

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

# **MEMOIRE**

Présenté

**AU DEPARTEMENT DE MECANIQUE**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**UNIVERSITE DE BATNA**

Pour l'obtention du diplôme

**MAGISTERE EN GENIE MECANIQUE**

**Option : Energétique**

Par

**Mr REDDAH Takieddine**

**THEME**

---

**Etude et dimensionnement d'un système solaire combiné**  
**Application: Logement individuel type F3 à Batna**

---

**Soutenue le 15/02/2015**

**Devant le jury :**

<b>Président</b>	<b>:</b>	<b>Mr C. BOUGRIOU</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ.Hadj Lakhdar Batna</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>:</b>	<b>Mr H. BENMOUSSA</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ.Hadj Lakhdar Batna</b>
<b>Examineur</b>	<b>:</b>	<b>Mr S. RAHAL</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ.Hadj Lakhdar Batna</b>
<b>Examineur</b>	<b>:</b>	<b>Mr S.A MAYOUF</b>	<b>M.C.A</b>	<b>Univ. Mohamed Boudiaf M'sila</b>

## Remerciement

Avant tout développement sur cette expérience, il apparait de commencer ce mémoire de magistère par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de cette formation.

Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail que je cite en particulier :

Mon encadreur monsieur H. BENMOUSSA, professeur au département de génie mécanique université de Batna, mon maître de mémoire qui m'a accompagné tout au long de ce mémoire de magistère avec beaucoup de patience et de pédagogie.

Je remercie monsieur C. BOUGRIOU, professeur au département de génie mécanique université de Batna.

Je remercie Mr S.RAHAL, professeur au département de génie mécanique université de Batna, en acceptant de faire parti de ce jury.

Mr S.A MAYOUF, professeur au département de physique université de M'sila, et je le remercie d'avoir bien voulu accepter de juger ce modeste travail.

J'adresse mes meilleurs remerciements à Mr A.MALEK, directeur de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables d'avoir m'accepté de faire un stage au niveau de C.D.E.R

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I Installation solaire thermique</b>	
Introduction	3
I.1 Eléments constitutifs d'une installation thermique	3
I.1.1 Capteurs solaires	4
I.1.2 Tuyauteries	9
I.1.3 Cuve de stockage	10
I.2 Les chauffe-eau solaires	10
I.3 Système solaire combiné (SSC)	13
I.3.1 Le système solaire combiné avec stockage de l'eau de chauffage en ballon	14
I.3.2 Le plancher solaire direct (PSD)	14
I.4 La position du système d'appoint	15
I.4.1 Appoint dans le stockage	15
I.4.2 Appoint en série avec le stockage	15
I.4.3 Appoint en parallèle avec le stock	15
I.4.4 Appoint complètement séparé	16
<b>Chapitre II Calcul du rayonnement solaire à Batna</b>	
Introduction	17
II.1 Rappel des données astronomiques	17
II.1.1 Mouvement de la terre	17
II.1.2 La position du soleil par rapport à la terre	18
II.1.3 Heures et temps	22
II.1.4 Durée et taux d'ensoleillement	25
II.2 Le rayonnement solaire	25
II.2.1 Composition	26
II.2.2 Nature	27
II.2.3 Principe de captation du rayonnement solaire	27
II.2.4 Composantes du rayonnement solaire	28
II.3 Programme de calcul du rayonnement solaire global	31

## **Chapitre III Dimensionnement de l'installation**

Introduction	33
III.1 Estimation des apports solaires	33
III.2 Estimation des déperditions thermiques	35
III.2.1 Présentation de l'habitation	35
III.2.2 Déperditions de la maison	36
III.2.2.1 Déperditions par l'enveloppe de la maison	36
III.2.2.2 Déperditions par renouvellement d'air	38
III.2.2.3 Apports internes	40
III.3 Estimation des besoins de chauffage	41
III.3.1 Calcul du coefficient de déperdition thermique GV	41
III.3.2 Calcul du coefficient des besoins thermiques BV	41
III.3.3 Méthode des degrés jours	42
III.4 Estimation des besoins en eau chaude sanitaire	44
III.5 La surface de captation du système	46

## **Chapitre IV Résultats et interprétations**

IV.1 Calcul de l'éclairement solaire pour le site de Batna	47
IV.2 Calcul des apports solaire à Batna	51
IV.3 Calcul de la puissance solaire utile	53
IV.4 Calcul des besoins de chauffage	54
IV.4.1 Calcul du coefficient de déperdition thermique (GV)	54
IV.4.2 Calcul des apports internes ( $Q_i$ )	54
IV.4.3 Calcul des degrés-jours (ndj)	55
IV.5 Calcul des besoins en eau chaude sanitaire	57
IV.6 Calcul de la surface de captation du système	58
IV.7 Bilan énergétique du système	58
IV.8 Interprétation des résultats	59

<b>Conclusion générale</b>	61
----------------------------	----

<b>Bibliographie</b>	62
----------------------	----



## Nomenclature générale

Symbole	Désignation	Unité
a	Azimut du soleil	Degré
a <sub>0</sub>	Rendement optique du capteur	%
a <sub>1</sub>	Conductance globale du capteur	W/K.m <sup>2</sup>
BV	Coefficient des besoins thermiques	W/C°
C <sub>p</sub>	Capacité thermique massique de l'eau	J/Kg.C°
C <sub>pa</sub>	Chaleur massique de l'air	J/Kg.C°
d	Numéro du jour de l'année	
D	Eclairement diffus	W/m <sup>2</sup>
D*	La composante verticale du rayonnement directe diffusé parvenant au sol	W/m <sup>2</sup>
dj	Durée du jour	Heure
Et	L'équation du temps	Minute
F	Facteur d'apport gratuit	
G	L'éclairement global	W/m <sup>2</sup>
G*	L'éclairement global reçu par la même surface	W/m <sup>2</sup>
GMTL	L'heure du lever du soleil	Heure
GMTC	L'heure du coucher du soleil	Heure
GV	Coefficient de déperdition thermique	W/C°
h	L'angle de la hauteur solaire	Degré
he	coefficient de convection thermique coté extérieur	W/m <sup>2</sup> .C°
hi	coefficient de convection thermique coté interieur	W/m <sup>2</sup> .C°
i	Angle d'inclinaison	Degré
I <sub>e</sub>	La quantité qui se déduit de la constante solaire	W/m <sup>2</sup>
I <sub>moy/jour</sub>	L'irradiation globale journalière	KWh/m <sup>2</sup>
I <sub>moy/mois</sub>	L'irradiation globale mensuelle	KWh/m <sup>2</sup>
I <sub>0</sub>	Eclairement dû au rayonnement solaire direct	W/m <sup>2</sup>
K	Coefficients de transmission surfacique	W/m <sup>2</sup> .C°

$K_f$	Coefficients de transmission surfacique des fenêtres	$W/m^2.C^\circ$
$K_m$	Coefficients de transmission surfacique des murs	$W/m^2.C^\circ$
$K_{po}$	Coefficients de transmission surfacique des portes	$W/m^2.C^\circ$
$L$	Longitude	Degré
$MSV$	Midi solaire vrai	Heure
$ndj$	Nombre de degré jour	
$n_j$	Nombre du jour	
$p$	Albédo du sol	%
$PSU$	Puissance solaire utile	$KWh/m^2$
$Q_i$	Les apports internes à la maison	$W$
$Q_c$	Les besoins énergétique réels	$KWh$
$Q_{ecs}$	La quantité réelle d'énergie nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire	$KWh/mois$
$Q_{ext}$	Déperditions totales coté extérieur	$W$
$Q_f$	Déperditions par les fenêtres	$W$
$Q_m$	Déperdition par le mur extérieur	$W$
$Q_p$	Déperditions par le plancher	$W$
$Q_{po}$	Déperditions par les portes	$W$
$Q_t$	Déperditions par le toit	$W$
$Q_{to}$	Déperditions totales par l'enveloppe de la maison	$W$
$Q_{th}$	Déperditions thermiques du logement	$W$
$R_{th}$	Résistance thermique	$m^2.C^\circ/w$
$S$	Eclairage direct	$W/m^2$
$SS$	Durée d'ensoleillement	Heure
$SS0$	Durée maximale d'ensoleillement	Heure
$S_{ca}$	Surface du captation du système	$m^2$
$S_f$	Surface des fenêtres	$m^2$
$S_m$	Surface du mur extérieure	$m^2$
$S_{po}$	Surface des portes	$m^2$
$T_a$	Température de l'environnement	$C^\circ$
$T_e$	Température de l'eau froide	$C^\circ$

$T_i$	Température de confort	C°
TL	Temps légal	Heure
Tu	Temps universel	Heure
TCS	Taux de couverture solaire	
TSM	Temps solaire moyen	Heure
TSV	Temps solaire vrai	Heure
$T_{SC}$	Température sans chauffage	C°
V	Volume de la maison	m <sup>3</sup>
Va	Débit de renouvellement d'air	m <sup>3</sup> /s
$\phi$	Latitude	Degré
$\delta$	La déclinaison	Degré
$\omega$	L'angle horaire	Degré
$\omega_l$	L'angle horaire au lever du soleil	Degré
$\omega_c$	L'angle horaire au coucher du soleil	Degré
$\sigma$	Taux d'ensoleillement	
$\lambda_0$	Longueur d'onde	N.m
$\gamma$	Angle d'orientation	Degré
$\eta$	Rendement du capteur	
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m.C°
$\rho$	Masse volumique de l'eau	Kg/ m <sup>3</sup>
$\rho_a$	Masse volumique de l'air	Kg/ m <sup>3</sup>



# Introduction générale

## Introduction générale

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973, conduit l'homme à s'intéresser à d'autres sources d'énergie renouvelable, au premier rang desquelles figure l'énergie solaire.

D'autre part, le réchauffement climatique causé par l'émission des gaz à effet de serre a conduit beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables constituent une source d'énergie inépuisable pour l'homme. Elles sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique).

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent. Le règne végétal, dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique via la photosynthèse. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur Terre.

L'utilisation des capteurs solaires pour chauffer l'eau chaude sanitaire (ECS) est une alternative mature. Toutefois une utilisation plus large est de plus en plus envisagée surtout avec des systèmes solaires combinés, qui fournissent de la chaleur pour l'eau chaude sanitaire et pour le chauffage des locaux. Ces systèmes combinés sont bien plus complexes, demandant plus d'attention dans la phase de conception et des systèmes de régulation automatique adéquats pour obtenir la performance souhaitée pendant le fonctionnement.

Pour le chauffage d'habitation, il est possible d'installer un chauffe-eau solaire, ou un chauffage solaire, il s'agit de capteurs vitrés installés le plus souvent sur la toiture, dans lesquels circule un liquide caloporteur réchauffé par le rayonnement solaire, qui transmet ensuite la chaleur à un chauffe-eau ou à un plancher chauffant basse température. Le rendement d'un panneau solaire thermique est trois fois meilleur que celui d'un panneau photovoltaïque (c'est-à-dire qu'un tel panneau récupère 30% à 40% de l'énergie solaire incidente) [1].

Notre travail porte essentiellement sur une étude d'une installation de chauffage et production d'eau chaude sanitaire pour un appartement type F3 à Batna.

Notre mémoire se compose de quatre chapitres :

Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique sur les installations solaires, tandis que le deuxième chapitre consiste à calculer le rayonnement solaire à Batna.

Au troisième chapitre on trouve le dimensionnement de notre installation de manière complète.

L'interprétation des résultats obtenus sont consignés dans le dernier chapitre.

# Chapitre I

## Installation solaire thermique

## Introduction

Les systèmes solaires combinés et les chauffe eau solaires sont des systèmes thermiques actifs qui utilisent l'énergie du soleil, via un capteur solaire pour convertir une partie des besoins (eau chaude sanitaire, chauffage).

On distingue deux types d'installation :

- Le chauffe eau solaire individuel (CESI) en réponse partielle au besoin d'eau chaude sanitaire (ECS).
- Le système solaire combiné (SSC) en réponse partielle aux besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire.

### I.1 Eléments constitutif d'une installation thermique

Tout système de conversion thermique de l'énergie solaire constitue les éléments suivants :

- 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.

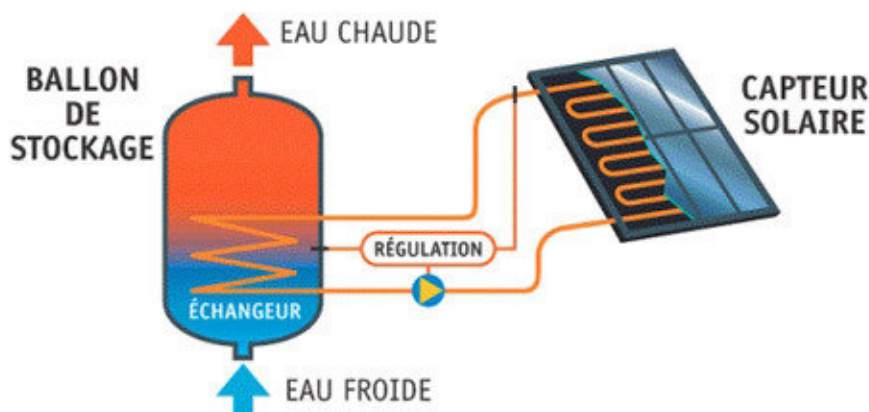


Figure (I-1) : schéma de principe d'une installation solaire thermique

### I.1.1 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 :

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

#### ➤ Type de capteur solaire

Actuellement, trois technologies coexistent dans le milieu du solaire thermique que l'on peut, toutefois, résumer en deux grandes familles de capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires plans.

Les capteurs solaires sous vide.

D'autres systèmes un peu particuliers existent aussi sur le marché, notamment les capteurs auto stockeurs, leur utilisation particulière ne convenant pas sous nos climats.

#### a) Capteur sous vide

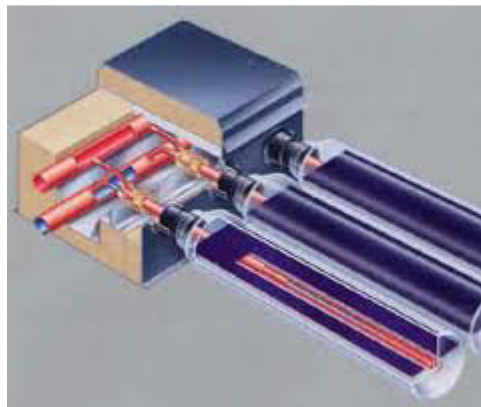
A l'intérieur des capteurs plans règne la pression de l'air ambiant, grasse souvent, des petites ouvertures pratiquées dans l'enveloppe du capteur. La circulation de l'air entre l'absorbeur et la plaque de couverture joue un rôle important dans le cadre des pertes énergétiques au niveau de la plaque absorbante, il est, toutefois, possible de remédier à cette déperdition par convection en éliminant l'air du capteur, c'est-à-dire en utilisant des capteurs sous vide.

Il ya quatre familles de capteurs sous vide, et chacun dépend d'une technique spécifique [2] :

- Le capteur à tube sous vide à circulation directe
- Le capteur à tube sous vide à « caloduc »
- Le capteur à tube sous vide à effet « thermos »
- Le capteur à tube sous vide à « schott »

- **Le capteur à tube sous vide à circulation directe**

Cette technique a été développée il ya une trentaine d'années afin d'améliorer les performances du capteur plan, en effet, la conception de l'absorbeur et les tuyaux de circulation du fluide caloporteur sont comme un capteur plan. Sauf que l'ensemble est suffisamment étroit pour être glissé à l'intérieur d'un tube en verre. Chaque tube est mis sous vide, de la même manière utilisée pour les tubes cathodiques des téléviseurs, assurant un très bas niveau de vide. Le principe est simple, mais la fabrication est difficile à cause des liaisons verre/métal nécessaires pour la circulation du fluide caloporteur.

