



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences de la technologie  
Département Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**Fouzia BETTAYEB**

Le : [Click here to enter a date.](#)

## Proposition d'une démarche de réalisation du projet solaire

---

### Jury :

Mr. Abdelhafid MOUMMI	Pr	<b>Université de Biskra</b>	Président
Mr. Nouredine MOUMMI	Pr	<b>Université de Biskra</b>	Rapporteur
Mr. Adnane LABED	Pr	<b>Université de Biskra</b>	Examineur

Année universitaire : 2020 - 2021

REMERCIEMENT

*Dieu merci de m'avoir laissé faire ce travail  
J'offre mes remerciements et ma gratitude à mon  
professeur, mon encadreur,*

*Pr : Noureddine MOUMMI*

*Je tiens à remercier tous mes professeurs qui ont  
contribué à ma formation et mon parcours  
universitaire*

*Chacun des Pr : Abdelhafide MOUMMI, Pr : Adnane  
LABADE, Mr : C.MAHBOUB, Mme : N.BOULTIF, Mr :  
C.NASER,*

*Mr: M.TAHAR, Mr: M.A.KETHIRI*

*Sans oublier chef d'département Mr : Belhi GUERIRA*

*Et tous les techniciens des laboratoires et les  
travailleurs administratifs du D.G.M.*

*Monsieur le président du jury ainsi que ses membres  
J'espère que vous accepterez ce travail.*

*Merci*

DEDICACE

*Tous les mots sont rares pour toi*

*Maman et Papa*

*La bénédiction de ma vie, que Dieu prolonge  
ta vie et te perpétue comme un soutien pour  
moi dans cette vie*

*A mes sœurs (MESSOUDA, NESRINE, HAKIMA,  
SARA), mon frère (ZINO) et sa femme*

*Pour mes copines: HANA, SARA.Z, SAFA,  
SARA.M, KHAOULA*

*Pour ceux que j'aime et ceux qui m'aiment*

*À la promotion 2021*

*Je dédie ce travail à toute ma chère famille  
et amis, chacun en son nom,*

*Pour ceux qui m'ont aidé dans cet humble  
travail et pour leurs encouragements.*

*Ainsi que tous mes professeurs qui m'ont aidé*

*Merci à vous tous*

# Sommaire

Remercie

Dédicace

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 1

## **CHAPITRE I: PRESENTATION DU PROJET**

I.1.Introduction 2

I.2. Quelle est la place des énergies renouvelables ? 2

I.3. Description du projet 4

Le Projet solaire à quoi consiste ? 4

I.4. Etapes de la démarche 4

    Phases I : Caractérisation des sites 5

    Phase II : Systèmes de conversion 5

    Phase III : Application, simulation et résultats 5

Bibliographie 6

## **CHAPITRE II : PHASES DES PROJETS**

Introduction 7

II.1. Phase I : Caractérisations du site 7

II.1.1. Caractérisation climatique	7
1. Evaluation de la température ambiante	8
2. Evaluation de la température par des modèles théoriques ou empiriques	10
3. Evaluation de la vitesse de vent	12
4. Evaluation de la vitesse de vent par des modèles	15
5. Evaluation de l'Irradiations solaires	16
5.1. Variation théorique du rayonnement incident	16
6. Evaluation du rayonnement incident par les modèles	18
6.1. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	19
6.2. Absorption par les gaz atmosphériques	20
7. Autres modèles pour calculer le rayonnement solaire	22
Modèles F. Chabane	23
Relation d'A.A.M. Sayigh	23
Relation de Reddy	24
Relation de Swartman	24
Relation de Garg et al	24
Relations de Sabbagh et al	25
Relation de Hussain et al	25
Modèle de W.E. Alnaser	26

Modèle de Liu & Jordan	26
Modèle de Collares-Pereira et al	26
Relation d'Erbs, Klein et Duffie	27
Relation d'Iqbal	27
Relation de Hussain	27
Modèle de Lacis & Hansen	27
Modèle M. Capderou	29
Exemples d'histogramme permettant l'évaluation de la température, la vitesse du vent et de l'humidité.	31
II.2.Phase II : Systèmes de conversion	32
1. Conversion de l'énergie	32
2. Classement des capteurs solaires	33
2.1. Capteurs solaires thermique à basse température	33
2.2. Capteurs solaires à haute température	33
3. Les capteurs solaires thermiques	33
3.1. Principe de fonctionnement des capteurs solaires thermiques	33
3.2. Classification des capteurs solaires thermiques	35
4. Capteur solaire plan	37
4.1. Capteur solaire plan vitré	38
4.2. Capteur solaire plan non vitré	38

4.3. Les capteurs solaires sous vide	38
3. Tubes sous vide à flux direct	39
4. Tubes sous vide à caloduc	39
4.4. Capteurs à concentration	39
4.4.1. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques	39
4.4.2. Les centrales à tour	40
5. Conversion électrique	41
La conversion photovoltaïque (conversion directe)	41
Conclusion	41
Bibliographie	42

### **Chapitre III : application (application)**

Introduction	44
III.1.Phase III : Application (chauffage)	44
1. Définition le chauffage	44
2. Composants des systèmes de chauffage solaire	44
3. Les systèmes solaires thermiques (chauffage)	45
3.1. Les systèmes de production d'eau chaude sanitaire	45
3.1.1. Chauffe-eau individuels	45
1. Chauffe-eau sans réservoir	45
2. Le chauffe-eau solaire thermosiphon	45

3. Le chauffe-eau solaire à circulation forcée	47
4. Le chauffe-eau solaire autovidangeable a circulation Forcée	48
3.1.2. Chauffe-eau solaire pour une grande consommation	48
1. Production centralisée et distribution directe	48
2. Production centralise et distribution par boucle de circulation	49
3.2. Les systèmes de chauffage solaire des bâtiments	49
3.2.1. Le plancher solaire direct (PSD)	49
3.2.2. Le système solaire combine (SSC)	49
3.3. Les systèmes de chauffage solaire des piscines	50
1. Le système de chauffage solaire pour piscine en plein air	50
2. Le système de chauffage solaire pour piscine couverte	50
III.2. Exemple d'un cas d'étude	52
Conclusion	58
Bibliographie	59

### **Chapitre IV : Méthode de calcul, simulation et résultats**

Présentation des résultats de la simulation	60
Conclusion	67
Conclusion générale	68



### Liste des figures

Figure I.1 : La consommation énergétique mondiale 2010 ( classique et renouvelable).	2
Figure I.2 : Consommation mondiale d'énergie.	3
Figure I.3: émissions totale de carbone provenant de la consommation de combustible fossiles.	3
Figure I.4 : Énergie solaire au sol dans le monde, en kWh/m <sup>2</sup> /an.	4
Figure II.1 : Répartition spatiale des températures maximales mois de juillet 2009.	9
Figure II.2 : Répartition spatiale des températures maximales mois d'Août 2012.	9
Figure II.3: Variation de la température d'entrée au cours de la journée.	11
Figure II.4 : Atlas - vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.	13
Figure II.5 : Carte-vitesse du vent projeté sur la carte topographique de l'Algérie.	13
Figure II.6 : Atlas vent- vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (Eté et Printemps).	14
Figure II.7 : Atlas-vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne).	15
Figure II.8 : Composantes du rayonnement solaire.	19
Figure II.9 : Influence de la courbure du globe terrestre sur le trajet parcouru par les RS.	20
Figure II.10 : Rayonnement solaire arrivant sur une surface réceptrice.	21
Figure II.11 : Irradiation globale inclinée à la latitude du lieu.	30
Figure II.12 : Principaux constituants d'un capteur solaire.	34
Figure II.13 : principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.	34
Figure II.14: Schéma des pertes de chaleur dans un CS.	37
Figure II.15 : Les principaux éléments constituant un capteur solaire plan vitré.	38
Figure II.16 : Photo d'un capteur sans vitrage.	38
Figure II.17 : Principe du système.	39
Figure II.18 : Principe du système dans les tubes sous vide à caloduc.	39
Figure II.19 : Schéma des systèmes à concentration.	40
Figure II.20 : Centrale solaire parabolique (projet DISH-STIRLINGA FONT-ROMEUE-ODEILLO).	40

Figure II.21 : Centrales à tour.	40
Figure II.22 : Capteur photovoltaïque.	41
Figure III.1 : Schéma de principe d'une installation solaire thermique.	44
Figure III.2 : La cuve de stockage avec échangeur.	46
Figure III.3 : Système de chauffe-eau solaire thermosiphon directe.	47
Figure III.4 : Système de chauffe-eau solaire thermosiphon indirecte.	47
Figure III.5 : Système de chauffe-eau solaire à circulation forcée.	47
Figure III.6 : Système de chauffe-eau solaire autovidangeable à circulation forcée.	48
Figure III.7 : Système de production centralise et distribution directe.	48
Figure III.8 : Système de production centralise et distribution boucle de circulation.	49
Figure III .9 : Le plancher solaire direct.	49
Figure III.10 : Système de production eau chaude et chauffage avec appoint intégré.	50
Figure III.11 : Système de chauffage solaire pour piscine en plein air avec appoint séparé.	50
Figure III.12 : Système de chauffage solaire pour piscine couverte.	51
Figure III.13 : Présentation du local étudié.	52
Figures III.14 : Dimensions du local étudié.	53
Figure IV.1: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 janvier.	61
Figure IV.2: variation de la température de sortie de l'air en 15 janvier.	61
Figure IV.3: variation de la température d'entrée de l'air en 15 janvier.	61
Figure IV.4 : variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 février.	61
Figure IV.5 : variation de la température de sortie de l'air en 15 février.	61
Figure IV.6: variation de la température d'entrée de l'air en 15 février.	61
Figure IV.7: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 mars.	62
Figure IV.8: variation de la température de sortie de l'air en 15 mars.	62
Figure IV.9: variation de la température d'entrée de l'air en 15 mars.	62
Figure IV.10: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 avril.	62

Figure IV.11: variation de la température de sortie de l'air en 15 avril.	62
Figure IV.12: variation de la température d'entrée de l'air en 15 avril.	62
Figure IV.13: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 mai.	63
Figure IV.14: variation de la température de sortie de l'air en 15 mai.	63
Figure IV.15: variation de la température d'entrée de l'air en 15 mai.	63
Figure IV.16: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 juin.	63
Figure IV.17: variation de la température de sortie de l'air en 15 juin.	63
Figure IV.18: variation de la température d'entrée de l'air en 15 juin.	63
Figure IV.19: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 juillet.	64
Figure IV.20: variation de la température de sortie de l'air en 15 juillet.	64
Figure IV.21: variation de la température d'entrée de l'air en 15 juillet.	64
Figure IV.22: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 aout.	64
Figure IV.23: variation de la température de sortie de l'air en 15 aout.	64
Figure IV.24: variation de la température d'entrée de l'air en 15 aout.	64
Figure IV.25: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 septembre.	65
Figure IV.26: variation de la température de sortie de l'air en 15 septembre.	65
Figure IV.27: variation de la température d'entrée de l'air en 15 septembre.	65
Figure IV.28: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 octobre.	65
Figure IV.29: variation de la température de sortie de l'air en 15 octobre.	65
Figure IV.30: variation de la température d'entrée de l'air en 15 octobre.	65
Figure IV.31: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 novembre.	66
Figure IV.32: variation de la température de sortie de l'air en 15 novembre.	66
Figure IV.33: variation de la température d'entrée de l'air en 15 novembre.	66
Figure IV.34: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 décembre.	66
Figure IV.35: variation de la température de sortie de l'air en 15 décembre.	66
Figure IV.36: variation de la température d'entrée de l'air en 15 décembre.	66

**Liste des tableaux**

Tableau II.1 : Vitesse moyennes mensuelles et annuelles différents sites en Algérie.	14
Tableau II.2 : Classification des capteurs solaires.	36
Tableau III.1 : Les résistances thermiques pour différents types de parois.	55
Tableau III.2 : Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois.	56
Tableau III.3 : Le taux horaire de renouvellement d'air du volume du local non chauffé.	57
Tableau III.4 : Déperditions par renouvellement d'air.	57

Nomenclature

Symbole	Dénomination	Unités
<b>ER</b>	énergies renouvelables	–
<b>CS</b>	capteur solaire	–
<b>CLS</b>	La Couche Limite de Surface	–
<b>CLA</b>	La couche limite atmosphérique	–
<b>N<sub>2</sub></b>	L'azote	–
<b>TWh/an</b>	Térawatt /ans	–
<b>mm Hg</b>	Le millimètre de mercure	–
<b>ASA</b>	L'Agence Spatiale Allemande	–
<b>Kw</b>	kilo watt	–
<b>T<sub>e</sub></b>	La température d'entrée de l'air dans le capteur	°C
<b>T<sub>max</sub></b>	La température maximale	°C
<b>T<sub>min</sub></b>	La température minimale	°C
<b>Δt</b>	La durée du jour entre le lever et le coucher du soleil.	–
<b>T<sub>éq</sub></b>	La température équivalente de l'air ambiant	°C
<b>T<sub>a</sub></b>	la température ambiante de l'air	°C
<b>h<sub>cve</sub></b>	Le coefficient de pertes thermiques par convection entre la face avant du capteur et l'extérieur.	–
<b>h<sub>rve</sub></b>	Le coefficient de pertes thermiques par rayonnement entre la face avant du capteur et l'extérieur.	–
<b>R</b>	Le flux net de rayonnement échangé par le fluide	–
<b>T<sub>ciel</sub></b>	La valeur de la température du ciel	–
<b>V</b>	La valeur de la vitesse du vent horizontal	–
<b>z</b>	L'altitude	–
<b>z<sub>0</sub></b>	La longueur de rugosité qui caractérise le type de surface du sol.	–
<b>G<sub>max</sub></b>	L'éclairement énergétique maximum à midi solaire sur un plan horizontal	–
<b>G(t)</b>	Le rayonnement instantané	–
<b>G</b>	Le rayonnement solaire global	W/m <sup>2</sup>

$G_m$	La moyenne des jours par ciel couvert	—
$G_{h0}$	L'irradiation extraterrestre	—
$W$	L'énergie globale reçue du lever jusqu'au coucher du soleil	—
$G^*$	L'apport en ensoleillement par beaux jours	—
$S$	La durée d'insolation quotidienne	—
$m$	La masse atmosphérique lorsque l'incidence est normale à la terre	—
$m_a$	La masse atmosphérique	—
$W$	Coefficient caractéristiques d'absorption	
$TL$	Le facteur de trouble de Linke	—
$\beta$	Le coefficient de trouble atmosphérique	—
$p_v$	La pression partielle de vapeur d'eau	<b>mm Hg</b>
$(alb)$	Est l'albédo ou coefficient de réflexion qui dépend de la nature du sol	—
$D$	L'éclairement solaire diffus	—
$D_{c,h}$	L'éclairement solaire diffus part du ciel sur une surface horizontale	—
$D_C$	L'éclairement solaire diffus part du ciel sur une surface d'inclinaison quelconque	—
$D_s$	L'éclairement solaire diffus part du sol	—
$h$	La hauteur du soleil	—
$H_r$	L'humidité relative	<b>(%)</b>
$G_{proposé}$	L'irradiation globale pour plusieurs jours de tests pour un plan incliné (45°) d'orientation sud	—
$T_m$	Durée astronomique du jour	—
$\omega_s$	L'angle horaire du lever du soleil en degrés	—
$H_a$	L'humidité absolue.	—
$DI$	La durée d'insolation	—
$\sigma$	la fraction d'insolation	—

$I_{sc}$	La constante solaire extraterrestre	–
$I_0$	La constante solaire moyenne	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$n_j$	Le numéro de jour dans l'année	–
$\theta_z$	L'angle zénithal	–
$U_0$	L'épaisseur de la couche d'ozone	–
$L$	La quantité d'ozone à la verticale du lieu	<b>Cm</b>
$l, \varphi$	sont respectivement la longitude et la latitude du lieu.	–
$U_w$	L'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu	<b>Cm</b>
$P$	La pression atmosphérique	<b>mbar</b>
$T$	La température ambiante	<b>K</b>
$T_0$	Le facteur de trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau	–
$Z$	L'altitude du lieu	–
$T_1$	Le coefficient de trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> et O <sub>3</sub> ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné	–
$h_{in}$	Coefficients extérieur d'échange superficiel	<b>W/m<sup>2</sup>. °C</b>
$h_{ex}$	Coefficients intérieur d'échange superficiel	<b>W/m<sup>2</sup>. °C</b>
$K$	Coefficient d'échange global des parois opaques (conductance)	<b>W/m<sup>2</sup>. °C</b>
$\lambda_F$	Conductibilité de l'air à l'instant t	<b>W/mK</b>
$\rho$	Masse volumique de l'air à l'instant t	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
$C_p$	capacité calorifique de l'air	<b>J/kg.K</b>
$\eta$	Rendement thermique du capteur plan à air	<b>%</b>

# Introduction générale



### Introduction générale

La substitution des énergies fossiles par des sources d'énergie inépuisables est un défi pour tous les pays du monde. Certains, envisagent d'ici l'an 2030 de remplacer les véhicules munis d'un moteur à combustion par celui électrique. D'autres, encouragent les recherches sur les technologies de l'exploitation de l'énergie des éoliennes et géothermiques. En tous les cas, leur marché est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale de tous les pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics en Algérie, le marché local doit atteindre 500 MW d'ici quelques années, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 5% de l'électricité totale produite (0,02% aujourd'hui). Avec une production effective de 33,6 TWh et plus de 245.000 kms de réseaux de distribution, le taux de couverture des besoins du pays en électricité est de 95%, y compris dans les zones rurales isolées. L'essentiel de la puissance est issue à 92% des turbines vapeur et turbines à gaz. La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année. La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations du fait d'une augmentation croissante de la demande intérieure. D'un autre côté la transformation socioéconomique a la transformation de l'architecture dite aujourd'hui moderne qui n'est pas adaptée au climat des régions du sud algérien. En effet l'architecture urbaine actuelle fait appel à des bâtiments énergivores que ce soit en matière de confort ou d'éclairage. La demande en électricité dépasse l'offre surtout en été où l'irrigation des palmeraies se répercute sur le réseau de Sonelgaz. Dans ce contexte nous proposons cette démarche qui servira aux utilisateurs des énergies renouvelables et solaire en particulier, comme support méthodologique quant aux étapes de réalisation d'un projet de conversion de l'énergie solaire. Le mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est relatif à la présentation du projet, son but et ses objectifs. Le deuxième chapitre est constitué des différentes phases du projet solaire. Le troisième chapitre est dédié à une application de la démarche. Il s'agit de l'étude d'un site à travers l'application de la démarche pour le calcul des différents paramètres, le choix du système utilisé. La simulation des modèles ainsi que le chauffage d'un local, constituent le quatrième chapitre qui comporte également la présentation des résultats du calcul. L'ensemble est suivi d'une conclusion générale.

# Chapitre I :

## Présentation du projet

## I.1.Introduction

Dans ce chapitre nous proposons un descriptif ainsi que les objectifs de la démarche proposée qui servira comme support technique utile à la fois aux étudiants et aux utilisateurs des énergies renouvelables et solaire en particulier. Ce support constituera une méthodologique quant aux étapes de réalisation d'un projet de conversion de l'énergie solaire en énergie.

## I.2.Quelle est la place des énergies renouvelables ?

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. Selon le dernier " Inventaire sur la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", réalisé par l'Observatoire des Énergies Renouvelables, 20 % seulement du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7 %) et par l'énergie nucléaire (17,1 %).

À elle seule, l'hydroélectricité génère 92,5 % de l'électricité issue des ER.

Les utilisations de la biomasse produisent 5,5 % du courant mondial " vert ",

La géothermie 1,5 %,

L'éolien 0,5 %.

Et les techniques solaires y contribuent seulement pour 0,05 %. Toutefois, ceci est variable d'un pays à l'autre. Tout est, en effet, fonction des gisements d'énergies renouvelables disponibles.

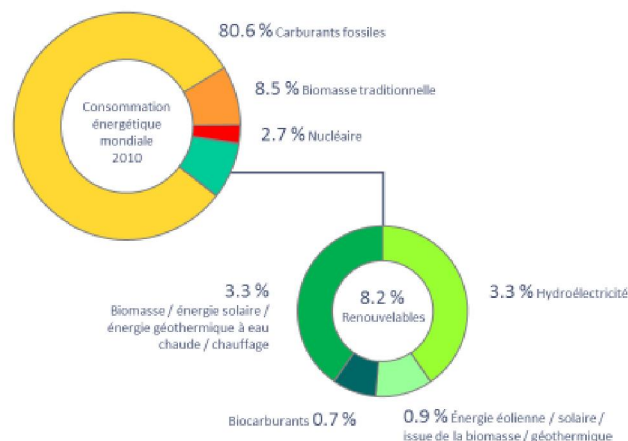


Figure I.1 : Consommation énergétique mondiale 2010 ( classique et renouvelable)

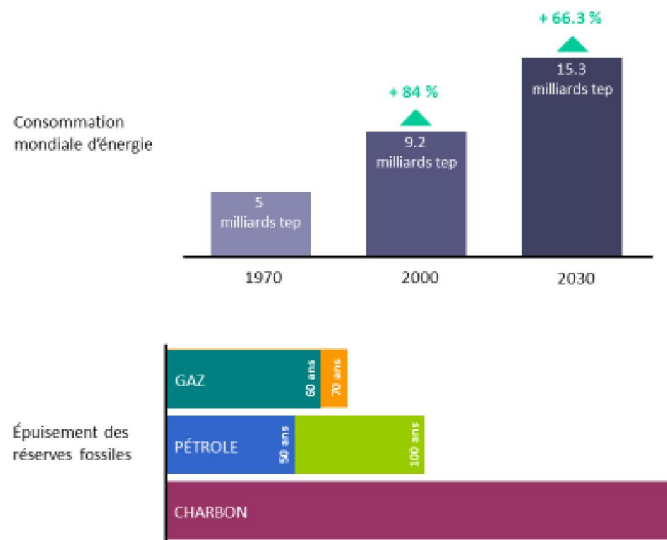


Figure I.2 : Consommation mondiale d'énergie.[1]

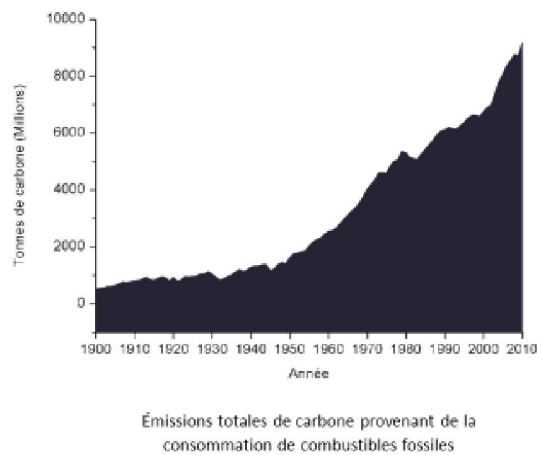


Figure I.3: Emissions totales de carbone.[1]

## CONSÉQUENCES

- 1 Inondations, sécheresses, incendies de forêt et intensification des tempêtes tropicales;
- 2 Acidification des océans et désertification des sols;
- 3 Risque de disparition d'écosystèmes et donc de nombreuses espèces;
- 4 Baisse de la ressource en eau potable et alimentaire;
- 5 Augmentation du nombre des grands facteurs de mortalité, comme les maladies;
- 6 Augmentation de l'instabilité géopolitique.

