montrent que le cuisier solaire atteint une puissance moyenne de 175 W, avec une efficacité énergétique de 26.6 %. Cette puissance fournit une énergie suffisante pour faire cuire un repas simple pour deux personnes en un temps de 2 heures. Un cuisier solaire parabolique (Figure 26b). Le cuisier contient un dispositif qui enregistre les données de la température ambiante, la température de cuisson et l'irradiation solaire [46].



Figure 27. a). Cuiser parapluie, b). cuiser parabolique

3.4.3. Cuisiers stockeurs d'énergie

Cuisiers solaires boîtes: Nahar a conçu, fabriqué et testé un cuisier solaire de type boîte avec l'utilisation d'une huile à moteur comme matériau de stockage de sorte que la cuisson peut être effectuée en fin de soirée [49]. Sharma et al. ont conçu et fabriqué une unité de stockage de chaleur

latente de forme cylindrique (Figure 28), pour le récipient de cuisson d'un cuiseur solaire pour stocker l'énergie solaire pendant la journée qui peut être utilisée pour cuire lors de la soirée [50].

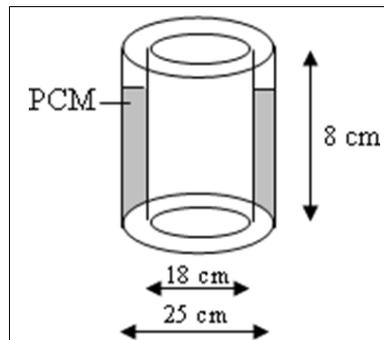


Figure 28. Schéma de l'unité de stockage de chaleur latente de forme cylindrique du cuiseur boîte avec PCM

Cuiseurs solaires à concentration: En 2008, Mawire et al. ont étudié un cuiseur solaire fonctionnant en mode indirect utilisant un concentrateur parabolique et muni d'une cuve de stockage thermique (Figure 29a) [51]. Les équations du bilan énergétique sont employées pour modéliser le système de réception d'énergie solaire et le système thermique de stockage d'énergie du cuiseur considéré [46]. En 2010, Muthusivagami et al. ont proposé d'étudier un système de cuisson solaire fonctionnant en mode indirect basé sur un capteur cylindro-parabolique à concentration d'énergie et muni d'une cuve de stockage thermique intégrée avec un PCM (modulation par impulsion et codage), et une unité de cuisson qui peut être installée à l'intérieur du local (Figure 29b) [52].

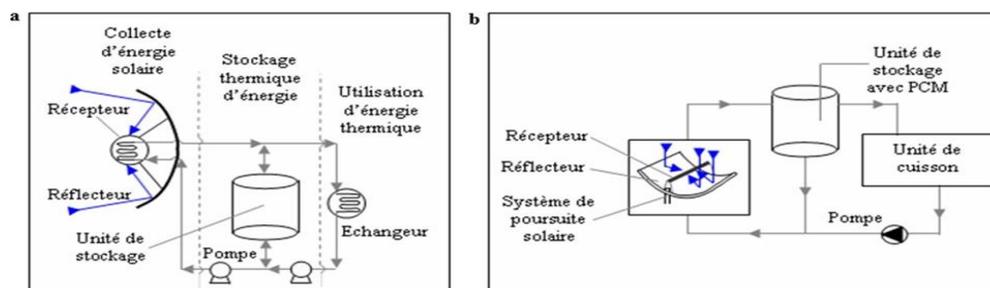


Figure 29. a). Schéma du cuiseur solaire parabolique indirect, b). Schéma du cuiseur solaire cylindro-parabolique indirect

Cuiseurs solaires indirects: Figure 30a démontre la faisabilité de l'utilisation de réfrigérants dans un système de cuisson solaire, qui consiste en un capteur solaire à tube sous vide avec un long caloduc intégré menant directement à la plaque de cuisson, pour cuire et/ou stocker les aliments chauds en fin de soirée. Sharma et al. ont étudié la performance thermique d'un prototype de

cuseur solaire basé sur un capteur à tube sous vide avec une unité de stockage équipée d'un matériau à changement de phase (MCP) (Figure 30b) [50].

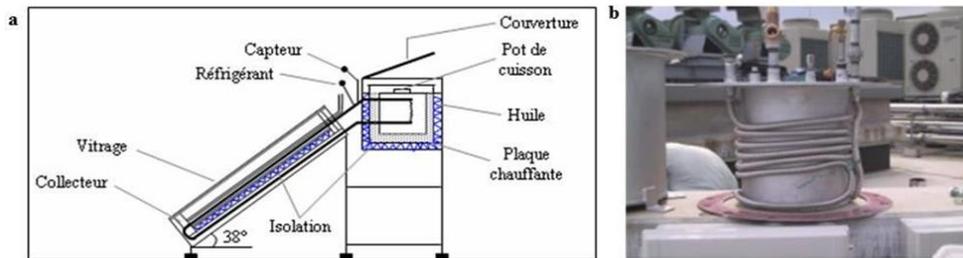


Figure 30. a). Schéma du cuseur solaire indirect contenant des réfrigérants

Les installations solaires peuvent être utilisées dans tous les climats pour produire de l'eau chaude, l'eau distillée et le séchage des produits, mais leurs performances annuelles sont proportionnelles à l'ensoleillement du lieu où sont installés les capteurs solaires. Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

3.5. Évaluation économique et environnemental du cuisson solaire

3.5.1. Contribution des cuseurs solaires à la réduction du dioxyde de carbone

De nombreuses études scientifiques révèlent que le taux de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 31% au cours des 200 dernières années. Les émissions de CO₂ ont augmenté à un taux moyen de 1,7 % par année. Les scénarios prévoient un taux de croissance plus rapide des émissions de CO₂ allant jusqu'à 2,2 % par an pour la période allant jusqu'en 2020. En 1996, Nandwani a mené une étude sur les avantages écologiques des cuseurs solaires au Costa Rica et dans le monde, comparant les avantages et les limites des cuseurs solaires aux cuseurs traditionnels en bois et électriques [53]. Par conséquent, il a constaté que le délai de retour est d'un cuseur en boîte ; en considérant une utilisation de l'appareil de 6 à 8 mois par année, il est d'environ 12 à 14 mois. En outre, Nahar mène depuis plusieurs années des études sur différents modèles de cuseurs solaires dans les conditions climatiques indiennes avec une évaluation du potentiel d'émissions de CO₂. On estime que le temps de retour varie entre 1,28 et 4,82 ans selon le vecteur énergétique (combustible de cuisson) à remplacer. Pour les différents cuseurs expérimentés, l'économie d'énergie est estimée à 5175 MJ par an. Les ressources énergétiques renouvelables joueront un rôle

important dans l'avenir de la planète, le développement des systèmes de cuisson solaire permettra de répondre aux besoins en énergie de cuisson et de résoudre certains problèmes liés à la cuisine traditionnelle, notamment dans les pays en développement [46]. Le bois de feu et le butane sont les principales sources d'énergie utilisées pour la cuisson par les ménages dans de nombreux pays en développement. En raison de sa facture élevée, ces nations ont de plus en plus du mal à maintenir la subvention publique des énergies fossiles. Dans le monde, près de 3 milliards de personnes n'ont que le bois de feu pour cuire leurs aliments, alors que la quasi-totalité d'entre eux vivent dans les régions ensoleillées. L'organisation mondiale de la santé (OMS) rapporte que chaque année 1,6 millions de personnes, meurent de maladies respiratoires provoquées par la pollution de l'air intérieur due à l'utilisation de combustibles solides pour la cuisson [54]. Six cents kilogrammes de bois sont nécessaires par personne et par année, ce qui est équivalent à environ 4 tonnes par famille. Sur un carré de 4 m de côté, le soleil donne plus d'énergie en un an que ces 4 tonnes de bois [54].

3.5.2. L'impact de cuisinier solaire Low-Tech sur l'environnement

Les ressources énergétiques renouvelables joueront un rôle important dans l'avenir de la planète, le développement de systèmes à cuisson solaire permettra de répondre aux besoins en matière d'énergie de cuisson et de résoudre certains problèmes liés aux cuissons traditionnelles, notamment dans les pays en développement [55]. Un cuisinier solaire domestique sauve 100 arbres en 15 ans de durée de vie, évite le dégagement de 1,5 tonne de dioxyde de carbone (CO₂), donne plus de temps aux femmes et aux enfants qui dépensent 15 heures par semaine pour la corvée des bois [54] et permet également d'augmenter le pouvoir d'achat. En effet, le budget alloué à la cuisson en bois de feu des ménages à faible revenu à la campagne absorbe une part importante du revenu familial, entre 10-30% selon le pays [56]. En ville, le prix de l'énergie de cuisson représente un tiers du revenu familial [54]. La consommation annuelle du gaz de pétrole liquéfié (GPL) est estimée à 2,4 mégatonnes (Mt), dont le butane et le propane représentent respectivement 90% et 10% [57]. Le butane est utilisé quasi en totalité dans le secteur résidentiel, mais son prix très faible fait que son usage se répand progressivement à d'autres secteurs plus inattendus, comme le pompage de l'eau d'irrigation et le chauffage des serres [58]. L'évolution du prix du butane sur le marché International affecte considérablement la part de couverture de subvention de l'État qui a connu une montée vertigineuse entre les années 2009 et 2012 passant de 91 à 224% [59]. Toutefois,

la contribution de l'État est de 110% et demeure supérieure au prix supporté par le consommateur. La consommation annuelle du bois de feu est évaluée à 11,3 Mt, dont 89% en milieu rural et 11% en milieu urbain [57]. [60], [61]. La moitié du bois de feu consommé (53% ou 6 Mt) provient de la forêt alors que la capacité de production est de 3,25 Mt [57]. Le reste est fourni par les vergers fruitiers (19% ou 2,15 Mt) et les résidus agricoles (28% ou 3,15 Mt) [57]. Les formations forestières boisées (non compris l'alfa) couvrent une superficie d'environ 5,7 millions d'hectares, et sont constituées à 66% d'essences feuillues, 18% d'essences résineuses, 9% de plantations artificielles et 7% de matorrals. La déforestation est estimée entre 30 000 à 50 000 ha par année en raison de la surconsommation de bois de feu et son renouvellement (reboisement) est insuffisant 8% [57]. La collecte s'effectue en moyenne 3 à 4 fois par semaine et dure de 3 à 8 h suivant la disponibilité en bois [60]. Le budget énergétique représente 20% des dépenses des ménages liées au logement selon Lahlou (2011) [62] et 24,2% selon Lahlimi (2016) [63]. Toutefois, l'adoption en masse des énergies renouvelables dans le mix énergétique dans certains pays comme le Maroc n'a pas eu d'impact sur l'utilisation du gaz et du bois de feu, vu la faible part de la cuisson électrique au Maroc. Dans ce sens, une attention particulière est portée sur l'utilisation de l'énergie solaire, en particulier à des fins de cuisson. Son utilisation pourrait être une alternative très intéressante et une solution viable de nature à augmenter le pouvoir d'achat des ménages, à diminuer considérablement l'émission de dioxyde de carbone, la déforestation, et l'érosion des sols, à baisser les mortalités causées par les maladies respiratoires et à participer à la création d'emplois. La cuisson solaire permet de cuire les aliments grâce à l'énergie solaire ou d'assurer des procédés tels que la pasteurisation et la stérilisation. Les cuiseurs capturent les rayons solaires au moyen de surfaces brillantes qui réfléchissent les rayons du soleil et les concentrent sur des récepteurs qui transfèrent la chaleur aux aliments. Les cuiseurs solaires peuvent être internes ou externes avec des tailles différentes: petite (3-4 personnes), moyenne (5 à 2000 personnes) ou grande (2000 à 50000 personnes).