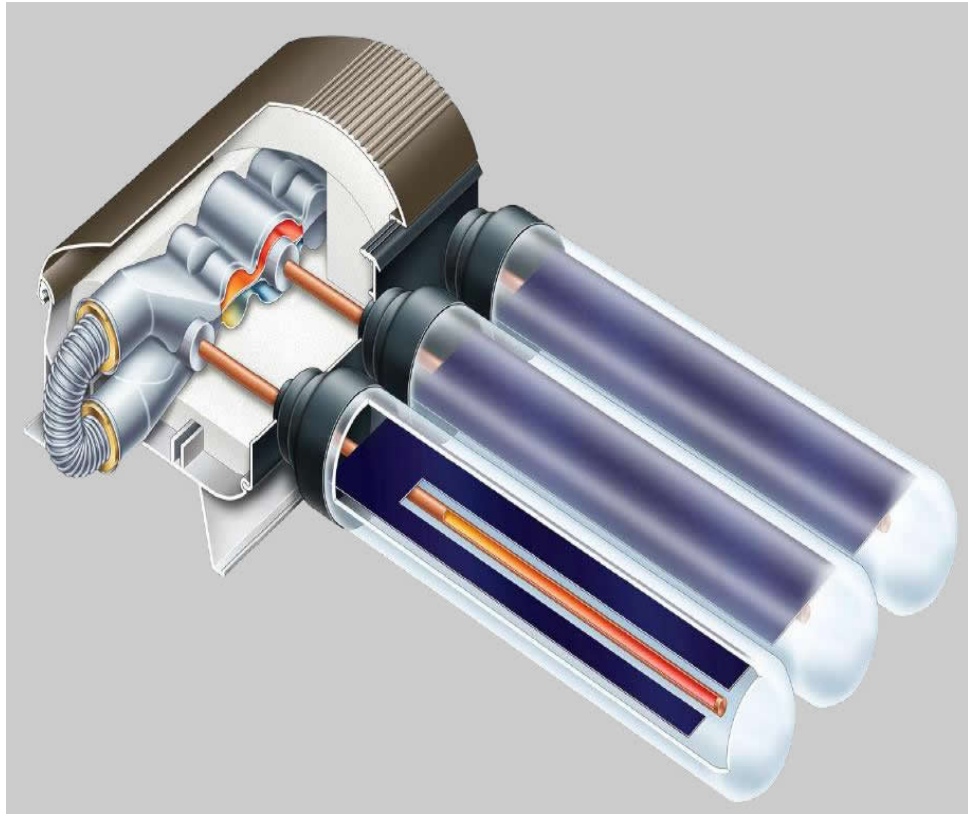


**Figure (I-2) : Capteur à tube sous vide à circulation directe**

- **Capteur à tube sous vide à caloduc**

Dans la deuxième variante, nommée Heat-pipe (figure I-3), l'absorbeur oblong est fixé à un caloduc dont les extrémités sont fermées après avoir y fait le vide. Ce tube est partiellement rempli d'un fluide présentant une courbe d'ébullition intéressante pour l'application visée (souvent 2 g d'eau). L'extrémité fermée en dehors du tube est insérée dans un échangeur de chaleur spécialement conçu à cet effet, dans lequel circule le fluide caloporteur transférant la chaleur vers le ballon de stockage. L'échauffement de l'absorbeur provoque l'évaporation (ébullition) du fluide présent dans le tube fermé, ce qui refroidit l'absorbeur. Les vapeurs formées s'élèvent dans la partie supérieure du tube où se situe l'échangeur de chaleur et s'y refroidissent dans cet échangeur a pour effet de condenser la vapeur, qui revient alors dans la partie inférieure du tube et refroidit la bande absorbante. L'échangeur fait donc office ici de condenseur.

Ce système présente l'avantage important de permettre l'installation, dans la section de condensation du caloduc, d'un clapet à fermeture automatique empêchant, à partir de 85°C, les vapeurs d'atteindre le condenseur interdisant, ainsi toute récupération de chaleur ultérieure. On peut, de la sorte éviter un échauffement trop élevé du système ou une température trop élevée de l'eau pour le sanitaire.



**Figure (I-3) : Capteur à tube sous vide « Heat-pipe»**

- **Capteur à tube sous vide à tube thermos**

Comme le montre la figure (I-4), ces capteurs utilisent une bouteille de verre à double paroi (d'une longueur de  $\pm 2$  m et d'un diamètre  $\pm 10$  cm). Les deux parois sont reliées de manière étanche à l'air au niveau du goulot. L'intérieur de la bouteille est soumis à l'air atmosphérique, tandis que l'espace compris entre les deux parois est sous vide.



. La paroi extérieure est transparente tandis que la paroi intérieure est pour sa part pourvue, du côté sous vide, d'un revêtement à absorption sélective de l'autre, elle est en contact avec deux profilés semi-circulaires métalliques, eux- même en contact avec les branches de l'absorbeur en U. La chaleur se créant dans le revêtement absorbant par suite du rayonnement solaire se transmet via les bandes semi-circulaires aux tubes métalliques, d'où elle est évacuée par le fluide caloporteur



**Figure (I-4) : Capteur à bouteilles à tubes thermos**

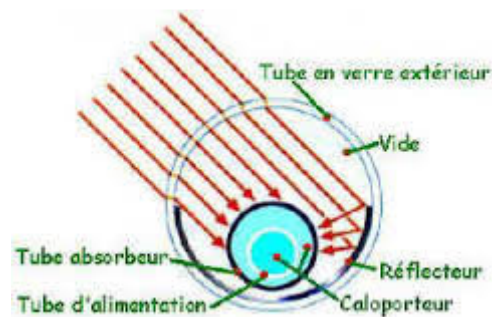
Dans ce genre de capteur, le revêtement absorbant se trouve dans la partie sous vide, tandis que le système de refroidissement de l'absorbeur se trouve dans la bouteille thermos, ce qui permet de réduire les déperditions calorifiques.

La fabrication des tubes à l'assemblage des capteurs est simplifiée, car il n'y a pas de soudures verre/métal. Par contre, les tubes thermos sont particulièrement fragiles au point de liaison avec le collecteur, où la partie extérieure et la partie intérieure de chaque tube se rejoignent.

- **Capteur à tube sous vide « Schott »**

Le tube sous vide fabriqué par l'entreprise Schott-Rohrglas en Allemagne utilise le principe « thermos » avec plusieurs perfectionnements techniques. D'abord, une

partie de la paroi intérieure du tube extérieur est un réflecteur cylindrique et ensuite, le tube intérieur sert comme absorbeur aussi bien qu'échangeur de chaleur avec le fluide caloporteur. L'utilisation des métaux est réduite à des traitements de surface du tube et les différentes pièces du collecteur.



**Figure (I-5) : Capteur à tube sous vide « Schott »**

### **b) Les capteurs plans**

Les capteurs plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température sans concentration du rayonnement solaire. Le flux d'énergie tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser  $1\text{KW/m}^2$ . Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à  $100\text{ C}^\circ$ . Par contre ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent les composantes directes et diffuse du rayonnement incident. Ils sont principalement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage d'habitation ou de piscines.



**Figure (I-6) : Capteur plan solaire**

➤ **Différences entre les capteurs plans et sous vide [3]**

Le capteur sous vide, de par le vide qui entoure l'absorbeur, sera moins influencé par la température extérieure par rapport au capteur plan qui, lui sera en contact au travers de la vitre et du caisson avec la température extérieure.

Les capteurs sous vide ont un rendement optique certes, inférieur aux capteurs plans.

### **I.1.2 Tuyauteries**

La tuyauterie sert au transfert du fluide caloporteur. Elle doit être fabriquée à partir d'un matériau inoxydable ou être traitée pour résister à la corrosion et doit aussi calorifugé avec soin afin de diminuer les pertes thermiques pendant le transfert.

### **I.1.3 Cuve de stockage**

L'inconstance des conditions météorologiques (baisse des températures, baisse de l'éclairement, passage des nuages, ..... ) empêche une utilisation directe de l'eau chauffée grâce au capteur et contraint à l'utilisation de cuves de stockage parfaitement calorifugée qui permettent d'emmagasiner l'eau chaude obtenue avec le moins des pertes possibles.

Pour ce faire, il convient de déterminer le volume de stockage optimal par rapport à la surface de captation puisqu'il n'est pas avantageux d'augmenter cette dernière si la cuve est petite. A contrario, un réservoir trop volumineux perd trop de chaleur et est plus difficile à réchauffer. Il faut aussi que le réservoir soit placé à l'intérieur et en un lieu proche des capteurs pour raccourcir au maximum la tuyauterie et diminuer ainsi les pertes pendant le trajet de l'eau de l'absorbeur jusqu'au lieu de stockage.

## **I.2 Les chauffe-eau solaires [4]**

Le principe d'un chauffe-eau solaire est simple, des panneaux solaires sont installés généralement en toiture, transforment la lumière du soleil en chaleur. Un circuit de plomberie permet de ramener cette chaleur dans un ballon, où l'eau chaude sanitaire est stockée en attendant d'être utilisée.

Durant la journée le soleil fait monter en température de l'eau du ballon. Lorsque le soleil est trop voilé une régulation arrête la circulation entre les panneaux et le ballon. L'eau chaude, protégée par l'isolation du ballon, reste disponible plusieurs jours pour les usages domestiques.

Une source d'énergie complémentaire permet de pallier les périodes de mauvais ensoleillement prolongé. Elle se déclenche lorsque la température de l'eau dans le ballon descend en dessous d'une température de consigne.

### **➤ Les différents types de chauffe-eau solaire**

Il existe quatre types de chauffe-eau solaire :

- Monobloc
- Thermosiphon

- Circulation forcé
- Auto vidange

### a) Les chauffe-eau monobloc

Ce sont les chauffe-eau les plus simples, le ballon et le panneau solaire formant un seul ensemble, d'où leur appellation. C'est directement l'eau chaude sanitaire qui circule dans les panneaux. Réchauffée par le rayonnement solaire, l'eau devient moins dense et monte dans le ballon situé légèrement au-dessus du panneau. Il n'y a donc pas besoin de pompe. Néanmoins, le ballon d'eau chaude doit être situé à proximité immédiate du panneau en général sur la toiture ce qui pose parfois des problèmes d'esthétique et d'isolation. Le chauffe-eau dépasse de la toiture, et le ballon est à l'extérieur du logement, en plein vent.



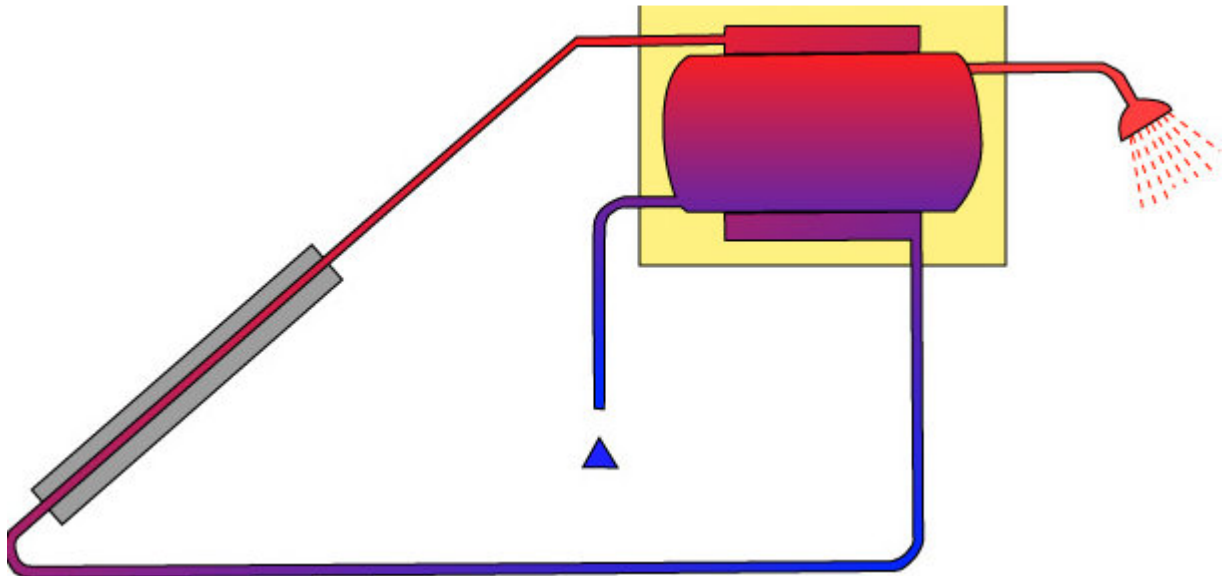
Figure (I-7) : Chauffe eau solaire monobloc

### b) Les chauffe-eau à thermosiphon

Pour éviter les inconvénients du système monobloc, tout en conservant les avantages et la simplicité, on peut séparer les panneaux du ballon d'eau chaude. Tant que les panneaux restent plus bas que le ballon de stockages, l'eau va pouvoir continuer à circuler naturellement par effet thermosiphon.

A la sortie du panneau l'eau est plus chaude donc plus légère, et monte vers le ballon. Elle est remplacée par l'eau la plus froide du ballon, qui est plus lourde et qui descend vers le bas des panneaux.

Mais sous certains climats, on ne peut malheureusement pas faire circuler de l'eau dans les panneaux solaire toute l'année, à cause des risques de gel. Deux alternatives sont alors envisageables : les chauffe-eau à circulation forcée et fluide antigel, et les chauffe-eau à auto vidange.



**Figure (I-8) : Système à thermosiphon**

### c) Les chauffe-eau à circulation forcée

Les panneaux solaires seront remplis avec un fluide qui ne craint pas le gel (en général de l'eau glycolée). Comme ce fluide est impropre à la consommation et ne doit pas être mélangé avec l'eau chaude sanitaire, la chaleur sera récupérée dans le ballon à travers un échangeur. Un serpentin à l'intérieur du ballon joue ce rôle et évite tout contact entre l'eau chaude et le fluide caloporteur. Une pompe assure le transfert du fluide entre les capteurs solaires et l'échangeur. La position du ballon par rapport aux panneaux n'a plus d'importance.

