

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie Mécanique

**MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Energétique

**DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE  
DANS UNE CELLULE MUNIE D'UNE  
TOITURE RAYONNANTE**

Par

**Kamel BENMAILI**

Devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> D. SEMMAR	Maître de conférence A,	USD De Blida	Président
M <sup>r</sup> M. MERZOUK	Maître de conférence A ,	USD De Blida	Rapporteur
M <sup>me</sup> N. K. MERZOUK	Directrice de recherche	CDER	Examinatrice
M <sup>r</sup> A. HAMID	Maître de conférence A ,	USD De Blida	Examineur

Blida, Novembre 2012

## RESUME

Les régions arides sont connues pour leurs écarts de température diurnes importants tout comme ils souffrent de condition climatiques extrêmes pendant une longue période durant l'année. L'idée est d'utiliser cet important écart diurne favorisé par la clarté du ciel pour décharger la quantité de chaleur accumulée durant la journée en utilisant une surface sélective froide. La surface sélective permettra de diminuer les apports solaires durant la journée grâce à son fort coefficient de réflexion dans le visible tout en rayonnant au maximum durant la nuit. Le cycle charge décharge se fera donc de façon intermittente. Le système thermique constitué par la cellule et son environnement a été modélisé.

Le système aux équations différentielles aux dérivées partielles a été résolu. Après validation avec les données expérimentales de la littérature le programme élaboré a été utilisé pour mettre en évidence l'effet des différents paramètres sur les conditions de confort climatique dans la cellule.

## ABSTRACT

Arid regions are known for their large diurnal temperature variations as they suffer from extreme weather conditions for long periods during the year. The idea is to use this important diurnal favored by the light of heaven to relieve the amount of heat accumulated during the day using a selective surface cold. The selective surface will reduce solar gain during the day due to its high reflectance in the visible while beaming up at night. The charge-discharge cycle will therefore intermittently. The thermal system consists of the cell and its environment was modeled. The system with partial differential equations has been solved. After validation with experimental data from literature program developed was used to highlight the effect of various parameters on the conditions of climatic comfort in the cell.

## ملخص

من المعروف عن المناطق القاحلة أنها كبيرة التغيرات في ما يخص درجة الحرارة في النهار كما أنها تعاني من الظروف الجوية القاسية لفترات طويلة خلال العام. راودتنا فكرة في أن نستخدم هذا الفارق الحراري للتخفيف من كمية الحرارة المتراكمة خلال النهار باستخدام سطح بارد انتقائي. هذا الأخير يسمح بتقليل الاستقبال الحراري طيلة النهار بفضل خاصية الانتقاء في ما يخص الشعاع الظاهر و الإشعاع طوال النهار و ستستمر دورة التفريغ بدون انقطاع. النظام الحراري المتكون من الخلية و محيطها.

قد تم حلها مع نظام المعادلات التفاضلية الجزئية. بعد التحقق من صحة واستخدمت مع البيانات التجريبية من برنامج تطوير أدب لتسليط الضوء على تأثير مختلف المعالم على الظروف المناخية من الراحة في الخلية.

## **REMERCIEMENTS**

La réalisation de ce travail de mémoire a bénéficié de la contribution de nombreuses personnes que je souhaite remercier

L'étude a été menée sous la direction de Monsieur **M. Merzouk** Maître de conférence à l'université de Blida, qu'il soit vivement remercié pour son aide ses nombreux conseils, et surtout pour sa patience et son soutien inconditionnel tout au long de ce mémoire. Ce fut un enchantement de travailler avec lui

Je tiens à remercier Monsieur **D.Semmar** Maître de conférence à l'université de Blida d'avoir accepté de présider mon jury d'évaluation

Je tiens également à remercier Madame **N. KASBADJI MERZOUK** Directrice de recherche au centre de développement des énergies solaires UDES pour avoir accepté de faire partie du jury ainsi que pour ces précieuses remarques.

Que Monsieur **A. Hamid** Maître de conférence à l'université de Blida soit chaleureusement remercié d'avoir accepté de faire partie de jury d'évaluation en qualité d'examineur et ces judicieuses remarques .

Mes meilleurs remerciements vont à Madame **N. KASBADJI MERZOUK** Directrice de recherche au centre de développement des énergies renouvelables (CDER), pour m'avoir accueillie au CDER de mes travaux de recherche

Je ne saurais terminer mes remerciements et mon estime sans m'adresser à tous les enseignants et travailleurs du département de génie mécanique de Blida, et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste projet, qu'ils trouvent ici l'expression de ma parfaite reconnaissance.

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERAL</b>	12
<b>CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	14
1.1 . INTRODUCTION	14
1.2 GISEMENT SOLAIRE	14
1.2.1. Nature du rayonnement solaire	14
1.2.2. Repérage du Soleil dans la Voûte Céleste	16
1.2.2.1. Mouvement de la Terre	16
1.2.2.2. Mouvement apparent du soleil	17
1.2.2.3. Heures et temps	20
1.2.2.3.1. Durée du jour	20
1.2.2.3.2. Relation entre temps légal et temps solaire vrais	21
1.2.2.4. Durée et taux d'ensoleillement	22
1.2.2.4.1 Durée d'ensoleillement	22
1.2.2.4.2. Fraction d'insolation	23
1.2.3. Aspects énergétiques	23
1.2.3.1 Rayonnement du ciel et de l'atmosphère	23
1.2.3.2 Rayonnement Solaire au sol	24
1.2.4. Variations types du rayonnement	26
1.2.4.1. Variation Annuelle	26
1.2.4.2 Variation Journalière	26
1.2.5. Eclairage et irradiation solaire	27
1.2.5.1. Estimation du rayonnement solaire par ciel clair	28
• Modèle de Hottel, Liu et Jordan	28
• Modèle de Perrin de Brichambaut	30
1.2.5.2. Estimation de l'irradiation solaire par ciel variable	31
• Relation de type Angström-Black	31
• Relation fonction de l'indice de clarté	32
1.2.6 Carte solaire de l'Algérie	33
1.3. La Notion de confort thermique	35
1.3.1. Introduction	35
1.3.2. Paramètres du confort thermique	37
1.4. Infiltrations et renouvellement d'air	39
1.4.1. La ventilation	40
1.4.2. Les infiltrations	40
1.5. Energie interne (inertie thermique)	41
1.6. Surfaces sélectives	43
1.7. Température ambiante	46
• Modèle de Hakem et al	46
• Modèle de SAADAOUI	49
• Model de LAZZARIN	49
• Modèle de Howell J.R. et al	50

1.8. Température Ciel	50
• Corrélation de Berhadl – Fromberg	50
• Modèle de Labed A et al	50
• Modèle de Bouchekima. B et al	50
• Corrélation de Swinbank 1963	51
• Corrélation d'Ursula Eiker	51
• Corrélation de Swinbank 1983 évoqué par Bot	51
1.9. Température au sol	51
• Modèle d'EL HAROUI M., A MASLOUHI	53
1.10. La convection due au vent	54
• Mac Adams 1954	54
• Watmuff et al 1977	54
• Relation d'Ursula Eiker	54
1.11 Maisons Bioclimatiques	54
1.11.1. Le principe de l'éco quartier	55
1.11.2. Quelques éco-quartiers d'Europe	56
1.11.3 La première maison bioclimatique sera rurale	57
1.11.4 Algérie : Un projet-pilote de 600 logements bioclimatiques	59
1.12 position du problème	61
1.13 Conclusion	61
<b>CHAPITRE 2 : MODELISATION</b>	<b>62</b>
2.1 Introduction	62
2.2 Hypothèse	62
2.3 Bilan thermique en régime permanent	62
2.3.1 Paramètres thermique	64
2.4 Echange Radiatifs	65
2.4.1 Eclairage solaire	65
2.4.2 Echange radiatif	68
2.5 Echanges convectifs	70
2.6 Conductance	70
2.7 Les infiltrations	72
2.8 Régime transitoire	73
• Bilan thermique sur l'air interne	73
• Bilan thermique global sur la cellule	74
2.9 Variation temporelle de la température ambiante	74
2.10 Mises en équations des différents bilans thermique et discrétisation	76
2.10.1 Régime permanent	76
2.10.1.1 Toiture	76

2.10.1.2 Murs	79
2.10.1.3 Bilan thermique global	81
2.10.2 Régime transitoire	82
2.10.2.1. Toiture	82
2.10.2.2. Murs	83
2.10.3 Discrétisation	84
2.10.4 Résolution	85
2.11 Conclusion	87
<b>CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	<b>88</b>
3.1 Introduction	88
3.2 Validation	88
3.3 Variation de l'éclairement et de la température ambiante	89
3.3.1. Eclairement reçu par chaque façade	89
3.3.2 Variation de l'éclairement par site	91
3.3.3. Variation de la température ambiante	94
3.4 Température interne de la cellule	95
A- Régime permanent	95
B- Régime transitoire	97
3.5 L'effet de l'emplacement de la fenêtre sur la température interne	98
3.6 L'effet des matériaux	98
3.7 L'effet de l'orientation	100
3.7 Apports énergétique sectoriels	101
3.8 Effet de surface sélective	102
3.9 Conclusion	103
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>104</b>
<b>Annexe A</b> : Liste des symboles	105
<b>Annexe B</b> : Instruments de mesure du rayonnement solaire.	108
<b>Annexe C</b> : propriétés thermiques et optiques de quelques matériaux.	110
<b>Annexe D</b> : les méthodes de discrétisation.	113
<b>Annexe E</b> : les méthodes de résolution.	116
<b>Annexe F</b> : Organigramme	120
<b>Annexe G</b> : Schémas électrique	122
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>123</b>

**LISTE DES FIGURES  
ET  
TABLEAUX**

## Liste des figures

Figure 1.1	Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil	5
Figure 1.2	Mouvement apparent du soleil observé à partir d'un point de latitude L	6
Figure 1.3	Repérage de la position du soleil	6
Figure 1.4	Diagramme solaire pour une Latitude de 36° NORD	7
Figure 1.5	Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich	9
Figure 1.6	Equation du temps ET et déclinaison $\delta$ en fonction du jours de l'année	9
Figure 1.7	Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre	10
Figure 1.8	Spectre du rayonnement atmosphérique	11
Figure 1.9	Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère au niveau du sol	12
Figure 1.10	Composantes du rayonnement incident	12
Figure 1.11	La variation annuelle des irradiations journalières en moyenne mensuelle reçue sur un plan horizontal (cite d'Adrar)	13
Figure 1.12	Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée non-perturbée au Mois d'Aout le 16	13
Figure 1.13	Mois de Janvier	15
Figure 1.14	Mois d'Avril	15
Figure 1.15	Mois d'Aout	15
Figure 1.16	Mois de Novembre	15
Figure 1.17	Comparaison des modèles d'éclairement sur un plan horizontale	16
Figure 1.18	Carte solaire de l'Algérie selon DLR	19
Figure 1.19	Carte des altitudes de l'Algérie	19
Figure 1.20	Cartographie de l'énergie solaire globale reçue sur un plan horizontal simulée par ciel clair selon le modèle r.sun (a), le modèle Capderou (b)	19
Figure 1.21	La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance	21

Figure 1.22	Digramme psychrométrique, repérage de différentes zones de confort et d'inconfort	22
Figure 1.23	Accumulation de chaleur et redistribution avec déphasage temporel	25
Figure 1.24	quelques ordre de grandeur de diffusivité thermique	25
Figure 1.25	quelques ordre de grandeur de l'effusivité thermique	26
Figure 1.26.a	Variation de la température Journalière moyenne au cours de l'année 2005 à Bouzareah.	28
Figure 1.26.b	Enregistrement de la température ambiante Du 28 mars au 03 avril, sur le site de Bouzareah	28
Figure .1.27	Température ambiante moyenne enregistrée à Bouzareah durant l'année 2007	29
Figure 1.28	Modélisation de la température ambiante par deux fonctions	29
Figure 1.29	Echange radiatif au sol-environnement	33
Figure 2.1	Visualisation des angles de repérage du soleil Par rapport à un plan incliné	43
Figure 2.2	Echange thermique à travers une paroi	47
Figure 2.3	Profil de température ambiante pour la journée du 15 mai	50
Figure 2.4	Variation de température selon le Modèle proposé Au cours d'une journée	52
Figure 2.5	Schéma des différents échanges au niveau de la toiture	53
Figure 2.6	Schéma des différents échanges thermique au niveau du Mur	55
Figure 2.7	Schéma des différents échanges thermique au niveau de la toiture En régime transitoire	58
Figure 2.8	Schéma des différents échanges thermique au niveau du mur En régime transitoire	59
Figure 2.9	Maillage au niveau d'une paroi	60
Figure 3.1	Mois de Mars	63
Figure 3.2	Mois d'Aout	63

Figure 3.3	Mois de Janvier	64
Figure 3.4	Mois de Février	64
Figure 3.5	Mois de Mars	64
Figure 3.6	Mois d'Avril	64
Figure 3.7	Mois de Mai	64
Figure 3.8	Mois de Juin	64
Figure 3.9	Mois de Juillet	65
Figure 3.10	Mois d'Aout	65
Figure 3.11	Mois de Septembre	65
Figure 3.12	Mois d'Octobre	65
Figure 3.13	Mois de Novembre	65
Figure 3.14	Mois de décembre	65
Figure 3.15	Mois de Janvier	66
Figure 3.16	Mois de Février	66
Figure 3.17	Mois de Mars	66
Figure 3.18	Mois d'Avril	66
Figure 3.19	Mois de Mai	67
Figure 3.20	Mois de Juin	67
Figure 3.21	Mois de Juillet	67
Figure 3.22	Mois d'Aout	67
Figure 3.23	Mois de Septembre	67
Figure 3.24	Mois d'Octobre	67
Figure 3.25	Mois de Novembre	68
Figure 3.26	Mois de Décembre	68
Figure 3.27	Comparaison de la variation diurne de la température ambiante entre le modèle proposé et le modèle de LAZZARIN	68

Figure 3.27	Variation Température interne en régime permanant du mois de Janvier au mois de Juin	69
Figure 3.28	Variation Température interne en régime permanant du mois de Juillet au mois de Décembre	70
Figure 3.29	Température interne en régime transitoire du mois de Janvier au mois de Juin	70
Figure 3.30	Température interne en régime transitoire du mois de Juillet au mois de Décembre	71
Figure 3.31	Effet de l'emplacement de la fenêtre sur la température interne (Mois de Mars)	71
Figure 3.32	L'effet des matériaux sur la température interne (Mois de Janvier)	72
Figure 3.33	Comparaison entre différents orientation de la cellule	73
Figure 3.34	Poids énergétique de chaque façade en Mois de Février	74
Figure 3.35	Poids énergétique de chaque façade en Mois de Aout	74
Figure 3.36	Distribution de température interne de la cellule pour différents rapports $\alpha/\varepsilon$ sur la Toiture	75
Figure 3.37	Distribution de température interne de la cellule pour différents rapports $\alpha/\varepsilon$ sur la Toiture et les Murs	75

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Répartition spectrale de l'éclairement solaire reçu sur terre Et d'un corps noir a 5762 k	4
Tableau 1.2 Coefficient de Hottel	15
Tableau 1.3 Coefficient donnés par Perrin de Brichambaut	16
Tableau 1.4 Coefficient du type Angström pour Bouzaréah (Alger)	17
Tableau 1.5 Journées représentatives de la moyenne mensuelle	18
Tableau 1.6 Plage de températures recommandées	21
Tableau 1.7 : Propriétés des différents revêtements de contrôle thermique	27
Tableau 1.8 sélectivité de quelques matériaux et peintures	27
Tableau 2.1 Coefficients données par Perrin de Brichambaut	44
Tableau 2.2 Infiltration a travers les portes	48
Tableau 2.3 Infiltration a travers les fenêtres	48
Tableau 2.4 résistance thermique au niveau de la toiture	53
Tableau 2.5 résistance thermique au niveau du mur	56

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis la révolution industrielle au XIX<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de l'énergie a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles formes d'énergie est devenue une nécessité pour assurer le niveau de vie actuel de l'humanité.

En effet, l'exploitation massive des énergies conventionnelles ne cesse de s'accroître, durant le XX<sup>ème</sup>, la consommation d'énergie est multipliée par 10 avec une accélération à partir de 1945, ce qui a pour effet l'épuisement des ressources traditionnelles en matière d'énergie.

En outre, le réchauffement climatique est une autre conséquence de l'exploitation massive des hydrocarbures qui produisent de grandes quantités de gaz à effet de serre. Au XX<sup>ème</sup> siècle, des scientifiques ont indiqué une augmentation de 0.6°C de la température moyenne de la planète et selon un rapport réalisé par le GIEC (groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) en 2007, la température moyenne de la planète va augmenter de 1.8 à 4°C d'ici la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est nécessaire de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et de développer les énergies renouvelables qui sont inépuisables et propres.

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 après la signature du protocole de Kyoto qui prévoit une baisse de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre des pays riches sur la période de 2002-2012 par rapport à 1990.

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes.

Le climat est un facteur très important en raison de son influence prépondérante sur le confort humain. Le problème des milieux semi aride et l'évacuation de la chaleur en été et la garder en hiver. Pour cela il faut diminuer les gains, améliorer les coefficients de transfert et réduire les apports solaires et amortir les écarts de température

Le but de ce travail est d'essayer de réduire les apports d'une cellule d'habitation en équipant la toiture de la cellule d'une surface sélective rayonnante permettant de diminuer les apports solaires grâce à un coefficient d'absorption proche de zéro dans le spectre du rayonnement solaire, et rayonnant au maximum dans le spectre infrarouge et infrarouge lointain permettant ainsi le refroidissement de la cellule par rayonnement avec la voûte céleste.

Toutes les études effectuées à ce jour, quelle soient théoriques ou expérimentales, montrent que les échanges thermiques d'une cellule d'habitation avec son environnement se font essentiellement par la toiture. Par ailleurs dans les zones arides comme les hauts plateaux ou le sud algérien le gros problème des habitations est de maintenir les conditions de confort acceptables en saison chaude.

Le premier chapitre sera consacré à l'étude bibliographique. On fera l'inventaire des travaux cités par la littérature, on parlera successivement du gisement solaire, du confort thermique, des infiltrations et du renouvellement d'air, des travaux réalisés concernant la modélisation de la température ambiante, la température ciel et la température au sol, on parlera du principe d'une maison bioclimatique et les principales réalisations

Le second chapitre sera consacré à la modélisation. Le système d'équations différentielles aux dérivées partielles régissant le comportement thermique de la cellule et les différents coefficients d'échange thermique sera établi. La méthode de résolution numérique du système après discrétisation sera présentée.

Le troisième et dernier chapitre sera consacré à la production des résultats numériques, Après validation, le modèle développé sera utilisé pour mettre en évidence les différents effets résultants de la modification des paramètres et en particulier l'impact important pour ramener le traitement approprié dans la toiture

*Chapitre 1*

**ETUDE  
BIBLIOGRAPHIQUE**

## 1.3 . INTRODUCTION

Toute étude ou application de l'énergie sur un site donné nécessite la connaissance complète et la plus détaillée possible de l'ensoleillement du site. Ceci est généralement facile lorsque le site est pourvu d'une station de mesures météorologiques fonctionnant régulièrement depuis plusieurs années. Cependant, dans la plupart des cas, il n'existe pas de mesures radiométriques locales. On doit avoir recours à certaines méthodes approchées permettant l'estimations des composantes de l'irradiation solaire.

Les régions arides sont connues pour leurs écarts de température diurnes importants tout comme elles souffrent de condition climatiques extrêmes durant toute l'année.

Ce chapitre sera consacré à la revue de l'essentiel des travaux cités par la littérature, en abordant successivement le gisement solaire, Les différents modèles d'estimation du rayonnement solaire, Le confort thermique, Le modélisation de températures ambiante, l'estimation de la température ciel et sol, et enfin les maisons bioclimatiques

## 1.4 GISEMENT SOLAIRE

### 1.2.1 Nature du rayonnement solaire

Le soleil est composé à 80% d'hydrogène et 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. Il est généralement accepter que la source d'énergie du soleil est une réaction thermonucléaire hydrogène-hélium, les détails de cette réaction sont peu connus est jamais encore observés en laboratoire. En ce qui nous concerne, le soleil rayonne à peu de chose près comme s'il s'agissait d'un corps noir ayant un diamètre de 1.39millions de km à une température de 5 762K. Cette température apparente du soleil ne correspond pas à la réalité physique car on estime en effet que dans les couches gazeuses internes, les températures peuvent atteindre 10 à 20 millions de K. Cependant, l'observation de l'intensité du flux solaire et sa distribution spectrale conduit à la définition de la température apparente.

La puissance rayonnée à la surface du soleil est donc à peu près égale à  $\pi R^2 \sigma T^4$  soit  $3.79 \cdot 10^{26}$  W. Seule une puissance de l'ordre de  $1.7 \cdot 10^{17}$  W est interceptée par la terre ; 30% de ce flux sont réfléchis vers l'espace, 47% sont absorbés, puis réémis vers l'espace sous forme de rayonnement dans l'infrarouge, 23% servent de source d'énergie au cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère et 0.5% se retrouvent sous forme de photosynthèse dans les plantes [1].

- Constante solaire

La valeur moyenne mesurée du flux solaire sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons et placé en dehors de l'atmosphère terrestre est appelé constante solaire  $I_0$ . La valeur moyenne actuellement retenue est

$$\bar{I}_0 = 1\,367 \text{ W/m}^2$$

Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extraterrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de  $\pm 1.6\%$  de la distance terre-soleil et donc une variation de ce flux.

- Distribution spectrale du flux solaire

La distribution spectrale du flux solaire, en dehors de l'atmosphère, ainsi que la distribution spectrale d'un corps noir porté à 5 762 K sont représenté en figure 1.1. Ces résultats sont adaptés par des études de THEKAEKARA [1] basées en partie sur des observations par satellites entreprises par la NASA.

La répartition de l'énergie solaire dans les trois bandes du spectre de rayonnement thermique est donnée dans le tableau 1.1

		% E (solaire)	%E corps noir 5 762
<b>Ultraviolet</b>	$\lambda < 0.38$	7 %	9.9 %
<b>Visible</b>	$0.38 < \lambda < 0.78$	47.3 %	46.4 %
<b>Infrarouge</b>	$0.78 < \lambda < 15$	45.1%	43.6%

*Tableau 1.1 Répartition spectrale de l'éclairement solaire reçu sur terre et d'un corps noir à 5762 K*

L'écart entre les distributions spectrales par bandes larges d'un corps noir à 5762 K et du soleil est généralement inférieur à 3%, ce qui permet de convenir que le rayonnement d'un corps noirs à 5762K est une approximation acceptable du rayonnement solaire en ce qui concerne les applications thermiques à basse température.

## 1.2.2. Repérage du Soleil dans la Voûte Céleste

### 1.2.2.1. Mouvement 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**. 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 km. La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'**équateur**. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé **déclinaison** et qui vaut  $23^{\circ}27'$ . Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure 1.1.

Plutôt que d'étudier le mouvement de la terre sur son axe de rotation et sur sa trajectoire autour du soleil, nous examinerons le mouvement apparent du soleil dans la voûte céleste. Le repérage du soleil permettra ainsi le calcul des flux sur un plan d'orientation quelconque.

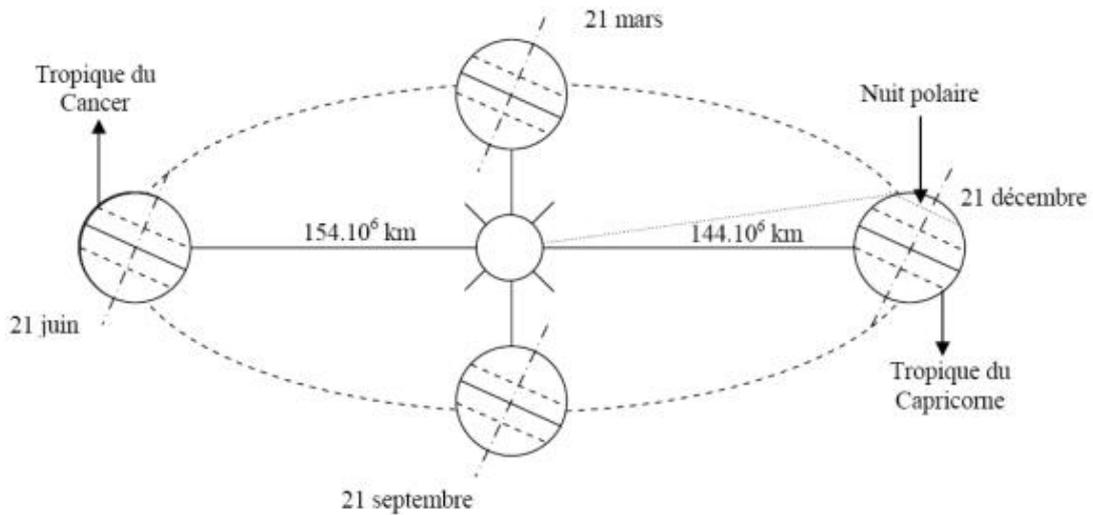


Figure .1.1 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil

Les quatre positions de la terre représentée sur cette figure correspondent aux solstices et équinoxes.

On appelle **déclinaison**  $\delta$  l'angle que forme la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation, [2]:

$$\delta = 23.45 \sin[0.980(j + 284)] \quad (1.1)$$

Où  $j$  est le numéro du jour dans l'année

Lorsqu'une grande précision est requise, on pourra utiliser le développement en série de FOURIER [2] :

$$\begin{aligned} \delta = & 0.33281 - 22.984 \cos J - 0.3499 \cos 2J - 0.1398 \cos 3J \\ & + 3.7872 \sin J + 0.03205 \sin 2J + 0.07187 \sin 3J \end{aligned} \quad (1.2)$$

Où  $J=0.984 j$ .

#### 1.2.2.1 Mouvement apparent du soleil

Le mouvement apparent du Soleil, vu par un observateur fixe en un point de latitude  $L$  au nord de l'équateur, est représenté sur la figure (1.2) A midi solaire vraie, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à  $(L - \delta)$ . La durée du

jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

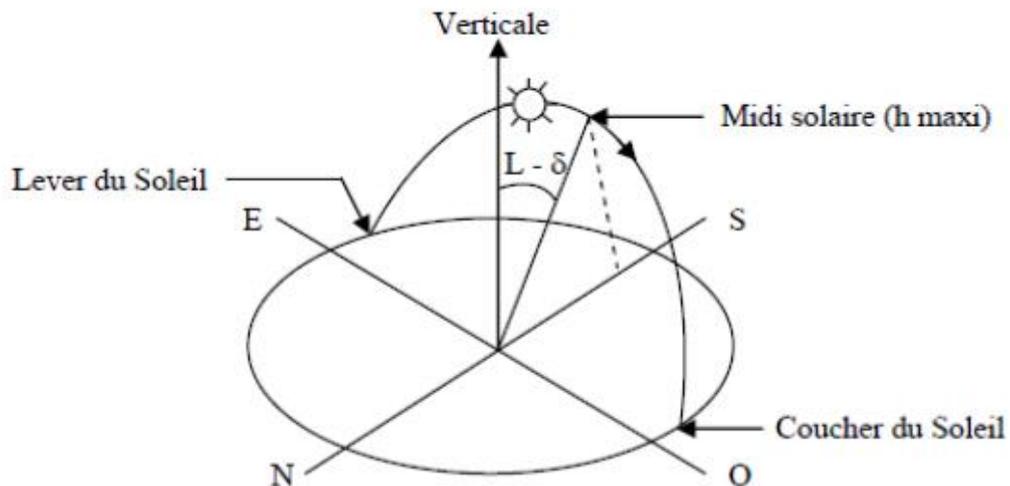


Figure 1.2 : Mouvement apparent du soleil observé à partir d'un point de latitude  $L$

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- L'**azimut  $a$**  : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, Cet angle est orienté positivement vers l'Ouest (voire Fig.1.3).
- La **hauteur  $h$**  du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal

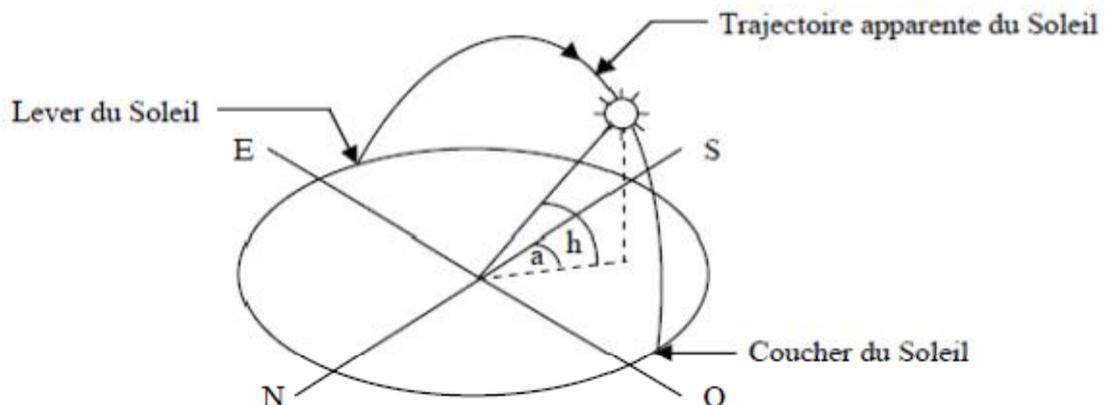


Figure 1.3 : Repérage de la position du soleil

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude L du lieu
- La date j (numéro du jour dans l'année)
- L'heure solaire vraie TSV dans la journée.

La latitude L et la date j servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TSV donne la position instantanée sur cette trajectoire.

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'**heure solaire TSV** en fixant TSV = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »).

- Angle horaire

On définit également l'**angle horaire  $\omega$**  en faisant une parallèle entre le cercle de rotation de la terre et le cercle trigonométrique 1 heure correspond à un angle horaire de 15°, Il est affecté du signe positif pour les heures de l'après-midi.

Ainsi :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (1.5)$$

De même on peut montrer que, [2] :

$$\sin h = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega \quad (1.3)$$

Et

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cos \omega}{\cos h} \quad (1.4)$$

Des abaques ou plus souvent des diagrammes solaires tels que celui de la figure (1.4) ont longtemps été utilisés par les architectes, ils donnent l'azimut, la hauteur et l'angle solaire pour chaque mois de l'année et chaque heure de la journée.

représentation de la trajectoire du soleil  
en projection stéréographique

LATITUDE  
Nord **36**

Pour le 21 de chaque MOIS

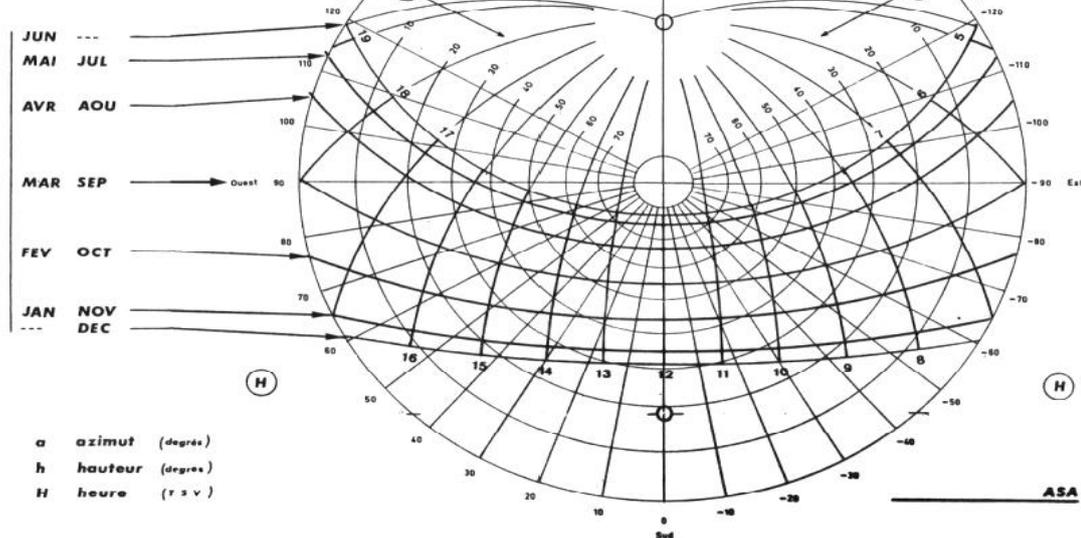


Figure 1.4 : Diagramme solaire pour une Latitude de 36° NORD [3]

Chaque diagramme est valable pour une latitude L donnée, l'azimut est lu directement par rapport au sud, et la hauteur h sur les cercles concentrique correspondant a l'angle horaire pour la journée considérée.