3.5.3. Classification de cuisson

Cuisson solaire selon la température: La cuisson peut être classifiée en 4 catégories selon les plages de températures requises: Sèchage (40 à 75 ° C), cuisson lente (75 à 85° C), cuisson (85 à 90 °C), ébullition (100 à 130 °C), friture (200 à 250 °C), et grillade (plus de 300°C) [64]. Cependant, la classification la plus commune distingue les cuiseurs directs et les cuiseurs indirects.

Cuisson solaire selon type: Dans les cuiseurs directs, l'énergie solaire est transférée directement du collecteur vers l'ustensile de cuisson qui contient les aliments et leur rendement varie de 2 à 55% [64], [65]. Dans les cuiseurs indirects, l'ustensile de cuisson est physiquement dissocié du collecteur, et ces systèmes utilisent des capteurs plans ou des capteurs à tubes sous vide ou un récepteur qui transfère l'énergie captée à un fluide intermédiaire qui va chauffer l'ustensile de cuisson et possèdent un rendement variant de 20% à 73% [51], [66]. Les deux modèles peuvent intégrer ou non un support de stockage qui sont sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente ou thermochimique ou parfois une combinaison des différents modes [67]. Plusieurs cuiseurs solaires de type boîte ont été conçus, développés, et évalués économiquement dans le contexte indien. Kandpal et Mathur (1986) ont constaté que le prix des carburants classiques utilisés pour la cuisson joue un rôle décisif dans leur utilisation. La cause principale de la mauvaise capacité de leur adaptation en milieu rural est l'utilisation des ressources disponibles localement et gratuites (bois de feu, bouse de vache, déchets agricoles etc.) [68]. Nahar et al., (1994) ont construit un cuiseur destiné à la cuisson des aliments pour animaux [69]. Panwar et al., (2013) ont développé un cuiseur solaire destiné à l'alimentation animale dans les zones rurales dans l'état de Rajasthan et contribue ainsi à l'amélioration du niveau de vie des agriculteurs ruraux et aussi à la réduction des émissions de CO₂ [70]. Le cuiseur peut remplacer la biomasse à 100% et économiser environ 424,8 kg de CO₂ par année. Al-Saad et Jubran (1991) ont développé en Jordanie un cuiseur à faible coût en utilisant un matériau disponible localement (argile) [48]. Beaumont et al., (1997) ont rapporté qu'un cuiseur solaire capable de fournir de la nourriture à 10-12 personnes par temps clair avec des repas autour de midi et au crépuscule a été conçu et construit en Tanzanie [71]. De nombreuses études scientifiques ont montré que le taux de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 31% au cours des 20 dernières décennies [72]. Depuis 1800, 20 Gt de CO₂ sont rejetés dans l'environnement, du seul fait de la déforestation, engendrant ainsi la concentration du gaz de méthane dans l'atmosphère, responsable de la destruction de la couche d'ozone. La température moyenne de la surface du globe a augmenté de 0,4-0,8 °C au siècle dernier, au-dessus de la ligne de base de 14 °C à cause des rejets de gaz [72]. La promotion de technologies propres avec les énergies renouvelables est devenue une nécessité afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Nandwani (1996) a mené une étude comparative au Costa Rica et dans le monde sur les avantages écologiques des cuiseurs solaires par rapport aux cuiseurs conventionnels en bois et

électrique [53]. Il a conclu, en considérant un usage du dispositif de 6-8 mois par an, que le temps de retour d'un cuiseur solaire de type boîte est d'environ 12-14 mois.

3.5.4. Cuiseur solaire et la diminution de déforestation

L'utilisation des cuiseurs solaires peut épargner environ 16,8 millions de tonnes de bois chaque année et éviter l'émission de 38,4 millions de tonnes de CO₂ par an dans l'atmosphère. Dans le même sens, Escobar (1996), visant à réduire la consommation de bois comme source d'énergie, a proposé 3 modèles de cuiseurs solaires de type boîte à faible coût, conçus et développés à l'école de physique au Salvador [73]. Selon les statistiques nationales du Salvador, cette source d'énergie représente 53% de l'énergie primaire consommée dans le pays. Hernandez-Luna et Huelsz (2008) ont présenté l'optimisation de la conception optogéométriques d'un cuiseur solaire de type boîte pour la zone intertropicale (Mexique). Ils ont estimé que le cuiseur peut sauver une quantité potentielle de bois 850 kg par an [74]. Le potentiel annuel d'économie de bois est de 346 millions de tonnes. Panwar et al., (2013) ont indiqué que sur la période 1971-1995, les émissions de CO₂ ont augmenté à un taux moyen de 1,7% par an [70]. Les scénarios prévoient un taux de croissance plus rapide des émissions de CO₂ jusqu'à 2,2% par an, pour la période allant jusqu'à 2020. Andrianaivo et Ramasiarino (2014) ont comparé le cuiseur solaire de type parabolique SK14 par rapport à deux alternatives: le bois de feu et le charbon de bois à Madagascar [75]. Les résultats de l'étude ont montré que le cuiseur solaire est moins utilisable par temps nuageux ou pluvieux et l'impact environnemental est réduit d'environ de moitié. Cependant, une source d'appoint est obligatoire pour cuire les repas à ces moments.

Garba et Danmallam (2014) ont étudié un cuiseur solaire passif de type boîte dans le contexte Nigérian pour une application durable dans les pays en développement dont le temps de retour est estimé entre 4 et 12 mois selon le nombre d'utilisations [76]. L'utilisation d'un cuiseur solaire assurant 100% des besoins journaliers permettent d'économiser annuellement dans le monde 1281 Mt de bois et 346 Mt de CO₂. Par ailleurs, des études sont menées durant plusieurs années sur différents modèles de cuiseurs solaires dans les conditions climatiques de l'Inde avec une évaluation du potentiel d'émission de CO₂ par Nahar [47] et ont estimé que le temps de retour varie entre 1,58 et 4,89 années suivant la source d'énergie primaire à remplacer. Pour les différents cuiseurs expérimentés, l'énergie économisée est estimée à 5 175 MJ par an. Pour satisfaire les besoins énergétiques d'un ménage de 5 personnes consommant 3 kg de repas à midi pour une durée

de cuisson de 2,5 heures, un concentrateur parabolique de 1,4 m de diamètre (surface utile de 1,6 m²) est nécessaire. A l'échelle du ménage, l'analyse financière a révélé que le temps de retour d'un cuiseur solaire direct par rapport au butane varie de 4 à 10 années selon le taux de la subvention publique. Par rapport au bois de feu, le temps de retour varie de 0,6 à 10 années selon le rendement du four et le prix du bois. Sur le plan écologique, la surface de forêt épargnée serait d'environ 10.000 ha/an et la quantité de CO₂ non émise serait de 1,08 Mt/DISCUSSI. Les besoins énergétiques avec un ménage de 5 personnes (moyenne) consommant 3 kg de repas au déjeuner pour une durée de 2,5 hr s'élèvent à 1,3 kWh. La température ambiante et le coefficient global des pertes sont des valeurs expérimentales [64]. Avec un cuiseur solaire parabolique ayant un rendement de 40%, l'énergie nécessaire est de 3,2 kWh. Les rendements des cuiseurs à butane varient de 48 à 70% [77]. En milieu rural pour le repas de midi. La totalité du butane utilisé en cuisson donne 910 tonnes de CO₂ par année. Le contenu carbone (Cca) dépend du type de bois, en supposant un contenu carbone de 35% dans le bois, on peut évaluer les émissions directes de CO₂ selon l'équation (6): $C+O_2 \rightarrow CO_2$. Les émissions indirectes viennent du fait que lors que les arbres sont coupés et brûlés, ils ne peuvent plus absorber les quantités de CO₂ émises et d'après [53]. En moyenne, chaque arbre coupé fournit une quantité de bois sec (Qbs) de 0,3 tonne, et chaque hectare de forêt a une densité moyenne (dfo) d'environ 130 arbres, a la capacité d'absorber (Cab) 39 tonnes de CO₂ par année. La densité moyenne de 130 arbres à l'hectare toute espèce confondue a été prise comme base de calcul et celle diffère fortement selon les espèces et le lieu géographique. Le nombre d'arbres sauvés est d'environ 1,3 millions soit une surface épargnée de 10 115 ha.

Les émissions indirectes sont de 0,39 Mt de CO₂ an, ce qui permet d'éviter globalement 0,90 Mt de CO an-1. Le même calcul appliqué à la totalité du bois de feu utilisé annuellement dans la cuisson (3,72 Mt dont 1,97 provenant de la forêt) donne une émission directe de 2,53 Mt de CO an-1. Le nombre d'arbres sauvés est d'environ 6,6 millions soit une surface de 50 570 ha. Les émissions indirectes seraient de 1,97 Mt de CO an-1, ce qui permet consommer rejette 0,27 kg de CO₂ pour 50% des ménages et d'éviter globalement 4,5 Mt de CO an-1. Les émissions totales sont évaluées à 1,08 Mt de CO₂ par année pour 50% des ménages en milieu rural pour le repas de midi. Les résultats ont montré que les besoins énergétiques de cuisson d'un repas de 3 kg pour un ménage de 5 personnes étaient de 1,3 kWh. Avec un rendement de 40%, l'énergie de cuisson pendant 2,5 hr est de 3,2 kWh, et la surface utile nécessaire est de 1,6 m².

Le coût spécifique d'un repas cuit avec le butane non subventionné est moins cher de -30% par rapport au solaire, et celui préparé avec du bois de feu plus cher de +31%, engendrant des temps de retour de 6,7 et de 3,4 années. La diminution des émissions de CO₂ qui sont évaluées par année à 1,08 Mt. Avec un cuiseur solaire parabolique ayant un rendement de 40%, l'énergie nécessaire est de 3,2 kWh. Les rendements des cuiseurs à butane varient de 48 à 70% [77].

Tableau 5. Synthèse des émissions de CO₂ du bois de feu

Quantité de repas	3,0	kg	Énergie primaire	3,2	kWh
Température finale	100,0	°C	DNI	820,0	W m ⁻²
Température initiale	20,0	°C	Surface utile ou surface d'ouverture	1,6	m ²
Temps de cuisson	2,5	hr	Diamètre utile de la parabole	1,4	m
Puissance thermique – repas	0,14	kW	Déclinaison	0	°
Masse –ustensile	1,1	kg	Surface de captation	2,2	m ²
Chaleur massique – ustensile	920,0	J kg ⁻¹ °C ⁻¹			
Puissance thermique – ustensile	9,0	W			
Coefficient global des pertes	30,0	W m ⁻² °C ⁻¹			
Surface –ustensile	0,2	m ²			
Température ambiante	24,0	°C			
Puissance thermique – pertes	0,4	kW			
Puissance totale	0,5	kW			
Énergie de cuisson (Besoins)	1,3	kWh			

En milieu rural pour le repas de midi. La totalité du butane utilisé en cuisson donne 910 tonnes de CO₂ par année. Le contenu carbone (Cca) dépend du type de bois, en sup- posant un contenu carbone de 35% dans le bois, on peut évaluer les émissions directes de CO₂ selon l'équation: $C+O_2 \rightarrow CO_2$.