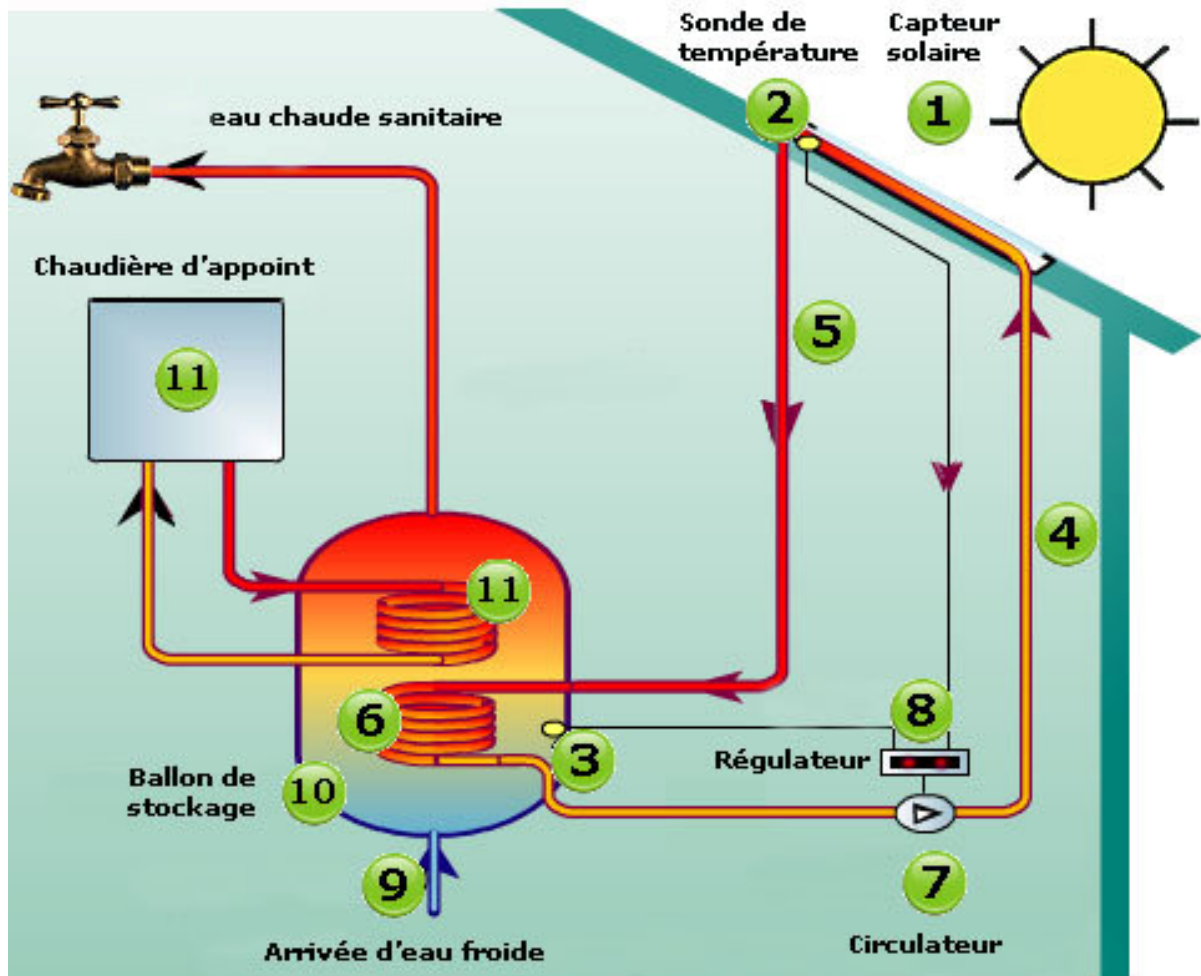


Figure (I-9) : Système à circulation forcée

### I.3 Système solaire combiné (SSC) [4]

Aussi appelé combi système, c'est une installation qui utilise le rayonnement solaire pour couvrir une partie des besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire. Comme son nom l'indique, le système solaire combiné, associe chauffage de l'eau chaude sanitaire et chauffage de l'habitat.

En plus de réchauffer l'eau sanitaire, le caloporteur transmet sa chaleur au réseau d'eau de chauffage également stockée dans un ballon et toujours par le biais d'un échangeur thermique. C'est ensuite l'eau de chauffage qui circule dans les radiateurs pour réchauffer

l'air ambiant .Là encore, il convient de prévoir une chaudière classique pour prendre le relais en cas de besoins.

On distingue deux types de système solaire combiné (SSC) :

### **I.3.1 Le système solaire combiné avec stockage de l'eau de chauffage en ballon**

Ce système est basé sur le stockage de l'eau chaude solaire dans un réservoir afin de restituer la chaleur tout au long de la journée. Il est constitué de quatre principaux éléments :

- Des capteurs solaires thermiques identiques utilisés avec un chauffe-eau solaire. Ils reçoivent le rayonnement solaire et ainsi chauffe l'eau.
- Un réservoir tampon d'eau de chauffage de grande capacité (environ 700L) intégrant la production d'eau chaude sanitaire.
- Une chaudière raccordée au réservoir pour compléter le chauffage, si besoin.
- Un ensemble de régulation.

Le fluide chauffé dans les capteurs passe dans un échangeur situé dans la partie basse du ballon de stockage. L'eau froide est réchauffée au contact de l'échangeur et lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'ensoleillement, une sonde de température déclenche l'appoint.

### **1.3.2 Le plancher solaire direct (PSD)**

Le principe de fonctionnement du plancher solaire direct est même que celui d'un SSC avec stockage, mais il n'utilise pas de réservoir tampon puisque c'est le plancher chauffant qui sert de réservoir. L'inertie thermique de la dalle permet de restituer la nuit, la chaleur accumulée le jour. Un ballon autonome assure la production et le stockage de l'eau chaude sanitaire. Une chaudière permet de compléter les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire.



## **I.4 La position du système d'appoint [4]**

On considère en généralement quatre positions du système d'appoint par rapport au stockage :

- Dans le stockage
- En série avec le stockage
- En parallèle avec le stockage
- Complètement séparé du système solaire

### **I.4.1 Appoint dans le stockage**

Cette disposition est dextrement défavorable est devra être évitée autant que possible, mais a part le cas ou la cuve est réellement stratifiée et l'appoint est situé en partie haute que l'on peut considérer, en première approximation, comme un ballon en série avec le ballon solaire, ce dispositif est limité à l'appoint de type électrique par résistance thermostatée et utilisé presque exclusivement pour les chauffe-eau solaire

### **I.4.2 Appoint en série avec le stockage**

C'est une solution peu chère, et à la régulation simple. L'inconvénient majeur de la mise en série de l'appoint et du stock est que l'eau des retours chauffage va maintenir le stock à des températures qui ne permettront pas de récupérer le maximum d'énergie solaire.

En d'autres termes, selon le type de distribution adopté, la température du stock ne descendra jamais sous la température des retours chauffages, mis à part les pertes du stockage.

A titre de sécurité on peut prévoir des dispositifs (by-pass du ballon solaire par exemple) permettant d'éviter des retours à température excessive dans le stock.

### **I.4.3 Appoint en parallèle avec le stock**

L'appoint en parallèle avec le stock est une solution performante :

- Il ne fonctionnera que lorsque le stock ne pourra rien fournir
- Pas de problème de température de retour
- Un seulet unique système de distribution des calories
- Par contre, ce système nécessite une régulation soignée.

#### **I.4.4 Appoint complètement séparé**

Ce système présente les meilleures performances thermiques. Il permet une bonne utilisation des calories solaires, mais il demande deux dispositifs distincts pour distribuer les calories.

Les ventilo-convecteurs (solaire) avec résistance électrique terminale rentrant dans cette catégorie, l'électricité est presque toujours employée dans ce cas, vu son faible coût relatif d'installation.

Néanmoins, une régulation soignée s'impose pour donner toujours la priorité aux surfaces de chauffage alimentées en calories solaire.

# Chapitre II

## Calcul du rayonnement solaire à Batna

## Introduction

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

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes.

## II.1 Rappel des données astronomiques [6]

### II.1.1 Mouvement de la terre

La terre est animée d'un mouvement de rotation direct et uniforme d'ouest en est, autour de son axe unissant ses deux pôles. En prenant le soleil comme point de référence, ce mouvement appelé rotation de la terre sur elle même, ce mouvement s'accomplit en une période moyenne de 24 heures.

Si l'on distingue sur un papier les différentes positions de coordonnées équatoriales qu'occupe la terre durant toute l'année dans la sphère céleste, et qui joint ces points d'un trait continu, on obtient un cercle appelé l'écliptique.

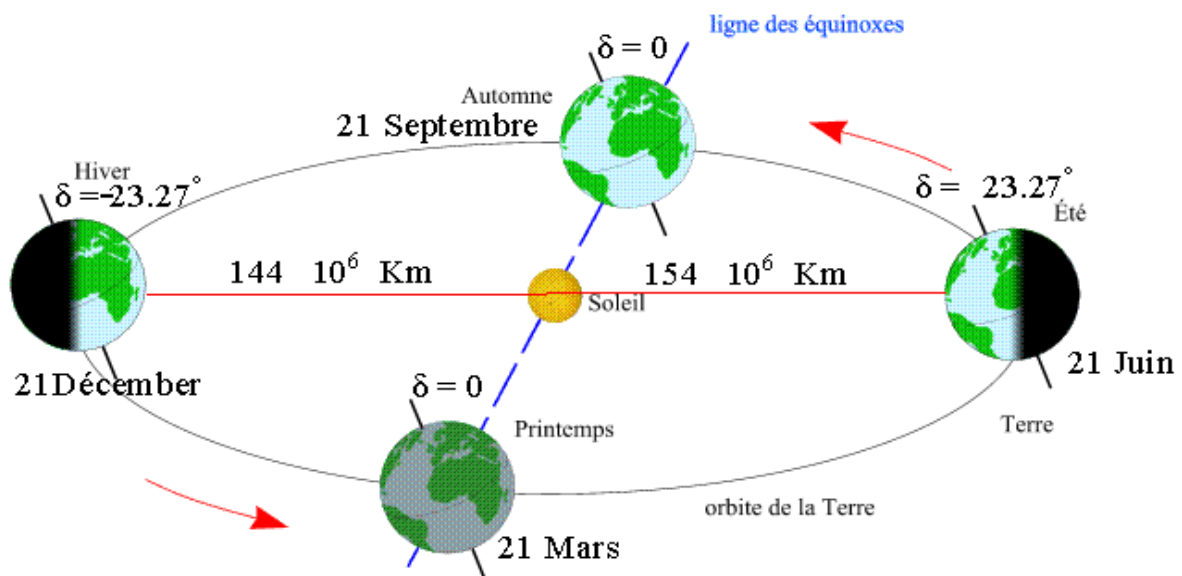


Figure (II-1): Mouvement de la terre autour du soleil

### II.1.2 La position du soleil par rapport à la terre

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

#### ➤ Les coordonnées géographiques terrestres

Se sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

##### a) Latitude ( $\phi$ )

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud.

##### b) Longitude (L)

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et négative à l'est du méridien origine.

##### c) Le méridien

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude, le méridien pris pour origine ( $0^\circ$ ) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien.

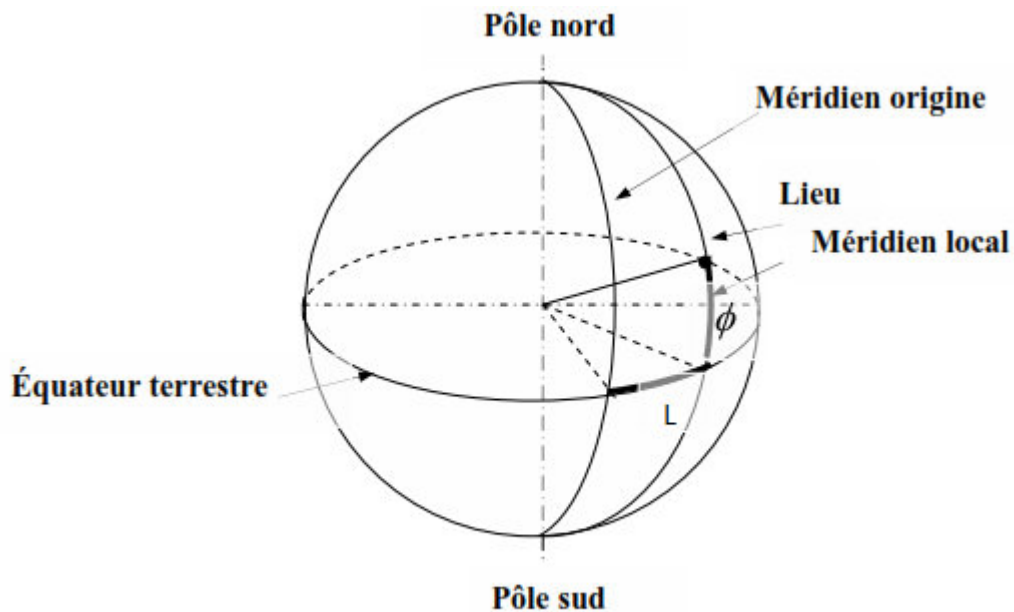


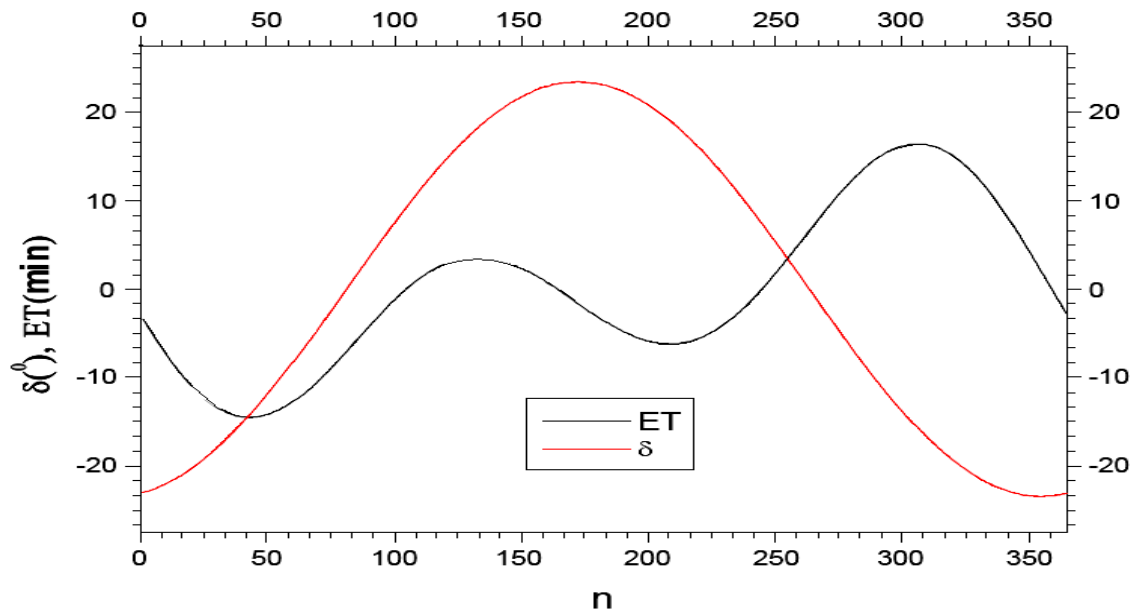
Figure (II-2): Les coordonnées terrestres d'un lieu donné

### ➤ Les coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$ .

#### a) La déclinaison ( $\delta$ )

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année comme, elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'été ( $+23^{\circ},27'$ ) et au solstice d'hiver. Elle varie selon une loi périodique comme le montre la figure (II-3).



**Figure (II-3): La variation de la déclinaison et l'équation du temps**

Son expression est donnée par :

$$\delta = 23,45 \sin \left[ 360 \left( \frac{d - 80}{365} \right) \right] \quad (\text{II-1})$$

Où d est numéro du jour à partir du 1er janvier

### **b) L'angle horaire ( $\omega$ )**

C'est l'angle formé par le méridien céleste et la projection de la direction terre/solaire sur le plan de l'équateur céleste, ou encore, c'est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire dans sa course d'est en ouest par rapport au méridien local. Il est nul à midi solaire, négatif le matin et positif en après midi. L'angle horaire est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15^\circ (TSV - 12) \quad (\text{II-2})$$

Où TSV est le temps solaire vrai.

