

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



**Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen**  
**Faculté des Sciences**



**Département de Physique**

***Laboratoire de Recherche :URMER***

**Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables**

**Mémoire de Master**  
**Option**

***Energétique et Matériaux***

Présenté par :

**HADJ BELKACEMI Mohammed**

***Thème***

---

**Modélisation et Etude Expérimentation d'un**  
**Capteur Solaire non Vitré et Perforé**

---

Soutenu Oralement le 06 juillet 2011 devant le Jury composé de :

<b>Mr ZERGA Abdellatif</b>	Enseignant	Université de Tlemcen	Président
<b>M<sup>me</sup> RAHMOUN Khadidja</b>	Enseignante	Université de Tlemcen	Encadreur
<b>Mr HAZEM Ahmed</b>	Attaché de Recherche	URER MS Adrar	Co-Encadreur
<b>Mr SAIM Rachid</b>	Enseignant	Université de Tlemcen	Examineur
<b>Mr BENYOUCEF Abdallah</b>	Enseignant	Université de Tlemcen	Examineur

## Résumé

*Les capteurs solaires a air non vitré et perforé, (Unglazed Transpired collectors), est une application de l'énergie solaire destinée pour le préchauffage de l'air entrant dans un bâtiment, le séchage solaire pour le secteur agricole et le couplage avec les panneaux photovoltaïques. Dans le présent travail nous discutons le comportement thermique de ce type de capteur. Une étude expérimentale a été réalisée sur un prototype installé sur la plate forme des essais expérimentaux de l'U.R.E.R d'Adrar (Lat. 27°, Long. 0.17W). Le modèle mathématique est basé sur une évaluation des bilans thermiques en régime stationnaire. Le paramètre clé de cette étude est le rayonnement solaire, ce dernier a été estimé et mesurer sur site et pour deux plans différents.*

## Abstract :

*Solar collector with unglazed perforated air (unglazed transpired collectors), is a solar energy application intended for the preload of the air entering a building, solar drying for the agricultural sector and the coupling with the photovoltaic panels, in present work, we discuss the thermal behavior of this type of collector. An experimental study was carried out on a prototype installed on the experimental tests platform within the research unit in renewable energies in the Saharan medium. (batch 27, length: 0,17W).the mathematical model is based on heat balaces evaluation in stationary mode. The key parameter of this study is the solar radiation. This latter was considered and measured on site and for two different plans.*

## ملخص:

هو تطبيق لاستخدام الطاقة الشمسية لتسخين الهواء دخول (غير المطلي تبين جامعي)جامعي الشمسية والهواء غير المزجج المثقبة في هذه الورقة نناقش السلوك الحراري لهذا النوع من PVالمبنى ، الطاقة الشمسية لتجفيف القطاع الزراعي ، واقتران مع لوحات Urrera (Lat. 27)وقد أجريت دراسة تجريبية على نموذج مثبتة على منصة من الاختبارات التجريبية لادرار .أجهزة الاستشعار كانت المعلمة الرئيسية لهذه الدراسة هو ويستند النموذج الرياضي على تقييم التوازنات حرارة ثابتة .(0.17W درجة، طول الاشعاع الشمسي ، ويقدر هذا الأخير ، ويقاس على موقع واثنين من مستويات مختلفة

# *Remerciements*

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué dans l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URMER) de la faculté des sciences, sous la direction de Monsieur **A.ZERGA**, maître de conférences à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen. Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **N. CHABANE SARI**, Professeur à l'Université Abou-bekr Belkaïd Tlemcen, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Je remercie sincèrement monsieur **K. GHAF FOUR**, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen et monsieur **A.BENMANSOUR**, Maître de conférences A à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de l'«URMER» sans oublier les étudiants.

## SOMMAIRE :

**INTRODUCTION** ..... 01

### **CHAPITRE : I** Généralité sur le rayonnement solaire.

**I.1.Introduction** ..... 04

**I.2.Le soleil** ..... 04

**I.3.La constante solaire** ..... 04

**I.4.Aspects géométriques du rayonnement solaire** ..... 05

**I.5.Mouvements de la terre**..... 05

**I.6.La sphère céleste** ..... 06

**I.7.Les coordonnées célestes** ..... 06

**I.7.1.Les coordonnées géographiques** ..... 07

**I.7.2. Les coordonnées horaires** ..... 07

**I.7.3. Les coordonnées horizontales** ..... 08

**I.8.Les temps solaires** ..... 08

**I.8.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)** ..... 08

**I.8.2. Le Temps Légal (T.L)** ..... 08

**I.8.3. le Temps Civil**..... 09

**I.9. Direction des rayons solaires par rapport à un plan** ..... 09

**I.10. Aspects énergétiques du rayonnement solaire** ..... 11

**I.11. Les différents types de rayonnement**..... 12

**I.12. Rayonnement solaire** ..... 12

**I.12.1.Rayonnement direct** ..... 13

**I.12.2.Rayonnement diffus** ..... 14

**II.12.3.Rayonnement global**..... 15

**II.13.Le gisement solaire en Algérie** ..... 15

### **CHAPITRE : II** Etude Bibliographique.

**II.1 - Conversion de l'énergie solaire** ..... 17

**II.1.1 L'énergie solaire passive** ..... 17

**II.1.2 L'énergie photovoltaïque**..... 17

**II.1.3 L'énergie solaire active.** ..... 18

<i>II.2 Le système UTC de chauffage solaire de l'air.....</i>	<i>18</i>
<i>II.3 Paramètres importants et performances thermiques des UTC.....</i>	<i>18</i>
<i>II.4 Revêtement de l'absorbeur.....</i>	<i>19</i>
<i>II.4.1 Revêtement non sélectif.....</i>	<i>21</i>
<i>II.4.2 Revêtement sélectif.....</i>	<i>21</i>
<i>II.5 Bénéfices des systèmes de chauffage solaire de l'air (UTC).....</i>	<i>21</i>
<i>II.6 Les études effectuées.....</i>	<i>21</i>
<i>II.6.1 La théorie du transfert de chaleur.....</i>	<i>22</i>
<i>II.7 Rappels sur les transferts de chaleur.....</i>	<i>24</i>
<i>II.8 Conclusion.....</i>	<i>29</i>

### **CHAPITRE : III**    *Modélisation d'un capteur solaire a air non vitre perforé.*

<i>III.1 Introduction:.....</i>	<i>29</i>
<i>III.2. Hypothèses Simplificatrice.....</i>	<i>29</i>
<i>III.3. Bilan thermique du capteur.....</i>	<i>30</i>
<i>III.3.1. Bilan thermique de l'absorbeur.....</i>	<i>30</i>
<i>III.3.1.1. Détermination des différents flux de l'équation (1).....</i>	<i>32</i>
<i>III.4. Bilan thermique de l'air de la cavité.....</i>	<i>37</i>
<i>III.5. Bilan thermique de l'isolation.....</i>	<i>38</i>
<i>III.6.L'efficacité thermique d'un capteur.....</i>	<i>40</i>
<i>III.6.1.L'efficacité d'échange de chaleur.....</i>	<i>40</i>
<i>III.7. La perte de charge.....</i>	<i>40</i>
<i>III.8. Conclusion.....</i>	<i>41</i>

### **CHAPITRE : IV**    *Réalisation expérimentale.*

<i>IV.1. Préparation et installation des thermocouples.....</i>	<i>44</i>
<i>IV.2. Etalonnage des thermocouples.....</i>	<i>45</i>
<i>IV.3. Interprétation des résultats.....</i>	<i>47</i>
<i>IV.4. Préparation du Pyranomètre.....</i>	<i>48</i>
<i>IV.5. L'acquisition de données.....</i>	<i>51</i>
<i>IV.6. Description du prototype.....</i>	<i>51</i>

IV.7. Conclusion.....	53
-----------------------	----

## **CHAPITRE : V** Résultats et interprétations.

V.1.plan vertical. ....	54
V.1.1. Comparaison entre le rayonnement solaire global calculé (Igl-Cal) et mesuré (R S G I):.....	54
V.2. Evolution du rayonnement solaire global mesuré et les températures (Tamb, Tabs et Tsortie ) en fonction du temps pour le plan vertical.....	55
V.2. plan incliné (30°) .....	57
V.2.1. Comparaison entre le rayonnement solaire global calculé (Igl-Cal) et mesuré (R S G I).....	57
V.2.2. Variation des différents rayonnements solaire en fonction du temps...	60
V.3. Comparaison de la variation du rayonnement solaire mesuré (R S G I) et calculé (Igl) pour trois journées successives.....	63
V.4. Evolution du rayonnement solaire global mesuré et les températures (Tamb, Tabs et Tsortie ) en fonction du temps pour le plan incliné.....	64
V.5. la variation des températures Tamb, Tsortie, Tabs et Tplen en fonction du temps.....	67
V.6. L'influence du R S G I mesuré sur les températures ( Tamb, Tsortie et Tabs ).....	71
V.7. Variation de l'efficacité et de R S G I en fonction du temps.....	73
V.8. la variation de l'efficacité en fonction du R S G I mesuré.....	75
V.9. La variation du gain en fonction du temps.....	77
V.10. Comparaison du gain entre les deux plans vertical et incliné.....	78
V.11. La variation de l'efficacité en fonction du temps pour deux plans vertical et incliné 30°.....	80

## **CONCLUSION ET RECOMMANDATION**

CONCLUSION.....	81
-----------------	----

## **ANNEXE**

- Présentation de l'unité de recherche d'ADRAR.

# **Introduction**

## Introduction

La consommation mondiale énergétique augmente malheureusement au détriment de l'environnement qui nous entoure, d'une part, et non renouvelable d'autre part. En effet, les énergies fossiles [charbon, pétrole, gaz naturel] sont utilisées de manière abusive. Ces énergies sont polluantes et limitées. Aujourd'hui la communauté scientifique reconnaît la responsabilité de cette consommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets dramatique sur les équilibres physiques, économiques sociaux et politiques de notre planète. Le recours à des énergies propres pour assurer la sécurité énergétique et le développement économique et social des populations devient incontournable. Les énergies renouvelables et spécialement le solaire devrait être la tendance en tenant compte de la sécurité de l'approvisionnement et de la protection de l'environnement ce choix est motivé par le fait que la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est 5 fois supérieure à la totalité des consommations quotidiennes humaines (nucléaire, charbon, bois, fioul, gaz, hydraulique...). L'Algérie faisant partie de cette planète, dispose d'un potentiel solaire le plus fort sur la rive méditerranéenne avec ses 3500 heures d'ensoleillement par an. Ajuste titre d'exemple, le solaire thermique est de 169440 TWh/an soit l'équivalent de 38000 milliards m<sup>3</sup>/an représentant près de 4 fois la consommation énergétique mondiale. Elle possède un potentiel considérable en ce qui concerne les compétences humaines. De ce fait, elle est plus que jamais appelée à s'orienter vers le développement de cette forme d'énergie.

Pendant plus de 100 ans de développement des capteurs solaire à air, plusieurs types ont été créés. En se basant sur le désigne de la plaque absorbante, le capteur solaire à air peut être divisé en deux types principaux: capteur à air perforé et capteur à air non perforé.

Dans cette étude nous nous intéressons au capteur solaire à air perforé, et en plus le capteur est non vitré L'U.T.C (*Unglazed Transpired collectors*) ; nous faisons cette étude sur deux plan différents le premier vertical et l'autre incliné de 30°. L'U.T.C est une application de l'énergie solaire qui est bien prouvée dans les applications industrielles avec cette technologie en préchauffant l'air de la ventilation avec l'énergie solaire, ce qui diminue considérablement la charge des systèmes chauffants conventionnellement dans un bâtiment. En plus de l'application du préchauffage de l'air de la ventilation, d'autres applications telles que le séchage solaire pour le secteur agricole, le dessiccateur de refroidissement, et le couplage du photovoltaïque avec les UTC (systèmes PV / Thermique).

Dans le présent travail nous présentons un modèle mathématique afin de prédire les performances thermiques d'un U.T.C en fonction de différents paramètres tel que

l'écartement de la cavité entre l'absorbeur et l'isolation, la vitesse du vent, le débit d'air délivré et ceci pour des formes géométriques de la plaque absorbante. Un programme de simulation en langage Fortran est établi pour calculer le rayonnement solaire global (Igl-cal), diffus (Idif) et direct (Idir) nous permettre une comparaison entre les résultats du modèle mathématique et celle issue de l'expérimentale d'un prototype installé sur le site d'Adrar.

Le présent travail comporte quatre chapitres et une partie annexe.

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du rayonnement solaire et le gisement solaire en Algérie avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Le deuxième chapitre concernant une étude théorique bibliographique du système de chauffage U T S et présente les différents paramètres qui influent sur le système ainsi que un rappel thermique.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons la modélisation mathématique d'un capteur solaire à air non vitré et perforé et les différentes équations concernant le fonctionnement du système en état stationnaire.
- Réalisation expérimentale, préparation et installation des thermocouples et pyranomètre ainsi que une description du prototype feront l'objet du quatrième chapitre.
- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du cinquième chapitre.
- La partie annexe expose, la présentation de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien.
- Une introduction générale et une conclusion et recommandation se rapportant au travail, complètent ce mémoire.

**Chapitre I :**

**GENERALITE SUR LE**

**RAYONNEMENT SOLAIRE:**

## **I.1.Introduction :**

La terre est animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe des pôles (NORD SUD).

Le centre de la terre décrit une ellipse ayant le soleil comme foyer.

Au lieu de faire l'étude de la terre autour du soleil et de son axe ; il est plus important pour notre étude de s'intéresser au mouvement apparent du soleil dans la sphère céleste.

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

## **I.2.Le soleil :**

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes [2].

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ( $E=mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 KW [2].

## **I.3.La constante solaire :**

La valeur du rayonnement solaire "**Ic**", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne "**I0**" appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m<sup>-2</sup>. En première approximation, on peut calculer la valeur de "**Ic**" en fonction du numéro du jour de l'année "**nj**" par la relation suivante [3] :

$$Ic = I0[1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times nj)] \quad (I.1)$$

## **I.4.Aspects géométriques du rayonnement solaire :**

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [1].

### I.5. Mouvements de la terre :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'**écliptique** [1,4].

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de  $149\,675\,106\text{ km}$  [4].

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'**équateur**. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé **inclinaison** de l'ordre de  $23^{\circ}27'$ [1].

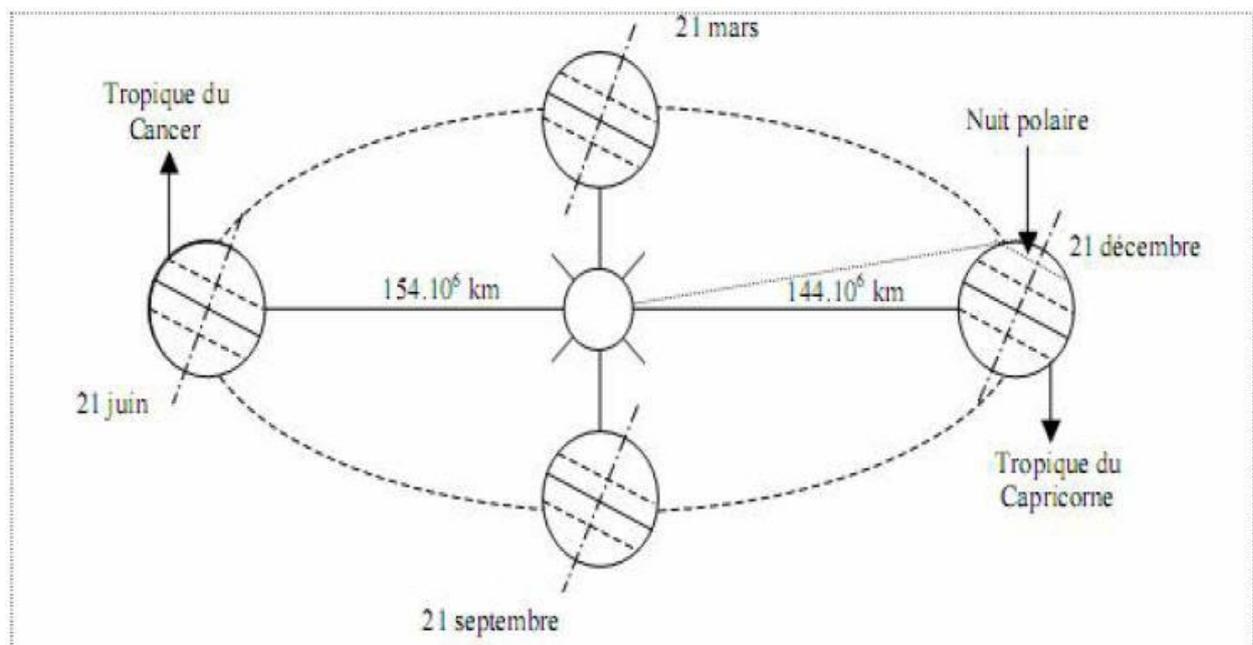


FIGURE I.1 : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil

### I.6. La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure (figure I.2).

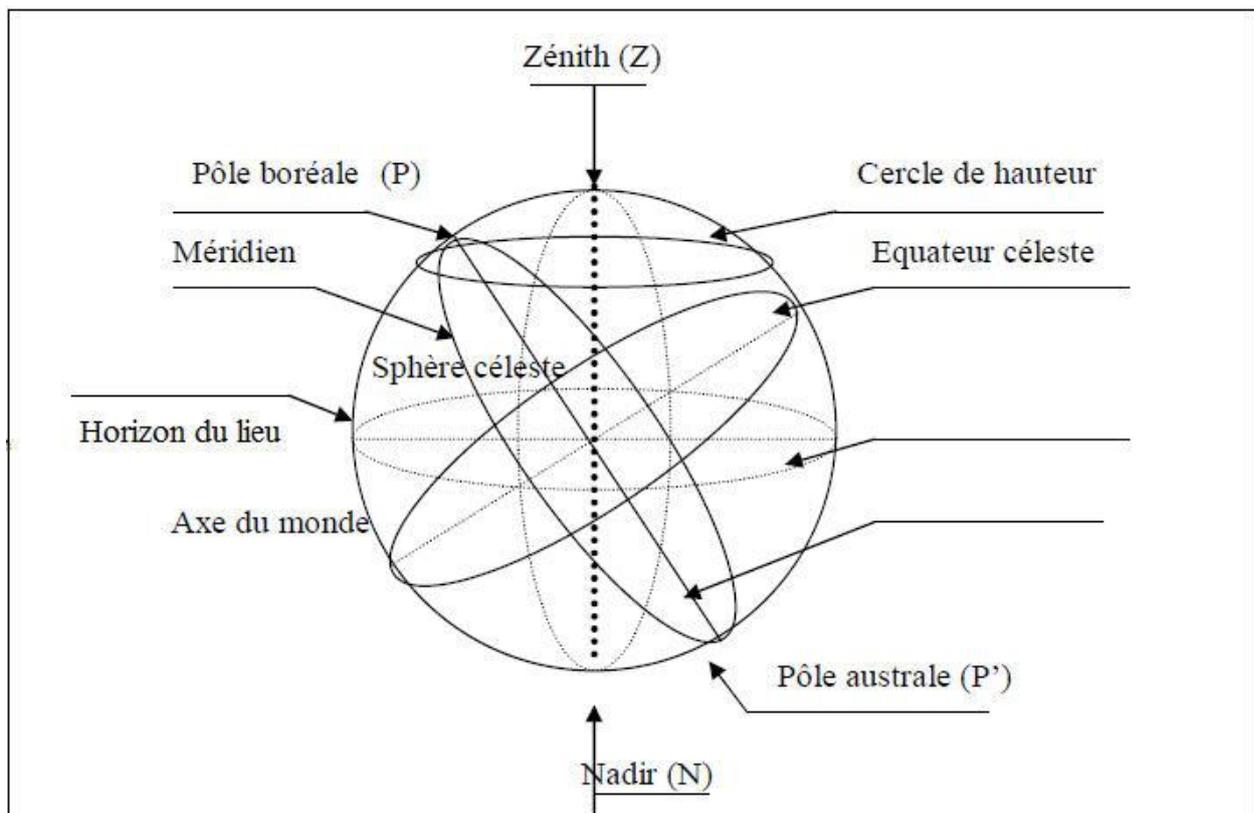


Figure I.2 : La sphère céleste

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

## I.7. Les coordonnées célestes :

### I.7.1. Les coordonnées géographiques [5]:

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.3).

#### - La longitude (L) :

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien **Greenwich**.

#### - La latitude ( $\Phi$ ) :

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  dans l'hémisphère nord et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  dans l'hémisphère sud.

#### - L'altitude (Z) :

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

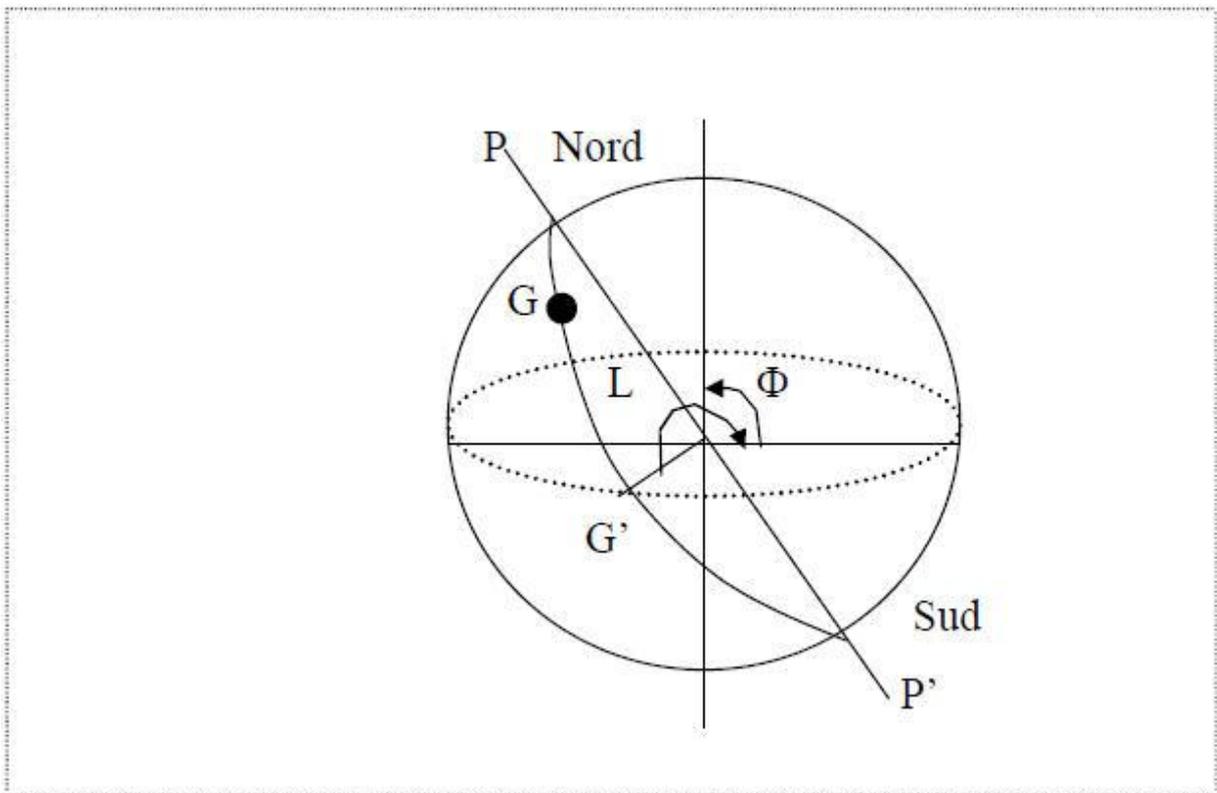


Figure I.3: Les coordonnées géographiques

## I.7.2. Les coordonnées horaires

### - La déclinaison ( $\delta$ )

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de  $+23^{\circ}27'$  à  $-23^{\circ}27'$  et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [4] :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{284 + n_j}{365} \times 360 \right] \text{ [Degré]} \quad (\text{I.2})$$

Où :

$n_j$  : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

### - L'angle horaire ( $\omega$ )

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté Positivement dans le sens rétrograde de  $0^{\circ}$  à  $360^{\circ}$  (figure I.4).

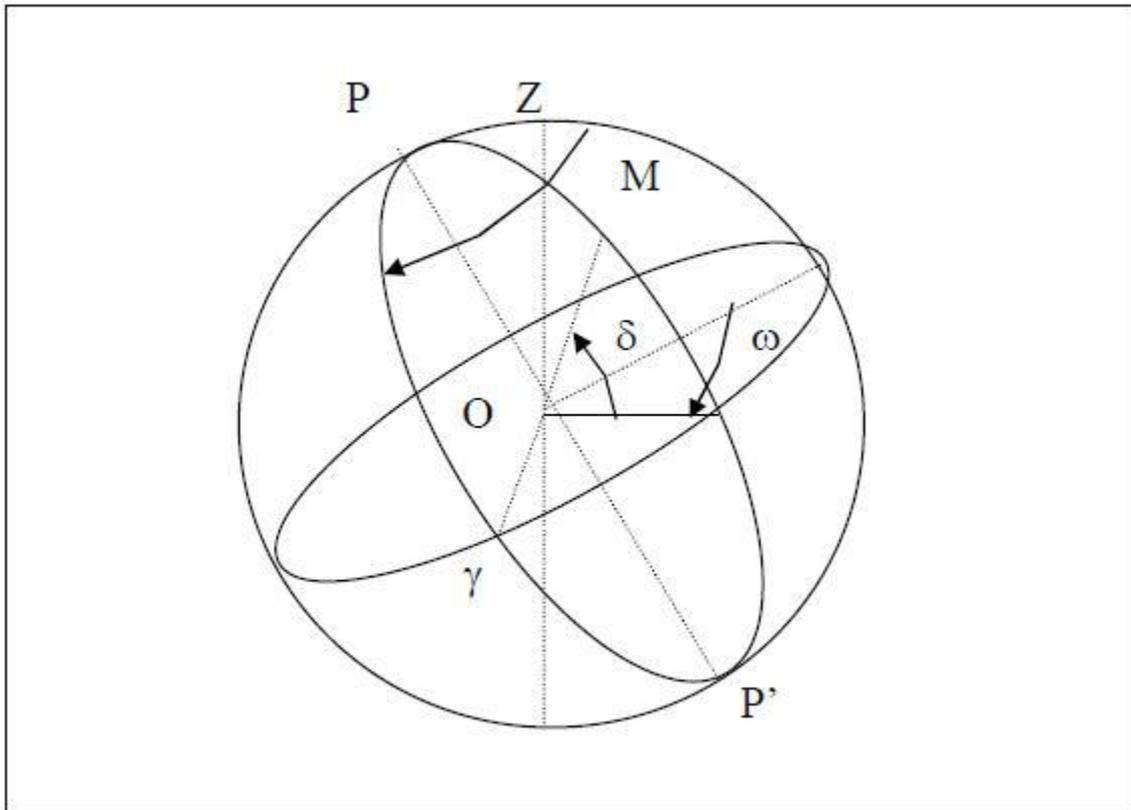


Figure I.4 : Les coordonnées horaires

### I.7.3. Les coordonnées horizontales

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

#### L'azimut solaire (a)

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  d'ouest en est, ou de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  à partir du sud vers l'ouest.