De plus, l'utilisation du solaire diminuera les émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, et le dioxyde de soufre qui polluent l'air et qui causent des maladies respiratoires. La quantité annuelle de CO₂ évitée est estimée à 182 tonnes de CO₂ en supposant que chaque kWh de gaz. Les émissions indirectes viennent du fait que lors que les arbres sont coupés et brûlés, ils ne peuvent plus absorber les quantités de CO₂ émises et se calculent selon l'équation (8) d'après [53]. En moyenne, chaque arbre coupé fournit une quantité de bois sec (Qbs) de 0,3 tonne, et chaque hectare de forêt a une densité moyenne (dfo) d'environ 130 arbres, a la capacité d'absorber (Cab) 39 tonnes de CO₂ par année. La densité moyenne de 130 arbres à l'hectare toute espèce confondue a été prise comme base de calcul et celle diffère fortement selon les espèces et le lieu géographique. Le nombre d'arbres sau- vés est d'environ 1,3 millions soit une surface épargnée de

10 115 ha. Les émissions indirectes sont de 0,39 Mt de CO₂ an , ce qui permet d'éviter globalement 0,90 Mt de CO an-1 (Tableaux 5, 6).

$$E_{in} = \frac{Q_{to} P_{fo} C_{ab}}{Q_{bs} d_{fo}} \quad (8)$$

Tableau 6. Les émissions indirectes de CO₂

Désignation	Quantités	Unité
Quantité totale	0,74	Mt an-1
Quantité - Forêts	0,39	Mt an-1
Émissions directes	0,51	Mt de CO an-12
Nombre d'arbres sauvés	1,30	Millions d'arbres
Émissions indirectes	0,39	Mt de CO an-12
Émissions totales	0,90	Mt de CO ₂ an-1

Les émissions totales sont évaluées à 1,08 Mt de CO₂ par année pour 50% des ménages en milieu rural pour le repas de midi. Les résultats ont montré que les besoins énergétiques de cuisson d'un repas de 3 kg pour un ménage de 5 personnes étaient de 1,3 kWh. Avec un rendement de 40%, l'énergie de cuisson pendant 2,5 hr est de 3,2 kWh, et la surface utile nécessaire est de 1,6 m². Le coût spécifique d'un repas cuit avec le butane non subventionné est moins cher de -30% par rapport au solaire, et celui préparé avec du bois de feu plus cher de +31%, engendrant des temps de retour de 6,7 et de 3,4 années. la diminution des émissions de CO₂ qui sont évaluées par année à 1,08 Mt.

Conclusion

L'utilisation de basses technologie Low-Tech solaire diminuera les émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, et le dioxyde de soufre qui polluent l'air et qui causent des maladies respiratoires. La quantité annuelle de CO2 évitée est estimée à 182 tonnes de CO2 en supposant que chaque kWh de gaz. L'utilisation accrue de l'énergie solaire dans la cuisson et séchage pourrait être une alternative intéressante, et une solution viable et se traduirait par des avantages globaux sur les plans économique, environnemental, sanitaire et social. Elle permettrait d'augmenter le pouvoir d'achat des familles avec les économies réalisées et de maintenir la durabilité de l'environnement par la conservation des forêts. Elle permet également de réduire les maladies dues à la pollution de l'air et de créer des emplois. Toutefois, la cuisine et séchage à base de l'énergie solaire n'a jamais été un candidat sérieux dans le marché commercial ni près d'être une méthode préférée de cuisson à cause de l'intermittence du soleil et de son caractère aléatoire.

Chapitre IV. Généralités sur le gisement et le captage solaire

1. Introduction

Les besoins énergétiques mondiaux ne cessent d'augmenter. Malgré son énorme potentiel, l'énergie solaire ne représente qu'une part négligeable de la production et de la consommation énergétique de l'Algérie. Cependant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables. C'est la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur terre. "Chaque jour, le soleil envoie à la Terre 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle mondiale". De plus, la quantité d'énergie libérée par le soleil pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an [85]. Les diverses applications qui résultent de l'exploitation des rayons solaires sont innombrables. Les technologies solaires les plus répandues se retrouvent principalement dans le secteur immobilier : solaire thermique passif, solaire thermique actif, solaire thermique, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et éclairage naturel. Et comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes énergétiques, une description détaillée du rayonnement solaire, sa modélisation ainsi que les paramètres géométriques nécessaires pour la modélisation, feront également l'objectif de ce chapitre.

2. Soleil

2.1. Caractéristiques générales

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et 2×10^{30} kg de masse, et qui est placée à 150 000 000 km de nous. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. N'oublie pas qu'elle voyage à la vitesse de 300 000 km/s, c'est-à-dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde. Quant à volume du soleil, presque 1 300 000 fois de la terre, et la masse 330 000 fois celle de la Terre (1,99.1030 kg ou 2 milliards de milliards de milliards de tonnes). Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale

à 4×10^{26} W. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ W [86, 87]. Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil. Bien que sa lumière soit 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir), il n'est visible qu'à une distance de 60 al (année-lumière).

La température de rayonnement si le Soleil est assimilé à un corps noir, est de 5 700 K selon la loi de Stephan ($0 \text{ Kelvin} = - 273,15 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est le zéro absolu ; l'agitation moléculaire est arrêtée), ce qui lui donne sa couleur jaune. La couleur est directement liée à la longueur d'onde, qui est liée à la température. Ainsi, en analysant la couleur, on peut facilement obtenir sa température de rayonnement. Au centre, la pression est 220 millions de fois supérieure à la pression atmosphérique de notre Terre (un gros pétrolier à portée de main !) qui est de 1033 hectopascal au niveau de la mer, soit une température de 15 millions de K, et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère ($> 10\,000 \text{ km}$ à plusieurs millions km) [88].

2.2. Mouvement de la terre

Le mouvement de la terre autour du soleil, décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers. L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre, n'est pas perpendiculaire au point de vue de l'écliptique. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers (Figure 31). En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Elle tourne autour du soleil en 365 jours 5h 48 mn 40s $\approx 365,25$ jours. La terre tourne avec une vitesse moyenne 29,77 Km/s. C'est au solstice d'hiver, la vitesse maximale 30,27 Km/s (c'est le jour est la plus éloignée du soleil) et minimale en été 29,77 Km/s (c'est le jour est la plus proche du soleil). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons [85].

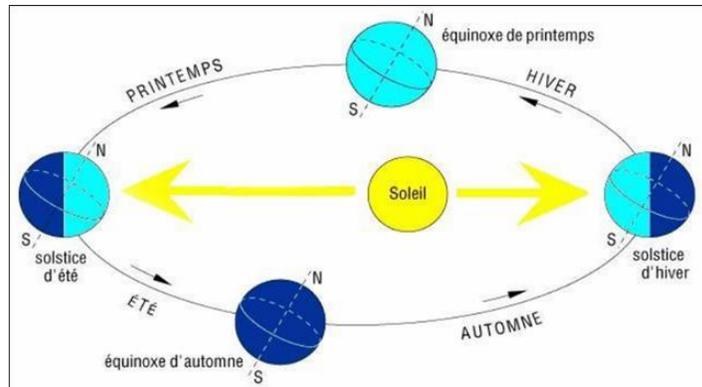


Figure 31. Mouvement de la terre autour du soleil [89].

Trajectoire apparente du soleil: Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve, voir 'la figure 32.

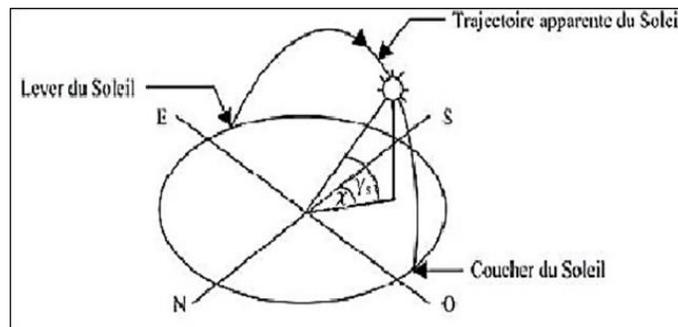


Figure 32. Repérage de la position du soleil [89]

Sphère céleste: La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur 'la figure 33 [90].

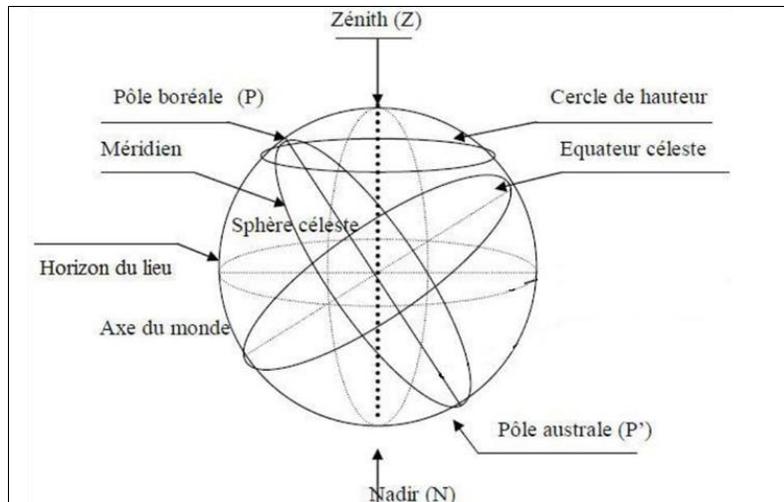


Figure 33. Sphère céleste [90]

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

2.3. Cordonnées du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est identifiée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents [85].

- Par rapport au plan équatorial de la terre (point de référence équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (point de référence horizontal).

2.3.1. Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est détecté par rapport sur le plan équatorial de la terre sous deux angles.

2.3.2. Coordonnées horizontales du soleil

La position du soleil à un instant considéré est donnée par l'azimut du soleil χ et son élévation γ_s .

Les coordonnées géographiques pour lieu de la ville de Ghardaïa [89]:

φ : 32,43° Nord.

λ : 3.8° Est.

z : 468 Mètres.

2.4. Caractéristiques de la terre

Les principales caractéristiques sont données sur le tableau 7 [91].

Tableau 7. Caractéristiques de la terre.

Caractéristiques	Valeurs
Masse	$6 \cdot 10^{21}$ T
Volume	$1083310 \cdot 10^6$ Km ³
Surface	$510101 \cdot 10^3$ Km ²
Diamètre équatorial	12756.32 Km
Diamètre polaire	12713.55 Km

2.4.1. Coordonnées terrestres

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :La longitude, la latitude, ainsi que par son altitude, voir les figures 34-35.

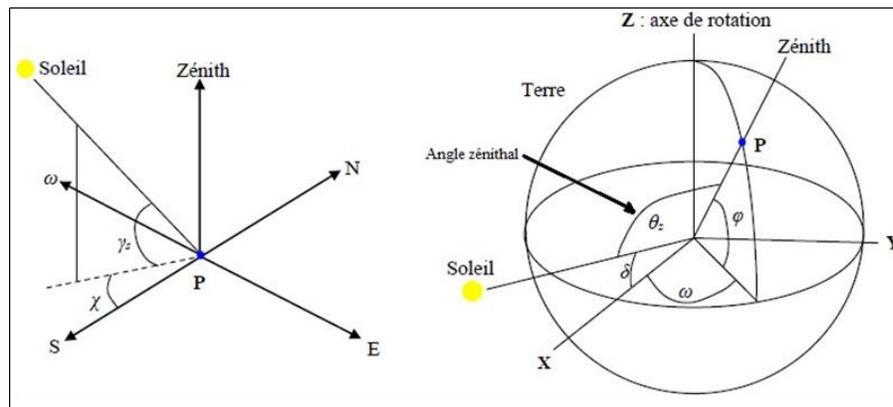


Figure 34. Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil) [92].