#### 1.2.2.2. Heures et temps

##### 1.2.2.2.1. Durée du jour

Le module  $\omega_l$  de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient en écrivant  $\sin h = 0$  dans la formule (1.3), ce qui conduit à :

$$\cos \omega_l = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (1.6)$$

L'heure solaire au lever du soleil a donc pour valeur :

$$(\text{TSV})_l = 12 - \frac{\omega_l}{15} \quad (1.7)$$

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

$$d = 2 \frac{\omega_l}{15} \quad (1.8)$$

Note :  $\omega$  est exprimé en degrés.

##### 1.2.2.2.2. Relation entre temps légal et temps solaire vrai

Les relations se rapportant au mouvement du soleil utilisent le temps TSV qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré, Cette différence est liée à :

-La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans le quel il se trouve :

$$C = TL - TCF \quad (1.9)$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire que l'on trouvera sur la figure 1.6.

- La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps noté *ET* est donné par [4]:

$$ET = -[0.0002 - 0.4797 \cos(\omega'j) + 3.2265 \cos(2\omega'j) + 0.0903 \cos(3\omega'j) + 7.3509 \sin(\omega'j) + 9.3912 \sin(2\omega'j) + 0.3361 \sin(3\omega'j)] \quad (1.10)$$

Avec  $j$  numéro du jour dans l'année

$$\omega' = 0.984$$

ET Equation du temps (terme correctif) en mn.

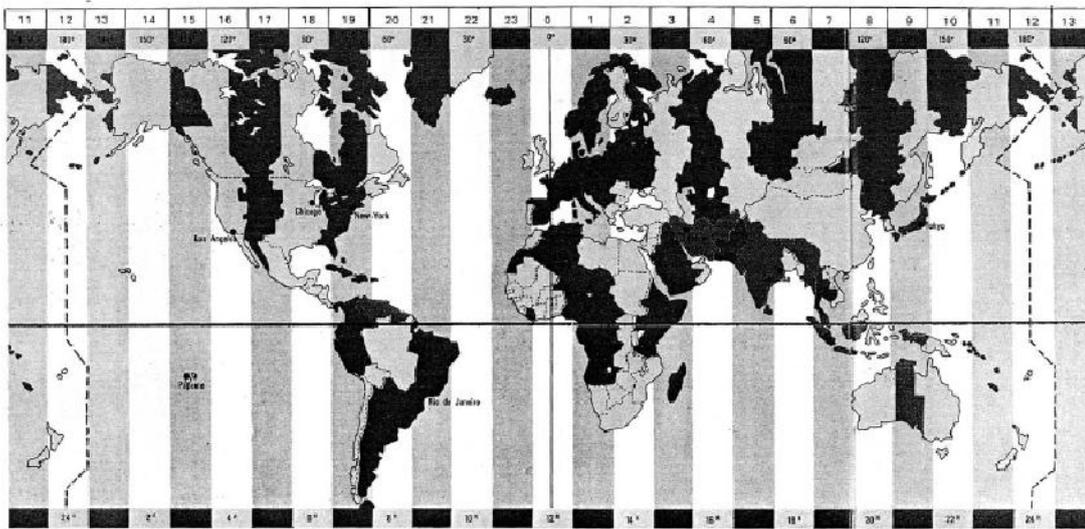


Figure 1.5 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

- La différence de longitude ( $L - l_{ref}$ ) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

Le temps solaire TSV se calcule finalement par la formule :

$$TSV = TL - C + ET + 4 * (L_{ref} - L) \quad (1.11)$$

La correction maximale due à l'équation du temps est de l'ordre de 16 mn pour certaines applications, on peut ne pas en tenir compte en première approximation. On trouvera les variations annuelles de la déclinaison et de l'équation du temps sur la figure 1.6

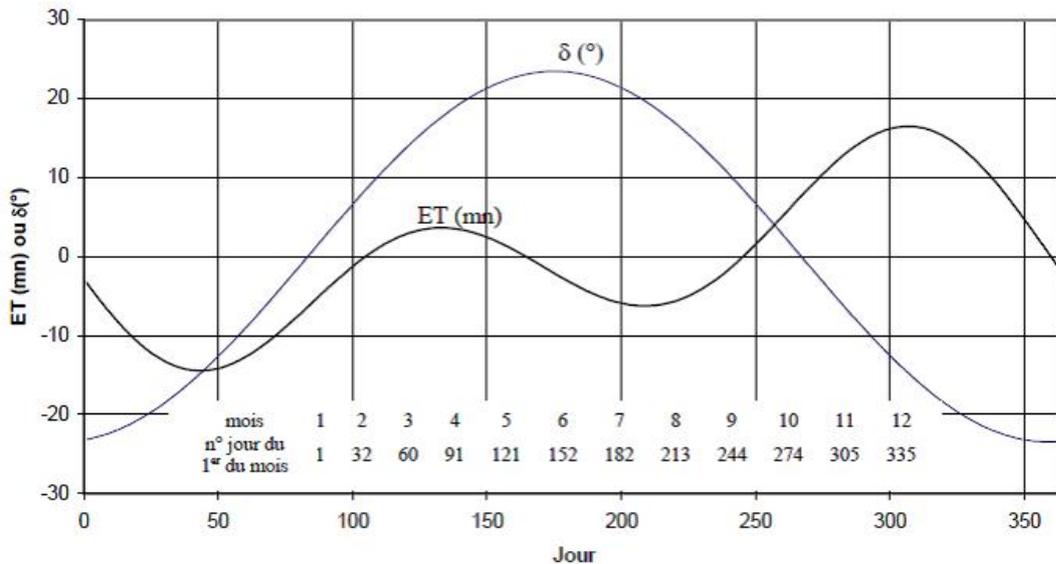


Figure 1.6 : Equation du temps ET et déclinaison  $\delta$  en fonction du jours de l'année.

#### 1.2.2.4. Durée et fraction d'ensoleillement

##### 1.2.2.4.1 Durée d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y ait beaucoup ou peu de nuages. On appelle **durée effective d'ensoleillement** ou **insolation SS** le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle **rayonnement direct** le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le Soleil.

##### 1.2.2.4.2. Fraction d'insolation

On appelle fraction d'insolation le rapport entre la durée d'insolation et la durée du jour maximale, soit :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (1.12)$$

La durée maximale d'ensoleillement  $SS_0$  pour un site donnée peut être calculée par la formule (1.8).

### 1.2.3. Aspects énergétiques

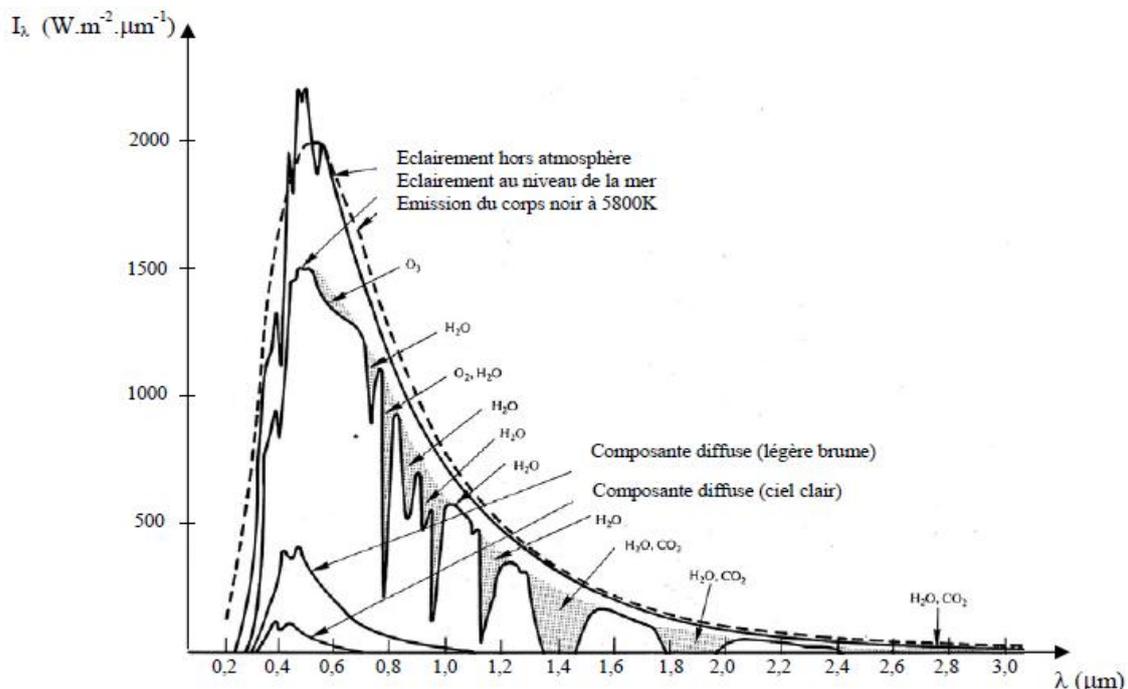


Figure 1.7 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

#### 1.2.3.1 Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère ( $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$ ) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- vers  $14,7 \mu m$  pour le  $CO_2$ .
- Entre  $5$  et  $7 \mu m$  et entre  $14$  et  $20 \mu m$  pour la vapeur d'eau.
- Vers  $9,6 \mu m$  pour  $O_3$ .

Ainsi que le montre la figure 2.8, il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'onde ( $> 3 \mu m$ ) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à  $3 \mu m$  [4].

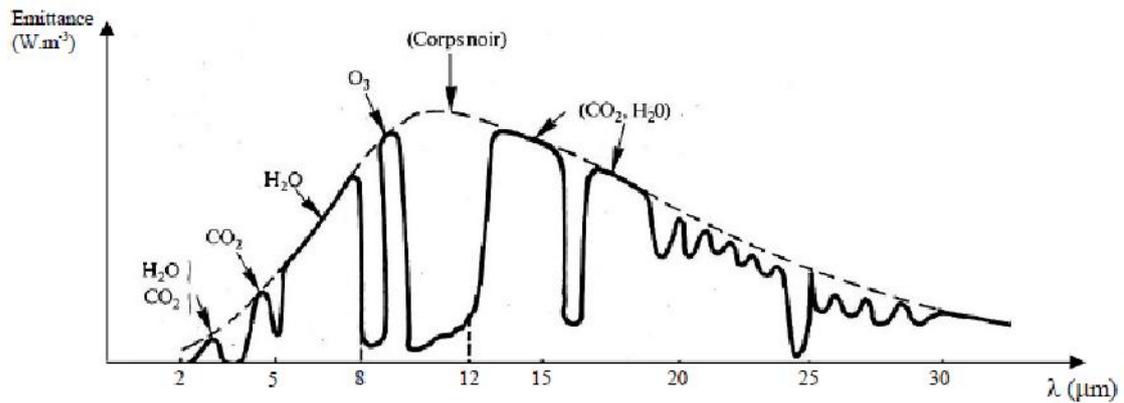


Figure 1.8 : Spectre du rayonnement atmosphérique

Le flux  $W$  rayonné par le ciel et l'atmosphère vers la terre peut être calculé par :

$$W = \sigma T_{\text{ciel}}^4 = \sigma \epsilon_a T_a^4 \quad (1.13)$$

$\epsilon_a$  est donné par la corrélation suivante [4]

$$\epsilon_a = 1 - 0.261 \exp[-7,77 \cdot 10^{-4} (T_a - 273)^2] \quad (1.14)$$

$$\epsilon_a = 0,787 + 0764 \ln\left(\frac{T_{ra}}{273}\right) \quad (1.15)$$

Où :  $T_{ra}$  Température de rosée

$T_a$  Température de l'air en K

### 1.2.3.2 Eclairement Solaire au sol

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de  $0.22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$  la figure (1.10) représente la variation de la répartition spectral de ce rayonnement.

Sur ce graphique on constate que pour  $\lambda \leq 0.3\mu\text{m}$  le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre  $0.38$  et  $0.78\mu\text{m}$  l'absorption par l'atmosphère est faible [5].

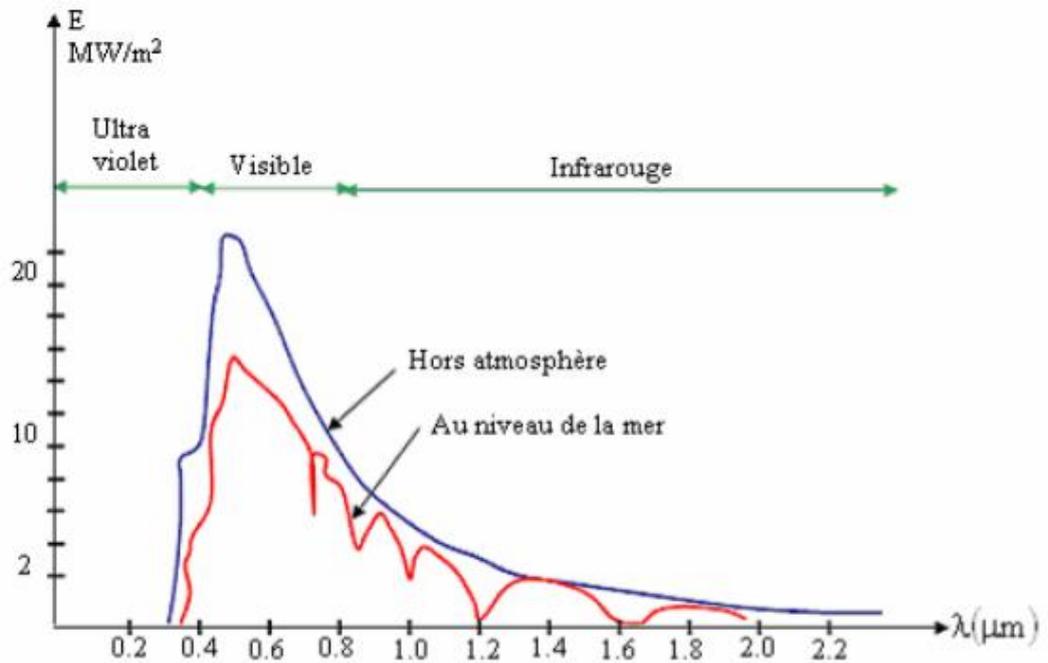


Figure 1.9 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère au niveau du sol [6]

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

- Le **rayonnement direct** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modification.
- Le **rayonnement diffus** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le **rayonnement global** est la somme du rayonnement direct et diffus [5].

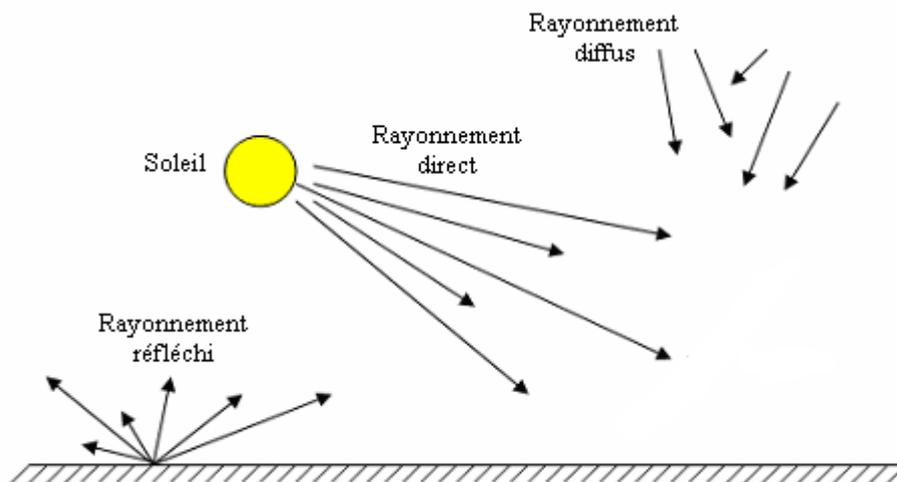


Figure 1.10 : Composantes du rayonnement incident

## 1.2.4. Variations types du rayonnement

### 1.2.4.1. Variation Annuelle

La valeur de l'irradiation globale annuelle sur un plan horizontal dépend fortement de la latitude comme le montre l'histogramme des irradiations figure 1.11

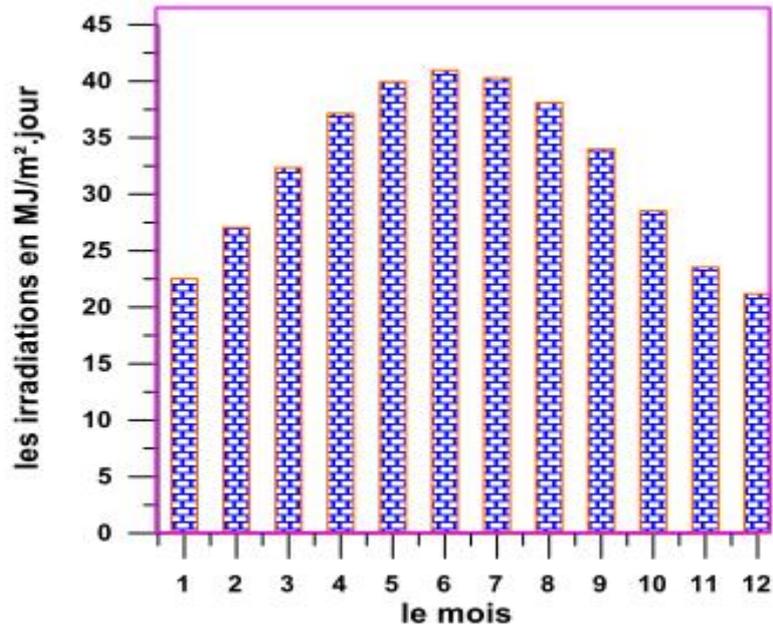


Figure 1.11 : La variation annuelle des irradiations journalières en moyenne mensuelle reçue sur un plan horizontal (cite d'Adrar)[A]

### 1.2.4.2 Variation Journalière

En absence de nuages, L'éclairement solaire reçu par un capteur varie typiquement de la manière représentée sur la figure 1.13 au cours d'une journée non-perturbée : nul la nuit, il augmente dès le lever du jour pour atteindre un maximum au midi solaire avant de décroître de nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit.

Eclairement d'une surface horizontale (L = 10°, I = 10°, j = 150)

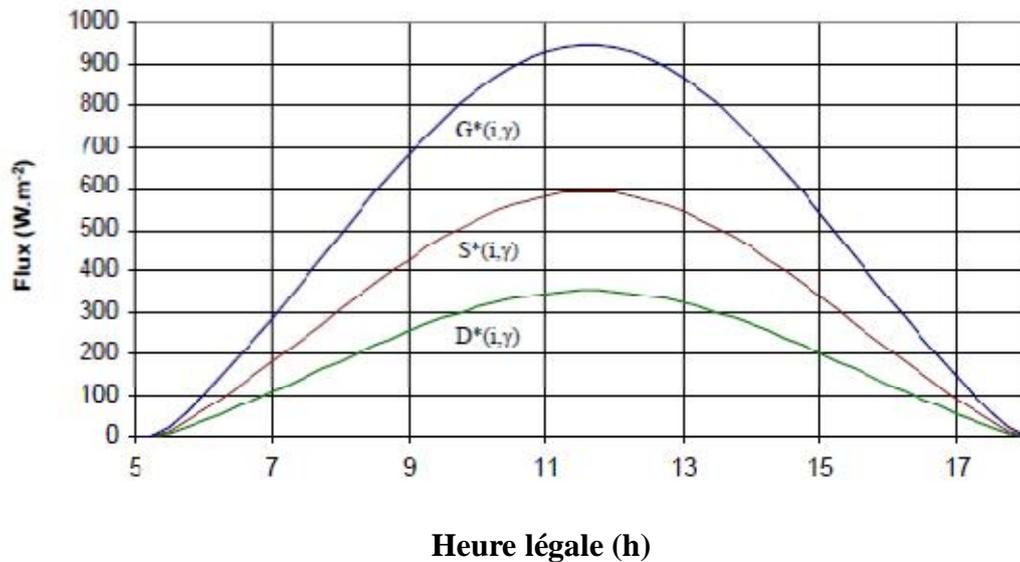


Figure 1.12 : Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée non-perturbée au Mois d'Aout le 16 [4]

L'utilisation de l'énergie solaire est donc bien adaptée aux applications dont les besoins coïncident avec les heures d'ensoleillement maximum. Dans la plupart des cas, il existe un décalage qui nécessite un stockage pour satisfaire les besoins de la période de non ensoleillement : ballon d'eau chaude associé à un capteur solaire pour les besoins en eau chaude en début de matinée, château d'eau associé à une pompe pour les besoins nocturnes en eau.

#### 1.2.5. Eclairement et irradiation solaire

L'éclairement est une donnée de base de toutes les études de simulation des systèmes solaires. A défaut de mesures, il faut donc passer par l'une des méthodes d'estimation ou de reconstitution.

Hors atmosphère l'éclairement solaire globale, reçu sur un plan normale aux rayons solaires, est égale a la constante solaire que multiplie un facteur représentant la correction de la distance terre-soleil [7], soit :

$$I_0 = I_{cs} \left[ 1 + 0.33 \cos \left( 360 \frac{NJ}{365} \right) \right]$$

Avec :

$I_{cs}$  : Constante solaire égale à 1367 W/m<sup>2</sup> selon les dernières recommandations de l'OMM [8]

$N_j$  : Numéro du jour dans l'année.

Au niveau du sol et en absence de mesures, on est amené à utiliser :

- Soit les estimations tabulées selon le lieu, la date et le type de ciel considéré. Ces estimations ou « Atlas Solaires » sont disponibles pour la plus part des pays. (« L'atlas Solaire de l'Algérie » publié par Capderou en 1987 a suscité nombre de réserves du fait de la pauvreté des données).

- Soit un modèle établi pour l'estimation de l'éclairement solaire global ou l'une de ses composantes.

Etablis sur une base des mesures enregistrées par les stations radiométrique sur un minimum de 10 années, ces modèles ont une portée souvent limitée pour l'Algérie.

#### 1.2.5.1. Estimations du rayonnement solaire par ciel clair

- Modèle de Hottel, Liu et Jordan

Le Modèle proposé par Hottel [9], pour l'estimation de l'éclairement direct reçu sur un plan horizontal, s'écrit simplement :

$$I_{hb} = I_0(\sin h)\tau_b$$

Avec :

$h$  : hauteur apparent du soleil.

$$\tau_b : a_0 + a_1 \exp(-a_3/\sin h)$$

Les coefficients  $a_0, a_1, et a_3$  ont été établis pour une visibilité à 23 et 5 km, tel que :

$$a_i = a + b(c - z)^2, \quad i = 0,1,2.$$

Avec

$Z$  : altitude du lieu, exprimée en km.

Pour tenir compte de la transmittivité du diffus on peut utiliser la relation proposée par Liu et Jordan [10], soit :

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939 \tau_b$$

Avec  $I_d = I_0 \tau_b$

Visibilité	$a_0$			$a_1$			$a_3$		
	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$
23 km	0.4237	-0.0082	6	0.5055	0.00595	6.5	0.2711	0.01858	2.5
5 km	0.2538	-0.0063	6	0.7678	0.001	6.5	0.249	0.081	2.5

Tableau 1.4 Coefficient de Hottel

Les courbes 1.13 à 1.16 représentent l'éclairement solaire (globale, diffus, direct) obtenus en appliquant le modèle de Lieu et Jordan pour différents mois de l'année pour la ville d'Alger

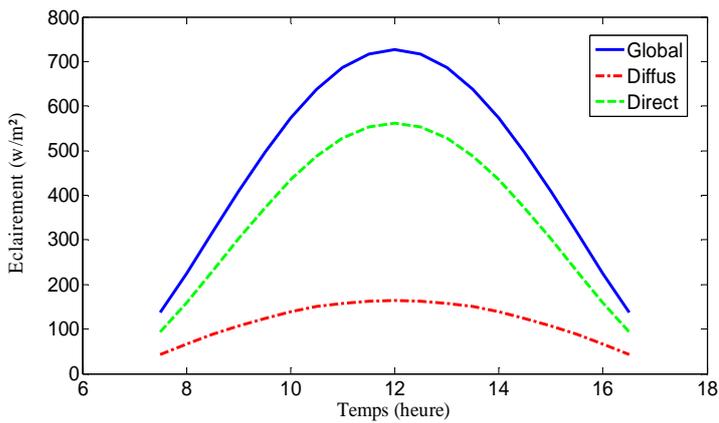


Fig.(1.13) Mois de Janvier

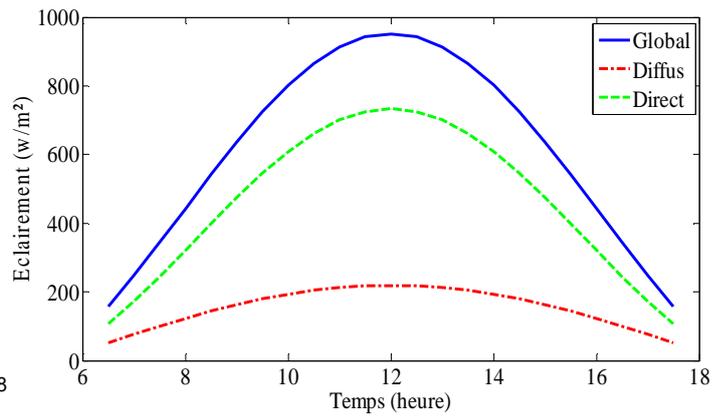


Fig.(1.14) Mois d'Avril

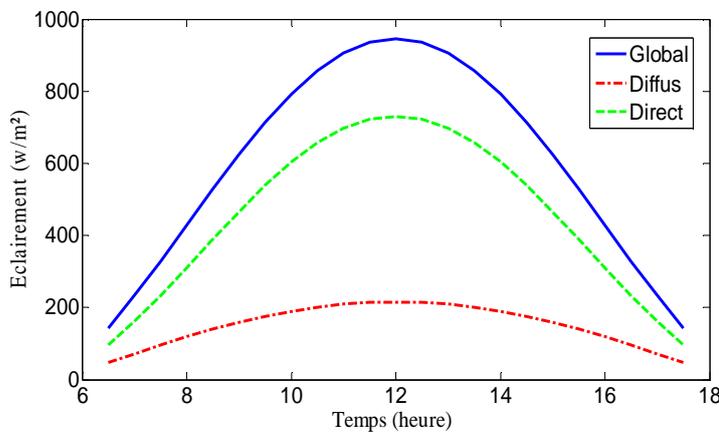


Fig.(1.15) Mois d'Aout

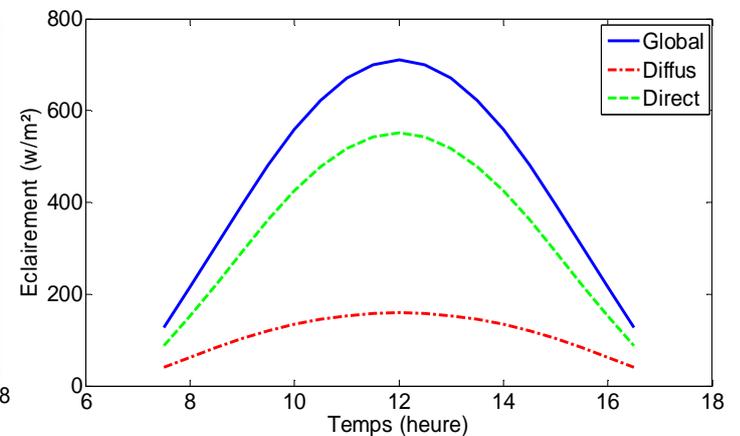


Fig.(1.16) Mois d'Novembre

- Modèle de Perrin de Brichambaut

Perrin de Brichambaut propose [11]

$$I_b = A \sin h \exp\{-[C \sin(h + 4\pi/180)]^{-1}\}$$

Et

$$I_d = B(\sin h)^{0.4}$$

Le global est estimé par sommation ou directement par :

$$I_g = D(\sin h)^E$$

Les coefficients A, B, C, D, et E dépendent de la qualité du ciel (voir tableau 2)

D'après **Capderou**[12]

Ciel	A W/m <sup>2</sup>	B W/m <sup>2</sup>	C	D W/m <sup>2</sup>	E
Très pur	1300	87	6	1150	1.15
Moyen	1230	125	4	1080	1.22
Pollué	1200	187	2.5	990	1.25

*Tableau 1.5 coefficient donnés par Perrin de Brichambaut*

La relation donnant le meilleur résultat pour l'Algérie pour le global s'écrit :

$$I_g = 1080[1 + 0.033 \cos (360 Nj/365)] \sin h [\sin h / (0.89)^z]^{0.22}$$

Avec

Z : altitude du lieu, exprimée en km

La figure 1.17 représente la comparaison entre les différents modèles d'estimation de l'éclairement solaire pour la journée du 15 Mai

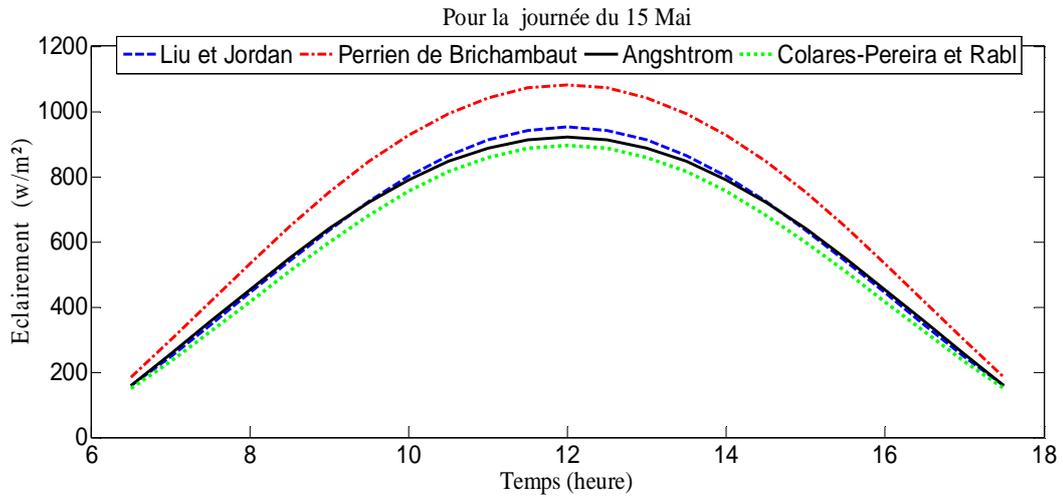


Fig. (1.17) Comparaison des modèles d'éclairement sur un plan horizontale

#### 1.2.5.2. Estimations de l'irradiation solaire par ciel variable

Par ciel variable les relations établies pour l'estimation de l'irradiation moyenne en fonction de la fraction d'insolation ou de l'indice de clarté.

- Relations de type Angström-Black

Les relations donnant l'irradiation en fonction de la fraction d'insolation Duffie et al [7]

Sont du type :

$$\bar{H}_h / \bar{H}_0 = a + b\bar{\sigma} \quad \text{Relation de Black}$$

Où

$$H_h / H_{cc} = a_0 + b_0\bar{\sigma} \quad \text{Relation d'Angström}$$

Avec :

$H$  : Irradiation

$\sigma$  : Fraction d'insolation

0, h, cc : indices pour hors Atmosphère, Horizontal et ciel clair, respectivement.

Pour l'Algérie, Capderou [12] propose, pour les moyennes mensuelles :

$$\bar{H}_{gh}/\bar{H}_{cc} = 0.41 + 0.58 \bar{\sigma}$$

$$\bar{H}_{dh}/\bar{H}_{cc} = 0.53 - 0.35 \bar{\sigma}$$

Les indices g et d signifient « global » et « diffus », respectivement.