➤ **Les coordonnées horizontales**

Le soleil est repéré par les deux grandeurs suivantes :

**a) L'azimut (a)**

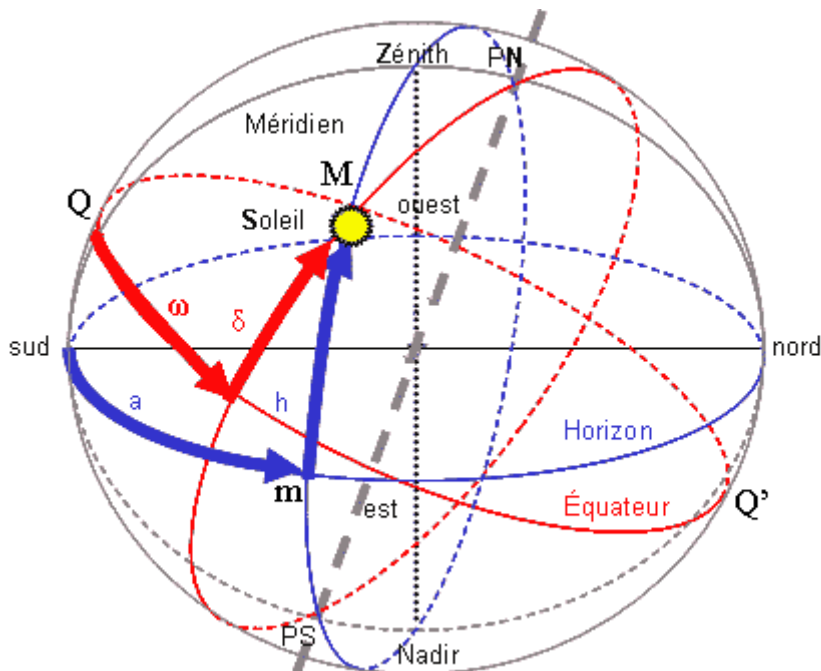
L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. Il se compte de 0° à 360° à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donné par :

$$\sin(a) = \frac{\sin(\omega) \cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (\text{II-3})$$

**b) L'angle de la hauteur solaire (h)**

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal. L'angle de la hauteur solaire est donné par :

$$\sin(h) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\omega) \cos(\delta) \cos(\phi) \quad (\text{II-4})$$



**Figure (II-4): Les coordonnées horizontales et équatoriales.**



### II.1.3 Heures et temps

La terre subit deux types de déplacement : La rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notation de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de  $15^\circ$ . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai.

➤ **Le temps universel (TU)**

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire.

$$TL = TU + \text{décalage} \quad (\text{II-5})$$

➤ **Le temps solaire moyen (TSM)**

Il se déduit de l'équation suivante :

$$TSM = TU + \frac{L}{15} \quad (\text{II-6})$$

Avec TSM en heure

➤ **Le temps solaire vrai (TSV)**

C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil.

$$TSV = TSM + \frac{Et}{60} \quad (\text{II-7})$$

Où Et est l'équation du temps

➤ **L'équation du temps (Et)**

La variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté Et :

$$Et = - \left[ \begin{array}{l} 0,0002 - 0,4797 \cos(w' d) + 3,2265 \cos(2w' d) + 0,0903 \cos(3w' d) \\ + 7,3509 \sin(w' d) + 9,3912 \sin(2w' d) + 0,3361 \sin(3w' d) \end{array} \right] \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$w' = \frac{2\pi}{365} \quad (\text{II-9})$$

d est le numéro du jour de l'année

Et est exprimé en minute

➤ **Numéro du jour de l'année (d)**

Le calcul de numéro dans l'année du jour consiste à ajouter le numéro du jour dans le mois au numéro caractéristique de chaque mois. d varie de 1 (1er janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile. Le tableau ci-dessous donne les numéros caractéristiques de chaque mois.

**Tableau II-1 : Numéro du jour de l'année.**

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
<b>Numéro du Dernier jour du mois</b>	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334	365

➤ **Durée du jour (dj)**

Le module  $\omega_1$  de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  dans la formule (II-4) ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_1) = -\tan(\phi) \tan(\delta) \quad (\text{II-10})$$

L'angle horaire  $\omega_c$  au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc  $\omega_c = -\omega_1$  et la durée du jour vaut :

$$d_j = 2 \frac{\omega_1}{15} \quad (\text{II-11})$$

L'heure solaire au lever et coucher du Soleil a donc pour valeur :

$$GMTL = MSV - \frac{d_j}{2} \quad (\text{II-12})$$

$$GMTC = MSV + \frac{d_j}{2} \quad (\text{II-13})$$

$$MSV = 12 + \frac{L}{15} + \frac{Et}{60} \quad (\text{II-14})$$

Où MSV est le midi solaire vrai

### II.1.4 Durée et taux d'ensoleillement

#### ➤ Durée d'ensoleillement (SS)

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus en moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages.

On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation (SS) le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil.

#### ➤ Taux d'ensoleillement ( $\sigma$ )

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement.

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (\text{II-15})$$

La durée maximale d'ensoleillement  $SS_0$  pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule (II-11).

## II.2 Le rayonnement solaire [7]

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrême élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. Ce rayonnement transporte l'énergie solaire, indispensable à toute vie terrestre.

### II.2.1 Composition

L'émission d'ondes électromagnétiques par le soleil est convenablement modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, et peut donc être décrit par la loi de Planck. Le maximum d'émission est dans le jaune ( $\lambda_0=570$  nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1 % d'ultraviolets.

Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, une partie du rayonnement solaire a été absorbée. On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (qui absorbe une partie importante des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau.

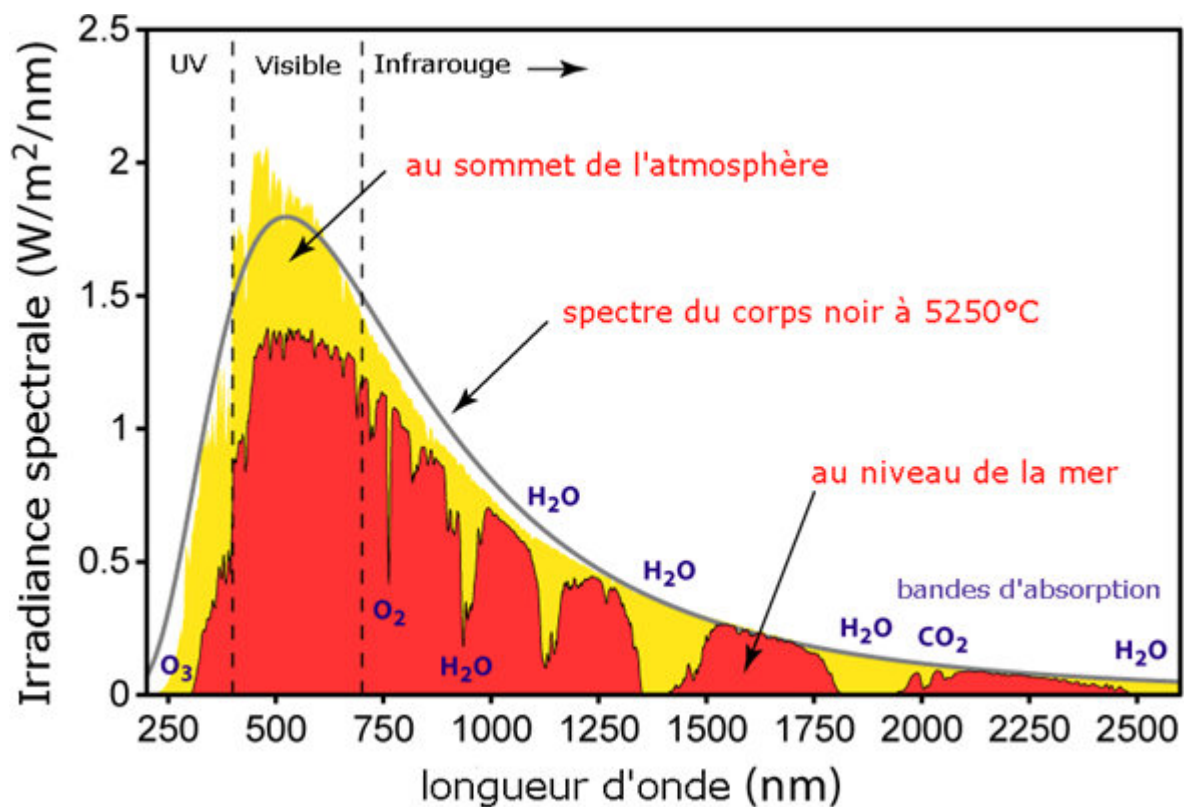


Figure (II-5) : Distribution spectrale du rayonnement solaire

### II.2.2 Nature

L'intensité du rayonnement n'est pas constante et augmente lors des éruptions solaires pendant les maxima du cycle solaire. Le rayonnement solaire se décompose en trois parties:

- L'émission du Soleil calme (voir constante solaire).
- La composante lentement variable.
- Les sursauts solaires.

L'étude du rayonnement électromagnétique du Soleil par la radioastronomie a permis d'énormes progrès dans la compréhension du fonctionnement interne du Soleil. Les ondes radio émises par le Soleil proviennent principalement des plasmas constituant la chromosphère et la couronne. Les ondes centimétriques correspondent aux couches basses de la chromosphère tandis que la couronne émet des ondes décimétriques.

Le plasma agit en fait comme un filtre passe-haut dont la fréquence de coupure dépend de la densité électronique du milieu.

### II.2.3 Principe de captation du rayonnement solaire

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur des rayons solaires qui les transforment en chaleur, en absorbant les rayons solaires provenant de toutes les directions. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé par le ciel, mais aussi de tout l'environnement.

Un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite que la surface d'ouverture du collecteur, afin d'augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur. Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. La figure suivante montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l'énergie solaire.

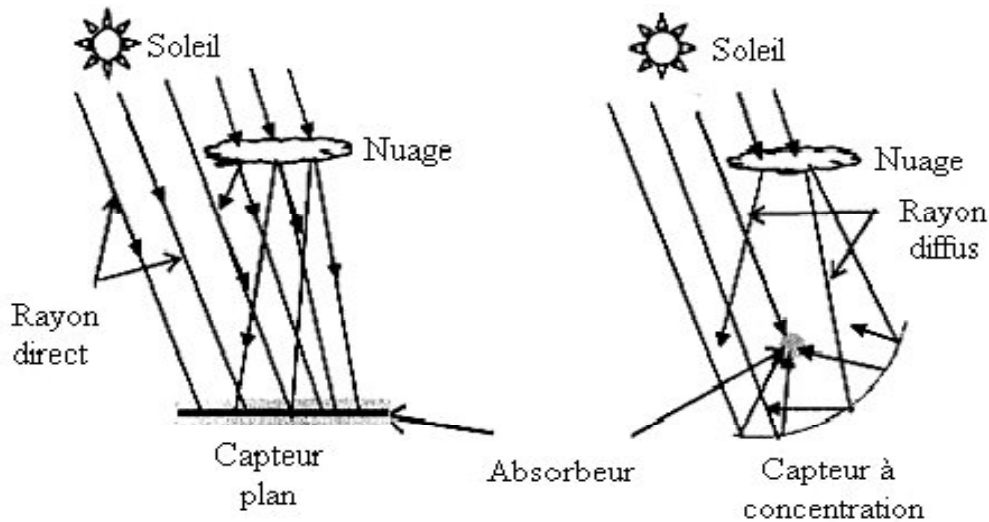


Figure (II-6) : Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire

## II.2.4 Composantes du rayonnement solaire

On subdivise le rayonnement solaire parvenant au sol en trois composantes principales sont :

### ➤ Eclairage dû au rayonnement solaire direct ( $I_0$ )

Si l'on appelle  $I_0$  l'intensité du rayonnement solaire direct provenant en un point M de la surface de captation, est variable avec la hauteur du soleil  $h$ . Cette variation peut être approchée par la formule suivante :

$$I_0 = A \exp \left[ - \frac{1}{B \sin(h + C)} \right] \quad (\text{II-16})$$

$I_0$  en  $\text{W/m}^2$  et  $h$  en degré

A, B, C dépendent de l'état des troubles atmosphériques, et l'on admet généralement :

Hypothèses	A	B	C
Conditions normales	1230	3.8	1.6
Ciel très pur	1220	6	1
Zone industrielle	1260	2.3	3

➤ **Eclairement direct (S)**

Où éclairement parvenant au sol sous un angle solide limité au seul disque solaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide.

L'expression de l'éclairement direct  $S(i, \gamma)$  sur un plan d'inclinaison  $i$  et angle d'orientation  $\gamma$  quelconques est donné par :

$$S(i, \gamma) = I_0 [\cos(h) \sin(i) \cos(\gamma - a) + \sin(h) \cos(i)] \quad (\text{II-17})$$

➤ **Eclairement diffus (D)**

Où éclairement diffusé par les composantes de l'atmosphère, provenant de la totalité du ciel à l'exception du disque solaire. La composante verticale du rayonnement directe diffusé parvenant au sol vaut alors :

$$D^* = 0.5 (I_e - I_0) \sin(h) \quad (\text{II-18})$$

$I_e$  : est une quantité qui se déduit de la constante solaire égale à  $1353 \text{w/m}^2$

Finalement, on a la formule suivante :

$$D(i) = \left( \frac{1 + \cos(i)}{2} \right) D^* + \left( \frac{1 - \cos(i)}{2} \right) P.G^* \quad (\text{II-19})$$

$G^*$  : est l'éclairement global reçu par la même surface.

$p$ : albédo du sol avoisinant.



$G^*$  est donné par les relations suivantes :

$$G^* \text{ max} = 1130 (\sin(h))^{1.15} \quad \text{Conditions normales} \quad (\text{II-20})$$

$$G^* \text{ min} = 995 (\sin(h))^{1.25} \quad \text{En zone industrielle} \quad (\text{II-21})$$

$$G^* \text{ moy} = 1080 (\sin(h))^{1.22} \quad \text{Par ciel très pur} \quad (\text{II-22})$$

➤ **Eclairement global (G)**

C'est la somme de l'éclairement direct + l'éclairement diffus.

$$G = S + D \quad (\text{II-23})$$

### II.3 Programme de calcul du rayonnement solaire global

Un programme informatique a été développé pour simuler le rayonnement solaire direct, diffus et global à Batna. Le programme est écrit en langage FORTRAN 90. Il est formé de deux parties essentielles :

La première partie : fait le calcul des facteurs géométriques tel que :

- Calcul de la déclinaison et la durée du jour.
- Calcul de l'heure du lever et du coucher du soleil.
- Calcul du temps solaire vrai.

La deuxième partie : fait le calcul des paramètres suivants :

- Calcul de l'angle horaire et la hauteur angulaire du soleil.
- Calcul de l'éclairement direct et diffus.
- Calcul de l'éclairement global.

L'organigramme ci-après donne les grands axes de calcul.