Longitude: longitude (λ) c'est l'angle formé par la méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180 et 180 °. A tout écart de 1 ° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps [85]. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest.

Altitude: C'est la distance verticale (z) exprimé en mètres entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [85].

Latitude: L'angle (φ) de latitude est l'angle entre une ligne tracée à partir d'un point de la surface de la terre avec le centre de la terre et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée par la latitude 0° , le pôle Nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle Sud par la latitude -90° . Par convention, le signe (-) est attribué à tous les endroits de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les endroits de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre -90° et $+90^\circ$ [85].

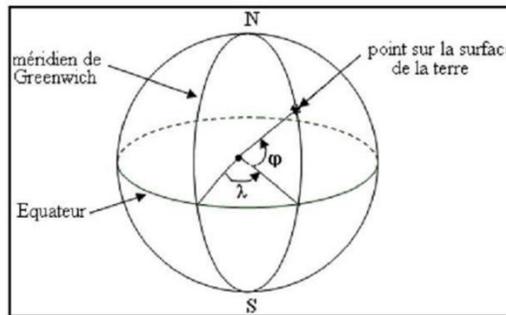


Figure 35. Cordonnée terrestre [56]

2.5. Rayonnement solaire

2.5.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire

l'ultraviolet ($0,2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5 \mu\text{m}$) [93].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de : 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$), 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$), et 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

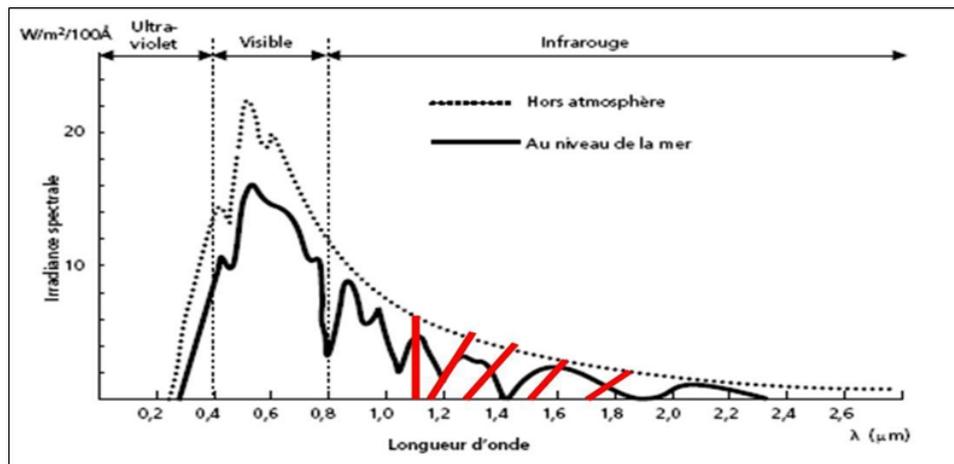


Figure 36. Analyse spectrale du rayonnement solaire [93]

Le tableau 8 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photos pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [86].

Tableau 8. Valeurs énergétiques des photos issues spectre solaire [86].

(μm)	E_{ph} (eV)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'onde afin de piéger les photos et de les libérer sous forme de chaleur ou d'électrons. Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, puis agisse comme collecteur, les photons doivent d'abord être absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite recueillis pour former une cure électrique globale [86].

2.5.2. Constante solaire

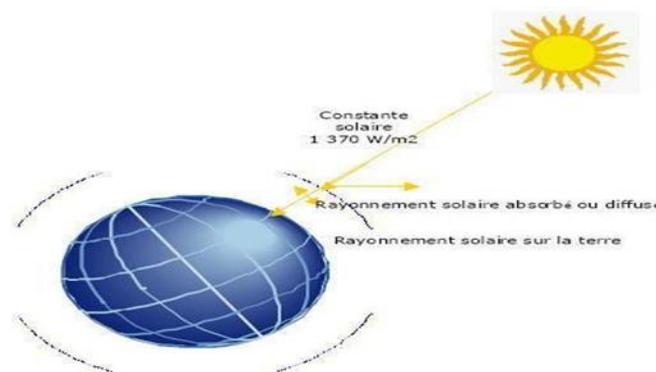


Figure 37. Constante solaire [93]

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Solaire égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire (Figure 37). Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m² [90, 94].

2.5.3. Types de rayonnements solaires

L'énergie reçue au niveau du sol est inférieure à 1367 W/m² (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et le réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire dans l'espace (environ 6 %). Le rayonnement global au niveau du sol est donc défini comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend également de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution et de l'orientation de la surface considérée [92] (Figure 38).

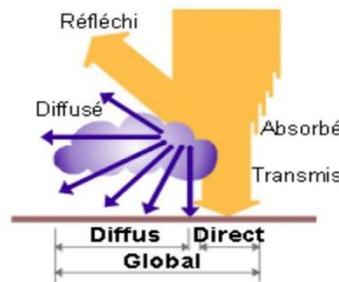


Figure 38. Composants du rayonnement solaire [92]

Rayonnement direct: Le rayonnement direct (Figure 46) est la lumière provenant directement du soleil dans un ciel clair. Il s'agit de rayons solaires qui ont traversé l'atmosphère terrestre sans être absorbés ou dispersés [86].

Rayonnement diffus: Le rayonnement diffus (Figure 39) est le rayonnement réfléchi par les obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. Dans un ciel clair, la proportion de rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu et l'état de l'atmosphère).

Le rayonnement global sur la terre et la proportion de rayonnement diffus varient au cours de l'année [90].

Rayonnement global : a) Une surface horizontale, C'est tout le rayonnement d'origine solaire qui atteint une surface horizontale à la surface de la terre. Il inclut donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et diffus [94]. b) Une surface inclinée, C'est le rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements: Direct, Diffus et Réfléchi.

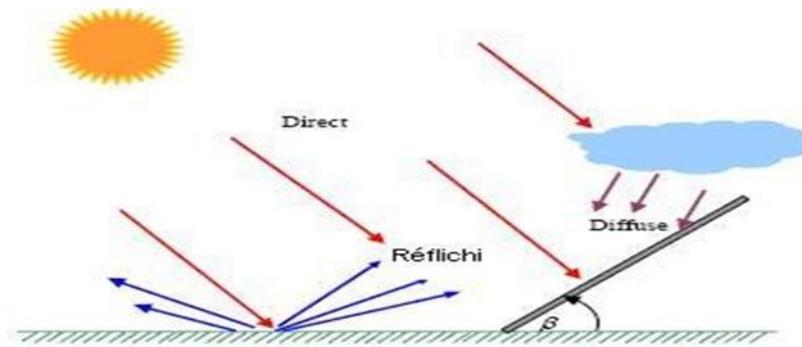


Figure 39. Trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné [94]

Lumière: La lumière se réfère aux ondes électromagnétiques visibles à l'œil humain, c'est-à-dire dans des longueurs d'onde de 0,38 à 0,78 micron (380 nm (violet) à 780 nm (rouge) ; le symbole nm désigne le nanomètre. La lumière est intimement liée à la notion de couleur. C'est Newton qui proposa pour la première fois au XVIIe siècle un cercle de couleurs chromatiques basé sur la décomposition de la lumière blanche. En plus de la lumière visible, par extension, d'autres ondes électromagnétiques, telles que celles des régions infrarouge et ultraviolette, sont parfois appelées "lumière".

2.6. Eclairage et l'irradiation

2.6.1. Irradiation ou rayonnement

L'irradiation est l'énergie reçue par une surface. Elle est exprimée en J/m² (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H. D'autres unités plus courantes sont Wh/m² (wattheure par mètre carré) bien que cette dernière ne devrait pas être utilisée car elle n'appartient pas au Système international d'unités (SI) [90].

2.6.2. Eclairage ou irradiation

L'éclairage est défini comme la puissance reçue par une surface. Elle est exprimée en W/m^2 (watt par mètre carré). Le S.I. (Système international d'unités) recommande l'utilisation du symbole G [86]. Il est à noter qu'en plus de l'impact de l'atmosphère, l'irradiation solaire en dépend de l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu et son degré de pollution, la période de l'année et l'heure considérée, et la nature des couches nuageuses.

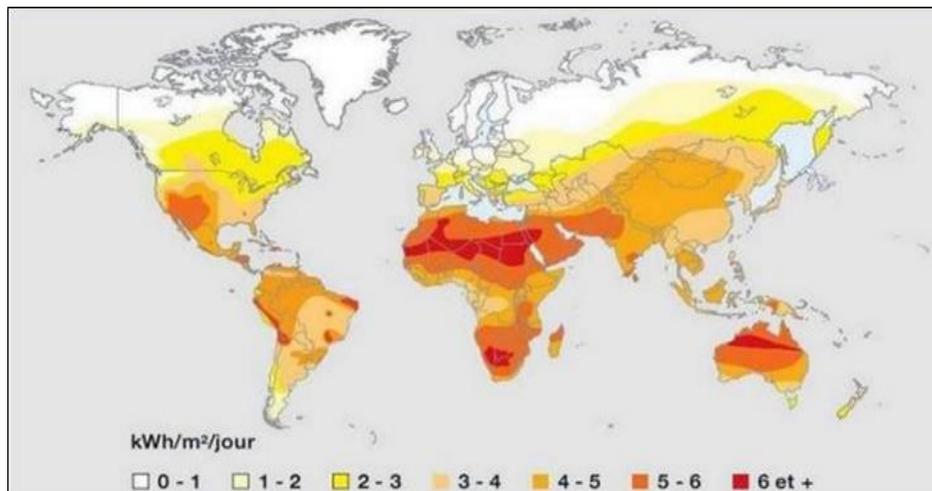


Figure 40. Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en $kWh/m^2/jour$ sur un plan horizontal [95]

La terre reçoit chaque année une valeur moyenne de l'éclairage $1.36 \text{ KW}/m^2$ (Figure 40) cette irradiation est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Des gaz comme l'ozone (O_3), pour des longueurs d'ondes inférieures à $0.3 \mu m$, le dioxyde de carbone (CO_2) et la vapeur d'eau (H_2O), pour les infrarouges au-dessus de $2 \mu m$, absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol.

Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente. Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde [96].

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta = 0^\circ$, $AM = 1$: la notation est AM1. AM0 correspond à l'irradiation hors atmosphère.