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à  $180^\circ$  à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'**azimut géographique**, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation.

#### - La hauteur (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le **zénith** et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  vers le **nadir**, On appelle quelquefois **distance zénithale** le complément de l'angle h :  $z + h = 90^\circ$  (figure I.5).

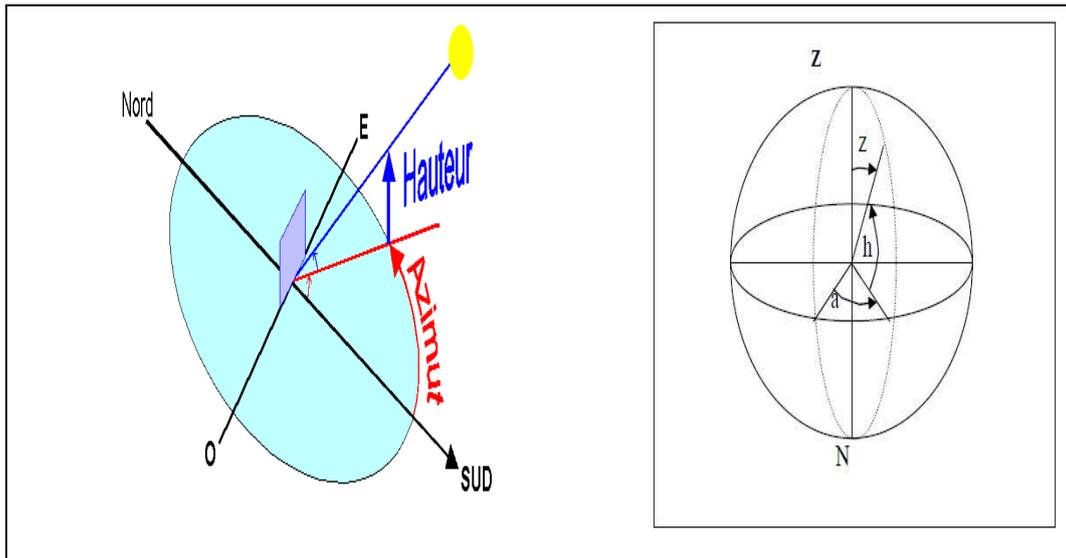


Figure I.5 : Coordonnées horizontales.

L'équation de passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires est [4] :

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

$$\cos (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \cos (\omega) \times \sin (\Phi) - \cos (\Phi) \times \sin (\delta)$$

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

## I.8. Les temps solaires

### I.8.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil  $w$ . Il est donné sous la forme suivante [6] :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (I.3)$$

$\omega$ : En degré.

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

Si  $\omega < 0$ , la matinée.

Si  $\omega > 0$ , l'après-midi.

### I.8.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [6] :

$$Et = TSV - TSM \quad (I.4)$$

Avec :

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

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

$$\text{Ou: } N' = (nj - 81) \cdot 360/365$$

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

### I.8.3. Le Temps Universel (T.U) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore **GMT** (Greenwich Mean Time) [6]:

$$TU = TSM - (L/15) \quad (I.5)$$

Où : L : est la longitude.

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

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

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

### I.8.2. Le Temps Légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [6] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.5.1)$$

Où :

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie.

### I.8.3. le Temps Civil

Représente le temps qui a pour origine minuit [6].

## I.9. Direction des rayons solaires par rapport à un plan :

On considère un plan quelconque situé dans un lieu de latitude F caractérisé par deux angles :

$\alpha$  : L'angle entre le méridien local et la normale au plan.

$\alpha = 0$  ; le plan est orienté vers le Sud.

$\alpha = \pi$  ; le plan est orienté vers le Nord.

$\alpha = -\pi/2$  ; le plan est orienté vers l'Est.

$\alpha = \pi/2$  ; le plan est orienté vers l'Ouest.

$\gamma$  = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0$  ; le plan est horizontal.

$\gamma = \pi/2$  ; le plan est vertical.

Soit :

$N$  : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires.

$n$  : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface.

$i$  : L'angle d'incidence ( $n, N$ ) (figure I.6)

$$\vec{N} \begin{cases} \sin(\alpha) \times \cos(h) \\ \cos(\alpha) \times \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases} \quad \vec{n} \begin{cases} \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases}$$

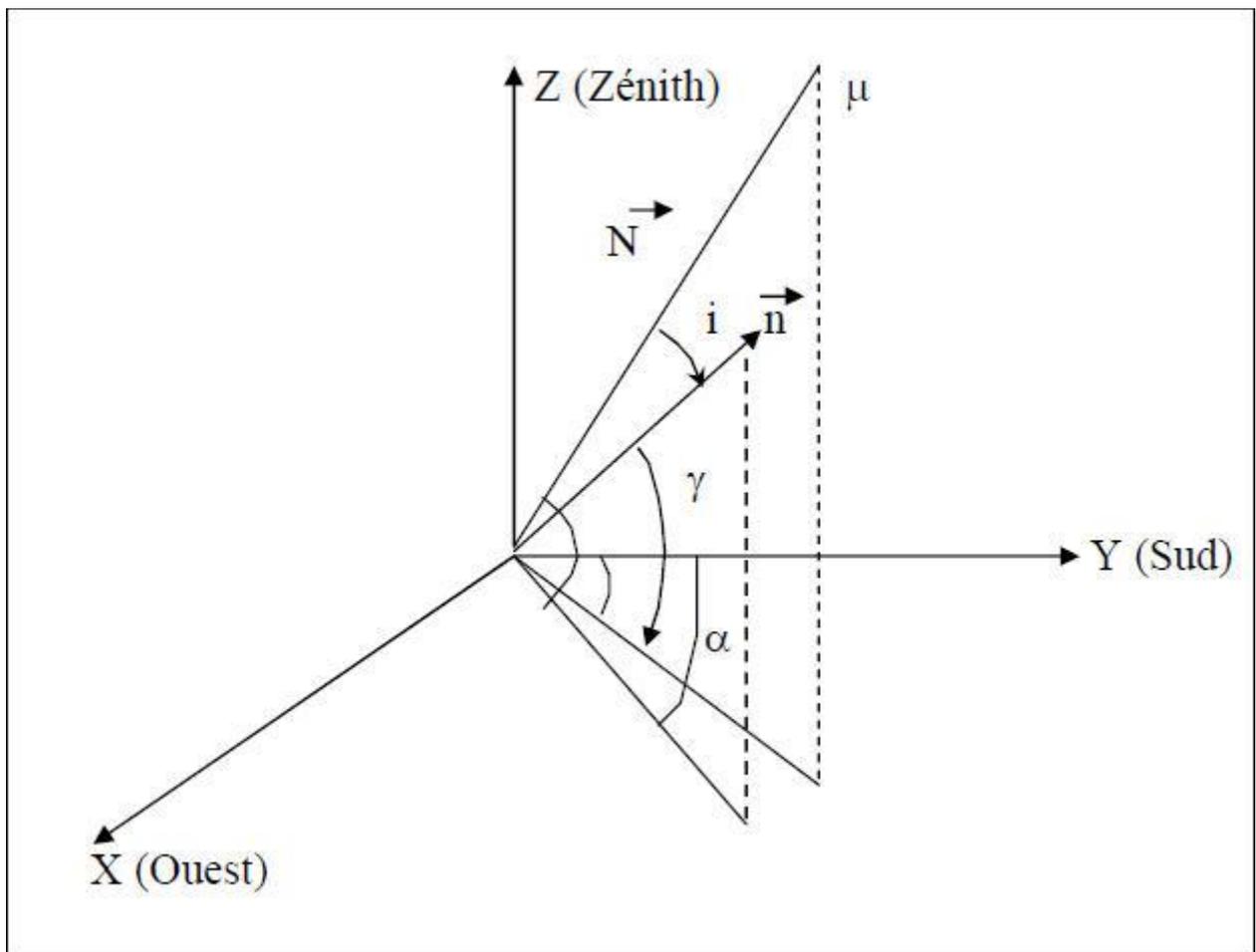


Figure I.6 : Représentation des vecteurs unitaires

$$\vec{N} \times \vec{n} = \|\vec{n}\| \times \|\vec{N}\| \times \cos(i) = \cos(i)$$

$$\vec{N} \times \vec{n} = \sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + \cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + \sin(h) \times \sin(\gamma) = \cos(i)$$

Par conséquent:

$$\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a - \alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma)$$

Exprimons  $\cos(i)$  en coordonnées horaires, il en résulte:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma)$$

Dans les cas particuliers où les surfaces sont horizontales ou verticales avec différentes orientations, l'expression devient:

- Surface horizontales:  $\gamma = \pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)$$

- Surface verticales:  $\gamma = 0$

- Surface verticales orientées vers le Sud :  $\alpha = 0$ .

$$\cos(i) = \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)$$

- Surfaces verticales orientées vers le Nord:  $\alpha = \pi$

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \sin(\delta) - \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta)$$

- Surface verticales orientées vers l'Est:  $\alpha = -\pi/2$

$$\cos(i) = -\cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Ouest:  $\alpha = +\pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

- Surface orientée vers le sud et incline d'un angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\Phi - \beta) + \sin(\delta) \times \sin(\Phi - \beta)$$

## I.10. Aspects énergétiques du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altération et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes...).

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope). L'autre partie dite directe est anisotrope [1].

### I.11. Les différents types de rayonnement :

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.

Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite.

Les rayonnements électromagnétiques se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde.

La figure (I.7), donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde

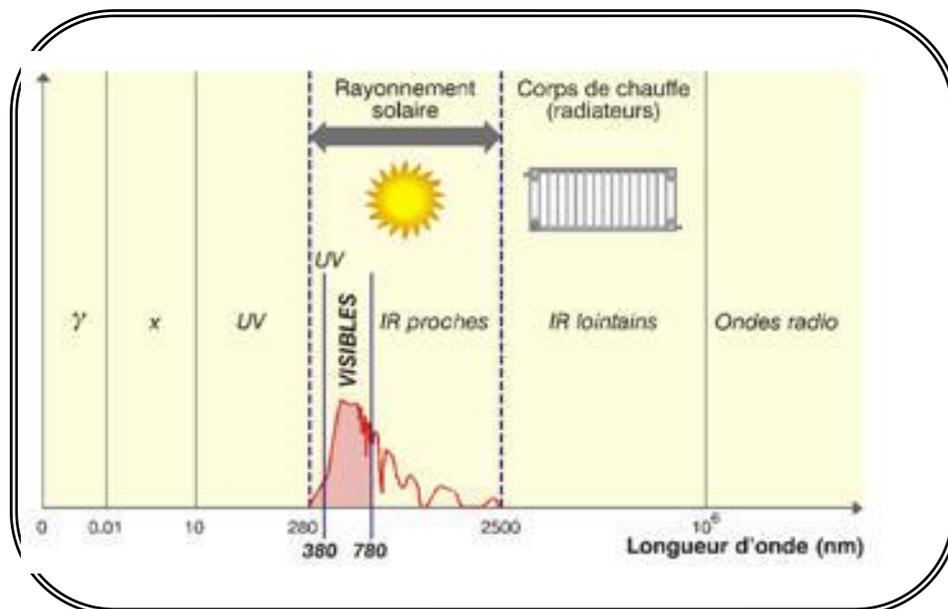
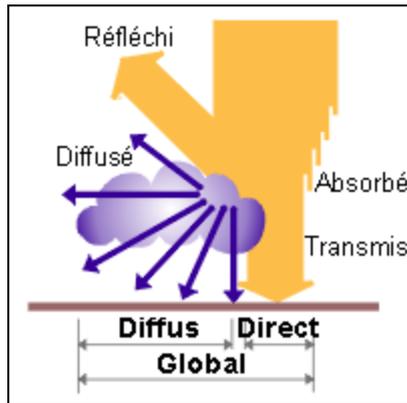


Figure I.7 : Classification des divers rayonnements électromagnétiques

### I.12. Rayonnement solaire :

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que  $1354 \text{ w/m}^2$  (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure (I.8) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.



**Figure I.8 : Les composants du rayonnement solaire**

*Le rayonnement direct* est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

*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). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

*Le rayonnement global* qui est la somme du rayonnement direct et diffus.

Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

### **I.12.1. Rayonnement direct :**

L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est [1,7] :

$$I_{dir} = I_C \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{P}{1000}\right) \times \cos(i) \quad (I.6)$$

a et b : Coefficients traduisant les troubles atmosphérique (tableau I.1)

P: la pression atmosphérique en fonction de l'altitude (tableau I.2).

**Tableau I.1: Valeur des coefficients de trouble atmosphérique**

	Ciel pur	Condition normale	Zone industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

**Tableau I.2: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude**

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

**I.12.2.Rayonnement diffus :**

Le rayonnement diffus provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface de captation se caractérise par deux composantes du flux à savoir :

- Le flux diffus émis par la voûte céleste ( $\varphi_1$ ), donné par la relation :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1 + \cos(b)}{2} \quad (I.7)$$

- Le flux émis par le sol ( $\varphi_2$ ), donné par l'expression :

$$\varphi_2 = \rho \times \frac{1 - \cos(b)}{2} \times (I_c \times \tau_{dir} \times \sin(h) + \varphi_0) \quad (I.8)$$

Avec:

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir}) \quad (I.9)$$

$\tau_{dir}$ : Étant la transmissivité total de la couche atmosphérique pour le flux solaire incident direct est donnée par [8]:

$$\tau_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{P}{1000}\right) \quad (I.10)$$

$\rho$ : L'albédo du sol, les valeurs de ce coefficients sont données dans le tableau ( I.3):

**Tableau I.3: Valeur de l'albédo du sol "ρ".**

Nature de sol	Neige Fraiche	Neige ancienne	Sol Rocheux	Sol cultivé	Forêt	Etendue D'eau
Valeur de $\rho$	0.8-0.9	0.5-0.7	0.15-0.25	0.07-0.14	0.06-0.20	0.05

Le flux diffus s'écrit par conséquent de la manière suivante :

$$I_{dif} = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (I.11)$$

### II.12.3. Rayonnement global :

Le rayonnement global sur une surface est la somme du rayonnement direct ( $I_{dir}$ ) et du rayonnement diffus ( $I_{dif}$ ), soit :

$$I_{gl} = I_{dir} + I_{dif} \quad (I.12)$$

### II.13. Le gisement solaire en Algérie:

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [9].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.7 :

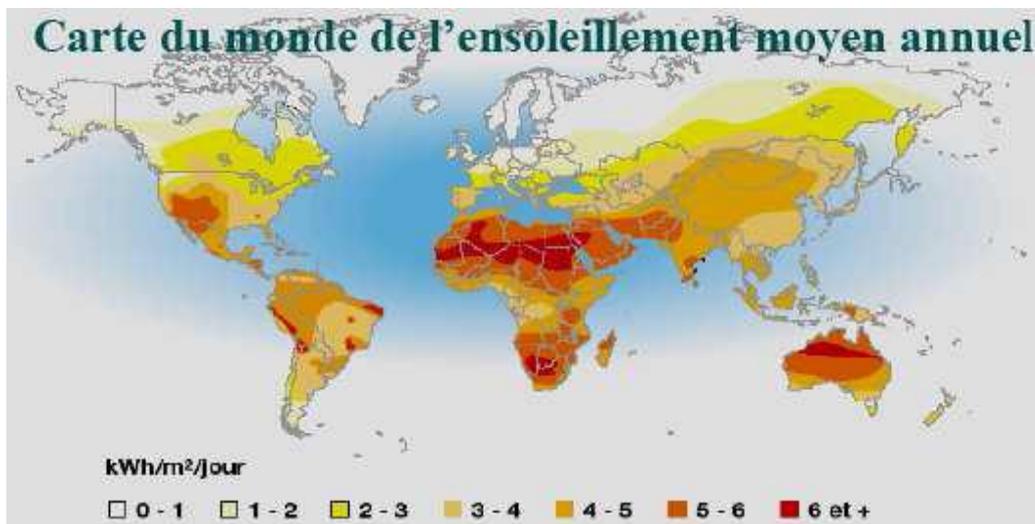


Figure I.9. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [10]

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 Hassi R'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 [10]:

**Tableau I.4. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques**

Régions	Région côtières	Haute plateaux	Sahara
Superficie ( % )	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

#### **II.14. Conclusion :**

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [10].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel solaire de toute l'Algérie.

**Chapitre II :**  
**Etude Bibliographique**

## **II.1 - Conversion de l'énergie solaire**

L'énergie solaire est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Cette énergie peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. Comparée aux différentes formes d'énergies classiques existantes, l'énergie solaire possède les avantages suivants :

- Après avoir recouvert 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 de façon significative les émissions des gaz à effet de serre;

L'énergie du soleil peut être utilisée de différentes façons en employant trois grandes Technologies soient, l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie Photovoltaïque.

### **II.1.1 L'énergie solaire passive**

Elle remplace avantageusement les énergies conventionnelles utilisées pour chauffer ou refroidir les bâtiments. L'énergie solaire passive, capable de fonctionner seule sans apport d'énergie extérieure, elle utilise l'architecture des bâtiments, l'orientation des murs, toits et fenêtres pour capter les rayons du soleil.

### **II.1.2 L'énergie photovoltaïque**

Par l'utilisation de panneaux photovoltaïques, une partie du rayonnement solaire est directement transformée en électricité. Ces panneaux solaires sont composés de cellules photovoltaïques constituées principalement de silicium. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste à l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou convertie à l'aide d'un onduleur pour être distribuée dans le réseau électrique.

### **II.1.3 L'énergie solaire active**

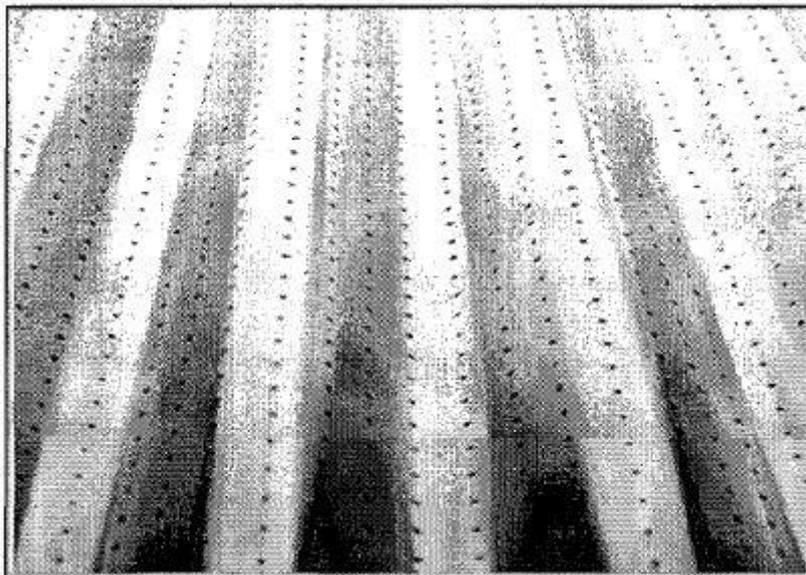
À l'aide de capteurs solaires, le capteur solaire actif transforme les rayons solaires en énergie thermique. Il emploie une source d'électricité supplémentaire pour actionner des pompes ou des ventilateurs qui distribuent l'énergie solaire à l'intérieur du bâtiment. Celle-ci

est acheminée vers un autre endroit, ou elle sera utilisée immédiatement ou stockée en vue d'un usage ultérieur. Le transfert de chaleur s'effectue au moyen d'un fluide caloporteur, qui peut-être de l'eau, de l'antigel ou de l'air.

On utilise les systèmes solaires actifs principalement pour le chauffage de l'air et de l'eau. Il existe d'autres applications telles que la climatisation, le séchage de produit, la détoxification d'eau contaminée et la production d'énergie électrique d'origine thermique. Les systèmes solaires actifs ont plusieurs applications. Essentiellement, on distingue deux grandes catégories. Le système de chauffage solaire de l'eau, et le système de chauffage solaire de l'air qui est le thème de cette étude.

## **II.2 Le système UTC de chauffage solaire de l'air**

Parmi les techniques les plus répandues pour capter l'énergie solaire actif dans le bâtiment, on peut distinguer le système de chauffage solaire de l'air a plaque perforée parfois appelé capteur solaire non vitre (UTC). Constitue d'une plaque perforée généralement en aluminium ou en acier galvanise de couleur foncée, la plaque peut-être uniforme, ondulée ou de forme trapézoïdale. La forme trapézoïdale est utilisée pour augmente la rigidité de la structure du mur solaire. Ce système est disponible en un large éventail de couleurs correspondant a l'esthétique du bâtiment. Il peut être installé soit sur la face verticale sud ou sur le toit du bâtiment. La figure II.1 présente une plaque perforée typique disponible sur la marche.



**Figure II.1 Plaque noire perforée de Matrix Energy.**

### II.3 Paramètres importants et performances thermiques des UTC

Avant de présenter les travaux antérieurs jugés importants pour cette étude, il est judicieux de définir les principaux paramètres d'entrée, les notions d'efficacité et de performance des UTC ainsi que les symboles qui y sont associés.

Les principaux paramètres ayant une influence sur les performances thermiques des capteurs solaires à perforations sont de trois types:

#### Paramètres géométriques

- ❖ Le diamètre des perforations ( $D$ );
- ❖ Le pas entre les perforations ( $P$ );
- ❖ La porosité de l'absorbeur ( $\sigma$ );
- ❖ Le revêtement de l'absorbeur (absorptivité  $\alpha_{\text{abs}}$ , et émissivité  $\varepsilon_{\text{abs}}$ ).

#### Paramètres d'exploitation

- ❖ La température de sortie de l'air ( $T_{\text{sortie}}$ );
- ❖ La température du capteur ( $T_{\text{abs}}$ );
- ❖ Le débit d'air d'aspiration ( $m \cdot$  ), ou la vitesse de section ( $V_s$ );

#### Paramètres opératoires

- ❖ La température ambiante ( $T_{\text{amb}}$ );
- ❖ Rayonnement solaire incidente ( $G_T$ );
- ❖ Vitesse du vents à proximité de l'absorbeur ( $V_{\text{wind}}$ ).

Tous ces paramètres ont une influence plus ou moins importante sur le rendement ( $\eta_{\text{coll}}$ ) et l'efficacité ( $\varepsilon_{\text{HX}}$ ) du capteur perforé. En pratique, le rendement de l'UTC est fonction de l'énergie utile  $Q_{\text{dell}}$  qu'on cherche toujours à augmenter. La puissance utile récupérée par l'air à travers son passage par l'absorbeur est équivalente à l'énergie solaire incidente moins les pertes thermiques par rayonnement et par convection

### II.4 Revêtement de l'absorbeur

La faisabilité économique et l'exploitation de l'énergie solaire par les systèmes de chauffage solaire de l'air dépendent principalement de l'efficacité de ces derniers. Cependant, l'efficacité est limitée par les pertes thermiques par convection et par rayonnement se produisant au sein de l'absorbeur (plaque perforée).

Un des éléments principaux pour la rentabilité économique de cette technologie est la qualité de l'absorbeur. Cet élément essentiel du capteur solaire, doit avoir la capacité de capter

le maximum d'énergie solaire incidente tout en limitant les pertes sous forme de rayonnement infrarouge.

D'une manière précise, l'exploitation efficace de l'énergie thermique provenant du soleil nécessite une surface d'absorption efficace. Puisque les surfaces métalliques tendent à réfléchir une partie de la lumière incidente, il est possible d'accroître leur efficacité par des revêtements sélectifs qui ont la capacité de combiner deux fonctions en même temps. D'une part, permettre l'absorption de la quasi-totalité du rayonnement solaire incident et d'autre part minimiser les pertes par rayonnement vers l'environnement extérieur.

Au niveau du sol, la plus grande portion du rayonnement solaire incident se situe pour des longueurs d'onde comprises entre (0,3 $\mu$ m et 2,5  $\mu$ m). Un absorbeur efficace devra posséder un coefficient d'absorption élevé ( $\alpha > 0,9$ ) sur cette intervalle. De plus, la température typique d'un absorbeur se situe généralement entre 0 °C et 60°C. De façon à minimiser les pertes par rayonnement, un absorbeur devra idéalement avoir une faible émissivité ( $\epsilon < 0,1$ ) pour des longueurs d'onde supérieur à 2,5  $\mu$ m (Peuser, 2005).

Les revêtements des capteurs solaires peuvent être classés en deux catégories :

- Revêtement sélectif;
- Revêtement non sélectif;

#### **II.4.1 Revêtement non sélectif**

La grande majorité des UTC actuellement installées au Canada, sont composées de revêtements non sélectifs. Ces revêtements non sélectifs sont simplement des peintures «standard » de couleur foncée. Ils ont l'inconvénient, par rapport aux peintures sélectives, d'avoir une émissivité beaucoup plus élevée pour des longueurs d'onde supérieures à 2,5  $\mu$ m ce qui fait en sorte qu'une portion significative de l'énergie reflue est remise sous forme de rayonnement infrarouge vers l'environnement extérieur.

#### **II.4.2 Revêtement sélectif:**

Un revêtement sélectif est une peinture spéciale déposée sur l'absorbeur d'un capteur solaire, qui peut retenir presque entièrement le rayonnement solaire incident auquel il est exposé et réduit simultanément les pertes par émission du rayonnement thermique de l'absorbeur vers l'ambiance extérieure.

## **II.5 Bénéfices des systèmes de chauffage solaire de l'air (UTC):**

Le système de chauffage solaire à plaque perforée présente les avantages suivants:

- Préchauffe l'air d'appoint, ce qui permet de réduire les coûts de chauffage;
- Améliore la qualité de l'air intérieur;
- Relativement facile à installer;
- Augmente la résistance thermique du Mur déjà en place et réduit les coûts d'isolation;
- Ne nécessite pratiquement aucun entretien, ne comporte aucun liquide ni aucune pièce; mobile autre que les ventilateurs du système de ventilation.

## **II.6 Les études effectuées:**

La revue de la littérature exposée dans ce chapitre est une série des travaux juges pertinents pour cette étude. On abordera en premier lieu les travaux effectués sur la théorie du transfert de chaleur des UTCs. Par la suite, les travaux relatifs à l'efficacité du transfert de chaleur seront présentés. Ceci sera suivi par une courte description des outils d'analyse des systèmes d'UTCs.