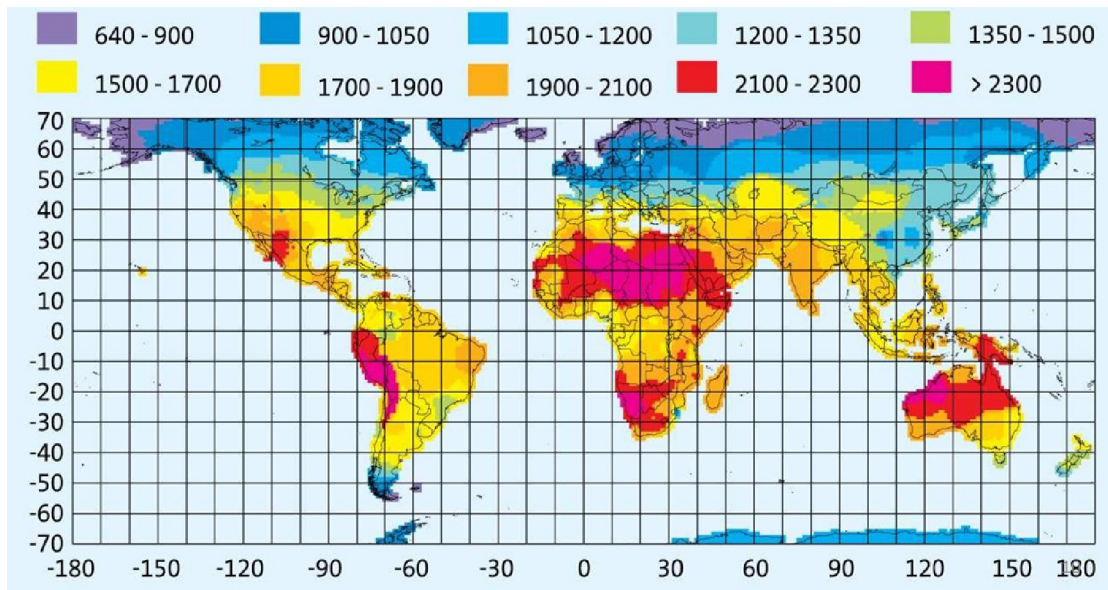


Figure I.4: Énergie solaire au sol dans le monde, en kWh/m<sup>2</sup>/an.[2]

### I.3.Description du projet

#### Le Projet solaire à quoi consiste ?

Le projet proposé consiste à établir une démarche de calcul des performances des systèmes solaires sous divers contextes géographiques et climatiques. Cette démarche servira aux chercheurs et aux utilisateurs industriels et particuliers pour leur indiquer les possibilités offertes par les énergies renouvelables. Ceci est très important car en l'absence de données préalables, on ne saura pas quelle sera la température maximale (ou électricité), exploitable qui pourra être fournie.

A l'issue de la dernière étape de la démarche, on saura évaluer les valeurs moyennes mensuelles du nombre d'heures exploitables pour une telle ou telle application.

L'ensemble permettra l'établissement d'une géographie d'utilisation : rassembler toutes les données pouvant servir à la constitution d'un Atlas des applications de l'énergie solaire.

#### I.4.Etapes de la démarche

En parcourant les différents modèles étudiés concernant la variation des paramètres structurels, conceptuels et d'environnement qui affectent le fonctionnement des systèmes solaires (insolateurs), se servir de ces outils pour faire une étude en phases du projet solaire qui sera structurée comme suit :

- a) Etablir une démarche globale de calcul :
  - Des coordonnées du soleil.
  - De la durée du jour, du temps du lever et du coucher du soleil et du midi solaire.
  - Du rayonnement solaire incident.
  - De la température ambiante.
  - De la température de sortie d'un insolateur qu'on jugera performant et dont on établira les bilans des échanges en fonction des conditions d'utilisation et ceux relative à sa conception.
- b) Donnez les résultats sous forme d'abaques de températures de sortie en fonction du temps par conditions de ciel différentes, pour différents débits, pour différents sites de situations géographiques différentes et enfin pour quelque jours types des mois de l'année.
- c) Faire le dimensionnement d'une installation de chauffage solaire par exemple (ou autre application).
- d) Exposer les résultats à travers l'étude d'un cas réel

Toutes ces étapes peuvent être résumées en phases décrites comme suit :

### **Phases I : Caractérisation des sites**

Généralités (systèmes énergétiques solaires...).

Le gisement solaire (coordonnées solaires, mouvement de la terre/sol...).

Modèles de calcul et d'évaluation.

### **Phase II : Systèmes de conversion**

Technologies de conversion (thermiques, photovoltaïque...).

Bilan thermique (calcul  $T_e$ ,  $T_s$ ,  $G$ , calculs des coefficients de pertes...).

### **Phase III : Application, simulation et résultats**

**Bibliographie**

[1] <https://www.google.com/search?q=Consommation+%C3%A9nerg%C3%A9tique+mondiale>

[2] Polycopie N.Moummi.

Chapitre II :  
Phases du projet



### Introduction

La réalisation d'un projet solaire nécessite de nombreuses évaluations climatiques pour sa réussite. Tous les sites ne sont pas adaptés à la réalisation de projets solaires, ainsi que les nombreux systèmes de conversion d'énergie solaire. Dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes à suivre pour tout projet solaire. Nous découvrirons également les différents systèmes de conversion de l'énergie solaire et leurs utilisations.

### II.1. Phase I : Caractérisations du site

**II.1.1. Caractérisation climatique :** La première étape concernant les projets de conversion de n'importe quelle énergie renouvelable est de caractériser ce site. Ça consiste à évaluer le potentiel de cette énergie contenu réellement dans ce site. Cela peut se faire par la quantification de l'intensité des paramètres propres à cette énergie. Ceci n'est pas facile car ces paramètres sont soit variables, soit imprévisibles. Il existe divers outils pour suivre l'évolution de ces paramètres dans le temps et dans l'espace.

Dans ce travail qui n'est pas exhaustif, on illustre certaines des méthodes utilisées pour débiter la réalisation d'un projet solaire à plusieurs fins (chauffage, séchage, éclairage). Afin de caractériser le gisement solaire d'un site on considère les paramètres suivants :

- La température ambiante.
- Irradiation solaire (l'ensoleillement).
- La vitesse du vent.

Pour démarrer un projet, ces éléments permettent d'étudier le site dans un contexte de projet solaire. Pour caractériser le climat, cette étude utilise les données météorologiques, les modèles, les cartes, ...etc. Pour ce qui concerne l'ensoleillement et les vents, en l'absence de données suffisantes récoltées sur une longue période on fait appel à des modèles.

L'Organisation Météorologique Mondiale recommande de caractériser le climat d'un site par des statistiques calculées sur 30 ans. Les moyennes des indicateurs climatiques obtenues sont appelées « normales » et servent de valeurs de référence.

On évalue le site par :

### **1. Evaluation de la température ambiante**

Nous savons que la température est un facteur de base pour la mise en œuvre de tout projet solaire, car elle diffère d'une région à l'autre et en raison de la proximité du site avec les forêts, les mers et les océans...etc. Elle diffère aussi selon la façon dont elle est évaluée : mesures par les stations météorologiques (instruments, satellites), prévisions modèles...etc.

La température de l'air est un facteur de base car ça constitue le paramètre d'entrée dans un système de conversion thermique de l'énergie solaire.

#### **• Structure d'un système énergétique solaire**

Un système énergétique solaire est mis en place en un lieu donné pour fournir de l'énergie sous une forme ou une autre, mécanique, thermique, électrique...etc. D'une façon générale sa structure est peut être schématisée de la façon suivante :

#### **1. Une entrée :**

- Le gisement solaire local.
- L'environnement géographique.
- Le ou les sources énergétiques d'appoint.

#### **2. Un transfert**

- Dispositif de captation du rayonnement solaire avec ou sans concentration.
- Élément de conversion d'énergie d'une forme à une autre.
- Des organes de pilotage et de régulation.

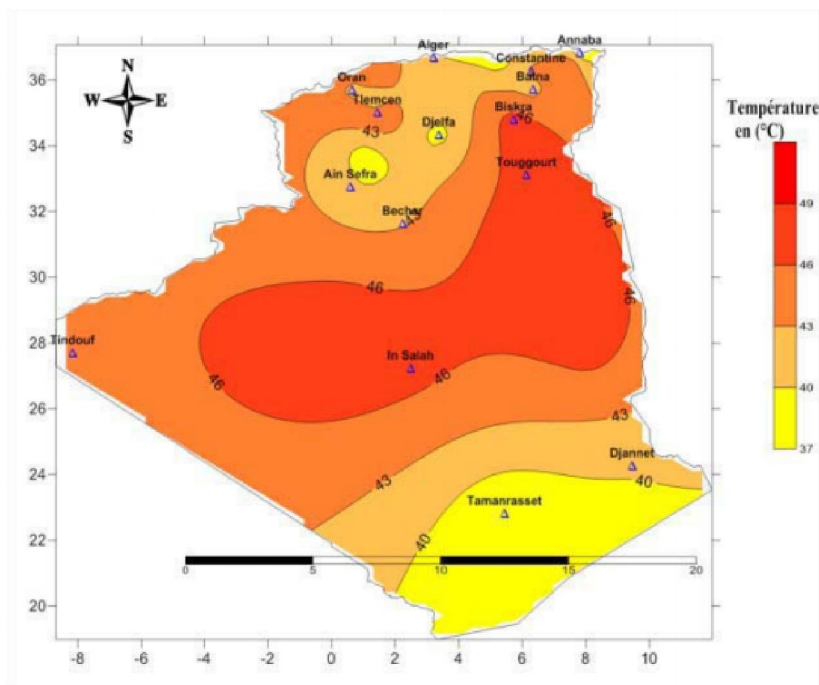
#### **3. Un stockage**

- Dispositifs tels que : des réservoirs d'eau, des masses calorifiques à chaleur sensible ou latente, des batteries électriques...etc.

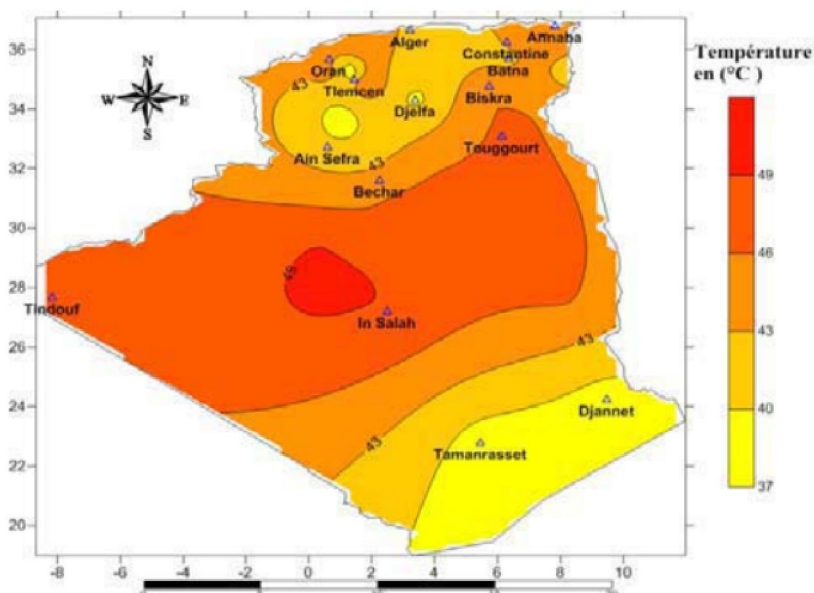
#### **Exemples :**

- Fourniture d'eau chaude ou d'air chaud (chauffage des locaux et habitations).
- Pompage d'eau.
- Centrale électrique.
- Séchage des produits agroalimentaires.
- Dessalement de l'eau.

Parmi les outils puissants utilisés pour l'évaluation de la température d'un site (ou d'une zone géographique) des cartes mis à la disposition des utilisateurs. Ces cartes sont établies par des spécialistes.



**Figure II.1:**Répartition spatiale des températures maximales mois de juillet 2009. [1]



**Figure II.2 :** Répartition spatiale des températures maximales mois d'Août 2012. [1]

Pour l'Algérie, à partir des données moyennes estivales calculées des 38 stations. L'évolution des moyennes des températures on montre les principales vagues de chaleur qui ont sévi sur l'Algérie depuis l'année 1988. Les dernières remontent à

juillet 2009 et Aout 2012. A titre d'exemple, on montre qu'au cours des vagues de chaleur de Juillet 2009 et Août 2012, la température maximale absolue se rencontre un peu par tout sur toute la région d'étude et plus particulièrement à l'intérieur du pays, les plus hautes températures sont observées à la station d'In Salah. On relève dans les stations d'altitude faible comme Annaba et Oran, les températures maximales absolues sont inférieurs à 40°C. [1]

## **2. Evaluation de la température ambiante par des modèles théoriques ou empiriques**

La température ambiante peut être également évaluée à partir de modèles théoriques ou empiriques. Nous exposons dans ce qui suit deux modèles à titre d'illustration :

L'évolution théorique de la température ambiante, qui est la température d'entrée de l'air dans le capteur, peut être modélisée par l'équation :

$$T_e(t) = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) + \left( \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) \cdot \cos\left( \frac{2\pi \cdot t}{\Delta t} \right)$$

Dans ce modèle la température maximale est atteinte au midi solaire vrai. Ce modèle ne correspond pas à la réalité car on considère que la température maximale n'est atteinte qu'au "midi thermique" qui correspond à l'heure, en temps solaire vrai, du midi solaire plus 1/8 de la durée du jour solaire ( $\Delta t$ ). Certes le flux maximal est atteint au midi solaire, mais on considère que vu l'inertie thermique du sol, l'équilibre thermique entre le milieu ambiant et le sol est décalé de 1/8 ( $\Delta t$ ) par rapport au midi solaire. Le modèle proposé a été remplacé à ce juste titre par un modèle qui introduit un "midi thermique", où la température ambiante atteint sa valeur maximale de la journée. Vu les échanges radiatifs nocturnes, la température ambiante atteint sa valeur minimale au lever du soleil et enfin, au coucher de soleil, on considère la température ambiante comme étant la température moyenne, et qui vaut  $\left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right)$ , l'approximation est cependant valable compte tenu des différents paramètres qui ne sont pas pris en considération (vent, pluie ...). Ainsi la température ambiante peut être modélisée par deux branches graphiques de fonctions sinusoïdales de périodes différentes :

- La première partie étant les  $\frac{5}{8}$  de ( $\Delta t$ ).

- La deuxième partie étant les  $\frac{3}{8}$  de  $(\Delta t)$ .

La première partie commence à partir du lever du soleil, correspondant à la température minimale, jusqu'à l'heure du midi solaire plus le  $\frac{1}{8}$  de  $(\Delta t)$  correspondant à la température maximale, car celle-ci n'est pas atteinte au midi solaire mais exactement au midi solaire plus  $\frac{1}{8}$  de  $(\Delta t)$ .

La courbe suivante, représente la variation de la température d'entrée du lever jusqu'au coucher du soleil selon le modèle.

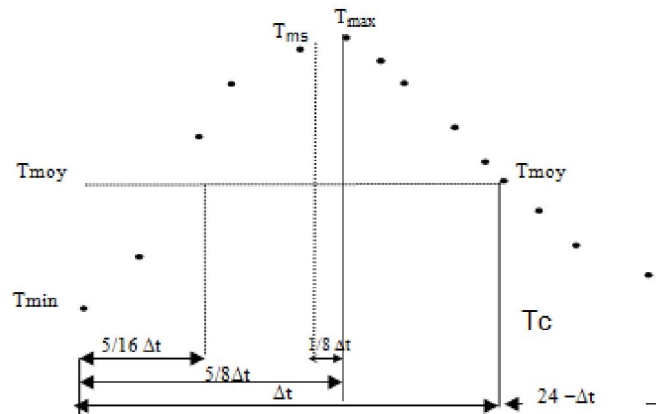


Figure II.3: Variation de la température d'entrée au cours de la journée.

Un paramètre très important, qui est l'influence de la température rayonnante de la voûte céleste (température du ciel) n'a pas été pris en compte dans cette étude. Ceci aurait une influence directe et prépondérante sur la température d'entrée et par conséquent sur la température de sortie. En effet, pour les sites situés en altitudes, les pertes thermiques doivent être prises en considération. L'expression de la température équivalente de l'air ambiant, s'écrit :

$$T_{\text{éq}} = (T_a \cdot h_{cve} + T_{\text{ciel}} \cdot h_{rve}) / h_{ve}$$

Où :

$T_a$  : La température ambiante de l'air.

$h_{cve}$  : Le coefficient de pertes thermiques par convection entre la face avant du capteur et l'extérieur.

$h_{rve}$  : Le coefficient de pertes thermiques par rayonnement entre la face avant du capteur et l'extérieur.

$$h_{ve} = h_{cve} + h_{rve}$$

$$T_{ciel} = \left( T_a^4 - \frac{R}{S} \right)^{0,25}$$

Dans cette dernière expression R est le flux net de rayonnement échangé par le fluide pour les basses longueurs d'ondes, souvent mesuré par les stations météorologiques, et qui dépend sensiblement de l'altitude. Si cette mesure n'est pas disponible la valeur de la température du ciel ( $T_{ciel}$ ) est calculée par la loi de Swinbank :

$$T_{ciel} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$$

### **3. Evaluation de la vitesse de vent**

Au milieu des années 80, les seules mesures des paramètres du vent disponibles en l'Algérie étaient rapportées dans les bulletins météorologiques de l'ONM qui donnent les vitesses et les fréquences moyennes des vents pour les différentes stations météorologiques. En 1990, Hamouche a édité " l'atlas de vent de l'Algérie "donnant les résultats de l'étude statistique de 37 stations en utilisant le logiciel Wasp utilisé pour la cartographie éolienne de l'Europe [2]. Les résultats sont donnés sous forme de tableaux regroupant les paramètres annuels de Weibull à 10, 50 et 100 m d'altitude, les fréquences directionnelles des vitesses pour un pas donné et les vitesses arithmétiques moyennes mensuelles et annuelles. Les résultats de Hammouche ont été utilisés pour établir la première carte du vent de l'Algérie par Kasbadji-Merzouk, [3]. Cette carte a été améliorée par le même auteur en 1999, en portant le nombre de stations à 46 et en utilisant la distribution hybride de Weibull [4]. Enfin un Atlas réalisé à l'aide d'un système d'information géographique a été mis en place en 2006 par le même auteur [6].

En parallèle, le modèle "Aïolis" a été utilisé pour l'établissement des cartes relatives aux microclimats des régions accidentées en Algérie. Les résultats obtenus ont permis de détecter des zones ventées en Algérie, [4,5]. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure II.4 . Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. A l'exception de la région côtière (moins Béjaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s [6].

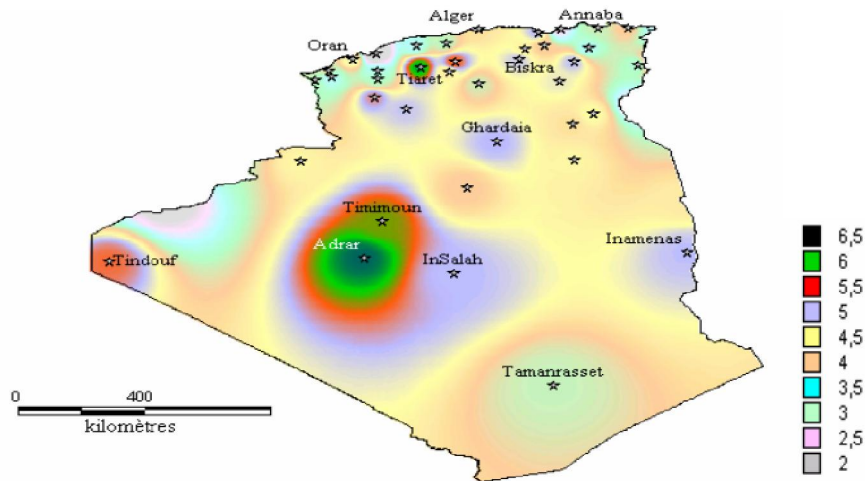


Figure II.4: Atlas - vitesse moyenne du vent de l’Algérie estimée à 10 m du sol. [6]

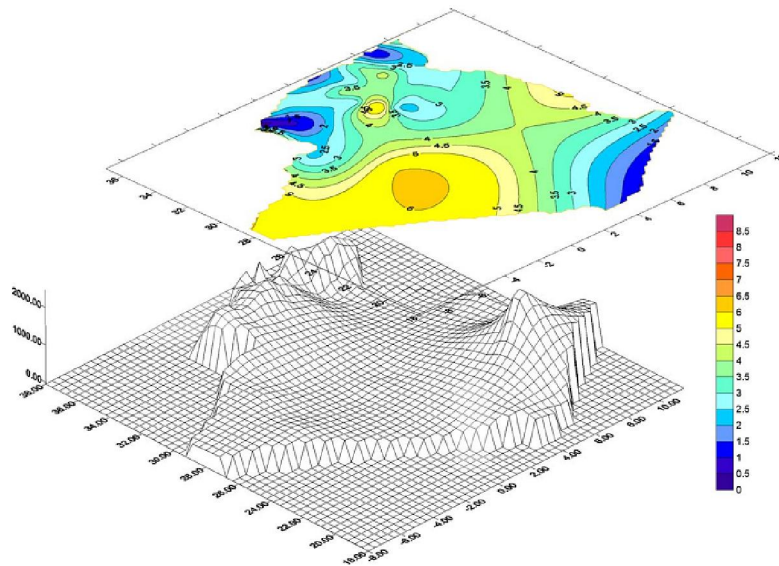


Figure II.5: Carte-vitesse du vent projeté sur la carte topographique de l'Algérie. [7]

Les vitesses moyennes mensuelles et annuelles du vent sont présentées dans le tableau II.1 qui comprend également les coordonnées géographiques et l’élévation au-dessus du niveau de la mer pour chaque site. Ce tableau nous permettra d’avoir une idée de l’évolution de la vitesse du vent en fonction des mois de l’année. Les cartes des vents montrent que les vitesses de vent les plus élevées sont réparties dans le sud tandis que le nord est généralement moins venteux.