Avec:

θ : Angle zénith

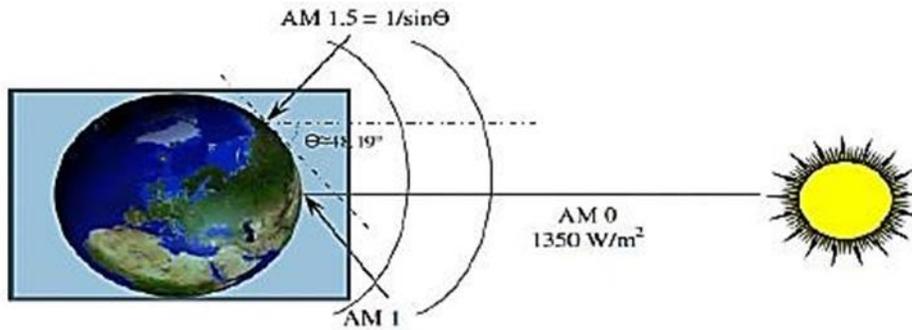


Figure 41. Spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [97]

L'intensité I reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante (Figure 41) [98] :

$$G = 1.353 \cdot (0.7AM)^{0.678} \quad (\text{I. 29})$$

Avec G en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1 sont représentés sur la figure 42.

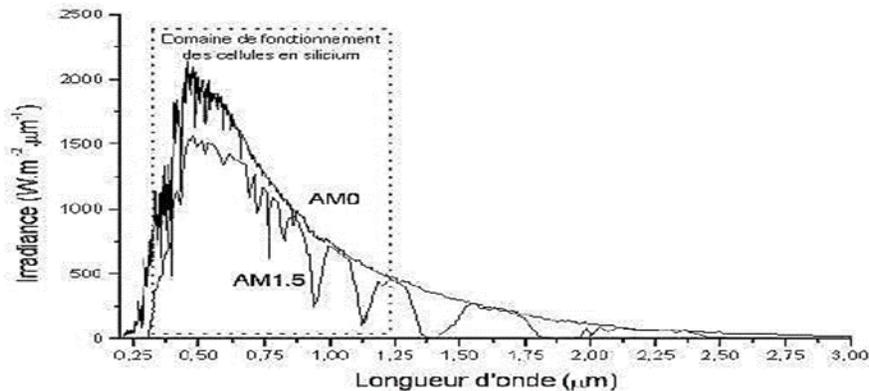


Figure 42. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5

2.6.3. Situation de l'Algérie

L'énergie solaire participe pour une très faible part dans le bilan énergétique national, soit seulement 0,02% de la consommation nationale d'électricité (5 GWH). Le pays est qualifié de très en retard en matière d'investissement dans le domaine des énergies renouvelables.

Pourtant, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde (Figure 43). Lors d'un séminaire organisé à Alger, par la Chambre Algérie-allemande de l'industrie et du commerce, l'intention de concrétiser le vœu algérien a été clairement affichée par les Allemands. Vu qu'à l'horizon 2010, environ 5% de l'électricité en Algérie sera produite par l'énergie solaire. Le projet consiste à ramener le taux de l'énergie renouvelable à 6% d'ici à 2015.

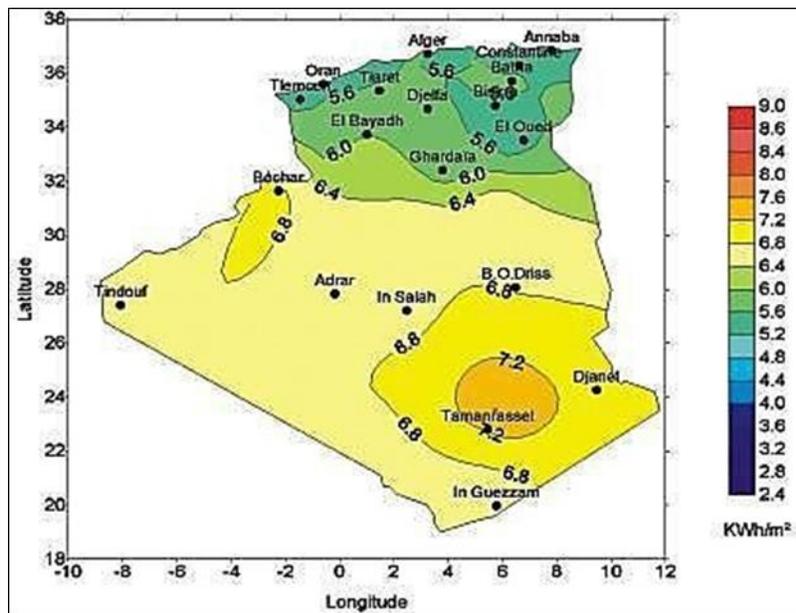


Figure 43. Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle [95]

3. Captage solaire

Le capteur solaire est un système de transformation des énergies de rayonnement solaire à l'énergie thermique se forme chaleur, généralement placé sur les toitures. Le capteur solaire qui capter l'énergie solaire pour élever la température de l'eau se cercle dans le serpentine et d'un réservoir permettant de stocker l'eau chaude. Cette opération baser sur le principe de l'effet de serre. L'échange thermique est un transfert d'énergie sous forme microscopique désordonnée. Il intervient lorsque deux corps des températures différentes, Il existe trois modes de transfert de chaleur par (conduction, convection et rayonnement). Dans ce paragraphe, nous nous proposons de donner quelques rappels sur ces phénomènes qui sont à la base du principe des capteurs solaires [99]. Dans cette partie de mémoire, nous avons étudié la théorie de capteur solaire thermique, le

transfert thermiques, comme le transfert de chaleur par rayonnement (le rayonnement entre le soleil et la terre), et la conduction (transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'eau qui traverse le canal), et le transfert de la chaleur par convection (entre le verre et l'absorbeur). Cette étude a principalement pour absorber le maximum des rayonnements solaires et transférer complètement en chaleur avec des minimum des pertes, finalement, étudier les facteurs qui l'affectent à la fois interne (les matériaux qui fabriquent le capteur) ou externe. Après cela, nous allons voir les types des capteurs solaires thermiques pour chaque type et nous allons concentrer notre étude sur les capteurs solaires de type concentrateur cylindro-parabolique, pour intégrer le principe de ce dernier aux capteurs solaires.

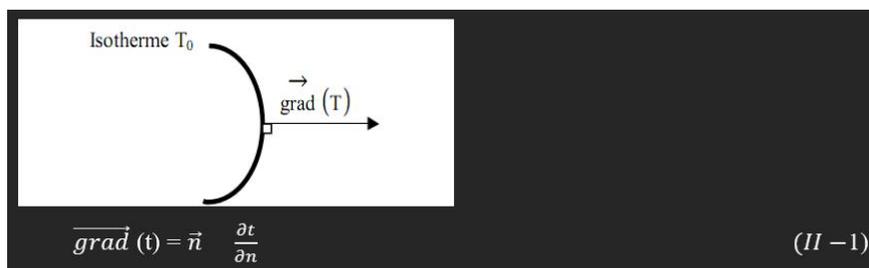
3.1. Rappels sur les transferts de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre, la thermique (thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [97].

3.1.1. Définitions

Champ de température: Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et de la température : $T = f(x, y, z)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas : a) Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire et b) Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire [97].

Gradient de température: Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température [97].



Avec :

$(n)^{\rightarrow}$: Vecteur unitaire de la normale.

$\partial t/\partial n$: Dérivée de la température le long de la normale.

C- Flux de chaleur :

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [97].

$$\phi = 1/S \quad dQ/dt \quad (\text{II-2})$$

Où S est l'aire de la surface (m^2).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps.

$$\varphi = dQ/dt \quad (\text{II-3})$$

3.1.2. Formulation d'un problème de transfert de chaleur

Bilan d'énergie: Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système (qui schématisé sur la figure 44 [97])

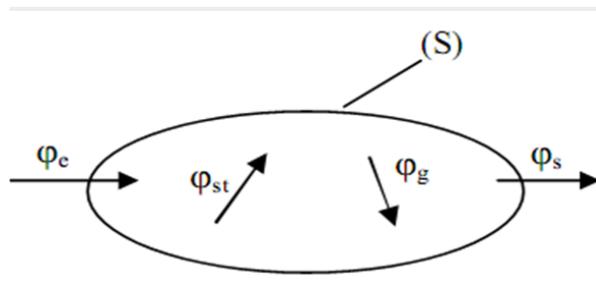


Figure 44. Système et bilan énergétique [97]

Dans le système (S)

φ_{st} : Flux de chaleur stocké.

φ_g : Flux de chaleur généré.

φ_e : Flux de chaleur entrant.

φ_s : Flux de chaleur sortant.

On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_{st} + \varphi_s \quad (\text{II-4})$$

Expression des flux d'énergie: Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système [97].

A. Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température [97].

$$(\vec{\varphi}) = -\lambda S (\vec{\text{grad}})t \quad (\text{II-5})$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

- φ : Flux de chaleur transmis par conduction. (W)
- λ : Conductivité thermique du milieu. (W m⁻¹°C⁻¹)
- x : Variable d'espace dans la direction du flux. (m)
- S : Aire de la section de passage du flux de chaleur. (m²)

B. Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide (Figure 45), l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [97].

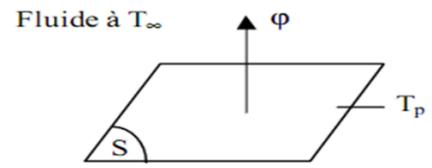


Figure 45. Schéma du transfert de chaleur convectif [100].

Ou

$$\varphi = h S (T_p - T_\infty) \quad (\text{II-7})$$

- φ : Flux de chaleur transmis par convection. (W)
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection. ($W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$)
- S : Aire de la surface de contact solide/fluide. (m^2)
- T_p : Température de surface du solide. ($^\circ C$)
- T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide. ($^\circ C$)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide [97].

C. Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide) (Figure 46).

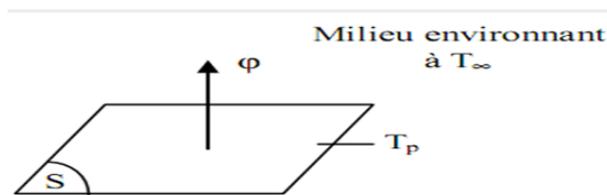


Figure 46. Schéma du transfert de chaleur radiatif [71].

Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation [97].

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (II-8)$$

Avec :

- φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement. (W)
- σ : Constante de Stefan. ($5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$)
- ε_p : Facteur d'émission de la surface.
- T_p : Température de la surface. (K)
- T_∞ : Température du milieu environnant la surface. (K)
- S : Aire de la surface. (m^2)

3.1.3. Flux de chaleur lié à un débit massique

Lorsqu'un débit massique \dot{m} de matière entre dans le système à la température (T_1) et en ressort à la température (T_2), on doit considérer dans le bilan président un flux de chaleur entrant correspondant [97].

$$\phi_e = \dot{m} c_p (T_1 - T_2) \quad (\text{II-9})$$

- ϕ_e : Flux de chaleur entrant dans le système. (W)
 \dot{m} : Débit massique. (kg.S⁽⁻¹⁾)
 c_p : Chaleur spécifique. (J. [kg]⁽⁻¹⁾.k⁽⁻¹⁾)
 T_1, T_2 : Températures d'entrée et de sortie. (K)

3.1.4. Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante et en l'absence de changement d'état).

$$\phi_{st} = \rho V c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II-10})$$

- ϕ_{st} : Flux de chaleur stocké. (W)
 ρ : Masse volumique. (kgm⁽⁻³⁾)
 V : Volume. (m³)
 c : Chaleur spécifique. (J [Kg]⁽⁻¹⁾°C⁽⁻¹⁾)
 T : Température. (°C)
 t : Temps. (s)

Le produit $\rho V c$ est appelé la capacitance thermique du corps [97].