La recherche sur les UTCs a pris son envol au cours des années 80. Ces recherches initiales ont principalement mis l'accent sur la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur se produisant à travers les plaques perforées. Les principaux objectifs des différentes études étaient d'améliorer la transmission de la chaleur et la diminution du coût du capteur destiné au chauffage solaire de l'air. Toutefois, les plus importantes études à ce jour sur le chauffage solaire de l'air par les UTCs ont été faites par Kutscher, Christensen et Barker (1993). Ils ont effectué une analyse théorique, numérique et expérimentale du transfert de chaleur, sur des capteurs à faible porosité. Dans ces études, Kutscher et coll. ont pu déterminer plusieurs paramètres influençant les performances de l'UTC.

Plus récemment, les chercheurs ont consacré leurs efforts sur l'amélioration de l'efficacité du transfert de chaleur ( $\epsilon_{HX}$ ) dans des conditions expérimentales plus représentatives des conditions réelles d'opérations ainsi que le développement de modèles mathématiques (Leon et Kumar, 2007) et l'utilisation des méthodes de calcul basées sur la dynamique des fluides numériques (méthodes CFD) (Gunnewiek, Brundrett et Hollands, 1996).

### **II.6.1 La théorie du transfert de chaleur:**

Sparrow et Ortiz (1982) ont été parmi les premiers chercheurs qui ont étudié le transfert de la chaleur sur les plaques perforées. Leur objectif était de déterminer les Coefficients de transfert de chaleur entre la plaque absorbante et l'air ambiant. Afin d'atteindre cet objectif, ils

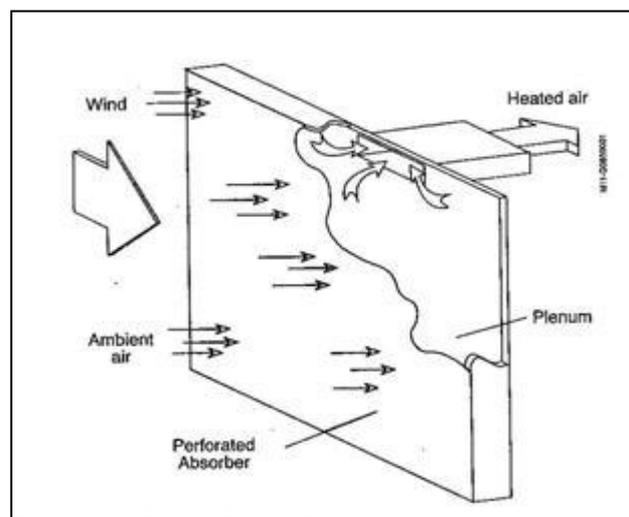
ont effectuée des expériences sur des plaques perforées uniformément avec arrangement triangulaire. Ils ont obtenu une expression pour le nombre de Nusselt ( $Nu$ ) en fonction de l'espace entre les trous ( $P$ ), le diamètre des trous ( $D$ ) et le nombre de Reynolds ( $Re_D$ ) avec une vitesse ( $V_{vent}$ ) égale à zéro. L'expression donnant le nombre de ( $Nu$ ) est donnée par l'équation ci-dessous.

$$Nu = 0.881 \cdot (Re_D)^{0.476} \cdot (Pr)^{0.33} \quad (II.1)$$

Toutefois, la corrélation donnée par l'expression (II.1) ne s'applique pas aux capteurs perforés du fait que la porosité était beaucoup plus élevée (14% à 22%) que celle des plaques généralement utilisées dans des capteurs perforés UTCs (0,1% à 0,5%) (Delisle, 2008).

Kutscher, Christensen et Barker (1993) ont effectuée des expériences sur plusieurs plaques isothermes de différentes épaisseurs, de diamètres et pas des perforations différents. Ces plaques possédant un arrangement triangulaire étaient soumises ou non à l'influence du vent. La figure II.2 représente le capteur perforé utilisé par Kutscher et coll. (1993). L'objectif de ces expériences était de fournir aux concepteurs des systèmes d'UTCs les dimensions optimales, du diamètre de perforations ( $D$ ) et l'espace entre les perforations ( $P$ ). Ainsi, une nouvelle expression du transfert de chaleur a été développée avec une erreur maximale de 9% par rapport aux résultats expérimentaux. Cette expression s'écrit:

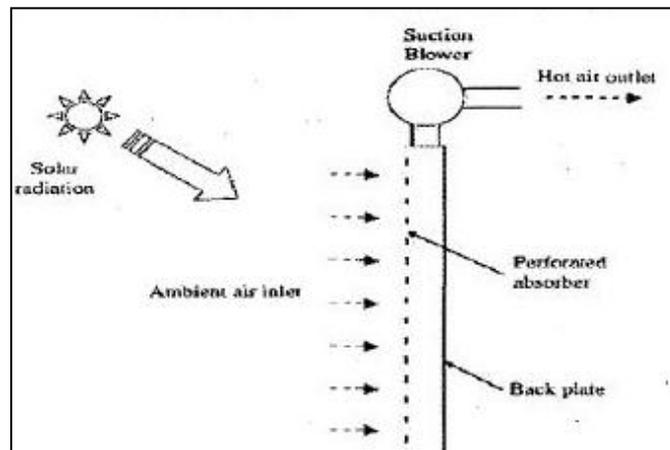
$$Nu = 2.75 \left[ \left( \frac{P}{D} \right)^{-1.21} \cdot Re^{0.43} + 0.011 \cdot \beta \cdot Re_1 \cdot \left( \frac{V_{wind}}{V_{app}} \right)^{0.48} \right]. \quad (II.2)$$



**Figure II.2 Capteur solaire perforé utilisé par Kutscher.**

Récemment, Leon et Kumar (2007) ont développé un modèle mathématique sur une échelle étendue de conditions opératoires. Ce modèle est basé sur les équations de bilan thermique et les corrélations empiriques du transfert de chaleur données par Kutscher (1994). En tenant

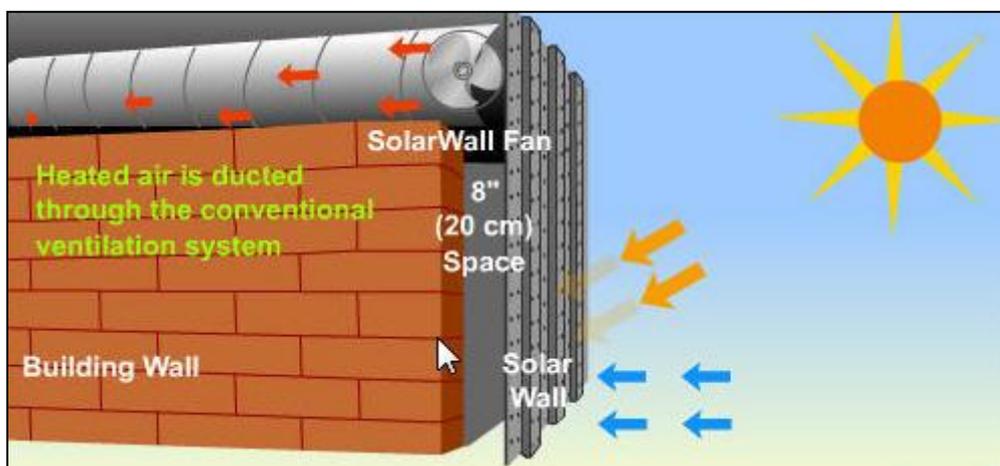
compte du transfert de chaleur sur l'absorbeur, le plenum d'air et les différentes parties du capteur solaire tel, qu'illustres dans la même étude, les résultats du modèle ont été analysés afin de prédire l'effet des paramètres clés sur les performances thermiques du mur solaire pour des températures de sortie entre 45 °C et 55°C figure II.3



**Figure II.3 Configuration du modèle Leon et Kumar.**

Mentionnons l'étude réalisée par Fleck, Meier et Matovic (2002) qui ont mis en place un montage expérimental pour étudier l'effet du vent sur la performance d'un UTC commercialisé sous le nom de « *Solarwall* ». Dans cette étude, un anémomètre ultrasonique est placé au centre du capteur *Solarwall* pour étudier l'écoulement tridimensionnel du vent près du mur. Ensuite une analyse statistique a été faite. Cette analyse suggère que la direction du vent a une influence sur le rendement et l'efficacité du système de chauffage. Cette efficacité est généralement supérieure lorsque le vent s'écoule perpendiculairement au mur comparativement au cas où le vent s'écoulerait parallèlement au mur.

La figure (II.4) représente le dispositif de « *Solarwall* ».



**Figure II.4 Comment la technologie Solarwall fournit-elle gratuitement de l'air chaude**

## II.7 Rappels sur les transferts de chaleur

### II.7.1 Introduction

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps).

L'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [11].

### II.7.2 Les modes de transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur sont

a) Conduction:

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

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température:

$$\vec{\Phi} = -\lambda \vec{\text{grad}}(T) \quad (\text{II.3})$$

Ou sous forme algébrique:

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W}) \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $\Phi$  Flux de chaleur transmis par conduction (W);

$\lambda$ : Conductivité thermique du milieu ( $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$x$ : Variable d'espace dans la direction du flux (m);

$S$ : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ );

b) Convection:

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

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

Loi de Newton:

Cette loi exprime l'échange de chaleur qui existe entre une plaque chaude (à la température T2) et un fluide (à la température T1).

$$\Phi = h S (T1 - T2) [W] \quad (II.5)$$

F : flux thermique (W);

S : surface d'échange (m<sup>2</sup>);

T1 : température de la plaque;

T2 : température du fluide;

La convection est dite forcée si le fluide est mis en mouvement par une action extérieure (pompe, ventilateur, vent...). La convection est dite naturelle si le mouvement du fluide ne résulte que des différences de masse volumique induite par des différences de températures.

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

c) Le rayonnement:

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

La loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan) permet de quantifier ces échanges. La puissance rayonnée par un corps est donnée par la relation :

$$P = \epsilon S \sigma T^4 \quad (II.6)$$

Avec:

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ )

$\varepsilon$  : émissivité, coefficient sans unité qui vaut 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau.

$S$  : superficies du corps ;

$T$  : température du corps (en kelvin).

### II.7.3 Puissance transmise par rayonnement [4]

#### II.7.3.1 Transmission de chaleur entre deux surfaces planes noires en vis à vis total (pas de pertes latérales)

Le facteur d'angle est égal à 1

Le flux transféré de la surface chaude 1 vers la surface froide 2 s'écrit :

$$\Phi = \sigma s (T_1^4 - T_2^4). \quad (\text{II.7})$$

#### II.7.3.2 Transmission de chaleur entre deux surfaces grises planes en vis à vis total (pas de pertes latérales) :

$$\Phi = \sigma f_{12} S_1 (T_1^4 - T_2^4) = \sigma f_{21} S_2 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$$f_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} \quad (\text{II.9})$$

#### II.7.3.3 Transmission de chaleur entre deux surfaces grises enrobant

C'est par exemple le cas de deux surfaces concentriques longues.

Le flux s'exprime encore :

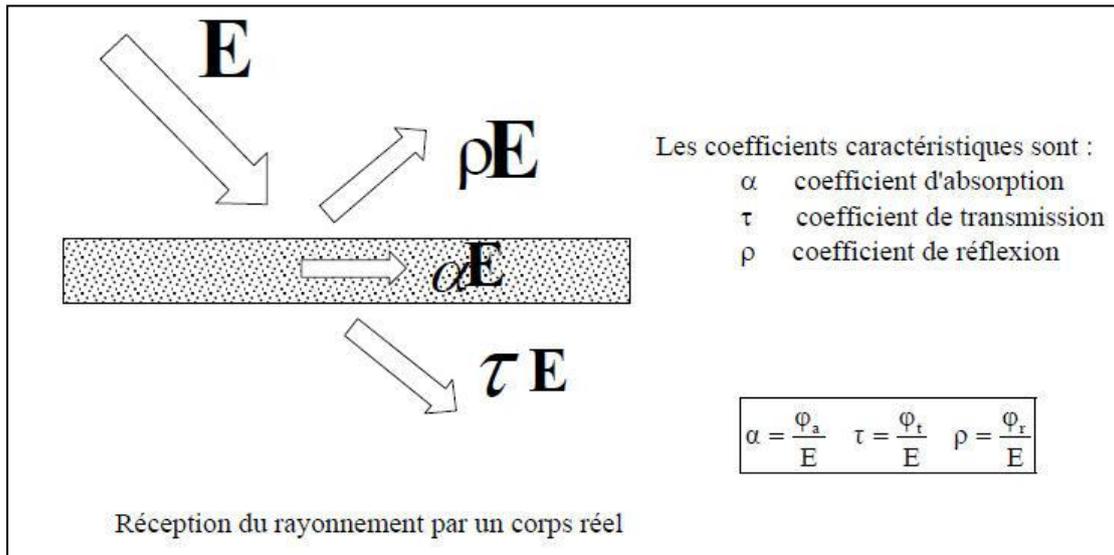
$$\Phi = \sigma f_{12} S_1 (T_1^4 - T_2^4) = \sigma f_{21} S_2 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.10})$$

Mais cette fois ci avec:

$$f_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1 (1 - \varepsilon_2) \frac{S_1}{S_2}} \quad (\text{II.11})$$

### II.7.3.4 Réception du rayonnement par des corps réel [12]

Lorsque un rayonnement atteint la surface d'un corps, une partie est réfléchiée, une autre partie est transmise directement et enfin la dernière partie est absorbée dans la masse de récepteur. Seule cette dernière partie correspond à l'apport énergétique du corps.



**Figure II.5. Réception du rayonnement par un corps réel**

Avec:

$E$ : éclairement.

$\varphi_a$ : Flux absorbé.

$\varphi_t$ : Flux transmise.

$\varphi_r$ : Flux réfléchi.

Une relation simple relie les trois coefficients:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (\text{II.12})$$

Ces coefficients dépendent fortement de la longueur d'onde. C'est le cas pour le verre qui laisse aisément passer les courtes longueurs d'onde et absorbe fortement les grandes longueurs. C'est la base même de l'explication de l'effet de serre.

La figure suivant représente les différents modes de transfert de chaleur:

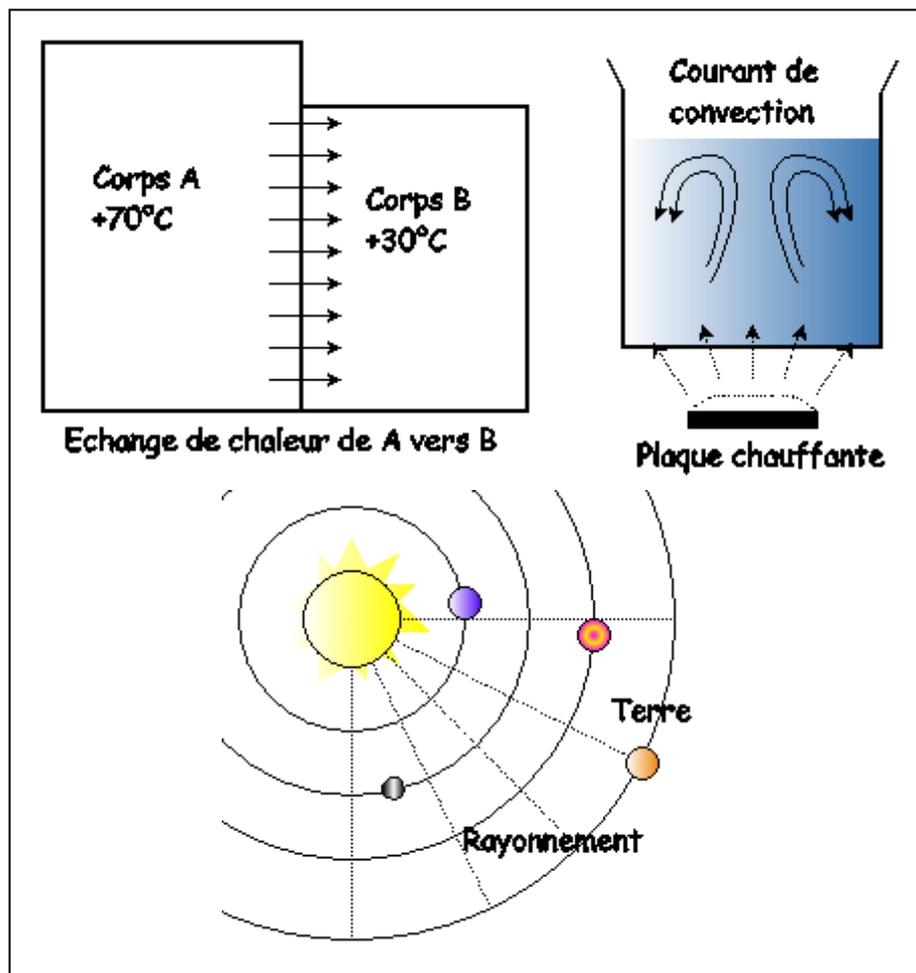


Figure II.6 Les différents modes de transferts de chaleur.

## II.8 Conclusion

Dans cette partie nous avons conclu que les études théoriques du capteur solaire a air non vitré et perforé est ancien, et nous avons présentés quelle que travaux effectué sur la théorie de transfert de chaleur et les paramètres important qui influes sur les performances thermique du capteur.

Chapitre III :

Modélisation d'un capteur  
solaire à air non vitre perforé

## **Modélisation d'un capteur solaire à air non vitré perforé (U.T.C)**

### **III.1 Introduction:**

Pour des applications à basse température, tel que le séchage, le préchauffage de l'air frais entrant dans les bâtiments, les capteurs solaires sont une des sources d'énergies solaires prometteuses. Dans cette partie, on présente des résultats expérimentaux ainsi qu'une évaluation des performances thermiques d'un capteur solaires non vitré perforé (*Unglazed transpired collector U.T.C*) implanté sur la plateforme des essais de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar (Lat.  $27^\circ$ , Log.  $0.17W$ ). Il s'agit d'un type spécifique de capteur solaire pour le préchauffage de l'air, constitué d'un absorbeur noir, ondulé et perforé, ayant une porosité de 1% de sa surface totale.

Les températures de l'air à l'entrée et à la sortie du système, à l'intérieur du capteur (espacement entre absorbeur et isolation) , aux différentes hauteurs de la plaque absorbante, la radiation solaire le débit d'air et la vitesse du vent ont été mesurés et analysés pour faire un bilan énergétique.

Afin de voir l'influence des paramètres clés sur l'efficacité du capteur en variant la porosité et le débit d'air.

Le modèle mathématique est basé sur l'état stationnaire, le flux absorbé par des surfaces ondulées, les différents transferts de chaleur et les pertes de charges après l'aspiration de l'air préchauffé.

### **III.2. Hypothèses Simplificatrice:**

1. Les pertes le long du bord de la cavité sont généralement négligeables par rapport à la grande surface du capteur [13].
2. L'absorbeur est considéré un milieu gris indépendant de la longueur d'onde.
3. L'air qui s'écoule dans la cavité est tiré uniquement à travers les trous de l'absorbeur.
4. La surface de l'absorbeur et de l'isolation est iso thermique, malgré que cette hypothèse ne soit pas valide, les travaux de [13] et [14] montrent que la non iso thermique de l'absorbeur n'influe sur les performances du capteur.

5. L'hypothèse de la température de surface de l'absorbeur constante ne serait pas valide pour des surfaces ombrées, donc la validité de cette hypothèse conduit à supposé que toutes les surfaces sont ensoleillées, cela n'influe pas sur le bilan de l'UTC, mais reste à noter que dans le cas d'un capteur hybride (présence des cellules photovoltaïques), la détermination des surfaces ombrées est nécessaire.
6. L'air traversant la cavité est supposé vertical.

### **III.3. Bilan thermique du capteur :**

Le bilan thermique sur le capteur est le résultat du bilan thermique sur la plaque absorbante, l'air de la cavité et l'isolation.

Commencent par le bilan thermique sur la plaque absorbante :

#### **III.3.1. Bilan thermique de l'absorbeur :**

Le bilan thermique sur la plaque absorbante est exprimé par l'équation (1), la figure (1) montre les différents échanges entre la plaque absorbante, l'isolation, le milieu extérieur et l'air de la cavité :

$$Q_{abs} + Q_{rad,iso-abs} = Q_{conv,abs-plen} + Q_{vent} + Q_{rad,abs,env} \quad (W) \quad (III.1).$$

Tel que :

#### **Les Gains :**

$Q_{abs}$  : Le flux total absorbé.

#### **Les pertes :**

$Q_{rad,abs-iso}$  : Echanges radiatifs (thermiques) à grande longueur d'onde (G.L.O) entre la plaque absorbante et l'isolation.

$Q_{conv,abs-plen}$  : Echanges convectifs entre l'absorbeur et l'air de la cavité.

$Q_{vent}$  : Echanges convectifs entre l'absorbeur et le milieu extérieur (pertes dues au vent).

$Q_{rad,abs-env}$  : Echange radiatif à grande longueur d'onde 'G.L.O' entre l'absorbeur et l'environnement extérieur, (Sol et Ciel).

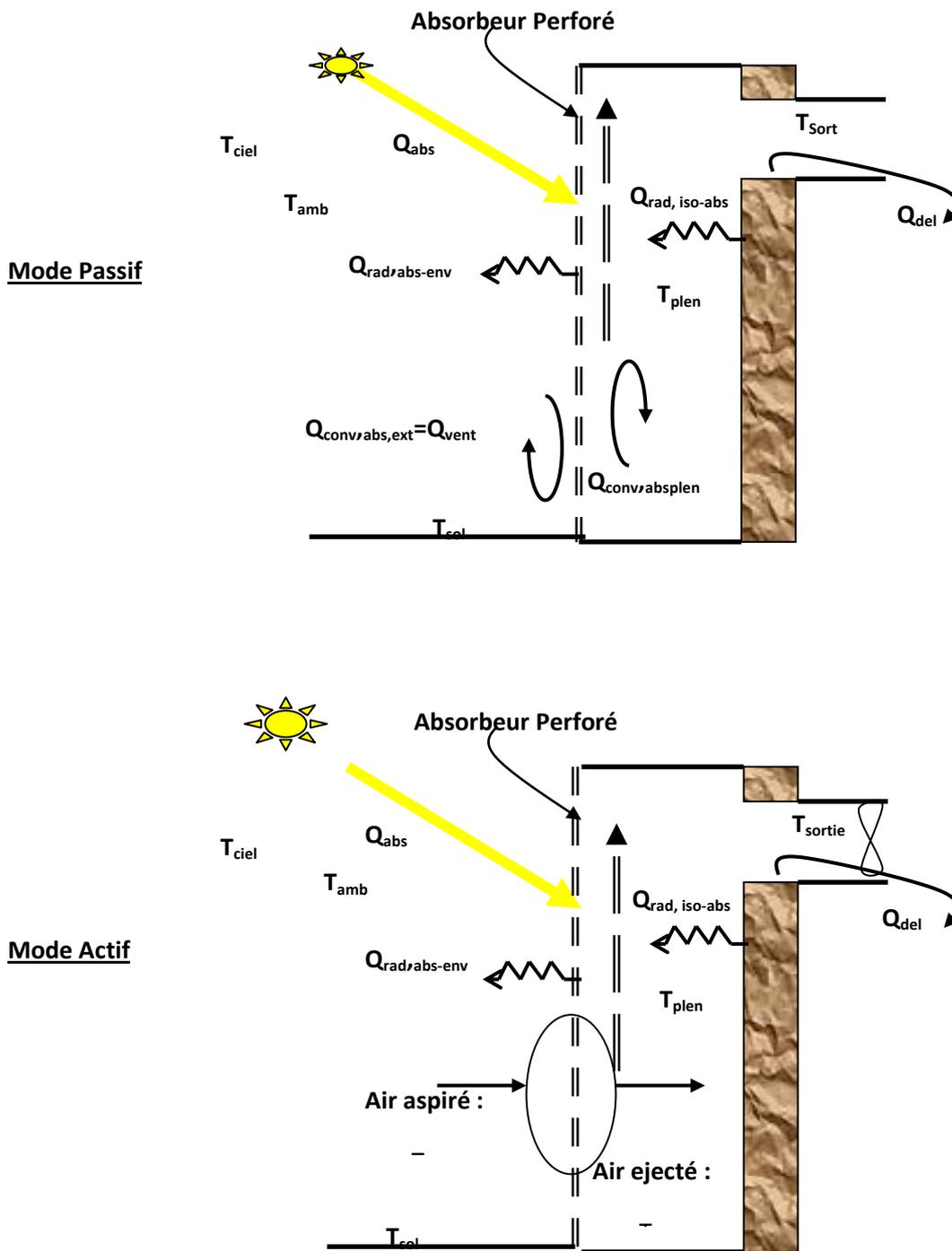


Figure (1) : Bilan thermique de la plaque absorbante.

### III.3.1.1. Détermination des différents flux de l'équation (III.1) :

#### 1. Flux total absorbé

Sachant que le flux absorbé par une surface est donné par :

$$Q_{abs} = \alpha_{abs} * Surf_{col,p} * G_{T,abs} \quad (III.2)$$

$\alpha_{abs}$  : Le coefficient d'absorption de la plaque absorbante.

$Surf_{abs,p}$  : Surface projetée de l'absorbeur, (équivalente à la surface d'un absorbeur plan)

Dans ce cas :  $Surf_{abs,p} = W * L$

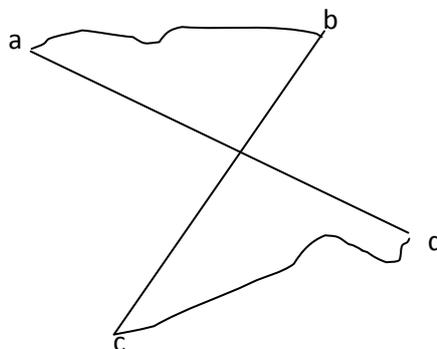
W et L : largeur et longueur respectivement de la plaque (m).