	Élévation	Latitude	Longitude	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Yearly
Adrar	280	27.8	-0.2	6.2	6.4	6.5	6.5	6.9	6.1	6.7	6.2	6	5.8	5.9	5.8	6.3
Ain Sefra	1174	32.8	-0.6	4.6	5.1	5.1	5.4	5.2	4.9	4.3	4.2	4.1	4	4.2	4.9	4.7
Algiers	25	36.8	3.1	2.2	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	1.5	1.6	1.4	1.9	2.4	1.9
Annaba	4	36.8	7.8	2.5	2.4	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
Batna	822	35.2	6.3	2.9	3.1	3.6	3.2	2.7	3	3	3.1	3	2.7	2.6	3.3	3
Bechar	881	31.7	-2.3	3.2	3.2	4.1	4.6	5	4	4.1	4	3.7	2.8	2.9	3.1	3.7
Bejaia	2	36.7	5.1	3.7	3.4	2.9	2.8	2.5	2.4	2.4	2.3	2.7	3.2	3.6	4.1	3
Biskra	87	34.8	5.7	3.9	4.3	4.9	5.3	5.1	4.3	3.8	3.7	3.9	3.3	4	4.1	4.2
Bou-saada	461	35.3	4.2	5.5	5.1	6.3	5.1	4.3	3.2	2.5	2.6	2.8	3.1	4.7	5.5	4.2
Chlef	143	36.2	1.3	3.1	3.5	3.3	2.6	3	2.7	2.1	2.4	2.7	2.9	3	3.1	2.9
Constantine	694	36.3	6.6	4	3.3	3.5	2.7	2.5	2.1	1.8	2	2	2.1	2.8	3.4	2.7
Djanet	967	24.3	9.5	3	2.9	3.5	4.1	4	4.2	4.1	4.2	3.5	3.2	2.4	2.4	3.5
Djelfa	1144	34.7	3.2	3.2	5	5.2	5.6	4.7	5.1	4	4.2	4	3.9	3.6	3.5	4.3
El-Golea	397	30.6	2.9	2.8	3.8	4.3	4.2	4.7	3.9	3.3	3.2	3.7	3.5	2.6	3	3.6
Eloued	61	33.5	6.8	2.6	2.7	3.6	4	3.9	3.8	3.5	3.5	3	2.6	2.3	2.6	3.2
Chardaia	450	32.4	3.8	3.5	3.2	4.4	4.5	3.9	3.5	2.9	2.7	3	2.8	2.8	3.5	3.4
Chelma	4	36.5	7.7	2.4	2.3	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
Griss	90	35.2	0.2	2.7	2.3	2.3	2	2.1	1.7	1.5	2	1.9	1.9	2.6	2.7	2.1
H Messaoud	142	31.7	6.2	3.2	3.3	4.1	4.2	4.8	4.1	3.4	3.7	3.9	3.5	2.8	3.1	3.7
H R'mel	774	32.9	3.3	5.7	6.3	7.6	8.1	7.8	6.6	5.3	5.4	5.4	4.8	4.5	5.7	6.1
Illizi	558	26.5	8.4	3.7	3.7	4.1	4.1	4.5	4.9	4.6	4.6	4.3	3.9	3.7	3.4	4.1
Inamenass	562	28	9.6	3.9	4.5	5	5.2	6	5.7	4.6	4.8	4.7	4.4	3.9	3.8	4.7
InSalah	293	27.2	2.5	5.3	4.9	5.5	5.1	5.6	5.3	5.6	5.3	4.9	4.6	4.7	4.3	5.1
Jjel	11	36.8	5.9	2.6	2.9	3.3	2.8	2.1	2.1	2.1	2	2.1	2.2	2.5	3.1	2.5
Laghouat	765	33.8	2.9	3.4	3.4	3.9	4.3	3.8	3.6	3	2.9	2.8	2.6	2.7	3.3	3.3
Oran	90	35.6	-0.6	2.7	2.8	3.2	3	3	2.9	2.6	2.3	2.3	2.1	2.4	2.7	2.7
Ouraglia	142	31.9	5.4	3.1	3.3	4.3	4.2	4.9	4.7	4	4.1	4.3	3.5	2.8	2.8	3.8
Setif	1040	36.2	5.3	3.4	3.8	3.8	3.7	3.3	3.4	3.2	3.3	3.4	3	3.2	3.1	3.4
Tamanrasset	1378	22.8	5.4	3.4	2.9	2.9	2.9	3.1	3.2	3.3	3.2	3	2.9	2.5	2.6	3
Tebessa	811	35.4	8.1	3.2	3.2	3.5	3.1	2.9	2.5	2	2.1	2.3	2.4	2.9	3.3	2.8
Tiaret	989	35.3	1.5	3	4.1	3.8	3.2	3.5	3	2.6	2.8	2.9	2.9	3.6	4	3.3
Timimoun	312	29.2	0.3	5	5.6	5.3	5.9	6.1	4.8	4.9	4.9	4.5	4.1	4.4	4	5
Tindouf	431	27.7	-8.1	4.6	5.4	5.3	7	7.3	7.3	5.6	6.2	6.7	4.7	4.3	4	5.7
Tlemcen	247	35	-1.5	3.7	3.2	3.3	2.3	2.1	1.8	1.5	1.6	1.4	2.4	3.1	3.9	2.5
Touggourt	85	33.1	6.1	2.9	3.1	3.9	4.1	4.2	3.7	3.4	3.7	3.2	2.9	2.5	2.9	3.4

Tableau II.1: Vitesses moyennes mensuelles et annuelles sites en Algérie. [7]

Les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en sur la figure II.6 (Eté et Printemps) et 6 (Hiver et Automne). Les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année. [8]

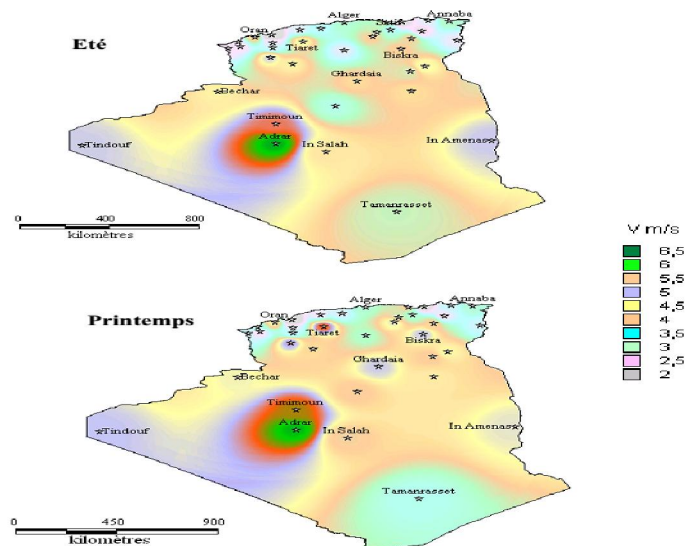
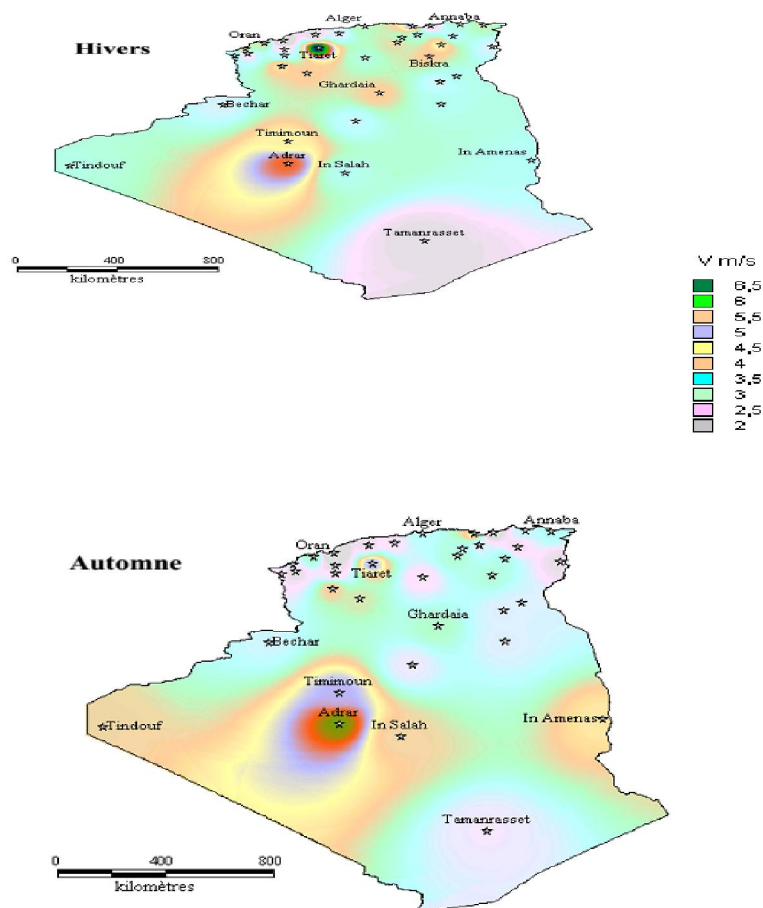


Figure II.6: Atlas vent- vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (Eté et Printemps).





**Figure II.7:** Atlas- vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne)[6]

Tous les atlas établis présentent la région sud ouest, à savoir Adrar, Timimoun et In Salah comme la zone les plus ventée, à l'exception de l'atlas hivernal qui se distingue par le microclimat de Tiaret qui présente les vitesses de vent les plus élevées. [6]

#### **4. Evaluation de la vitesse de vent par des modèles**

Dans la couche limite atmosphérique (CLA), la proximité du sol engendre des forces de frottement qui occasionnent une régression de l'intensité des vents, au fur et à mesure qu'on se rapproche du sol. Un changement continu de direction accompagne cette diminution d'amplitude selon la spirale d'Ekman quand l'altitude et l'intensité du vent diminuent, celui-ci tourne vers la gauche dans l'hémisphère Nord, droite dans le Sud. Cette rotation a lieu dans la couche de mélange (couche d'Ekman), au-dessus de la Couche Limite de Surface (CLS). Dans le cas d'une atmosphère neutre, (gradient vertical de température) on peut considérer que dans la Couche Limite de Surface

CLS, le vent horizontal garde une direction constante et son module varie selon un profil logarithmique [9] :

$$v(z) = V \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Où  $V$  désigne la valeur de la vitesse du vent horizontal,  $z$  l'altitude et  $z_0$  la longueur de rugosité qui caractérise le type de surface du sol.

A partir de cette équation on déduit également le rapport entre la vitesse du vent à deux hauteurs différentes :

$$v(z_2) = v(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}$$

Cette relation utile dans le cadre de l'étude de la ressource éolienne (nécessité de déduire d'une vitesse mesurée à 10 m de haut, la vitesse au niveau du moyeu, à une hauteur d'environ 50 m).

### **5. Evaluation de l'Irradiation solaire [26]**

Le rayonnement solaire dépend de nombreux paramètres en un lieu donné dont :

- La latitude du site.
- La saison : déclinaison solaire.
- L'heure de la journée : hauteur du soleil.
- Les conditions météo et atmosphériques (nébulosité, pollution, nuages, pluies...).

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [10].

#### **5.1. Variation théorique du rayonnement incident**

Dans la pratique on admet une variation sinusoïdale de l'éclairement global.

Si  $G_{max}$  : désigne l'éclairement énergétique maximum à midi solaire sur un plan horizontal.

$\Delta t$  : La durée du jour entre le lever et le coucher du soleil.

Le rayonnement instantané a comme expression :

$$G(t) = G_{max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Tel que :  $\omega = \frac{2\pi}{T}$       **ou**       $T = 2\Delta t$

L'énergie globale reçue du lever jusqu'au coucher du soleil s'écrit :

$$W = \int_{t_l}^{t_c} G(t) \cdot dt = G_{max} \int_{-\frac{\Delta t}{2}}^{\frac{\Delta t}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{\Delta t} \cdot t\right) dt$$

$$W = \frac{\Delta t}{\pi} \cdot G_{max} \int_{-\frac{\Delta t}{2}}^{\frac{\Delta t}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{\Delta t} \cdot t\right) d\left(\frac{\pi}{\Delta t} \cdot t\right)$$

$$W = G_{max} \frac{\Delta t}{\pi} \cdot \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$W = 2G_{max} \cdot \frac{\Delta t}{\pi} \quad \text{ou} \quad G_{max} = \frac{\pi \cdot W}{2 \cdot \Delta t}$$

Enfin  $G(t)$  prend l'expression suivante :

$$G(t) = \frac{\pi \cdot W}{2 \cdot \Delta t} \cos\left(\frac{\pi}{\Delta t} t\right)$$

$W = G^*$ : représente l'apport en ensoleillement par beaux jours. Pour les journées non ensoleillées, on remplace  $W$  par  $G_m$ .

$G_m$ : représente l'apport en ensoleillement par ciel couvert qui se calcule de la façon suivante :

$$G = (1 - \sigma) \cdot G_m + \sigma \cdot G^*$$

$$G_m = \frac{(G - S \cdot G^*)}{(1 - S)}$$

$\sigma$ : est la fraction d'insolation définie comme suit :

$$\sigma = \frac{S}{\Delta t}$$

$S$ : La durée d'insolation quotidienne.

A titre d'exemple pour la ville d'Alger, au mois de Mai la durée du jour  $\Delta t = 13,95$  heures et la durée moyenne d'ensoleillement  $S = 9,9$  heures. La fraction d'insolation pour le mois de Mai à Alger est donc :  $\sigma = \frac{9,9}{13,95} = 0,71$  ( $\sigma = 71\%$ ). On appelle jour clair, un jour pour lequel  $\sigma$  est aux alentours de 0,8.

$G$ : est le rayonnement solaire global en  $[W/m^2]$ .

$G_m$  : Représente la moyenne des jours par ciel couvert.

### **6. Evaluation du rayonnement incident par les modèles**

Les processus affectant les rayons solaires sont trop complexes. D'une façon générale les radiations solaires arrivant au sommet de l'atmosphère se répartissent deux parties : La première partie est directement réfléchiée vers l'espace avant de s'enfoncer dans l'atmosphère. La deuxième en pénétrant dans l'atmosphère subit des réflexions et des diffractions pour être à son tour, soit renvoyée vers l'espace, soit dirigée vers la terre.

La vapeur d'eau et de multiple gaz absorbent de façon très irrégulière certaines radiations caractérisées par leurs longueurs d'onde. Les radiations absorbées par les composantes de l'atmosphère sont ensuite émises dans toutes les directions, il en résulte que parmi les radiations solaires arrivant finalement à la terre, quelques-unes sont fournies par les nuages et les autres composantes de l'atmosphère. Une fois ces radiations arrivées au sol, une fraction est réfléchiée directement vers le ciel, l'autre sera gagnée par la terre. En conclusion un capteur solaire reçoit l'énergie et du soleil et de l'atmosphère, pour simplifier ces multiples réflexions et émissions, on subdivise le rayonnement solaire provenant au sol en rayonnement direct et rayonnement diffus, l'ensemble forme le rayonnement global.

Les mesures du flux solaire moyen effectuées par la NASA à bord des satellites avancent une valeur moyenne de  $1353 W/m^2$ . Certains ouvrages avancent la valeur de  $1390 W/m^2$  et d'autres  $1367 W/m^2$ . [1]

Les mesures par satellite ont permis d'établir une formule empirique, d'une précision acceptable, donnant la constante solaire  $I$  en fonction du jour  $j$  de l'année :

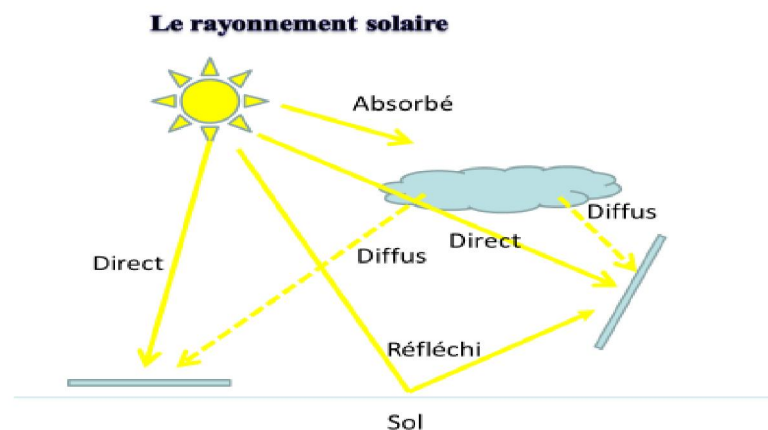
$$I = 1353. (1 + 0.033. \cos (0,984. J))$$

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit  $169.000$  (TWh/an) pour le solaire thermique,  $13,9$  (TWh/an) pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est

l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l'ensoleillement reçu annuellement. [11].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700(\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an})$  au Nord et  $2263 (\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an})$  au Sud du pays.

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien [10]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre. La durée d'insolation au Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an [11].

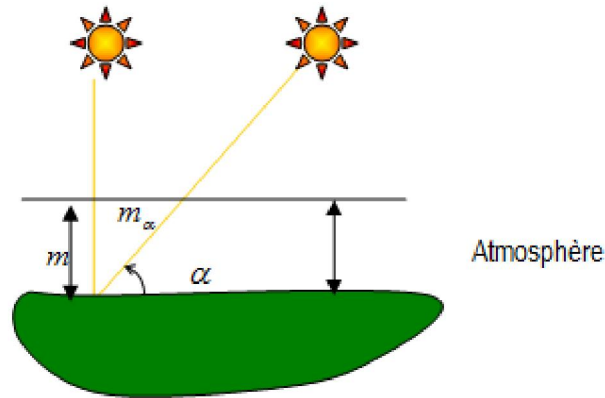


**Figure II.8:** Composantes du rayonnement solaire.

### 6.1. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

**Notion de la Masse atmosphérique :** Avant d'atteindre le sol le rayonnement solaire traverse une masse atmosphérique. Cette masse est constituée d'air, de vapeur d'eau,

de gaz carbonique et d'autres aérosols. Son épaisseur est évaluée à 8 Km. Lorsque le soleil est non vertical par rapport à une région, l'épaisseur de la masse atmosphérique devient plus grande, et ainsi le rayonnement s'affaiblit encore plus.



**Figure II.9:**Influence de la courbure du globe sur le trajet parcouru par les RS.

Où  $m$  est la masse atmosphérique lorsque l'incidence est normale à la terre. Elle varie quand l'incidence fait un angle  $\alpha$  avec l'horizon. :

$$\frac{m}{m_{\alpha}} = \sin \alpha \Rightarrow m_{\alpha} = \frac{m}{\sin \alpha}$$

Les estimations des différentes masses atmosphériques  $m_{\alpha}$  sont rapportées à la masse ( $m$ ) qui prend arbitrairement la valeur ( $m=1$ ) pour un trajet normale au sol sous une pression d'un bar au niveau de la mer. Si par exemple ( $\alpha$ ) est de  $30^{\circ}$  alors la masse atmosphérique  $m_{\alpha}$  sera double du cas où le soleil est normal à la surface considérée et ainsi le rayonnement qui atteint le sol la moitié de sa valeur.

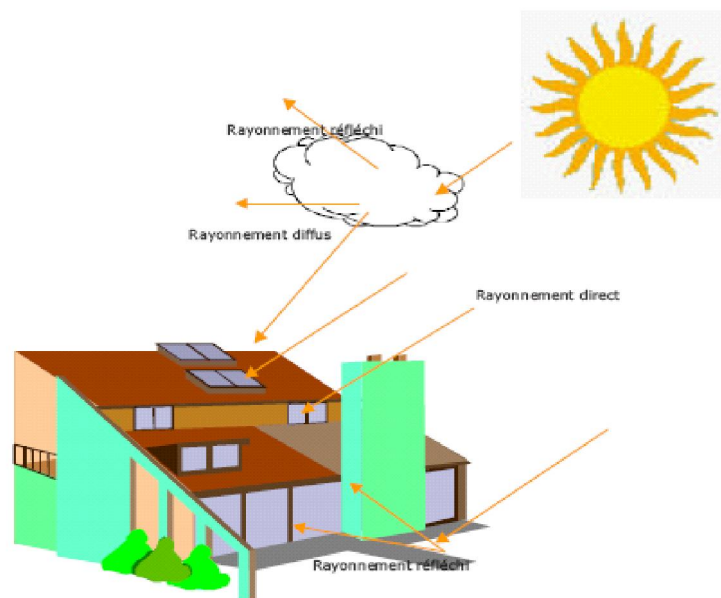
## 6.2. Absorption par les gaz atmosphériques

Le principal constituant de l'atmosphère est l'azote moléculaire  $N_2$  très stable chimiquement ce qui explique son abondance. L'oxygène est le second constituant mais le plus important pour la vie, son origine est la photosynthèse liée à l'énergie solaire. L'absorption par les gaz atmosphériques (Ozone, gaz carbonique, vapeur d'eau...) est assimilée à une épaisseur d'eau condensable présentant les mêmes caractéristiques d'absorption représentée par le coefficient ( $W$ ), qui varie selon les saisons : En hiver,  $W=1$  cm, en été,  $W=2$  cm

Pour une grande période quelconque de l'année, ce coefficient est pris égal à la moyenne pondérée des deux cas précédent. Quant à la diffusion moléculaire, elle fait intervenir le trajet optique, caractérisé par ( $m_\alpha$ ).

**Rayonnement solaire au sol :** L'atmosphère ne transmet pas la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- **Le rayonnement direct :** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- **Le rayonnement diffus :** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- **Le rayonnement global :** est la somme du rayonnement direct et diffus.



**Figure II.10:** Rayonnement solaire arrivant sur une surface réceptrice.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par ( $I$ ).

- ✓ **Rayonnement direct :** On peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation

$$I^* = 1370. \exp \left[ - \frac{TL}{0,9 + 9,4. \sin(h)} \right]$$

Où TL est le facteur de trouble de Linke :

$$TL = 2,4 + 14,6\beta + 0,4(1 + 2\beta) \ln(p_v)$$

$\beta$ : Le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égale à :

$\beta = 0,05$  en zone rurale.