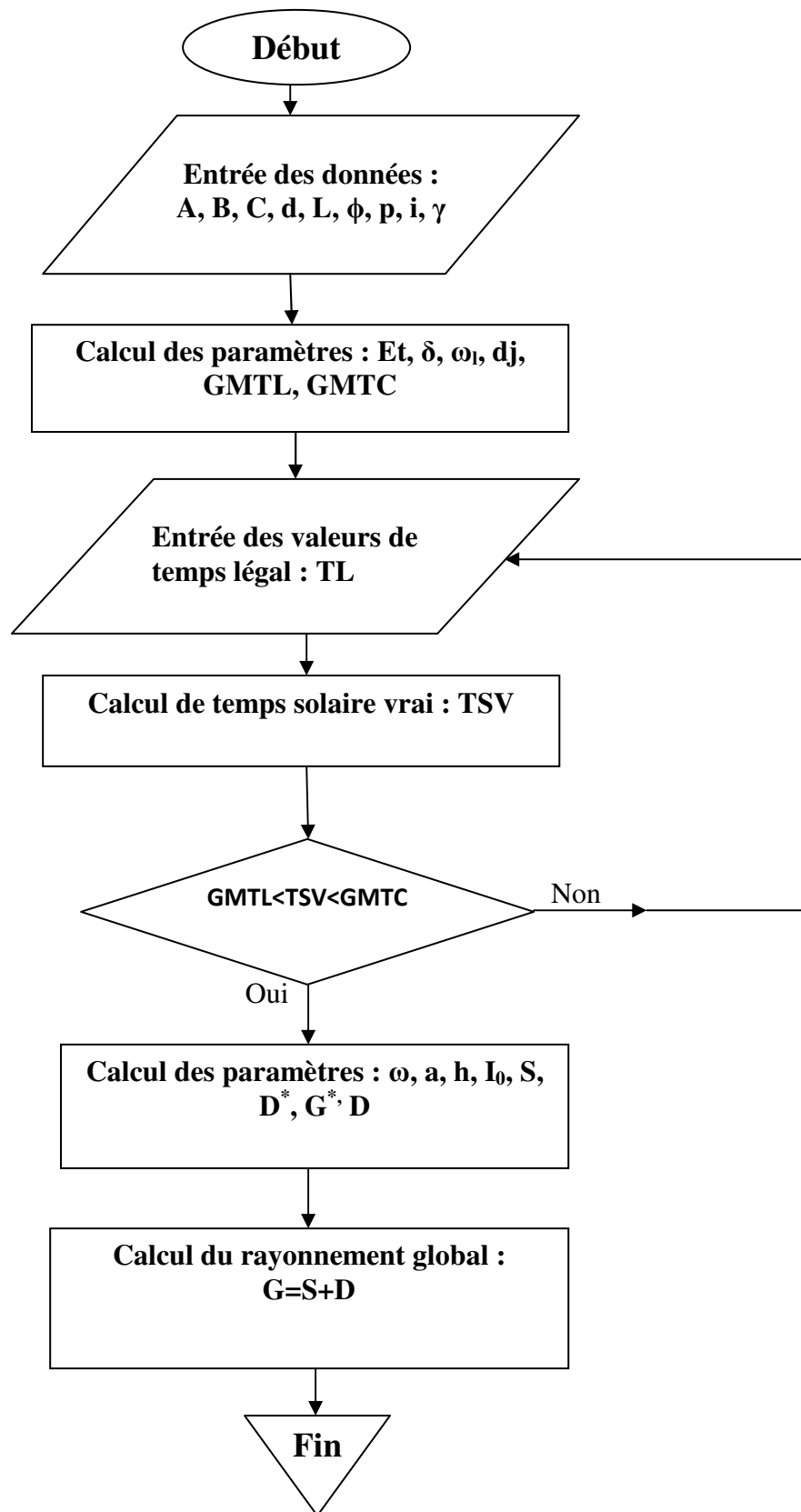


Figure (II-7) : Organigramme du programme de calcul du rayonnement solaire global

# Chapitre III

## Dimensionnement de l'installation

## Introduction

L'établissement du bilan énergétique d'une installation solaire suppose tout d'abord la connaissance de l'énergie solaire qu'elle reçoit. Cette énergie sera définie par plusieurs facteurs, cela en fonction des paramètres essentiels à prendre en charge tels que les déperditions thermiques et les besoins auxquels il faudra subvenir.

### III.1 Estimation des apports solaires

A partir du calcul de la puissance solaire sur une surface inclinée de  $35^{\circ},55$  par rapport à l'horizontal pour la wilaya de Batna, nous avons déterminé l'irradiation mensuelle par les formules suivantes [8] :

$$I_{\text{moy/jour}} = G_{\text{moy/jour}} \times dj \quad (\text{III-1})$$

$$I_{\text{moy/mois}} = I_{\text{moy/jour}} \times nj \quad (\text{III-2})$$

#### ➤ La puissance solaire utile [8]

La puissance solaire disponible est donnée par la formule suivante :

$$PSU = I_{\text{moy/mois}} \times \eta \quad (\text{III-3})$$

Avec :

PSU : Puissance solaire utile en [KWh/m<sup>2</sup>]

$I_{\text{moy/mois}}$  : L'irradiation moyenne mensuelle en [KWh/m<sup>2</sup>]

$\eta$  : Rendement du capteur

#### ➤ Capteur utilisé [9]

Le capteur utilisé est J.GIORDANO industriel disponible au C.D.E.R (Centre de Développement des Energies Renouvelables) en Algérie.

**Tableau III-1 Caractéristique du capteur utilisé : J.GIORDANO industriel.**

$a_0$	0,7
$a_1$	4,36 [W/K.m <sup>2</sup> ]
Surface utile	1,65 m <sup>2</sup>
Glace	Verre normal
$\eta$	0,43

Avec :

$a_0$  : Rendement optique du capteur.

$a_1$  : Conductance globale du capteur.

**Figure (III-1) : Capteur utilisé (J.GIORDANO)**

## III.2 Estimation des déperditions thermiques

Pour dimensionner une installation de chauffage solaire il est nécessaire de connaître avec une bonne approximation les besoins thermiques. Dans le cas d'une habitation, nous allons définir plusieurs grandeurs représentatives des échanges thermiques avec l'extérieur. On notera  $T_i$  la température de confort (consigne que l'on veut maintenir à l'intérieur de l'habitation) et  $T_a$  la température de l'environnement. Les pertes thermiques ont plusieurs origines : les murs extérieurs et intérieurs, les vitrages, le plancher, la toiture et le renouvellement d'air.

### III.2.1 Présentation de l'habitation

Ce logement est situé à Batna, en troisième étage d'un immeuble collectif entre deux appartements chauffés, et dont la superficie est de 121,6 m<sup>2</sup>. Il est construit sur la base d'une architecture simple, les murs extérieurs sont en double cloison de brique, et le plafond est une dalle en béton armée, les murs intérieurs sont une seule cloison. Les fenêtres sont en bois.

Cet appartement est composé de deux chambres, une cuisine, de sanitaire et d'une salle de séjour. Il est habité par cinq personnes, les besoins de cette habitation sont évalués en fonction de ces caractéristiques architecturales, du nombre d'occupants et du taux de renouvellement d'air.

➤ **Données architecturales de la maison :**

Hauteur de la maison	2,80 m
Surface de la maison	121,6 m <sup>2</sup>
Volume de la maison	340,48 m <sup>3</sup>

➤ **Données géographiques de la maison [10]:**

Latitude ( $\phi$ )	35°,55
Longitude (L)	6°,32
Altitude	822 m
Albédo	0,2

### III.2.2 Déperditions de la maison

#### III.2.2.1 Déperditions par l'enveloppe de la maison

Le calcul des déperditions par l'enveloppe de la maison est fait par les règles de calcul des déperditions calorifiques [11]. (Méthode de D.T.R)

##### a) Mur extérieur de 35 cm

Il est constitué de cinq couches de l'intérieur vers l'extérieur comme suit :

désignation	Epaisseur (m)	$\lambda$ [W/m.c°]	Rth [m <sup>2</sup> .c°/w]
mortier en ciment	0,025	1,4	0,018
brique creuse	0,1	0,46	0,22
Lame d'air	0,05	0,28	0,18
brique creuse	0,15	0,46	0,33
mortier en ciment	0,025	1,4	0,018
			<b><math>\Sigma R_{th}=0,766</math></b>

##### b) Plancher

Il est constitué de cinq couches du haut vers le bas comme suit :

désignation	Epaisseur (m)	$\lambda$ [W/m.c°]	Rth [m <sup>2</sup> .c°/w]
carrelage	0,02	0,54	0,037
chape de ciment	0,03	1,4	0,021
béton armé	0,05	2,09	0,024
hourdis	0,15	0,97	0,154
mortier de ciment	0,02	1,4	0,018
			<b><math>\Sigma R_{th}=0,254</math></b>



**C) Toiture**

Elle est constituée de cinq couches du haut vers le bas comme suit :

désignation	Epaisseur [m]	$\lambda$ [W/mc°]	Rth [m <sup>2</sup> c°/w]
carrelage	0,02	0,54	0,037
chape de ciment	0,03	1,4	0,021
béton armé	0,05	2,09	0,024
hourdis	0,15	0,97	0,154
mortier de ciment	0,02	1,4	0,018
			<b><math>\Sigma Rth=0,254</math></b>

➤ **Calcul du coefficient de transmission surfacique de la maison**

**a) Calcul du coefficient de transmission surfacique du mur extérieur ( $K_m$ )**

$$K_m = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_i + \Sigma R_{th} + R_e} \quad (\text{III-4})$$

Avec :

$$R_i = \frac{1}{h_i} \quad (\text{III-5})$$

$$R_e = \frac{1}{h_e} \quad (\text{III-6})$$

D'après DIN 4701  $h_i=8,12$  [W/m<sup>2</sup>.C°]

$h_e=23,22$  [W/m<sup>2</sup>.C°]

$h_e$  et  $h_i$  sont les coefficient de convection thermique coté extérieure et intérieure respectivement

Pour le mur extérieur de 35 cm

$$K_m = \frac{1}{0,12 + 0,766 + 0,04} = 1,08 \text{ [W/m}^2\text{.C}^\circ\text{]} \quad (\text{III-7})$$

### b) coefficient de transmission surfacique des portes et des fenêtres [12]

Les valeurs du coefficient de transmission surfacique des portes et fenêtres sont :

Portes et fenêtres	K [w/m <sup>2</sup> .C°]
Les portes extérieures en bois	3,48
Les fenêtres extérieures en bois	2,55

On néglige le calcul du coefficient K du plancher et la toiture car on n'a pas un transfert de chaleur.

Les déperditions par l'enveloppe de la maison sont calculées comme suit :

$$Q_{ext} = Q_m + Q_{po} + Q_f + Q_t + Q_p \quad (\text{III-8})$$

Où

$Q_{ext}$  : Déperditions totales coté extérieur

$Q_m$  : Déperdition par le mur extérieur

$Q_{po}$  : Déperditions par les portes

$Q_f$  : Déperditions par les fenêtres

$Q_p$  : Déperditions par le plancher

$Q_t$  : Déperdition par le toit

On néglige les déperditions par le toit et le plancher car on n'a pas un transfert de chaleur.

Donc la formule des déperditions totales cotées extérieur sera :

$$Q_{ext} = Q_m + Q_{po} + Q_f = \left[ (K_m S_m + K_{po} S_{po} + K_f S_f) \right] (T_i - T_a) \quad (\text{III-9})$$

Avec :

$K_m$ ,  $K_{po}$  et  $K_f$  : sont les coefficients de transmission surfacique des murs extérieurs, des portes et des fenêtres.

Et  $S_m$ ,  $S_{po}$  et  $S_f$  : sont les surfaces des murs extérieurs, des portes et des fenêtres.

$T_i$  : la température de confort égale à 20 C°

$T_a$  : la température ambiante.

Le calcul de la température ambiante est fait à l'aide du logiciel METEONORM (logiciel sous licence). Les valeurs de  $T_a$  pour la ville de Batna sont représentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III-2 Température ambiante moyenne mensuelle à Batna**

mois	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juillet	aout	sept	octobre	nov	déc
Ta (C°)	5,3	6,8	10,7	13,7	18,7	23,9	27,7	26,6	21,2	17,3	10,4	6,7

### III.2.2.2 Déperditions par renouvellement d'air [13]

Plus une maison est isolé, plus elle est étanche à l'air. Il se pose alors un problème de renouvellement d'air. La température ambiante  $T_a$  est inférieure à la température interne de la maison  $T_i$ , ce renouvellement d'air entraîne une déperdition calorifique  $Q_a$  que l'on peut mettre sous la forme suivantes :

$$Q_a = \rho_a V_a C_{pa} (T_i - T_a) \quad (\text{III-10})$$

Avec :

$\rho_a$  : Masse volumique de l'air égal à 1,204 [Kg/m<sup>3</sup>]

$V_a$  : débit de renouvellement d'air en [m<sup>3</sup>/h]

$C_{pa}$  : Chaleur massique de l'air égal à 1006 [J/Kg.C°]

Le débit  $V_a$  du renouvellement d'air s'élève à la moitié du volume de la maison par heure

$$V_a = \frac{V}{2} \quad (\text{III-11})$$

Et on obtient donc les déperditions totales par l'enveloppe de la maison qui sont données par la formule suivante :

$$Q_{to} = 1,1 Q_{ext} + Q_a \quad (\text{III-12})$$

### III.2.2.3 Apports internes

#### a) stratégie d'occupation [14]

Nous avons supposé que l'appartement est habité par cinq personnes, ce qui représente la moyenne rencontrée dans notre région. La puissance dissipée par personne est estimée à 120 W.

#### b) Appareils électroménagers

Ils sont à la fois liés à la présence et l'activité humaine. Le tableau ci-dessus présente les puissances dégagées par les appareils électroménagers.

**Tableau III-3 : puissances dégagées par les appareils électroménagers**

Appareil	Zone	Temps d'utilisation	Puissance moyenne Sur 24h [W]
réfrigérateur	cuisine	24/24	70
téléviseur	Salon, cham1, cham2	12h	150
Appareils de cuisson	cuisine	5h	200
ordinateur	cham2	7h	30

### III.3 Estimation des besoins de chauffage [13]

#### III.3.1 Calcul du coefficient de déperdition thermique GV [W/C°]

Ce coefficient appelé coefficient de déperdition thermique, caractérise les déperditions thermiques  $Q_{th}$  du logement. Il est calculé à partir de l'équation suivante :

$$Q_{th} = GV (T_i - T_a) = \left[ (K_m S_m + K_f S_f + K_{po} S_{po}) + \rho_a V_a C_{pa} \right] (T_i - T_a) \quad (\text{III-13})$$

#### III.3.2 Calcul du coefficient des besoins thermiques BV [W/C°]

Le coefficient des besoins thermiques BV se déduit du coefficient de déperdition thermique GV en prenant compte les apports énergétiques dus aux occupants de l'habitation, aux appareils domestiques et aux apports solaires par les fenêtres. Il s'exprime en W/C°.

Soient  $Q_i$  les apports internes à la maison. On définit une température  $T_{sc}$  dite température sans chauffage, correspondante à la température extérieure à partir de laquelle il n'y a plus besoin de chauffage pour maintenir à la température intérieure de l'habitation  $T_i$ .

$$Q_i = GV (T_i - T_{sc}) \quad (\text{III-14})$$

Donc les besoins énergétique réels  $Q_c$  sont donnés par :

$$Q_c = Q_{th} - Q_i = BV (T_i - T_a) \quad (\text{III-15})$$

Ou encore

$$BV (T_i - T_a) = GV (T_i - T_a) - GV (T_i - T_{sc}) \quad (\text{III-16})$$

On obtient :

$$BV = GV (1 - F) \quad (\text{III-17})$$

Avec :

$$F = \frac{T_i - T_{sc}}{T_i - T_a} \quad (\text{III-18})$$

F : est appelé facteur d'apport gratuit

Ce dernier facteur dépend de nombreux paramètres tels que :

- Le nombre d'occupants du logement.
- Le mode de vie (température de confort, éclairage, appareils électrique.)
- La situation géographique (ensoleillement, température extérieure.)
- La construction de la maison (orientation par rapport au sud, dimensions, isolation.)