$G_{T,abs}$  : L'irradiation tombante sur la surface totale de l'absorbeur ( $W/m^2$ )

#### · Evaluation des facteurs de formes :

Après la définition de la forme géométrique, on calcule les facteurs de formes par la méthode de **Hottel**, appelée aussi méthode des diagonales. Cette méthode, consiste à donner le facteur de forme entre une surface émettrice (ab) et une surface réceptrice (cd) en géométrie bidimensionnelle par le quotient de (la somme des segments croisés moins la somme des segments non croisés tendus entre les extrémités de ces surfaces) par deux fois la surface émettrice [15].

$$F_{ab-cd} = \frac{(bc + ad) - (ac + bd)}{2ab}$$



Après la définition des surfaces fictives qui seront les frontières d'une cavité, on obtiens pour notre cas deux forme géométrique, figure (5), une forme trapézoïdale et une forme triangulaire:

**Exemple de calcul des facteurs de forme :**

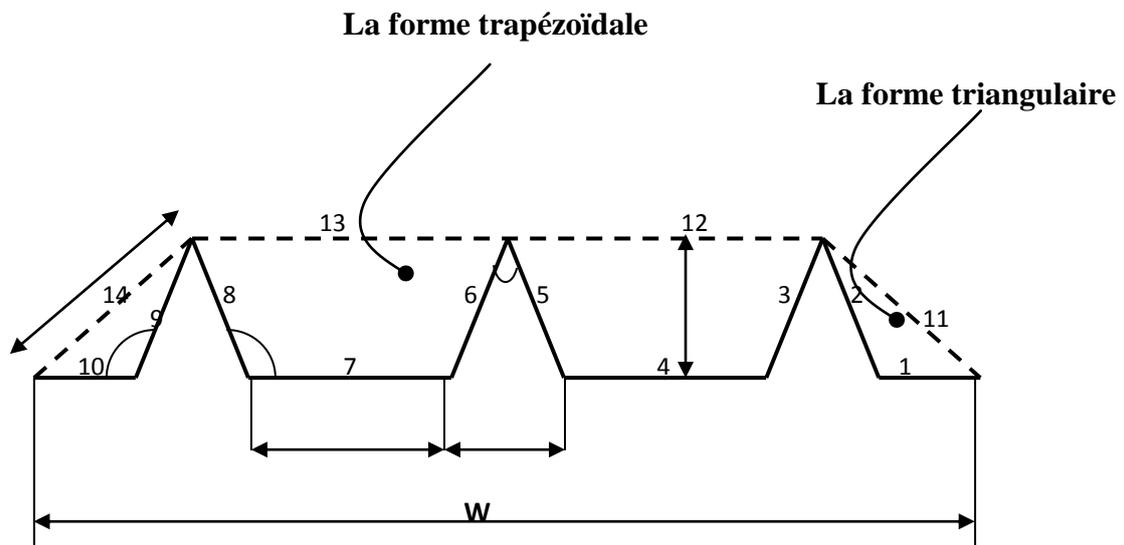
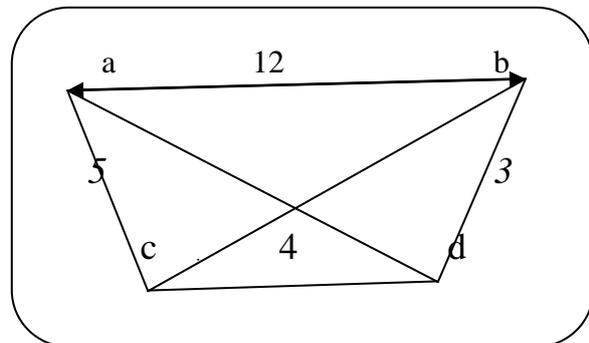


Figure (5)

Le calcul des facteurs de forme entre les surfaces (3, 4, 5 et 12)

$$F_{3-5} = \frac{(ad + cb) - (ac + bd)}{2ab}$$



## 2. Echange radiatif entre l'absorbeur et l'isolation :

Le transfert de chaleur par rayonnement est calculé en se basant sur la loi de Stefan Boltzmann.

$$Q_{rad,abs-iso} = \frac{\sigma_{sb} * A_{abs} * (T_{abs}^4 - T_{iso}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{abs,int}} + \frac{1}{\epsilon_{iso,int}} - 1} \quad (III.3)$$

$\sigma_{sb}$  : Constante Stefan Boltzmann.

$\epsilon_{abs,int}$  : Emissivité de la face intérieure de l'absorbeur.

$\epsilon_{iso,int}$  : Emissivité de la face intérieure de l'isolation.

$A_{abs}$  : La surface d'ouverture de l'absorbeur ( $A_{abs} = W * L$ ) (m<sup>2</sup>).

Généralement l'émissivité de la surface extérieure d'un absorbeur est différente à celle de la surface intérieure, puisque la surface exposée au rayonnement solaire est une surface sélective, dans notre cas on cherche à tester les deux faces de la plaque, qui seront teintées par une couleur noir, donc on admet que les deux surfaces ont la même émissivité,

$$\epsilon_{abs,int} = \epsilon_{abs,ext} .$$

## 3. Echange radiatif entre l'absorbeur et l'environnement extérieur :

$Q_{rad,abs-env}$  : est une formulation de l'échange radiatif entre la surface, le ciel et le sol. L'échange de chaleur radiatif est calculé à partir de la température l'émissivité et les facteurs de formes :

$$Q_{rad,abs-env} = \sigma_{sb} * \epsilon_{abs} * A_{abs} * (1 - \sigma) * (T_{abs}^4 - T_{env}^4) \quad (III.4)$$

$$T_{env}^4 = F_{abs-ciel} T_{ciel}^4 + F_{abs-sol} T_{sol}^4 \quad (III.4.1)$$

Les facteurs de formes surface/sol et surface ciel sont donnés par (Walton 1983):

$$F_{abs-ciel} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (III.4.2)$$
$$F_{abs-sol} = \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

### Détermination de la température du ciel :

L'estimation de la température du ciel est abordée dans plusieurs travaux, (Swinbank 1963, Berger 1984 et Martin 1984), le modèle le plus utilisé est celui de Martin et Berdhal donné par l'algorithme suivant :

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel}^{0.25} * T_{amb} \quad (III.4.3)$$

Cependant l'émissivité du ciel est donnée par un algorithme exigeant la connaissance des paramètres concernant le site, ce qui nous manque, un algorithme plus récent (ASHRAE 1993), donne la température du ciel en fonction de la température de rosé et la pression atmosphérique:

$$T_{ciel} = T_{amb} * (0.689 + 0.0056T_{rosé} + 0.000073T_{rosé}^2 + 0.00012P_{atm})^{0.25} \quad (III.4.4)$$

Température du sol

Dans le présent travail on pose:  $T_{sol} = T_{amb}$ ,

#### **4. Echange convectif entre l'absorbeur et l'air de la cavité:**

Sparrow et Ortiz (1982) ont abordé les premières études du transfert de chaleur sur les plaques perforées. Leur objectif était la détermination du coefficient de transfert de chaleur entre la plaque absorbante et l'air ambiant. L'expression obtenue du nombre de Nusselt (Nu) est fonction de l'espace entre les trous (P), le diamètre (D) et le nombre de Reynolds (Re), pour une vitesse du vent quasiment nulle. Mais cette expression est valable uniquement pour des plaques ayant une porosité de 14% à 24% ,(Delisle Véronique 2008), pour des plaques à faible porosité (0.1% à 1%), les travaux de (Kutscher 1992, 1993) donne l'expression suivante du nombre de Nusselt :

$$Q_{conv.abs-plen} = h_{conv.abs-plen} (T_{abs} - T_{plen}) \quad (III.5)$$

Tel que:

$$Nu = 2.75 * \left[ \left( \frac{P}{D} \right)^{-1.21} * Re_1^{0.43} + 0.011 * \sigma * Re_1 * (V_{vent} / V_s) \right] \quad (III.5.1)$$

et :  $Re_1 = \rho_{air} * V_{trou} * D / \mu_{air}$

Et finalement le coefficient du transfert de chaleur par convection entre l'absorbeur et l'air de la cavité est donné par :

$$h_{conv,abs-plen} = Nu * K_{air} / D \quad (III.5.2)$$

P : La distance entre les trous (m)

D : Diamètre des trous (m)

$\sigma$ : Porosité de la plaque

$\mu_{air}$  : Viscosité de l'air ambiant (Kg/m.s<sup>2</sup>)

$V_{vent}$  : Vitesse du vent (m/s)

$V_s$  : Vitesse d'aspiration (m/s)

$K_{air}$  : Conductivité thermique de l'air (W/m.k).

## 5. Echange convectif entre l'absorbeur et l'air extérieur (vent)

$Q_{conv,abs-env} = Q_{vent}$  : Les pertes de chaleur convectives de l'absorbeur avec le milieu extérieur est de grande importance, pour l'évaluation des performances du capteur, pour la modélisation de ces pertes on utilise la formulation classique de la convection ( $Q_{conv} = h_{conv}(\Delta T)$ ), le coefficient du transfert de chaleur par convection dépend de la nature de l'U.T.C :

Si l'U.T.C est passif le coefficient  $h_{conv}$  est traité comme le cas d'une paroi extérieure exposée aux conditions extérieure. Dans le cas actif la formule de [16] est utilisée :

$$Q_{conv,abs-env} = h_{conv,abs-env} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (III.6)$$

$$h_{conv,abs-env} = C_f * (0.82 * \frac{V_{vent} \nu \rho C_p}{L V_s}) \quad (III.6.1)$$

### III.4. Bilan thermique de l'air de la cavité

Le bilan thermique de l'air de la cavité (En anglais : Plenum), est modelé autour d'un volume de contrôle:

$$Q_{conv,plen,abs} = \dot{m} C_p (T_{plen} - T_{amb}) \quad (III.7)$$

### III.5. Bilan thermique de l'isolation:

On montre sur la figure (6) un bilan thermique sur les deux faces de l'isolation, la première face est au contact direct avec l'air chaud de la cavité, Pour la deuxième face, et puisque le présent capteur est placé à l'extérieur, un bilan avec l'environnement extérieur est effectué:

En régime stationnaire le bilan sur l'isolation est donné par :

$$Q_{rad,iso-abs} + Q_{conv,iso-plen} = Q_{rad,iso-env} + Q_{conv,iso-env} \quad (III.8)$$

Notons que le bilan sur la face intérieure est :

$$Q_{cond,iso} = Q_{rad,iso-abs} + Q_{conv,iso-plen} \quad (III.8.1)$$

Et sur la surface extérieure est :

$$Q_{cond,iso} = Q_{rad,iso-env} + Q_{conv,iso-env} \quad (III.8.2)$$

$$Q_{conv,iso-plen} = h_{conv,iso-plen} (T_{iso} - T_{plen}) \quad (III.9)$$

Dans l'équation (8) le coefficient du transfert de chaleur est donné par :

$$h_{conv,iso-plen} = Nu_{iso-plen} * K_{air} / H_{plen}$$

$H_{plen}$ : Hauteur de la cavité (m),

Le nombre de Nusselt utilisé dans cette situation est celui de l'écoulement parallèle à une plane :

$$Nu_{iso-plen} = 0.664 * Re_L^2 Pr^{1/3} \quad \text{Pour } Re_L < 5 * 10^5 \quad (III.9.1)$$

$$Nu_{iso-plen} = (0.037 * Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad \text{Pour } 5 * 10^5 < Re_L < 10^8 \quad (III.9.2)$$

Les nombres adimensionnels (Reynolds ( $Re_L$ ) et de Prandtl ( $Pr$ )), sont donnés par:

$$Re_L = \frac{V_{plen,moy} * H}{V_{air}} \quad \text{et} \quad Pr = Cp_{air} * \mu_{air} / K_{air}$$

Dans l'équation (7), reste à déterminer les deux termes :  $Q_{conv,iso-env}$  et  $Q_{rad,iso-env}$  :

**Commencant par le terme convectif :**  $Q_{conv,iso-env}$

$$Q_{conv,iso-env} = h_{conv,iso-env} * (T_{iso} - T_{amb})$$

Le nombre de Nusselt est donné en fonction de la vitesse du vent :

$$Nu_{vent} = 0.664 \left( \frac{V_{vent} * W}{V_{air}} \right)^{0.5} * Pr^{0.33}$$

**Le terme radiatif**

$$Q_{rad,iso-env} = \sigma_{sb} * \epsilon_{iso} * A_{abs} * (T_{iso}^4 - T_{env}^4)$$

$T_{env}$  : est déterminé par les équations (3.1), (3.2) et (3.4).

$\epsilon_{iso}$  : Emissivité de l'isolation.

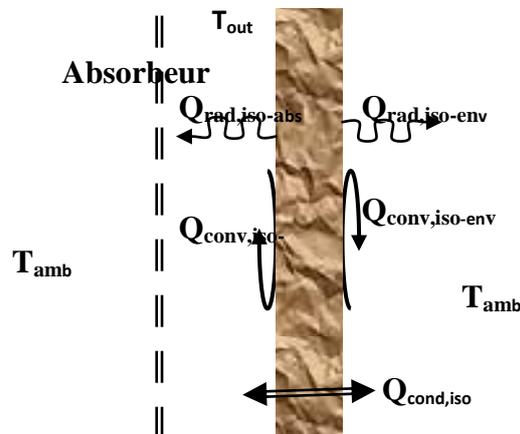


Figure 6 : Bilan thermique de l'isolation.

Le capteur reçoit un rayonnement solaire global (direct et diffus), mais celui-ci n'est pas totalement récupère du aux différentes pertes thermiques existantes dans le capteur perfore. Pour une puissance de rayonnement solaire donnée, la fraction de l'énergie récupérée varie en fonction de la différence de température ambiante et de la température de l'air a la sortie de l'absorbeur. Par conséquent, le rendement du capteur solaire peut être défini comme étant la fraction d'énergie solaire convertie en énergie thermique utile.

### III.6. L'efficacité thermique d'un capteur :

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{sort,air}} * C_{p,\text{air}} (T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}})}{G_T * A_{\text{abs}}} \quad (\text{III.10})$$

#### III.6.1. L'efficacité d'échange de chaleur:

$$\epsilon_{HX} = \frac{T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}}{T_{\text{Abs}} - T_{\text{amb}}} \quad (\text{III.11})$$

### III.7. La perte de charge:

Calcul les pertes de charge:

La perte de charge totale est donnée par la relation suivante [17]:

$$\Delta P_{\text{Tot}} = \Delta P_{\text{abs}} + \Delta P_{\text{buoy}} + \Delta P_{\text{acc}} + \Delta P_{\text{f,plen}} + \Delta P_{\text{f,cond}} + \Delta P_{\text{f,coude}} \quad (\text{III.12})$$

Ou:

$\Delta P_{\text{abs}}$ : la perte de charge au niveau de surface de l'absorbeur.

$\Delta P_{\text{buoy}}$ : la perte de charge due au force résultant de la poussée de l'air, subie par le volume immergé d'un corps, opposée au poids total de ce même corps.

$\Delta P_{\text{acc}}$ : la perte de charge du à l'accélération de l'air.

$\Delta P_{\text{f,plen}}$ ,  $\Delta P_{\text{f,cond}}$ ,  $\Delta P_{\text{f,coude}}$ : la perte de charge due au frottement dans le plénum, dans le conduit et dans le coude, respectivement.

1) La perte de charge à travers l'absorbeur est donnée par Kutscher (1994) comme:

$$\Delta P_{\text{abs}} = \frac{\rho_{\text{moy}} \times V_{\text{asp}} \times \zeta}{2} \quad (\text{III.13})$$

Telque:

$$\zeta = 6.82 \times Re_D^{-0.236} \times \left[ \frac{1-\sigma}{\sigma} \right] \quad (III.14)$$

Et le  $Re_D$  définie comme suite:

$$Re_D = \frac{V_{asp} \times D}{\sigma \times v_{moy}} \quad (III.15)$$

Calcul de la porosité:

Van Decker et al. (2001) a défini la porosité d'une plaque avec les trous circulaires sur un ton carré comme:

On à: les dimensions de la plaque sont: L = 179.5cm, W = 85cm, e = 12cm et le pas entre les trous P = 3.3cm.

$$\sigma = \frac{\pi \times D^2}{4 \times P^2} \quad (III.16)$$

$$\sigma = \frac{\pi \times (0.002)^2}{4 \times (0.033)^2} = 0.00288.$$

La viscosité cinématique moyenne,  $v_{moy}$  pet être égale à 0.0000159 m<sup>2</sup>/s, et la porosité de l'absorbeur de 0.288% porosité avec les perforations qui ont un diamètre équivalent de 0.002 m,  $Re_D$  et  $\zeta$ . à une vélocité de la succion de 0.02 m/s correspondez à:

$$Re_D = \frac{0.02 \times 0.002}{0.00288 \times 0.0000159} = 873.51 \quad (III.17)$$

$$\zeta = 6.82 \times ((873.51)^{-0.236}) \times \left[ \frac{1-0.00288}{0.00288} \right]^2 = 165.33 \times 10^3 \quad (III.18)$$

On va calculer la masse volumique moyenne d'après la loi des gaz parfait:

$$\rho = \frac{P}{R \times T} \quad (III.19)$$

Dans l'équation (III.19) R est la constant des gaz parfait R = 0.287 Kj/Kg.°K, considérant à pression atmosphérique 101.325 KPa une température ambient 35°C et 50°C pour

l'absorbeur, la masse volumique de l'air à température moyenne dans la cavité est peut calculer par la formule suivant:

$$\rho_{\text{moy}} = \frac{101.325}{0.287 \times \left( \frac{308+323}{2} \right)} = 1.12 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{III.20})$$

Utiliser les résultats d'équations (17) et (19) dans équation 2, la perte de charge à travers l'absorbeur peut être calculé:

$$\Delta P_{\text{abs}} = \frac{1.12 \times (0.02)^2 \times 165.33 \times 10^3}{2} = 37.034 \text{ Pa} \quad (\text{III.21})$$

2) La perte de charge due à l'accélération de l'air est donnée par la formule suivante:

$$\Delta P_{\text{acc}} = \frac{\rho_{\text{moy}} \times V_S}{2} \quad (\text{III.22})$$

Talque:  $V_S$  la vitesse d'air sortie est donnée par l'expression:

$$V_S = \frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{cond}}} \quad (\text{III.23})$$

Le panneau a une largeur de 85cm et une longueur de 179.5 cm. Donc, le débit volumique max  $Q_{\text{max}}$  correspond à:

$$Q_{\text{max}} = 0.02 \times 3600 \times 0.85 \times 1.795 = 109.85 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{III.24})$$

Utilisant le résultat d'équation (III.23) dans équation (III.22), la vitesse de l'air sortie pour un conduit avec un diamètre de 0.1m est:

$$V_S = \frac{109.85 \times \frac{1}{3600}}{\frac{3.14 \times (0.1)^2}{4}} = 3.88 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{III.25})$$

Utiliser le résultat d'équation (24) dans l'équation (21), la perte de charge due à l'accélération peut être obtenue:

$$\Delta P_{\text{acc}} = \frac{1.12 \times 3.88^2}{2} = 8.43 \text{ Pa} \quad (\text{III.26})$$

La perte de charge due à la flottabilité est exprimée comme:

$$\Delta P_{\text{buoy}} = \frac{(\rho_{\text{sortie}} - \rho_{\text{amb}}) \times g \times L}{2} \quad (\text{III.27})$$

Utilisant équation (8) on obtient  $\rho_{\text{sortie}}$ ,  $\rho_{\text{amb}}$  et  $\Delta P_{\text{buoy}}$  peut être calculé:

$$\Delta P_{\text{buoy}} = \frac{(1.13 - 1.20) \times 9.8 \times 1.795}{2} = -0.61 \text{ Pa} \quad (\text{III.28})$$

Le composant de perte de charge au niveau de plénum de l'équation (III.10) est donné par l'équation suivant

$$\Delta P_{f,plén} = f \times L \times \frac{\rho_{moy} \times v_{moy}^2}{2 \times D_h} \quad (III.29)$$

Où  $D_h$  : est le diamètre hydraulique,  $f$ : le facteur de la friction est donné par la formule de Swamee-Jain (Swamee & Jain, 1976):

$$f = \frac{0.25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{5.74}{Re^{0.9}} + \frac{\epsilon}{3.7 \times D} \right) \right]^2} \quad (III.30)$$

Où:  $\epsilon$  est la rugosité de la surface. Pour le plénum, la vitesse moyenne et le diamètre hydraulique correspond à:

$$V_{plén} = \frac{1}{2} \times \frac{Q_{max}}{A_{plén}} = \frac{1}{2} \times \left[ \frac{109.85 \times \frac{1}{3600}}{0.85 \times 0.12} \right] = 0.299 \text{ m/s}$$

$$D_{h,plén} = 4 \times \frac{0.85 \times 0.12}{(2 \times 0.12 + 2 \times 0.85)} = 0.21 \text{ m.}$$

On prendre la rugosité d'acier galvanisé 0.09 mm, le facteur de la friction du plénum et la perte de charge totale peut être calculée:

$$f_{plén} = 0.25 \times \left[ \text{Log} \left( \frac{5.74}{\left( \frac{0.299 \times 1.795}{0.0000159} \right)^{0.9}} + \frac{0.0009}{3.7 \times 0.21} \right) \right]^{-2} = 0.015$$

$$\Delta P_{f,plén} = 0.015 \times 1.795 \times \frac{1.12 \times 0.299}{2 \times 0.21} = 0.0214 \text{ Pa} \quad (III.31)$$

Notre système ne contient pas une conduite et coude donc:

$\Delta P_{f,cond}$  et  $\Delta P_{f,coude}$  sont égale à zéro.

Alors:  $\Delta P_{Tot} = \Delta P_{abs} + \Delta P_{buoy} + \Delta P_{acc} + \Delta P_{f,plén}$

$$\Delta P_{Tot} = 37.034 + 8.43 - 0.61 + 0.0214$$

$$\Delta P_{Tot} = 44.87 \text{ Pa.}$$

### III.8. Conclusion:

Nous s'intéressons dans ce chapitre de présentés le modèle mathématique qui définit les différents bilans thermique pour chaque partie du capture et on nous fait déterminée les pertes et le gain ainsi que les différent échange thermique effectués et les pertes de charge dans le capture.

**Chapitre IV :**  
**Réalisation expérimentale**

## IV.1. Préparation et installation des thermocouples

### 1) Définition :

En physique les thermocouples sont utilisés pour la mesure de température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut et leur précision: il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0.1-0.2 °C. La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck.

### 2) Différents types de thermocouples

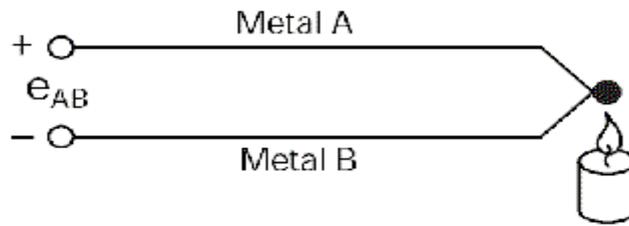
Il existe différents types de thermocouples, correspondant chacun à une gamme de température ou à une plus ou moins grande précision. Leurs propriétés peuvent également dépendre du type d'isolation (gaine) utilisée pour les fils métalliques. La liste suivante donne la définition des thermocouples suivant les normes internationales.

- Type J:  
Composition: Fer / constantan (alliage nickel + cuivre)  
Fonctionne bien dans le vide et dans une plage de température de 0 à 750 °C.
- Type K:  
Composition: Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium (5%) + silicium); iL permet une mesure dans une gamme de température large de -200°C à 1250°C.
- Type T:  
Composition: Cuivre / Constantan (alliage cuivre + nickel)  
Ce thermocouple est particulièrement adapté pour une utilisation à basse température (-200 à 350°C) comme pour des applications cryogéniques.

### 3) Principe de mesure

Les deux métaux a et b de natures différentes, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures  $T_1$  et  $T_2$  tel que présenté sur la figure.

Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions,  $T_e = T_1 - T_2$



On appelle :

- **Soudure chaude** : Jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer: c'est la jonction Capteur.
- **Soudure froide** : Jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  : c'est la jonction Référence.

Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante ( $0^{\circ}\text{C}$ ). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par une capture (température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique. Il est donc nécessaire de connaître la réponse du thermocouple utilisé en fonction de la température pour pouvoir relier la différence de potentiel électrique à la différence de température. La mesure passant par la détermination d'une différence de potentiel, sa précision dépend fortement du voltmètre utilisé.

#### IV.2. Etalonnage des thermocouples

Avant de mesurer les températures dans les différents endroits du capteur, on a procédé à l'étalonnage des différents thermocouples de la façon suivante. Cet étalonnage nous a permis de reconnaître la précision et la performance de ces thermocouples.

##### Types de thermocouples utilisés :

Dans les tests effectués nous avons utilisé sept thermocouples, six de type « k » et un de type « J », le choix de ces sept thermocouples est liée à la vérification de l'emplacement et l'état de ces derniers, donc en cas de détachement d'un thermocouple ou même d'une défaillance inattendue (Ex : coupure de la soudure), un deuxième thermocouple placé au même endroit assure une mesure exacte et continue.

Reste à noter que la gamme d'utilisation et la précision de chaque type sont les principaux paramètres pour faire le choix.

### Déroulement de l'expérience :

L'expérience est très classique, elle est basée sur le teste des températures de référence de l'eau (0 et 100 °C),

Au premier lieu, nous avons préparé deux bains, le premier destiné pour l'eau chaude jusqu'à la température d'ébullition 100°C et l'autre pour réaliser des tests à la température (0°C). Ensuite dans la deuxième étape nous avons mit les sept thermocouples dans le bain chaud (l'un après l'autre), notre objectif est de mesurer la température de l'eau à l'état d'ébullition pour chaque thermocouple, bien sur nous avons essayé de respecter une distance (h), loin du fond du récipient (Figure IV.1).

L'autre partie de ces thermocouples est reliée par un module qui peut être placé sur l'acquisition des données ; ce dernier est considéré comme un appareil à multifonction pour mesurer et enregistrer les résultats.

Dans la troisième étape nous avons appliqué la même procédure que la deuxième, mais cette fois ci nous avons changé le bain chaud par un autre froid (glace fondu), sa température et de (0°C).

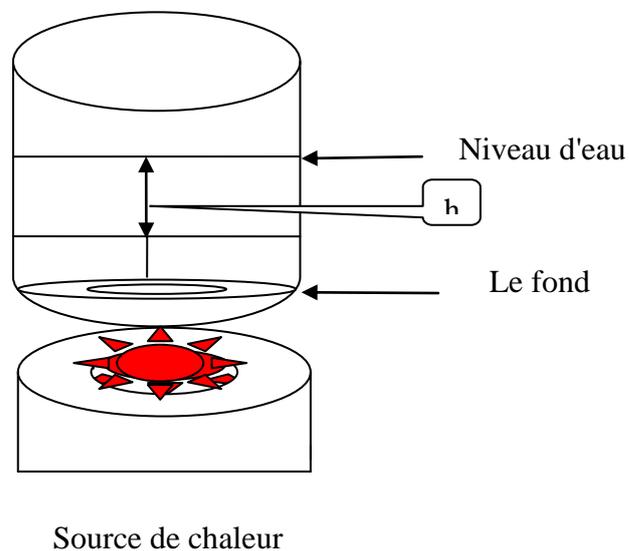


Figure IV.1: chauffage d'eau pour mesure la température d'ébullition.

Les résultats de cette expérience sont résumés dans tableau IV.1

**Tableau IV.1: les résultats d'étalonnage des thermocouples.**

N° de thermocouple	Types	Température chaud	Température froid
1	K	99.500	0.053
2	K	99.996	0.189
3	K	99.996	0.305
4	K	99.812	0.309
5	K	99.453	0.571
6	K	99.981	0.206
7	J	99.952	0.120

### **IV.3. Interprétation des résultats**

A partir de ces résultats nous avons trouvé des valeurs très proches à celle mesurées par le thermomètre, les erreurs comprise entre 0.1 et 0.5 restent toujours incluses dans l'intervalle  $[\pm 0.5]$ , (gamme de précision pour les deux types des thermocouples «k» et «J»). Donc l'étalonnage des thermocouples est positif.