3.1.5. Génération d'énergie

Elle intervient lorsqu'une forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme [97]:

$$\phi_g = q V \quad (\text{II-11})$$

Avec :

- ϕ_g Flux d'énergie thermique générée (W)
 q Densité volumique d'énergie générée (Wm⁽⁻³⁾)
 V Volume (m³)

4. Capteur solaire thermique

4.1. Composantes d'un système de conversion thermique

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants: a) Une surface de captation du rayonnement solaire, b) Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air, c) Un stockage thermique, et d) Un réseau de distribution [101].

4.2. Définition et principe d'un capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est tout système exposé au rayonnement solaire afin de le capter et de le transformer en énergie thermique. Ce système de captage basé sur l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3 μm), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante. L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 μm). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne une partie vers la surface absorbante et une partie vers l'extérieur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur [101].

4.3. Types des capteurs solaires thermiques

Compte tenu des utilisations différentes. Les besoins en eau chaude ont été caractérisés par une température et un volume. Pour répondre à la diversité des demandes plusieurs types de capteurs ont été élaborés [99].

4.3.1. Capteurs plan vitré

Ils sont appropriés pour le chauffage de l'eau et sont indiqués pour les températures de l'eau de 30° à 60° C [99]. Ce type de capteur (Figure 47) peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple) [101].

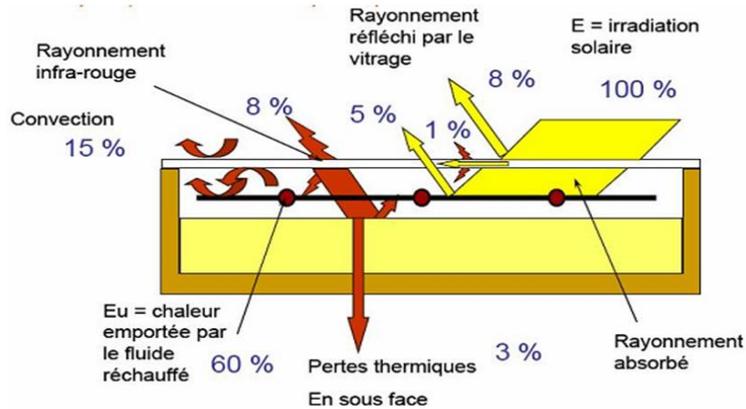


Figure 47. Schéma de Principe d'un capteur plan vitré [101]

A. Pertes thermiques vers le haut

Les pertes thermiques de l'absorbeur vers le haut peuvent s'écrire [100]:

$$\varphi^{\uparrow} = \varphi_{c,p-c} + \varphi_{r,p-c} = \varphi_{c,c-a} + \varphi_{r,c-a} - \varphi_{s \rightarrow c} \quad (II - 12)$$

Où :

$\varphi_{c,p-c}$: Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture.

$\varphi_{r,p-c}$: Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture.

$\varphi_{c,c-a}$: Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur.

$\varphi_{r,c-a}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur.

$\varphi_{s \rightarrow c}$: Flux solaire absorbé par la couverture transparente.

Chacun de ces flux peut s'exprimer de la manière suivante [97]:

$$\varphi_{c,p-c} = h_{c,p-c} (T_p - T_c) S \quad (II - 13)$$

Où $h_{c,p-c}$, est le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air.

$\varphi_{r,p-c}$, peut être calculé en considérant la paroi absorbante et la couverture comme deux surfaces parallèles infinies (la distance séparant est faible devant leur largeur et leur longueur) grises et opaques (hypothèse de la couverture opaque au rayonnement IR), ces hypothèses permettent d'écrire [100].

$$\varphi_{r,p-c} = \sigma \frac{T_p^4 - T_c^4}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} S, \quad (II - 14)$$

Que l'on peut aussi écrire :

$$\varphi_{r,p-c} = h_{r,p-c} (T_p - T_c) S \quad (II - 15)$$

$$\text{Avec } h_{r,p-c} = \sigma \frac{(T_p^2 - T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} \quad (II - 16)$$

Et : α_{pi} Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR α_{ci}

Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR * $\varphi_{c,c-a}$ qui

dépend principalement de la vitesse du vent peut se calculer par [100]:

$$\varphi_{c,c-a} = h_{c,c-a} (T_c - T_a) S \quad (II - 17)$$

le coefficient de convection étant calculable par la corrélation suivante où u vent est la vitesse moyenne du vent [19].

$$h_{c,c-a} = h_{vent} = 5,7 + 3,8 u_{vent} \quad (\text{W.m}^{-2}\text{C}^{-1}) \quad (II - 18)$$

$$\varphi_{r,c-a} = \sigma \alpha_{ci} (T_c^4 - \varepsilon_a T_a^4) S \quad (II - 19)$$

$$= \sigma \alpha_{ci} (T_c^4 - T_{ciel}^4) S \quad (II - 20)$$

Où

ε_a : Emissivité de l'atmosphère.

T_{ciel} : Température équivalente du ciel.

T_c : Température moyenne de la couverture.

On peut le mettre sous la forme :

$$\varphi_{r,c-a} = h_{r,c-a} (T_c - T_a) S \quad (II - 21)$$

$$\text{avec : } h_{r,c-a} = \frac{\alpha_{ci} (T_c^4 - \varepsilon_a T_a^4)}{T_c - T_a} \quad (II - 22)$$

$$* \varphi_{s \rightarrow c} = \alpha_{cs} G_{(i,\gamma)}^* \quad (II - 23)$$

Le flux perdu vers le haut par la plaque absorbante peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned}\varphi_{p\uparrow} &= (h_{c,p-c} + h_{r,p-c}) (T_p - T_c) S \\ &= (h_{c,c-a} + h_{r,c-c}) (T_c - T_a) S - \alpha_{cs} G_{(i,\gamma)}^* S\end{aligned}\quad (II - 24)$$

Remarque : Dans le cas où $\alpha_{cs} \approx 0$ (cas du verre), on obtient l'expression simplifiée suivante:

$$\varphi_{p\uparrow} = \frac{(T_p + T_a)}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{c,c-a} + h_{r,c-c}}} S \quad (II - 25)$$

B. Pertes thermiques vers le bas

Les pertes thermiques du fond du capteur vers le bas peuvent s'écrire : [100]

$$\varphi_{b\downarrow} = \frac{(T_b + T_a)}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} S \quad (II - 26)$$

$\varphi_{c,p-b}$: Flux échangé par convection-conduction entre la paroi et le bas.

$\varphi_{r,p-b}$: Flux échangé par rayonnement entre la paroi et le bas $\frac{e_i}{\lambda_i S}$.

$e_i \lambda_i$: Epaisseur et conductivité thermique de l'isolant.

C. Pertes thermiques totales

On obtient finalement [19] :

$$\frac{\varphi_p}{S} = \frac{\varphi_{p\uparrow}}{S} + \frac{\varphi_{b\downarrow}}{S} = \frac{(T_p + T_c)}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}}} + \frac{(T_b + T_a)}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (II - 27)$$

Que l'on peut mettre sous la forme [19] :

$$\varphi_p = h_p (T_p - T_c) S \quad (II - 28)$$

Avec:

$$h_p = \frac{1}{T_p - T_a} \left(\frac{(T_p + T_c)}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}}} + \frac{(T_b + T_a)}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \right) \quad (II - 29)$$

4.3.2. Capteur solaire couvert de fluide caloporteur

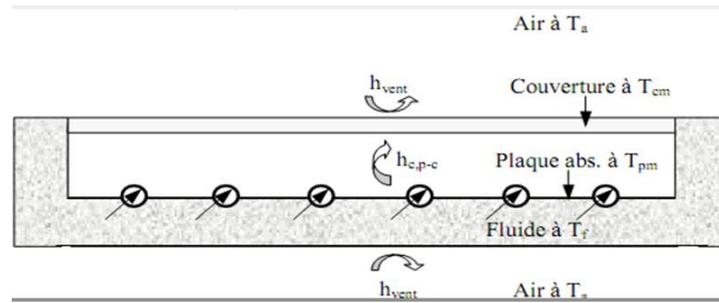


Figure 48. Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire couvert de fluide caloporteur [97].

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit [100]:

$$h_p = \left(\frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{vent}}} + (h_{c,p-c} + h_{r,p-c}) \frac{(T_p + T_c)}{T_p + T_c} \right) \quad (II - 30)$$

Dans le cas (verre) où $a_{cs} \approx 0$ on a [19]:

$$h_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,c-a}}} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (II - 31)$$

4.3.3. Capteurs plans non vitrés

Dans cette catégorie, on dénote les capteurs métalliques et les capteurs synthétiques.

Capteurs métalliques: Indiqués pour le chauffage des piscines et le préchauffage de l'eau chaude sanitaire, ils sont utilisés pour de température entre [10 et 40° C].

Capteurs synthétiques: Ils ont indiqué pour des applications nécessitant de basses températures par exemple le chauffage des piscines. Pouvant être installés sur les toits plats ou inclinés, leur durée de vie est estimée à 30 ans.

Il est à noter qu'une protection contre le vent accroît leur efficacité. En effet, les pertes de chaleur sont trop importantes du fait de l'absence de vitrage et d'isolation (Figure 49) [99].

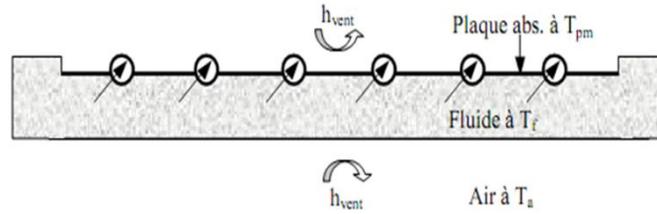


Figure 49. Les capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [100].

Sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Leur principe de fonctionnement est présenté sur la figure (Figure 50) [101].

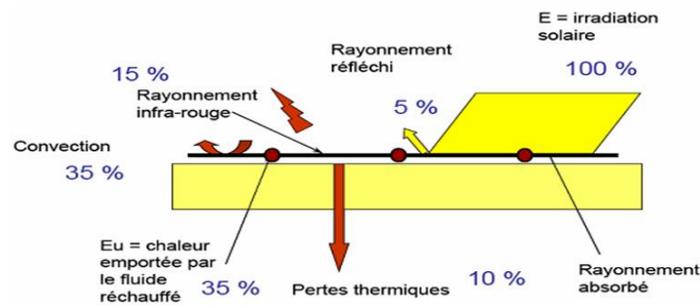


Figure 50. Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement Sélectif [101].

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit [100].

$$h_p = h_{vent} + h_{r,a-p} \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (II - 32)$$

4.3.4. Capteur solaire non-vitré à air

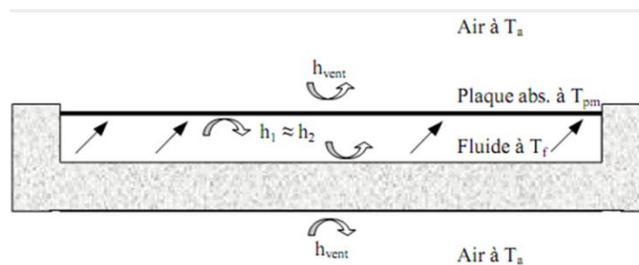


Figure 51. Schématisation des flux convectifs dans un capteur solaire non-couvert à air [100]

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit :

$$h_p = h_{vent} + h_{r,c-a} \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (II - 33)$$

4.3.5. Capteurs à tube sous vide

Le capteur à tubes sous vide présenté dans la **figure 52** permet de satisfaire aux applications nécessitant des niveaux de températures plus importants. Il se trouve dans des applications industrielles, mais pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, il se trouve aussi dans l'habitat individuel et collectif [101].