Les relations établies à l'échelle du jour sont fonction du mois et du lieu considéré. Pour l'estimation du global et en exploitant les données mesurées à Bouzaréah Mefti et al [13]

Proposent des relations selon les 2 modèles. Les coefficients des relations du type Angström sont donnés dans le tableau (1.6)

	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	An
$a_0$ ( $\times 10^3$ )	217	213	222	241	242	240	271	287	264	241	211	229	233
$b_0$ ( $\times 10^3$ )	396	443	454	450	438	471	415	381	397	406	404	375	431

Tableau 1.6 : Coefficient du type Angström pour Bouzaréah (Alger)

- Relation fonction de l'indice de clarté

La littérature propose plusieurs relations expriment le rapport Diffus/Global en fonction de l'indice de clarté (défini par  $K_t = H_{gh}/H_0$ ). La plus simple est celle propose par Page [14]

Soit :

$$\frac{H_d}{H_g} = a - b\bar{K}_t$$

Pour le Sud Algérien, Capderou [12] propose a=0.91 et b=0.98

La relation proposée par Collares- Pereira et Rabl [15] intègre en plus l'angle horaire au coucher du soleil, soit :

$$\frac{H_d}{H_g} = 0.775 - 0.00653(\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455(\omega_s - 90)]\cos(115\bar{K}_t - 103)$$

$\omega_s$  Étant l'angle horaire au coucher du soleil.

Les irradiations horaires sont alors reconstituées par des méthodes basées sur les moyennes ou sur des calculs probabilistiques [7] [16]

MOIS	JOUR DU MOIS	JOUR DE L'ANNEE (j)
JANVIER	17	17
FEVRIER	16	47
MARS	16	75
AVRIL	15	105
MAI	15	135
JUIN	11	162
JUILLET	17	198
AOUT	16	228
SEPTEMBRE	15	258
OCTOBRE	15	288
NOVEMBRE	14	318
DECEMBRE	10	344

Tableau 1.7 Journées représentatives de la moyenne mensuelle

#### 1.2.6 Carte solaire de l'Algérie

La carte solaire de l'Algérie disponible et adoptée par la majorité des scientifiques et chercheurs algériens est celle délivrée par l'agence aérospatiale allemande (DLR) (Fig. 1.13) réalisée durant les années 90. Cette carte est la projection des données du rayonnement solaire incident sur un plan normal (avec poursuite solaire) sur l'ensemble de l'année. Cependant, les avancées technologiques de la filière solaire exigent de plus en plus de cartes pour diverses incidences du rayonnement. A cet effet, il à été jugé nécessaire de proposer d'autres cartes solaires pour l'Algérie, et ceci est réalisable à partir des deux modèles de calcul du rayonnement solaire Capderou et r.sun pour chaque combinaison latitude, longitude et altitude (Fig 1.14) du territoire algérien [17].

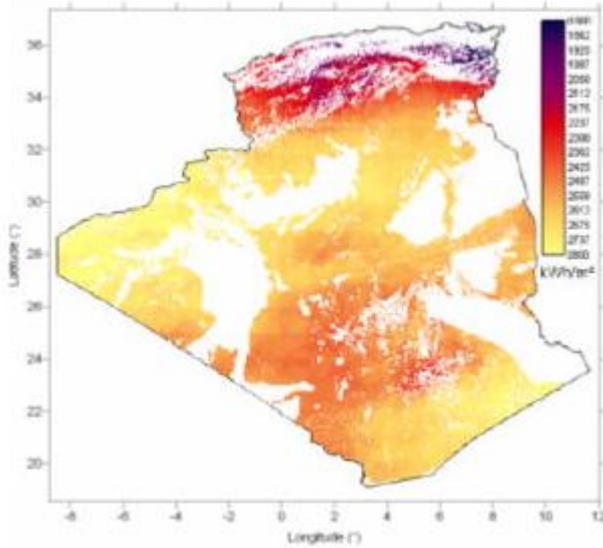


Fig. 1.18 Carte solaire de l'Algérie selon DLR [18].

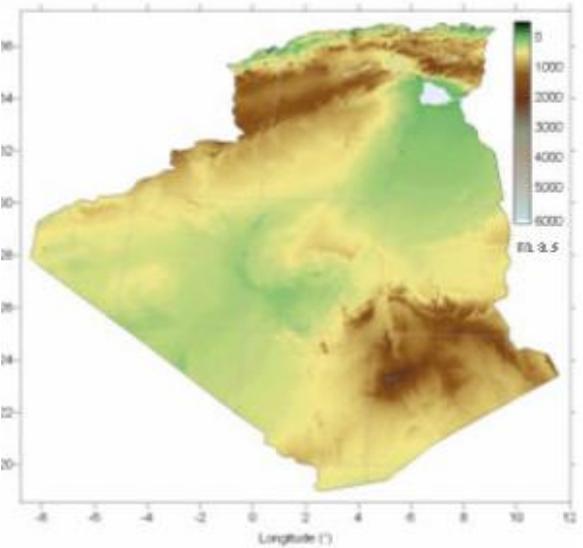


Fig. 1.19: Carte des altitudes de l'Algérie

A l'aide de ces données, nous avons calculé l'énergie solaire globale mensuelle ensuite annuelle reçue sur un plan horizontal simulée par ciel clair selon le modèle r.sun ( Fig. 1.15 a), le modèle Capderou (Fig. 1.15 b), les résultats sont projetés sur les cartes suivantes [17] :

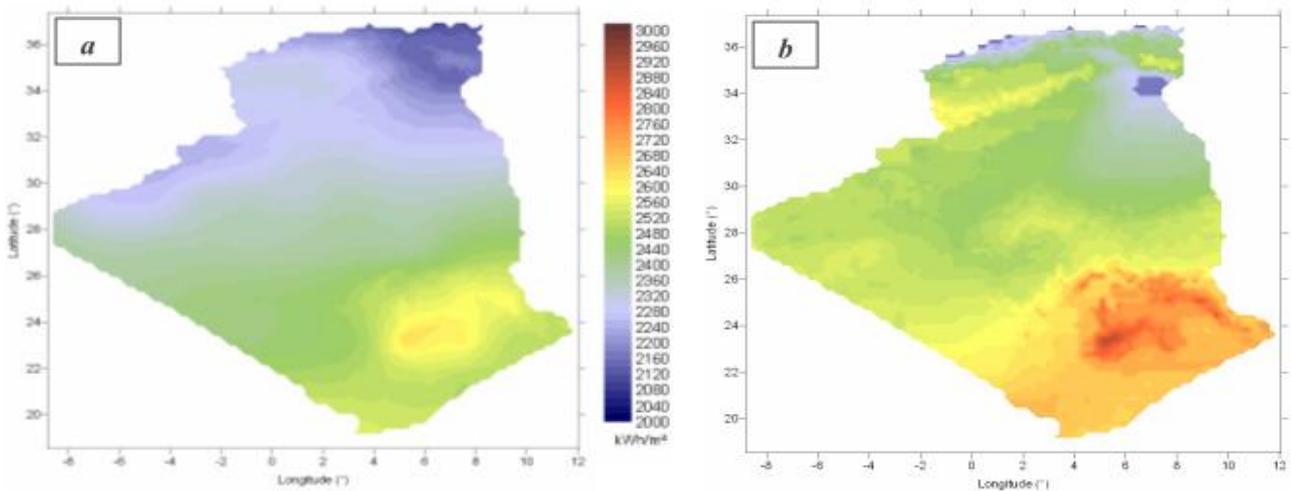


Fig. 1.20: Cartographie de l'énergie solaire globale reçue sur un plan horizontal simulée par ciel clair selon le modèle r.sun (a), le modèle Capderou (b)

A partir de l'analyse globale des cartes, on remarque qu'il existe une différence remarquable entre les valeurs des deux cartes déduites des deux modèles, néanmoins on constate clairement que le potentiel énergétique de l'Algérie est très important. Les moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600 h/an dans le Nord à 3500 h/an dans le Sud [18].

### **1.3. La Notion de confort thermique**

#### **1.3.1. Introduction**

La notion de confort thermique est le plus souvent appliquée à l'être humain, bien qu'elle puisse s'appliquer à tout être vivant. En effet, la vie - et spécialement l'activité métabolique assurant les fonctions vitales - n'est possible que dans une certaine plage de température, qui varie d'une espèce à l'autre. Il existe cependant des conditions d'ambiance optimales qui seront ressenties par l'individu comme celle d'un état de confort thermique.

Sur un plan physique, le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance. Il dépend de la sensibilité (aspect psycho-sociologique), de l'habillement, du métabolisme et de l'activité physique de chaque individu, d'une part, mais aussi de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air, et de l'humidité, d'autre part. Au-delà d'un certain niveau de déséquilibre, l'individu va ressentir de l'inconfort, notamment parce qu'il va devoir réagir pour réduire ce déséquilibre. [20]

L'homme assure le maintien de sa température corporelle autour de 36,7°C. Cette température est régulièrement supérieure à la température ambiante, aussi un équilibre doit il être trouvé afin d'assurer le bien-être de l'individu. Si l'apport de calories par l'alimentation, ainsi que l'habillement jouent un rôle important, les échanges calorifiques se font par différents mécanismes [21]:

- L'évaporation :

Le mécanisme de l'évapotranspiration (l'eau, en passant de l'état liquide à l'état gazeux, absorbe les calories), grâce à son évaporation, rafraîchit la surface de la peau.

- La convection :

Echange de chaleur entre l'air ambiant et le corps humain. Ces échanges sont accentués par la vitesse de l'air (généralement compris entre 0,1 et 0,3m/s ; Perception de courant d'air au-delà de 0,3m/s), et par l'écart de température entre l'air et le corps [22].

- Le rayonnement :

Echange de radiations infrarouges entre le corps et les parois. Une paroi froide (telle une vitre) absorbe la chaleur du corps, alors qu'un mur exposé au soleil toute la journée transmet sa chaleur le soir sans même le toucher.

- La conduction :

Echange par contact direct avec une paroi : marcher pieds nus sur un carrelage froid contribue à une perte de calories pour le corps. Ce type d'échange est d'impact limité.

Le tableau 1.7 donne les températures de confort recommandés [21]

Type de travail	Températures recommandées
Sédentaire assis	21 à 23 °C
Physique léger assis	19°C
Physique léger debout	18°C
Physique soutenu debout	17°C
Physique intense	15 et 16°C

Tab.1.6 Plage de températures recommandées

*Fournit par l'Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail*



Figure 1.21 : La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance [21]

### 1.3.2. Paramètres du confort thermique [21]

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement.

- Températures

#### Température de l'air ambiant

C'est la température de l'air mesurée à l'ombre, comprise généralement entre 19°C en hiver et 26°C en été [20]. L'enveloppe de l'habitat doit être capable de maintenir la température dans cette fourchette malgré les écarts de la température extérieure, été comme hiver, de jour comme de nuit. Ensuite, il faut assurer une certaine homogénéité dans l'espace : l'air chaud monte et l'air froid descend ! Il est peu confortable d'avoir la tête au chaud et les pieds au froid, de passer d'une pièce froide à une pièce chaude.

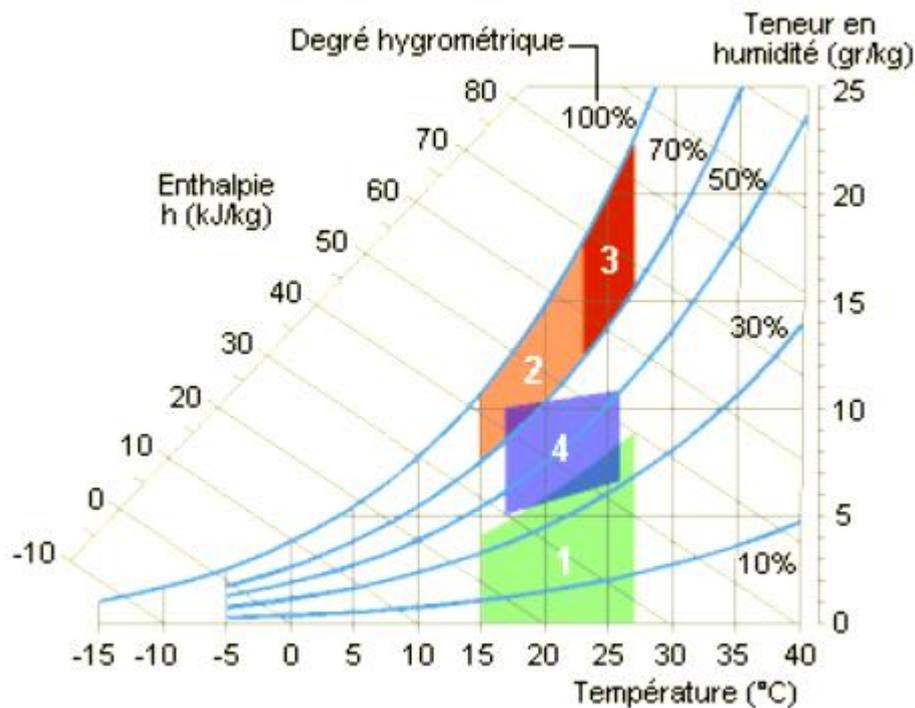


Figure (1.22) Digramme psychrométrique [21], repérage de différentes zones de confort et d'inconfort

1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
2. et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de micro-champignons.
3. Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
4. Polygone de confort hygrothermique

- La température des parois

L'impact de la température rayonnante est généralement sous estimé, voire ignoré. Il est pourtant un des éléments les plus importants dans la sensation de confort, en été comme en hiver. Une paroi froide absorbe le rayonnement chaud du corps (simple vitrage orienté au nord) et produit une sensation de froid, même avec une température ambiante agréable. A contrario, une paroi chaude délivre une sensation de chaleur au corps.

- La température ressentie

C'est la combinaison air/parois. Pour une humidité donnée, en l'absence de courant d'air perceptible, on estime que la température effectivement ressentie est la moyenne entre celle de l'air et celle des parois. A partir d'une différence de 4°C [21],

l'écart entre la température de l'air et celle des parois devient perceptible. Une paroi froide augmente l'inconfort et nécessite une augmentation de la température de l'air pour atteindre une zone de confort.

- L'humidité

L'air contient de la vapeur d'eau. Plus la température augmente, plus l'air peut contenir de la vapeur d'eau : à 15°C, l'air contient 10g de vapeur d'eau par kg d'air, alors qu'à 20°C, cette quantité passe à 15g. Si l'humidité est contenue entre 35 et 70%, nous restons dans la zone de confort. Sous 20%, l'air est trop sec et au delà de 80%, trop humide [21].

- La vitesse de l'air

Autre paramètre très important, la vitesse de l'air. L'air en mouvement accélère les échanges thermiques par convection au niveau de la peau. Si l'air est plus froid que la peau (30 à 33°C), la sensation de froid est d'autant plus importante que la température de l'air ambiant est faible. Pour une vitesse de 3,6km/h (1m/s), la baisse de température ressentie est de 4°C pour une température ambiante de 10°C, mais n'est que de 1°C pour une température ambiante de 30°C.

Les mouvements de l'air sont dus souvent aux défauts d'étanchéité des bâtiments, aux systèmes de ventilation, et à des différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur : vent, combustion par cheminée à bois...La sensation de courant d'air apparaît à partir de 0,15m/s en hiver et de 0,25m/s en été [21].

#### **1.4. Infiltrations et renouvellement d'air**

L'air extérieur s'introduit dans une maison par ventilation (effet volontaire) ou par infiltration (effet involontaire). Il doit alors être chauffé ou refroidi pour être porté à la température intérieure de confort.

#### 1.4.1. La ventilation

La ventilation assure le renouvellement sanitaire (apport d'air frais, évacuation des odeurs, etc.) nécessaire à la bonne santé de l'occupant. Il existe deux types de ventilation [20] :

- Naturelle
- Mécanique

Elle peut être assurée

- soit naturellement via des orifices d'amenée d'air frais et de rejet d'air vicié,
- soit mécaniquement, par des bouches de pulsion et d'extraction.

Le taux de renouvellement nécessaire, varie principalement avec le nombre d'occupants, la hauteur sous plafond, Le type du local et le nombre des fumeurs. Quoique la dilution des odeurs corporelles soit suffisante avec un débit d'air extérieur de 8.5 m<sup>3</sup>/h par personne. Ce minimum correspond à une hauteur sous plafond de 2.4 m et à une densité d'occupation telle que l'on ait en moyenne 1 occupant par 4.6 à 7 m<sup>2</sup> de surface de plancher. Si la densité d'occupation est plus grande, Ce minimum doit être augmenté [21]

#### 1.4.2. Les infiltrations

**Les infiltrations** d'air dans un bâtiment sont dues à des différences de pression engendrées soit par le vent, soit par l'écart entre les températures intérieure et extérieure, et sont rendues possibles par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe.

L'air extérieur introduit dans le bâtiment doit être porté à la température intérieure de confort, que ce soit par réchauffement (en saison de chauffe) ou par rafraîchissement (en été).

Les déperditions thermiques dues à la mise en température de l'air extérieur sont donc proportionnelles [20] :

- au volume d'air réchauffé ou rafraîchi

- au taux de renouvellement d'air  $n$  (nombre de fois que le volume d'air est renouvelé par de l'air frais par heure, mesuré en  $h^{-1}$ )
- à la chaleur spécifique de l'air

### 1.5 Energie interne (inertie thermique)

C'est la capacité d'un matériau à accumuler puis à restituer un flux thermique

La capacité thermique dépend de trois paramètres propres à chaque matériau, à savoir :

- La conductivité thermique
- la chaleur spécifique
- la masse volumique.

Rôles de l'inertie dans une habitation

- atténuer les variations de température du système
- Stocker la chaleur
- Température intérieure moins dépendante de la température extérieure
- Améliorer le confort d'hiver et d'été
- Optimiser l'utilisation des apports solaires et internes

Une forte inertie permet d'atténuer les variations de température. En hiver, les calories apportées par les apports solaires sont stockées dans les murs et sont restituées la nuit. Cette restitution de chaleur cumulée avec les apports solaires apportés par les vitrages permet de réduire les consommations de chauffage . En été, en se protégeant des apports solaires, une forte inertie permet de garder une température intérieure convenable en restituant la fraîcheur nocturne durant la journée. Il est cependant important de bien ventiler la nuit pour déstocker les calories accumulées dans la journée (figure 1.23).

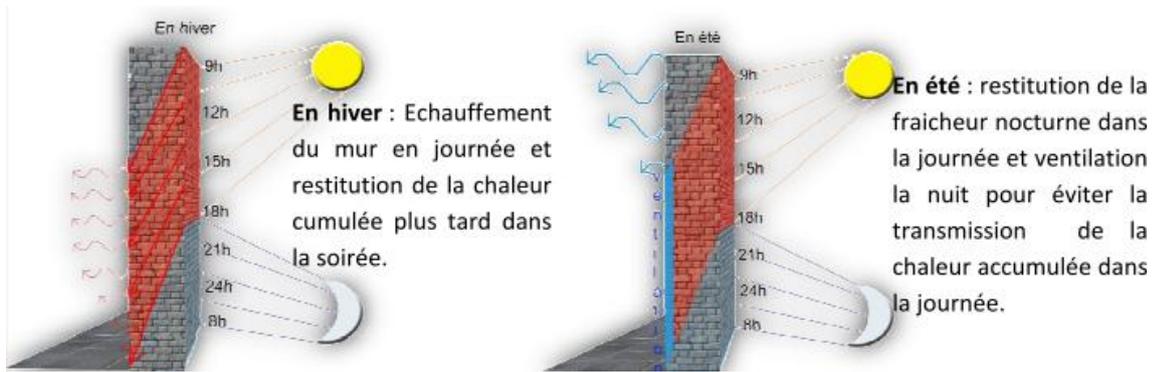


Fig. (1.23) Accumulation de chaleur et redistribution avec déphasage temporel

Pour bien utiliser l'inertie d'un bâtiment, il faut considérer la vitesse de repense des matériaux pour transmettre une variation de température, traduite *diffusivité thermique*. En effet, l'inertie permet de tempérer les amplitudes journalières de températures intérieures face aux variations de températures extérieures, Ce qui est générateur de confort et d'économie pour les locaux chauffés en permanence [22].

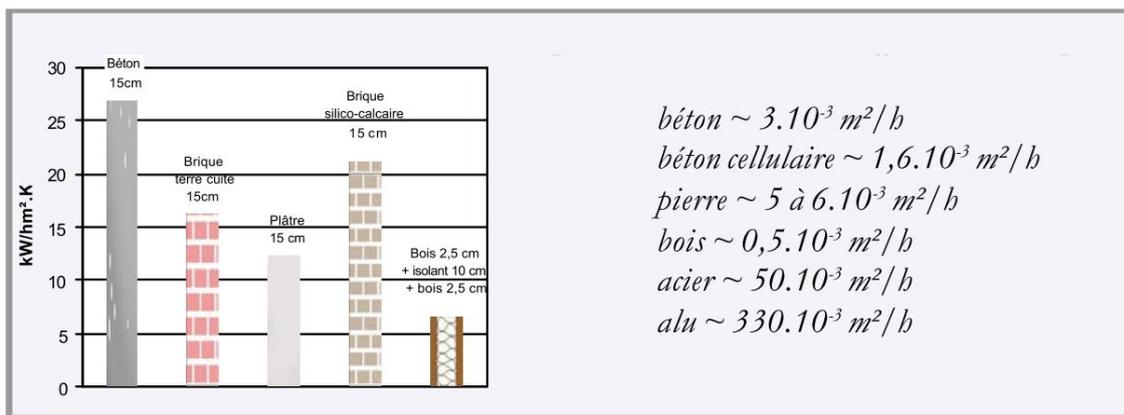


Fig. (1.24) quelques ordre de grandeur de diffusivité thermique

L'effusivité thermique caractérise la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Plus elle est grande et plus le matériau absorbe rapidement les apports de chaleur (internes ou solaire) sans que la température du local s'élève notablement.

Dans un climat tempéré à froid, les revêtements à effusivité faible sont plus appréciés (bois par exemple).

C'est l'inverse dans un climat chaud, où les revêtements à effusivité forte sont préférés (grès, faïence,...).

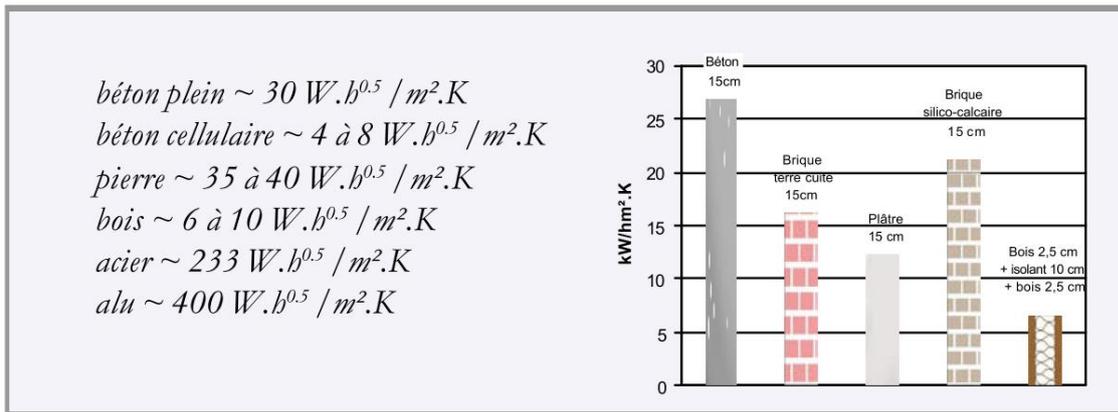


Fig. (1.25) quelques ordres de grandeur de l'effusivité thermique

## 1.6 Surfaces sélectives

Depuis plusieurs années, d'importants travaux ont été publiés au cours de conférences portant sur l'utilisation de l'énergie solaire, particulièrement celle de TUCSON (Etat Unis), GIER et DUNKEL (Etats Unis) et TABOR (Israël) [23] ont présenté d'importants résultats de recherche sur la possibilité d'obtenir, par traitement électrolytique et chimique de surfaces sélectives ayant un très bon rendement. Elles possèdent de très grandes capacités d'absorption du spectre solaire, par contre, elles émettent très peu au niveau des infrarouges. La plupart des surfaces sélectives traitées en y étalant des couches d'oxydes de cuivre dont le rapport absorption / émission se situe entre 8 et 9. La conception d'obtention des surfaces sélectives, consiste d'après TABOR, à absorber l'énergie solaire entre 0.3 et 2.3  $\mu\text{m}$  et à mettre très peu au niveau des infrarouges.

Il y a des cas où on a tendance à évacuer une certaine énergie au lieu de l'absorber. Prenant l'exemple au sud dans la saison d'été, alors c'est intéressant de faire évacuer le maximum d'énergie dans la nuit là où la température ambiante est élevée la nuit. Alors ici il est très recommandé d'utiliser ce genre de surface qu'on appelle sélectifs froids qui ont le rôle d'évacuer le maximum d'énergie et d'absorber le minimum pour les certaines longueurs d'onde.

Les revêtements pour obtenir des surfaces sélectives sont classés en fonction de leurs propriétés thermo-optiques et donc de leurs températures d'équilibre. Quelques exemples de ces revêtements, et de leurs principales propriétés sont résumés dans le tableau 1.8

Les Réflecteurs Solaires (RS), appartiennent à la catégorie des revêtements froids. Comme pour les SSM (Second Surface Mirrors) ou les OSR (Optical Solar Reflectors), le rapport de leurs propriétés thermo-optiques  $\alpha/\epsilon$  doit être le plus faible possible.

Tableau 1.7 : Propriétés des différents revêtements de contrôle thermique [24].

Type de revêtement	$\alpha$	$\epsilon$	$\alpha/\epsilon$	Température
<b>Froid</b> ( $\alpha/\epsilon < 1$ ) Ex : peintures blanches, réflecteurs solaires	< 0,2	0.8	0.25	<b>-75°C</b>
<b>Moyen</b> ( $\alpha/\epsilon \sim 1$ ) Ex : peintures aluminium	0.3	0.3	1	<b>6°C</b>
<b>Chaud</b> ( $\alpha/\epsilon > 1$ ) Ex : peintures noires	0.97	0.97	1.08	<b>12°C</b>
<b>Très chaud</b> ( $\alpha/\epsilon > 4$ ) Ex : dorures	0.3	0.03	10	<b>223°C</b>

Le tableau 1.9 permet de constater la sélectivité de nombreux matériaux ou peintures, tout en fournissant la réflectivité  $\rho = 1 - \alpha$  afin de juger de leur nature plus ou moins réfléchissante [25].

Matériaux et peintures	Courtes LO - RS		Grandes LO - RIR	
	$a_{RS}$	$r_{RS} = 1 - a_{RS}$	$a_{RIR} = a_{RIR}$	$a_{RIR} = 1 - a_{RIR}$
Aluminium brillant	0,05	0,95	0,05	0,95
Aluminium oxydé	0,15	0,85	0,12	0,88
Acier galvanisé neuf	0,65	0,35	0,20	0,80
enduit de chaux neuf	0,12	0,88	0,90	0,10
peinture à l'huile blanche	0,20	0,80	0,90	0,10
peinture à l'huile gris clair	0,40	0,60	0,90	0,10
peinture à l'huile gris foncé	0,70	0,30	0,90	0,10
peinture à l'huile vert clair	0,40	0,60	0,90	0,10
peinture à l'huile vert foncé	0,70	0,30	0,90	0,10

Tableau 1.8 sélectivité de quelques matériaux et peintures

## 1.7. Température ambiante

La température est un état instable dont les variations au voisinage de l'environnement humain dépendent du rayonnement solaire, du vent, de l'altitude et de la nature du sol [28].

- Modèle de Hakem et al [29]

La température ambiante est une variable aléatoire. Son influence sur les performances des systèmes thermiques solaires est importante.

La température ambiante est une variable externe au système étudié. Pour montrer son caractère aléatoire, une distribution sur une journée durant une année est tracée, (figure 1.26.a). On remarque que la répartition est non uniforme et n'obéit à aucune loi mathématique simple.

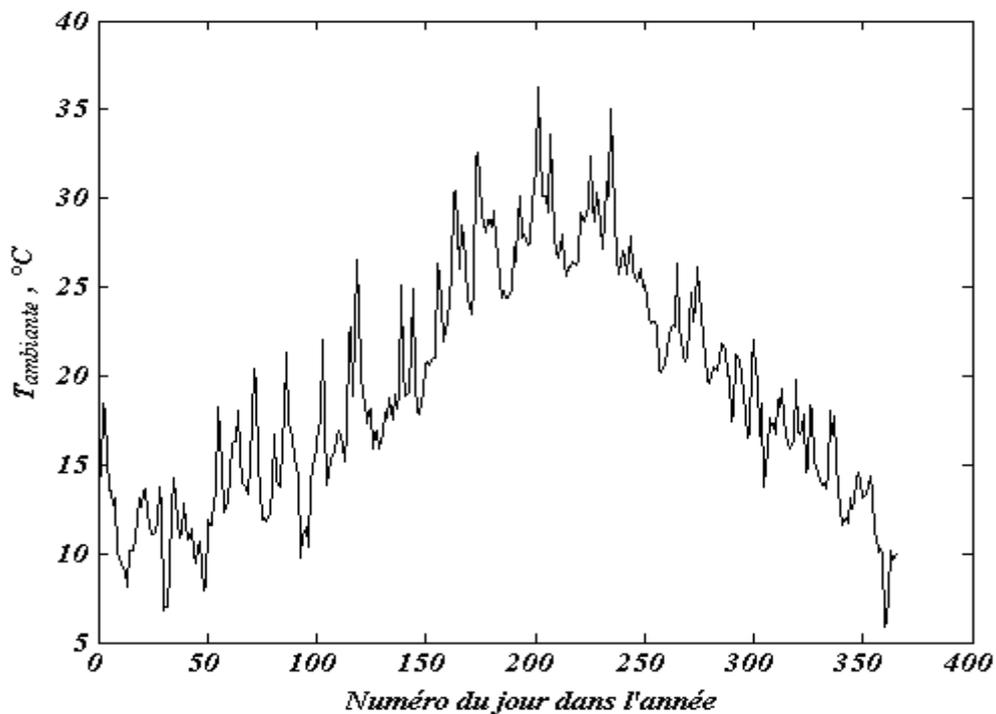
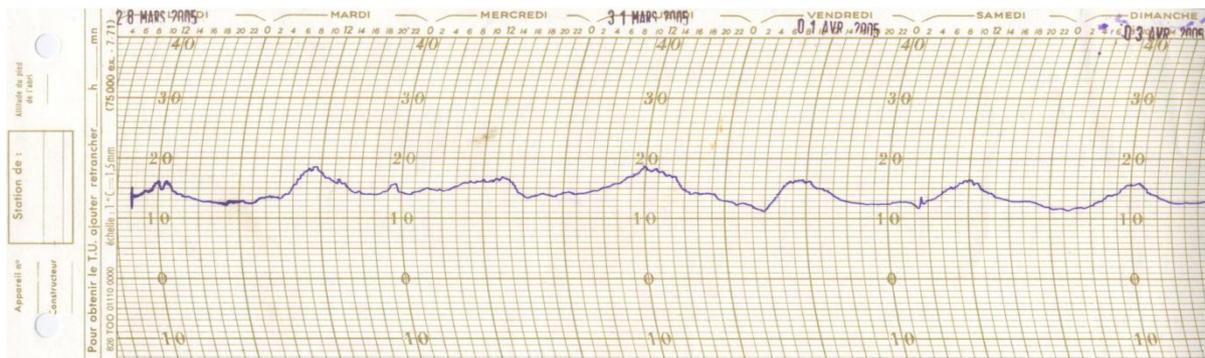


Figure 1.26.a : Variation de la température

Journalière moyenne au cours de l'année 2005 à Bouzareah.