### **IV.4. Préparation du Pyranomètre**

Le rayonnement solaire est mesuré par un Pyranomètre type Kipp & Zonen. Le Pyranomètre de l'Unité de recherche est déjà étalonné, cette tache est effectuée au niveau de l'Unité de recherche de Tamanrasset.

Le pyranomètre que nous avons utilisé dans notre travail est représenté (par la photo que nous avons prise) dans la figure IV.2.



**Figure IV.2: pyranomètre**

Durant notre expérimentation nous avons pris le soin de respecter les précautions d'utilisation suivante:

- L'état de la surface du verre (la coupole) du pyranomètre doit être propre et lisse c'est-à-dire ne présente aucune rature qui empêche la réception correcte du rayonnement solaire.
- Le dessiccateur doit être vérifié afin d'éviter l'accumulation de l'humidité sur sa surface. La couleur rose de dessiccateur indique une quantité importante de l'humidité qui influe considérablement sur les mesures du rayonnement solaire.
- L'emplacement du pyranomètre ne doit projeter aucune ombre sur le capteur, en plus il doit être dans le même plan de l'absorbeur.

Après ces deux dernières expériences nous avons distribué les sept thermocouples sur le modem comme suit :

**Chanel 2** : le thermocouple qui mesure la température de l'absorbeur  $T_{abs(1)}$  ;

**Chanel 3** : le thermocouple qui mesure la température de la cavité  $T_{plén(1)}$  ;

**Chanel 4** : le thermocouple qui mesure la température de la cavité  $T_{plén(2)}$  ;

**Chanel 5** : le thermocouple qui mesure la température de l'absorbeur  $T_{abs(2)}$  ;

**Chanel 6** : le thermocouple qui mesure la température de sortie  $T_s$  ;

**Chanel 7** : le thermocouple qui mesure la température ambiante (1)  $T(1)$ ;

**Chanel 8** : le thermocouple qui mesure la température ambiante (2)  $T(2)$  ;

La figure IV.3 représente la mise en place des thermocouples:  $T_{\text{abs}(1)}$ ,  $T_{\text{abs}(2)}$  et  $T_{\text{plén}(1)}$



**Figure IV.3:schéma représente les positions des thermocouples.**

En suite, nous avons configuré l'acquisition des données sur les paramètres mesurés avec la mise en considération :

- le type « k » doit être adapté pour le Pyranomètre et les thermocouples ;
- Pour les thermocouples : la température en  $^{\circ}\text{C}$  ;
- Pour le Pyranomètre :
  - la puissance de rayonnement en  $\text{W}/\text{m}^2$  ;
  - le type de courant choisi c'est le courant directe « V-CD » ;

#### IV.5. L'acquisition de données

On a utilisé une acquisition de données de marque «FLUKE : HYDRA série II», plus un module de 20 sorties pour relier les sept thermocouples et le Pyranomètre,



Figure IV.4: L'acquisition de données.

#### IV.6. Description du prototype

La figure (IV.5) montre la partie avant du prototype dans sa phase finale, il est composé des parties suivantes:

- **L'absorbeur**: c'est une plaque noire, perforée et ayant une forme triangulaire/trapézoïdale, comme indique la figure (IV.6).
- **Une cavité**: l'écartement entre l'absorbeur et l'isolation en anglais (plenum), typiquement varie entre 5 et 30 cm mais dépend aussi de la géométrie d'un absorbeur à un autre, notre capture à un écart de 12 cm entre l'absorbeur et l'isolant [18].
- **L'isolation**: la face arrière du capteur est constituée d'une isolation et une tôle en acier, dans ce qui suit l'ensemble (isolation + tôle) est appelé uniquement isolation.
- **Zone d'aspiration**: l'air chauffé entre l'absorbeur et l'isolation sera aspiré et éjecté vers l'application souhaitée, pour ceci on a placé un extracteur comme indique la figure (IV.7).



Figure IV.5: La face avant de l'U.T.C.



Figure IV.6: Forme de la plaque absorbante.



Figure IV.7: La partie d'aspiration.

#### **IV.7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons bien détaillé le déroulement de notre expérience, on a commencé de préparer les instruments qu'on a utilisés et de faire étalonner les thermocouples et le pyranomètre avant de placer chacune dans sa place.

Chapitre IV :  
Réalisation expérimentale

## V.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de notre travail pour deux plans différents qui sont réalisés par le logiciel «ORIGIN 8» ainsi que leurs interprétations. Les conditions des tests effectués sont présentés sur les figures ci-dessous où sont représentés les variations de rayonnement solaire ainsi que l'évolution de température pendant les journées des tests.

Notre travail est effectué sur deux positions différentes de la capture:

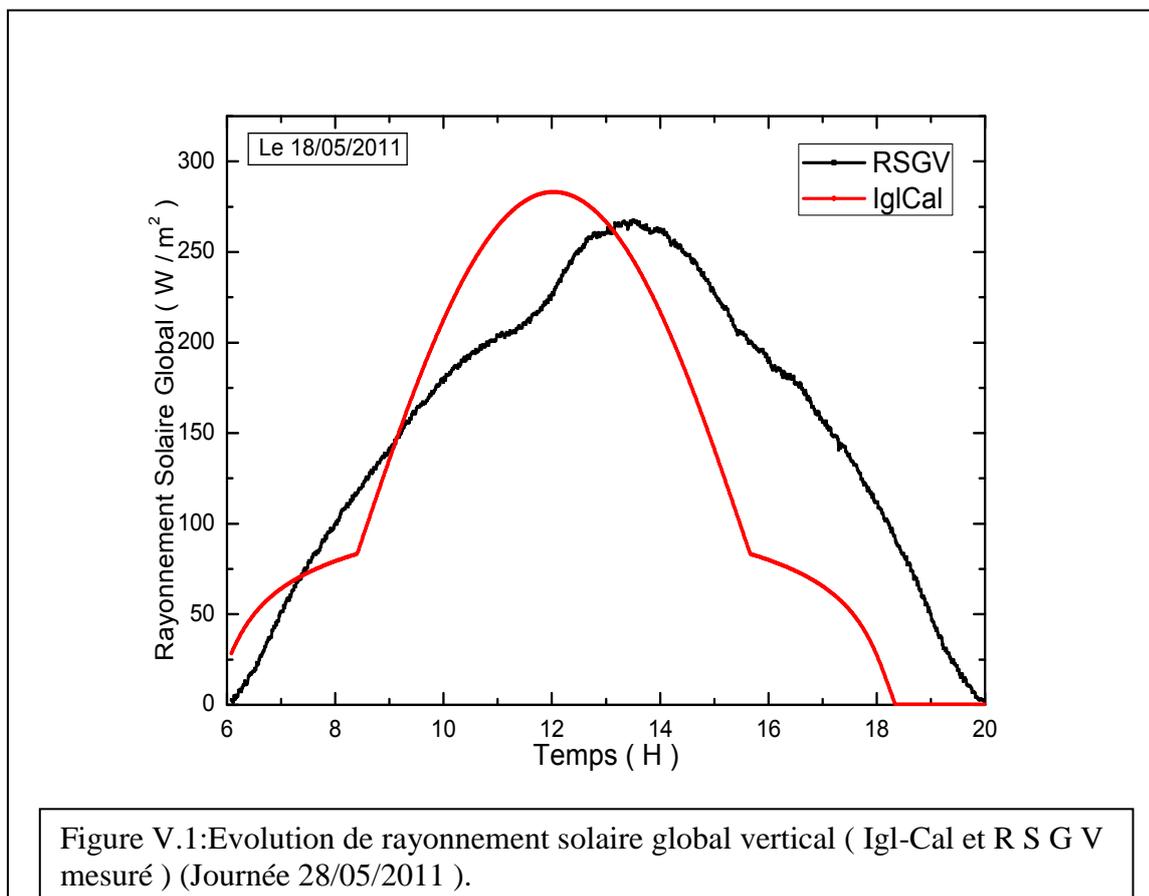
Le premier plan est vertical et l'autre incliné par un angle de 30°.

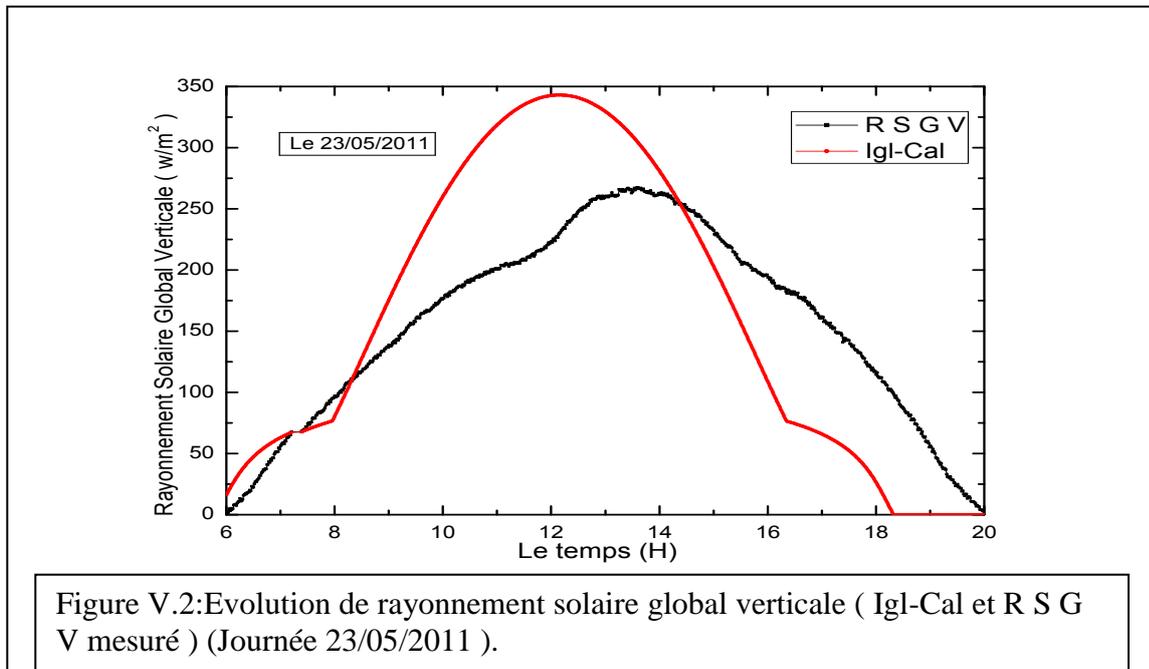
## V.2.plan vertical

### V.2.1. Comparaison entre le rayonnement solaire global calculé (Igl-Cal) et mesuré

#### (R S G I)

Les mesures du rayonnement solaire que nous avons relevé du levé jusqu'au couché du soleil pour les journées: 18 et 23/05/2011 sont représenté sur les figures IV.1 et IV.2.

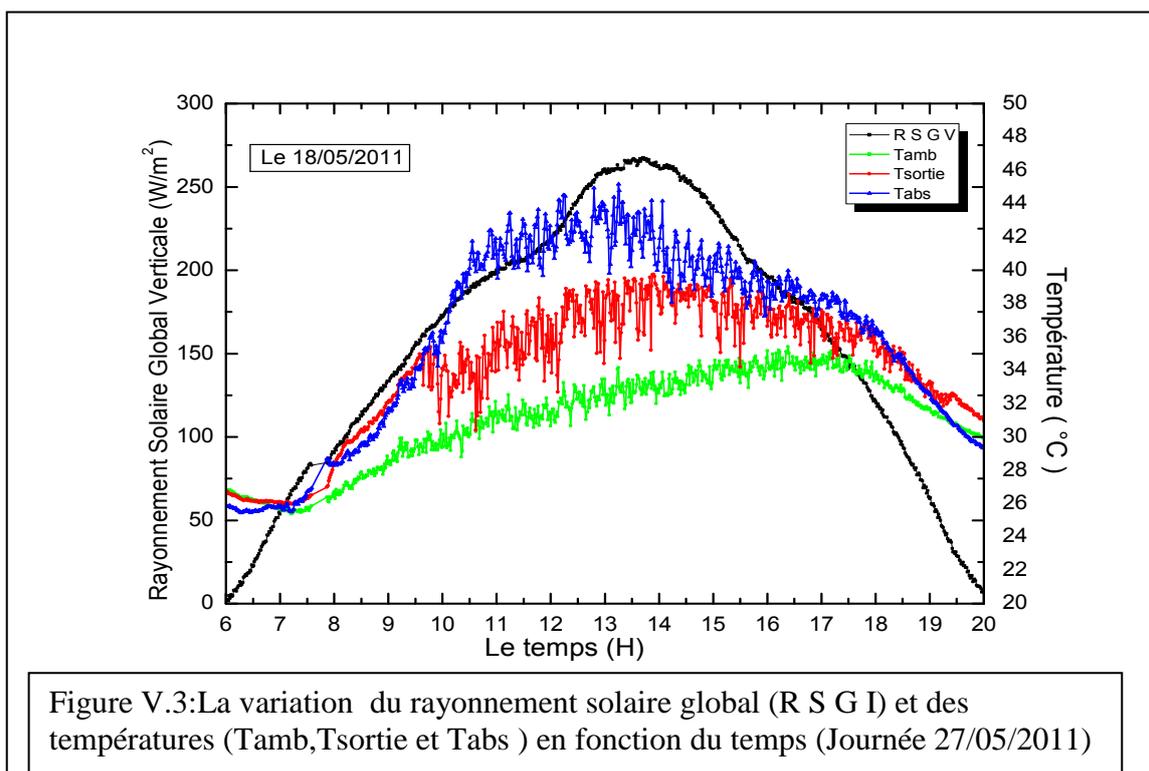




A partir des graphes précédente en remarque que l'évolution de rayonnement solaire global verticale ( Igl-Cal et R S G V mesuré ) pour les deux journées ne sont pas confondues, mais proches.

### V.2.2. Evolution du rayonnement solaire global mesuré et les températures (Tamb, Tabs et Tsortie ) en fonction du temps pour le plan vertical

Les figures IV.3 et IV.4 montrant une corrélation entre le R S G calculé et les températures (Tamb, Tsortie et Tabs) du plan vertical de capture



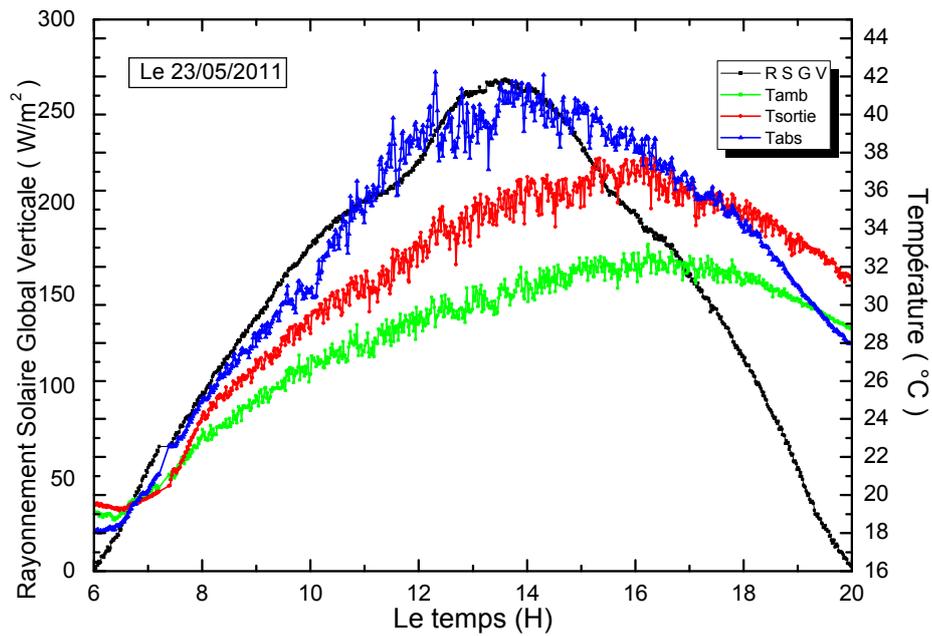


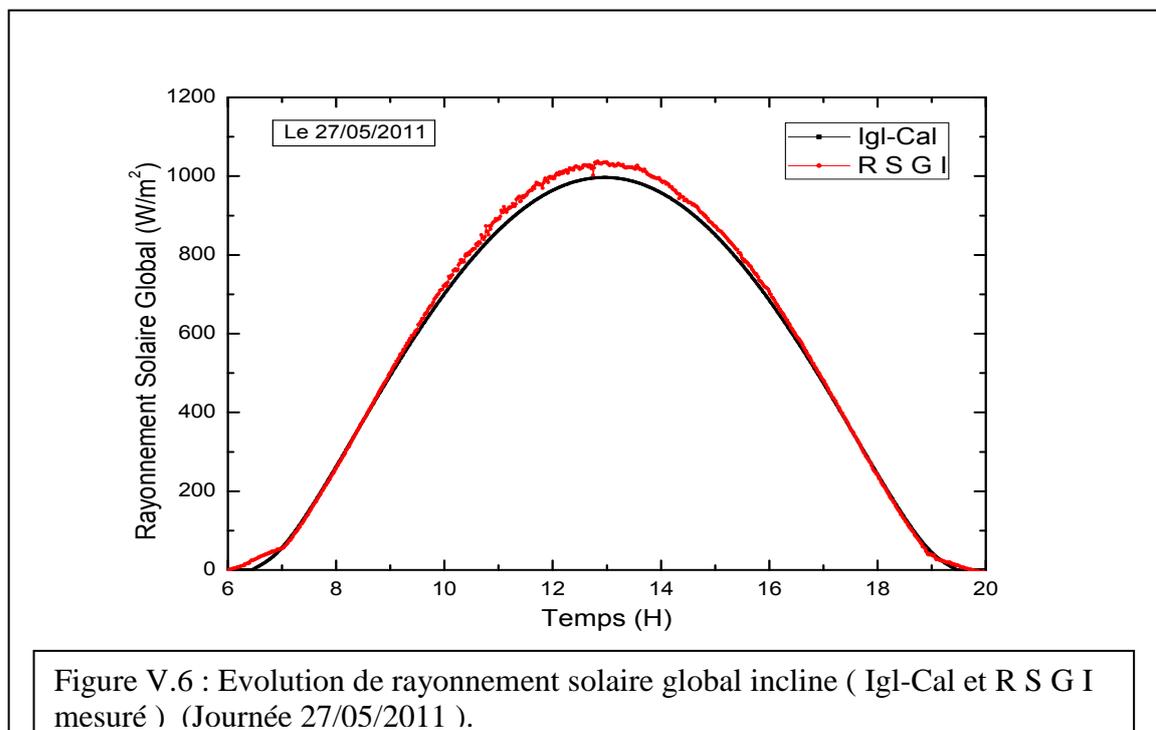
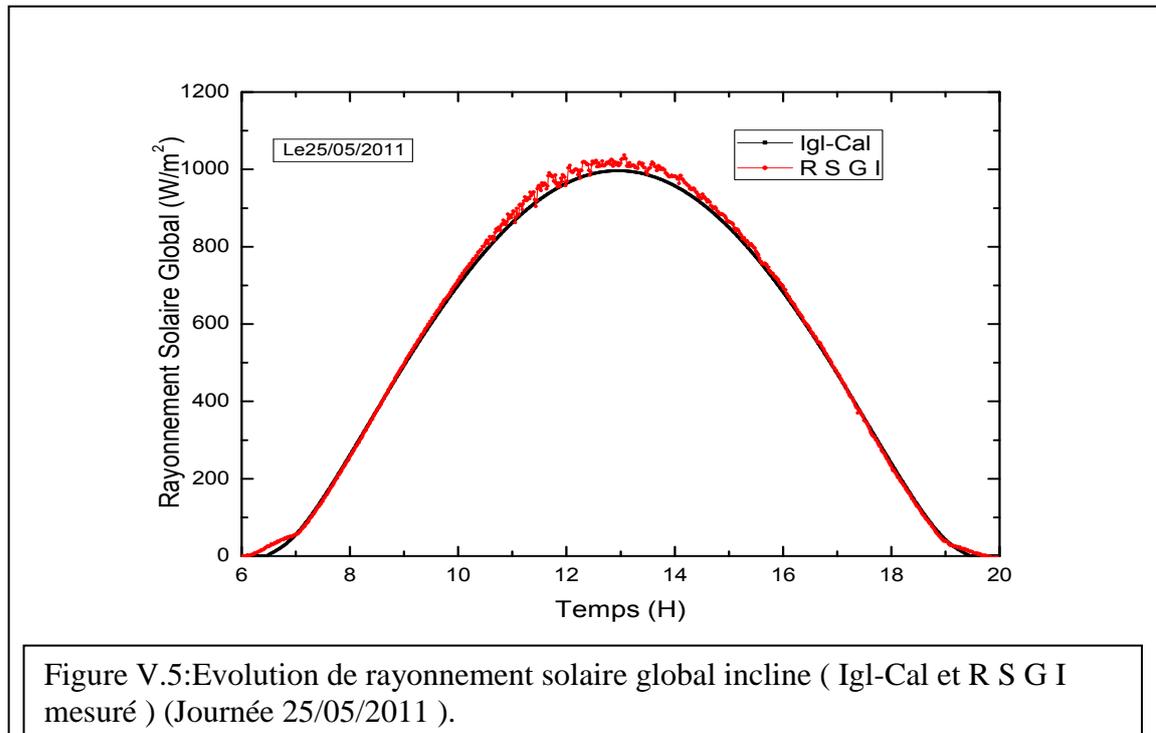
Figure V.4: La variation du rayonnement solaire global (R S G I) et des températures (Tamb, Tsortie et Tabs) en fonction du temps (Journée 27/05/2011)

- Le résultat représenté dans les figures (V.3 et V.4) montre que l'augmentation des températures (Tamb, Tsortie et Tabs) est due à l'augmentation du rayonnement solaire.
- Le chemin des températures Tsortie et Tabs suivent le chemin de rayonnement solaire.

### V.3. plan incliné (30°)

#### V.3.1. Comparaison entre le rayonnement solaire global calculé (Igl-Cal) et mesuré (R S G I)

Les mesures de rayonnement solaire que nous avons relevé du levé jusqu'au couché du soleil pour les journées: 25,27,28 et 29/05/2011 sont représenté sur les figures suivants:



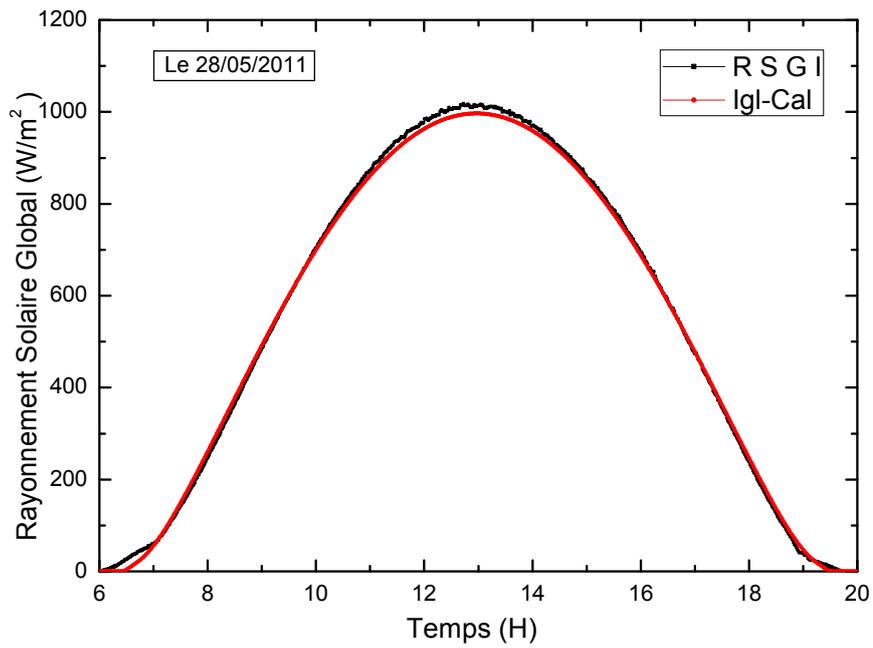


Figure V.7: Evolution de rayonnement solaire global incline ( Igl-Cal et R S G I mesuré ) (Journée 28/05/2011 ).

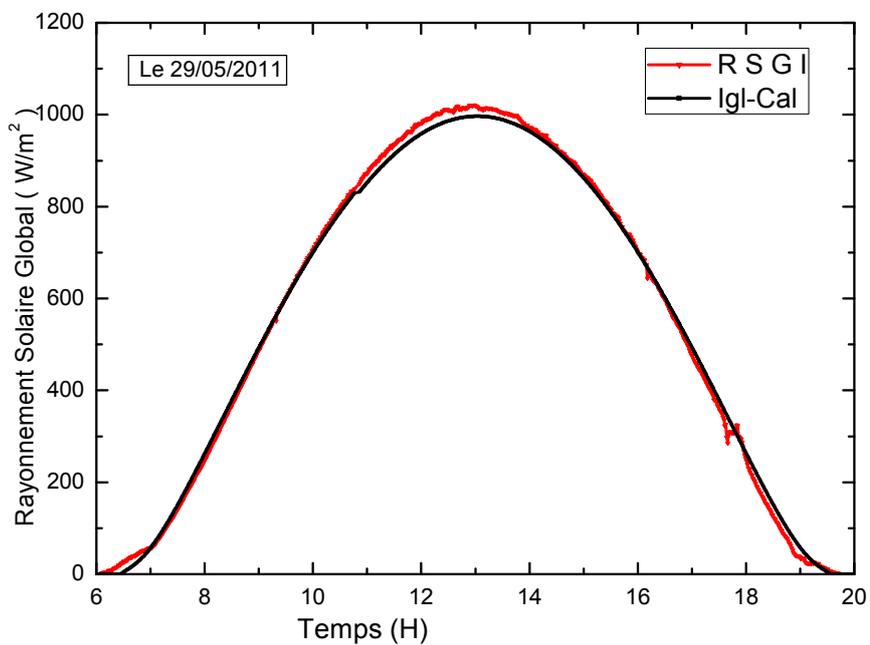
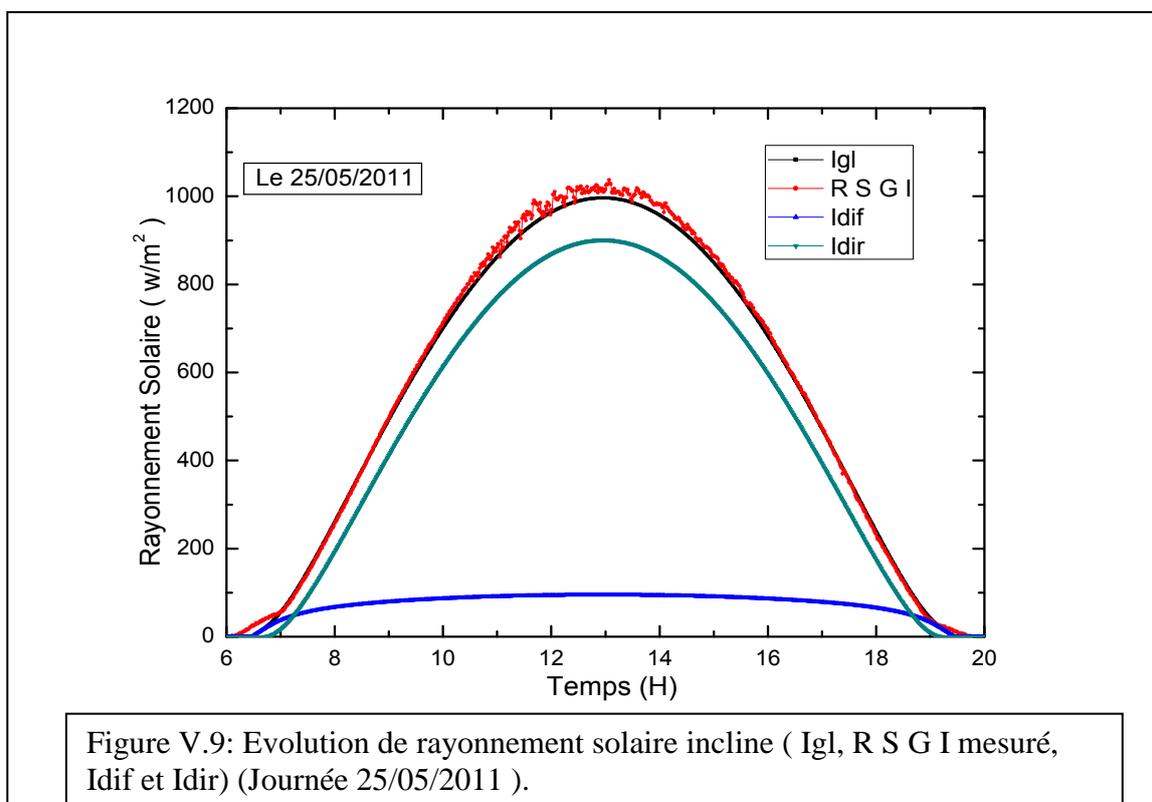


Figure V.8: Evolution de rayonnement solaire global incline ( Igl-Cal et R S G I mesuré ) (Journée 25/05/2011 ).