### III.3.3 Méthode des degrés jours [15]

Elle permet de calculer les besoins en chauffage d'une habitation, à un instant donné. La puissance thermique effective nécessaire pour maintenir à la température intérieure de l'habitation s'écrit :

$$Q_c = GV (T_{sc} - T_a) \quad (\text{III-19})$$

La détermination de l'énergie à fournir au logement durant une période  $\Delta t$  s'écrit :

$$Q_c = \int_{\Delta t} GV (T_{sc} - T_a) dt \quad (\text{III-20})$$

Appelons nombre de degré jour la quantité suivante :

$$ndj = \int (T_{sc} - T_a) dt \quad (\text{III-21})$$

Le terme  $dt$  de l'intégrale correspond au nombre de jours durant lesquels la température de l'air extérieure vaut  $T_a$  avec bien sûr  $T_a < T_{sc}$ . La définition de  $ndj$  implique que  $T_{sc}$  et  $T_a$  représentent des températures moyennes calculées sur la journée. Le nombre degrés-jours correspond donc au nombre de jour de chauffage multiplié par l'écart de température ( $T_{sc}-T_a$ ).

En considérant que le facteur  $Gv$  est constant sur la période étudiée, l'énergie à fournir pour le chauffage s'écrit :

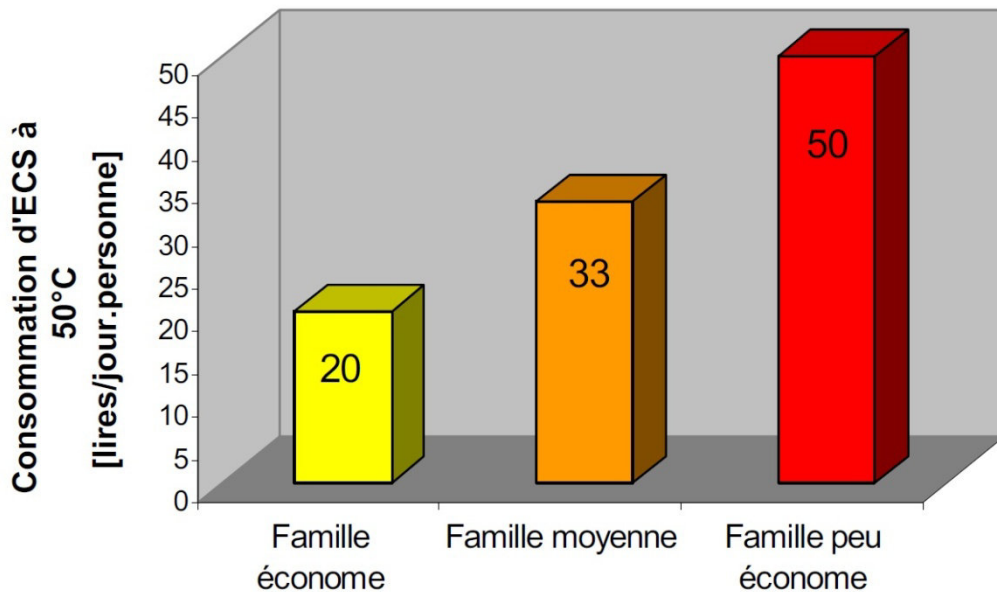
$$Q_c = GV \, ndj \quad [\text{W}] \quad (\text{III-22})$$

Pour obtenir  $Q_c$  en KWh, il faut diviser par  $10^3$  et multiplier par 24 le résultat, ce qui donne :

$$Q_c = 0,024 \, GV \, ndj \quad [\text{KWh}] \quad (\text{III-23})$$

### III.4 Estimation des besoins en eau chaude sanitaire

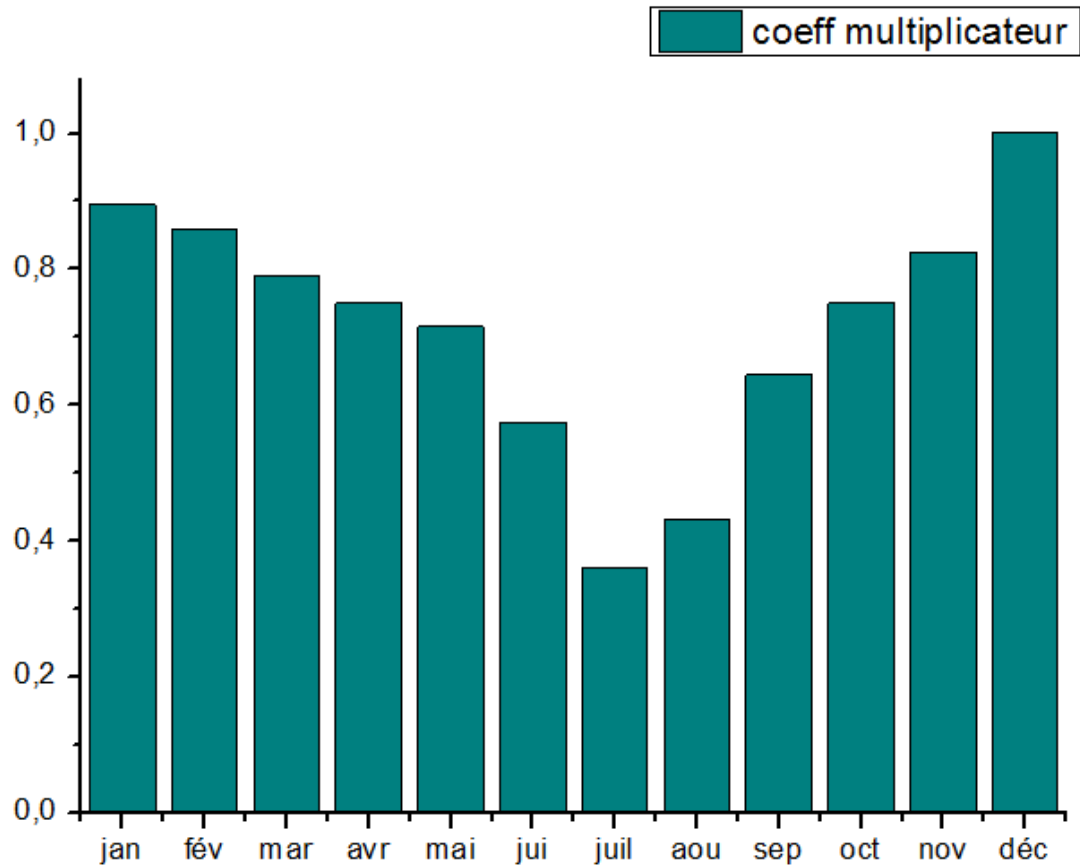
La consommation d'eau chaude sanitaire à 50 C° varie en fonction des habitudes des occupants, du type de famille et du nombre de personnes, la consommation d'eau chaude peut être définie comme suit [16] :



**Figure (III-3) : Consommation d'eau chaude par jour en fonction de type de famille**

Les besoins d'énergie pour chauffer de l'eau doivent être déterminés dans les modèles de production d'eau chaude sanitaire (avec ou sans stockage). Pour calculer les quantités d'énergies nécessaires à la production d'eau chaude sanitaire, il faut d'abord connaître les volumes d'eau chaude à produire. Ces valeurs sont obtenues à partir du diagramme ci-dessus, dans notre exemple on prendra le cas d'une famille peu économe (50 l/j). Pour tenir compte des différences de consommation en cours d'année, nous allons supposer un profil de consommation de type méditerranéenne. Les consommations journalières sont exprimées en valeurs moyennes mensuelles.





**Figure (III-4) : Profil de la consommation d'eau chaude sanitaire [16]**

La consommation en décembre est maximale. Elle est affectée d'un coefficient égal à l'unité. Autrement dit pendant ce mois la consommation journalière moyenne sera prise égale à 250l. (Cas d'une famille de 5 personnes)

Les consommations pour les autres mois seront calculées comme le produit de la consommation maximale par le coefficient correspondant au mois considéré.

La quantité réelle d'énergie nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire est déterminée comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ce volume de la température de l'eau froide jusqu'à la température demandée. Si  $V_s$  est le volume à soutenir et  $T_h$  la température demandée, l'énergie nécessaire  $Q_{ecs}$  est donnée par :

$$Q_{ecs} = \rho C_p V_s (T_h - T_e) \text{ [Joule]} \quad \text{(III-24)}$$

Où

$C_p$  est la capacité thermique massique de l'eau (4200 J/Kg .C°),  $\rho$  sa masse volumique (1Kg/l) et  $T_e$  la température de l'eau froide. Pour obtenir  $Q_{ecs}$  en Wh, il faut diviser par 3600.

### III.5 La surface de captation du système [8]

Parmi les capteurs plans disponibles au niveau de C.D.E.R (Centre de Développement des Energie Renouvelables), le type classique (tubes disposées en radiateur) de marque J.GIORDANO a été choisi. Son rendement optique moyen  $a_0$  est égal à 0,7 et le rendement moyen  $\eta$  est de 0,43.

Si on suppose un taux de couverture solaire (TCS) de 60% en valeur moyenne annuelle, la surface de captation nécessaire est donnée par :

$$S_{ca} = \frac{(\text{besoin en chauffage} + \text{besoin en ECS})}{\text{PSU}} \times 0,6 \quad (\text{III-25})$$

# Chapitre IV

## Résultats et interprétations

### IV.1 Calcul de l'éclairement solaire pour le site de Batna

Le calcul de l'éclairement solaire annuel sur un plan incliné de  $35^{\circ},55$  et orienté vers le sud dans la région de Batna a été fait à l'aide d'un programme en langage FORTRAN 90. Et les résultats obtenus sont :