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit :

$$h_p = h_{vent} + h_{r,c-a} \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (II - 33)$$

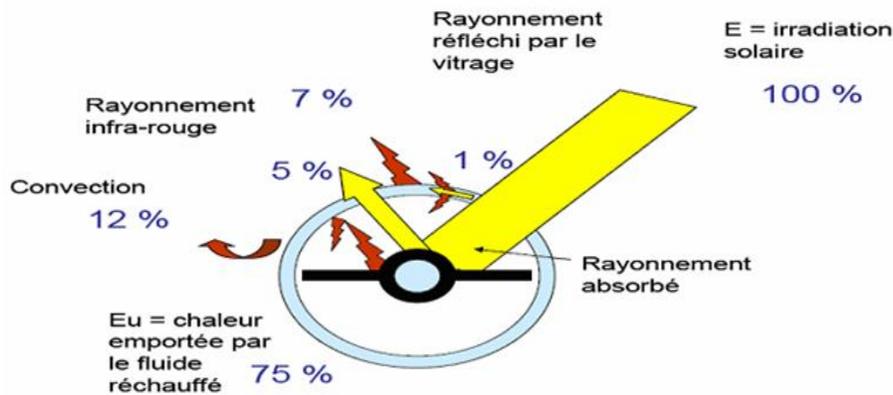


Figure 52. Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [101].

4.3.6. Capteur concentrateurs paraboliques

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques (**Figure 53**) pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500°) sur le récepteur [65].

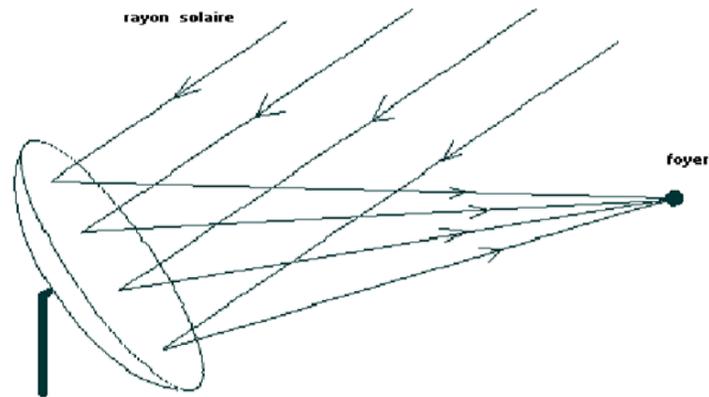


Figure 53. Concentrateur parabolique [65].

4.3.7. Concentrateurs cylindro-paraboliques

Les réflecteurs cylindro-paraboliques (Figure 54) sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur. Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple axe ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C.

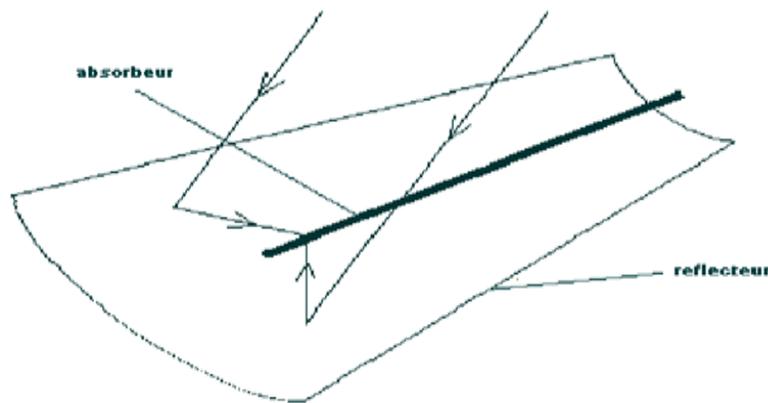


Figure 54. Concentrateur cylindro-parabolique [65].

Quelques avantages de la concentration: Réduction des surfaces réfléchissantes, Réduction des pertes thermiques, et La densité d'énergie au niveau de l'absorbeur est grande donc le fluide caloporteur peut travailler à température plus élevée pour la même surface de captation d'énergie.

4.4. Constituants d'un capteur solaire plan

Le capteur plan est une boîte constituée de trois parties principales :

A. Partie avant

C'est la couverture transparente constituée du verre ou du plastique et qui peut être simple, doublée ou triplée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles :

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plupart du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement [101].

A.1. Partie absorbante

Citée au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique, et qui doit assurer les fonctions suivantes :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.
- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie [101].

B. Partie arrière

Elle est généralement constituée d'une couche isolante, qui diminue les pertes par convection et ralentit ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Le choix du matériau à utiliser dépend de :

- Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie....etc [101].

Conclusion

Dans ce chapitre est montré l'énergie renouvelable est de plus en plus très répondeuse dans la production mondiale de l'électricité. Ainsi que les caractéristiques qui affectent la terre est le soleil et leurs influences sur la production de l'énergie solaire. En plus de ça on a compris la lumière et le spectre solaire et la différente longueur d'onde. L'Algérie comme on a vu précédemment, est parmi les pays avantageux qui puissent utiliser l'énergie solaire en mode Low-tech comme solution de future pour remplacer l'énergie fossile, et pour cela il faut que tous les électrotechniciens orientent leurs perspectives vers l'énergie verte et solaire précisément en Algérie parce qu'il est non polluant et renouvelable. La théorie de capteur solaire basée sur deux études, la première c'est le transfert de chaleur et on concentre notre étude sur les trois types, par (rayonnement, conduction et convection), par des relations mathématiques (les flux de chaleur), on a démontré les calculs et l'interprétation dans le quatrième chapitre. Ces trois types peuvent assembler toutes les caractéristiques internes ou externes d'un capteur solaire et ainsi (les trois types). La deuxième étude sur le capteur solaire (côté de composition) et expliquée les caractéristiques et les pertes thermiques de chaque type.

Référencés bibliographiques

- [1] Galvez, R. Péloffy, K, 2020. Réduire les émissions ou éliminer les énergies fossiles? comprendre le piège carbone au canada.
- [2] Lopez, A. Roizard, D. Favre, E. Dufour, A, 2013. Les procédés de capture du CO2 Cas des unités de traitement et de valorisation thermique des déchets.
- [3] Muradov, N.Z, 2014. Liberating Energy from Carbon: Introduction to Decarbonization, Springer, New York. USA: Springer; Softcover reprint of the original, 1st ed, 460 p, ISBN 978-1-4939-0544-7.
- [4] Météo France. L'effet de serre [en ligne]. Disponible sur: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/comprendre-le-climat-mondial/leffet-de-serre-et-autres-mecanismes> (consulté le 02.06.2021).
- [5] TPE, Effet de serre [en ligne]. Disponible sur: <https://sites.google.com/site/alr108cch/home> (consulté le 02.06.2021) .
- [6] Nations unies, 2020. Action Climat [en ligne]. Disponible sur: <https://www.un.org/en> (consulté le 29.06.2021).
- [7] Actu Environnement, 2019. Dioxyde de carbone [en ligne]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com> (consulté le 08.06.2021).
- [8] GIEC, 2005. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge University Press, Cambridge UK, 431 p.
- [9] Léria, C, 2021. Energie solaire : définition et différents types d'exploitation [en ligne]. Disponible sur : <https://opera-energie.com/energie-solaire/> (consulté le 01.09.2021).
- [10] Berrched, I, 2011. Etude prospective de la demande énergétique finale pour l'Algérie à l'horizon 2030, mémoire de Magister en management des projets énergétiques, Université de M'Hamed BOUGUARA Boumerdes, année universitaire 2010-2011, p 17.
- [11] Energies nouvelles et renouvelables. Ministère de L'énergie et des Mines de l'Algérie [en ligne]. Disponible sur : <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie> (consulté le 02.06.2023).

- [12] Peter Ginn, *Slow Tech : The Perfect Antidote to Today's Digital World*, Haynes UK, 2019, 160 p. (ISBN 978-1-78521-616-9, lire en ligne [archive])
- [13] Corentin de Chatelperron, *Nomade des mers : le tour du monde des innovations*, E/P/A, 2018, 240 p. (ISBN 978-2-37671-022-6, lire en ligne [archive])
- [14] « No tech reader #7 » [archive] (consulté le 6 avril 2020)
- [15] Julia Watson, *Lo—TEK. Design by Radical Indigenism*, Paris, Taschen, 2020, 420 p. (ISBN 978-3-8365-7818-9, lire en ligne [archive])
- [16] « Low-tech Lab – Les actions du Low-tech Lab | Découvrez nos projets. » [archive], sur lowtechlab.org (consulté le 19 juin 2022)
- [17] « Low-tech Lab – Les Low-tech : l'innovation utile, accessible et durable. » [archive], sur lowtechlab.org (consulté le 19 juin 2022)
- [18] Démarches "low-tech", ADEME, 48 p. (présentation en ligne [archive], lire en ligne [archive]), p. 21-22
- [19] « Arthur Keller sur LinkedIn : #lowtech #lowtech | 19 commentaires » [archive], sur www.linkedin.com (consulté le 19 juin 2022)
- [20] Audrey Tanguy et Valérie Laforest, « Les frontières du Low-tech : principes-clés identifiés dans la littérature », Rapport du PRC 20.2 viabilite low-tech. [Rapport de recherche] PRC20.1 – L1.1, Mines Saint-Étienne, ,p. 16-17 (HAL emse-03264266, lire en ligne [archive] [PDF] ,2021 .(consulté le 19 juin 2022
- [21] Contributeur, « Vers des technologies sobres et résilientes - Pourquoi et comment développer l'innovation "low-tech" ? » [archive], sur *La fabrique écologique*, 14 avril 2019 (consulté le 20 juin 2021)
- [22] Revenir plus haut en :a b et c *La Fabrique écologique*, « «Les low-tech, c'est quoi ?» in "Vers des technologies sobres et résilientes –Pourquoi et comment développer l'innovation «low-tech»?" » [archive], sur lafabriqueecologique.fr (consulté le 16 avril 2020)
- [23] Revenir plus haut en :a b et c 29ter, « [Tribune] Philippe Bihouix : Start-up nation ? Non, low-tech nation ! » [archive], sur www.socialalter.fr (consulté le 20 juin 2021)
- [24] « #85 - Les Low-Tech Solutions » [archive], sur *Acteurs du Paris durable* (consulté le 20 juin 2021)
- [25] Kris De Decker, « What is Low-tech Magazine? » [archive] , sur *Low-tech magazine* (consulté le 18 décembre 2021)