En analysant les résultats représentés dans les figures, ci-dessus on constate que le rayonnement solaire Globale obtenue pour le cas mesuré R S G I et calculé Igl sont proches ce qui justifie et valide la précision du programme utilisé, et illustrant la fiabilité et la validation du modèle utilisé dans la simulation.

### V.3.2. Variation des différents rayonnements solaire en fonction du temps

La variation des différents rayonnements solaires (Igl, R S G I, Idif, Idir) est représentée sur les figures suivantes:



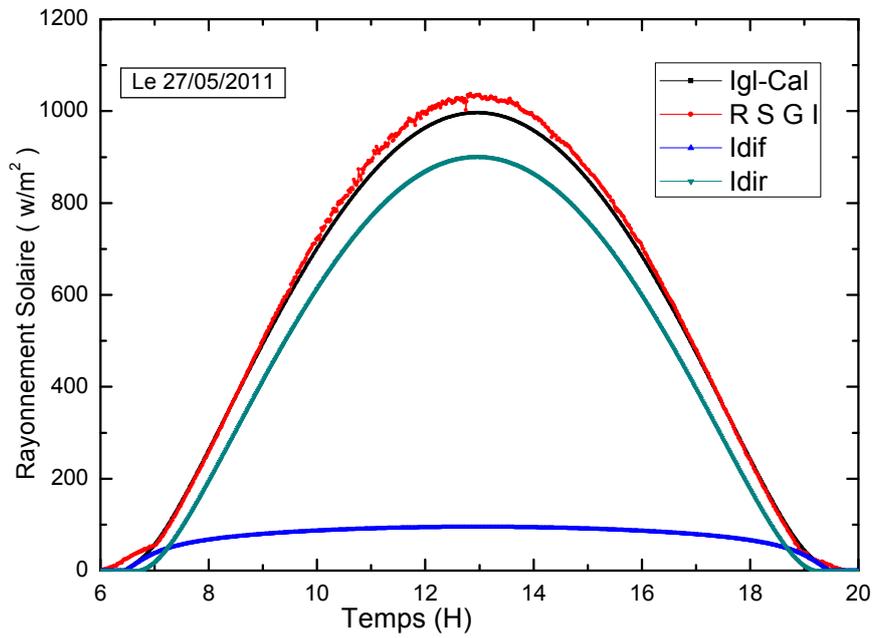


Figure V.10: Evolution de rayonnement solaire incline ( Igl, R S G I mesuré, Idif et Idir) (Journée 25/05/2011 ).

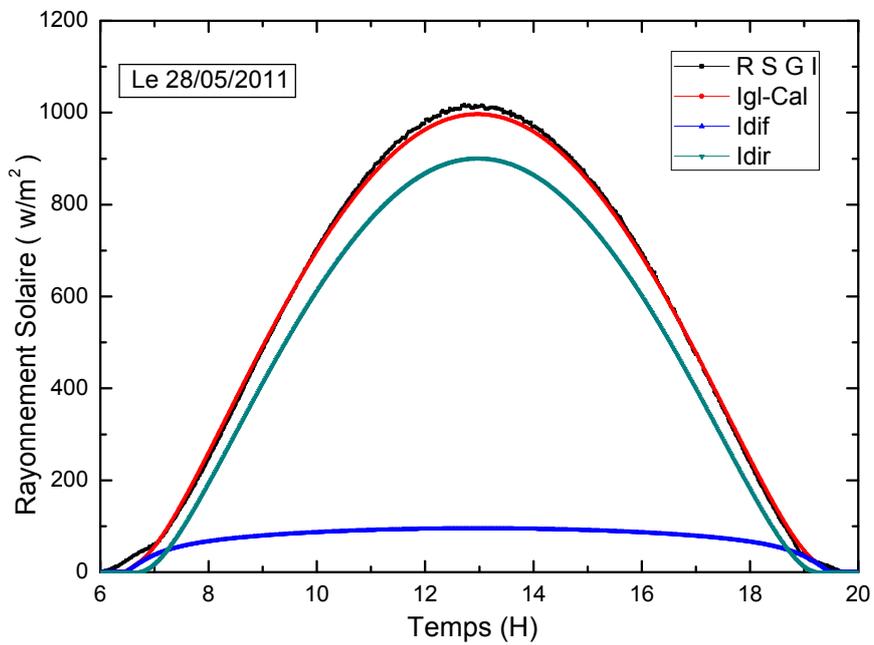


Figure V.11: Evolution de rayonnement solaire incline ( Igl, R S G I mesuré, Idif et Idir) (Journée 28/05/2011 ).

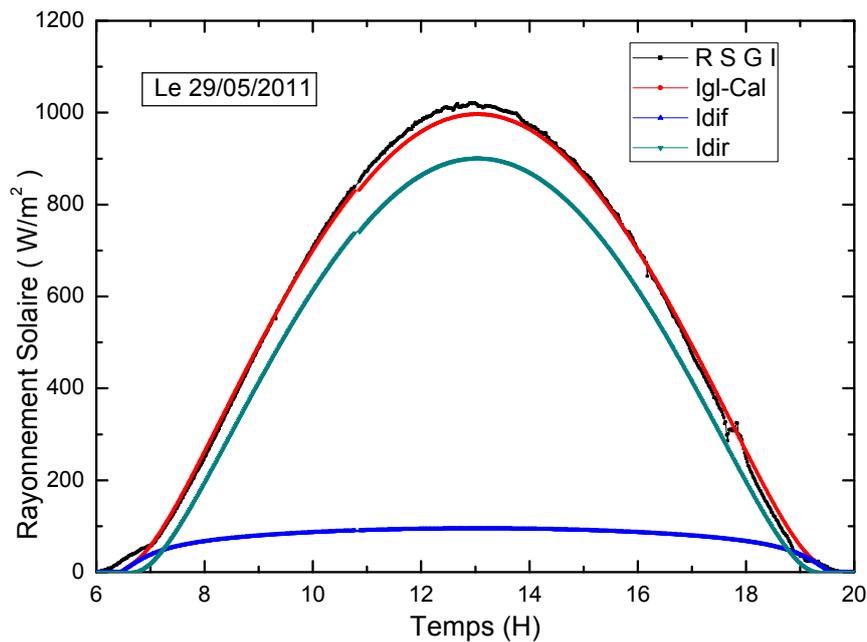


Figure V.12: Evolution du rayonnement solaire incline ( Igl, R S G I mesuré, Idif et Idir ) (Journée 29/05/2011 ).

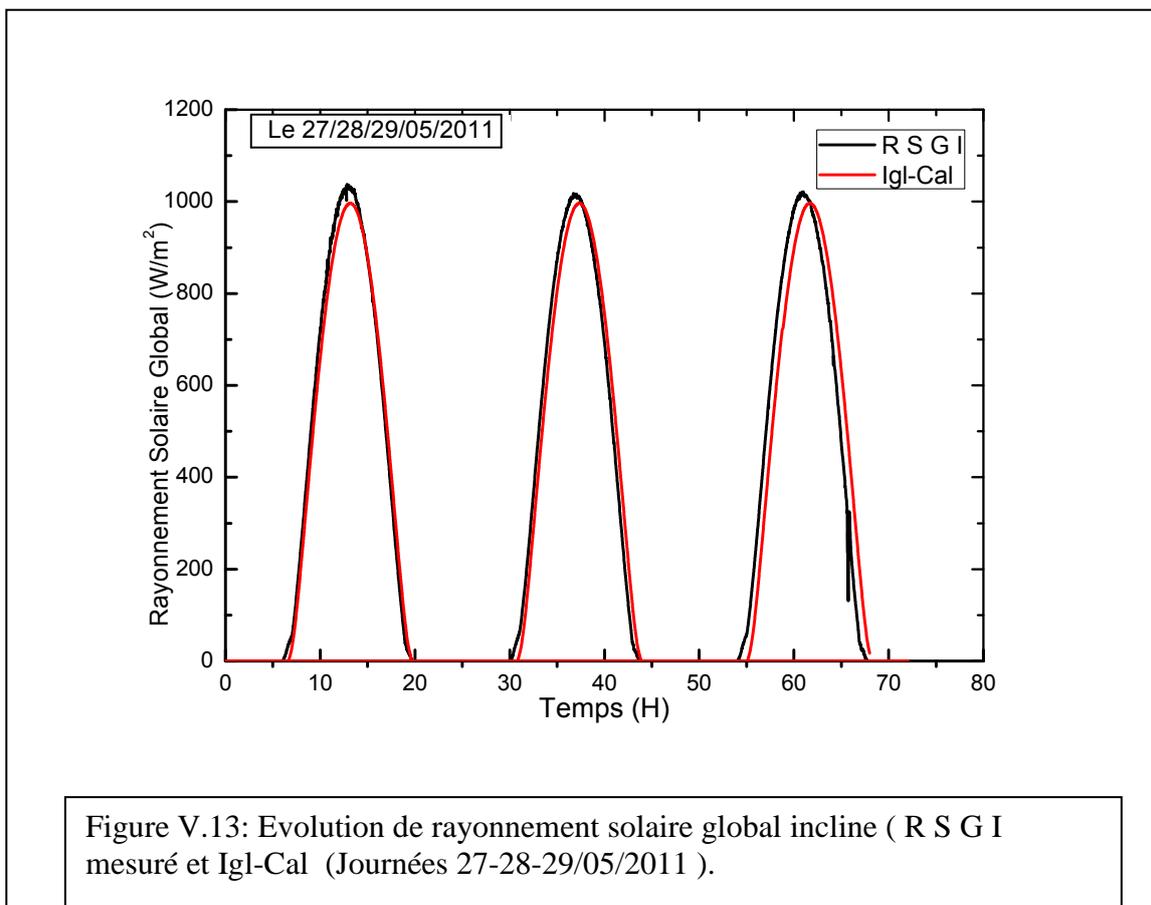
En analysant les résultats représentés dans les figures (V.9 jusqu'au V.12) on déduit ce qui suit:

- Le rayonnement solaire global augmente avec la croissance du temps jusqu'à atteindre une valeur maximal aux environs de 13:00h (midi solaire) puis commence à diminuer jusqu'à atteindre zéro (couche de soleil).
- La composante diffuse Idif commence a augmenter avant la composante direct Idir mais toujours prend des valeurs presque inférieurs à  $100 \text{ W/m}^2$ ).
- Pour la période estivale, on peut remarquer une augmentation brusque des valeurs du rayonnement solaire globale figure (a), à notre avis ceci est dû à la relation directe de l'angle d'incidence et la composante directe, autrement dit, au moment indiqué sur la figure (a), malgré la présence du rayonnement direct, on peut remarquer qu'il n'y a aucune incidence sur la paroi, et seulement la composant diffuse qui influe sur la

paroi, ensuite et à un moment bien définir la paroi sera influencée par les deux composantes (  $I_{dir}$  +  $I_{dif}$  ).

- Finalement, sur les figures précédentes, on constate que la composante direct  $I_{dir}$  est la plus importante pour l'évolution du rayonnement solaire global on peut enregistrer presque une valeur de  $900 \text{ W/m}^2$ , pour une valeur du rayonnement solaire global de  $1100 \text{ W/m}^2$ .

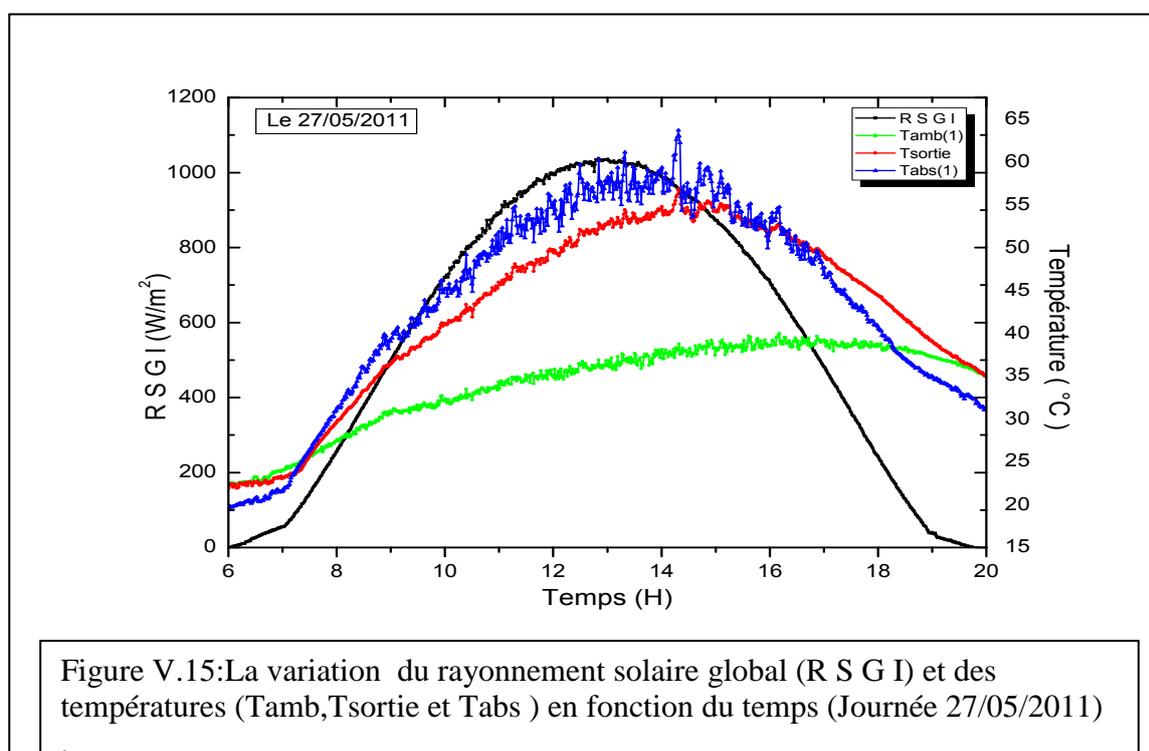
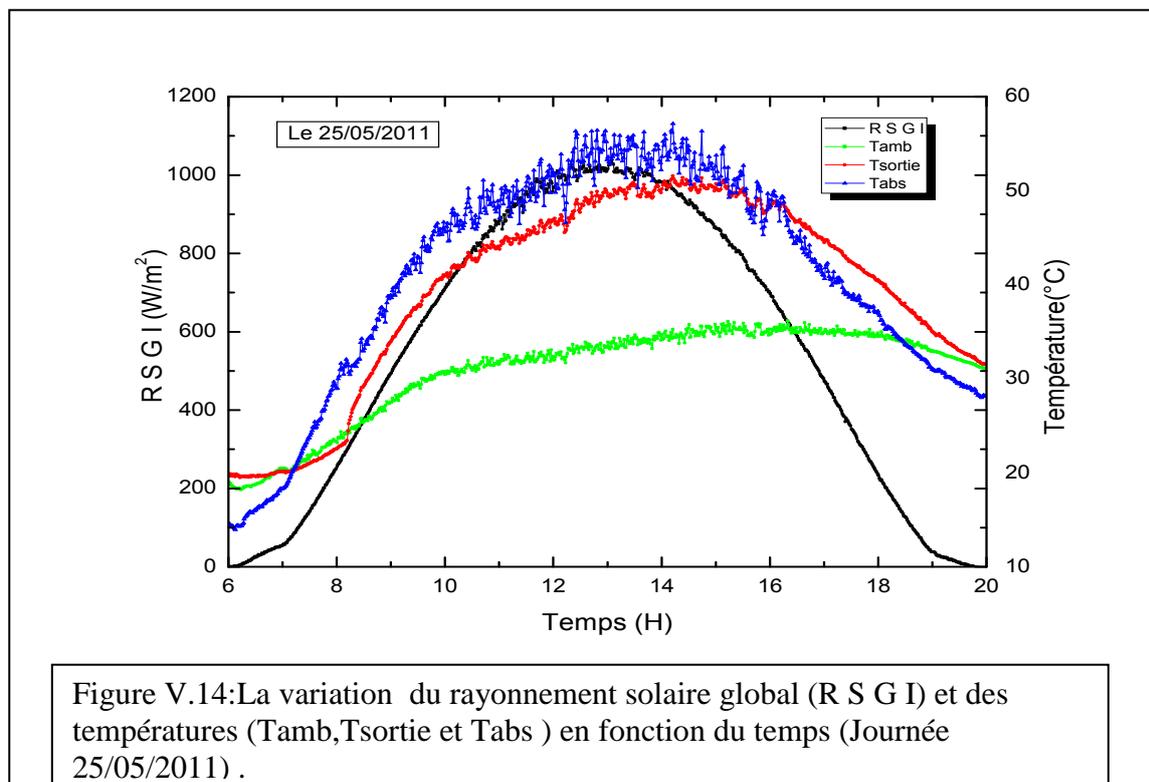
### V.3.3. Comparaison de la variation du rayonnement solaire mesuré (R S G I) et calculé (Igl) pour trois journées successives



- Nous présentons sur la figure (V.13) l'évolution du rayonnement solaire global pour les deux rayonnements (Igl-Cal et R S G I mesuré) des trois journées (27,28 et 29/05/2011), il est clair que les allures sont régulières et atteignent une valeur maximale de ( $\approx 1050 \text{ w/m}^2$ ) pour chaque journée au midi solaire.
- Les rayonnements solaires globaux Igl-Cal calculés et R S G I mesurés pour les trois journées sont presque confondus cela confirme la précision du modèle utilisé dans le calcul du rayonnement solaire global (Igl).

### V.3.4. Evolution du rayonnement solaire global mesuré et les températures ( $T_{amb}$ , $T_{abs}$ et $T_{sortie}$ ) en fonction du temps pour le plan incliné

Les figures suivantes représentent la variation du rayonnement solaire global ( $R_{SGI}$ ) et des températures ( $T_{amb}$ ,  $T_{sortie}$  et  $T_{abs}$ ) en fonction du temps pour les journées 25-27-28-29/05/2011).



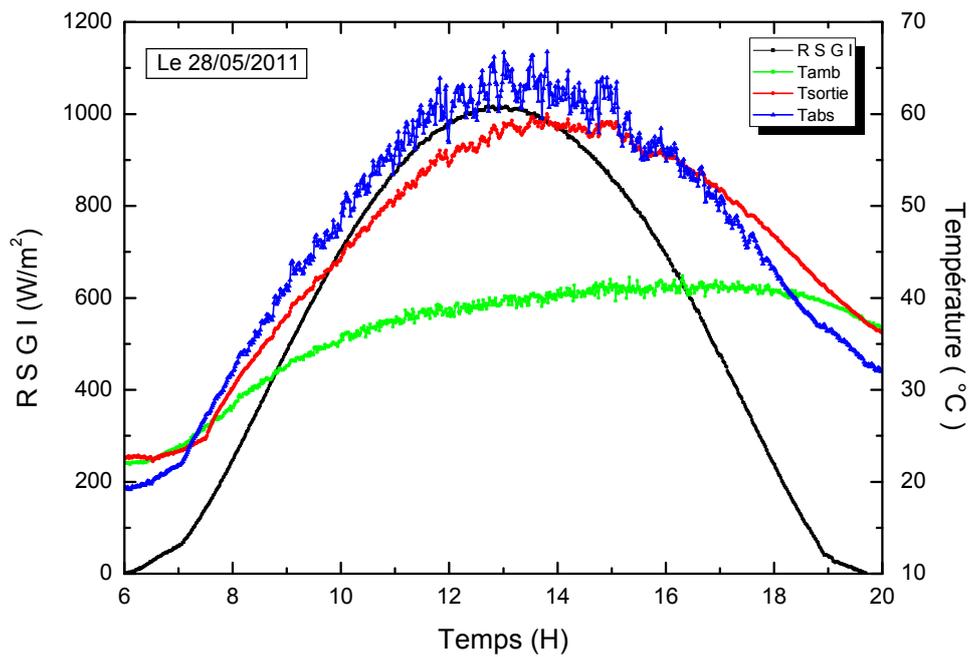


Figure V.16: La variation du rayonnement solaire global (R S G I) et des températures (Tamb, Tsortie et Tabs ) en fonction du temps (Journée 28/05/2011)

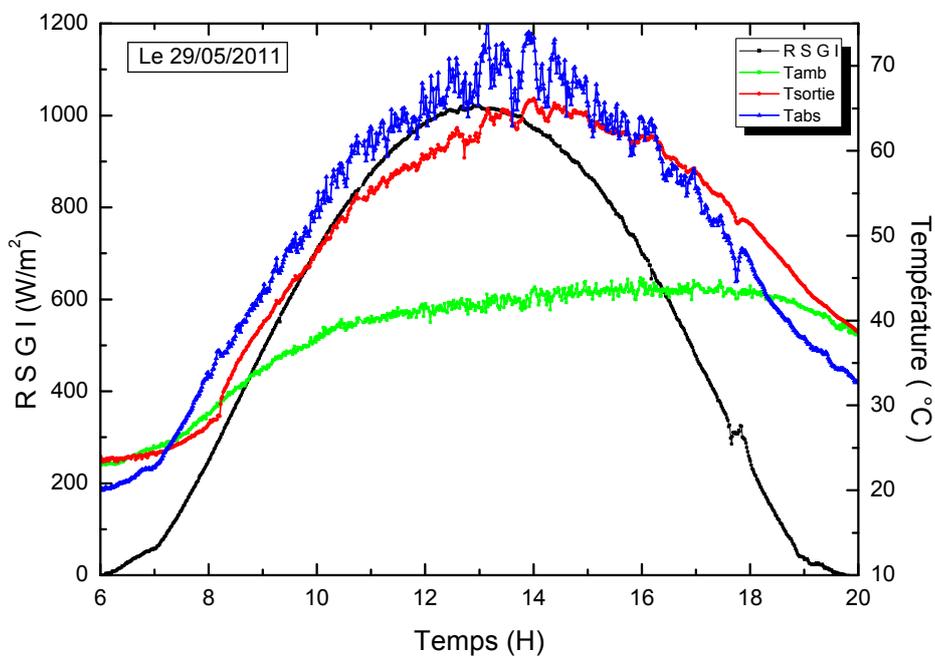
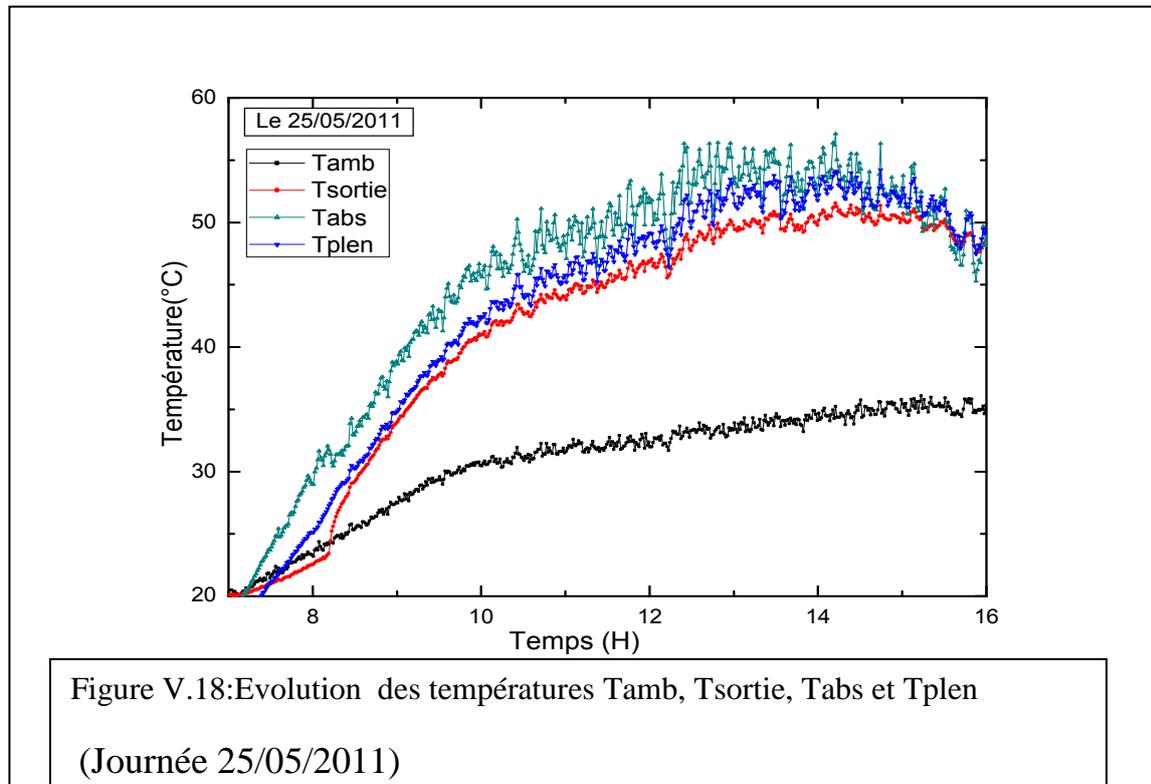


Figure V.17: La variation du rayonnement solaire global (R S G I) et des températures (Tamb, Tsortie et Tabs ) en fonction du temps (Journée 29/05/2011)

- L'évolution des températures ( $T_{amb}$ ,  $T_{sortie}$  et  $T_{abs}$ ) est présentée sur les figures de ((V.14) à (V.17)), on constatant que les températures ( $T_{amb}$ ,  $T_{sortie}$  et  $T_{abs}$ ) suivant une évolution logique en fonction de l'évolution du R S G I pendant la durée de la journée.
- Au premier lieu, de 07h:00 à 14h:00 une augmentation de la  $T_{abs}$  et  $T_{sortie}$  ceci est très normale, puisque la  $T_{abs}$  est inférieure à celle de l'ambiance, ensuite et puisque le rayonnement solaire global diminue, et la température de l'absorbeur atteint des valeurs maximales, on constate que la température de l'absorbeur  $T_{abs}$  commence à démunier presque vers (16h:20), malgré cela la température de sortie  $T_{sortie}$  reste toujours supérieure à la température ambiante, de cette remarque on peut comprendre que ce type de capture (sans vitrage), sera mieux amélioré avec des matériaux de stockage, c'est-à-dire on peut continuer à utilisé l'air chauffé en l'absence du soleil.