$\beta = 01$  en zone urbaine.

$\beta = 0,2$  en zone industrielle ou polluée.

$p_v$  : est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mm Hg.

- ✓ **Rayonnement diffus** : L'éclairement solaire diffus D sur un plan horizontal peut être déterminé comme suit :

$$D^* = 548\sqrt{\sin h} [TL - 0.5 - \sqrt{\sin h}]$$

### 7. Autres modèles pour calculer le rayonnement solaire [26]

La composante directe du rayonnement solaire est donnée par les expressions empiriques suivantes :

- a) conditions normales par ciel clair :

$$I = 1230. \exp \left[ \frac{-1}{3,8. \sin(h + 1,6)} \right]$$

- b) pour un ciel très clair :

$$I = 1210. \exp \left[ \frac{-1}{6. \sin(h + 1)} \right]$$

- c) pour un ciel pollué : zone industrielle.

$$I = 1260. \exp \left[ \frac{-1}{2,3. \sin(h + 3)} \right]$$

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Les expressions empiriques permettant d'estimer la composante du rayonnement solaire diffus sont ci- dessous :



**a) Part du ciel**

- Part du ciel sur une surface horizontale :
  - Par ciel clair :  $D_{c,h} = 125. (\sin(h))^{0,4}$
  - Par ciel très clair, on multiplie cette dernière expression par 3/4, si le ciel est couvert, on la multiplie par 4/3.
- Part du ciel sur une surface d'inclinaison quelconque :

$$D_c(i) = D_{c,h} \cdot \frac{1 + \cos(i)}{2}$$

**b) Part du sol**

$$D_s(i) = alb. \left( \frac{1 - \cos(i)}{2} \right) \cdot G_h$$

Où :

$$G_h = I_h + D_h = I_{dir} \cdot \sin(h) + D_h$$

(*alb*) : Est l'albédo ou coefficient de réflexion qui dépend de la nature du sol.

Les modèles permettant d'évaluer le rayonnement solaire sont très nombreux. Citons à titre d'exemple :

▪ **Modèles de F. Chabane**

Le modèle établi est basé sur des régressions non linéaires en fonction de la hauteur du soleil et de l'humidité relative écrites en fonction de l'irradiation globale pour plusieurs jours de tests pour un plan incliné (45°) d'orientation sud:

$$G_{proposé} = 696,42 \cdot \left( \frac{h}{1,124} \right)^{1,124} + 1,751 \cdot \left( \frac{H_r}{1,24} \right)^{1,24} \quad R^2 = 0,837$$

▪ **Relation d'A.A.M. Sayigh**

Le modèle de Sayigh et al relatifs à plusieurs sites indiens, où la latitude est comprise entre 8°Nord et 28.6°Nord et la longitude comprise entre 72°Est et 88°Est. Cette relation tient compte des paramètres géographiques, météorologiques, calculée sur un plan horizontal :

$$G_H = 11,6 \text{ KN} \exp\left(\varphi \left(\frac{DI}{T_m}\right) - \left(\frac{H_r}{15}\right) - \left(\frac{1}{T_{max}}\right)\right)$$

$$N = 1,7 - 0,458\varphi$$

$\varphi$  : étant la latitude du site exprimée en radians.

▪ **Relation de Reddy**

Cette relation a été aussi établie pour plusieurs sites indiens. Les mêmes paramètres utilisés dans le modèle de Sayighet al ont été reconduits dans ce modèle, mais, en plus Reddy a tenu compte du nombre de jours pluvieux dans le mois. Ainsi le modèle proposé est décrit par la relation suivante :

$$G_h = K \left[ 1 + 0,8 \left( \frac{DI}{T_m} \right) \right] \frac{(1 - 0,2t)}{\sqrt{H_r}}$$

$$K = 100(nt + \Psi_{ij} \cos(\varphi))$$

Avec :

$$n = \frac{1}{(1 + 0,1\varphi)}$$

▪ **Relation de Swartman**

De même, moyennant les données relatives de 14 stations indiennes, deux relations ont été établies par Swartman. Ces relations permettent d'estimer l'irradiation globale sur un plan horizontal à partir de la durée d'insolation et de l'humidité relative.

$$G_{h1} = 11,6.490 \left( \frac{DI}{12} \right) (0,35H_r)^{-0,262}$$

$$G_{h2} = 11,6.490. \exp \left[ 0,607 \left( \frac{DI}{12} - H_r \right) \right]$$

▪ **Relation de Garg et al**

A partir de la courbe de saturation de l'air, Garg et al moyennant la méthode des moindres carrés, ont développé une relation multilinéaire reliant l'humidité absolue  $H_a$  à l'humidité relative  $H_r$ , à la température ambiante  $T_a$ . A partir de cette corrélation et de la fraction d'insolation définie par le rapport :

Durée d'insolation  $DI$  à la durée astronomique du jour  $T_m$  et à partir de l'irradiation extraterrestre  $G_{h0}$  calculée sur un plan horizontal, Garg et al ont développé la relation suivante:

$$G_h = G_{h0} \left( 0.14 - 0.4 \left( \frac{DI}{T_m} \right) - 0.0055 H_a \right)$$

$$H_a = H_r (4,7923 + 0,3647 T_a + 0,0055 T_a^2 + 0,0003 T_a^3)$$

Dans ces relations  $G_h$  est exprimé en Wh/m<sup>2</sup>.

▪ **Relations de Sabbagh et al**

En se basant sur des données relatives à plusieurs pays du Golf en particulier, les sites d'Arabie Saoudite, Sabbagh et al ont développé deux relations empiriques liant les différents paramètres météorologiques qui affectent l'atténuation du rayonnement solaire, à savoir: la température maximale  $T_{max}$ , l'altitude  $Z$ , la situation géographique (longitude  $L$ , latitude  $\varphi$  et sa situation par rapport à la mer et un lac d'eau caractérisé par le facteur de zone caractéristique, qui sont données par les relations suivantes:

$$G_h = 18,1.K.exp \left[ \varphi \left( \frac{DI}{12} \right) - \left( \frac{H_r}{100} \right)^{1/3} - \left( \frac{1}{T_{max}} \right) \right]$$

$$G_h = 18,4(419,391.DI - 292,73H_r + 330,571)$$

▪ **Relation de Hussain et al**

Le modèle de Hussain est basé sur le modèle de Garg et al. Ainsi, cette expression permet d'estimer l'irradiation globale en fonction des moyennes mensuelles par jour de l'humidité absolue et de la durée d'insolation. Cette expression est donnée comme suit:

$$G_h = G_{h0} \left[ 0,394 + 0,364 \left( \frac{DI}{T_m} \right) - 0,0035 H_a \right]$$

▪ **Modèle de W.E. Alnaser**

Pour la reconstitution de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale sur un plan horizontal, Alnaser a développé un nouveau modèle pour Bahrayn. Dans ce modèle, il utilise six paramètres (astronomiques et météorologiques). Ainsi il a essayé de mettre en évidence l'effet du choix du nombre de paramètres sur la précision de ce modèle. Ainsi, il propose:

$$G_h = 1066,167 + 0,5133G_{h0} - 8,924H_r + 2647,32 \frac{DI}{T_m} - 34,604T_a + 31,202T_{sol}$$

▪ **Modèle de Liu & Jordan**

Une première relation a été établie par Liu & Jordan qui exprime la fraction de l'irradiation diffuse par rapport à l'irradiation globale  $K_D$  en fonction de l'indice de clarté. Les données utilisées sont relatives au site de Blue Hill Massachusetts (USA), cette corrélation est donnée comme suit:

$$K_D = 1,39 - 4,027K_T + 5,531K_T^2 - 3,108K_T^3$$

Pour  $0,30 < K_T < 0,70$

▪ **Modèle de Collares-Pereira et al**

Collares-Pereira et Rabl, moyennant les données relatives de cinq sites aux Etats-Unis, a proposé une corrélation polynomiale d'ordre 4, donnée comme suit:

$$K_D = 1,188 - 2,272K_T + 9,473K_T^2 - 21,856K_T^3 + 14,648K_T^4$$

Pour  $0,17 < K_T \leq 0,80$

Pour  $K_T \leq 0,17$  et  $K_D = 0,99$

Une autre relation a été développée par Collares-Pereira & Rabl qui dépendra, cette fois-ci, de l'angle horaire du lever du soleil  $\omega_s$ , paramètre caractérisant la saison considérée. Cette relation est donnée comme suit:

$$K_T = 0,775 + 0,347 \left( \frac{\pi}{180} \right) (\omega_s - 90) - \left[ 0,505 + 0,261 \left( \frac{\pi}{180} \right) (\omega_s - 90) \right] \cos[2(K_T - 0,90)]$$

$\omega_s$  : L'angle horaire du lever du soleil en degrés.

$\omega_s \approx 90^\circ$  pour les mois de Février, Mars, Avril, Août, Septembre et Octobre.

$\omega_s \approx 100^\circ$  pour les mois de Mai, Juin et Juillet.

$\omega_s \approx 80^\circ$  pour les mois de Novembre, Décembre et Janvier.

▪ **Relation d'Erbs, Klein et Duffie**

Erbs et al ont utilisé des mesures à l'échelle horaire établis sur quatre stations américaines, des irradiations globale et diffuse pour développer un modèle dépendant de la saison reliant les deux grandeurs indiquées. Ainsi ils proposèrent les relations suivantes :

Pour :  $\omega_s \leq 80^\circ$  et  $0,30 \leq K_T \leq 0,80$

$$K_D = 1,391 - 3,560K_T + 4,189K_T^2 - 2,137K_T^3$$

Pour :  $\omega_s > 80^\circ$  et  $0,30 \leq K_T \leq 0,80$

$$K_D = 1,311 - 3,022K_T + 3,427K_T^2 - 1,821K_T^3$$

▪ **Relation d'Iqbal**

Iqbala utilisé des données relatives à différents sites canadiens, et établit une relation linéaire donnée pour :  $0,30 \leq K_T \leq 0,60$

$$K_D = 0,958 - 0,982K_T$$

▪ **Relation de Hussain**

Pour l'irradiation diffuse, Hussein a proposé un même type de relation que celle établie pour l'estimation de l'irradiation globale. Cette relation est fonction de la durée d'insolation, de la température ambiante, de l'humidité et de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontale. Elle est donnée par :

$$D_h = G_{h0} \left[ 0,306 - 0,165 \left( \frac{DI}{T_m} \right) - 0,0025H_a \right]$$

▪ **Modèle de Lacis & Hansen**

La formule générale proposée par Lacis & Hansen pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal est donnée par l'équation :

$$G = I_{SC} \cdot \cos \theta_z \left[ \frac{(0,647 - \rho_s - \alpha_0)}{(1 - 0,0685\rho)} + 0,353\alpha_\omega \right]$$

$I_{SC}$  : est la constante solaire extraterrestre calculée par:

$$I_{SC} = I_0 \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{360}{365} (n_j - 3) \right) \right]$$

Avec  $I_0$ : la constante solaire moyenne égale à  $1367 \text{ W/m}^2$

$n_j$ : Le numéro de jour dans l'année ( $n_j = 1$  pour le 1er Janvier et  $n_j = 365$  pour le 31 Décembre).

$\theta_z$  : est l'angle zénithal.

$\theta_z = 90^\circ - h$  où  $h$  est la hauteur du soleil.

Le coefficient  $\alpha_0$  correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, est calculé par la relation :

$$\alpha_0 = \frac{0,02118U_0}{1 + 0,0042U_0 + 3,0310^{-4}U_0^2} + \frac{1,082U_0}{(1 + 138,64U_0)^{0,805}} + \frac{0,0658U_0}{1 + (103,6U_0)^3}$$

Où,  $U_0$  l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par:  $U_0 = l \cdot m_r$

Où,  $m_r$  est la masse d'air optique relative donnée l'équation :

$$m_r = (\cos \theta_z + 0,15(93,885 - \theta_z)^{-1,253})^{-1}$$

$L$ : représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm).

$$L = \frac{235 + [150 + 40 \sin(0,9856(n_j - 30)) + 20 \sin(3l(\sin^2(1,28\varphi)))]}{1000}$$

$l, \varphi$  : Sont respectivement la longitude et la latitude du lieu.

$\alpha_w$  : Le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau, est donné par l'équation :

$$\alpha_w = \frac{209X_w}{(1 + 141,5X_w)^{0,635} + 5,925X_w}$$

$X_w$  : est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche, donnée par :

$$X_w = m_a \cdot U_w$$

$U_W$  : est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm). Elle est donnée par l'équation :

$$U_W = \frac{0,493}{T} H_r \cdot \exp\left(26,23 - \frac{5416}{T}\right)$$

Avec,  $m_a$  la masse d'air corrigée exprimée par:

$$m_a = m_r \left(\frac{P}{1013}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{P}{273}\right)^{0,5}$$
$$P = P_0 \cdot \exp(-0,0001184 \cdot Z)$$

P est la pression atmosphérique (mbar). Elle peut être calculée à partir de Site (m), par rapport au niveau de la mer.

▪ **Modèle M. Capderou**

Le modèle Capderou utilise le coefficient de trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs des troubles. A partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directe et diffuse par ciel clair.

• **Eclairement reçu sur un plan horizontal par ciel clair :**

La connaissance du facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement direct traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2$$

$T_0$ : est le facteur de trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau.

Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin(\varphi) + 0,1(2 + \sin(\varphi))A_{he} - 0,2Z - (1,22 + 0,144A_{he})(1 - \sin(h))$$

$$A_{he} = \sin \left[ \left( \frac{360}{365} \right) (j - 121) \right]$$

Où

$Z$  : est l'altitude du lieu

$T_1$  : est le coefficient de trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$  et  $O_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par :

$$T_1 = 0,89^Z$$

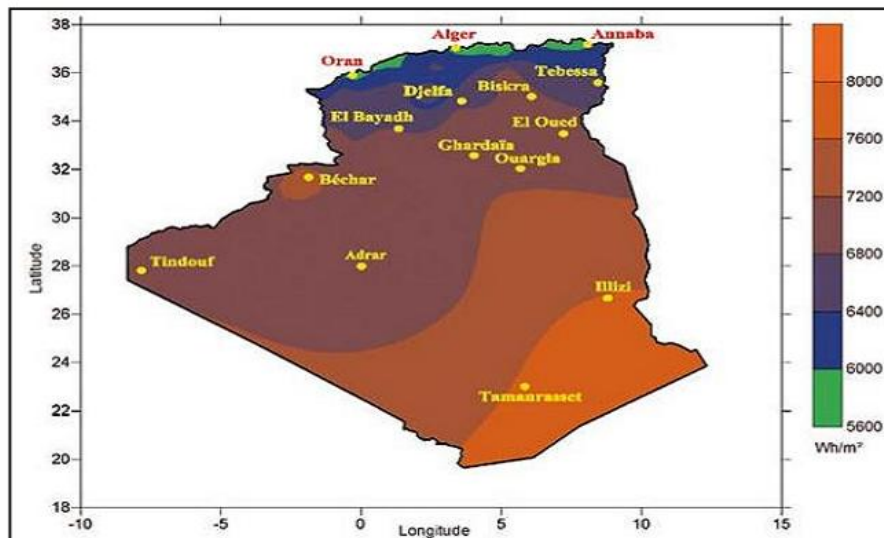
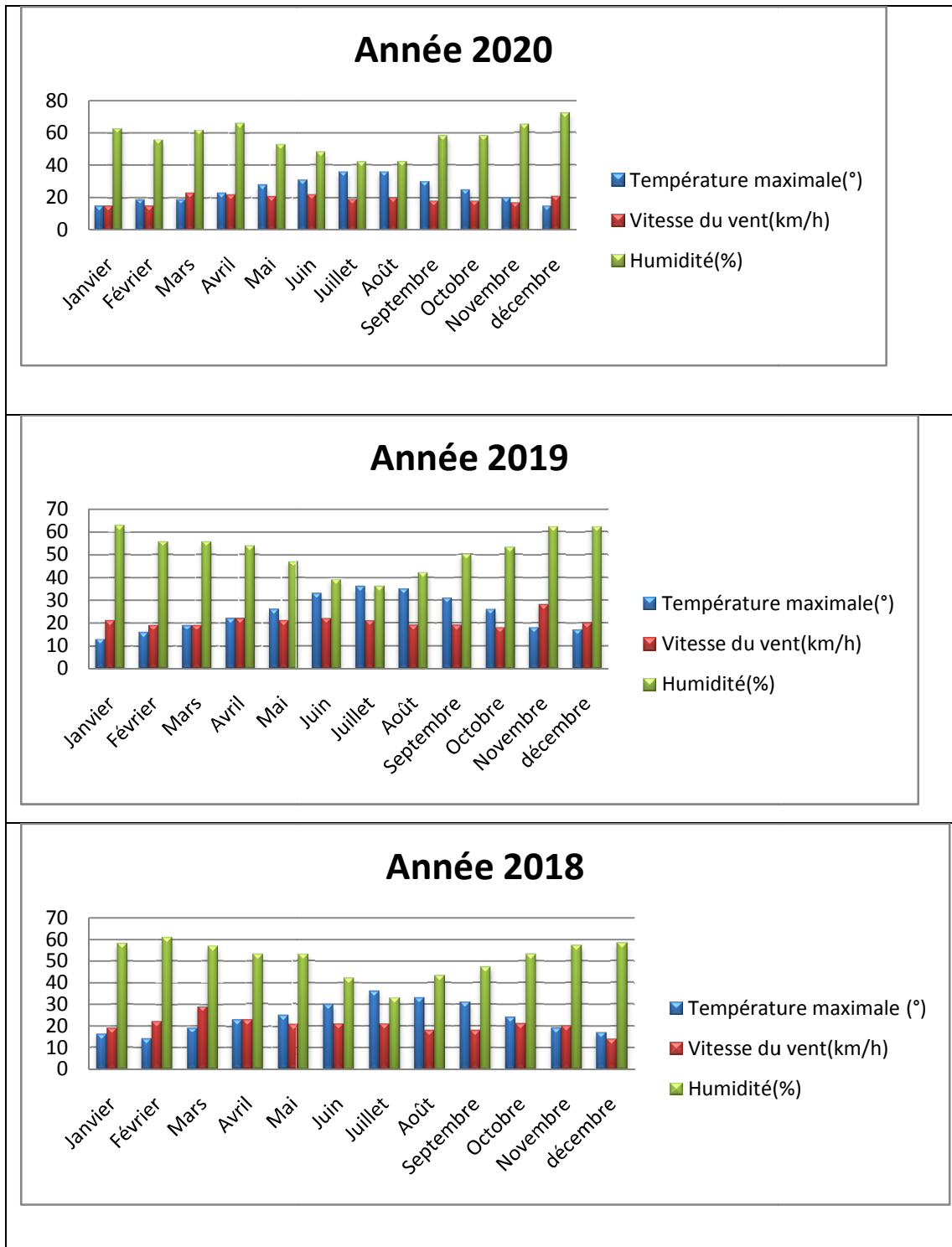


Figure II.11: Irradiation globale inclinée à la latitude du lieu. [12]



Exemples d'histogramme permettant l'évaluation de la température, la vitesse du vent et de l'humidité :

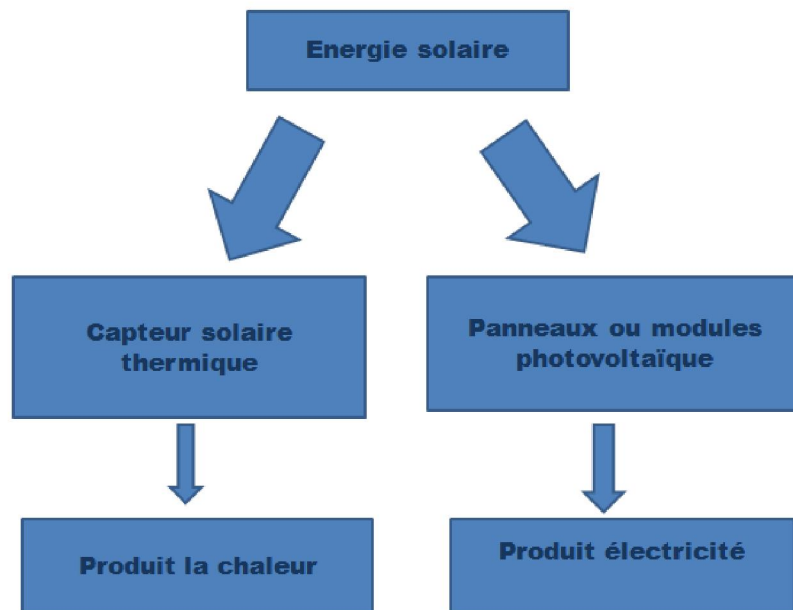


## II.2. Phase II : Systèmes de conversion

L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou électricité grâce à des capteurs adaptés. Comparée aux autres formes d'énergies classiques existantes, l'énergie solaire possède les avantages suivants :

- Après les coûts initiaux de l'installation, l'énergie solaire est pratiquement gratuite.
- L'utilisation de l'énergie solaire remplace l'énergie fossile non propre.
- L'utilisation de l'énergie solaire permet de diminuer les émissions des gaz à effet de serre.

**1. Conversion de l'énergie solaire :** Les technologies permettant de convertir l'énergie solaire sont de deux formes : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité.



Les systèmes solaires thermiques peuvent être classés selon la température fournie :

### Basse et moyenne température ( $\leq 100^{\circ}\text{C}$ )

- ❖ Chauffage central.
- ❖ Eau chaude sanitaire.

- ❖ Réfrigération.
- ❖ Dessalement de l'eau de mer.
- ❖ Séchage des fruits, des légumes, ....etc.

### **Haute température (>100°C)**

- ❖ Procédés thermiques, Stérilisation.

**2. Classement des capteurs solaires :** Les capteurs sont classés en deux catégories :

#### **2.1. Capteurs solaires thermique à basse température**

- ✓ Capteurs plans de types vitrés.
- ✓ Capteurs plans sans vitrage.
- ✓ Capteurs à plaque perforée sans vitrage.
- ✓ Capteurs solaires à passage retour.
- ✓ Capteurs solaires à air.
- ✓ Capteurs sous vide.

#### **2.2. Capteurs solaires à haute température**

- ✓ Capteurs solaires intégrés.
- ✓ Cuisinières solaires.
- ✓ Capteurs solaires à circulation de liquide.
- ✓ Systèmes à réflecteur parabolique.
- ✓ Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique.
- ✓ Systèmes de centrale à tour.
- ✓ Capteurs solaires fixes à concentration.