- [26] Kris De Decker, « Manifesto » [archive], sur LOW-TECH MAGAZINE (consulté le 18 décembre 2021)
- [27] « Low-tech Lab – Accueil » [archive] , sur lowtechlab.org (consulté le 13 décembre 2021)
- [28] ↑ Revenir plus haut en :a et b Emmanuel Grimaud, Yann Philippe Tastevin et Denis Vidal, « Low-tech ? Wild-Tech ! », Techniques & culture, no 67, ISSN 0248-6016, DOI) 2017 (tc.8260/10.4000
- [29] « Low tech definition » [archive], sur Cambridge International Dictionary (consulté le 1er avril 2018).
- [30] « Retrotech and Lowtech - How forgotten patents can shake the future » [archive], sur paleo-energetique.org (consulté le 16 novembre 2020)
- [31] Cédric Carles, Thomas Ortiz, Éric Dussert et Bertrand Picard, Rétrofutur : une contre-histoire des innovations énergétiques, dl 2018 (ISBN 978-2-283-03191-9 et 2-283-03191-5, OCLC 1062386018, lire en ligne [archive])
- [32] « Trois formes d’innovation énergétique à valoriser face à la crise systémique » [archive], sur <https://theconversation.com/trois-formes-dinnovation-energetique-a-valoriser-face-a-la-crise-systemique-143758> [archive] (consulté le 1er mars 2021).
- [33] Christophe Abrassart, François Jarrige et Dominique Bourg, Introduction : Low-Tech et enjeux écologiques - quels potentiels pour affronter les crises?, LA PENSÉE ÉCOLOGIQUE, 2020 (lire en ligne [archive])
- [34] « Passerelle #21 : Low tech : face au tout-numérique, se réappropriier les technologies » [archive], 2020 (consulté le 6 avril 2020)
- [35] « SlowTech - It is about finding the OFF switch. » [archive] (consulté le 6 avril 2020)
- [36] « The Slow Tech Movement. » [archive] (consulté le 6 avril 2020)
- [37] « La ville (s)low-tech » [archive] (consulté le 6 avril 2020)
- [38] Daniel Spreng, « The Interdependency of Energy, Information, and Growth », Springer International Publishing Switzerland,DOI 10.1007/978) 2015 -3-319-09228-7_25, lire en ligne [archive] [PDF])
- [39] Peter Ginn, Slow Tech : The Perfect Antidote to Today's Digital World, Haynes UK, 2019, 160 p. (ISBN 978-1-78521-616-9, lire en ligne [archive])
- [40] Corentin de Chatelperron, Nomade des mers : le tour du monde des innovations, E/P/A, 2018, 240 p. (ISBN 978-2-37671-022-6, lire en ligne [archive])

- [41] Julia Watson, Lo—TEK. Design by Radical Indigenism, Paris, Taschen, 2020, 420 p. (ISBN 978-3-8365-7818-9, lire en ligne [archive])
- [42] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf>
- [43] Khelifa Abdelkrim; " Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT ". Thèse de doctorat. Université Hadj Lakhdar de Batna, 22/01/2017, Page 28
- [44] Boussalia Amar; " Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux". Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, 27/06/2010, Page 14.
- [45] Dudez P., 'Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes, expériences et procédés'. (CIRAD) Ed. du GRET, ministère de la Coopération, 1996.
- [46] Bouhediba Malika; " Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS) ". Mémoire de Master, Université Hassiba Benbouali de Chef, 2011- 2012, Page 8.
- [47] Nahar N.M. (2009). Design and Development of a Large Size Non-Tracking Solar Cooker, *Journal of Engineering Science and Technology*, 4: 264-271.
- [48] Al-Saad M.A., Jubran B.A. (1991). The Performance of a Low-Cost Clay Solar Cooker. *Renewable Energy*, 1:617–621.
- [51] 2008 Mawire A., McPherson M., Van den Heetkamp R.R.J. (2008). Simulated Energy and Energy Analyses of the Charging of an Oil-Pebble Bed Thermal Energy Storage System for a Solar Cooker. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 92: 1668–1676.
- [53] Nandwani S.S. (1996). Solar Cookers – Cheap Technology with High Ecological Benefits. *Ecological Economics*, 17: 73–81.
- [54] ASDER, (2012). Solar Cookers-Technical Presentation. Savoyard Association for the Development of Renewable Energies, Chambéry, France, <http://www.asder.asso.fr/phocadownload/cuiseur%20solaire.pdf>
- [55] Panwar N.L., Kaushik S.C., Kothari S. (2011). Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review. *Renewable Sustainable Energy Review*, 15: 1513–1524.
- [56] Schwarzer K. (2004). Experience with Solar Cookers in Different Countries. PPT Presentation, Solar-Institute Julich, Solar-Global, IBEU, Germany.
- [57] Atouk S., (2013). Les énergies renouvelables et les populations rurales pauvres: le cas du Maroc. Mémoire de maîtrise en environnement à l'université de Sher-brooke.

- [58] IEA, (2014). Energy Policies Morocco-Annual Report. International Energy Agency, Paris, France. [https:// www.iea.org/publications/freepublications/](https://www.iea.org/publications/freepublications/)
- [59] Ministère de l'Économie et des Finances (2014). Rapport sur la compensation. Projet de loi de finance pour l'année budgétaire 2015.
- [60] CDER, (2008). Wood Energy Synthesis Report in Morocco. Energy Efficiency Program, Renewable Energies Development Center, Marrakech, Morocco.
- [61] Lavieeco, (2012). <http://lavieeco.com/news/economie/bois-de-feu-la-consommation-des-marocains-est-deux-fois-plus-importante-que-la-production-24120.html>
- [62] Lahlou N., (2011). Energie, changement climatique et bâtiment en Méditerranée-Etude nationale Maroc. Plan Bleu PNUE/PAM.
- [63] Lahlimi A. A. (2016). Évolution du niveau de vie et ses dimensions sociales et territoriales. (www.hcp.ma)
- [64] Mbodji N., Hajji A. (2016). Performance Testing of a Parabolic Solar Concentrator for Solar Cooking. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 138: 10 pages.
- [65] Yettou. F. 'Conception et réalisation d'un système de cuisson solaire destiné au site saharien (Ghardaïa, Algérie)', Thèse de Doctorat en Sciences, Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique, Université Hadj Lakhdar Batna, 2015.
- [66] Prasanna U. R. (2010). Modeling, Optimization and Design of a Solar Thermal Energy Transport System for Hybrid Cooking Application. Ph. D. Thesis, Indian Institute of Science.
- [67] Muthusivagami R et al., 'Solar cookers with and without thermal storage—A review', Institute for Energy Studies, College of Engineering, Anna University, Guindy, Chennai 600025, India, 2010.
- [68] Kandpal T.C., Mathur S.S. (1986). The Economics of Box Type Solar Cookers. *Energy Conversion and Management*, 26: 233–235.
- [69] Nahar N.M., Gupta J.P., Sharma P. (1994). Design, Development and Testing of a Large-Size Solar Cooker for Animal Feed. *Applied Energy*, 48: 295–304.
- [70] Panwar N. L., Kothari S., Kaushik S.C. (2013). Techno-Economic Evaluation of Masonry Type Animal Feed Solar Cooker in Rural Areas of an Indian State Rajasthan. *Energy Policy*, 52: 583-586.
- [71] Beaumont G., Eiloart T., Robinson P. (1997). Ultra-Low Cost Solar Cookers: Design Details and Field Trials in Tanzania. *Renewable Energy*, 10: 635–640

- [72] Sims R.E.H. (2004). Renewable Energy: A Response to Climate Change. *Solar Energy*, 76: 9–17.
- [73] Escobar E.M., (1996). Low Budget Solar Cookers: An Alternative to Diminish the Use of Wood as a Source of Fuel. *Renewable Energy*, 9: 754–757.
- [74] Hernandez-Luna G., Huelsz G. (2008). A Solar Oven for Intertropical Zones: Evaluation of the Cooking Process. *Energy Conversion and Management*, 49: 3622–3626.
- [75] Andrianaivo L., Ramasiarino V.J. (2014). Life Cycle Assessment and Environmental Impact Evaluation of the Parabolic Solar Cooker SK14 in Madagascar. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2: 191–195.
- [76] Garba M.M., Danmallam I.M. (2014). Techno-Economic and Environmental Impact Analysis of a Passive Solar Cooker for Application in Nigeria. *International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 3:06–10.
- [77] Khan M.Y., Saxena A., Katiyar J. (2015). Performance of LPG Burner with Different Size of Ball Bearing as a Porous Medium. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 2: 955–957.
- [78] Lorenz-Ladener C. et al. ‘Séchoirs solaires : Construction et utilisation’. Thèse de Master, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.
- [79] Site internet, ‘ L’énergie solaire en site isolé : cuisson solaire et autres applications Année 2005’, <http://solarcooking.org>, consulte-le [24.02.2019].
- [80] Miri R et al., ‘ Étude expérimentale d’un Séchoir Solaire ’, Rev. Energ. Ren. : Zones Arides, p. 41-48, 2002.
- [81] Berhinger. R . ‘Cuisseurs solaires : Auto-construction et recettes’. thèse de doctorat Université de Lyon, 2009.
- [82] Sharma. S, ' Conception, développement et évaluation des performances d'une unité de stockage de la chaleur latente pour la cuisson du soir dans un four solaire'. *Conversation énergétique. Manag.* 41, 1497-1508.2000
- [83] Klemens Schwarzer , MARIA EUGENIA Vieira da Silva ‘Characterizations and design methods of solar cookers’ *Solar Energy* 82 (2008) 157–163.
- [84] Revenir plus haut en :a et b Emmanuel Grimaud, Yann Philippe Tastevin et Denis Vidal, « Low-tech ? Wild-Tech ! », *Techniques & culture*, no 67,(ISSN 0248-6016, DOI 10.4000/tc.8260) 2017

- [85] Chenni Rachid, 'Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire', Thèse Magister, Université Mantouri de Constantine, 2007.
- [86] Arafa Kaddouri, 'Conception et réalisation d'un suiveur solaire a deux axes', l'obtention du diplôme Ingénieur d'Etat, électronique & télécommunications, département génie électrique, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2015.
- [87] Yettou Fatiha, 'Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude', Mémoire de magister, Département d'électronique électricité solaire, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER, 2009.
- [88] Site internet '<http://www.meridienne.org/index.php?page=angle-horaire>', consulte le [10.03.2019]
- [89] Sandali Messaoud, 'Etude dynamique et thermique d'un capteur Solaire à air à double passe avec milieu poreux', Thèse magister, Université de Tlemcen, 2014.
- [90] M. Petibon Stéphane, 'Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [91] Zerguine Bilal, 'Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque', Thèse de Magister, réseaux électrique, Département d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [92] Maouedj Rachid, ' Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ', Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd Faculté des Sciences Département de physique 2005.
- [93] Bouden Abdelmalek, 'Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque', Thèse doctorat Université Mentouri Constantine, 2008.
- [94] Carreau.C et al, ' les énergies renouvelables dans l'habitat', France 2001.
- [95] Bouziane Mahmah, et al. 'Production d'Hydrogène Solaire Phase I : Etude d'Opportunité et de Faisabilité du Projet'. 20th World Energy Congress – Rome, November 11th – 15th, 2007.
- [96] Nichiporuk Oleksy , 'Simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque a contact arrière interdigtés '. thèse doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [97] Louzazna Brahim et al, ' Etude et Caractérisation d'un Panneau Photovoltaïque type Condor option Energies Renouvelables, Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université de Bejaïa, 2015.

[98] Site internet '<http://www.meridienne.org/index.php?page=angle-horaire>', consulte-le [10.03.2019]

[99] Thibaut Desruse, ' Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium contact et en face arrière '. thèse doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.

[100] Harmim. A. et al. 'Développement et expérimentation d'un cuiseur solaire à double exposition', Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, 'URERMS' B.P. 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie, 2008.

[101] Mouhous-Chaouchi Samira 'Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné', mémoire de magister, école doctorale «énergies renouvelables», université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2012.