### V.3.5. la variation des températures $T_{amb}$ , $T_{sortie}$ , $T_{abs}$ et $T_{plen}$ en fonction du temps

L'évolution des températures  $T_{amb}$ ,  $T_{sortie}$ ,  $T_{abs}$  et  $T_{plen}$  est présenté sur les figures suivantes:



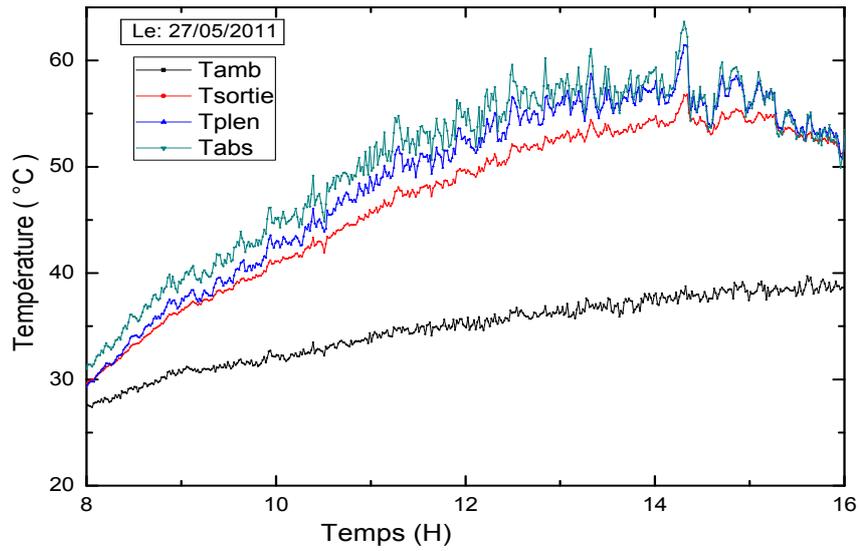


Figure V.19: Evolution des températures Tamb, Tsortie, Tabs et Tplen  
(Journée 27/05/2011)

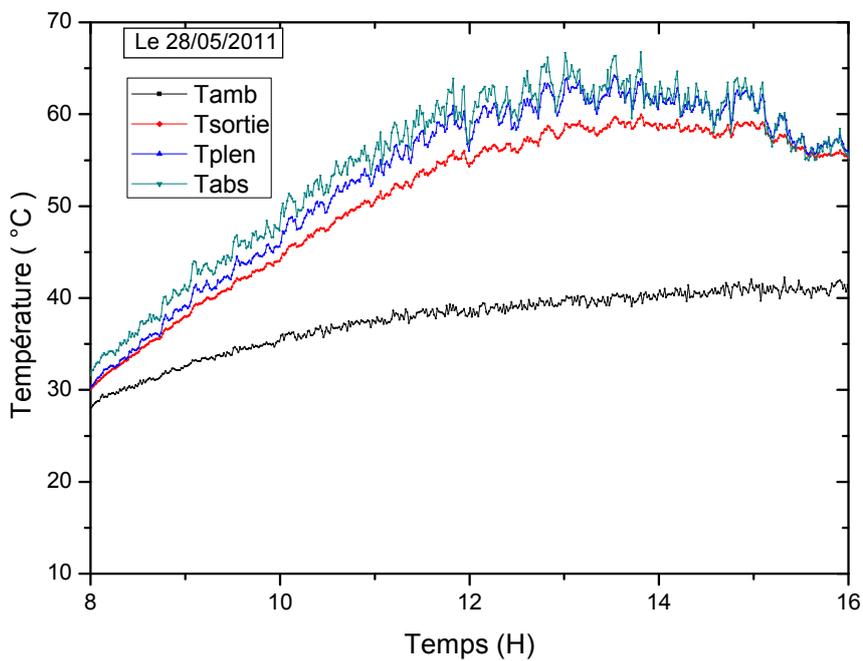


Figure V.20: Evolution des températures Tamb, Tsortie, Tabs et Tplen  
(Journée 28/05/2011)

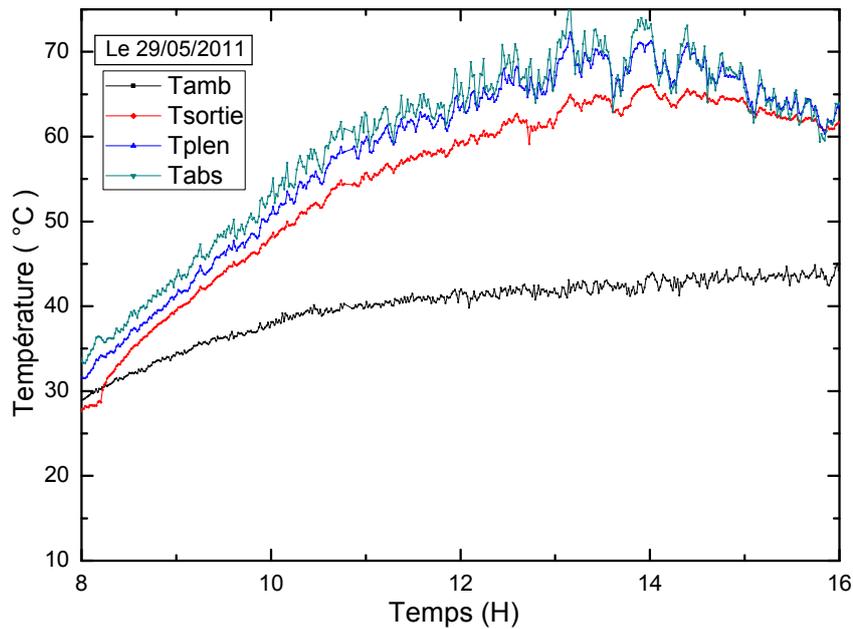


Figure V.21: Evolution des températures Tamb, Tsortie, Tabs et Tplen  
(Journée 29/05/2011)

Pour les figures: ((V.18) à (V.21)) nous remarquons ce qui suit:

- Les températures Tsortie, Tabs , Tplen augmentent avec l'augmentation du R S G I pendant la duré du:8h:00 à 14h:00 puis commence à diminuer.
- Pour la duré de 17h:00 à 20h:00, l'écart entre les trois températures et la température ambiant est très important dans la période de la matinée, cette écart atteint la valeur maximale à 14h:00 .
- Le plus important sur ces figures est, les fluctuations enregistrées sur la température de l'absorbeur, à notre avis, la cause principale de ces fluctuations est l'emplacement du capture à l'extérieur en plus de cela l'absorbeur est exposé directement au vent (partie avant du capture).

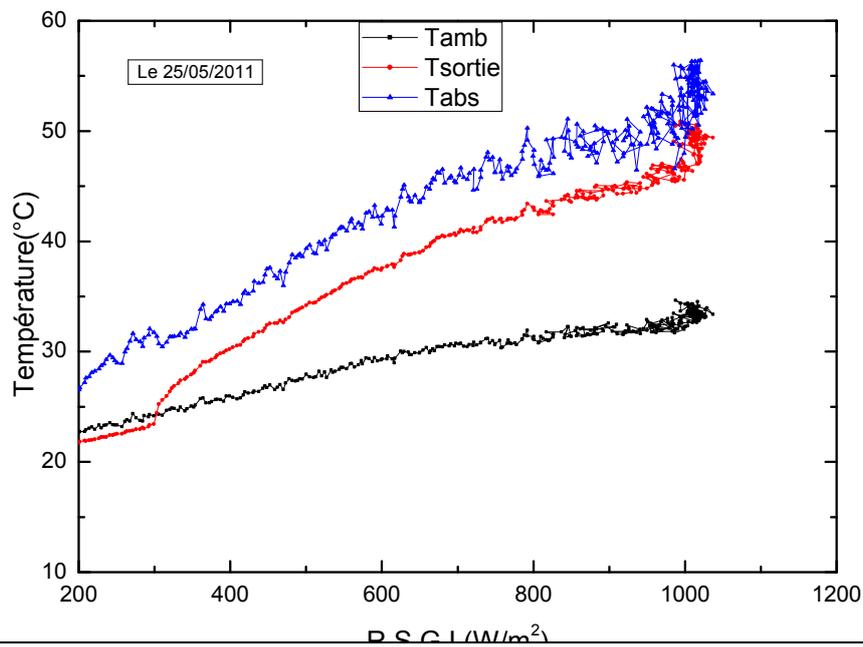


Figure V.22: La variation des températures Tamb, Tsortie et Tabs en fonction du R S G I mesuré (Journée 25/05/2011).

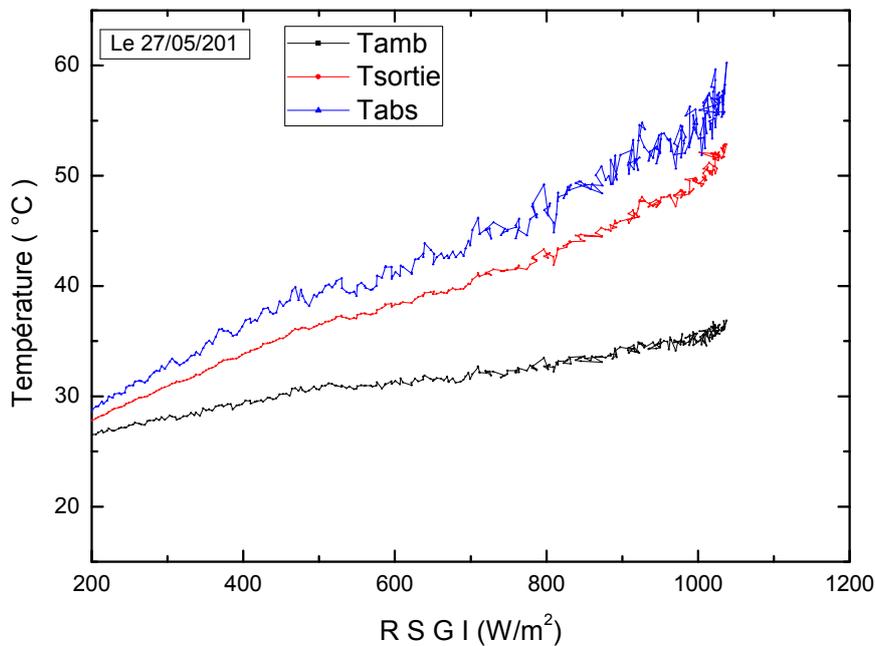
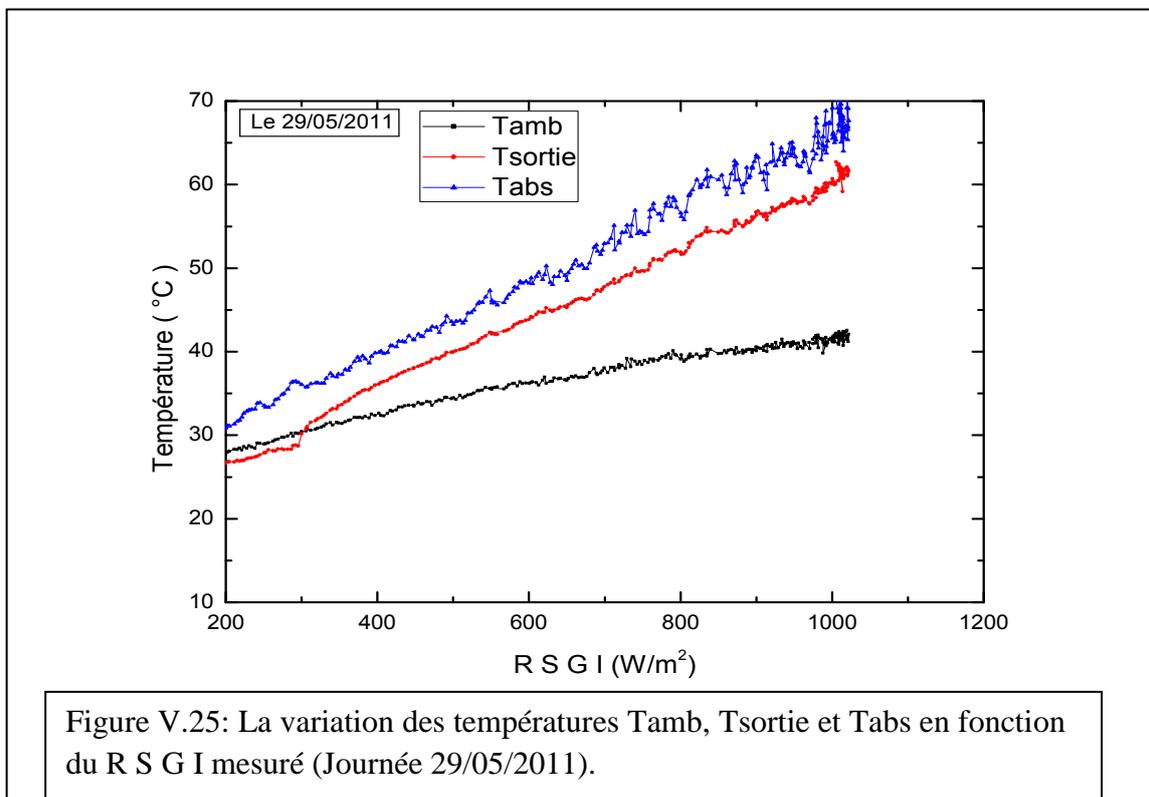
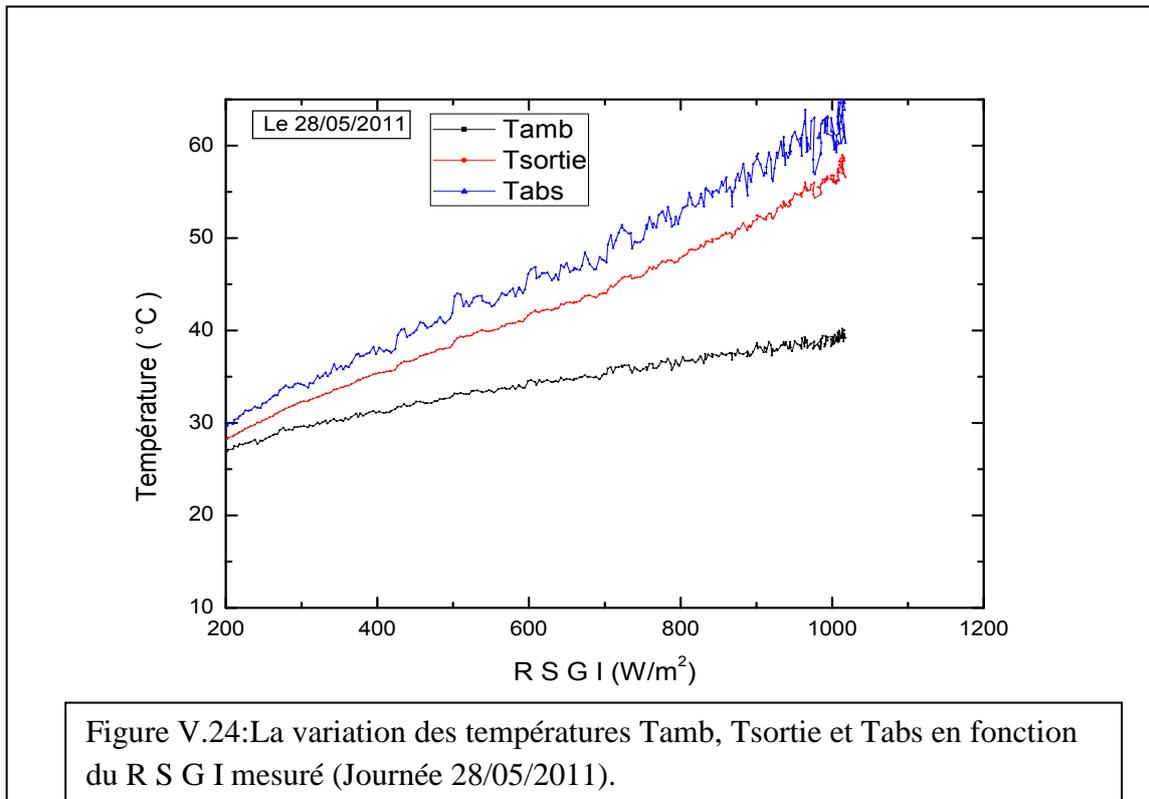


Figure V.23: La variation des températures Tamb, Tsortie et Tabs en fonction du R S G I mesuré (Journée 27/05/2011).

### V.3.6. L'influence du R S G I mesuré sur les températures ( Tamb, Tsortie et Tabs )

Les figures suivantes représentent la variation des différentes températures en fonction du temps pour les journées 28-29/05/2011.

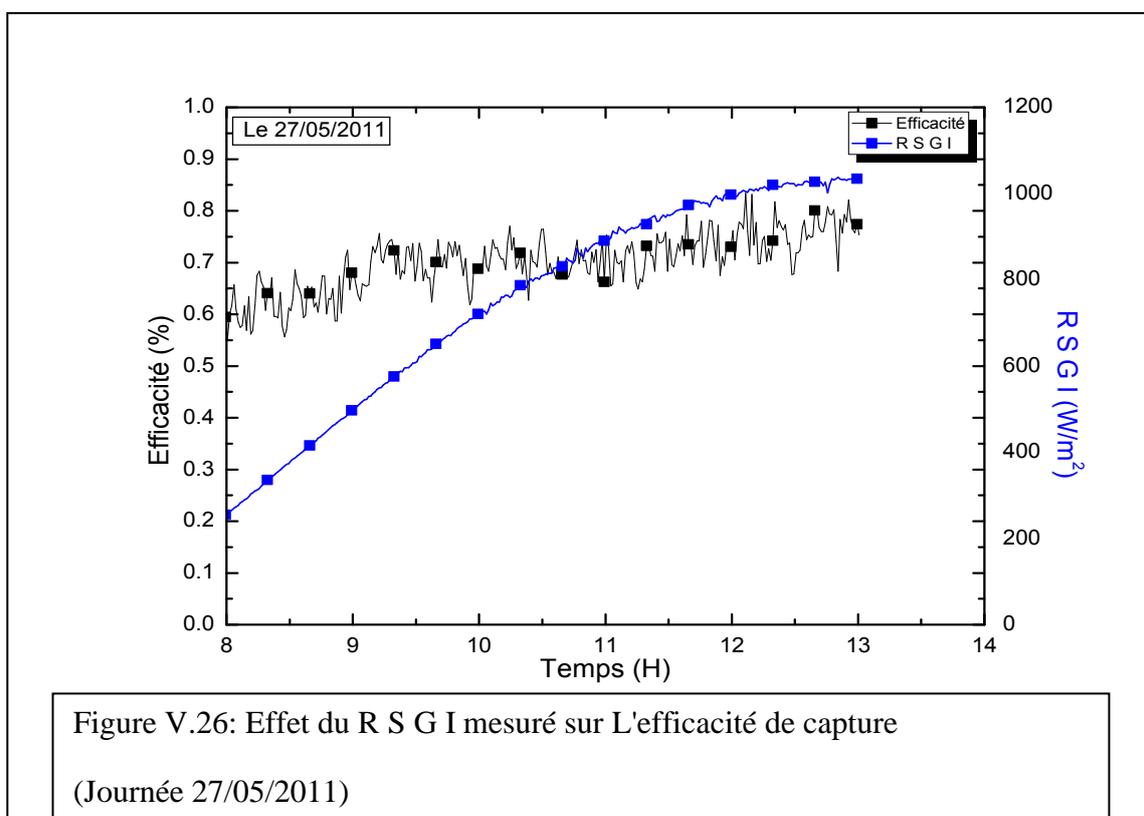


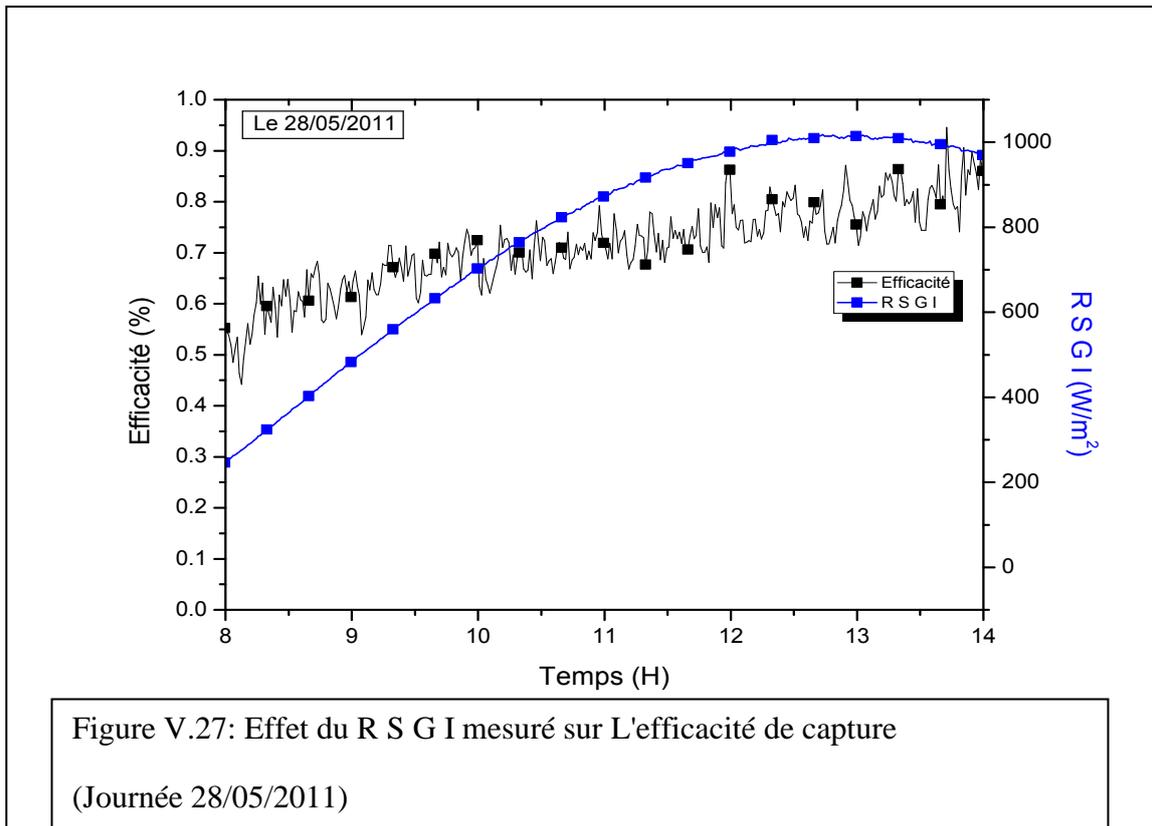
Pour les figures (V.22) jusqu'au (V.25) :

Just pour comprendre mieux l'élévation des températures de notre capteur, une présentation sur les figures (V.22 à V.25), montre l'élévation des températures ( amb, abs et sortie ) en fonction du (R.S.G), on remarque clairement que des présences du R.S.G , la température la plus élevée est celle de l'absorbeur , on peut enregistrer un gradient de 27°C pour la plaque absorbante, donc on conclut que l'amélioration du captation du R.S.G au cours de la journée améliore fortement l'augmentation de Tabs.