### **3. Les capteurs solaires thermiques**

#### **3.1. Principe de fonctionnement des capteurs solaires thermiques**

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). Le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie thermique est basé sur la paroi absorbante qui s'échauffe sous l'effet du rayonnement solaire incident, et l'effet de serre et la transfère directement par l'intermédiaire d'un fluide

qui circule sous cette paroi et récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ( $T_{sf} - T_{ef}$ ).

Les capteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau domestique, chauffage domestique, et produire de la chaleur [13-14].

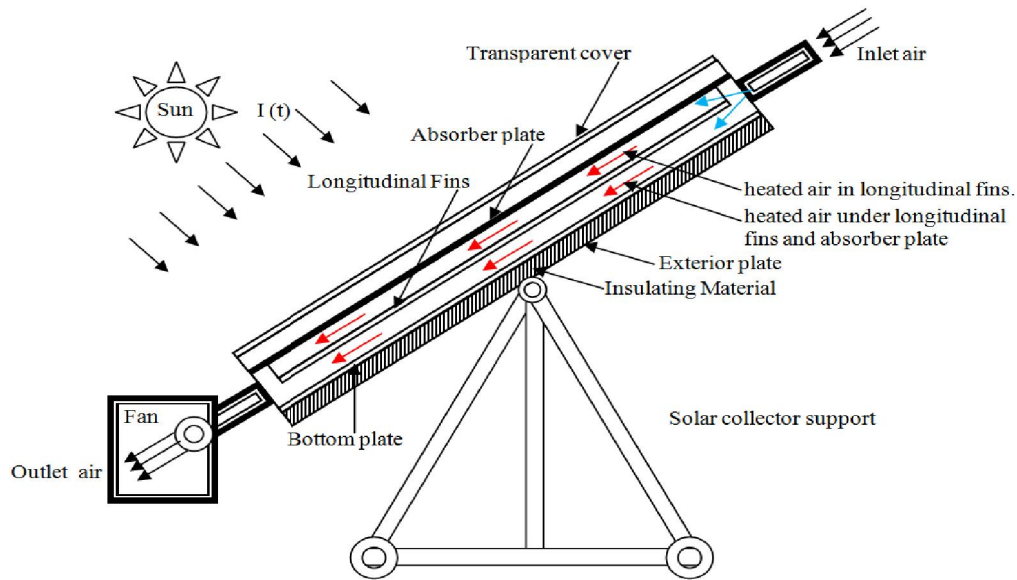


Figure II.12 : Principaux constituants d'un capteur solaire.

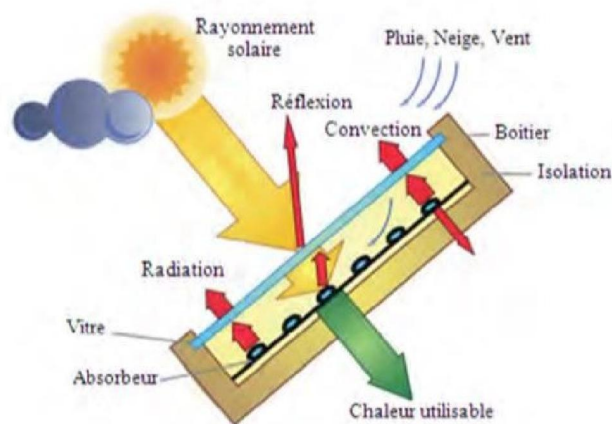


Figure II.13: principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.

### 3.2. Classification des capteurs solaires thermiques

On peut classer les capteurs selon [15]:

- **Le fluide de travail utilisé :** On peut trouver :
  - Des capteurs solaires à air.
  - Des capteurs solaires à eau.
- **L'orientation des capteurs :** Les capteurs peuvent être :
  - Des capteurs fixes.
  - Des capteurs à poursuite.
- **Les types des composants :**
  - **La couverture :** Elle peut exister ou pas, on peut alors trouver :

**\*Les capteurs solaires plans non vitrés :** Ils sont constitués d'un réseau de tubes peints en noir en plastique résistant aux rayons U.V sans couverture transparente. Ils sont essentiellement utilisés pour le chauffage de l'eau des piscines extérieures en été et assurent des températures relativement basses de l'ordre de 30 à 35°C.

**\* Les capteurs solaires plans vitrés :** Le vitrage crée un effet de serre qui permet d'atteindre des températures de 70°C à 90°C et augmente ainsi le rendement. Le capteur solaire peut avoir une ou plusieurs couvertures transparentes.

- **L'absorbeur :** L'absorbeur peut être classé suivant sa forme. On trouve :
  - ✓ Les capteurs plans.
  - ✓ Les capteurs à cavités.

- **La température :** On peut classer le capteur solaire selon la température ; les capteurs à faible température, moyen température, haut température [16-17].

Suivant ce classement il existe essentiellement trois types de capteurs solaires thermiques :

- ✓ Capteur plan.
- ✓ Capteur à tube sous vide.
- ✓ Capteur à concentration.


	Type de capteur		Rapport de concentration pour rayonnement direct	Intervalle Température T(K)
	Nom	Diagramme schématique		
Stationnaire	Capteur à absorbeur plat		$C \leq 1$	$300 < T > 350$
	Tube sous vide		$C \leq 1$	$300 < T > 460$
Un axe	Réflecteur parabolique composé		$1 < C \leq 1$	$340 < T > 510$
			$5 < C \leq 15$	$340 < T > 560$
	Réflecteur Parabolique		$15 < C \leq 40$	$340 < T > 560$
	Réflecteur Fresnel		$10 < C > 40$	$340 < T > 540$
	Réflecteur cylindro-Parabolique		$10 < C > 50$	$340 < T > 540$
Deux axes	Réflecteur disque parabolique		$100 < C > 1000$	$340 < T > 1200$
	Réflecteur sphérique		$100 < C > 300$	$340 < T > 1000$
	Champs d'Héliostat		$100 < C > 1500$	$340 < T > 3000$

Tableau II.2 : Classification des capteurs solaires. [19]

#### 4. Capteur solaire plan

Le capteur solaire plan combine deux principes physiques, les effets de serre et du corps noir. Un Capteur solaire à plaque plane est constitué d'un boîtier en métal ou en fibre de verre boîte isotherme contenant une plaque : absorbeur de couleur foncée, couvert d'un ou plusieurs vitrages. Il est peint avec des revêtements de surface sélectifs spéciaux afin d'absorber et transférer la chaleur mieux. Le vitrage recouvert réduit la convection et les pertes de chaleur du rayonnement vers l'environnement [16-19].

La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [20]:

- Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.
- Activer la croissance des végétaux.
- Sécher les grains et les fourrages.
- Faire fonctionner des moteurs thermiques.
- Alimenter des machines de réfrigération.

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [20].

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur à la périphérie du capteur [21-22].

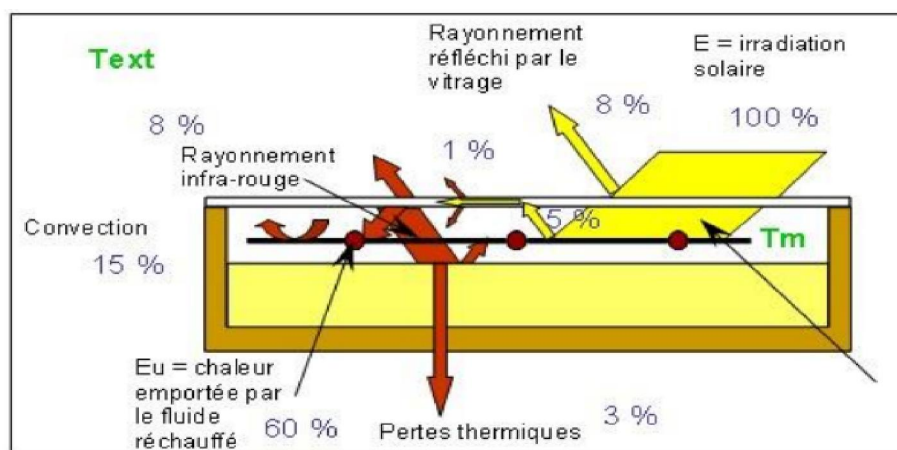


Figure II.14:Schéma des pertes de chaleur dans un CS. [23]

#### 4.1. Capteur solaire plan vitré



Figure II.15: Les principaux éléments constituant un capteur solaire plan vitré.

#### 4.2. Capteur solaire plan non vitré



Figure II.16: Photo d'un capteur sans vitrage.

#### 4.3. Les capteurs solaires sous vide [18]

L'utilisation de ce type est très favorable dans le cas où la température de fonctionnement requise est très élevée ( $>100^{\circ}\text{C}$ ), ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne). On distingue deux types :



## 1. Tubes sous vide à flux direct

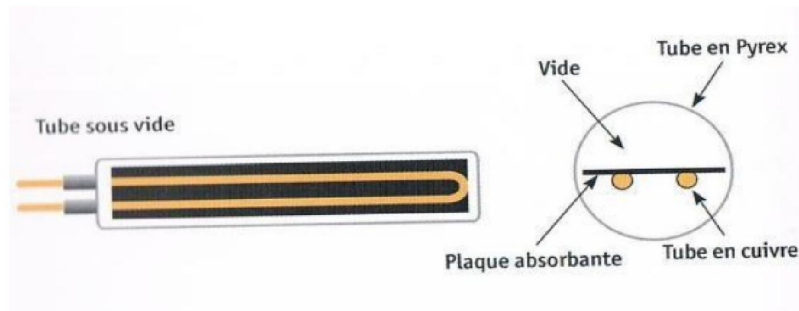


Figure II.17: Principe du système.

## 2. Tubes sous vide à caloduc

Dans les tubes sous vide à caloduc, le tube de l'absorbeur contient une petite quantité de liquide (fluide organique, alcool...). Sous l'action du rayonnement solaire, le liquide se transforme en vapeur qui monte en haut du tube où elle se condense au contact de l'échangeur et transfère la chaleur au fluide caloporteur.

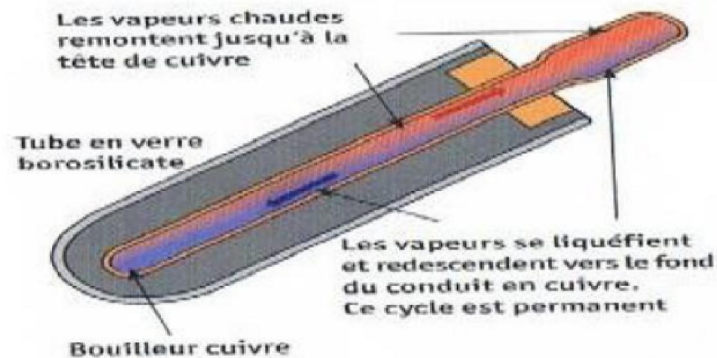


Figure II.18: Principe du système dans les tubes sous vide à caloduc.

## 4.4. Capteurs à concentration [25]

### 4.4.1. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques

Ces systèmes à concentration et poursuite du soleil. Selon que la concentration se fait sur un point ou sur une ligne, les températures atteintes sont élevées. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques concentrent la lumière sur un absorbeur linéaire. Ainsi, les températures atteintes. Sont de 200 à 400 °C, pour des puissances de plusieurs centaines de kW.

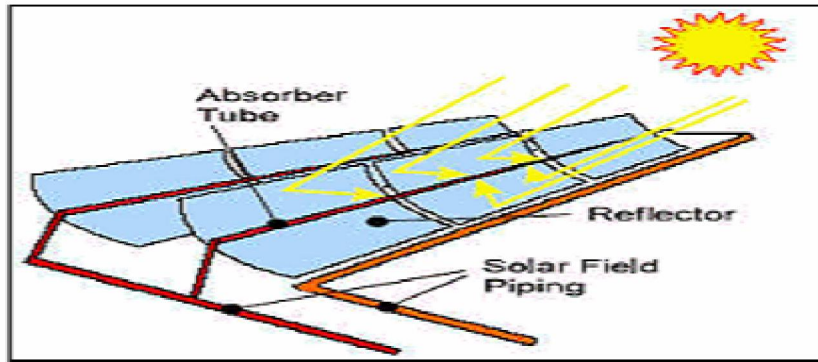


Figure II.19: Schéma des systèmes à concentration.

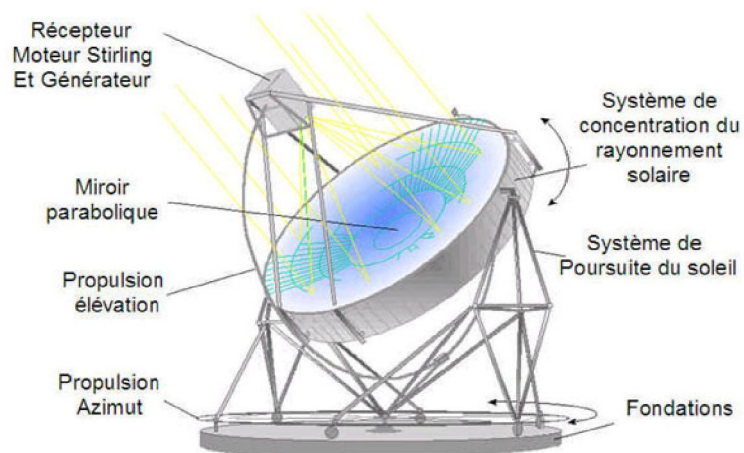


Figure II.20: Centrale solaire parabolique (projet ROMEU-ODEILLO). [24]

#### 4.4.2. Les centrales à tour [25]

Les installations concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel à l'aide de miroirs (appelés "héliostats") qui suivent le soleil selon deux directions, sur une chaudière située au sommet d'une tour. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C.

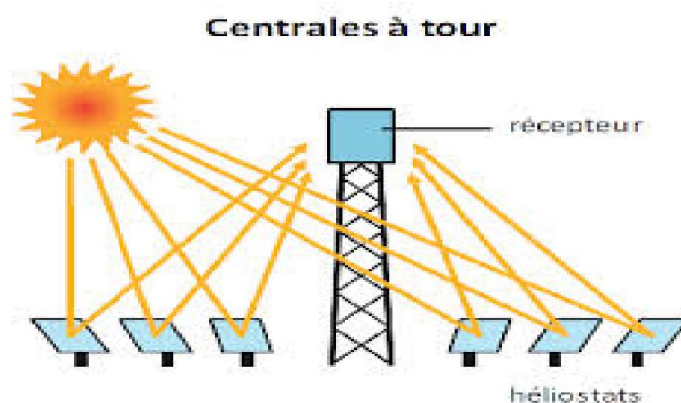


Figure II.21: Centrales à tour.[24]

### 5. Conversion électrique [26]

- **La conversion photovoltaïque (conversion directe)**

La conversion photovoltaïque est la transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique de type continu directement utilisable. L'élément de base dans cette conversion est la cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est principalement constituée de silicium dopé (semi-conducteur). Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou polycristallin et le silicium en couche mince.



**Figure II.22:**Capteur photovoltaïque.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné une démarche sur l'évaluation des paramètres climatiques d'un site défini pour des calculs répétitifs, puis nous avons présenté les principaux éléments constituant des systèmes de conversion de l'énergie solaire permettant ainsi le choix du système convenable.

**Bibliographie**

- [1] Journal Algérien des Régions Arides (JARA) / Numéro spécial 2016.
- [2] **I.Troen et E.L. Petersen**, ‘‘European Wind Atlas’’-Riso, National Laboratory, Roskilde, Danmark, 1989.
- [3] **N.KasbadjiMerzouk**, ‘‘An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria’’- Proceeding of EWEC'94 congress- Thessaloniki, Grèce, 1994.
- [4] **N.Kasbadji Merzouk, N. Messen**, ‘‘Contribution à l’Etude du Vent en Rapport avec l’Erosion Eolienne dans les Zones Arides’’-Revue Energies Renouvelables, numéro spéciale zones arides, 2002.
- [5] **H. Nedjari Daaou, S. Haddouche et N. KasbadjiMerzouk**, ‘‘Amélioration de la carte des vents à partir des données interpolées’’- Revue Energies Renouvelables- Energies Photovoltaïque et éolienne, pp 119- 124., 2003.
- [6] **N.Kasbadji. Merzouk**, ‘‘Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la direction du vent en Algérie’’- Thèse de Doctorat- Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2006.
- [7] **F. Chellali et al**, ‘‘Renewable and Sustainable Energy Reviews’’ 15 (2011) 993–1002.
- [8] **Boumahrat. M et J. Gourdin**, ‘‘méthodes numériques appliquées’’, Office des publications universitaires (OPU)-Algérie, 1983.
- [9] **T. Oke**, ‘‘Boundary layer climates’’-London, 1989.
- [10] **M, Capderou**, ‘‘Atlas solaire de l’Algérie’’, O.P.U, Alger. (1985).
- [11] **A. Mefti, M.Y. bouroubi, H. Mimouni**, ‘‘Evaluation du potentiel énergétique solaire’’, N°2, décembre. (2002).
- [12] **Dobbi. A**, ‘‘Climatisation solaire : système à absorption’’- Mémoire de Magister. CentreUniversitaire d’Ouargla. Département de Physique. 2000.
- [13] **A. Sfeir, G. Guarracino**, ‘‘Ingénierie des systèmes solaires’’- Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [14] **J. Bonal ; P. Rossetti**, ‘‘Les énergies alternatives’’- Omniscience. (2007).
- [15] **D.K.Edwards**, ‘‘Capteurs solaires’’- Edition SCM, paris. (1979).
- [16] **Ch.Perrin**, de Brichambaut; C, Vauge, ‘‘Le gisement solaire’’- Technique et Documentation, Paris. (1982).

- [17] **P.H.Communay**, ‘‘Héliothermique: le gisement solaire, méthodes et calculs’’- Groupe de Recherche et d’Edition, France. (2002).
- [18] **MOHAMED SEDIK .N**, ‘‘Etude des paramètres impactant sur le rendement d’un capteur solaire’’, Mémoire de Master- Université de Annaba, 2018.
- [19] **T.Enrênez, J. P. Bibring, M. Blanc, M. A. Barucci, F. Roques, P. Zarka**, ‘‘Le système solaire’’- Éditions et EDP sciences, Paris. (2003).
- [20] **D.K. Edwards**, ‘‘Capteurs solaires’’- Edition SCM, paris. (1979).
- [21] **C. voyant**, ‘‘Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d’énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels’’- Thèse doctorat, université de Corse-Pascal Paoli, France, (2011).
- [22] **R. Bernard, G. menguy, M. Schwartz**, ‘‘Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications’’- Techniques et Documentation. (1979).
- [23] **N.enteria, A.Akbarzadeh**, ‘‘Solar energy sciences and engineering applications’’- Taylor-francis group- London, UK, (2014).
- [24] **O.Sotehi**, ‘‘Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d’un distillateur solaire’’- Thèse de magistère- Université de Constantine. (2009).
- [25] **Malika.B**, ‘‘Simulation thermique d’une maison solaire pour la production d’eau chaude sanitaire (ECS)’’- Mémoire de Master, Université de Chlef, 2012.
- [26] **Moumni N**, ‘‘Les énergies renouvelables’’, polycopie de cours-Université de Biskra 2021

Chapitre III :  
Application (chauffage)

### Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la troisième phase du projet présenté, c'est l'application du chauffage solaire des bâtiments, de l'eau sanitaire ou des produits alimentaires et agro alimentaires.

### III.1.Phase III : Application (chauffage)

#### 1. Définition le chauffage

Le chauffage est l'action de transmettre de l'énergie thermique à un objet, un matériau ou à l'air ambiant. On distingue le chauffage à des fins de confort thermique est une application couramment utilisée car sa technologie est simple (Chauffage des locaux, de l'eau chaude sanitaire, etc.).L'objectif du chauffage est d'améliorer le confort thermique d'un espace à vivre. Un système de chauffage consomme de l'énergie sous une forme et la restituer sous forme de chaleur. [1]

#### 2. Composants des systèmes de chauffage solaire

Tout système de conversion thermique de l'énergie solaire se compose des éléments suivants : [2]

- Un capteur solaire.
- Un circuit caloporteur permettant de transférer l'énergie absorbée par le capteur à l'appareil d'accumulation ou directement au point d'exploitation.
- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution.

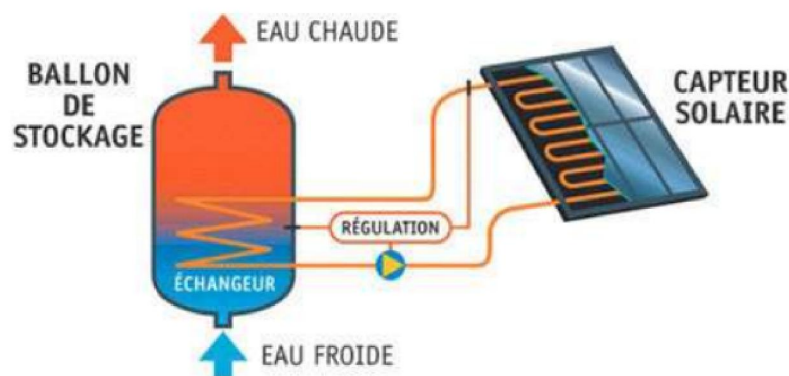


Figure III.1 : Schéma de principe d'une installation solaire thermique. [2]

- **Capteurs solaires**

Le Capteur solaire est l'élément de base pour la transformation de énergie solaire en chaleur et sera le plus souvent constitué de : [2]

- Un absorbeur.
- Une isolation thermique.
- Une couverture transparente.
- Un caisson.

- **Tuyauteries**

Le système de transport du fluide caloporteur doit être conçu à partir d'un matériau inoxydable et doit aussi transmettre la chaleur d'une façon efficace afin de diminuer les pertes thermiques pendant le transfert.

- **Le fluide caloporteur**

Le fluide caloporteur est essentiel pour transporter la chaleur. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique et capacité calorifiques élevées et une faible viscosité. Dans le cas des capteurs plans, on utilise soit de l'air ou de l'eau avec un antigel (généralement de l'éthylène glycol).

- **Cuve de stockage**

La cuve de stockage est un élément essentiel dans l'installation de chauffage d'eau solaire.

Elle permet de stocker l'eau chaude des capteurs pour la restituer au moment des besoins d'utilisation, elle peut contenir ou non un échangeur de chaleur.

Aussi pour éviter les pertes thermiques vers le milieu extérieur, la cuve de stockage doit être bien isolée en choisissant une épaisseur de l'isolant thermique et économique adéquate. Le stockage est caractérisé par:

- Le mode d'accumulation de chaleur (sensible ou latente).
- La capacité thermique du stock.



- Les pertes thermiques du stockage.