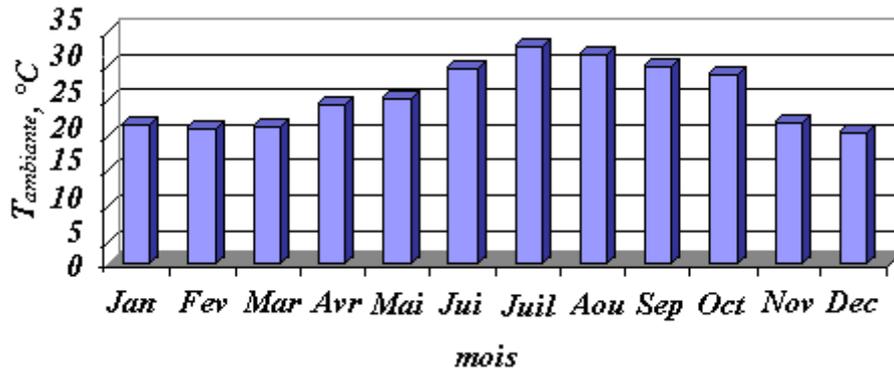
En figure (1.16.b) est montré le caractère aléatoire de la distribution de la température ambiante enregistrée pendant la semaine allant du 28 mars au 03 avril 2006 sur le site de Bouzareah.



*Figure 1.26.b : Enregistrement de la température ambiante*

*Du 28 mars au 03 avril, sur le site de Bouzareah.*

En faisant la moyenne mensuelle, pour la journée type de cette répartition (figure 1.26.b), on remarque que la distribution obéit à une loi périodique que l'on peut approcher par une loi sinusoïdale.



*Figure .1.27 : Température ambiante moyenne enregistrée*

*à Bouzareah durant l'année 2007.*

Partant des remarques faites sur les deux figures 1.26a, 1.26b et 1.27, Hakem et al proposent un modèle permettant la reconstitution de la température ambiante à l'échelle du jour. En figure 3.8a est représenté l'évolution prévisible de la température ambiante suivant le jour. Les données sont divisées en deux parties distinctes et modélisée par deux fonctions, le point d'inflexion se situe au niveau de l'heure correspondant à la température moyenne.

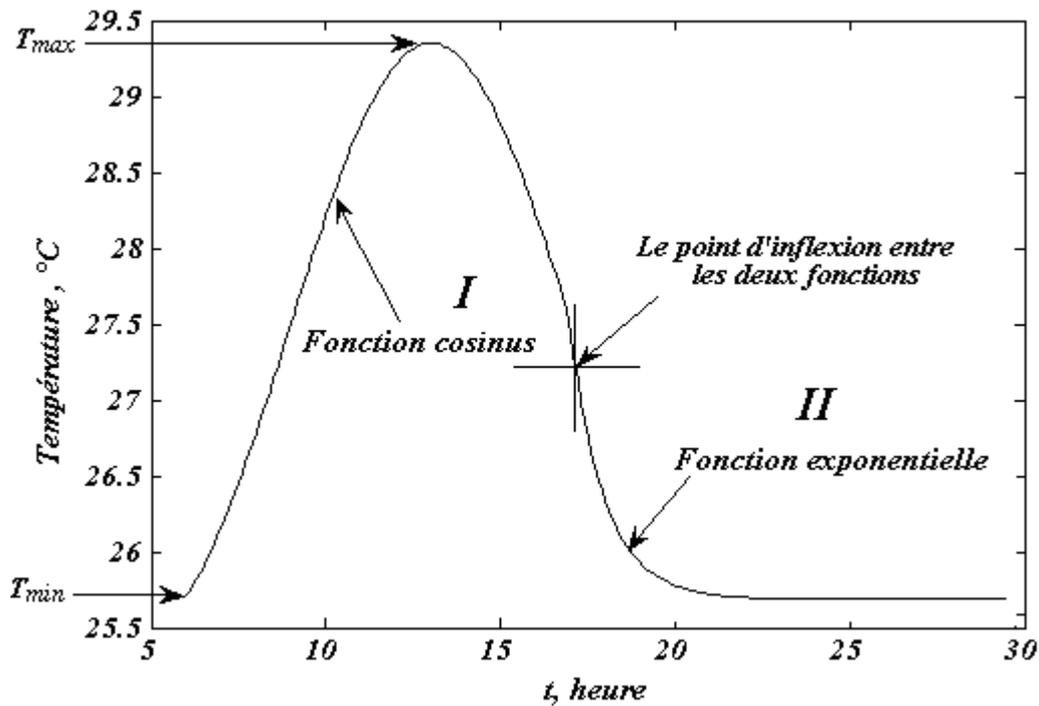


Figure 1.28 : Modélisation de la température ambiante par deux fonctions.

- Une première fonction cosinus (partie I, figure 3.9) pour l'intervalle de temps compris entre 6h et 18h, sous la forme:

$$T_a(t) = a \cos(p_1 t + p_2)$$

(1.16)

Où  $a$ ,  $p_1$  et  $p_2$  sont respectivement, l'amplitude, la période et la phase.

Les coefficients,  $p_1$  et  $p_2$  et  $a$  sont estimés en utilisant la méthode non linéaire des moindres carrés.

- Une deuxième partie est ajustée par fonction exponentielle pour l'intervalle de temps allant de 18h à 06h du matin, qui s'écrit :

$$T(t) = C \left( 1 - \exp \left( - \left( \frac{t_0 - t(i)}{b} \right) \right) \right)$$

(1.17)

$t_0$  : temps initial, correspondant au point d'inflexion.

- Modèle de SAADAOUI [30]

L'évolution théorique de la température à l'entrée de l'insolateur, qui est la température ambiante de l'air, est rapporté par [28] :

$$T(j, t) = \frac{T_{max}(m) + T_{min}(m)}{2} + \frac{T_{max}(m) - T_{min}}{2} * \sin\left(\pi \frac{t - 1}{12}\right) \quad (1.18)$$

- Model de LAZZARIN

La courbe de la température en fonction du temps est constituée de deux parties :

- Une partie croissante ayant pour équation [31] [32]:

$$T = f(t) \\ T = \frac{\bar{T}_{max} + \bar{T}_{min}}{2} - \frac{\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min}}{2} \cos\left[\frac{\pi(t - t_{01})}{t_{max} - t_{01}}\right] \quad (1.19)$$

- Une partie décroissante ayant pour équation :

$$T = g(t) \\ T = T_2 + (\bar{T}_{max} - T_2) \cos\left[\frac{\pi(t - t_{max})}{t_{03} - t_{max}}\right] \quad (1.20)$$

Avec :

$$T_2 = \bar{T} \frac{24}{t_{03} - t_{max}} - \frac{\bar{T}_{max} + \bar{T}_{min}}{2} \frac{t_{max} - t_{01}}{t_{03} - t_{max}} \quad (1.21)$$

Les températures correspondant respectivement à la température journalière moyenne, maximale, minimale, toutes trois représentant les moyennes mensuelles établies à partir de séries statistiques. Ces données figurent dans les relevés météorologiques ONM [DATA]

$t_{01}$  correspond au lever du soleil pour le jour ( j ).

$t_{max}$  correspond à l'heure la plus chaud de la journée (en générale on considère que c'est 14 H).

$t_{02}$  correspond au coucher du soleil pour le jour ( j ).

$t_{03}$  correspond au lever du soleil pour le jour ( j+1 ).

- Modèle de Howell J.R. et al [34]

Howell propose de modéliser la température ambiante par :

$$T_a = \bar{T}_a + \Delta T_a \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{12} \cdot [TL - (TL_{0L} + 3/2)] \right\} \quad (1.22)$$

Avec  $\bar{T}_a = \frac{T_{a.max} + T_{a.min}}{2}$   $\Delta T_a = \frac{T_{a.max} - T_{a.min}}{2}$

Où  $T_{a.min}$  et  $T_{a.max}$  représentent les températures ambiantes maximale et minimale au cours d'une journée, avec TL le temps légal en heures.

## 1.8 Température Ciel

La température de ciel, qui caractérise les échanges radiatifs entre un capteur

(Face de la cellule) et son environnement n'est pas mesurée. Cette température est essentiellement fonction de la température de l'air extérieur et de son humidité. Pour l'évaluer il existe plusieurs corrélations qui donnent la température du ciel [9]

- Corrélation de Berhadl – Fromberg [35]

$$T_{ci} = T_a (0.741 + 0.0062 P_v)^{0.25} \quad (1.23)$$

Elle donne la température de ciel en fonction de la température ambiante et de la pression de vapeur d'eau  $P_v$  (mbar), en l'absence de toute nébulosité

En 1932, Brunt a proposé une relation entre la température du ciel et la pression de vapeur d'eau.

- Rapporté par Labeled A et al [36]

$$T_c = T_a - 12 \quad (1.24) \text{ pour pays continentaux}$$

- Rapporté par Bouchekima. B et al [37]

$$T_c = T_a - 6 \quad (1.25) \text{ pour l'Europe climat tempéré}$$

- Corrélation de Swinbank 1963

Swinbank propose :

$$T_c = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (1.26)$$

par la relation suivante **Eiker [38]** propose :

$$T_c = 0.037536 \cdot T_a^{1.5} + 0.32 \cdot T_a \quad (1.27)$$

$T_c$  : Température ciel

$T_a$  : Température ambiante

- Corrélation d'Ursula Eiker [38]

L'auteur propose l'estimation de la température du ciel en fonction du point de rosée, soit :

$$T_c = T_a \left( 0.8 + \frac{T_r - 273}{250} \right)^{0.25} \quad (1.28)$$

- Corrélation de Swinbank 1983 évoquée par Bot

L'auteur propose :

$$T_{sky} = (T_{ae} - 6) \frac{Nub}{8} + 0.05 T_{ae}^{1.5} \left( 1 - \frac{Nub}{8} \right) \quad (1.29)$$

Avec  $T_{ae}$  est la température de l'air extérieur à la serre et  $Nub$  est la nébulosité du ciel

## 1.9 Température au sol

Un bilan d'énergie entre surface sol – air permet d'écrire [39 41]:

$$H + \lambda E = Q^* - G^* \quad (1.30)$$

avec

$H$  : Flux échangé par chaleur sensible,  $W/m^2$

$\lambda E$  : Flux échangé par chaleur latente,  $W/m^2$

$G$  : Flux échangé par convection,  $W/m^2$

$Q^*$  : Echange radiatif net,  $W/m^2$

L'échange de chaleur par convection est fonction du bilan radiatif  $Q^*$  et peut être exprimé par :

$$G = C_G Q^* \quad (1.31)$$

Expression dans laquelle  $C_G$  représente le rapport entre le flux de chaleur émis par le sol et l'échange radiatif net. Ce coefficient dépend de la nature du sol et varie peu pour un sol défini. Il est approximé à 0.1 pour les étendues vides de toute construction, [39].

Un bilan radiatif sur la surface du sol, permet d'écrire :

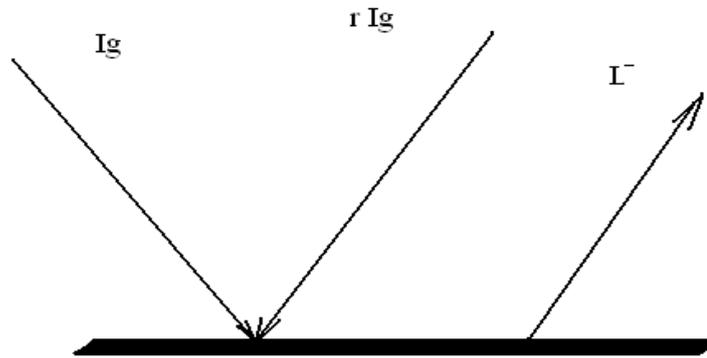


Figure 1.29 : Echange radiatif au sol-environnement.

$$Q^* = (1 - r)I_g - L^- \quad (1.32)$$

avec :

$r$  : albédo

$L^-$  : Rayonnement infrarouge émis par le sol, dans les grandes longueurs d'ondes,  $W/m^2$

$I_g$  : Eclairement global incident,  $W/m^2$ .

Après décomposition de l'éclairement incident et estimation des différentes composantes, il vient :

$$Q^* = \frac{0.558(1 - r)I_{g,mesuré} + C_1 T^6 - \sigma T^4 + C_2 Nb}{1 + C_3} \quad (1.33)$$

Par ailleurs, pour un terrain sec et nu, le flux de chaleur latente est nul, car il n'y a pas d'évaporation d'eau, d'où :

$$H = (1 - C_G)Q^* \quad (1.34)$$

$$H = (1 - C_G) \frac{0.558(1 - r)I_{g,mesuré} + C_1 T^6 - \sigma T^4 + C_2 Nb}{1 + C_3} \quad (1.35)$$

Les différentes constantes sont données par Holstag, [40] et dépendent de la nature du terrain.

- Modèle d'EL HAROUI M., A MASLOUHI [41]

Le transfert de chaleur est modélisé par l'approche monodimensionnelle de Wagnet et Hutson., 1989[40].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\lambda(\theta) \partial T}{\rho_h C_p \partial t} \right) \quad (1.36)$$

Avec  $T$  : Température au sol

$\lambda(\theta)$  : Conductivité thermique [ $J L^{-1} T^{-1} ^\circ C^{-1}$ ]

$\rho_h$  : est la masse volumique en état humide [ $M L^{-3}$ ]

$C_p$  : représente la chaleur spécifique ou la capacité thermique massique du sol  $J^{-1}M^{-1} ^\circ C^{-1}$

La résolution de l'équation (1.36) nécessite en premier lieu la connaissance des propriétés thermiques du sol étudié.

On suppose que les variations horaires de la température à la surface du sol sont sinusoïdales:

$$T(0, t) = T_a + \gamma \sin\left(\frac{2\pi t}{p}\right) \quad (1.37)$$

Où  $T_a$  est la température moyenne horaire à la surface du sol ( $^\circ C$ ),  $\gamma$  l'amplitude de la température à la surface du sol qui représente généralement l'écart entre les températures moyenne et extrême ( $^\circ C$ ),  $p$  est la période d'un cycle complet et  $t$  le temps. La fréquence radiale est définie par le rapport  $(2\pi/p)$ .

## 1.10. La convection due au vent

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton [43]

$$Q = h * (T_p - T_f) \quad (1.38)$$

Où :

Q : Flux échangé

h : Coefficient d'échange

T<sub>p</sub> : Température parois.

T<sub>f</sub> : Température du fluide

De nombreux travaux expérimentaux ont permis d'établir différentes expressions donnant le coefficient d'échange convectif dû au vent :

- Mac Adams 1954[8] a rapporté l'équation de Jurjes

$$h = 5.7 + (3.8 * V) \quad (1.39)$$

Selon John A. Duffie, William A. Beckman [8] il est probable que cette relation (1.39) inclut l'effet de la convection et du rayonnement, et n'est applicable que pour les surfaces de 0.5m<sup>2</sup>.

- A cet effet Watmuff et al 1977 [44] proposent :

$$h = 2.8 + (3.0 * V) \quad (1.40)$$

- Relation d'Ursula Eiker [38]

Ursula Eiker propose :

$$h = 4.214 + (3.575 * V) \quad (1.41)$$

## 1.11 Maisons Bioclimatiques

Les maisons bioclimatiques relèvent d'un concept architectural qui exploite au mieux les possibilités offertes par le climat.

L'habitat bioclimatique désigne un bâtiment dans lequel l'architecte profite au maximum des apports solaires, de l'orientation du bâtiment, des éléments architecturaux ou végétaux (ombrage, limitation des réflexions...etc.), dans le but de réduire les besoins en chauffage et en climatisation [45].

Les principes fondamentaux de l'architecture bioclimatique sont de capter, diffuser et conserver la chaleur en hiver « stratégie du chaud » et de protéger, minimiser les apports dissipés d'énergie en été « stratégie du froid ».

On peut citer encore :

- Les maisons basses énergie
- Les maisons zéro énergie
- Les maisons à énergie positive

Parmi les techniques solaires actives on a les systèmes à base de panneaux solaires photovoltaïques peuvent fournir de l'électricité durable pour des usages multiples. Les toits sont souvent inclinés selon le soleil pour permettre aux panneaux photovoltaïques un meilleur rendement, et certains bâtiments se tournent même durant la journée en fonction du soleil. Le *Samundra Institute of Maritime Studies* (SIMS) de Lonavala à côté de Pune en Inde possède le plus long mur photovoltaïque du monde, faisant plus de quatre-vingt-dix mètres de long [46]. Des éoliens domestiques (des turbines normales font souvent plus de 75 mètres) ont peut-être connu une trop grande publicité au regard de leurs capacités attendues parfois décevantes, surtout dans les foyers nord-américains [47]. Une autre technique solaire active, le système de chauffe-eau solaire, est une manière durable de procurer à long terme de l'énergie de chauffe spécifique. Il arrive que des maisons utilisant une combinaison de ces méthodes atteignent le but enviable du « zéro énergie », et parfois même en produisent tellement qu'elles peuvent l'exporter vers d'autres bâtiments [46].

#### 1.11.1 Le principe de l'éco quartier [48]

Confrontés aux extensions urbaines, aux problèmes de logement et d'environnement, l'éco-quartier apparaît comme un moyen de réduire l'impact sur l'environnement et favoriser la mixité sociale

Il permet de :

- réduire les consommations énergétiques.
- Favoriser l'utilisation de transports doux (transports en commun, vélo, marche à pied).
- Intégrer toutes les catégories de population et faisant participer les citoyens à la vie du quartier,

- Diminuer les consommations d'eau : les eaux pluviales sont récupérées et utilisées pour arroser les espaces verts, nettoyer la voie publique ou alimenter les WC.
- Respecter les critères de la Haute Qualité Environnementale.
- Favoriser l'utilisation de matériaux locaux et écologiques pour la construction.
- Limiter la production des déchets.
- Favoriser la biodiversité.

Dans un éco-quartier, les habitants sont généralement très impliqués et fidèles aux principes du développement durable.

#### 1.11.2 Quelques éco-quartiers d'Europe [48]

- *Le quartier Vauban à Fribourg Allemagne)*

Site : ancienne caserne de l'armée française.

Superficie : 38 hectares.

Nombre de logements : 2 800 programmés à terme.

- *BedZED à Beddington (Royaume-Uni)*

Site : ancienne friche industrielle.

Superficie : 6 hectares

Nombre de logements : 85

- *L'éco-quartier de Malmö (Suède)*

Site : ancienne friche industrielle

Superficie : 32 hectares

Nombre de logements : 3 000 (appartements et maisons individuelles)

Après un demi siècle d'indépendance, l'Algérie est confronté au problème de la crise de logement suite à la croissance démographique intense. La réponse à la forte demande était la quantité au détriment de la qualité. Des considérations économiques ont orienté le choix des modèles d'habitat importés en matériaux à bon marché, mais peu appropriés thermiquement.

### **1.10.3 La première maison bioclimatique sera rurale**

1<sup>ère</sup> maison (village solaire EPAU dans les années 80) a Boussaâda

Le prototype, conçu et réalisé par le Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (Cnerib) en collaboration avec le CDER (Centre de développement des énergies renouvelables) a été sélectionné dans le cadre d'un concours lancé par le programme MED-ENEC (Mediterranean Energy Efficiency in Construction Structure) en 2006.

La surconsommation de l'énergie fossile accentuant les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre (GES) mais également le fait que le bâtiment soit le premier poste de consommation de l'énergie + 40% du bilan énergétique annuel est consommé par ce secteur. Cette consommation, qui a triplé durant les trois dernières décennies dans le bassin méditerranéen et il est prévu sa multiplication par le même facteur d'ici l'an 2025, a impulsé chez les chercheurs, algériens cette fois, l'idée de repenser la maison de demain. Le deal étant de concrétiser via matériaux et équipements "durables" l'efficacité énergétique dans le secteur de la construction. Cette première expérience concerne dans un premier temps la maison rurale qui se verra conférer un nouveau concept, celui de l'habitat durable intégrant l'architecture bioclimatique dans sa conception [49].

Des impératifs tant technologiques qu'environnementaux

Pour rappel, en 2000, il y a donc de cela douze ans, le décret 2000/90 du 24.04.2000 portant réglementation thermique des bâtiments neufs était censé être appliqué immédiatement pour les bâtiments publics, contre 5 ans pour la construction individuelle. Rien n'en fût ! Alors que déjà bien plus tôt, soit en 1997 et 1999 – ce qui aurait dû faire avancer les choses – le Cnerib avait élaboré deux DTR (documents techniques réglementaires) y afférents. Il y est question d'atteindre l'efficacité énergétique via la maintenance du niveau de confort situé d'après l'OMS (Organisation mondiale de la santé) entre 18°C et 25°C . "Ce qui se résume, en des termes plus simples, à la recherche de la sobriété contre le gaspillage", souligne M. Afra.

"Comment faire pour gérer les apports et les déperditions calorifiques tout en privilégiant le confort ?" et "quelles doivent être les caractéristiques mécaniques et chimiques du matériau de construction ?" ont, en outre, constitué la problématique de base du projet. En effet, la maison durable se devait de répondre à des impératifs

tant technologiques qu'environnementaux par l'application des mesures passives, d'une part, et des mesures actives, d'autre part. Pour ce qui est des premières, il s'agit de l'orientation (le sud est privilégié pour limiter au maximum la facture énergétique), l'ombrage naturel (par les plantations), la ventilation naturelle, l'isolation de l'enveloppe, le double vitrage (qui divise par deux à trois, le flux de chaleur), l'éclairage naturel et les lampes à basse consommation (elles réduisent de 5 fois la consommation en énergie) et l'isolation optimale de l'enveloppe et de la toiture.

La brique de terre, la pierre, le gypse... des matériaux à valoriser

Pour ce qui est des matériaux, si celui en vogue dans les pays européens est le bois, pour ses qualités d'isolant thermique, en Algérie, ce sont les matériaux locaux tels que la brique de terre ou béton de terre stabilisé (BTS) et la pierre – les deux ne nécessitent pas d'énergie lors de leur extraction et fabrication puisque le plus souvent extraites de l'assiette en question – mais également le plâtre et le gypse qui sont privilégiés dans les pays de la rive sud. Le responsable du Cnerib estime que ces matériaux sont à valoriser et à développer davantage. La brique de terre, matériau de base de la maison durable, doit être utilisée dans un système constructif à base de maçonnerie porteuse chaînée – qui consomme moins d'eau, moins de sable et moins de rond à béton – par rapport à sa ductilité. "Ce système peut aller jusqu'au R+2 en zone III (zone sismique) avec une performance parasismique certaine – les poteaux ont une section de 15x15 contre 35x35 pour le système poteau poutre classique. Le chaînage n'est, par ailleurs, pas indispensable pour les régions du Sud !" précise notre interlocuteur. Les mesures actives concernent, en outre, le recours aux panneaux solaires (utilisation de l'énergie solaire) pour l'eau chaude sanitaire. Un serpentin est encastré dans le plancher de la maison pour la chauffer en hiver. Toutefois, le système s'inverse pour la rafraîchir en été. Intégrées dans le bâtiment, ces mesures permettent de réduire jusqu'à 50% la consommation énergétique, de préserver l'énergie fossile et d'atténuer les émissions de CO<sub>2</sub>. Quand on sait que celui-ci est aujourd'hui coté en Bourse ! Et si la maison durable requiert près de 10% d'investissement supplémentaire, il faut savoir que la facture énergétique est amortie sur les 10 ans à venir. La maison verte s'harmonise parfaitement avec son environnement. C'est ce que doit être conclu à la livraison en

décembre prochain de la première habitation écologique algérienne. Gageons qu'elle intéressera plus d'un [49].

#### **1.11.4 Algérie : Un projet-pilote de 600 logements bioclimatiques**

Le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme a déclaré un lancement d'un projet-pilote de 600 logements bioclimatiques à haute performance énergétiques (HPE), repartis sur 11 wilayas de l'Algérie en fonction des zones climatiques

Pas moins de 11 OPGI sélectionnés sont impliqués en tant que maîtres d'ouvrage de réalisation de ces logements de HPE. Ce programme est réparti, entre autres, à travers les wilayas de Tamanrasset (30 logements), Laghouat (32), Sétif (54), Alger (50), Blida (80) et Djelfa (80). « Nous avons procédé à la rédaction de cahiers de charges avec les OPGI concernés en mettant en avant de nouvelles normes spécifiques indiquées en économie d'énergie dans le bâtiment », a-t-elle ajouté.

« LE SOLEIL N'ENVOIE PAS DE FACTURE » Les OPGI concernés sont avertis de la nature des matériaux nécessaires et l'orientation des façades des bâtiments pour réduire soit le froid, soit la chaleur en fonction des saisons. « Le soleil n'envoie pas de facture », selon le slogan consacré dans le secteur des énergies renouvelables. Les OPGI sont tenus, dit Mme Aït Mesbah, de construire selon ces nouvelles recommandations, qui portent sur l'isolation thermique [50].

Mme Ouidif Lila, chef du département bâtiment à l'époque auprès de l'APRUE, a insisté, quant à elle, sur les enjeux du programme national de la maîtrise de l'énergie (PNME) face aux changements climatiques et l'insécurité économique. Le recours excessif au chauffage et à la climatisation est une réalité qui ne manquera d'influer négativement sur l'économie nationale, si des mesures adéquates ne sont pas prises d'ici là. « Il y a recours excessif au chauffage et à la climatisation car le développement de l'architecture n'est pas adapté au climat du pays », a-t-elle indiqué. Elle a dévoilé, dans ce cadre, les grandes lignes du PNME portant notamment sur la réduction de la consommation de l'énergie dans les foyers et les différents secteurs d'activité.

On parle aussi du :

PROGRAMME TRIENNAL D'EFFICACITE ENERGETIQUE « 2011-2013 »

Le programme triennal d'efficacité énergétique « 2011-2013 » est extrait du programme national des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique adopté par le Conseil des ministres en février 2011 [51].

*Le programme d'efficacité énergétique obéit à la volonté de l'Algérie de favoriser une utilisation plus responsable de l'énergie et d'explorer toutes les voies pour préserver les ressources et systématiser la consommation utile et optimale.*

*Ce programme concernera les volets suivants :*

- *L'isolation thermique des bâtiments;*
- *Le développement du chauffe-eau solaire ;*
- *La généralisation de l'utilisation des lampes basse consommation,*
- *L'introduction de l'efficacité énergétique dans l'éclairage public;*
- *L'aide à l'introduction de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et les établissements grands consommateurs d'énergie, par la réalisation d'audits et l'aide aux projets d'économie d'énergie;*
- *L'augmentation de la part de marché du GPLC et la promotion du GNC ;*
- *La conversion au cycle combiné des centrales électriques quand cela est possible ;*
- *La réalisation de projets pilotes de climatisation au solaire.*

*L'APRUE est chargée de réaliser le programme d'efficacité énergétique.*

- Isolation thermique des bâtiments
- Généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie
- Introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public
- Promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel
- Promotion du GPL/c
- Promotion du GN/c
- Introduction des principales techniques de climatisation solaire

### **1.12. Position du problème**

Le climat est un facteur très important à cause de son influence sur le confort thermique de l'être humain. Le problème dans les régions semi aride est l'évacuation de la chaleur accumulée pendant la journée en été et la garde en hiver. L'étude du comportement thermique d'une cellule habitable et analysé la distribution de la température à l'intérieure de la cellule nous permet de trouver un moyen pour amortir les écarts de températures et de réduire les apports en équipant la toiture de la cellule d'une surface sélective.

### **1.14. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une synthèse des différents travaux de recherche ayant une relation directe avec le sujet, ainsi les différents travaux proposés dans la littérature pour la modélisation de l'éclairement solaire et les températures, ciel sol et ambiante, l'étude a été affinée en orientant la recherche vers les modèles applicables dans le cas de l'Algérie. Nous nous sommes intéressés aussi à la notion de confort thermique et les différents paramètres qui entrent en jeu, les infiltrations. Nous avons terminé le chapitre en présentant le cas de l'Algérie vis-à-vis l'énergie renouvelable et les maisons bioclimatiques et les programmes ministériels.

# *Chapitre 2*

## **MODELISATION**

## 2.1 Introduction

Pour étudier le comportement thermique d'une cellule, Nous devons analyser les phénomènes physique qui régissent le système.

Ce chapitre sera consacré à l'élaboration des différents bilan thermique au niveau de la toiture et des murs et a la résolution des équations régissent le système en régime permanent et en régime transitoire. L'analyse des résultats permettra de déterminer les profils des températures et de voir l'impacte des différent changement pour bien maintenir des conditions de confort thermique acceptable.

## 2.2 Hypothèses

- Nous considérons que la température est uniforme dans la parois.
- Les caractéristiques des matériaux sont constantes et indépendantes de la température et des conditions métrologique.
- La voûte céleste est assimilée a un corps noir.
- La température du ciel est uniforme.
- Les matériaux sont homogènes.
- Les propriété des matériaux, conductivité, masse volumique, chaleur spécifique sont constantes.
- Le Flux de chaleur est unidimensionnelle.
- Le flux solaire est uniforme.
- Le rayonnement Diffus est isotrope.
- l'échange radiatif entre les parois est négligé devant les échanges convectifs et les infiltrations
- On considère que le plancher est adiabatique.

## 2.3 Bilan thermique en régime permanent

Notre système est régi par l'équation de conservation de l'énergie, Nous considérons l'équation qui décrit les échanges dans la cellule :

$$\text{div}(K \overrightarrow{\text{grad}} T) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

En développant l'équation (2.1) on aura

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

En tenant compte des hypothèse évoqué précédemment, le flux est unidirectionnel

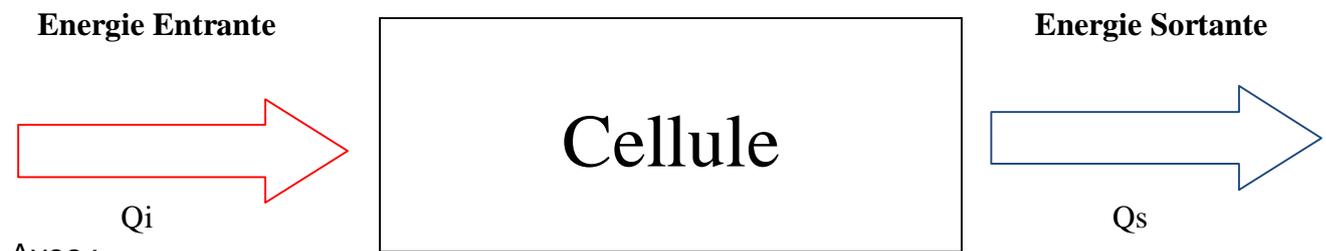
$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cong 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cong 0$$

Alors on écrit

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2.3)$$

En régime permanent la somme des échange thermique de la cellule est égale a zéro, pas de stockage d'énergie ce qui nous permet d'écrire :

$$\Sigma Q_i + \Sigma Q_s = 0 \quad (2.4)$$



Avec :

Qi : énergie entrante

Qs : énergie sortant

Le bilan thermique sur une paroi permet d'écrire :

Apports solaires = quantité de chaleur transmise vers la cellule + quantité perdu

Soit :

$$\alpha \cdot I_g \cdot A_+ = Q_p + Q_t \quad (2.5)$$

Avec :

$\alpha$  : Absorptivité,

$I_g$  : Eclairement solaire global incident,

A : Surface d'échange.

$Q_t$  : Quantité transmise vers l'intérieure par conduction convection et rayonnement.

$Q_p$  : Quantité renvoyé vers l'ambiance par convection et rayonnement

L'étude sera faite sur une cellule qui comporte 04 Murs et une toiture et un plancher avec une porte et un fenêtre.

### 2.3.1 Paramètres thermique

Le coefficient d'échange interne englobe les échanges radiatifs convectifs (convection naturelle) il est estimé en considérons les données du DTU[54] :

La résistance due a la convection interne dans un local est :  $R= 0.17$ .

Le même document donne la résistance externe  $R=0.05$ .

La résistance de la lame d'air  $R=0.20$ .