### V.3.7. Variation de l'efficacité et de R S G I en fonction du temps

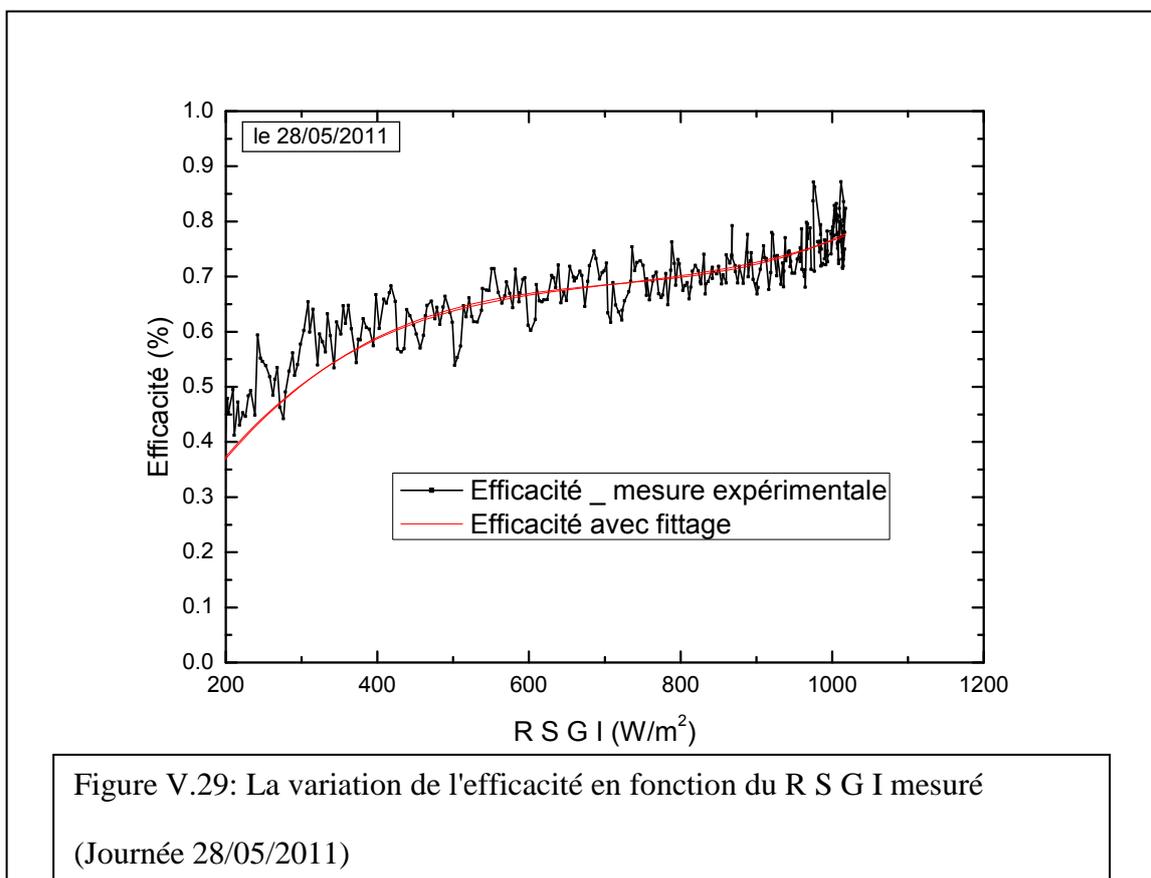
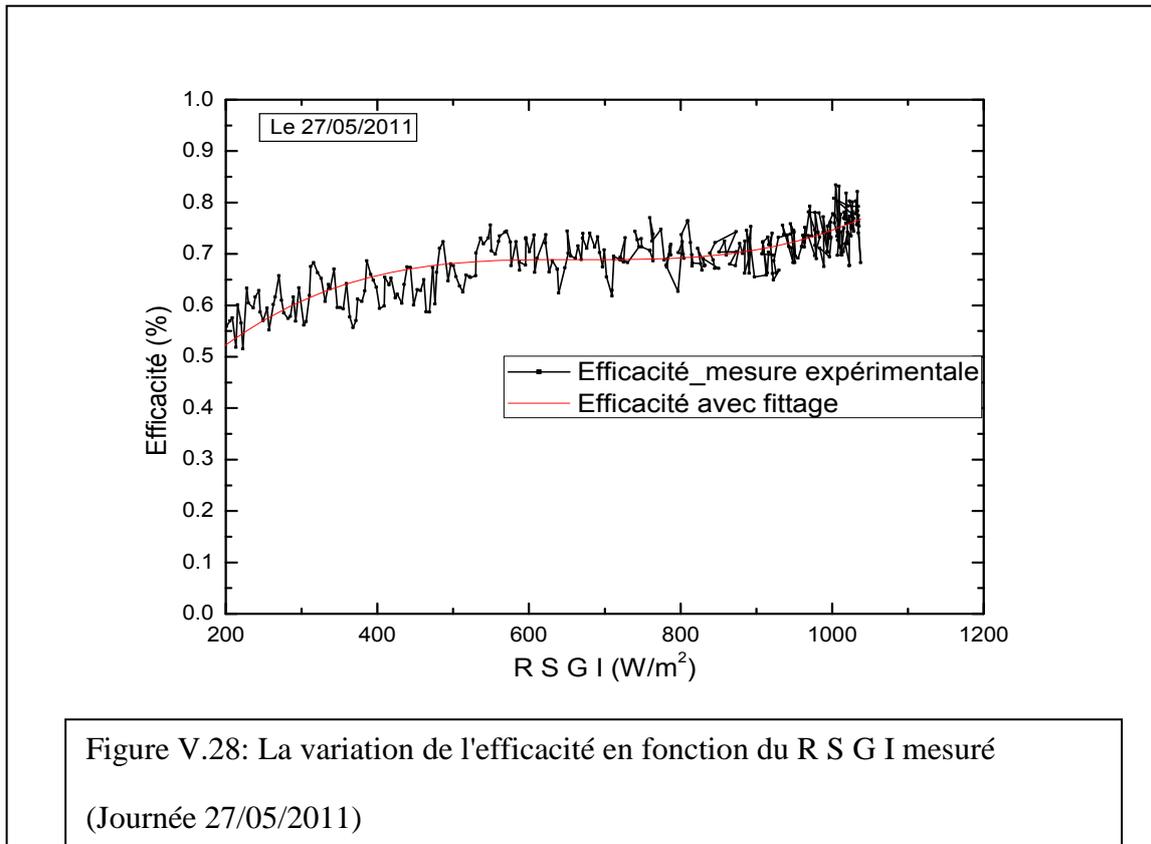
Les deux figures (V.26) et (V.27) suivantes représentent l'effet du rayonnement solaire global sur l'efficacité.





Sur les deux figures on présente la variation de l'efficacité du système au cours de la journée et en fonction du R.S.G, une valeur max de 78% est enregistrée, ce qui montre l'importance de ce type de capteur, malgré cela on peut dire que cette efficacité n'est pas stable au cours de la journée, ce qui influe sur les applications (séchage ou chauffage) et leurs rendements, une amélioration du système (isolation, forme géométrique, emplacement.), influe directement sur la linéarité de l'efficacité.

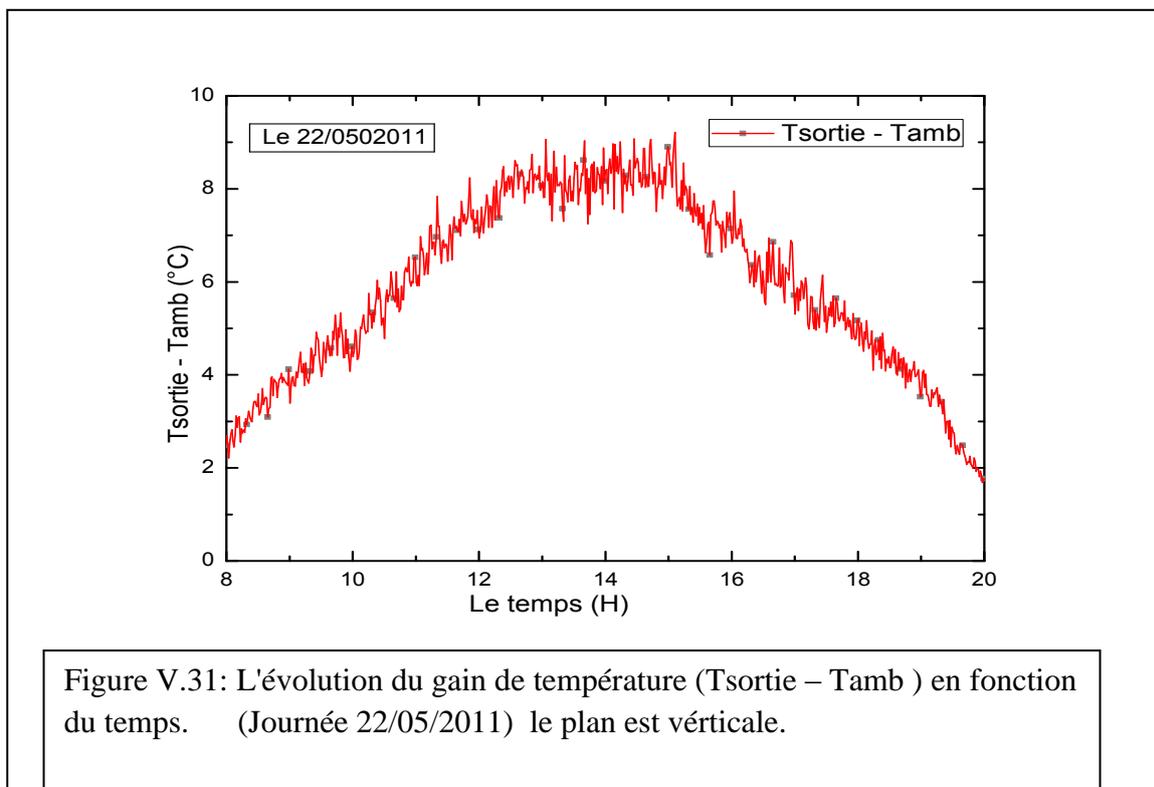
### V.3.8. la variation de l'efficacité en fonction du R S G I mesuré:



Sur les figures (V.28) et (V.29), l'efficacité est représentée en fonction du R.S.G, une autre fois, le paramètre clé pour ce type de capteur est le R.S, une augmentation de R.S.G, sera accompagnée par une augmentation de l'efficacité suite aux fluctuations enregistrées, nous avons procédé à un lissage des données par le code de calcul «ORIGIN 8».

#### V.4. La variation du gain en fonction du temps

Les deux figures (V.31) et (V.32) représentent l'évolution du gain en fonction du temps pour les journées 22/05/2011(plan vertical) et 29/05/2011 plan incliné de 30°.



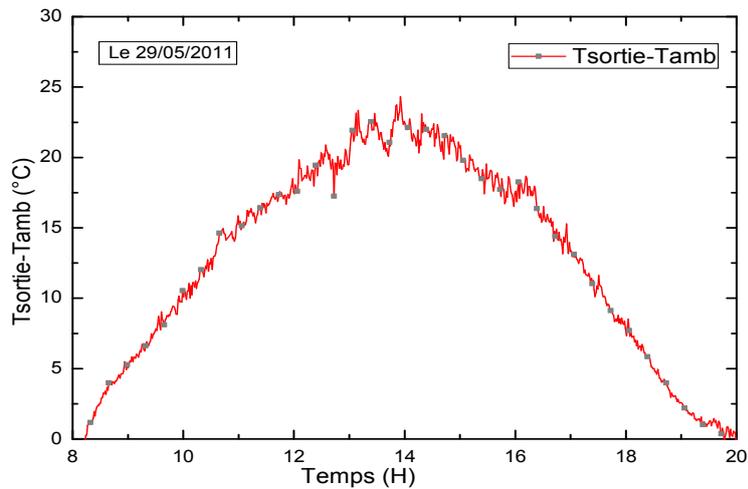


Figure V.32: L'évolution du gain de température ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$ ) en fonction du temps. (Journée 29/05/2011) le plan est incliné de  $30^\circ$ .

A partir des deux figures ci-dessus on constate ce qui suit:

- l'évolution du gain de température ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$ ) en fonction du temps est atteint le maximum au midi solaire.
- Le gain de température ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$ ) dans la plan incliné est très supérieur par rapport au plan vertical, il peut atteint  $24^\circ\text{C}$  pour le plan incliné et  $9^\circ\text{C}$  pour le plan vertical.

### V.5. Comparaison du gain entre les deux plans vertical et incliné:

la figure V.30 représente la variation du gain ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$ ) en fonction du temps.

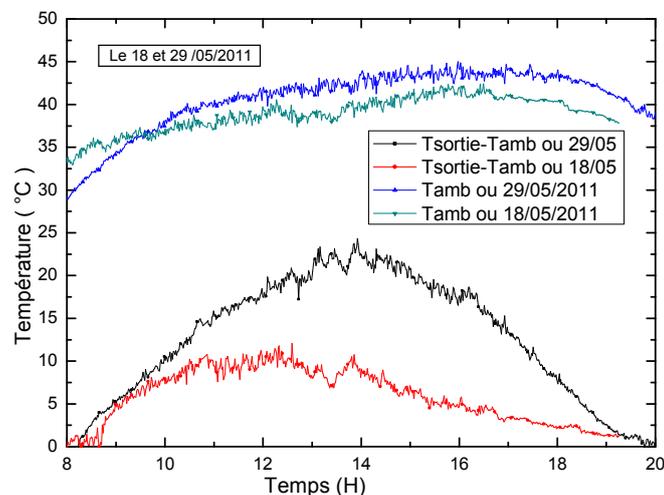


Figure V.30: La variation des températures  $T_{\text{amb}}$  et  $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$  en fonction du temps. (Journée 18 (plan verticale) et 29 (plan incliné  $30^\circ$ ) /05/2011

A partir de cette figure nous constatons que le gain de température ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$ ) pour les journées (29/05/2011 plan incliné  $30^\circ$ ) et (18/05/2011 plan verticale  $90^\circ$ ) commence à augmenter avec les temps du : 8h à 14h. Puis subir une diminution jusqu' à la valeur zéro presque à 17h:40.

Le gain de température pour un plan incline ( $30^\circ$ ) est supérieur à celui du plan verticale, nous avons enregistré pour le plan incliné presque un gain de  $22^\circ\text{C}$ , cependant pour le plan vertical on a même pas dépassé  $10^\circ\text{C}$  ceci est du à la captation du R S G.

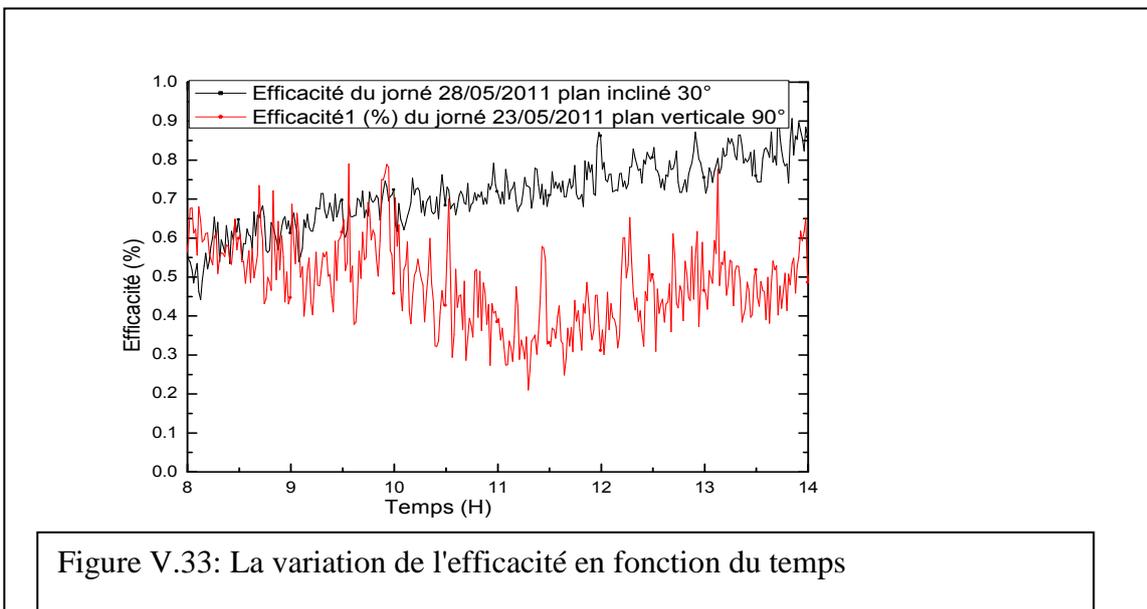
Sachant que le soleil pendant l'été est très élevé par rapport à l'hiver, donc une captation pendant l'été pour le plan vertical, est un mauvais choix.

Une captation optimale est obtenue par un plan ayant une inclinaison égale à la latitude du lieu pour la région d'ADRAR Lat.= $27.8$  donc une inclinaison de  $30^\circ$  est acceptable.

Malgré l'écart dans la température ambiante pour les deux journées ne doit pas dépasser  $5^\circ\text{C}$  comme valeur maximale. Mais l'écart dans le gain ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{ambiante}}$ ) peut atteindre  $17^\circ\text{C}$  cela confirme bien l'importance de l'angle d'inclinaison sur l'absorbeur, le gain et l'efficacité.

### V.6. La variation de l'efficacité en fonction du temps pour deux plans vertical et incliné $30^\circ$ :

La figure suivante représente la variation de l'efficacité en fonction du temps des journées (28/05/2011) plan incliné et (23/05/2011) plan vertical.



A partir de cette figure nous remarquons que la variation de l'efficacité en fonction du temps pour la journée du -23/05/2011-(plan vertical  $90^0$ ) est pleine de perturbations et ne doit pas dépasser 60% pour la majorité du temps mais dans la journée -28/05/2011- ( plan incliné de  $30^0$  ) l'efficacité a moins de perturbations par rapport au plan verticale est peut atteindre 80% , cela est du à l'influence de la vitesse du vent sur l'inclinaison du capteur.

## **V.7. Conclusion**

D'après les tests précédents concernant le même prototype, on constate que l'inclinaison du capteur a une bonne efficacité par rapport au plan vertical cela est du à la capacité de captage de rayonnement solaire qui est important dans le plan incliné ainsi que le gain de température.

Une bonne concordance entre le rayonnement solaire global calculé et mesuré est constatée.



**Conclusion et  
Recommandation**

Les résultats présentés dans ce travail expérimental nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- 1) La température  $T$  de l'air sortie de capture varie en fonction du l'éclairement sur l'absorbeur.
- 2) Notre conception à permis d'obtenir des températures du fluide assez élevées à la sortie surtout dans le plan incliné  $30^\circ$  quand on peut atteint des températures de sortie de  $60^\circ\text{C}$  favorable pour les exploiter dans les applications du séchage des produits agroalimentaires et le chauffage des habitations.
- 3) Notre étude expérimentale nous à permis de tester les deux configurations de la position de l'angle d'inclinaison de capture solaire à air non vitré et perforé et nous concluons que :

- L'inclinaison de capture de  $30^\circ$  a une bonne rentabilité en effet la température de sortie peut dépasser  $60^\circ\text{C}$ , ceci est du à l'inclinaison de la plaque absorbante et à l'ouverture conçue sur sa partie supérieure, puisque l'air quand il monte augmente la possibilité de faire des contacts avec la paroi de l'absorbeur.
- L'efficacité de la capture inclinée de  $30^\circ$  est bonne par rapport à la capture verticale  $90^\circ$ .
- Aux environs de 14h nous remarquons le gain de température ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$ ) dans le plan incliné est supérieur que celle dans le plan vertical  $90^\circ$ , ce qui confirme l'efficacité de capture solaire incliné de  $30^\circ$ .

Dans le but de maximiser le gain de température ( $T_{\text{sortie}} - T_{\text{amb}}$ ) et améliorer le système de chauffage U T C on doit faire recommande à ce qui suit:

- Minimiser le maximum de pertes par convection et rayonnement et faire un bon système d'isolation.
- Il faut augmenter la température dans la cavité (plénum) , pour cela il est recommandé d'ajouter des ailettes aux surfaces intérieures de l'absorbeur en l'isolant vice à vice (face à face), pour augmenter le flux de chaleur de l'air qui entre dans la cavité avant la sortie, augmenter la surface d'échange dans la cavité et minimiser les pertes par convection et rayonnement entre l'absorbeur et le milieu extérieur.

**Références  
bibliographiques**

- [1] **J, Bernard.** Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] **C, Fröhlich.** 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [3] **Charles Chauliagnet:** L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981  
P22, 32 et p147-148.
- [4] **Yves Jannot.** Thermique solaire. Paris (2007).
- [5] **Michel Daguenet:** les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.
- [6] **Pierre Henri Communay:** Héliothermiques; Le gisement solaire Méthodes et calculs. Groupe de Recherche et d'Édition-2002.
- [7] **R. Bernard, G. Merguy, M. Schwartz,** Le rayonnement solaire: conversion thermique et application. Technique et documentation, deuxième Edition-1980.
- [8] **N, Bellel.** Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur; thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).
- [9] **M, Capderou.** Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [10] **A, Mefti; M, Y, Bouroubi; H, Mimouni.** Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).
- [11]: **Yves JANNOT,** Transfert thermique.
- [12]: **Grraba Besma .** Fascicule de travaux pratiques, Etude de la transmission de chaleur
- [13]: **Gawlik, K.M.** 1995. A numerical and experimental investigation of heat transfer in the practical utilization of unglazed, transpired solar air heaters. Ph.D. Dissertation, University of Colorado, Department of
- [14] **Gawlik, K.M., & Kutscher C.** 2002. Wind Heat Loss from Corrugated, Transpired Solar Collectors. Transactions of the ASME 124(3), 256-261.

[15] **Adrian Bejan, Allan D. Kraus** Heat Transfer Handbook ; JOHN WILEY & SONS, 2003.

[16] **Kutscher, C.F.**, 1992. An Investigation of Heat Transfer for Air Flow through Low Porosity Perforated Plates. Ph.D. dissertation, University of Colorado, Department of Mechanical Engineering.

[17] **Véronique Delisle**. Analytical and Experimental Study of a PV/Thermal Transpired Solar Collector Waterloo, Ontario, Canada, 2008.

[18] **Dymond, C., & Kutscher, C.** (1997). Development of a Flow Distribution and Design Model for Transpired Solar Collectors. Solar Energy 60(5), 291-300.

**Site web:**

<http://aviatechno.free.fr/thermo/thermo01.php> mesure de température par Thermocouples.

**Annexe**

## **I.1 Présentation de l'unité :**

L'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URER.MS) est une structure de recherche, créée par arrêté ministériel N°76 du 22 mai 2004 au sein de L'EPST centre de développement des énergies Renouvelable de Bouzaréah.

Les activités de recherche scientifique et de développement technologique menées à L'URER.MS s'inscrivent dans le cadre du programme national de recherche en énergies renouvelables, considéré par les pouvoirs publique comme prioritaire et mobilisateur.

La vocation essentielle de L'Unité est la recherche scientifique appliquée et le développement technologique. Elle est chargée d'entreprendre des activités de recherche et d'expérimentation pour la promotion et de développement des énergies renouvelables dans les régions sahariens. Il s'agit de:

- collecter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaire, éolien et de biomasse dans les régions sahariennes,
- Effectuer des travaux scientifiques et technologiques sur la conception et le développement des dispositifs et équipement de conditionnement d'énergie solaire et de biomasse,
- Procéder à des études relatives à la qualification des sites d'installation des systèmes d'énergie solaire et éolienne,
- Entreprendre des travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploration, de mesure, de fiabilité et de d'endurance des équipements des énergies solaires et éoliennes,
- Entreprendre des travaux de production et de valorisation de la biomasse à des fins énergétique, environnementale et agronomiques.

## **I.2. Organisation scientifique:**

L'unité de recherche, comprend deux (4) divisions:

- 1) La division convection photovoltaïque,**
- 2) La division conversion thermique et thermodynamique,**
- 3) La division énergie éolienne,**
- 4) La division bioénergie et environnement.**

### **I.2.1 La division conversion photovoltaïque :**

Cette division a pour mission de maîtriser, d'étudier et de développer les techniques et les systèmes nécessaires à la conversion de l'énergie solaire radiative en énergie directement utilisable. Elle est donc chargée de:

- ✓ La collecte, de l'exploitation et du traitement des données météorologiques nécessaires à l'évaluation du gisement solaire,
- ✓ La conception et la réalisation des dispositifs de régulation, de contrôle et de conversion destinés aux systèmes et applications photovoltaïque,
- ✓ La conception, l'étude et la réalisation de divers systèmes photovoltaïques destinés aux pompages de l'eau, la production de froid et l'éclairage domestique et publique,
- ✓ La mise en place de bancs d'essais pour équipements et matériels faisant partie des systèmes photovoltaïque,
- ✓ Des études concernant la qualification des sites d'installation des équipements d'exploitation d'énergie solaire,
- ✓ La mise en œuvre de travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploitation, de mesure, de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie solaire.
- ✓ Développement de l'atelier de circuits imprimés.

Cette division est composée de cinq (05) équipes de recherche:

- 1. Equipe Pompage Photovoltaïque,**
- 2. Equipement de Gisement solaire,**
- 3. Equipe Froid Photovoltaïque,**
- 4. Equipe Electronique Systèmes,**
- 5. Equipe Installations De Puissance.**

### **I.2.2 La division conversion thermique et thermodynamique :**

Cette division entreprend des activités de recherche sur: L'Héliothermie et à pour principales mission :

- ✓ L'étude, la conception, la réalisation, l'expérimentation et le développement des systèmes de conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique utilisable dans différents domaine d'applications thermiques, mécaniques ou électrique,
- ✓ Le suivi d'endurance et de fiabilité des systèmes et équipements en milieu saharien,
- ✓ L'augmentation du taux d'intégration des systèmes solaire thermiques,
- ✓ La bioclimatique et l'architecture solaire,
- ✓ La valorisation des matériaux locaux l'habitat saharien.

La division conversion Thermique et Thermodynamique se compose de cinq (05) équipes de recherche:

- 1. L'équipe de systèmes solaire,**
- 2. L'équipe de séchage solaire,**
- 3. l'équipe de stockage d'énergie,**
- 4. l'équipe de Bioclimatique,**
- 5. l'équipe optimisation de la consommation énergétique des habitations.**

### **I.2. 3 La division énergie éolienne :**

La division énergie éolienne a pour mission de maîtriser les techniques et les systèmes nécessaires à la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique directement utilisable dans différents champs d'applications.

Elle est chargée notamment de :

- ✓ la collecte, de l'exploitation et du traitement des données météorologiques nécessaires à l'évaluation du gisement éolien, pour un meilleur dimensionnement des systèmes de conversion,
- ✓ la qualification des sites d'installation des équipements d'exploitation d'énergie éolienne,
- ✓ l'étude, l'installation et l'expérimentation des éoliennes destinées au pompage de l'eau et à la production d'électricité,
- ✓ la mise en œuvre des travaux d'essais de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie éolienne,
- ✓ l'étude de faisabilité des systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables (éolienne, photovoltaïque, micro hydraulique), pour la production d'électricité,
- ✓ la simulation et la modélisation des aérogénérateurs,
- ✓ l'évaluation du cout réel de production (cout du m<sup>3</sup> d'eau ou le cout du kilowatt heure d'électricité) et comparaison avec d'autres sources d'énergie,
- ✓ l'étude de l'ensemble des pièces des aérogénérateurs (hélice, système électrique ...) et des propriétés mécaniques (résistance, rigidité...),
- ✓ l'étude de la faisabilité technique et économique des parcs éoliens raccordés au réseau électrique.

Cette division est composée de 05 équipes de recherche :

- 1. Equipe aérodynamique des éoliennes,**
- 2. Equipe pompage éolien,**
- 3. Equipe électromécanique des éoliennes,**
- 4. Equipe systèmes hybrides,**
- 5. Equipe mécaniques des éoliennes.**

#### **I.2. 4 la division bioénergie et environnement :**

Cette division a pour missions de développer des activités de recherche sur la valorisation de la biomasse à des fins énergétiques avec des retombées environnementales et agronomiques positives.

Les activités de recherche s'articulent autour :

- ✓ L'étude et l'évaluation du gisement de biomasse à l'échelle locale,
- ✓ L'exploitation et la valorisation des déchets organiques à des fins énergétiques, avec des retombées environnementales et agronomiques, à travers la production de bio alcool et de biogaz,
- ✓ La maîtrise des techniques de mise en œuvre du micro algues pour la production de bio hydrogène à l'échelle pilote,
- ✓ L'élaboration d'études technico-économique des procédés développés en vue de la réalisation d'installations sur site réel (production de biogaz plus particulièrement).

Cette division est constituée de quatre (04) équipes de recherche :

- 1. Equipe gisement biomasse,**
- 2. Equipe bio alcool,**
- 3. Equipe biogaz,**
- 4. Equipe bio hydrogène.**