Suivant la capacité de stockage on distingue deux types :

- Stockage long durée (inter- saisonnier).
- Stockage court durée (ne dépassant pas quelques journées ou quelques heures).

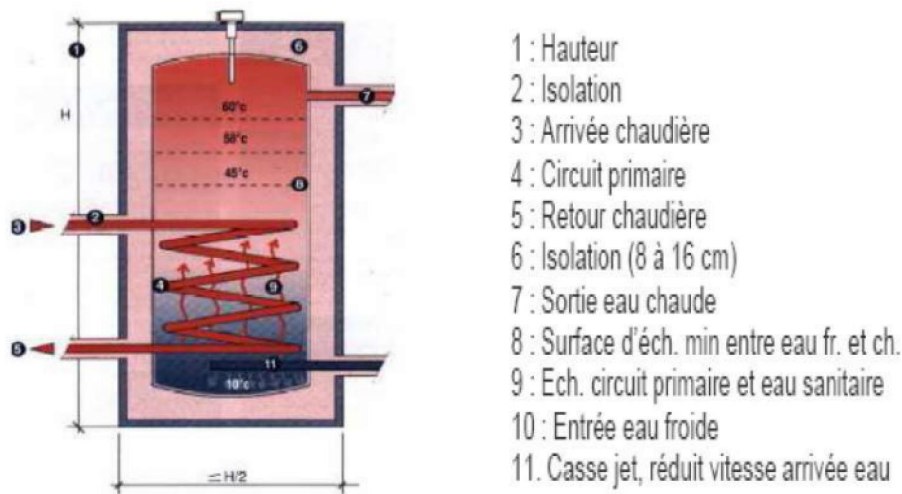


Figure III.2 : La cuve de stockage avec échangeur. [3]

### 3. Les systèmes solaires thermiques (chauffage)

#### 3.1. Les systèmes de production d'eau chaude sanitaire

##### 3.1.1. Chauffe-eau individuels

###### 1. Chauffe-eau sans réservoir

###### 2. Le chauffe-eau solaire thermosiphon

On désigne deux types des systèmes thermosiphon : [5]

✓ Le thermosiphon direct (monobloc)

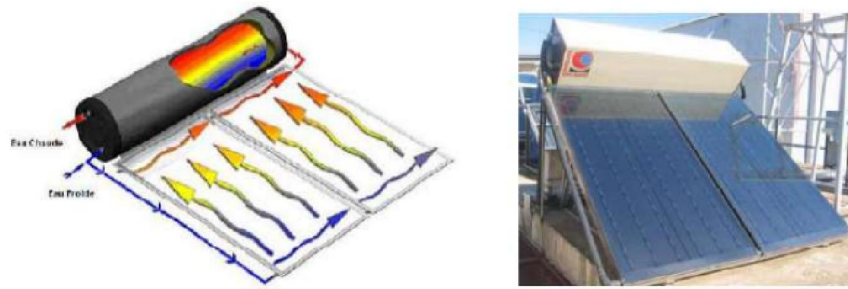


Figure III.3 : Système de chauffe-eau solaire thermosiphon directe.

✓ Le thermosiphon indirect (à éléments séparés)

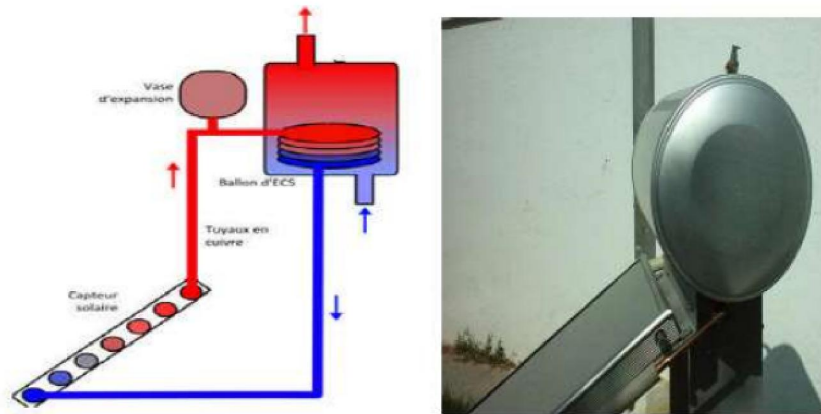


Figure III.4 : Système de chauffe-eau solaire thermosiphon indirecte.

3. Le chauffe-eau solaire à circulation forcée

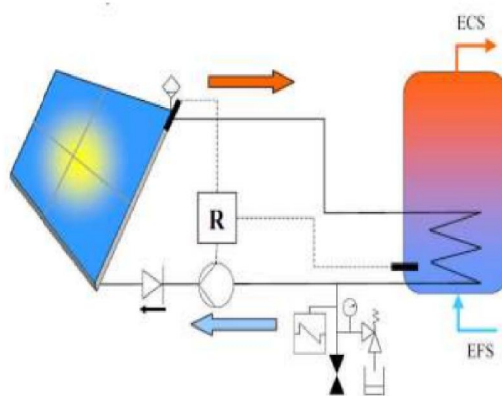


Figure III.5 : Système de chauffe-eau solaire à circulation forcée.

#### 4. Le chauffe-eau solaire autovidangeable a circulation forcée

Les capteurs et leurs canalisations se vident automatiquement à l'arrêt de la pompe dans une bouteille de récupération. Les équipements (sauf le capteur) sont situés dans une zone hors-gel. [4]

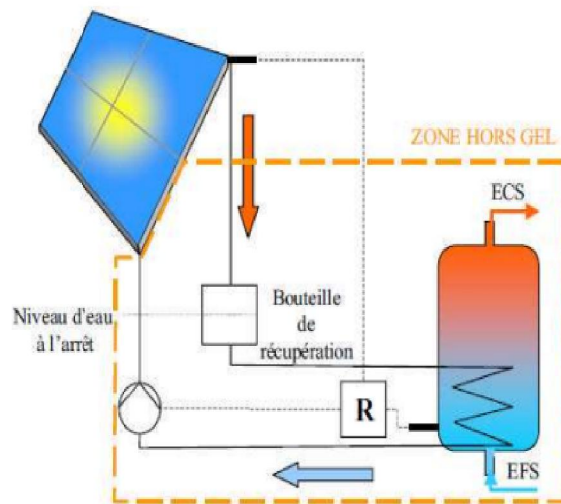


Figure III.6 : Système de chauffe-eau solaire autovidangeable à circulation forcée.

#### 3.1.2. Chauffe-eau solaire pour une grande consommation

1. Production centralisée et distribution directe: mise en œuvre lorsque les besoins d'ECS sont limités.

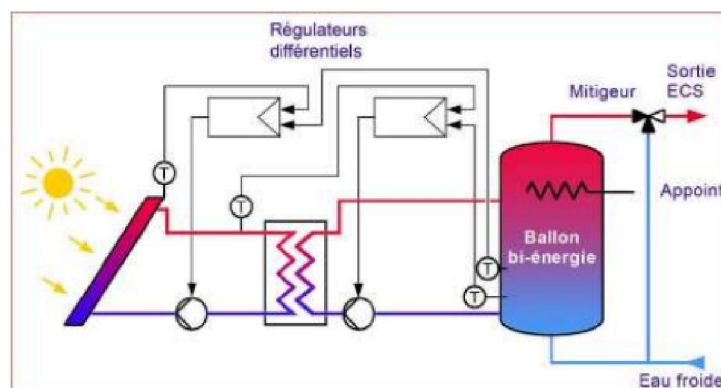
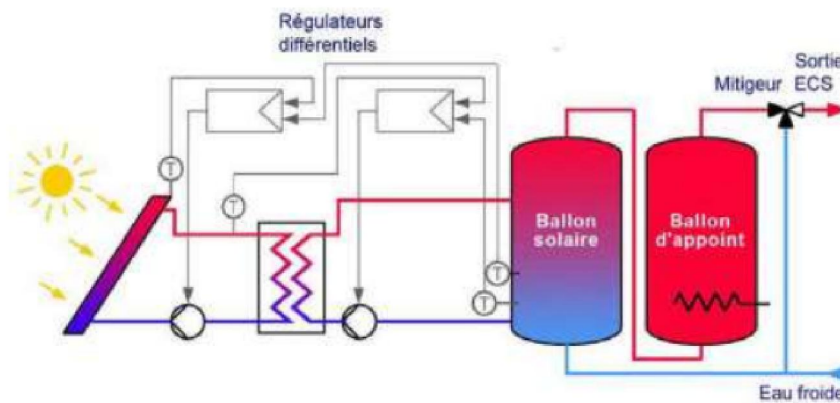


Figure III.7 : Système de production centralisée et distribution directe.

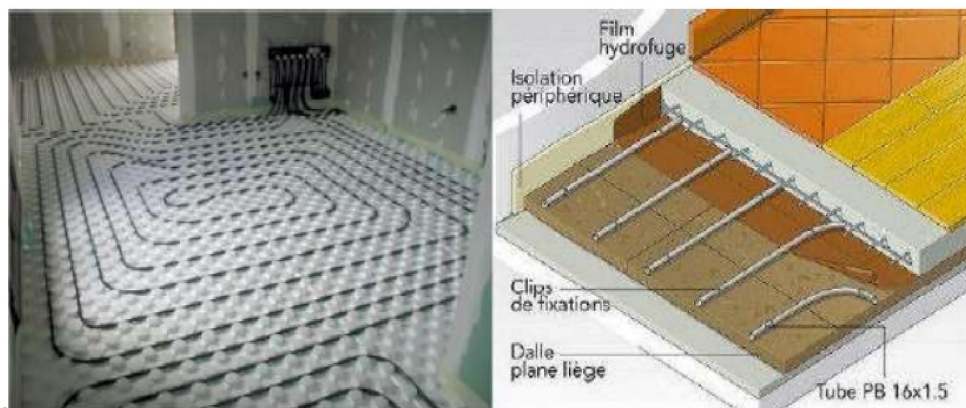
**2. Production centralisée et distribution par boucle de circulation :** adoptée lorsque le volume de stockage est plus important.



**Figure III.8 :** Système de production centralisée et distribution boucle de circulation.

### 3.2. Les systèmes de chauffage solaire des bâtiments

#### 3.2.1. Le plancher solaire direct (PSD)



**Figure III .9 :** Le plancher solaire direct. [4]

#### 3.2.2. Le système solaire combiné (SSC)

Un système solaire combiné est une installation solaire qui fournit à la fois de l'eau chaude sanitaire et le chauffage (sur un réseau de radiateurs ou un plancher chauffant), on l'appelle aussi combi système.[6]

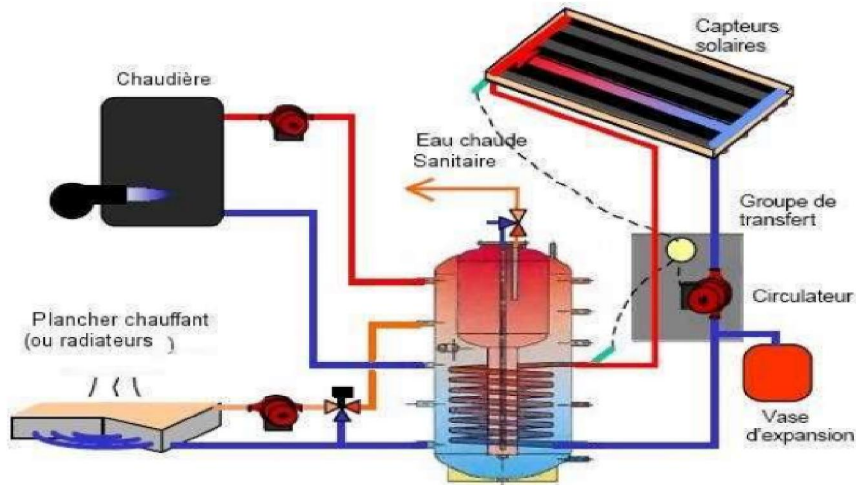


Figure III.10 : Système de production eau chaude et chauffage avec appoint intégré.

[4]

### 3.3. Les systèmes de chauffage solaire des piscines

#### 1. Le système de chauffage solaire pour piscine en plein air

Le chauffage de piscine ouvertes est par un seul circuit est connu sous nom de circuit ouverts où l'eau de la piscine circule à l'aide d'une pompe à grand débit. Elle passe par un filtre traverse les canaux du capteur solaire et redescend avec une température élevées se verser dans la piscine. [7]

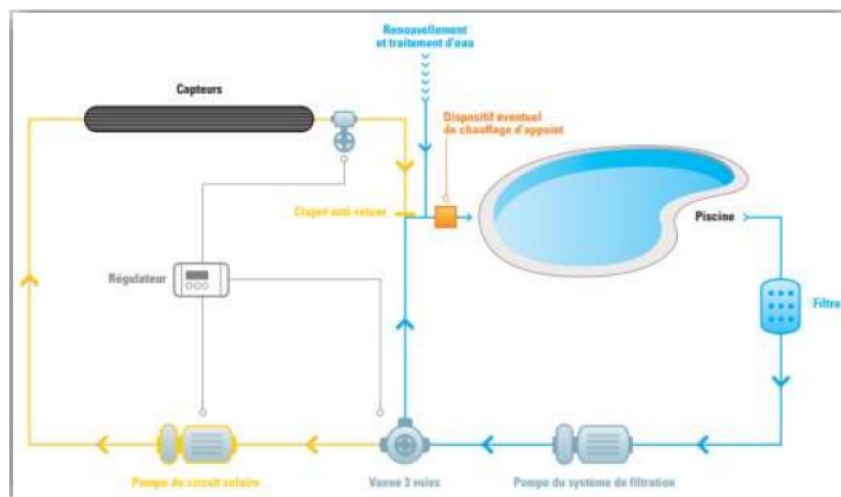


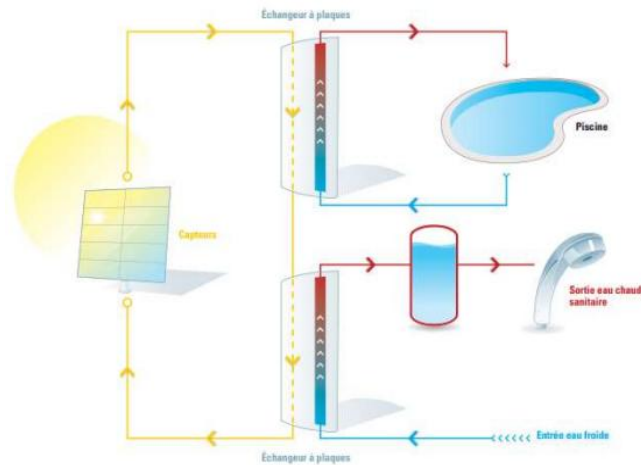
Figure III.11 : Système de chauffage solaire pour piscine en plein air avec appoint séparé.

#### 2. Le système de chauffage solaire pour piscine couverte

Le chauffage de ce type de piscine est par un circuit fermé, il composé deux circuits :

- Le circuit solaire: le fluide caloporteur (eau avec glycol) circule entre les champs des capteurs et l'échangeur de chaleur.
- Le circuit de l'eau de piscine : sert à transporter l'eau chauffée de l'échangeur de chaleur à la piscine.

Le système de chauffage de ce type de piscine exige un haut débit en générale 3 à 4 fois plus élevé que celui pour l'eau chaude sanitaire. [7]



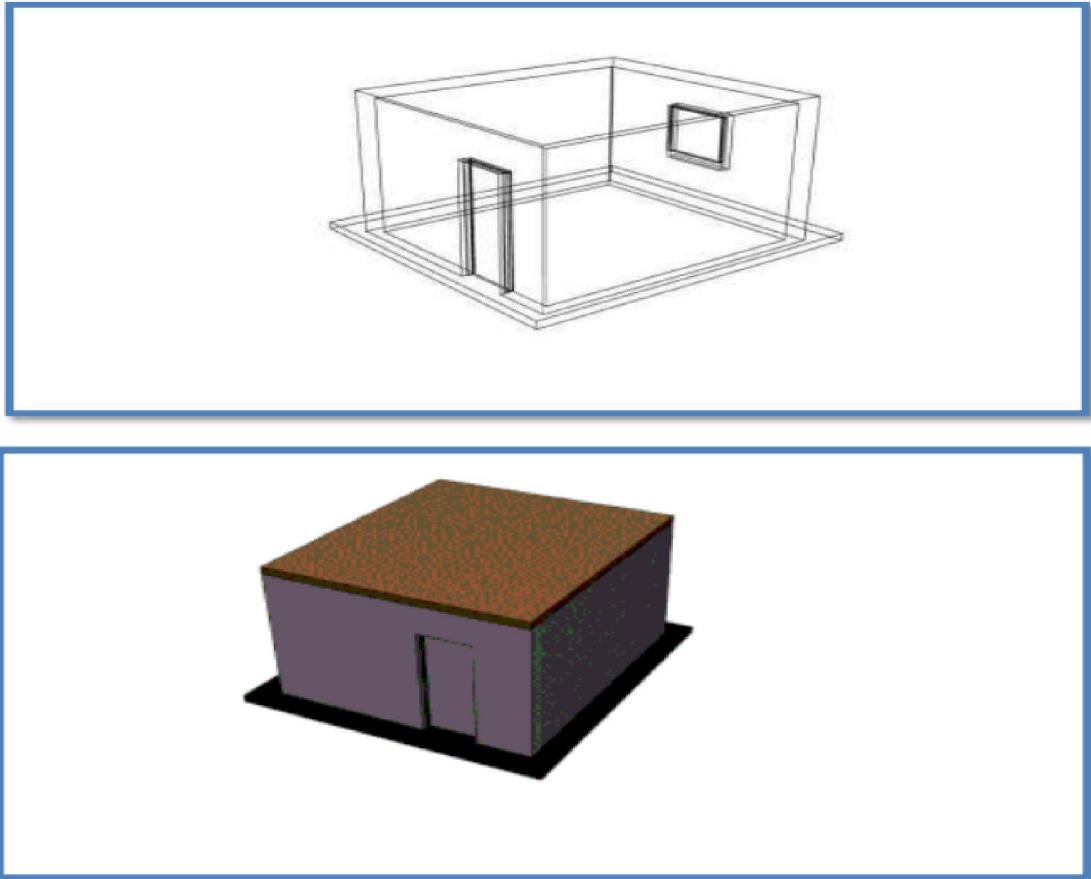
**Figure III.12 :** Système de chauffage solaire pour piscine couverte.

### III.2. Exemple d'un cas d'étude

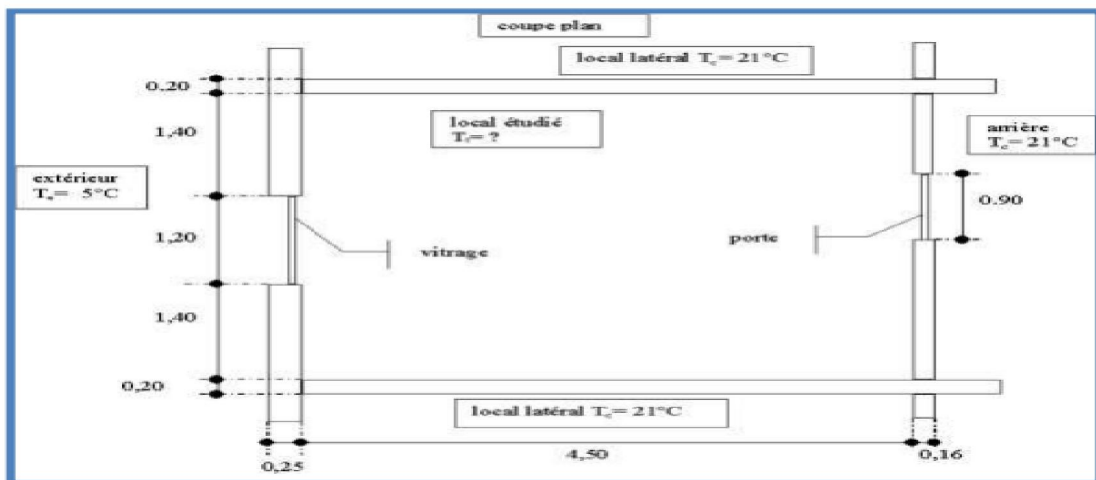
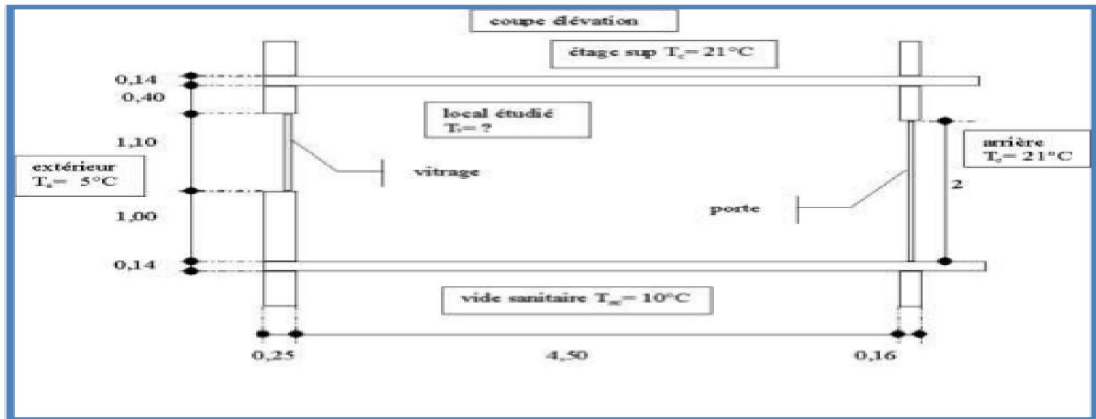
Le travail suivant est relatif à un cas d'étude fait auparavant par S.GUENIFI [8]

#### 1. Présentation du local étudié :

Pour chauffer convenablement un local il faut faire le bilan thermique. Il s'agit ici d'un local non chauffé entouré par des locaux chauffés de tous les côtés, sauf une façade donnant sur l'extérieur et le plancher sur vide sanitaire. Une vue générale du local est donnée par la figure ci-dessous :



**Figure III.13** : Présentation du local étudié.



Figures III.14 : Dimensions du local étudié.