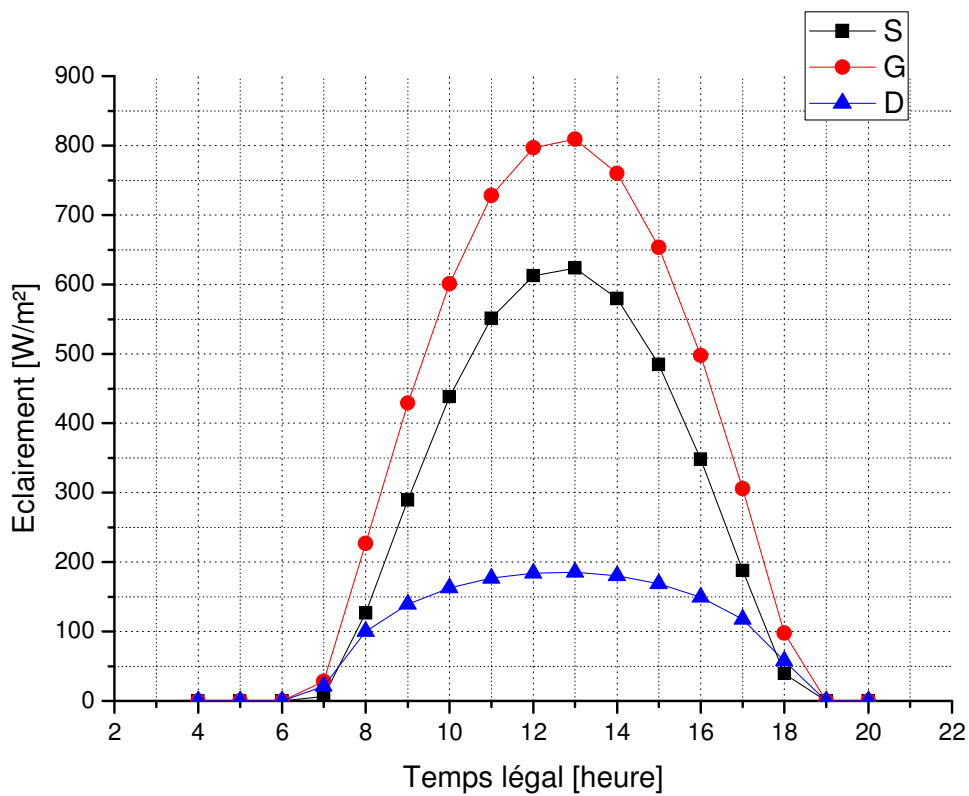


Figure (IV-1) : Evolution de l'éclairement solaire pour le jour N° 80

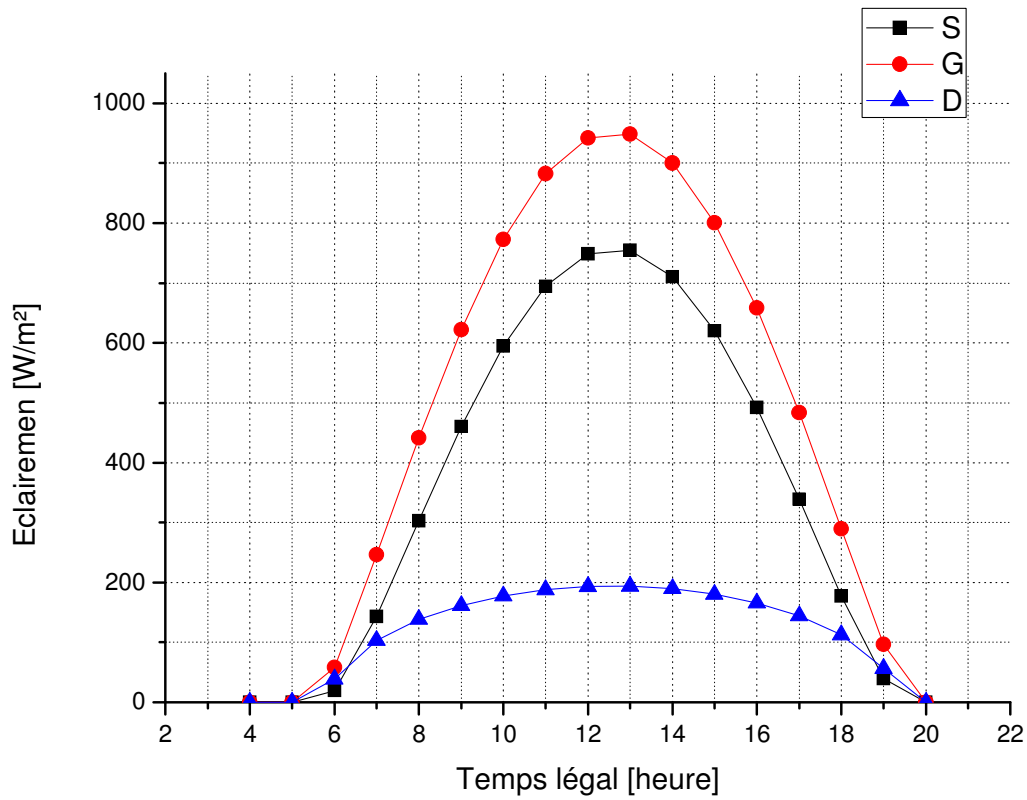


Figure (IV-2) : Evolution de l'éclairement solaire pour le jour N° 172

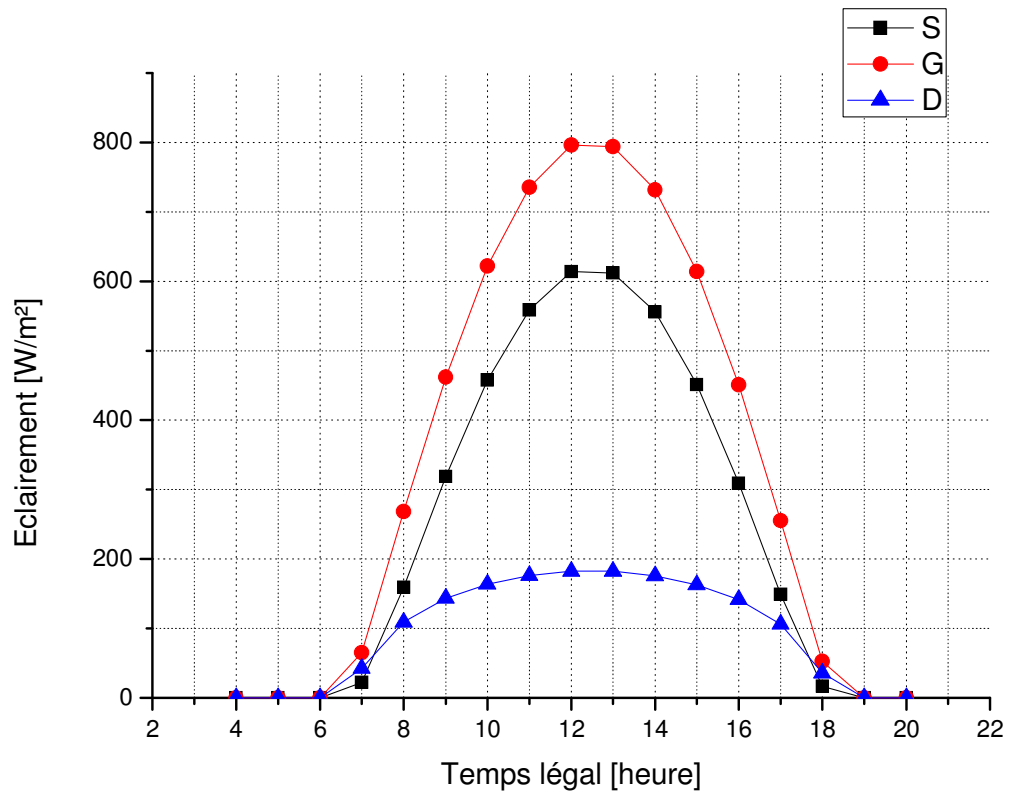


Figure (IV-3) : Evolution de l'éclairement solaire pour le jour N° 264

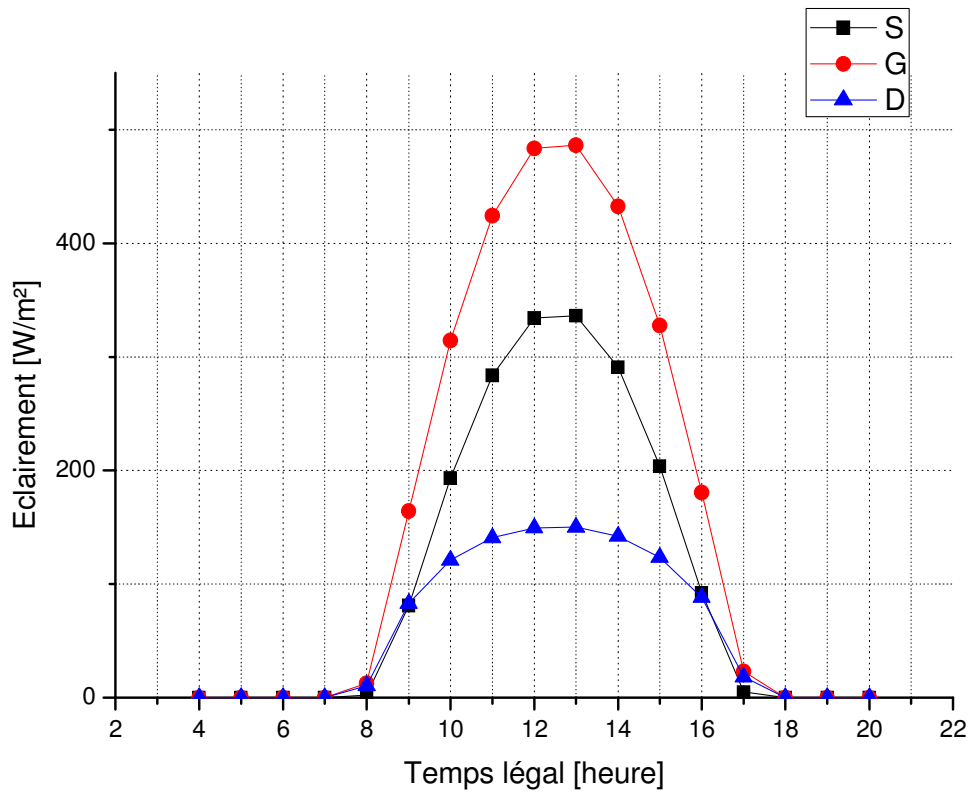


Figure (IV-4) : Evolution de l'éclairement solaire pour le jour N° 355

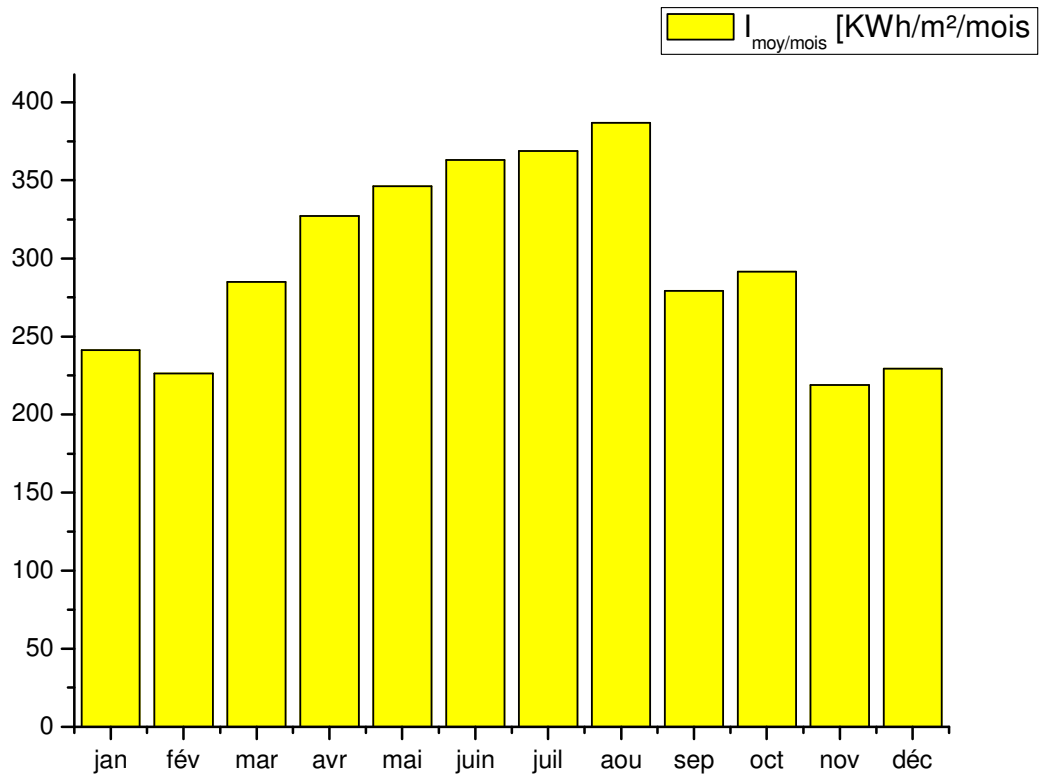
## IV.2 Calcul des apports solaire à Batna

Le calcul est fait à partir des équations (III-1) et (III-2).

**Tableau IV-1 : Les apports solaire à Batna**

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Eclairement Moyen G [W/m <sup>2</sup> ]	786	755	779	843	804	841	835	885	745	859	724	768
Durée du Jour (dj)	9,9	10,7	11,8	12,9	13,9	14,4	14,3	14,1	12,5	11	10 ,1	9,6
Nombre de Jour du Mois (nj)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Irradiation globale moyenne par jour I <sub>moy/jour</sub> [KWh/m <sup>2</sup> ]	7,78	8,08	9,19	10,9	11,17	12,1	11,9	12,48	9,31	9,4	7,3	7,4
I <sub>moy/mois</sub> [KWh/m <sup>2</sup> ]	241,2	226,2	284,9	327	346 ,3	363	368,9	386,9	279,3	291,4	219	229,4





**Figure (IV-5) : Apports solaire mensuels à Batna sur un plan incliné de 35°,55**

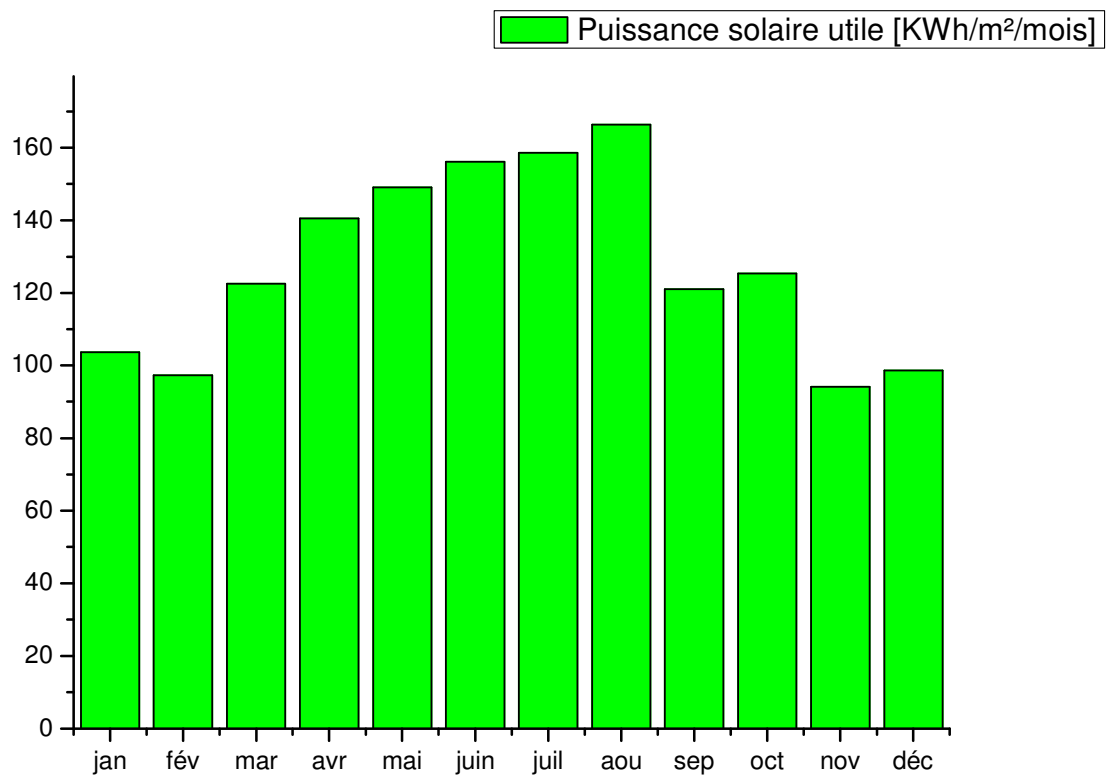
Dans cette représentation, on peut remarquer l'allure sinusoïdale de l'évolution de l'irradiation mensuelle. Le maximum est atteint en été et le minimum pendant les mois d'hiver, ce qui est un paradoxe vis-à-vis des besoins en eau chaude sanitaire et des besoins de chauffage de l'appartement.

### IV.3 Calcul de la puissance solaire utile

Le calcul de la puissance solaire disponible est fait par l'équation (III-3).

**Tableau IV-2 : La puissance solaire utile**

Mois	jan	fév	mar	avril	mai	juin	juil	aout	sep	oct	nov	déc
Puissance Solaire moyenne mensuelle [KWh/m <sup>2</sup> ]	103,7	97,27	122,5	140,6	149	156	158,63	166,37	121	125,3	94,17	98,64



**Figure (IV-6) : Puissance solaire utile en moyenne mensuelle à Batna**

## IV.4 Calcul des besoins en chauffage

### IV.4.1 Calcul du coefficient de déperdition thermique (GV)

A partir de l'équation (III-13) on va calculer le coefficient de déperdition thermique par l'enveloppe de la maison.

La surface du mur extérieur est égale à 94,16 m<sup>2</sup>

La surface des fenêtres cotées extérieures est égale à 5,6 m<sup>2</sup>

La surface des portes cotées extérieures est égale à 8,3 m<sup>2</sup>

Le volume du logement est égal à 340,48 m<sup>3</sup>

$K_m=1,08$  [W/m<sup>2</sup>.C°],  $K_{po}=3,48$  [W/m<sup>2</sup>.C°],  $K_f=2,55$  [W/m<sup>2</sup>.C°]

$\rho_a = 1,204$  [Kg/m<sup>3</sup>],  $C_{pa}=1006$  [J/Kg.C°],  $V_a=170,24$  [m<sup>3</sup>/h]

On aura donc  $GV=216,61$  [W/C°]

### IV.4.2 Calcul des apports internes (Q<sub>i</sub>)

On a supposé que l'appartement abrite cinq personnes ce qui donne les valeurs suivantes :

$$Q_i=120 \times 5 + 450 = 1050 \text{ [W]}$$

Et par suite on va calculer la température  $T_{sh}$  à partir de l'équation (III-14)

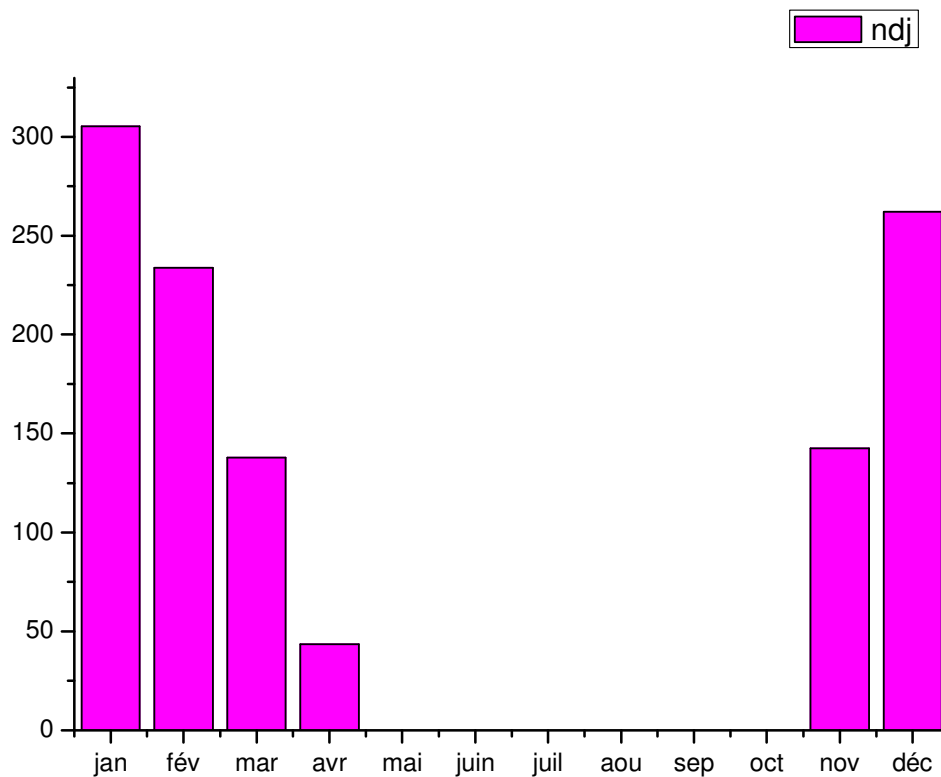
$$T_{sh} = T_i - \frac{Q_i}{GV} = 20 - \frac{1050}{216,61} = 15,15 \text{ C}^\circ$$

### IV.4.3 Calcul des degrés-jours (ndj)

En remplaçant la valeur de  $T_{sh}$  dans l'équation (III-21).