- Coefficient global de transmission de chaleur est donnée par :

$$\frac{1}{K} = R_i + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + [h_{ext}^{-1} + h_{ray}^{-1}]^{-1} \quad (2.6)$$

Avec :

$R_i$  : Résistance de convection interne  $R_i = \frac{1}{h_{int}}$

$h_{ext}$  : Coefficient de transmission par convection externe

$h_{ray}$  : Coefficient de transmission radiatif

$e_i$  Epaisseur en (m)

$\lambda_i$  Conductivité thermique (w/m.K)

## 2.4 Echange Radiatifs

### 2.4.1 Eclairage solaire

L'éclairage solaire reçu sur un plan incliné dépend de l'angle d'incidence lui-même fonction des angles permettant de repérer la position du soleil en un point de la terre et à un moment de l'année, tel que représenté en figure (2.1).

Pour un plan incliné l'angle d'incidence  $\theta$ , s'exprime alors par la relation suivante [8] :

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.7)$$

$\beta$  : L'inclinaison du plan.

$\gamma$  : L'orientation

$\delta$  : étant la déclinaison du soleil donnée par :

$$\delta = 23.45 \sin[(284 + nj) 360/365] \quad (2.8)$$

Avec :

$nj$  : Numéros du jour dans l'année.

$\varphi$  : Latitude du lieu.

$\omega$  : L'angle horaire est donné par :

$$\omega = (TSV - 12) * 15 \quad (2.9)$$

Avec

TSV : temps solaire vrai.

La hauteur du soleil s'exprime en fonction de l'angle horaire, la déclinaison et la latitude du lieu, elle est donnée par :

$$\sin h = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (2.10)$$

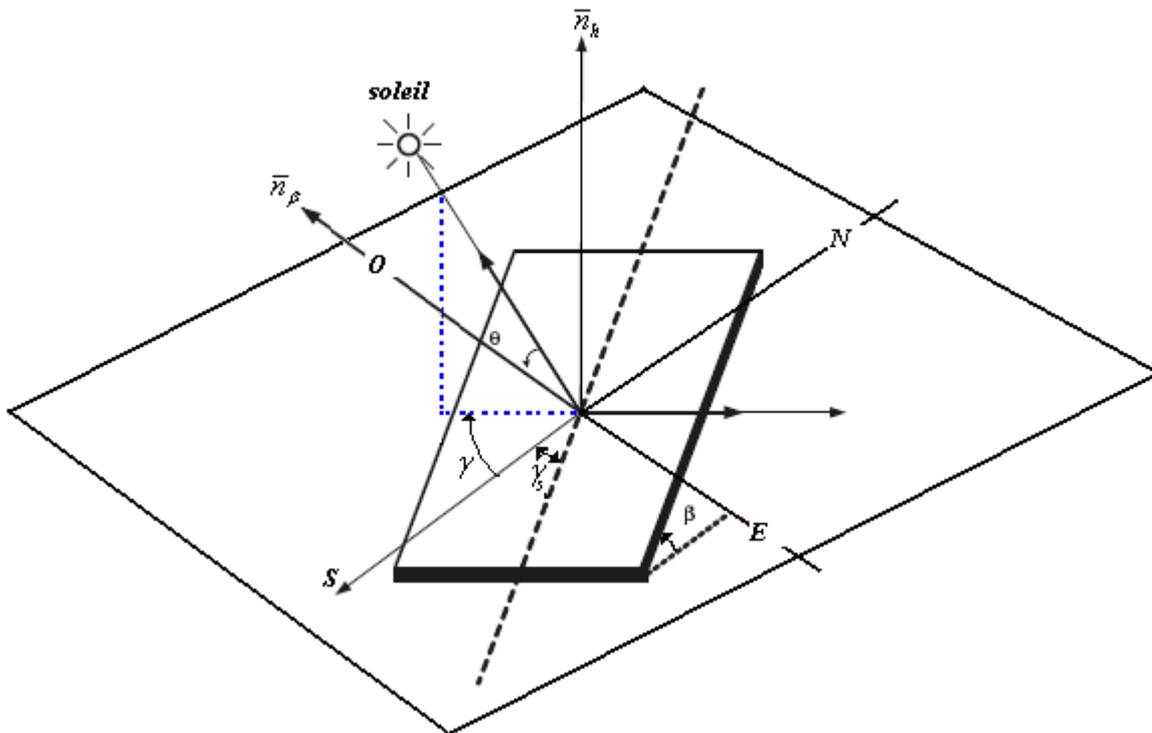


Figure 2.1 : Visualisation des angles de repérage du soleil par rapport à un plan incliné

Avec

$\bar{n}_h$  : Normale au plan horizontal.

$\bar{n}_\beta$  : Normale au plan incliné.

$\beta$  : Angle d'inclinaison du capteur.

$\gamma_s$  : Déviation azimutale.

$\gamma$  : Azimut du soleil.

$\theta$  : Angle d'incidence formé par la normale  $\bar{n}_\beta$  au plan du capteur et la direction du rayon incident.

$\theta_n$  : Angle d'incidence formé par la normale au plan horizontale et le rayon incident.

Les heures du lever et du coucher du soleil sont obtenues en faisant  $h=0$ , dans l'équation (2.10), d'où :

$$\cos \omega_s = -tg\varphi * tg\delta \quad (2.11)$$

Hors atmosphère, l'éclairement solaire global, reçu sur un plan normal aux rayons solaires, est égal à la constante solaire que multiplie un facteur représentant la correction de la distance terre-soleil [8], soit :

$$I_0 = I_{cs}[1 + 0.033 \cos(360 nj/365)] \quad (2.12)$$

$I_{cs}$  : Constante solaire égale à 1367 W/m<sup>2</sup> selon les dernières estimations de l'OMM [53]

$nj$  : Numéro du jour dans l'année.

– Modèle de Perrin de Brichambaut

Perrin de Brichambaut propose [12] :

$$I_b = A \sin h \exp\{-[C \sin (h + 2)]^{-1}\} \quad (2.13)$$

$$I_d = B(\sin h)^{0.4} \quad (2.14)$$

Pour l'éclairement directe et le diffus, respectivement.

Les coefficients A, B, C, D et E dépendent de la qualité du ciel (voire tableau 2.1)

Ciel	A W/m <sup>2</sup>	B W/m <sup>2</sup>	C	D W/m <sup>2</sup>	E
Très pur	1300	87	6	1150	1.15
Moyen	1230	125	4	1080	1.22
pollué	1200	187	2.5	990	1.25

Tab 2.1 Coefficients données par Perrin de Brichambaut

D'après Capderou [13] la relation donnant le meilleur résultat pour l'Algérie s'écrit :

$$I_g = 1080[1 + 0.033 \cos (360Nj/365)] \sin h [\sin h/(0.89)^z]^{0.22} \quad (2.15)$$

Avec

Z : altitude du lieu, exprimée en Km.

- En tenant compte de l'hypothèse évoqué précédemment que le rayonnement est isotrope l'éclairement reçu sur un plan incliné est donné par :

$$G = R_b I_b + [(1 + \cos \beta)/2] I_d + \rho [(1 - \cos \beta)/2] I_g \quad (2.16)$$

$R_b = \frac{\cos \theta}{\sin h}$  : Coefficient de conversion géométrique

$\theta$  : Angle d'incidence formé par la direction des rayons solaires et la normale au capteur

$\beta$  : Angle d'inclinaison du capteur, par rapport à l'horizontale

$\rho$  : Albédo.

$\frac{1 + \cos \beta}{2}$  : Facteur de forme plan – ciel

$\frac{1 - \cos \beta}{2}$  : Facteur de forme plan – sol

L'éclairement directe est déduit par différence, soit :

$$I_b = I_g - I_d \quad (2.17)$$

### 2.4.3 Echange radiatif

Il est généralement, impossible de mesurer pour un local donné, aussi bien les gains maximaux que les gains dans des conditions intermédiaires, on ne peut qu'estimer, et c'est pour permettre cette estimation que nous avons essayé d'utiliser la méthode américaine CLTD (d'après ASHRAE handbook fondamental 1977). Pour pouvoir estimer les gains de chaleur avec une précision suffisante, il est indispensable de connaître tous les éléments qui auront une influence sur le bilan, ainsi que les coefficients utilisés par cette méthode.

- Gains calorifiques internes (charges internes)

Cette charge représente la quantité de chaleur dégagée dans le local par l'ensemble des sources internes (occupants, éclairage....)

#### 2.a Chaleur dégagée par les occupants $Q_p$

Les corps humains dégagent constamment de la chaleur avec des quantités variables suivant leur activité. Cette chaleur comporte la chaleur sensible et la chaleur latente. L'évaluation de cette chaleur se fait par les formules suivantes :

- Chaleur sensible  $Q_{p(s)}$

$$Q_{p(s)} = N_p \cdot CLF \cdot SHG \quad (2.18)$$

Avec

$N_p$  : nombre de personnes.

CLF : Facteur d'amortissement qui dépend de la durée d'occupation

SHG : Gain en chaleur sensible par personne

- Chaleur latente  $Q_{p(L)}$

$$Q_{p(L)} = N_p \cdot LHG \quad (2.19)$$

LHG : Gain en chaleur latente par personne

### 2.b Chaleur dégagée par l'éclairage $Q_{ec}$

Les appareils d'éclairage constituent une source de chaleur sensible qui dépend de la puissance absorbée et du type de la somme lumineuse.

Leur calcul s'effectue suivant la formule :

$$Q_{ec} = P \cdot CLF \cdot S \quad (2.20)$$

Avec

P : puissance de l'éclairage

CLF : facteur d'amortissement.

S : surface planché [m<sup>2</sup>]

### 2.c Chaleur dégagée par les machines $Q_{ma}$

Lorsqu'une machine travaille, l'énergie utilisée est partiellement importante transformée en chaleur. En général, On connaît uniquement la puissance du moteur, portée sur la plaque et on doit estimer la chaleur dégagée par la machine et du rendement de celui-ci. Ainsi le gain de chaleur dû aux machines est :

$$Q_{ma} = P \cdot (1 - z) \quad (2.21)$$

Avec

$Q_{ma}$  : Gain de chaleur du a la machine en

P : Puissance de la machine

Z : Rendement de la machine.

## 2.5 Echanges convectifs

En fait, dans notre environnement quotidien, les manifestations de la convection libre sont plus que présente que les effets de la convection forcée, même si elles ne sont pas toujours perceptibles par nos sens.

Dans notre cas on est en présence des deux types de convection, à savoir

- Intérieure : Convection naturelle
- Extérieure : Convection mixte (convection naturel et convection due au vent)

Vu la direction et la vitesse du vent qui change instantanément d'une manière aléatoire, les modèles présents dans la littérature ne s'appliquent pas pour la convection externe du fait de la variation aléatoire du vent. Donc on est amené à utiliser les modèles expérimental recommandé par le DTU [54], qui donne la résistance du a la convection externe.

## 2.6 Conductance

- Conductivité à travers les murs (ou toiture)

La figure 2.3 présente les différents échanges thermique à travers une paroi composée de différents matériaux a des différentes épaisseurs et différentes conductivité :

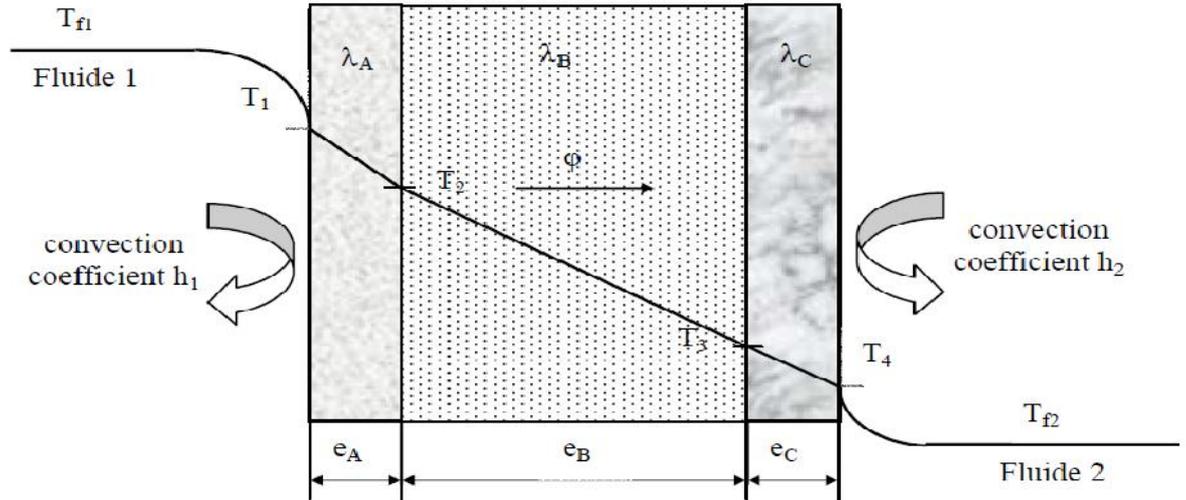


Fig. 2.2 Echange thermique à travers une paroi

le flux de chaleur se conserve lors de la traversée de la paroi et s'écrit :

$$\varphi = h_1 s (T_{f1} - T_1) = \frac{\lambda_A s (T_1 - T_2)}{e_A} = \frac{\lambda_B s (T_2 - T_3)}{e_B} = \frac{\lambda_C s (T_3 - T_4)}{e_C} = h_2 s (T_4 - T_{f2}) \quad (2.22)$$

Nous avons considéré que les contacts entre les couches de différentes natures étaient parfaits et qu'il n'existait pas de discontinuité de température aux interfaces. En réalité, compte-tenu de la rugosité des surfaces, une micro - couche d'air existe entre les creux des surfaces en regard et crée une résistance thermique R (l'air est un isolant) appelée résistance thermique de contact. La formule précédente s'écrit alors :

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 s} + \frac{e_A}{\lambda_A s} + R_{AB} + \frac{e_B}{\lambda_B s} + R_{BC} + \frac{e_C}{\lambda_C s} + \frac{1}{h_2 s}} \quad (2.23)$$

e : épaisseur du composant

$\lambda$  : Conductivité

La résistance totale s'écrit :

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 s} + \frac{e_A}{\lambda_A s} + R_{AB} + \frac{e_B}{\lambda_B s} + R_{BC} + \frac{e_C}{\lambda_C s} + \frac{1}{h_2 s} \quad (2.24)$$

Et on aura la conductance totale  $U_{tot}$

$$U_{tot} = 1/R_{tot} = \left[ \frac{1}{h_1 s} + \frac{e_A}{\lambda_A s} + R_{AB} + \frac{e_B}{\lambda_B s} + R_{BC} + \frac{e_C}{\lambda_C s} + \frac{1}{h_2 s} \right]^{-1} \quad (2.25)$$

$R_{tot}$  : résistance total au niveau d'un paroi.

## 2.7 Les infiltrations

Le débit d'air d'infiltration est fonction de la vitesse du vent, du degré d'étanchéité des portes et des fenêtres et de leur degré d'utilisation

L'apport par chaleur sensible est donné par :

$$Q = 0.29 \cdot q_{air} \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (2.26)$$

L'apport par chaleur latente est donné par :

$$Q = 0.71 \cdot q_{air} \cdot (W_{ext} - W_{int}) \quad (2.27)$$

Avec :

$q_{air}$  Débit d'air ( $m^3/h$ )

Pour une vitesse de vent de 12km/h, les infiltration estimé sont tel que représenté dans le tableau 2.2 [55]

- Infiltration par les portes

Type	$m^3/h$ par $m^2$ de surface		$m^3/h$	
	Non utilisé	Utilisation moyenne	Constamment ouverte	
			Pas de vestibule	Avec vestibule
Porte en bois (2.1x0.9m)	18	119	1190	850
Porte en verre	82	183	1190	850

Tab 2.2 Infiltration a travers les portes

- Infiltration par les fenêtres

Type	$m^3/h$ par $m^2$ de surface			$m^3/h$		
	Petits 75x150 cm			Grande 140x245 cm		
	Sans bourrelet d'étanchéité	Avec bourrelet d'étanchéité	Double fenêtre	Sans bourrelet d'étanchéité	Avec bourrelet d'étanchéité	Double fenêtre
Encadrement bois moyen	7.8	4.8	4	5	3.1	2.6
Encadrement bois mal ajusté	22	6.8	11	14	4.4	7
Encadrement métallique	14.8	6.4	7.3	9.3	4	4.6

Tab 2.3 Infiltration a travers les fenêtres

## 2.8 Régime transitoire

Avec les hypothèses précédentes, la distribution de la température est donnée par l'équation de FOURIER, a savoir :

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_p}{\partial t} = 0 \quad (2.28)$$

Avec  $\alpha = \lambda/\rho C_p$  la diffusivité thermique

### A. Conditions initiales

Les conditions initiales correspondent au temps  $t_0$ , à savoir le temps du lever du jour, le moment où on considère que les températures sont uniforme et sont égale a la température initiale.

### B. Conditions au limites

Au niveau de chaque parois on a :

A  $x=0$  : on à des échanges convectifs et radiatifs

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha \cdot I_g - U_e (T_{pe} - T_a) \quad (2.29)$$

A  $x=L$  : On à échange convectif interne

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_i (T_{pi} - T_i) \quad (2.30)$$

### - Bilan thermique sur l'air interne

A l'intérieure de la cellule la somme des échanges convectif entre les différentes parois plus les infiltrations a travers la porte et la fenêtre sont égale aux terme de stockage de la cellule ce qui permet décrire :

$$\sum h_i (T_{pi} - T_i) + \sum m \cdot C_p (T_i - T_a) = M \cdot C_p \frac{dT_i}{dt} \quad (2.31)$$

Avec :

$h_i$  : coefficient de convection interne

$T_{pi}$  : Température de parois interne

$T_i$  : Température interne de la cellule

$T_a$  : Température ambiante.

$m$  : Masse d'aire

M : masse de la cellule (sommées des différentes masses des composants de la cellule)

Cp : chaleur spécifique.

- Bilan thermique global sur la cellule

Un bilan thermique sur la cellule permet d'écrire :

$$\alpha \cdot I - U_e(T_{pe} - T_a) = M \cdot C_p \frac{dT_m}{dt} + h_i(T_{pi} - T_i) \quad (2.32)$$

Avec

$\alpha$  : Absorptivité de la paroi.

I : Eclairement solaire.

Ue : conductance externe (résultante des échanges externes : rayonnement parois-sol parois-ciel et convection externe).

M : masse de la cellule (sommées des différentes masses des composants de la cellule)

Cp : chaleur spécifique.

## **2.9 Variation temporelle de la température ambiante**

La température ambiante est une variable aléatoire. Son influence sur les performances des systèmes thermiques solaires est importante.

L'évolution de la température au cours d'une journée est divisée en deux parties une partie croissante et une partie décroissante.

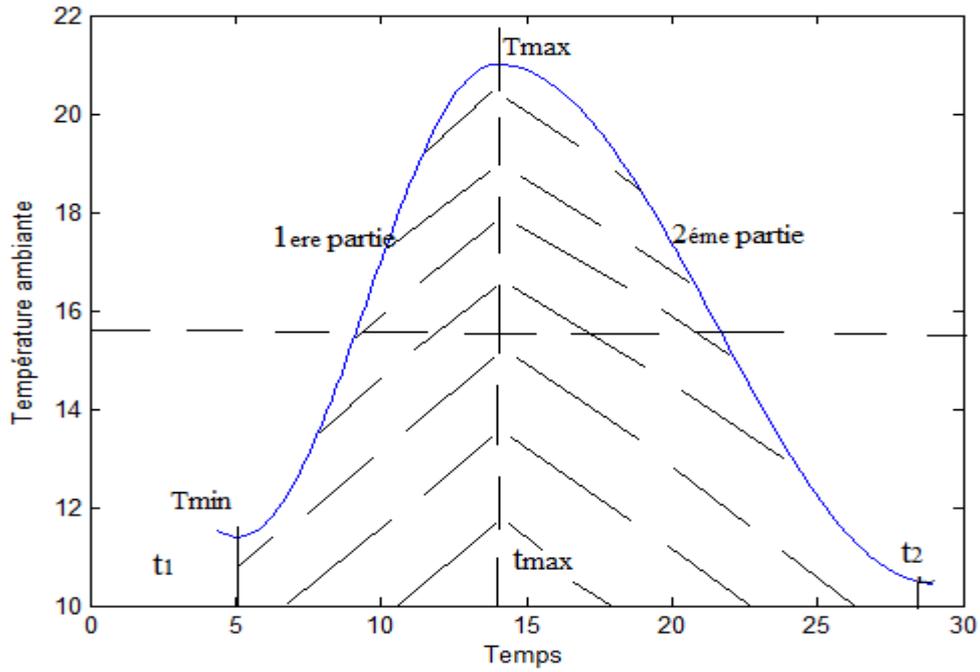


Fig. (2.3) Profil de température ambiante pour la journée du 15 mai 2005

1/ partie croissante:

On peut modéliser cette partie de la courbe par, [56]

$$T = a + b \cos \pi \frac{t - t_1}{t_M - t_1} \quad (2.33)$$

Avec les conditions aux limites :

$$\text{A } t = t_1 \quad \Rightarrow T = a + b = T_m \quad (1)$$

$$t = t_M \quad \Rightarrow T = a - b = T_M \quad (2)$$

$$(1) + (2) \text{ donne : } 2a = T_M + T_m$$

$$(1) - (2) \text{ donne : } 2b = T_m - T_M$$

la partie décroissante (2ème partie) peut être modélisé par :

$$T = a_2 + b_2 \cos \omega \frac{t - t_M}{t_2 - t_M} \quad (2.34)$$

$$\text{Alors } t = t_M \quad \Rightarrow T = a_2 + b_2 = T_M$$

$$t = t_2 \Rightarrow T = a_2 + b_2 \cos \omega = T_m \Rightarrow \omega = \arccos\left(\frac{T_m - a_2}{b_2}\right)$$

$$a_2 = 24 \frac{\bar{T}}{t_2 - t_M} - \frac{T_M + T_m}{2} \frac{t_M - t_1}{t_2 - t_M}$$

$$b_2 = T_M - a_2 = T_M - 24 \frac{\bar{T}}{t_2 - t_M} - \frac{T_M + T_m}{2} \frac{t_M - t_1}{t_2 - t_M}$$

On remplace la valeur de  $a_2$  et  $b_2$  dans (2.34), on aura

$$T = 24 \frac{\bar{T}}{t_2 - t_M} - \frac{T_M + T_m}{2} \frac{t_M - t_1}{t_2 - t_M} + T_M - 24 \frac{\bar{T}}{t_2 - t_M} - \frac{T_M + T_m}{2} \frac{t_M - t_1}{t_2 - t_M} \cos\left(\frac{T_m - a_2}{b_2}\right) \frac{t - t_M}{t_2 - t_M} \quad (2.35)$$

$t_1$  : Correspond au lever du soleil pour le jour (j).

$t_M$  : Correspond à l'heure la plus chaude la journée (en général considéré comme 14H)

$t_2$  : Correspond au lever du soleil pour le jour (j + 1)  $t_2 = t_1 + 24$

La figure 2.4 représente le profile de la température ambiante selon notre modèle

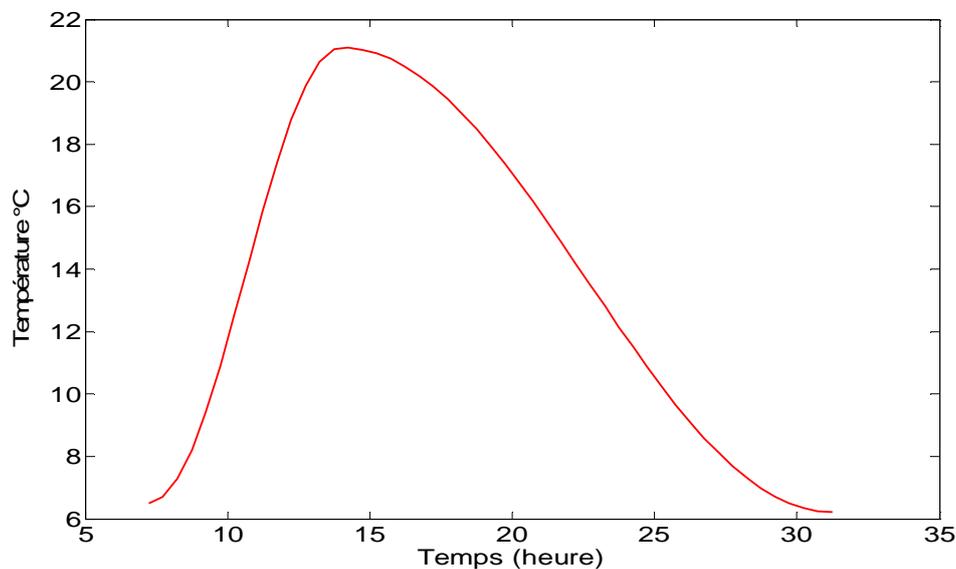


Fig. (2.4) Variation de température selon le Modèle proposé au cours d'une journée

## 2.10 Mises en équations des différents bilans thermique et discrétisation

### 2.10.1 Régime permanent

#### 2.10.1.1 Toiture

La figure 2.5 représente les différents échanges thermique au niveau de la toiture, on présence des échanges convectifs et radiatifs avec l'environnement (rayonnement avec le ciel et un échange conductif au niveau de la toiture et un échange convectif du coté intérieure de la cellule

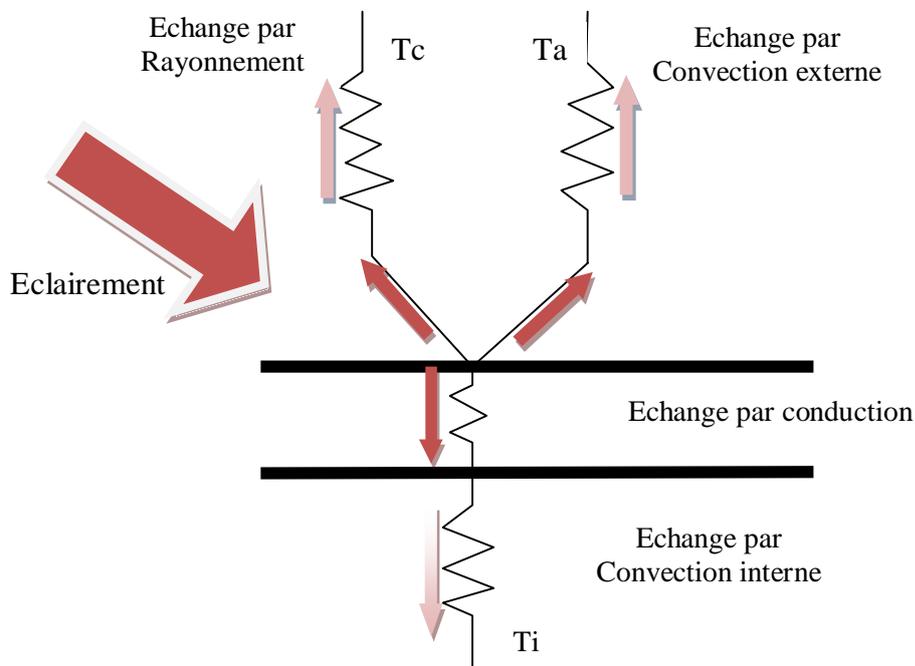


Fig. (2.5) Schéma des différents échanges au niveau de la toiture

Un bilan thermique au niveau de la toiture nous donne :

$$A \cdot \alpha \cdot I_g = A \cdot h_{cve}(T_{pe} - T_a) + A \cdot h_{rc}(T_{pe} - T_c) + A \cdot U_T(T_{pe} - T_{pi}) + A \cdot h_{cvi}(T_{pi} - T_i) \quad (2.36)$$

On exprime **Tc** en fonction **Ta** en utilisant la formule de swimbank

$$A \cdot \alpha \cdot I_g = (h_{cve} + h_{rc} + U_T) \cdot T_{pe} - (h_{cve} + h_{rc}) \cdot T_a - U_T \cdot T_i \quad (2.37)$$

- Résistance des échanges au niveau de la toiture

Le calcul de résistance thermique global au niveau de la toiture est donnée dans le tableau 2.4

COMPOSITION DE LA TOITURE								
Désignation et représentation	N°	Constitution	Epaisseur en (m)	Conductivité $\lambda$ (w/m.K)	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur Spécifique (J/Kg.k)	forme	Résistance (w/K)
$h_{int}$	-	Air intérieur	-	-	1	1000	$1/h_{int}$	0.17
01	01	Bitume	0.06	4	715	1500	$e/\lambda$	0.015
02	02	Isolant	0.05	0.023	130	2300	$e/\lambda$	2.17
03	03	Béton armée Plein	0.05	1.75	2300	2160	$e/\lambda$	0.0286
04	04	Plâtre	0.02	0.57	900	972	$e/\lambda$	0.0351
$h_{ext}$	-	Air extérieur	-	-	1	1000	$1/h_{ext}$	0.05

Tableau 2.4 : résistance thermique au niveau de la toiture

- Echanges radiatifs

- En considérons les parois comme isothermes le flux radiatif échangé par 2 parois est donné par :

$$\phi_{1-2} = A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \cdot F_{1-2} \quad (2.38)$$

$$\phi_{2-1} = A_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 \cdot F_{2-1} \quad (2.39)$$

Le flux net entre les surfaces est donnée par :

$$\phi_{1-2 Net} = A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \cdot F_{1-2} - A_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 \cdot F_{2-1} \quad (2.40)$$

$$\phi_{1-2 Net} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1-2}} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad (2.41)$$

Dans ce cas entre toiture et ciel on aura

$$\phi_{ciel-Toiture} = \frac{A_T \sigma (T_T^4 - T_c^4)}{\frac{1 - \varepsilon_T}{\varepsilon_T} + \frac{1}{F_{T-c}} + \frac{A_T}{A_c} \cdot \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c}} \quad (2.42)$$

Sachant que  $A_c \gg \gg A_T$

Et en assimilant le ciel a un cops noir ( $\varepsilon = 1$ ), il vient :

$$\phi_{T-c} = A_T \cdot h_{rc} \cdot (T_T - T_a) \quad (2.43)$$

Donc  $h_{rc}$  s'écrit :

$$h_{rc} = \frac{\sigma(T_T^2 - T_c^2)(T_T - T_c)}{\frac{1 - \varepsilon_T}{\varepsilon_T} + \frac{1}{F_{T-c}}} \quad (2.44)$$

$h_{rc}$  : Coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la toiture et le ciel

- La résistance thermique a travers la toiture s'écrit :

$$Re_{toit} = \frac{1}{(h_{rc} + h_{cve})} + \frac{1}{U_T} + \frac{1}{h_{cvi}} \quad (2.45)$$

Avec

$h_{cve}$  et  $h_{cvi}$  : Coefficients de convection externe et interne respectivement donnée dans le Document technique réglementaire pour une convection sur un plan horizontal (on donne les résistances) [50]

$U_T$  : Conductance thermique de conduction a travers la toiture

La conductance total des différents échange a travers la toiture s'écrit

$$UT = \frac{1}{Re_{toit}} \quad (2.46)$$

En remplaçons  $U_T$ ,  $h_{rc}$  dans 2.37 on aura l'expression :

$$T_{pe} = \frac{A \cdot \alpha \cdot I_g + (h_e + h_r) \cdot T_a + U_T \cdot T_i}{h_e + h_r + U_T} \quad (2.47)$$

#### 2.10.1.1 Murs

La figure 2.6 représente les échange au niveau du mur, on a présence d'un échange convectif avec l'ambiance, un échange radiatif avec le sol et avec le ciel, un échange conductif a travers le mur et un échange convectif du côté intérieur