➤ **Caractéristiques des éléments de constructions:**

- **Planchers:** dalle béton, épaisseur = 14 cm,  $\lambda = 1,75 \text{ w.m}^{-1} \cdot \text{°c}^{-1}$ .
- **Porte:** coefficient global d'échange  $K_{\text{porte}} = 3 \text{ w.m}^{-2} \cdot \text{°c}^{-1}$ .
- **Cloison de fond:** coefficient global d'échange  $K = 2,1 \text{ w.m}^{-2} \cdot \text{°c}^{-1}$ .
- **Fenêtre en vitrage simple :** épaisseur = 3 mm; conductivité  $\lambda = 1,15 \text{ w.m}^{-1} \cdot \text{°c}^{-1}$ 
  - **La composition de chaque paroi latérale en briques est la suivante:**
    - Brique creuse NFP 13-301 3 alvéoles, épaisseur = 15 cm, résistance thermique unitaire  $R_{\text{brique}} = 0,35 \text{ m}^2 \cdot \text{°c.w}^{-1}$ .
    - Enduit plâtre de chaque côté, épaisseur = 1,5 cm ; conductivité  $\lambda = 0,5 \text{ w.m}^{-1} \cdot \text{°c}^{-1}$
  - **La composition du mur de façade est la suivante:**
    - Enduit mortier extérieur, épaisseur = 1 cm ; conductivité  $\lambda = 1,15 \text{ w.m}^{-1} \cdot \text{°c}^{-1}$ .
    - Blocs creux béton, épaisseur = 20 cm, résistance thermique unitaire  $R_{\text{bloc}} = 0,23 \text{ m}^2 \cdot \text{°c.w}^{-1}$



- Isolation intérieure polystyrène extrudé, épaisseur = 3 cm; conductivité  $\lambda = 0,035$  w.m-1. °c1.
- Enduit plâtre intérieur, épaisseur = 1 cm ; conductivité  $\lambda = 0,5$  W.m<sup>-1</sup>. °c<sup>-1</sup>.

## 2. Coordonnées géographiques du site

Les coordonnées géographiques du site d'étude (Biskra) :

- Latitude: 34° 51' 01" Nord
- Longitude : 5° 43' 40" Est

## 3. Conditions de base

- Température extérieure de base = 5° C
- Température intérieure de base = 21° C

## 4. Evaluation des surfaces nettes (A<sub>i</sub>) des vitrages, murs, cloisons et planchers

- **Vitrage:**  $A_{\text{Fenêtre}} = 1,10 \times 1,20 = 1,32 \text{ m}^2$ .
- **Porte:**  $A_{\text{Porte}} = 2,00 \times 0,90 = 1,80 \text{ m}^2$ .
- **Cloison légère:**  $A_{\text{Cloison légère}} = (4,00 \times 2,50) - 1,80 = 8,20 \text{ m}^2$ .
- **Cloison brique:**  $A_{\text{Cloison brique}} = (4,50 \times 2,50) = 11,25 \text{ m}^2$ .
- **Façade:**  $A_{\text{Façade}} = (4,00 \times 2,50) - 1,32 = 8,68 \text{ m}^2$ .
- **Plancher:**  $A_{\text{Plancher}} = 4,00 \times 4,50 = 18,00 \text{ m}^2$ .

## 5. Coefficients globaux de transmission thermique K

Pour déterminer le coefficient global de transmission de chaleur à travers les parois (K), on a utilisé les formules 1, 2 et le tableau 1. De ce fait on trouve:

Formule 1 :

$$\frac{1}{k} = \sum R + \frac{1}{h_{\text{ext}}} + \frac{1}{h_{\text{int}}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}]$$

Formule 2 :

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}]$$

- **R<sub>i</sub>** représente la résistance thermique de la couche i.
- **e<sub>i</sub>** en(m) représente l'épaisseur de la couche de matériau.
- **λ<sub>i</sub>** en (W/m. °C) représente la conductivité thermique du matériau.




Type de paroi ↓	- l'extérieur, - un passage ouvert, - un local ouvert.			- un local, chauffé ou -non chauffé, - un comble, - un vide sanitaire.		
	$1/h_{ext}$	$1/h_{int}$	$\Sigma$	$1/h_{ext}$	$1/h_{int}$	$\Sigma$
Mur (latéral) 	0,11	0,06	0,17	0,11	0,11	0,22
Toiture (Flux ascendant) 	0,09	0,05	0,14	0,09	0,09	0,18
Plancher (Flux descendant) 	0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

Tableau III.1 : Les résistances thermiques pour différents types de parois.

• Vitrage:

$$\frac{1}{K_{Fen}} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{1}{h_{int}} + \frac{e_f}{\lambda_f} = 0,11 + 0,06 + \frac{0,003}{1,15} \rightarrow K_{fen} = 5,793 \text{ w.m}^{-2}.\text{°c}^{-1}$$

• Façade:

$$\frac{1}{K_{Fac}} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{1}{h_{int}} + \frac{e_{em}}{\lambda_{em}} + R_{bb} + \frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{e_{ep}}{e_{ep}}$$

$$= 0,11 + 0,06 + \frac{0,01}{1,15} + 0,23 + \frac{0,03}{0,035} + \frac{0,01}{0,5} \rightarrow K_{fac} = 0,777 \text{ w.m}^{-2}.\text{°c}^{-1}$$

• Porte:

$$K_{porte} = 3 \text{ w.m}^{-2}.\text{°c}^{-1}$$

• Cloison légère (de fond):

$$K_{fond} = 2,1 \text{ w.m}^{-2}.\text{°c}^{-1}$$

• Murs latéraux:

$$\frac{1}{K_{Fac}} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{1}{h_{int}} + R_{bc} + 2 \frac{e_{ep}}{e_{ep}} = 0,11 + 0,11 + 0,35 + 2 \frac{0,015}{0,5}$$

$$\rightarrow K_{fac} = 1,587 \text{ w.m}^{-2}.\text{°c}^{-1}$$

- **Plancher haut (flux descendant):**

$$\frac{1}{K_{phaut}} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{1}{h_{int}} + \frac{e_p}{\lambda_p} = 0.17 + 0.17 + \frac{0.14}{1.75} \rightarrow K_{phaut} = 2.38 \text{ w.m}^{-2}.\text{°c}^{-1}$$

- **Plancher bas (flux descendant):**

$$\frac{1}{K_{pbas}} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{1}{h_{int}} + \frac{e_p}{\lambda_p} = 0.17 + 0.17 + \frac{0.14}{1.75} \rightarrow K_{pbas} = 2.38 \text{ w.m}^{-2}.\text{°c}^{-1}$$

### 6. Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois

Le tableau suivant représente les déperditions surfaciques par transmission à travers les parois :

<b>Paroi</b>	<b>A<sub>i</sub>(en m<sup>2</sup>)</b>	<b>K<sub>i</sub>(en w.m<sup>-2</sup>.°c<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ds = KxA (en w/°c)</b>
<b>Vitrage</b>	<b>1.32</b>	<b>5.793</b>	<b>7.64</b>
<b>Porte</b>	<b>1.80</b>	<b>3.00</b>	<b>5.4</b>
<b>Cloison légère</b>	<b>8.20</b>	<b>2.10</b>	<b>17.22</b>
<b>Cloison brique</b>	<b>11.25</b>	<b>1.587</b>	<b>17.85</b>
<b>Façade</b>	<b>8.68</b>	<b>0.777</b>	<b>6.74</b>
<b>Plancher</b>	<b>18.00</b>	<b>2.38</b>	<b>42.84</b>

**Tableau III.2 :** Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois.

### 7. Déperditions par renouvellement d'air

Pour déterminer déperditions par renouvellement d'air, on pourra utiliser les formules 3 et le tableau III.3:

**Formule 3 :**

$$d_r = 0,34 \times N \times V \quad [\text{W/°C}]$$

Où :

- V (en m<sup>3</sup>) est le volume du local non chauffé,
- N (en h<sup>-1</sup>) est le taux horaire de renouvellement d'air du volume V du local non chauffé.

Il est donné dans le tableau 3.

Dépendances	N (en h <sup>-1</sup> )
Maison individuelle, toutes dépendances (caves, garage, cellier, ...)	0,5
Immeuble collectif d'habitation	
- Circulation commune	
• sans ouverture directe sur l'extérieur	0,5
• avec ouverture directe sur l'extérieur	2
• avec bouche ou gaine de désenfumage ouverte en permanence	4
- Hall d'entrée	4
- Garage collectif	1
- Autres dépendances	0,5

**Tableau III.3 :** Le taux horaire de renouvellement d'air du volume du local non chauffé.

- Volume de local :  $V_1 = 4,5 \times 2,5 \times 4 = 45m^2$

Paroi	N (en h <sup>-1</sup> )	V <sub>locale</sub> (en m <sup>3</sup> )	d <sub>r</sub> =0.34 xN x V (en w/°c)
Porte	0.5	45	7.65
Fenêtre	1	45	15.3

**Tableau III.4 :** Déperditions par renouvellement d'air.

### 8. Bilan d'équilibre thermique

$$\sum_{parois} \phi_t = \sum_{parois} K_t \times A_t \times (T_i - T_j) = 0$$

$$[7.64 + 6.74] \times (T_1 - T_e) + [5.4 + 17.22 + 2 \times 17.85 + 42.84] \times (T_1 - T_c) + 42.84 \times (T_1 - T_{nc}) = 0$$

$$14.38 \times (T_1 - T_e) + 101.16 \times (T_1 - T_c) + 42.84 \times (T_1 - T_{nc}) = 0$$

$$14.38 \times (T_1 - 5) + 101.16 \times (T_1 - 21) + 42.84 \times (T_1 - 10) = 0$$

$$[14.38 + 101.16 + 42.84] T_1 - [14.38 \times 5 + 101.16 \times 21 + 42.84 \times 10] = 0$$

$$158.38 T_1 - 2624.66 = 0 \rightarrow T_1 = \frac{2624.66}{158.38} = 16.57 \text{ °C}$$

En ajoutant les déperditions par renouvellement d'air au bilan de déperditions précédentes :

$$14.38 \times (T_1 - T_e) + 101.16 \times (T_1 - T_c) + 42.84 \times (T_1 - T_{nc}) + 7.65 \times (T_1 - T_c) + 15.3 \times (T_1 - T_c) = 0$$

$$14.38 \times (T_1 - 5) + 101.16 \times (T_1 - 21) + 42.84 \times (T_1 - 10) + 7.65 \times (T_1 - 21) + 15.3 \times (T_1 - 5) = 0$$

$$[158.38 + 7.65 + 15.3] T_1 - 2624.66 - 7.65 \times 21 - 15.3 \times 5 = 0$$

$$181.33 T_1 - 2861.81 = 0 \rightarrow T_1 = \frac{2861.81}{181.33} = 15.78 \text{ °C}$$

### 9. Puissance de chauffage Q

Pour avoir une température  $T_1 = 21^\circ\text{C}$  du local, en tenant des déperditions par renouvellement d'air et de la puissance du chauffage à déterminer Q, on remplace  $T_1$  par sa valeur dans l'équation du bilan thermique. Soit dans l'équation:

$$181.33 \times T_1 - 2861.81 = Q$$

$$181.33 \times 21 - 2861.81 = Q$$

**D'où : Q = 946.12 W soit 1 KW**

### 10. Dimensionnement des capteurs solaires

Pour effectuer le dimensionnement d'une installation solaire, nous devons connaître l'énergie effective qu'il est possible d'utiliser.

La surface des capteurs solaires à installer doit couvrir les besoins journalier. La question est donc, quelle est cette surface d'un tel type de capteurs solaire qui pourra assurer pendant un intervalle de temps (12 heures par exemple) une température assurant le maintien du confort demandée ?

Durant une journée (température ambiante  $5^\circ\text{C}$ ), du mois de janvier (cas défavorable) par exemple, l'énergie solaire qui sera captée sera de : 12000 Wh (12 kWh) en considérant une valeur moyenne de  $1000 \text{ w/m}^2$  et une journée de 12 heures. Un capteur solaire à air ayant comme rendement de 60 % pour un débit d'air de  $35 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  fournira un air chaud à une température de sortie égale à :

$$T_{fs} = \frac{\eta \cdot G^* \cdot S_c}{\rho \cdot Q_v \cdot C_p} + T_a = \frac{0,6 \cdot 1000 \cdot 1}{1,29 \cdot \frac{35}{3600} \cdot 1005} + 5 = 52,6^\circ\text{C}$$

Cette température assure donc une quantité de chaleur journalière de 7.2 KWh qui est donc assurée seulement avec un capteur d'une surface de  $1\text{m}^2$ . Si on double cette surface on pourra assurer largement le confort du local considéré.

### Conclusion

À l'issue des calculs exposés dans ce chapitre, nous avons montré que pour une date donnée, un site donné et par une simple technologie de conception l'énergie solaire comme source énergétique pourra fournir de l'énergie suffisante pour diverses applications telles que le chauffage et le séchage.

**Bibliographie**

- [1] **Djamel FITES**, “Comparaison technico-économique entre différentes installations de chauffage et de climatisation des locaux“, Mémoire de magister, Université de Batna, 2014.
- [2] **Takieddine Reddah**, “Étude et dimensionnement d’un système solaire combiné application: Logement individuel type F3 à Batna“, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2015.
- [3] **Malika Bouhediba**, “Simulation thermique d’une maison solaire pour la production d’eau chaude sanitaire (ECS) “, Mémoire de Master, Université de Chlef, 2012.
- [4] **Rima Zouagri**, “Étude de faisabilité technique et économique des installations solaires thermiques dans un bâtiment“, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2012.
- [5] **M.S. Hossain, R. Saidur, H. Fayaz, N.A. Rahim, M.R. Islam, J.U. Ahmed, et M.M. Rahman**, “Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe“, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, (3801–3812), 2011.
- [6] **R. Kharchi, B. Benyoucef et M. Belhamel.**, “Système solaire combiné estimation des besoins énergétiques“, Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, (109 –114), 2007.
- [7] **Ahmed KHEDIM**, “L’énergie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque“, Centre de Publication Universitaire, Tunis, 2003.
- [8] **S.GUENIFI**, ‘Étude de faisabilité des applications solaires utilisant des CSP en fonction de leur température de sortie’, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2016,

## Chapitre IV :

Méthode de calcul,  
simulation et résultats

## Présentation des résultats de la simulation

Pour le site considéré et les applications telles que le chauffage des locaux ou le séchage des produits alimentaires ou agroalimentaires, nous présentons quelques résultats qui peuvent servir de réponses à la faisabilité de l'énergie solaire.

- **Modèle du rayonnement solaire:**

$$G = D_{ch} + I$$

$$I = 1230. \exp \left[ \frac{-1}{3,8. \sin(h + 1,6)} \right]$$

$$D_{ch} = 125. (\sin h)^{0,4}$$

- **Modèle de la température de l'air ambiant  $T_e$ :**

$$T_e = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) + \left[ \left( \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) \cdot \cos \frac{2\pi(TSV - tmsBiskra)}{\Delta t} \right]$$

- **Modèle de la température de sortie  $T_s$ :** Système dont le rendement est de 0.60 pour un débit de 35 (m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>) :

$$T_s = \frac{71,4. G}{P(z)} + T_e$$

$$P(z) = P_0 \left[ 1 - \frac{0,0065. Z}{288,15} \right]^{5,31}$$

Les courbes suivantes représentent respectivement les variations en fonction du temps, du rayonnement solaire, de la température d'entrée  $T_e$  et celle de sortie  $T_s$  pour le 15 de chaque mois.

Ces courbes sont issues des modèles choisis comme exemple du calcul pour ce projet.



15 janvier

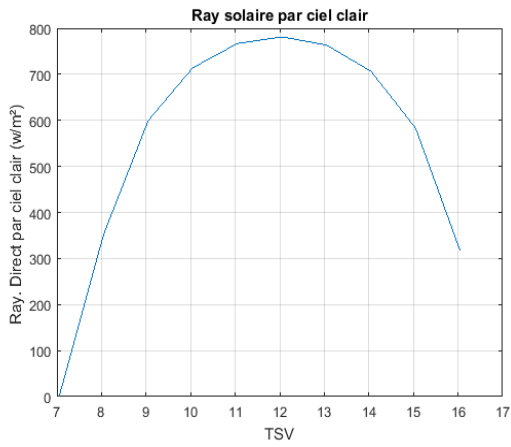


Figure IV.1: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 janvier.

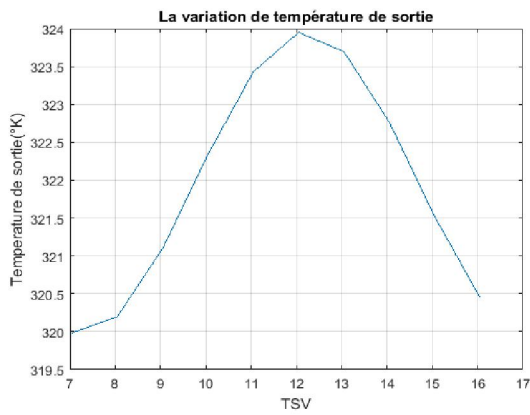


Figure IV.2: variation de la température de sortie de l'air en 15 janvier.

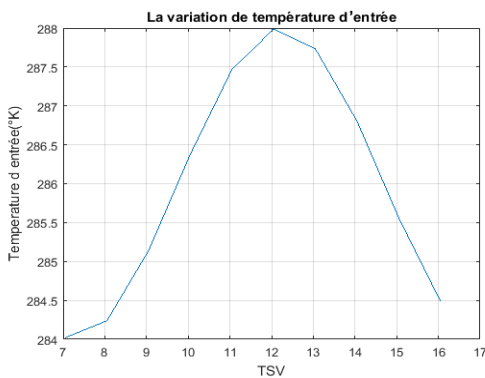


Figure IV.3: variation de la température d'entrée de l'air en 15 janvier.

15 février

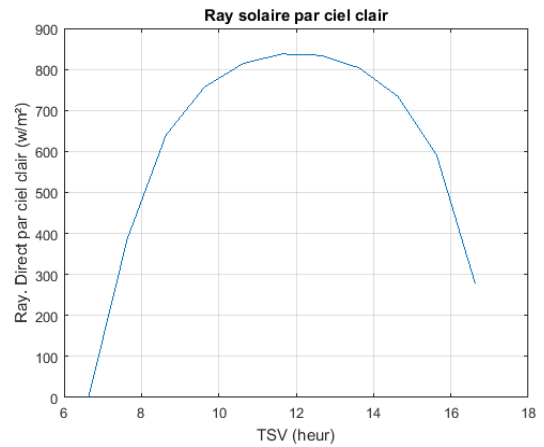


Figure IV.4 : variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 février.

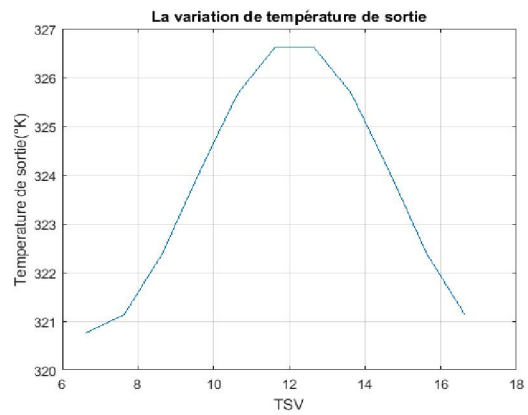


Figure IV.5 : variation de la température de sortie de l'air en 15 février.

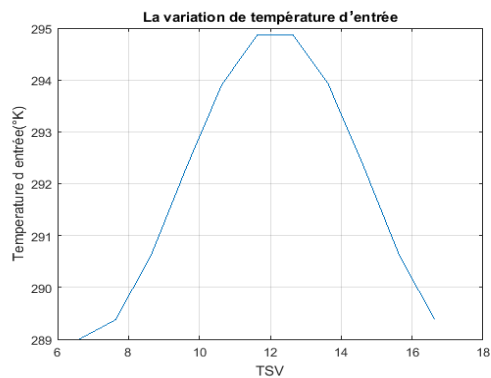


Figure IV.6: variation de la température d'entrée de l'air en 15 février.

15 mars

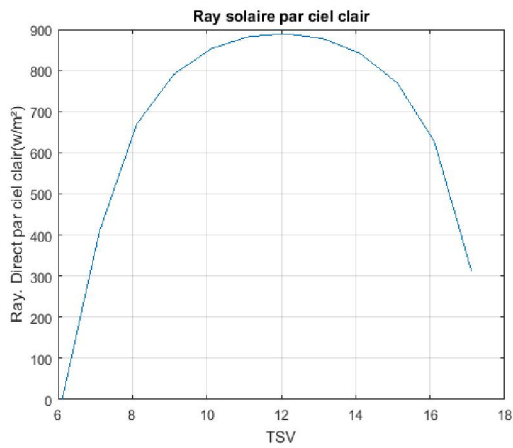


Figure IV.7: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 mars.

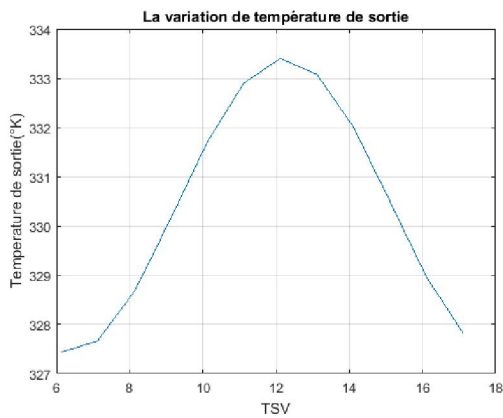


Figure IV.8: variation de la température de sortie de l'air en 15 mars.

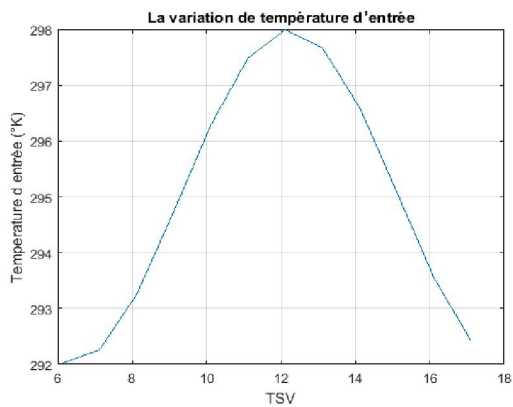


Figure IV.9: variation de la température d'entrée de l'air en 15 mars.

15 avril

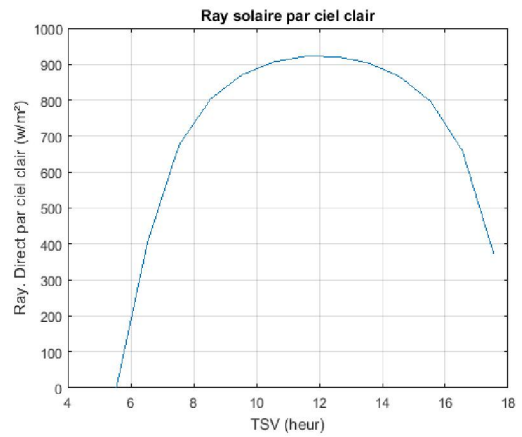


Figure IV.10: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 avril.