**Tableau IV-3 : Nombre des degrés jours (ndj)**

Mois	$T_a$	Nombre de jour	$(T_{sh} - T_a)$	ndj
janvier	5,3	31	9,85	305,35
février	6,8	28	8,35	233,8
mars	10,7	31	4,45	137,95
avril	13,7	30	1,45	43,5
mai	18,7	31	-	0
juin	23,9	30	-	0
juillet	27,7	31	-	0
aout	26,6	31	-	0
septembre	21,2	30	-	0
octobre	17,3	31	-	0
novembre	10,4	30	4,75	142,5
décembre	6,7	31	8,45	262

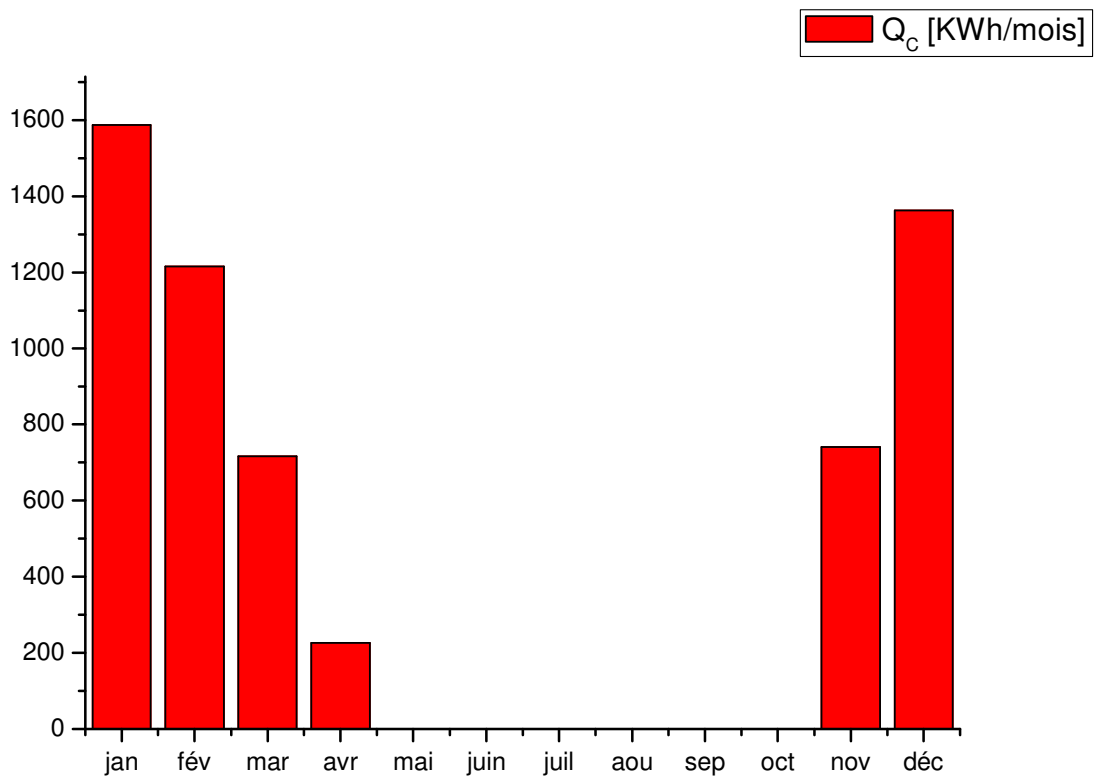


**Figure (IV-7) : Nombre des degrés-jours (ndj) à Batna.**

A partir de l'équation (III-23), on trouve les valeurs des besoins de chauffage  $Q_c$ .

**Tableau IV-4: Les besoins mensuels de chauffage**

Mois	jan	fév	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	nov	déc
$Q_c$ [kwh]	1587,4	1215,4	717,2	226,1	0	0	0	0	0	0	740,8	1362



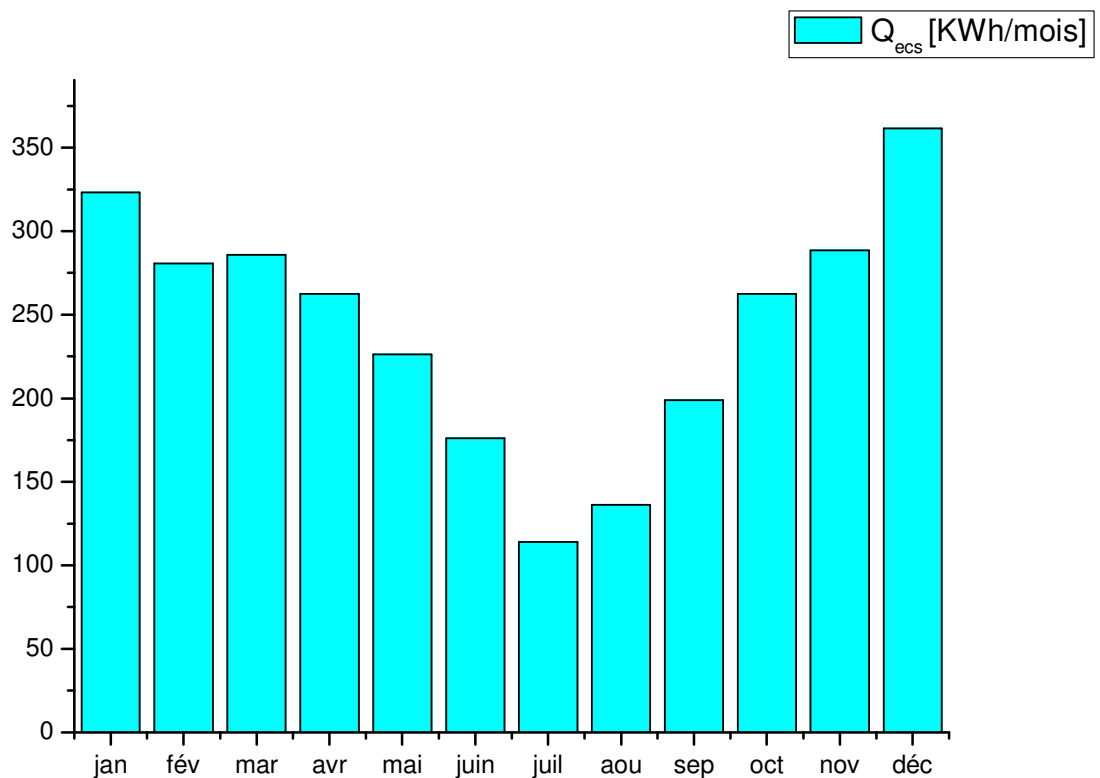
**Figure (IV-8) : Les besoins mensuels en chauffage.**

### IV.5 Calcul des besoins en eau chaude sanitaire

Nous avons effectué les calculs en prenant l'exemple d'une famille de 5 personnes. La température de l'eau chaude ( $T_h$ ) est prise égale à 50 C°. La température de l'eau au réseau ( $T_e$ ) est supposée égale à 10 C° en saison froide et 15 C° en saison douce.

**Tableau IV-5 : Les besoins mensuels en eau chaude sanitaire**

Mois	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	aou	sep	oct	nov	déc
$T_e$ [C°]	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15	10	10
Consommation Journaliere[l/j]	223,7	215	197,5	187,5	178,7	143,75	90	107,5	161,2	187,5	206,2	250
Qecs [kwh/j]	10,43	10,03	9,22	8,75	7,29	5,87	3,67	4,38	6,62	8,75	9,62	11,66
Qecs [kwh/mois]	323,33	280,84	285,82	262,5	226,2	176,09	113,9	136,07	198,7	262,5	288,68	361,66



**Figure (IV-9) : Les besoins mensuels en ECS**

## IV.6 Calcul de la surface de captation du système

Le calcul de la surface de la surface de captation est fait à partir de l'équation (III-25). On va prendre les valeurs maximales des besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire et les valeurs minimales de la puissance solaire utile.

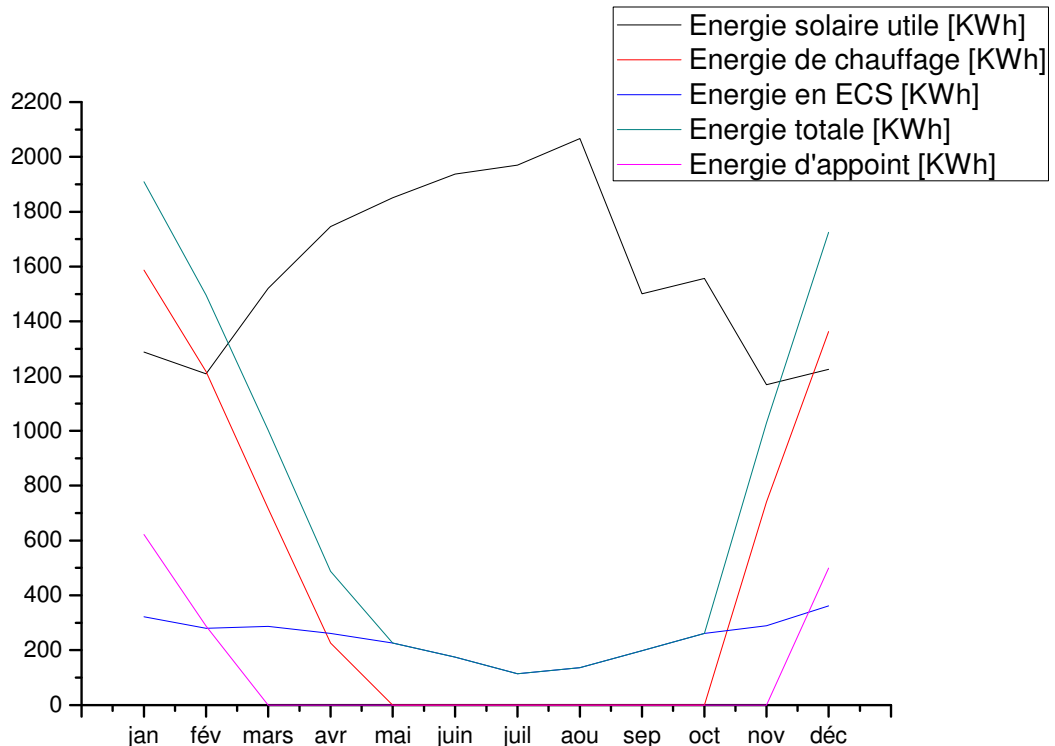
$$S_{ca} = \frac{(1587,4 + 361,66)}{94,17} \times 0,6 = 12,42 \text{ m}^2$$

Pour le système combiné de production d'eau chaude sanitaire et de chauffage, la surface nécessaire est égale à 12,42 m<sup>2</sup>.

## IV.7 Bilan énergétique du système

**Tableau IV-6 : Récapitulatif des apports externes et besoins internes**

mois	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	déc
Energie solaire utile [KWh]	1288	1208	1521	1746	1851	1937	1970	2066	1501	1556	1169	1225
Besoin de chauffage [KWh]	1587	1215	717	226	0	0	0	0	0	0	741	1362
Besoin en ECS [KWh]	323	281	286	262	226	176	114	136	199	262	289	362
Besoin total	1910	1496	1003	488	226	176	114	136	199	262	1030	1724
Energie d'appoint [KWh]	622	288	0	0	0	0	0	0	0	0	0	499
Taux de couverture solaire [%]	67	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	71



**Figure (IV-10) : Bilan énergétique du système**

## IV.8 Interprétation des résultats

La proportion des besoins en énergie pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage varie suivant le volume habitable, l'isolation thermique et le nombre d'occupants.

Il est clair que les besoins en chauffage ne sont pas en phase avec l'ensoleillement pendant l'hiver, et que l'énergie solaire disponible en été dépasse largement les besoins en énergie qui se réduisent en cette période à la production d'eau chaude sanitaire.

Pour l'option choisie qui est de couvrir les besoins à 60%, et qui nécessite l'installation de 12,42 m<sup>2</sup> de capteurs, on remarque que le TCS est de 100% pratiquement pendant les deux tiers de l'année. Cependant, il faudrait justifier ce choix par une étude économique.



Les résultats obtenus sont de nature globale, une étude dynamique rendrait mieux compte de l'évolution des caractéristiques du système dans le temps telles que la température du stock, la température de l'eau à l'eau des capteurs etc... Ce qui pourrait permettre de dimensionner le volume de stockage.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Au cours de cette étude, nous avons essayé de mettre en évidence l'intérêt de l'exploitation de l'énergie solaire et l'efficacité des installations solaires thermiques individuelles en Algérie pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Le taux de couverture solaire est pratiquement de 100% pendant une moitié de l'année, pendant le reste l'énergie solaire couvre environ la moitié des besoins.

Ces résultats sont très encourageants et démontre tout l'intérêt de développer l'utilisation de cette forme d'énergie, très largement disponible dans notre pays et notamment dans le grand sud où le gisement solaire est immense, de plus la technologie de ces systèmes individuels est bien maîtrisée et totalement intégrée, grâce aux efforts de la recherche scientifique en Algérie.

# Références bibliographiques

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] S.Sami-Mechri, A.Hamid, M.Belhamel, Etude de la rentabilité d'une installation solaire de chauffage d'eau collective appliquée à différents site algériens, CDER, Rapport interne, 2003.
- [2] <http://www.outilssolaires.com/premie/index-sousvide.htm>
- [3] A.Khedim, Energie solaire: utilisation thermique et photovoltaïque. 2005, ANEP.
- [4] M.Tissot, 2<sup>ieme</sup> édition, L'énergie solaire thermique et photovoltaïque.
- [5] M.Chateaumnois, D.mondineau, D.Roux, Calcul d'installation solaire à eau.
- [6] J.A.Duffie, and .W.A.Beckman, Solar energy thermal process, Edition Wiley, 2<sup>nd</sup> edition 1996.
- [7] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwatz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et documentation, paris, 1980.
- [8] Système solaire combiné, Estimation des besoins énergétiques, Revue des énergies renouvelables ICRESD-07 Tlemcen, 2007, 109-114.
- [9] Donnée CDER (Centre de Développement Des énergies Renouvelables ALGER).
- [10] R.Yaiche, A.Bouhanik, Atlas solaire algérien.
- [11] Règlementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des déperditions calorifiques, Fascicule 1, D.T.R. C-32.
- [12] Traité de chauffage et de climatisation, Tome 2, Springer-Verlag, 1970.
- [13] J.Bernard, Energie solaire calculs et optimisation, édition ellipses, 2004.
- [14] N.Fezzioui, B.Droui, M.Benyamine et S.Larbi, Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique, Revue des énergies renouvelables Vol.11 N°1 (2008) 25-34.
- [15] O.Buyukalaca, H.Bulut, T.Yilmaz, Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey, Applied Energy 69 (2001) 269-283.
- [16] Ashrae Handbook, Fundamentals, Energy Estimating Methods, 1993

# Annexe