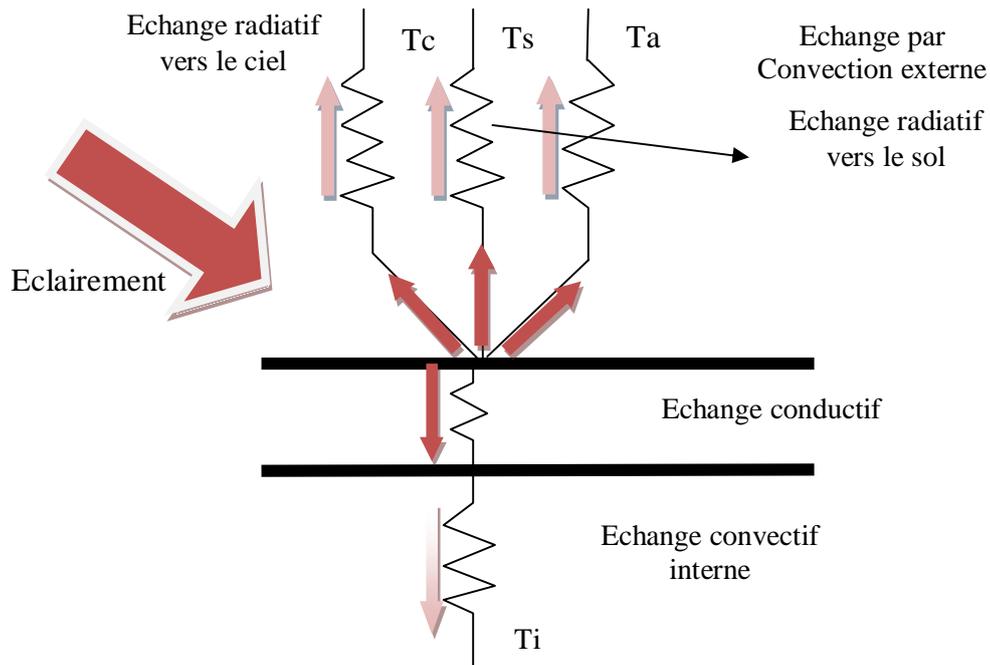


Fig. (2.6) Schéma des différents échanges thermique au niveau du Mur

Un bilan thermique sur un mur permet d'écrire :

$$A \cdot \alpha \cdot I_g = h_e(T_{Mpe} - T_a) + h_{rs}(T_{Mpe} - T_s) + h_{rc}(T_{Mpe} - T_c) + U_T(T_{Mpe} - T_{pi}) + h_i(T_{pi} - T_i) \quad (2.48)$$

- Résistance des échanges au niveau du mur

Le calcul de résistance thermique global au niveau du mur est donnée dans le tableau 2.5

COMPOSITION DES MURS								
Désignation et représentation	N°	Constitution	Epaisseur en (m)	Conductivité $\lambda(w/m.K)$	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur Spécifique (J/Kg.k)	forme	Résistance (w/K)
$h_{int}$	-	Air intérieur	-	-	1	1000	$1/h_{int}$	0.17
01	01	Ciment	0.015	1.4	2300	2160	$e/\lambda$	0.0107
02	02	Lame d'air	-	-	1	1000	$e/\lambda$	0.20
03	03	Brique 1	0.1	0.39	1400	972	$e/\lambda$	0.2546
04	04	Brique 2	0.15	0.39	1400	972	$e/\lambda$	0.3846
05	05	Plâtre	0.02	0.57	900	840	$e/\lambda$	0.0351
$h_{ext}$	-	Air extérieur	-	-	1	1000	$1/h_{ext}$	0.05

Tableau 2.5: résistance thermique au niveau du mur

- Echange radiatif

En considérons les parois comme isothermes on exprime le coefficient de rayonnement s'écrit :

- Mur – ciel :

$$h_{rM-c} = \frac{\sigma(T_M^2 + T_C^2)(T_M + T_C)}{\frac{1 - \varepsilon_M}{\varepsilon_M} + \frac{1}{F_{M-c}}} \quad (2.49)$$

$F_{M-c}$  : Facteur de forme entre mur – ciel

- Mur-sol :

$$h_{rM-s} = \frac{\sigma(T_M^2 + T_S^2)(T_M + T_S)}{\frac{1 - \varepsilon_M}{\varepsilon_M} + \frac{1}{F_{M-s}}} \quad (2.50)$$

- Résistance des échanges au niveau du mur

La résistance thermique à travers un mur est donnée par :

$$Re_{Mur} = \frac{1}{(h_{rc} + h_{rs} + h_{cve})} + \frac{1}{U_T} + \frac{1}{h_{cvi}} \quad (2.51)$$

Avec

$h_{rc}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre mur-ciel

$h_{rs}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre mur-sol

En remplaçons  $U_T$ ,  $h_{rc}$ ,  $h_{rs}$  dans 2.48 on aura l'expression :

$$T_{Mpe} = \frac{A \cdot \alpha \cdot I_g + (h_e + h_{rs} + h_{rc}) \cdot T_a + U_T \cdot T_i}{h_e + h_{rc} + h_{rs} + U_T} \quad (2.52)$$

### 2.10.1.2 Bilan thermique global

Le flux global échangé par la cellule avec son environnement s'écrit :

$$Q_{tot} = \frac{T_e - T_a}{R_{tot}} \quad (2.53)$$

$R_{tot}$  : Résistance globale de la cellule donnée par :

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{toi}} + \frac{1}{R_{Msud}} + \frac{1}{R_{Mnord}} + \frac{1}{R_{Mest}} + \frac{1}{R_{Mouest}} \quad (2.54)$$

Un bilan thermique au niveau de la cellule permet d'écrire

$$\sum U_i (T_{pe_i} - T_i) + \dot{m} \cdot C_p (T_i - T_a) = 0 \quad (2.55)$$

$$\sum U_i \cdot T_{pe_i} - T_i \sum U_i + \dot{m} C_p \cdot T_i - \dot{m} \cdot C_p \cdot T_a = 0 \quad (2.56)$$

En réarrangeant

$$T_i (\dot{m} \cdot C_p - \sum U_i) = \dot{m} \cdot C_p \cdot T_a - \sum U_i \cdot T_{pe_i} \quad (2.57)$$

On aura :

$$T_i = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot T_a - \sum U_i \cdot T_{pe_i}}{\dot{m} \cdot C_p - \sum U_i} \quad (2.58)$$

## 2.10 .2. Régime transitoire

### 2.10 .2.1. Toiture

On a présence d'un échange convectif externe, échange radiatif, un échange conductif et un stockage d'énergie

La figure 2.7 montre les différents changement a travers la toiture en régime transitoire

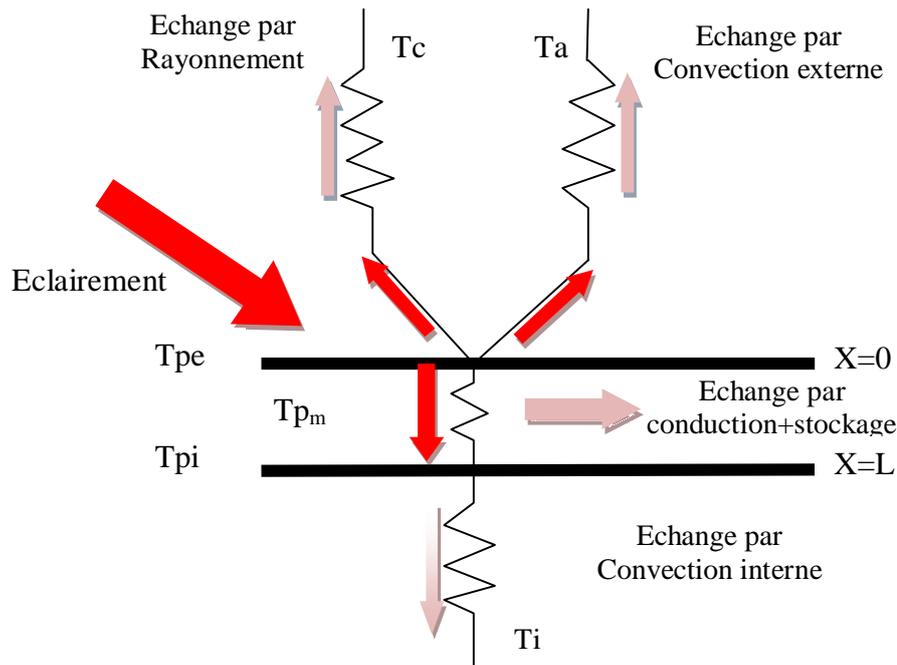


Fig. (2.7) Schéma des différents échanges thermique au niveau de la toiture en régime transitoire

- Bilan thermique sur la toiture

Un bilan thermique sur la toiture permet d'écrire :

$$\alpha \cdot A \cdot I - A \cdot U_{te}(T_{pe} - T_a) = M \cdot C_p \frac{dT_m}{dt} + A \cdot h_i(T_{pi} - T_i) \quad (2.59)$$

Avec :

$C_p$  : Chaleur spécifique

M : masse de la toiture (sommés des différentes masses des composants de la toiture )

$T_m$  : Température du milieu de la toiture ( nœud central )

$U_{me}$  : Conductance des différent échanges externe de la toiture

### 2.9.2.2. Mur

On a présence d'un échange convectif externe, échange radiatif avec le ciel et le sol, un échange conductif et un stockage d'énergie.

La figure 2.8 représente les différents échanges a travers un mur

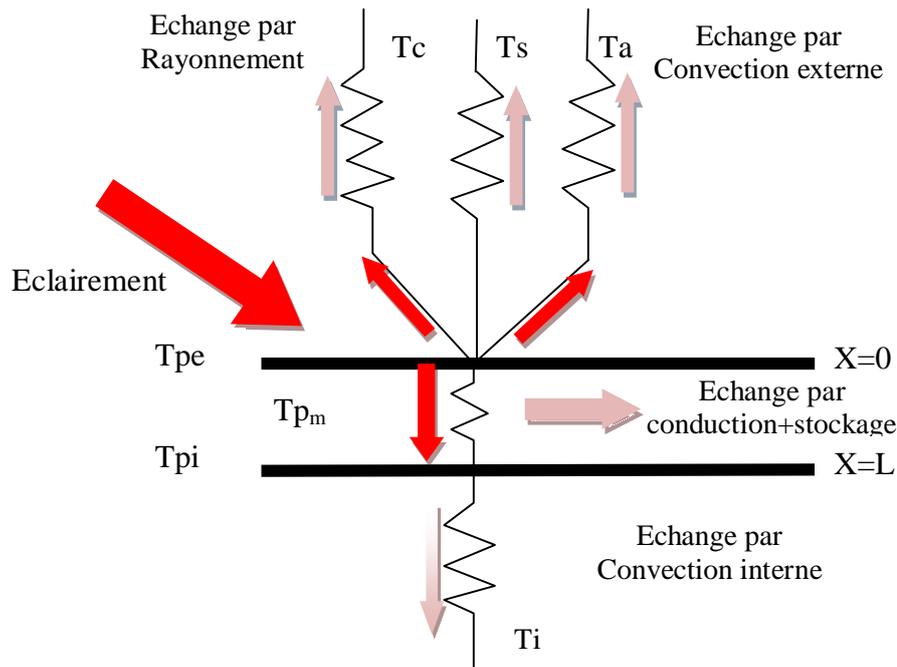


Fig. (2.8) Schéma des différents échanges thermique au niveau du mur en régime transitoire

- Bilan thermique sur un mur

$$\alpha \cdot A \cdot I - A \cdot U_{me}(T_{pe} - T_a) = M \cdot C_p \frac{dT_m}{dt} + A \cdot h_i(T_{pi} - T_i) \quad (2.60)$$

Avec

$U_{me}$  : Conductance des différent échanges externe du mur

- Bilan thermique sur le volume interne de la cellule

A l'intérieure de la cellule l'échange convectif plus les infiltration d'aire a travers la porte et le fenètre est égale au stockage de la cellule, un bilan thermique permet d'écrire :

$$\sum h_i(T_{pi} - T_i) + \sum \dot{m} \cdot C_p(T_i - T_a) = M \cdot C_p \frac{dT_i}{dt} \quad (2.61)$$

Avec

$m$  : débit d'infiltration d'aire.

### 2.10.3 Discrétisation

Au niveau de chaque paroi, en tenant compte de hypothèse quelle est isotherme, la discrétisation du domaine est abordée par un maillage de 3 nœuds ce qui nous donne en tous 17 nœuds dans la cellule.

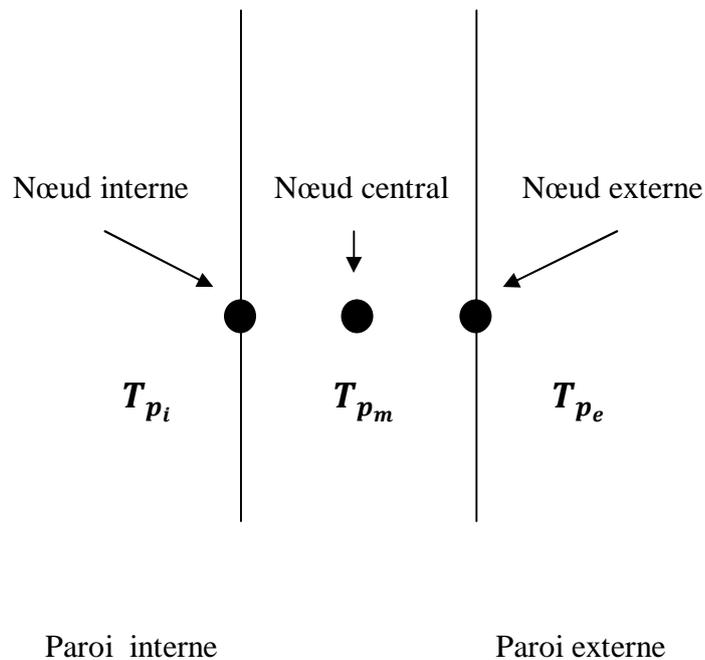


Fig. (2.9) Maillage au niveau d'une paroi

Une discrétisation du seconde ordre de l'équation 2.3 nous donne :

$$\left. \frac{T_{p-1} - 2T_p + T_{p+1}}{\Delta x^2} \right| = \frac{1}{\alpha} \frac{T_p^{t+1} - T_p^t}{\Delta t} \quad (2.62)$$

D'où le système a résoudre pour chaque paroi s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{pe} - 2T_{pm} + T_{pi}}{L^2} \Big|_{j+1} = \frac{\rho \cdot C_p}{k} \frac{T_{Pm}^{j+1} - T_{Pm}^j}{\Delta t} \end{array} \right. \quad (2.64)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot I - U_e (T_{pe} - T_a) \Big|_{j+1} = -k \frac{T_{pm} - T_{pe}}{L/2} \Big|_{j+1} \end{array} \right. \quad (2.65)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h_i (T_{pi} - T_i) \Big|_{j+i} = -k \frac{T_{pi} - T_{pm}}{L/2} \Big|_{j+i} \end{array} \right. \quad (2.66)$$

En réarrangeant le système on écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2k}{L} T_{Pm}^{j+1} - \left( \frac{2k}{L} + U_e \right) T_{pe}^{j+1} = -\alpha I - U_e T_a \end{array} \right. \quad (2.67)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( h_i + \frac{2k}{L} \right) T_{pi}^{j+1} - \frac{2k}{L} T_{Pm}^{j+1} = h_i T_i^j \end{array} \right. \quad (2.68)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{L^2} T_{pe}^{j+1} - \frac{1}{L^2} T_{pi}^{j+1} - \left( \frac{2k}{L^2} + \frac{\rho \cdot C_p}{k \Delta t} \right) T_{Pm}^{j+1} = -\frac{\rho \cdot C_p}{k \Delta t} T_{Pm}^j \end{array} \right. \quad (2.69)$$

On a à résoudre le système de 03 équations à 03 inconnues  $T_{Pm}, T_{pe}, T_{pi}$

#### 2.10.4 Résolution

Comme on ne sais pas résoudre les équation analytiquement, et [A] étant fonction de la température interne, la résolution numérique se fait par itérations successives implicite. Le calcul se fait avec MATLAB en établissant un programme de calcul., initialement les température sont uniforme et sont a la température ambiante.

Soit sous écriture matricielle :

$$[A][T] = [C]$$

$$[T] = [A]^{-1}[C]$$

Où [T] est le vecteur des températures

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{2k}{L} + U_e\right) & -\frac{2k}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{2k}{L} & \left(h_i + \frac{2k}{L}\right) \\ \frac{1}{L^2} & -\left(\frac{2k}{L^2} + \frac{\rho \cdot C_p}{k\Delta t}\right) & -\frac{1}{L^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{Pe} \\ T_{Pm} \\ T_{Pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha I - U_e T_a \\ h_i T_i^j \\ -\frac{\rho \cdot C_p}{k\Delta t} T_{Pm}^j \end{bmatrix}$$

une fois les 3 inconnues déterminé on réécrit le bilan thermique sur l'enceinte interne de la cellule :

$$\sum h_{ij} (T_{Pij} - T_i) + m \cdot C_p (T_a - T_i) + \tau \cdot A \cdot I_g = m_{air} \cdot C_p \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (2.70)$$

Le terme de stockage de l'air  $m_{air} \cdot C_p \frac{\partial T_i}{\partial t}$  est très faible et presque négligeable donc on aura

$$\sum h_{ij} (T_{Pij} - T_i) + m \cdot C_p (T_a - T_i) + \tau \cdot A \cdot I_g = 0 \quad (2.71)$$

On rajoute et on soustraie  $T_a$  On aura

$$\sum h_{ij} (T_{Pij} - T_a) + \sum h_{ij} (T_a - T_i) + m \cdot C_p (T_a - T_i) + \tau \cdot A \cdot I_g = 0 \quad (2.72)$$

$$\sum h_{ij} (T_{Pij} - T_a) + \tau \cdot A \cdot I_g = (T_a - T_i) \cdot \left( \sum h_{ij} + m \cdot C_p \right) \quad (2.73)$$

En remplaçant la valeur de  $T_{Pij}$  On pour déterminé  $T_i$  selon l'expression suivante :

$$T_i = T_a + \frac{\sum h_{ij} (T_{Pij} - T_a) + \tau \cdot A \cdot I_g}{\sum h_{ij} + m \cdot C_p} \quad (2.74)$$

## 2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de la cellule en procédant successivement à l'étude des différents composants, a savoir : le calcul des différent coefficients d'échanges thermiques dans les différentes parois de la cellule, le calcul de l'éclairement solaire reçu par chaque façade, les bilans thermiques de chaque parois et le bilan thermique globale en régime permanant et transitoire. Cela a permis d'aboutir a un système , écrit sous forme matricielle, en exprimant la variation de la température interne dans le temps.

# *Chapitre 3*

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre sont représentés les différents résultats des simulations effectuées. Nous examinerons successivement l'allure des courbes, les valeurs maximales et minimales et nous tenterons d'expliquer leurs variations. Les résultats portent sur :

- La validation des modèles établis.
- L'effet de changement des matériaux et de l'emplacement de la porte et fenêtre

### 3.2 Validation

Pour la validation du modèle on a choisie l'étude faite par N.Kadri et al sur un logement faisant parti d'un habitat collectif de 1377 logement situé à ADL USTO ORAN, le bâtiment est mono zone avec 16 m<sup>2</sup> de surface habitable. La résistance thermique du mur est de  $R_m=2.63$  et celle de la toiture de  $R_t=3.36$ . Le local est muni de seulement 3 façade exposées au soleil. Les figures 3.1 et 3.2 représentent la comparaison entre les résultats de Kadri et ceux obtenus avec notre modèle pour le mois de Mars et Aout

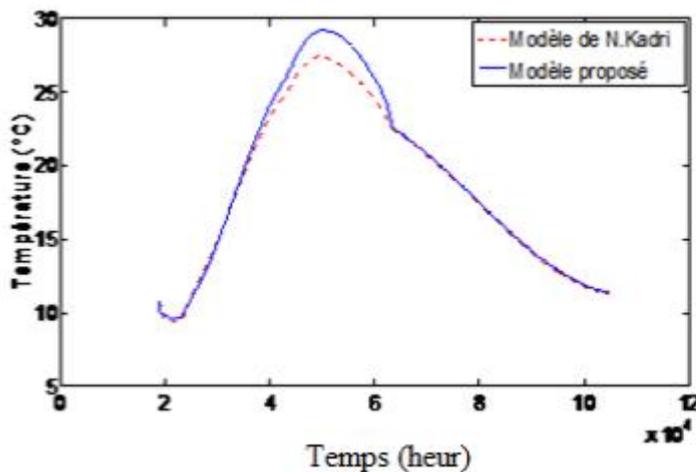


Fig.3.1 Mois de Mars

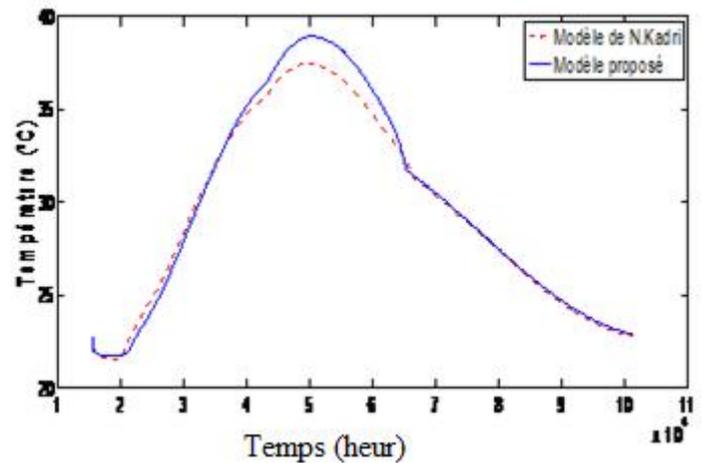


Fig.3.2 Mois d'Aout

Fig. (3.1 et 3.2) Comparaison entre la variation de la température interne du modèle proposé et le modèle de N.Kadri pour les journées représentatives des mois de Mars et d'Aout

On remarque bien dans la figure (3.1) et (3.2) que les deux courbes sont bien cohérentes et prennent tout les deux la même forme, la température augmente au levée du jour pour atteindre un maximum de 26 °C selon le modèle de N. Kadri et 29°C selon notre modèle, un maximum enregistré a 14h dans le mois de Mars et vers 14h30 dans le mois d'Aout, cet écart limité au milieu de la journée peut s'expliquer par le fait que l'éclairement solaire et la température ambiante ont été estimés faute de mesures

### 3.3 Variation de l'éclairement et de la température ambiante

#### 3.3.1. Eclairement reçu par chaque façade

Les courbes (3.3) à (3.14) représentent la variations de l'éclairement reçu par chaque face de la cellule durant les journées représentatives de chaque mois

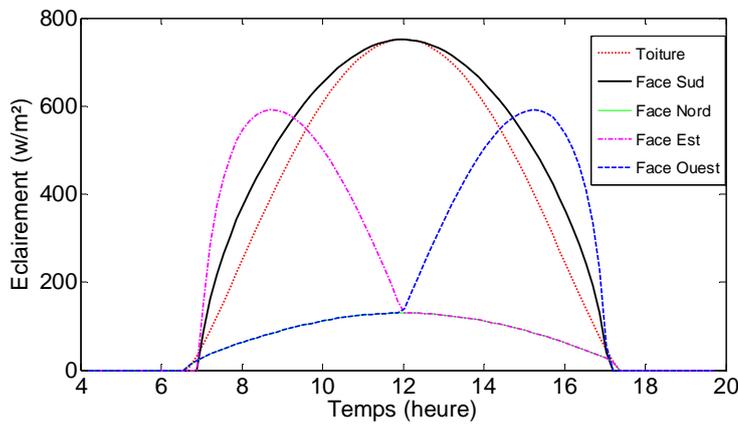


Fig. (3.3) Mois de Janvier

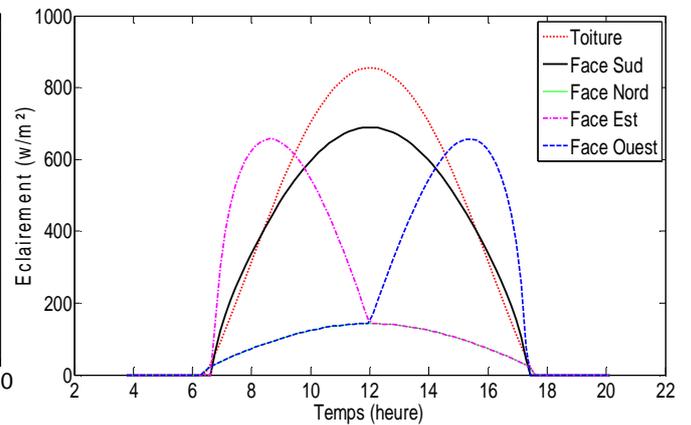


Fig. (3.4) Mois de Février

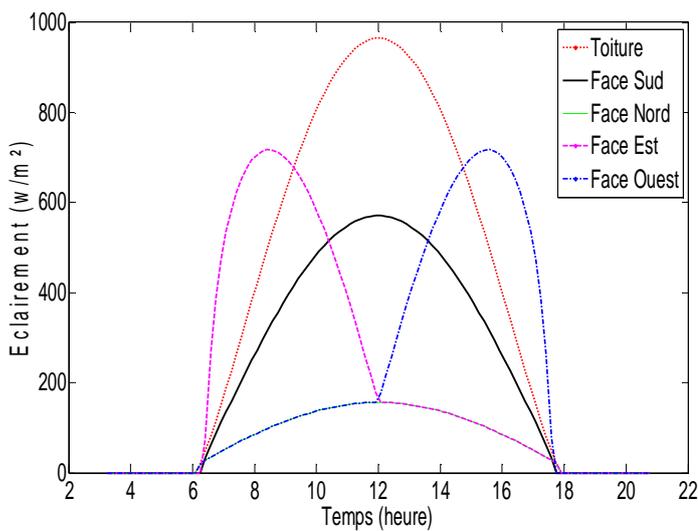


Fig. (3.5) Mois de Mars

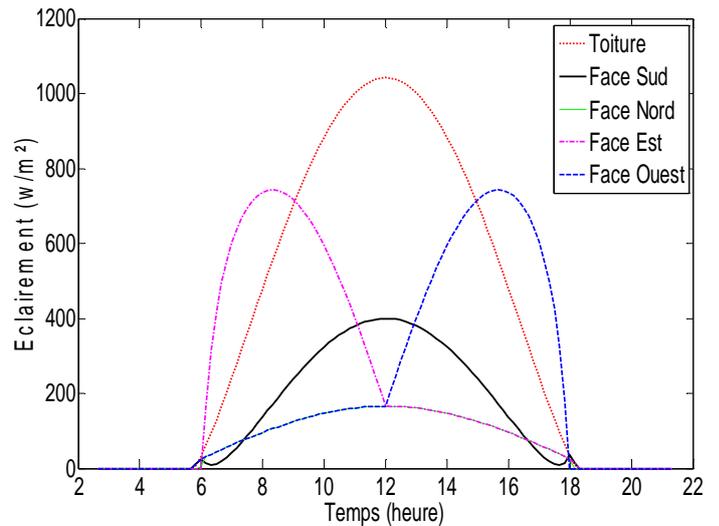


Fig. (3.6) Mois d'Avril

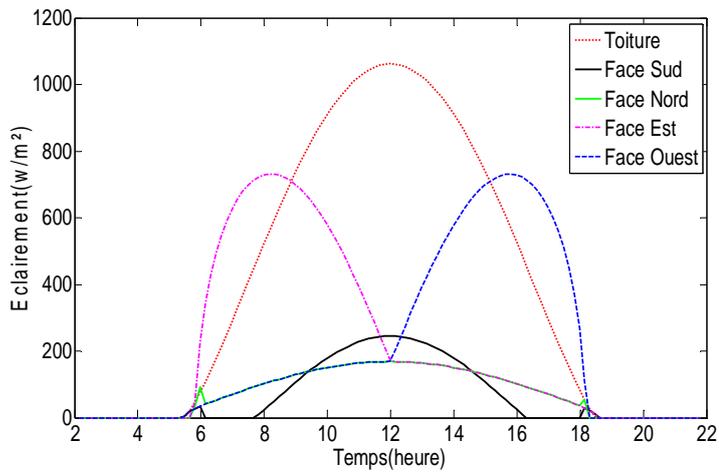


Fig. (3.7) Mois de Mai

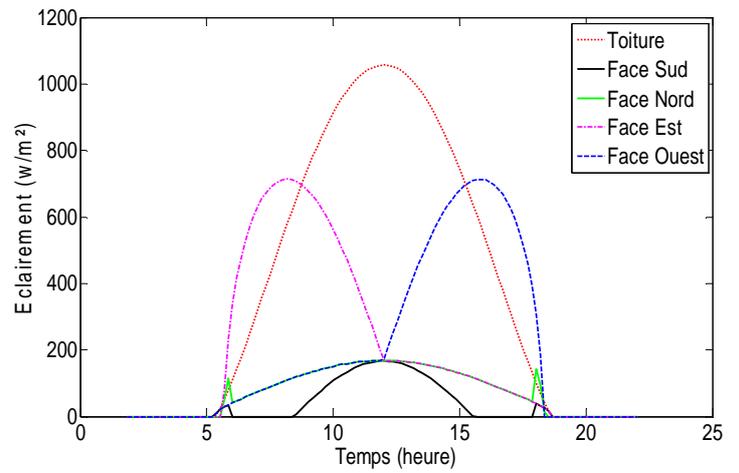


Fig. (3.8) Mois de Juin

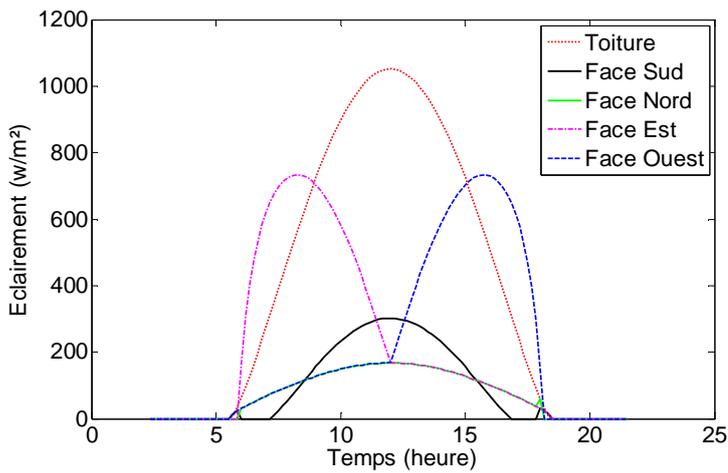


Fig. (3.9) Mois de Juillet

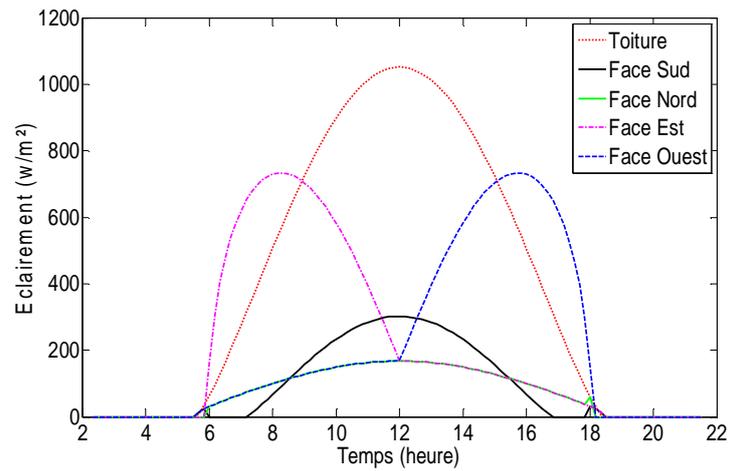


Fig. (3.10) Mois d'Aout

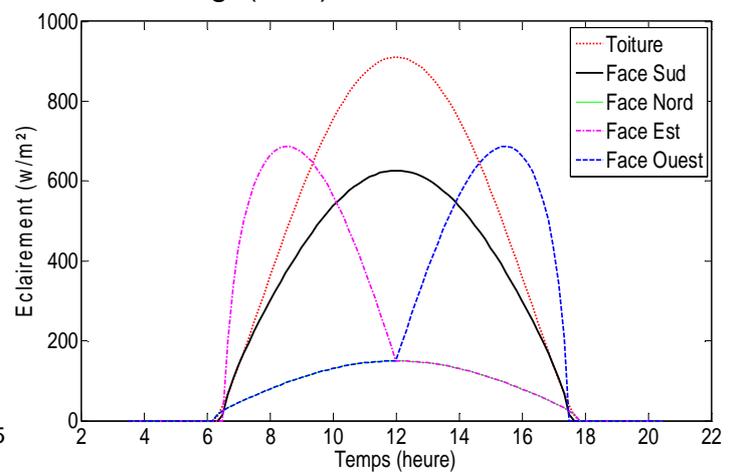
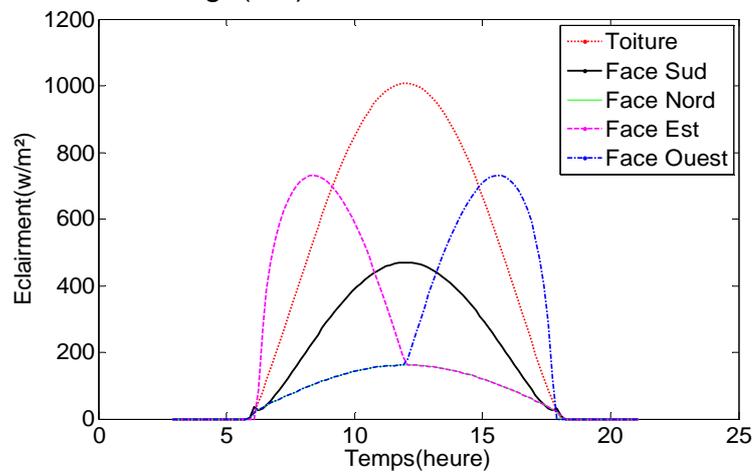


Fig. (3.11) Mois de Septembre

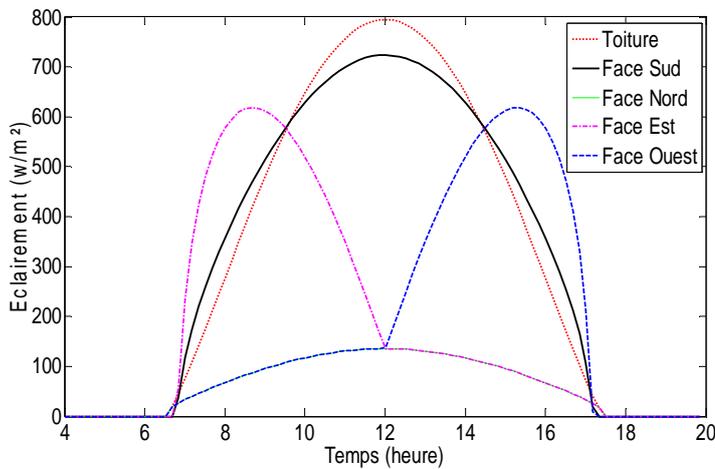


Fig. (3.12) Mois d'Octobre

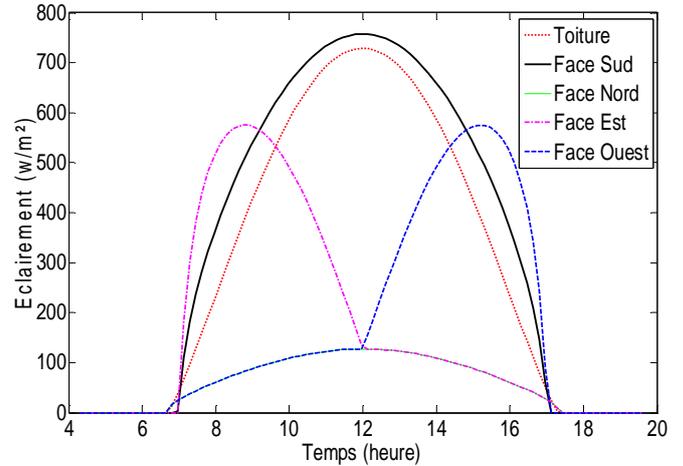


Fig. (3.13) Mois de Novembre

Fig. (3.14) Mois de décembre

Fig.(3.3 - 3.14) représentent l'éclairement reçu par chaque façade de la cellule durant chaque mois de l'année

Le mouvement apparent du soleil durant l'année nous donne une explication sur la variation de l'éclairement reçu par les différentes façades, représenté par les figures précédentes (3.16 à 3.27). durant la période allant du (21 Mars au 21 Septembre), le soleil est haut dans le ciel ce qui explique la faible quantité d'éclairement reçu par les façades orienté sud et nord, et le taux élevé sur le plan horizontal (Toiture).