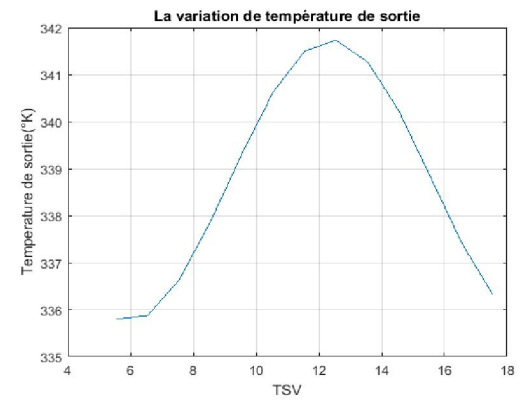


Figure IV.11: variation de la température de sortie de l'air en 15 avril.

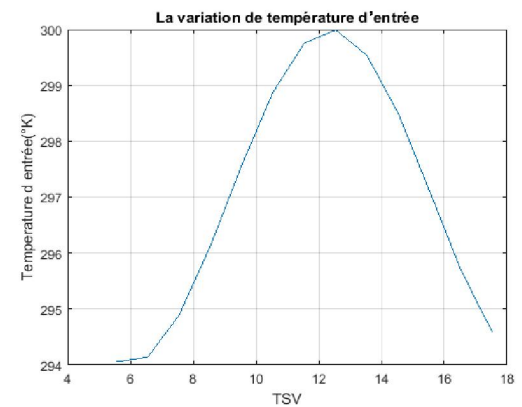


Figure IV.12: variation de la température d'entrée de l'air en 15 avril.

15 mai

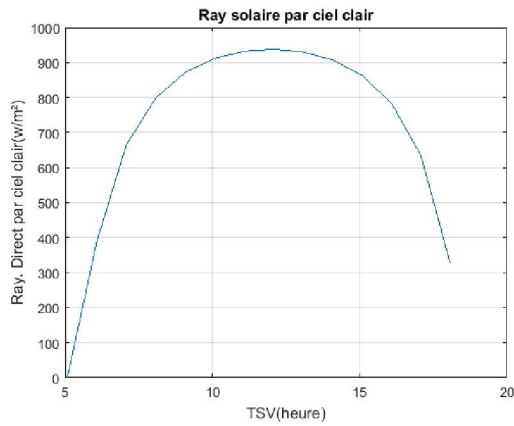


Figure IV.13: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 mai.

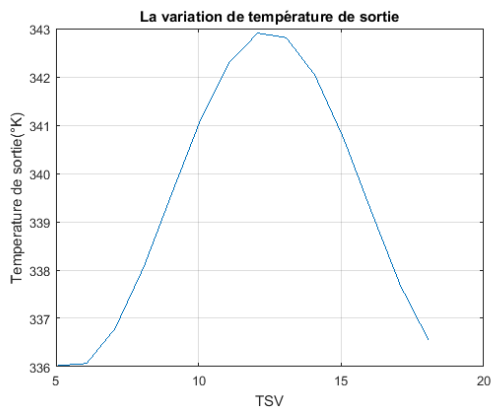


Figure IV.14: variation de la température de sortie de l'air en 15 mai.

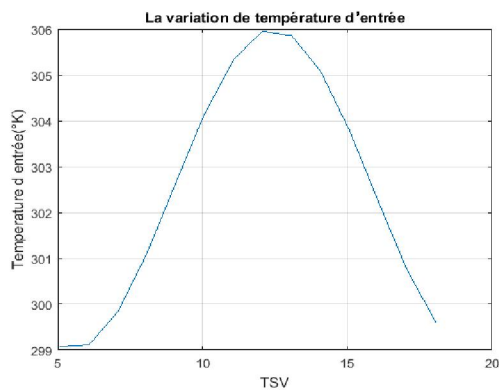


Figure IV.15: variation de la température d'entrée de l'air en 15 mai.

15 juin

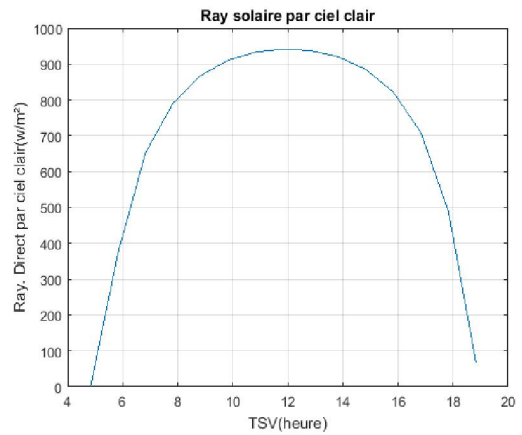


Figure IV.16: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 juin.

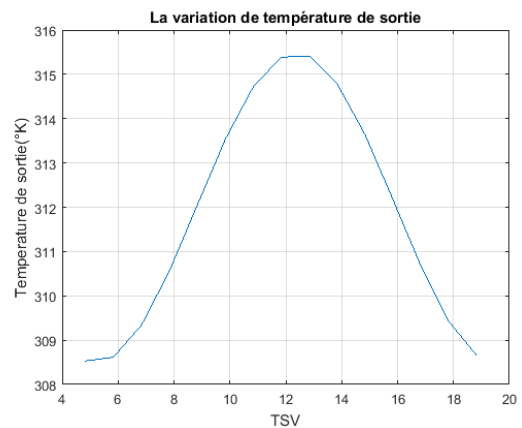


Figure IV.17: variation de la température de sortie de l'air en 15 juin.

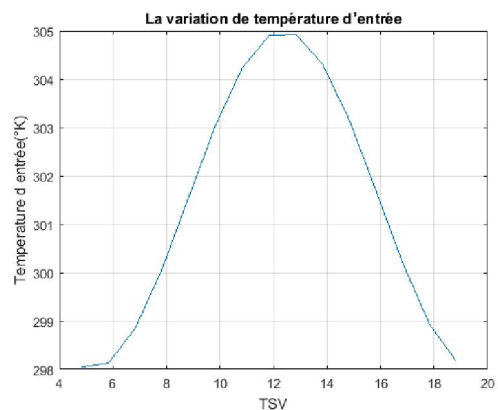


Figure IV.18: variation de la température d'entrée de l'air en 15 juin.

15 juillet

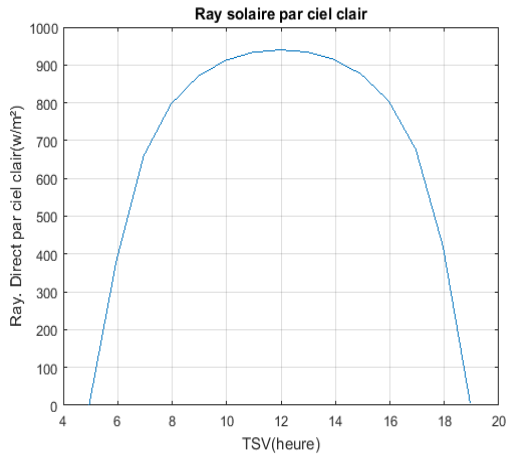


Figure IV.19: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 juillet.

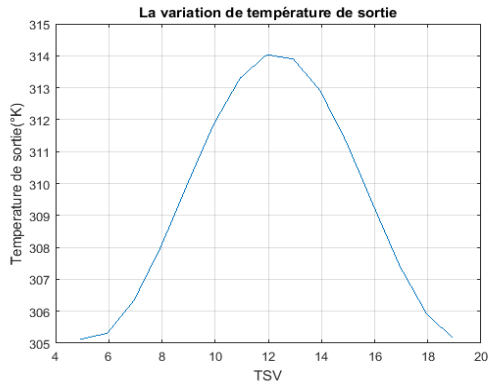


Figure IV.20: variation de la température de sortie de l'air en 15 juillet.

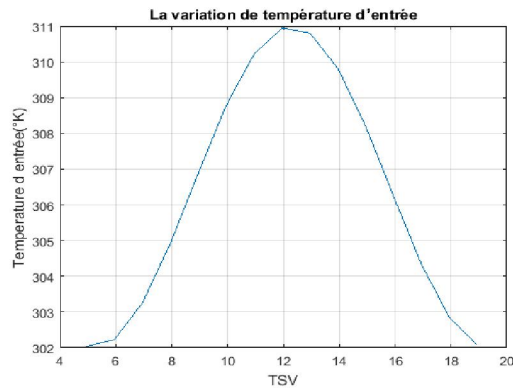


Figure IV.21: variation de la température d'entrée de l'air en 15 juillet.

15 out

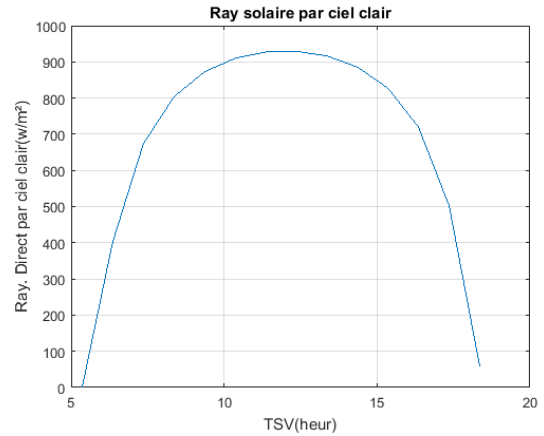


Figure IV.22: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 août.

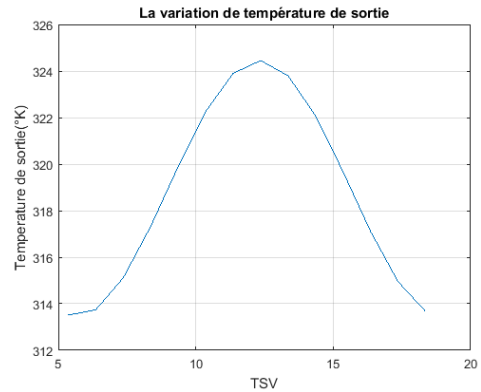


Figure IV.23: variation de la température de sortie de l'air en 15 août.

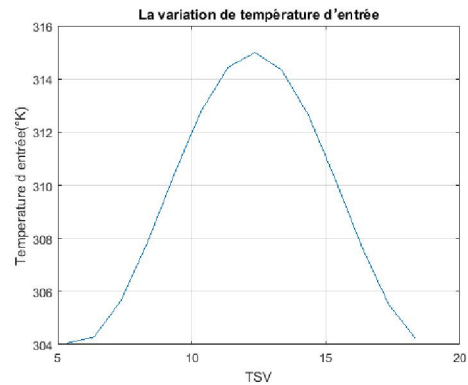


Figure IV.24: variation de la température d'entrée de l'air en 15 août.

15 septembre

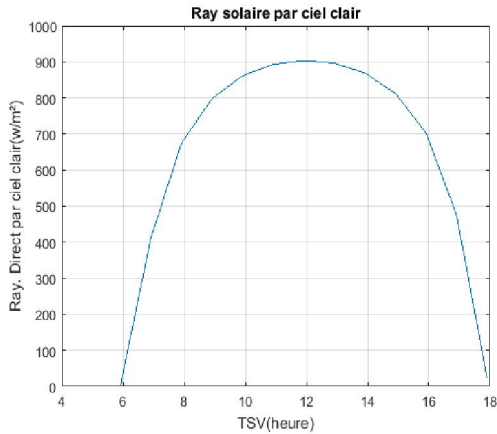


Figure IV.25: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 septembre.

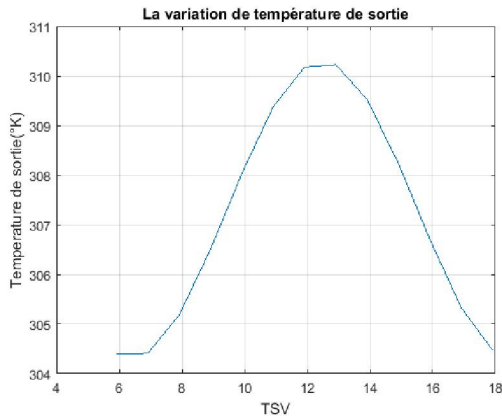


Figure IV.26: variation de la température de sortie de l'air en 15 septembre.

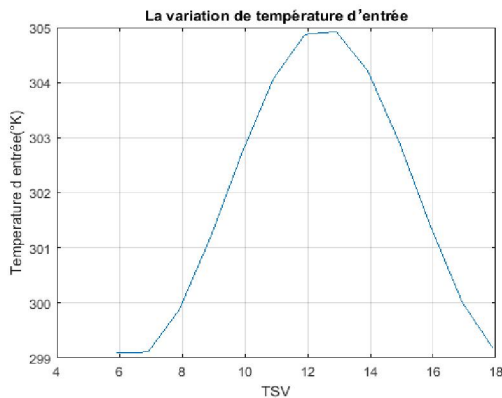


Figure IV.27: variation de la température d'entrée de l'air en 15 septembre.

15 octobre

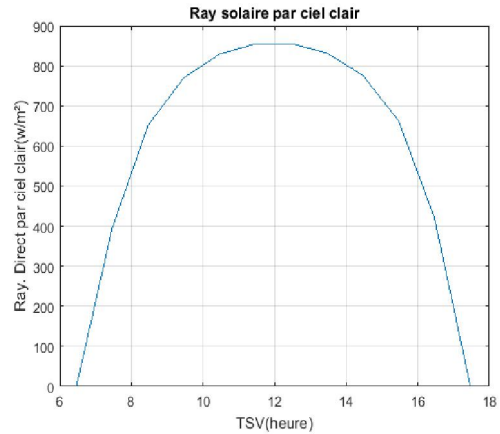


Figure IV.28: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 octobre.

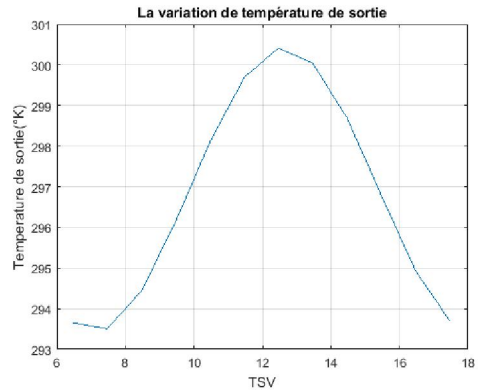


Figure IV.29: variation de la température de sortie de l'air en 15 octobre.

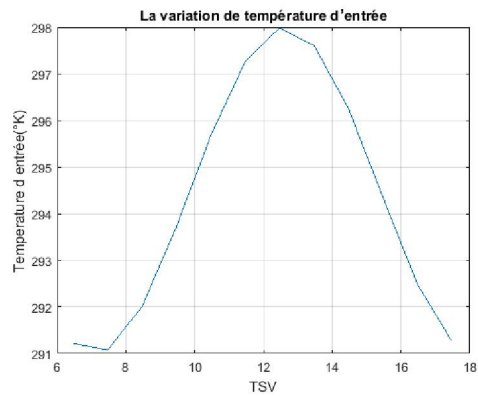


Figure IV.30: variation de la température d'entrée de l'air en 15 octobre.

15 novembre

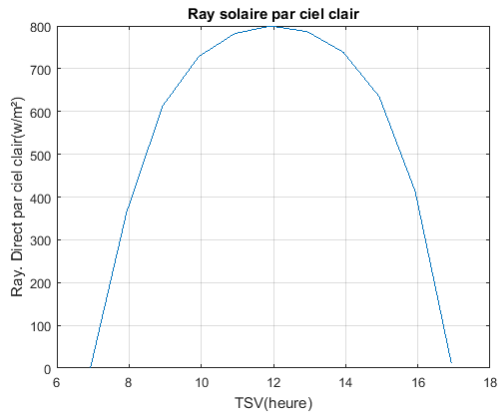


Figure IV.31: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 novembre.

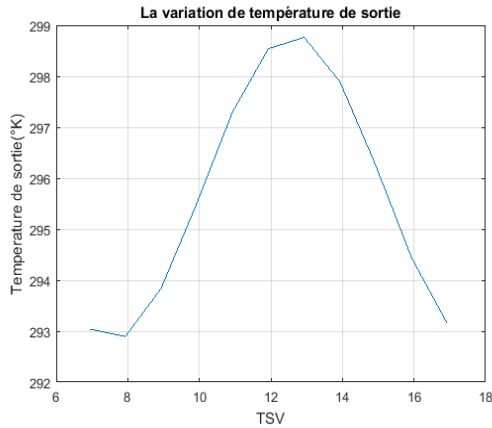


Figure IV.32: variation de la température de sortie de l'air en 15 novembre.

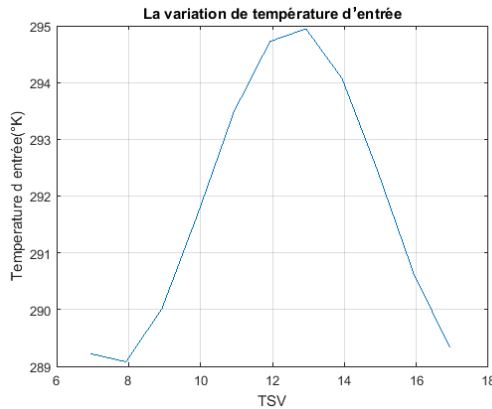


Figure IV.33: variation de la température d'entrée de l'air en 15 novembre.

15 décembre

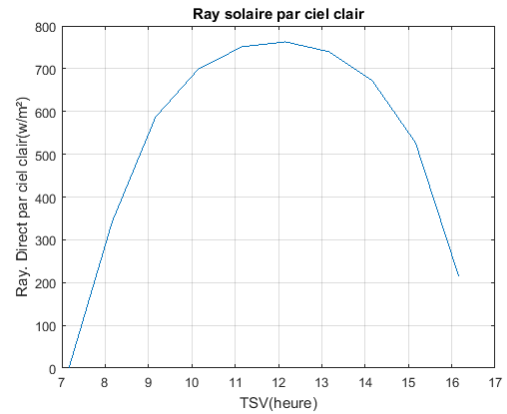


Figure IV.34: variation de rayonnement solaire pour ciel clair en 15 décembre.

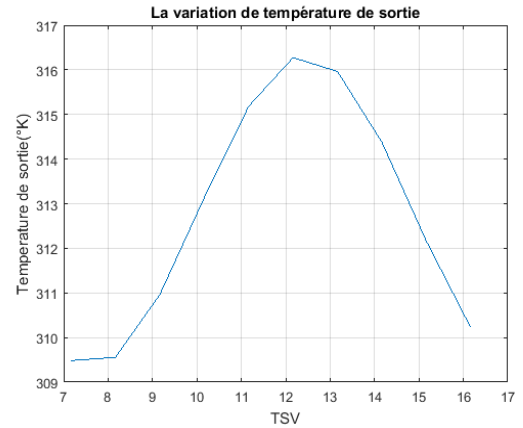


Figure IV.35: variation de la température de sortie de l'air en 15 décembre.

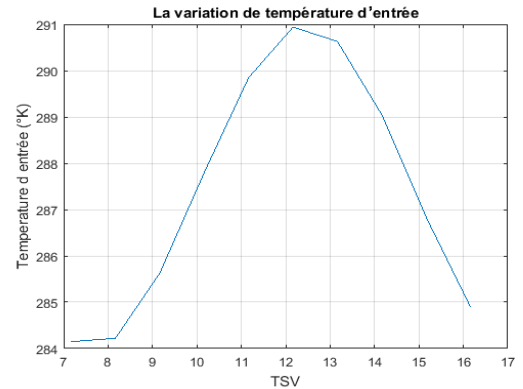


Figure IV.36: variation de la température d'entrée de l'air en 15 décembre.

L'ensemble des résultats peut être donnée sous forme d'abaques de courbes, comme ça peut être donné sous la forme de tableaux à partir desquels l'utilisateur pourra lire facilement les informations souhaitées.

A partir de ces courbes ou peut également calcules le nombre d'heures durant lesquelles, la source solaire pourra être exploitée. Ces est très important dans le cas de l'étude de faisabilité et rentabilité de system.

### **Conclusion**

Nous avons donné les résultats des calculs qu'on pourra donner comme support d'appui à la décision quant à la faisabilité de la source solaire comme alternative aux autres énergies pour différentes utilisations dans divers secteurs de l'économie nationale.

# Conclusion générale



### Conclusion générale

A l'issue de ce travail nous avons proposé une démarche relative à l'exploitation de l'énergie solaire pour des fins thermiques ou photovoltaïques.

L'utilisateur simple (particulier) ou potentiel (entrepreneur) pour servir connue méthode explicite lors de l'exécution de son projet. Cette démarche été menée par l'étude d'un cas réel illustrée par des modèles choisis a titre d'exemple.

Le travail présenté dans ce mémoire représente une démarche de la réalisation d'un projet solaire dans lequel nous avons présenté quelques paramètres qui doivent être pris en considération, notamment la température de l'air, la vitesse du vent et l'intensité du rayonnement solaire. Nous les avons évaluées à titre d'illustration pour pouvoir d'estimer la température de sortie d'un système solaire, permettant ainsi de calculer le nombre d'heures exploitables.

Nous avons abordé ce sujet, pour aider les porteurs de projets d'énergie solaire à les réaliser d'une façon efficace et rentable.

### Résumé

Cette étude présente les étapes essentielles d'un projet solaire, quel que soit son objectif, qu'il soit le séchage, le chauffage ou l'éclairage. Nous avons donné des modèles pour calculer la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Cependant il faut savoir qu'il existe d'autres modèles. Nous avons également et à titre indicatif mentionné les différents types de capteurs solaires existants et leurs technologies. Le travail est illustré par une application, le chauffage solaire (ou le séchage).

### Abstract

This study presents the essential steps of a solar project, whatever its objective, whether it is drying, heating or lighting. We have given models to calculate air temperature, wind speed and solar radiation. However, be aware that there are other models. We have also mentioned the different types of existing solar collectors and their technologies for information. The work is illustrated by an application, solar heating (or drying).

### ملخص

في هذه الدراسة وضعنا المراحل الأساسية لتحقيق مشروع استغلال الطاقة الشمسية مهما كان هدفه. وضعنا كذلك النماذج التي تمكن من حساب درجة حرارة الهواء , سرعة الرياح وشدة أشعة الشمس.

نلاحظ أن النماذج متعددة كما قمنا على سبيل التوضيح بإبراز مختلف أنماط اللواقط الشمسية وكذا تكنولوجيا تصنيعه.