Aux solstices d'été (21 Juin), on remarque une quantité d'éclairement importante sur la façade orientée nord par rapport à celle reçu par la façade sud. Alors qu'au solstice d'hiver (21 Décembre), on remarque l'éclairement le plus important est sur la façade sud par rapport à celui reçu par la façade nord.

### 3.3.2 Variation de l'éclairement par site

On choisi trois sites pour voir la variation de l'éclairement (global) reçu par la cellule durant les journées représentatives du mois et pour cela on prend les villes suivantes :

- Alger située au nord de l'Algérie a la latitude de 36.72
- Ghardaïa a la latitude de 32.40
- Tamanrasset a la latitude de 22.78

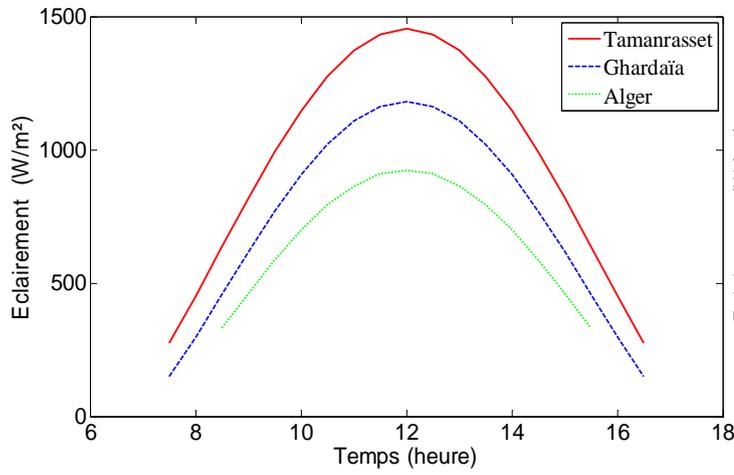


Fig. (3.15) Mois de Janvier

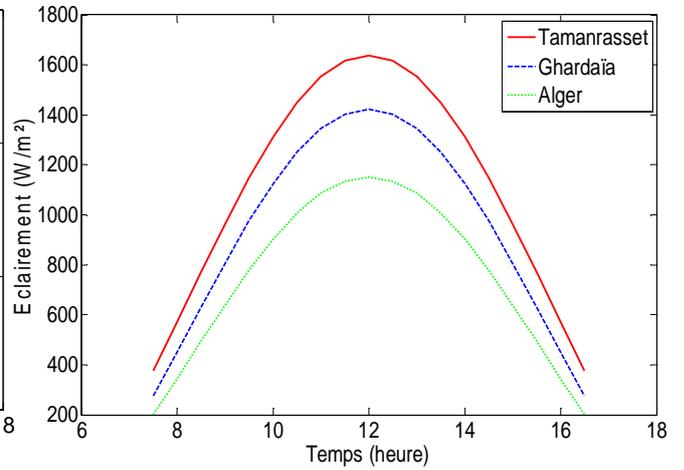


Fig. (3.16) Mois de Février

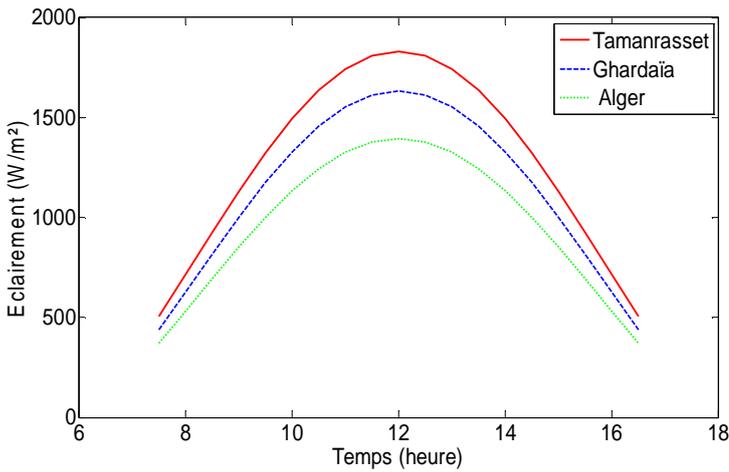


Fig. (3.17) Mois de Mars

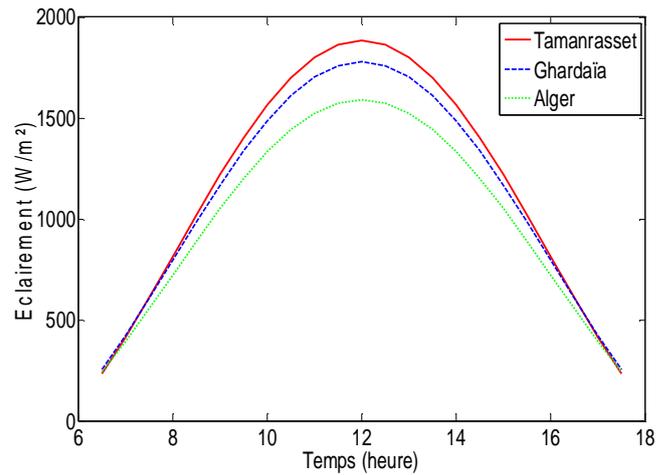


Fig. (3.18) Mois d'Avril

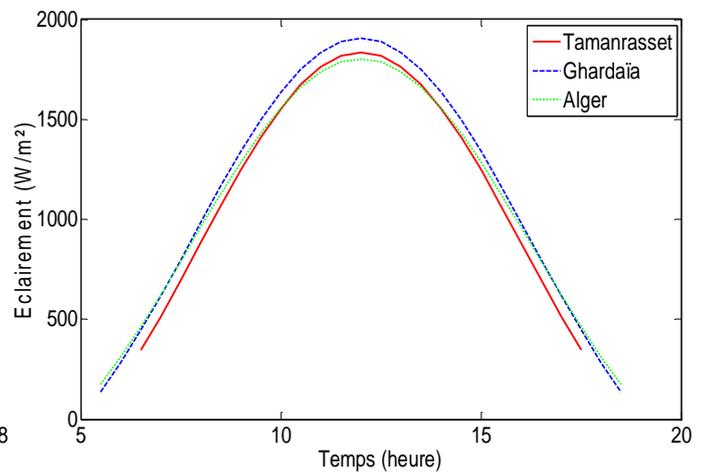
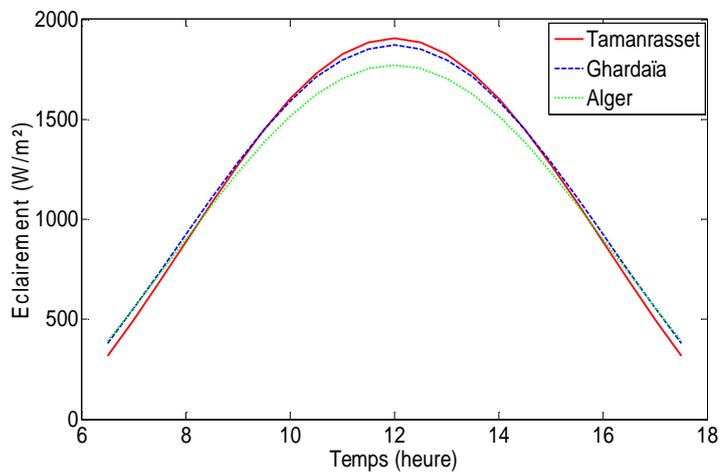


Fig. (3.19) Mois de Mai

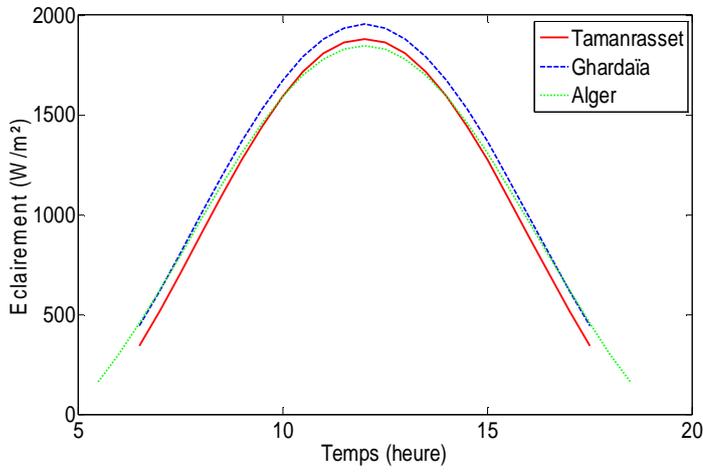


Fig. (3.20) Mois de Juin

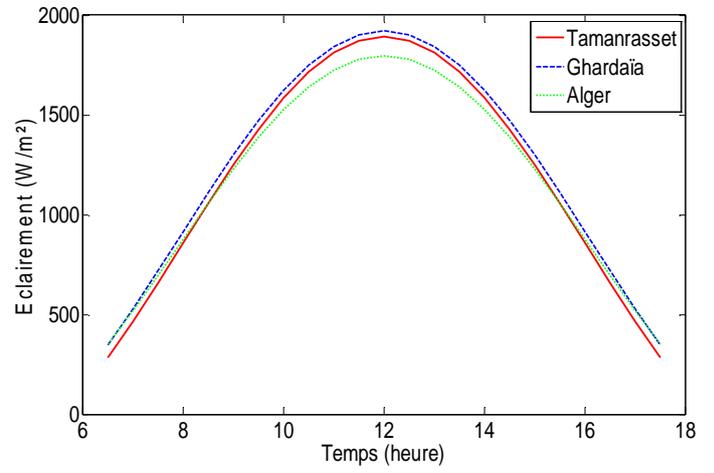


Fig. (3.21) Mois de Juillet

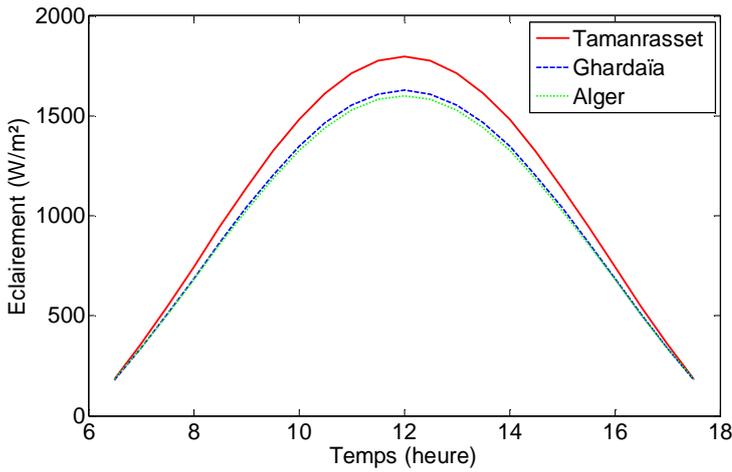


Fig. (3.22) Mois d'Aout

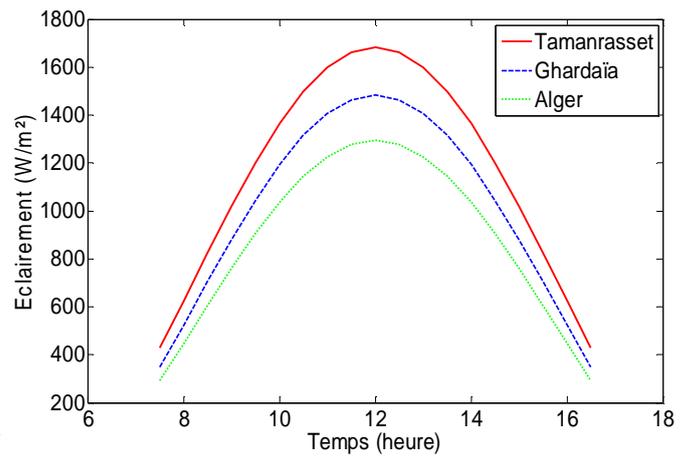


Fig. (3.23) Mois de Septembre

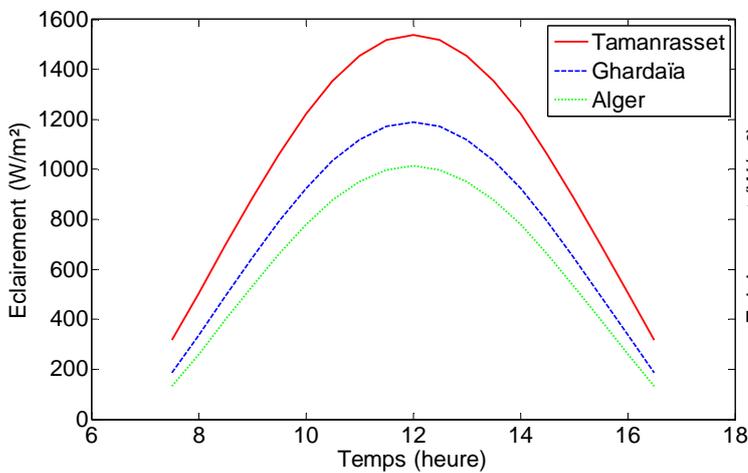


Fig. (3.24) Mois d'Octobre

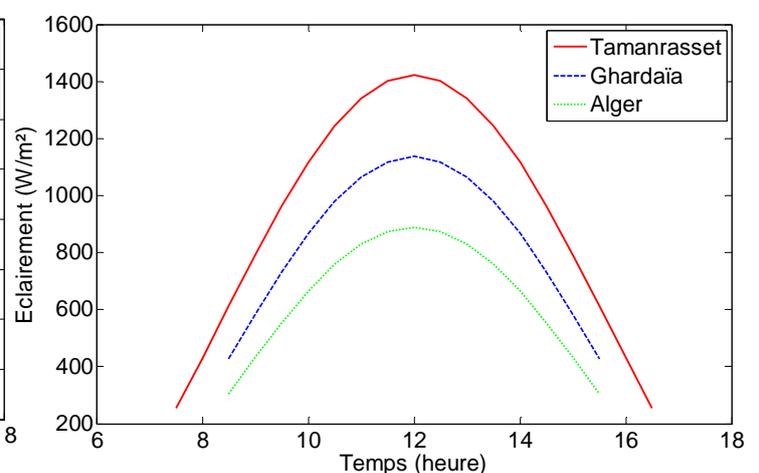


Fig. (3.25) Mois de Novembre

Fig. (3.26) Mois de Décembre

On remarque que le changement de l'éclairement reçu par la cellule durant les 12 mois de l'année varie d'une région à autre, Tamanrasset pendant tout l'année est une région plus ensoleillée que Ghardaïa. Alger en dernier excepté pendant les mois de Juin, Juillet et Aout ou on a presque les mêmes irradiances pour les trois régions.

### 3.3.3 Variation de la température ambiante

La température ambiante est une variable aléatoire. Son influence sur les performances des systèmes thermiques solaires est importante. La figure (3.27) représente la comparaison entre le modèle proposé et le modèle de LAZZARIN

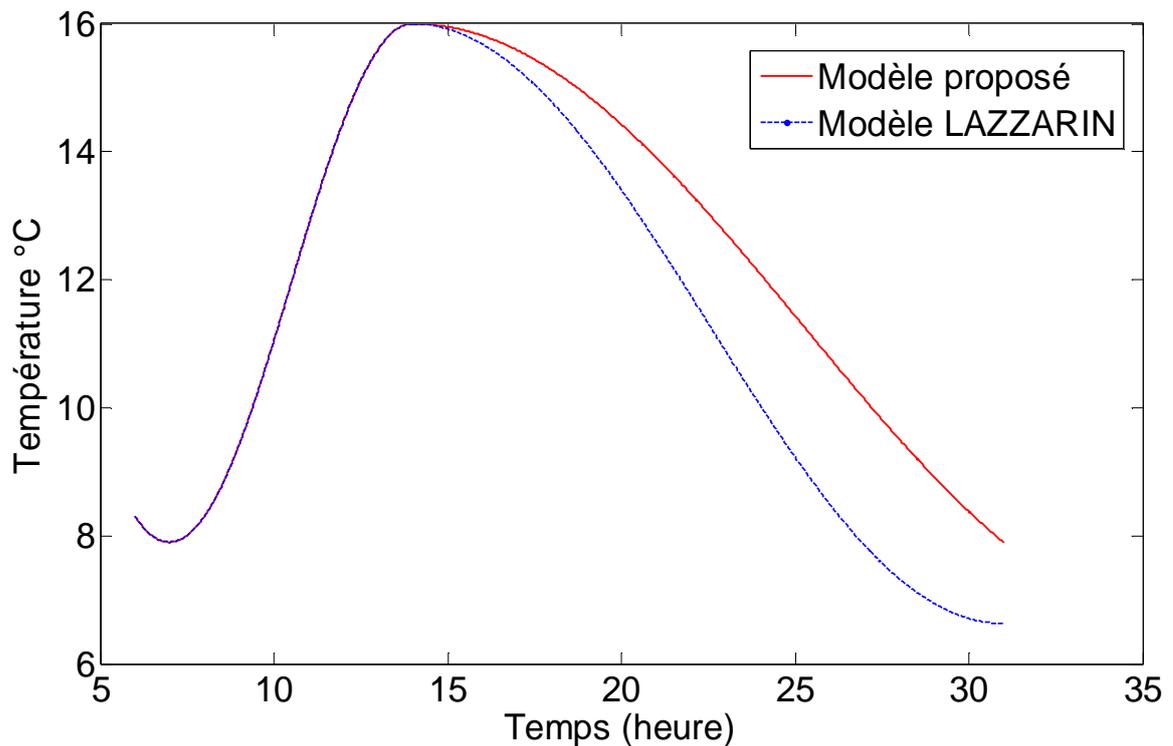


Fig. (3.27) Comparaison de la variation diurne de la température ambiante entre le modèle proposé et le modèle de LAZZARIN

On remarque que pour une journée représentative, il y a un écart entre le début et la fin de la période dans le modèle de LAZZARIN, alors que dans le modèle proposé la limite de la représentation ne va pas au-delà de la température minimale.

### 3.4. Température interne de la cellule

Les résultats obtenus par les modèles d'estimations de l'éclairement solaire et la température ambiante sont introduit dans le programme de calcul pour déterminer l'évolution de la température interne de la cellule dans le régime permanent et le régime transitoire

Les figures (3.27 et 3.28) présentent la distribution de le température interne dans la cellule en régime permanent de Janvier a Juin pour la figure (3.27) et de Juillet a Décembre pour la figure (3.28), de même pour les figures (3.29) durant le mois de Janvier au mois de Juin et (3.30) de Juillet au mois de Décembre en régime transitoire.

#### A- Régime permanent

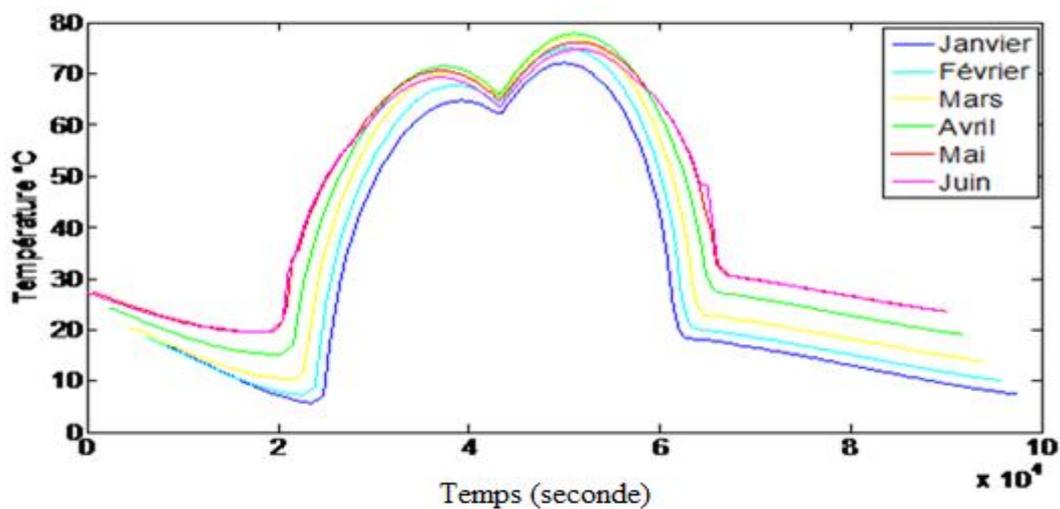


Fig. (3.27) Variation Température interne en régime permanent du mois de Janvier au mois de Juin

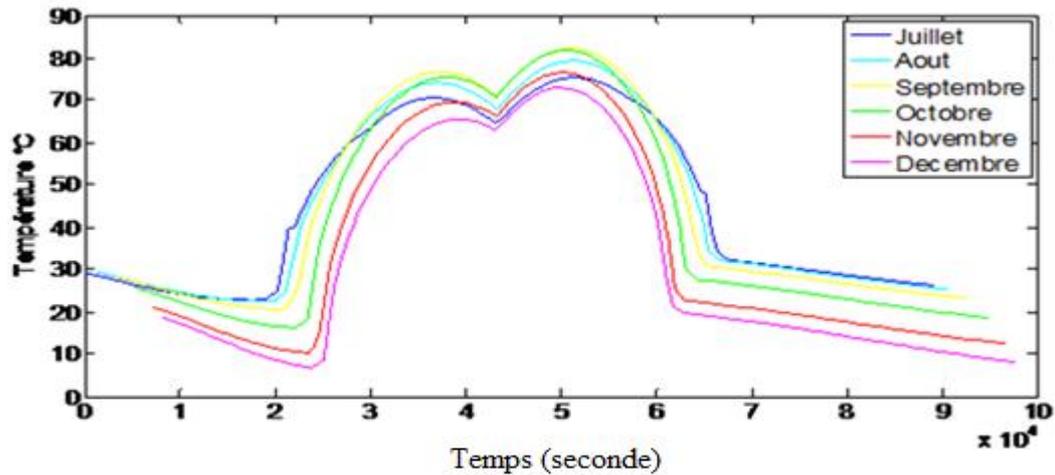


Fig. (3.28) Variation Température interne en régime permanent du mois de Juillet au mois de Décembre

On remarque bien dans les figures (3.27) et (3.28) que les distributions de températures  $i$  suivent les mêmes allures.

La température descend pendant l'absence totale de soleil ( absence d'éclairement solaire et faible température ambiante ) jusqu'au lever du jour présent vers 5h00 du matin durant le mois de Juillet la température augmente jusqu'à une température maximale de 75°C enregistré vers 14h30 au mois d'Aout. Alors qu'au mois de Décembre la température commence à augmenté vers 7h20 jusqu'à une valeur maximale de 60°C enregistrée vers 14h de l'après midi. Après cela la température commence à diminuer jusqu'au coucher du soleil avec la chute l'éclairement solaire et de la température ambiante.

Le passage du soleil d'une façade à une autre et en absence d'inertie thermique explique la chute brusque de la température interne vers 14h et ce qui explique aussi les températures très élevées pendant la journée. Les creux en milieu de journée s'expliquer par le fait que l'inertie du système est impliquer

## B- Régime Transitoire

Les figures (3.29 et 3.30) représente la distribution de la température interne dans la cellule en régime transitoire, en tenant compte de l'inertie du système

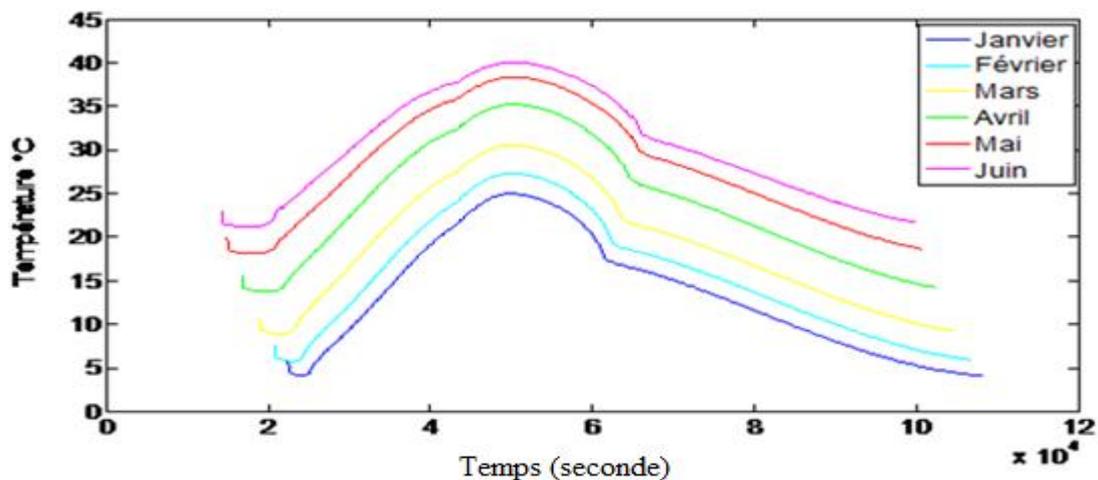


Fig. (3.29) Température interne en régime transitoire du mois de Janvier au mois de Juin

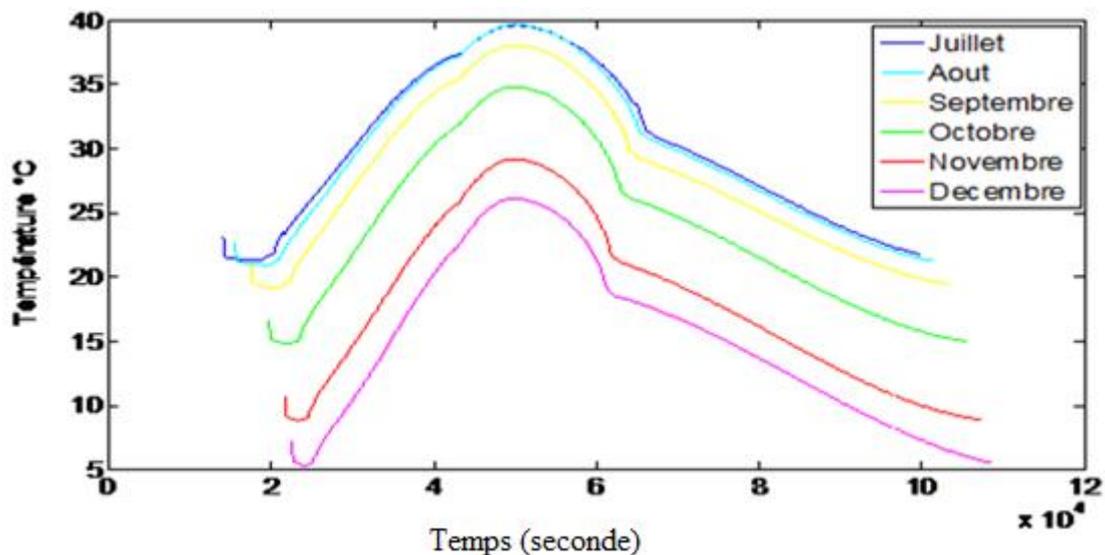


Fig. (3.30) Température interne en régime transitoire du mois de Juillet au mois de Décembre

On remarque la même allure pour la température interne durant l'année qui commence à croître avec le lever du jour (différent selon le mois), en mois de

janvier la température commence à augmenter vers 7h15 du matin pour atteindre un maximum vers 14h de 21°C. Elle descend après jusqu'au lever du jour suivant. Durant le mois de Juillet elle commence à croître vers 5h du matin pour atteindre un maximum de 38°C vers 14h30.

### 3.5 L'effet de l'emplacement de la fenêtre sur la température interne

La figure 3.31 représente l'effet de l'emplacement de la fenêtre sur la distribution de la température interne

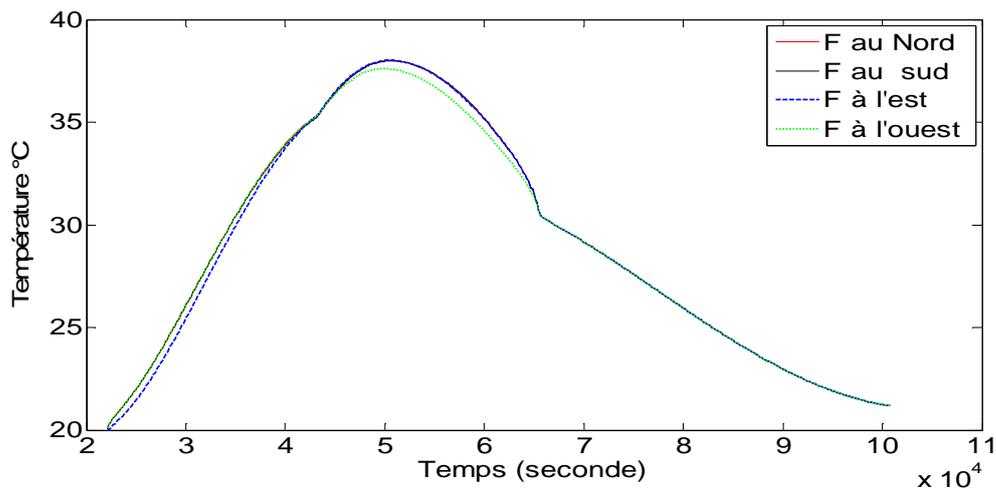


Fig. (3.31) Effet de l'emplacement de la fenêtre sur la température interne (Mois de Mars)

On remarque dans la figure (3.31) que la variation de la température interne dû à l'emplacement de la fenêtre dans chaque face de la cellule est peut importante. la plus grande valeur de la température est lorsque la fenêtre est situé sur la face sud ce qui est tout a fait logique car c'est la face la plus exposée au soleil après la toiture

### 3.6 L'effet des matériaux

Comme notre étude est destinée pour les régions semi arides ou totalement arides alors on a choisi de voir l'effet des matériaux sur la température interne et pour cela nous avons comparé un mur de brique, un mur de pierre ferme et un mur de terre et paille à 600 kg/m<sup>3</sup> et afin de montré aussi l'effet de l'inertie thermique de la cellule

La figure 3.32 représente l'effet de changement de la constitution des parois de la cellule sur la distribution de la température interne

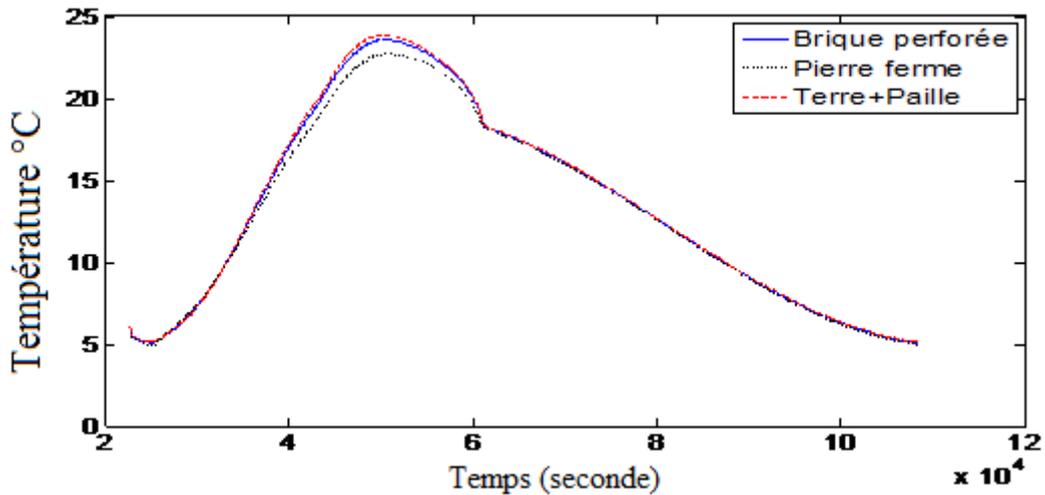


Fig.(3.32) L'effet des matériaux sur la température interne (Mois de Janvier)

La figure (3.32) représente la comparaison de l'effet du changement des matériaux sur l'évolution de la température interne de la cellule, 24 °C comme valeur maximale du mois de Janvier pour des murs composer de terre et paille et la valeur minimale de 21°C pour des murs de pierre ferme a cause de sa capacité thermique qui est de 1840-2340 J/kg. K et une masse volumique de 936 kg/m<sup>3</sup> et des valeur moins importantes pour la brique qui varient entre 1400-1600 (J/Kg. K). l'inconvénient de la pierre est le stockage de la chaleur pendant la journée et sur dissipation pendant la nuit ce qui n'est pas souhaitable dans les pays chauds car on tombe dans le cas d'un mur stockeur d'où la nécessité d'une isolation interne pour que le déstockage se fasse vers l'ambiance extérieure de la cellule.

### 3.7 Effet de l'orientation

La figure (3.33) présente l'effet de l'orientation de la cellule sur la variation de la température interne

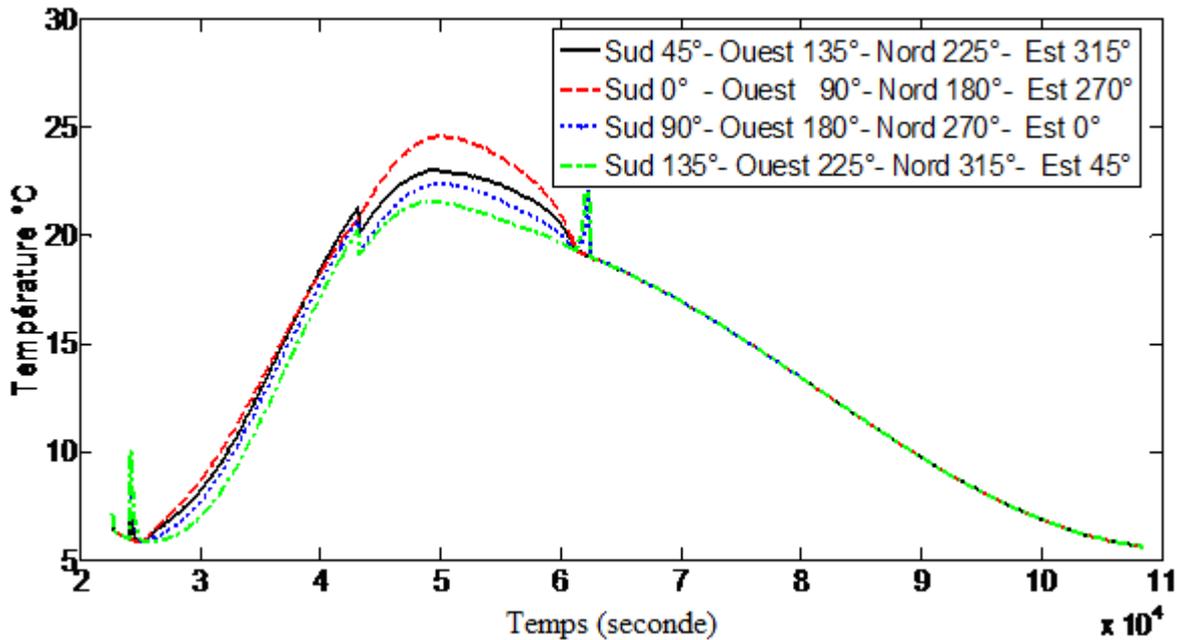


Fig.(3.33) Comparaison entre différents orientation de la cellule

Avec une orientation plein sud (sud 0° Ouest 90° Nord 180° et Est 270°) la température interne commence à croître avec le lever du jour pour atteindre un maximum de 24 °C vers 14h alors que pour une orientation de 45° sud et ouest 135°, Nord 225° et Est 315° on a un maximum de 22°C, Pour une orientation plein Est 0° on a un maximum de 20 °C. on remarque l'existence de pics qui sont dus au passage du soleil d'un côté a un autre dans le cas ou on a une orientation de 45° pour une façade.

### 3.7 Apports énergétique sectoriels

Pour bien voir l'apport à travers chaque façade de la cellule on a déterminé les apports énergétique de chaque façades. La figure 3.34 représente les apports énergétique de chaque façade en forme d'histogramme

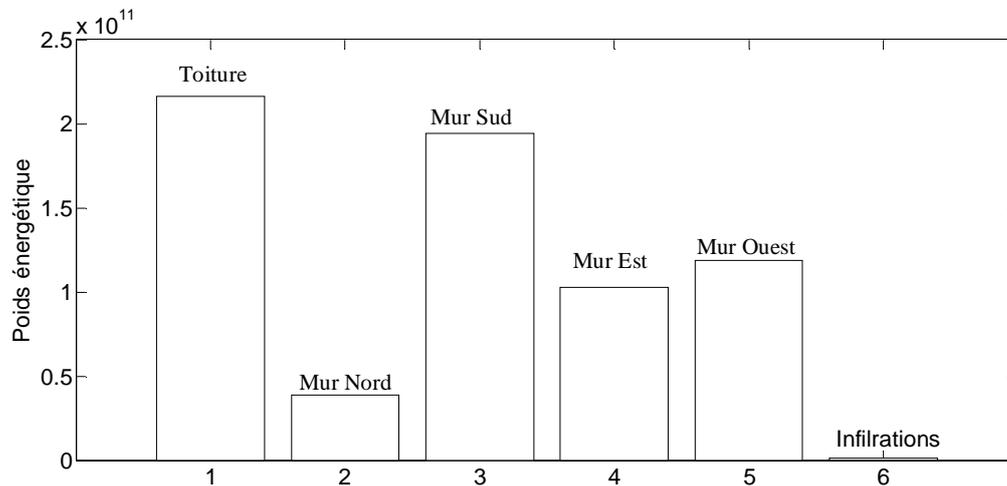


Fig. (3.34) Poids énergétique de chaque façade en Mois de Février

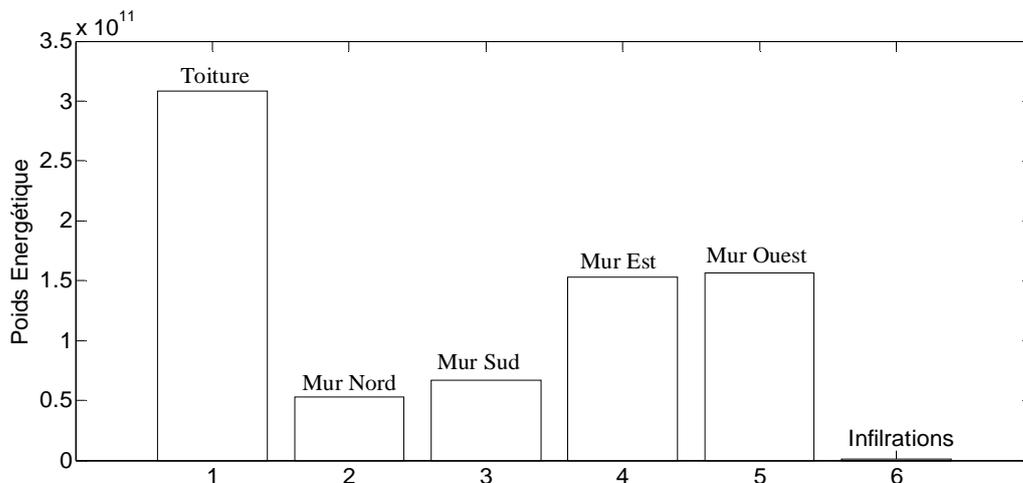


Fig. (3.35) Poids énergétique de chaque façade en Mois de Aout

On remarque bien dans les figures (3.47 et 3.48) le poids énergétique de chaque façade de la cellule durant les deux mois de Février et Aout et il est bien clair que la toiture à le plus grand poids car elle est tout le temps exposée contrairement aux autre façades qui sont éclairé jusqu'à des heures précise de la journée pendant l'année. Ce constat justifie le choix du sujet visent à diminuer post le plus important dans les échanges thermique de la cellule.

### 3.8 Effet de la surface sélective

La figure 3.36 représente l'effet du dépôt d'une surface sélective sur la toiture sur la distribution de température à l'intérieur de la cellule.

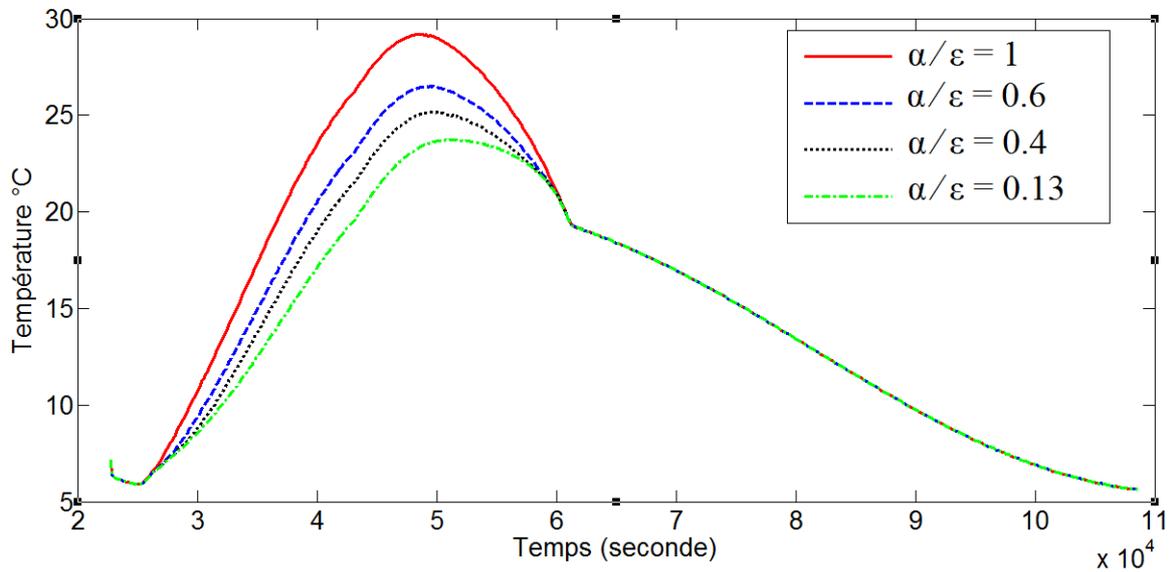


Fig. 3.36 Distribution de température interne de la cellule pour différents rapports  $\alpha/\epsilon$  sur la Toiture

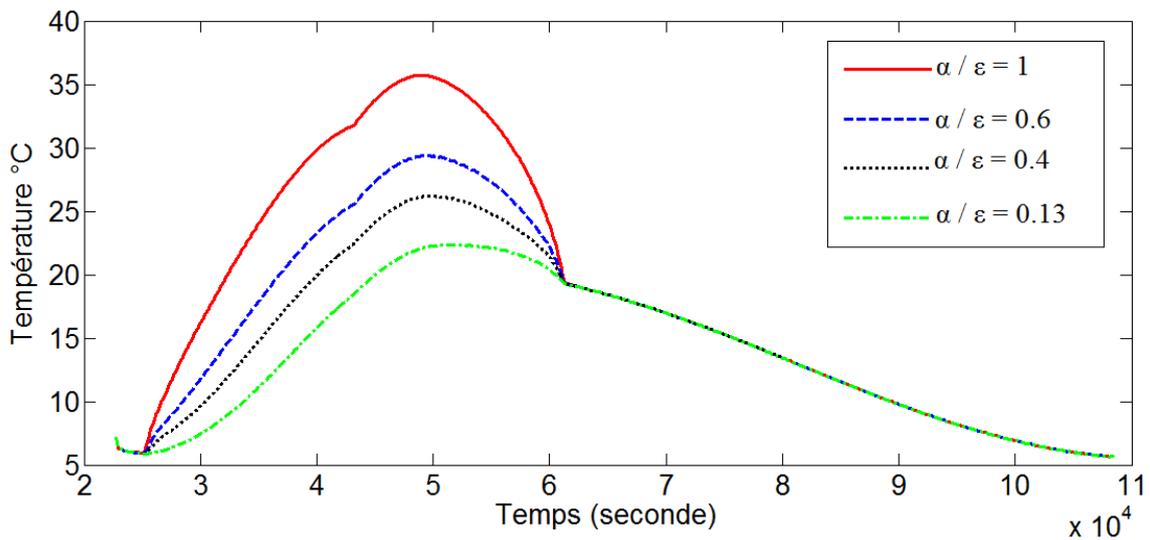


Fig. 3.37 Distribution de température interne de la cellule pour différents rapports  $\alpha/\epsilon$  sur la Toiture et les Murs

Les courbes sont obtenues en faisant varier le rapport  $\alpha/\varepsilon$  (absorptivité au visible sur l'émissivité dans l'infrarouge) de 1 (surface grise) à 0.13 (surface dite sélective froide et correspondant à un enduit de chaux neuf). Les courbes montrent que l'effet est marquant le matin avec un maximum vers 15h. Par contre, l'effet est négligeable après le coucher du soleil.

Les écarts sur la température interne de la cellule, en milieu de journée et selon le rapport retenu, peuvent dépasser les 6°C. Ce qui est énorme pour les habitants des zones arides. Surtout que le traitement est simple et peu onéreux (il suffit de le maintenir en l'état avec un ravalement répété et bien appliqué).

### **3.9 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats avec leur comparaison à des données tirées de la littérature. Après validation du modèle, nous avons analysé la variation de la température interne dans la cellule en régime permanent et en régime transitoire, en fonction des paramètres les plus importants, emplacement de fenêtre, orientation, et de composition des murs de la cellule, traitement de surface). Comme le but de cette recherche est de modéliser la température interne d'une cellule en milieu semi aride où le problème est l'évacuation de la chaleur en été et la garder en hiver, nous avons équipé la cellule d'une surface sélective. Le champ exploré est assez vaste, il est vraiment judicieux de poursuivre des travaux aussi bien dans le domaine des études expérimentales qu'en explorant d'autres possibilités.

**CONCLUSION  
GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

En règle générale le problème d'un pays comme l'Algérie étant plus un problème de protection contre la chaleur que contre le froid, l'étude de la variation de la température interne d'une cellule munie d'une surface sélective en toiture a été réalisée.

Après une présentation succincte de quelques données astronomiques, nous avons dressé un état de l'art des différents travaux de recherches ayant une relations avec le sujet. Les différent travaux proposés par la littérature pour la modélisation de l'éclairement solaire et des températures, ciel, sol et ambiante ont été présentés.

Les notions et conditions de confort thermique ont été présentées. De même les principes, les études et les réalisations expérimentales se rapportant aux maisons bioclimatiques ont été rapportées. Les bilans thermique sur les différentes volumes de contrôles ont été établis en régime permanent et en régime stationnaire, Le système aux équations différentielles aux dérivées partielles a été établi. Après discrétisation, le système a été résolu numériquement en utilisant la méthode matricielle avec itérations successives.

Ceci, aussi bien pour le régime permanent que le régime transitoire. Le programme de résolution a été écrit sous MATLAB. Les résultats obtenus ont permis la détermination des différents profils de températures. Les résultats obtenus ont été comparés a ceux fournis par la littérature.

Après validation le modèle a été utilisé pour établir les effets respectifs de différents paramètres (changement d'emplacement de la fenêtre, orientation, composition des parois, sélectivité de la toiture). Les résultats obtenus mettent en

évidence l'influence de ces paramètres internes et externes sur la variation de la température interne dans la cellule, en milieu semi aride où le problème est l'évacuation de la chaleur en été et sa préservation en hiver. L'effet du traitement sélectif sur le comportement thermique de la cellule a été nettement mis en évidence. Ceci, d'autant que le coût du traitement est négligeable à tout point de vue.

Le travail accompli repose sur un certain nombre d'hypothèses permettant la simplification du problème à résoudre. Par ailleurs, certains aspects ayant une influence certaine sur le confort thermique ont été occultés.

Ce travail mérite d'être poursuivi en retirant certaines hypothèses simplificatrices comme l'effet du vent, les échanges radiatifs internes, les échanges thermiques entre le ou les occupants et les parois, la distribution de la température dans la cellule.

# NOMENCLATURE

## Lettres latines

Af	: Surface de la fenêtre, m <sup>2</sup>
Am	: Surface du mur, m <sup>2</sup>
Ap	: Surface de la porte, m <sup>2</sup>
At	: Surface de la toiture, m <sup>2</sup>
Cpa	:Chaleur spécifique de l'aire, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
CpB	:Chaleur spécifique du brique, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
CpBe	:Chaleur spécifique du Béton, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
Cpb	:Chaleur spécifique du bitume, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
CpC	:Chaleur spécifique du Ciment, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
CpH	:Chaleur spécifique de l'hourdi, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
CpI	:Chaleur spécifique du l'isolant, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
CpP	:Chaleur spécifique du plâtre, J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .
e	:épaisseur, m
Fmc	: Facteur de forme Mur-ciel.
Fms	: Facteur de forme Mur-sol.
H	: Irradiation solaire, J m <sup>-2</sup>
h <sub>int</sub>	: Coefficient de transfert de chaleur convectif interne, W/ m <sup>2</sup> °C
h <sub>ext</sub>	: Coefficient de transfert de chaleur convectif externe, W/ m <sup>2</sup> °C
I	: Eclairage , W m <sup>-2</sup> .
I <sub>0</sub>	: Eclairage hors atmosphère, W m <sup>-2</sup> .
I <sub>cs</sub>	: Constant solaire, W m <sup>-2</sup> .
K <sub>t</sub>	: Indice de clarté.
k <sub>m</sub>	: Conductivité du mur.
k <sub>t</sub>	: Conductivité du toiture.
Nj	: Numéro du jour dans l'année.
Nu	: Nombre de Nusselt.
Pr	: Nombre de Prandlt.
Q <sub>c</sub>	: Flux de chaleur par convection/unité de longueur, W/m.
Q <sub>r</sub>	: Flux de chaleur par rayonnement/unité de longueur, W/m.
Re	:Nombre de Reynolds.
Rb	:Facteur de conversion géométrique.
Rci	:Résistance de convection interne.
Rce	:Résistance de convection externe.
T <sub>a</sub> , T <sub>c</sub>	:Température ambiante et ciel, respectivement, K.
T <sub>T</sub> , T <sub>m</sub>	:Température de la toiture et de mur, respectivement, K.
T <sub>s</sub>	:Température au sol, K.
T <sub>pi</sub>	:Température parois interne, K.
T <sub>pe</sub>	:Température parois externe, K.
U <sub>tot</sub>	:Conductance totale a travers une parois, W m <sup>-2</sup> .
V	:vitesse du vent, m/s.

$a$	:Diffusivité thermique, $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ .
$e$	:Epaisseur, m.
$h$	:Hauteur apparente du soleil, deg
$h_c$	:Coefficient de transfert par conduction, $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ .
$h_e, h_i$	:Coefficient de transfert par convection externe et interne, respectivement, $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$ .
$h_r$	:Coefficient de transfert par rayonnement.
$h_w$	:Coefficient de transfert par convection due au vent, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ .
$r$	:Correction de la distance terre soleil.
$z$	:Altitude du lieu, km.

### Lettres grecques

$\Omega$	:Angle solide, str.
$\gamma$	:Azimut du soleil, deg.
$\gamma_s$	:Déviation azimutale, deg.
$\alpha$	:demi angle sous le quel on voit le soleil .
$\alpha$	:Absorptivité totale pour un angle d'incidence $\theta$ .
$\beta$	:Angle d'inclinaison de la parois par rapport a l'horizontale, deg.
$\delta$	:Déclinaison di soleil, deg.
$\varepsilon, \varepsilon_v$	:Emissivité totale de la parois et vitre.
$\theta$ et $\theta_n$	:Angle d'incidence et angle d'incidence formé par la normale au plan horizontal et le rayon.
$\rho$	:Albédo.
$\rho$	:masse volumique, $\text{kg/m}^3$ .
$\sigma$	:Fraction d'insolation.
$\tau$	:Transitivité.
$\omega$	:Angle horaire, deg.
$\omega_s$	:Angle horaire au coucher du soleil, deg.

### Indices

cd, cv, ry	:conduction, convection et rayonnement respectivement.
i et e	:pour interne et externe respectivement.
g, b et d	:pour globale, direct et diffus respectivement.
O, h et cc	:pour Hors atmosphère, Horizontal et ciel clair, respectivement.
$\theta$ et n	:pour incidence $\theta$ et incidence normale, respectivement.
t et m	:pour toiture et mur respectivement.

# **Annexes**

*Annexe A* : Instruments de mesure du rayonnement solaire.

*Annexe B* : Propriétés Thermiques et Optiques de quelques Matériaux.

*Annexe C* : Les Méthodes De Discrétisation.

*Annexe D* : Les Méthodes De Résolution.

*Annexe E* : Algorithme

*Annexe F* : Schéma Electrique

## Annexe A

### Instruments de mesure du rayonnement solaire

Les mesures solarimétriques ne datent pas d'aujourd'hui, les premières mesures ont été entreprises par Pouillet en 1837.

Selon la composante du rayonnement solaire, différents appareils de mesure sont utilisés.

#### • Rayonnement solaire total

Pour mesurer le rayonnement solaire total parvenant sur une surface à partir d'un angle solide  $2\pi$  stéradians on utilise un pyrromètre.

#### • Rayonnement solaire global

On utilise un pyranomètre (figure 1.A) pour mesurer le rayonnement solaire global parvenant sur une surface à partir d'un angle solide  $2\pi$  stéradians.



Figure 1.A. Un pyranomètre

#### • Rayonnement solaire direct

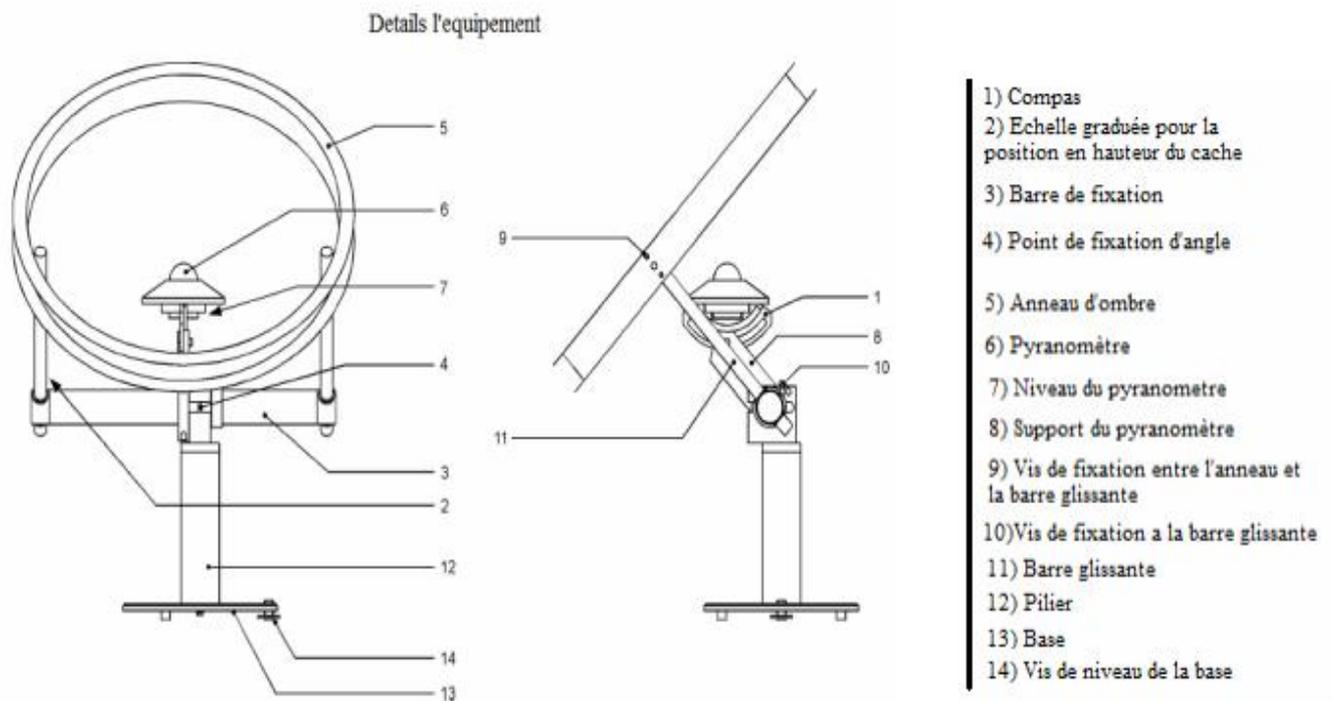
L'appareil de mesure du rayonnement solaire direct est un pyréliomètre (figure 2.A), orientable de façon que la surface réceptrice soit normale aux rayons solaires.



Figure 2.A. Pyréliomètre

## • Rayonnement solaire diffus

Quant à la mesure du rayonnement solaire diffus, elle est entreprise à l'aide d'un pyranomètre muni d'un dispositif pare-soleil.



## Annexe B

### Propriétés thermiques et optiques de quelques matériaux

Les caractéristiques thermophysiques de quelques matériaux métalliques sont regroupés dans le tableau (1.B)

Métal	Conductivité thermique (W/m. K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/kg. K)	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0.25	0.02
Acier Inoxydable	14	7800	460	0.01	0.04
Aluminium	204	2700	879	0.63	0.09

Tableau 1.B. Caractéristiques thermophysiques des matériaux métalliques

Les propriétés optiques de quelques surfaces sélectives figurent dans le (tableau 2.B)

[A]

Support et traitement	Absorptivité de la surface	Emissivité de la surface	Effet de l'humidité
Acier et nickel noir sur nickel	0.95	0.07	Variable
Acier et chrome noir sur nickel	0.95	0.09	Sans effet
Acier et chrome noir	0.91	0.07	Oxydation rapide
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14	Peu d'effets
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16	Couche sélective pèle rapidement
Cuivre et cuivre noir	0.88	0.15	
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08	Peu d'effet
Alu et oxyde de manganèse	0.70	0.08	
Acier et couche organique sur oxyde de fer	0.90	0.16	Peu d'effets
Acier et couche organique sur chrome noir	0.94	0.2	Peu d'effet

Tableau 2.B. Propriétés optiques de quelques surfaces sélectives

Le tableau 3.B regroupe le degré d'émissivité de quelques matériaux

Matériaux	Température (°C)	Emissivité
Aluminium nu après laminage	170	0.04
Aluminium anodisé noir	50	0.98
Béton	20	0.93
Glace lisse	0	0.97
Fer poncé	20	0.24
Verre	90	0.94
Cuivre légèrement ternis	20	0.04
Cuivre oxydé	130	0.79
Acier trempé	200	0.52
Acier oxydé	200	0.79

Tableau 3.B. Degré d'émissivité de quelques matériaux

[A] S, A, Hakem ; N, Kasbadji-Merzouk ; M, Merzouk. Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, Revue des Energies Renouvelables, p 153-162. (2008)

Matériaux	Conductivité thermique (w/m.k)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/Kg.K)	Diffusivité thermique 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s
Air à 20°C	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.04	20	1500	13.3
Laine de roche	0.04	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.04	450	1880	0.47
Feutre d'amiante	0.047	116	800	5.1
Liège expansé	0.048	120	1380	2.9
Perlite	0.048	60	840	9.5
Silicate de calcium	0.052	200	920	2.8
Magnésie	0.055	200	880	3.1
Béton cellulaire	0.075	280	800	3.3
Vermiculite	0.09	80	880	12.8
Papier journal comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Papier	0.14	700	1340	1.5
Bois de sapin	0.144	535	272	9.9
Caoutchouc	0.153	1200	2170	0.6
Pvc	0.166	1380	1000	1.2
Bois de chêne	1.198	825	2400	1.0
plâtre	0.35	800	800	5.5
Brique	0.697	1700	900	4.6

Tableau 5.B. Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants

## Annexe C

### Les méthodes de discrétisation

Dans le but de passer d'un problème continu (exact) au problème discret (approché), on peut utiliser une des méthodes suivantes :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des volumes finis.

#### 1. Méthode des différences finies

Elle consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

La méthode des différences finies présente des avantages à savoir, une grande simplicité d'écriture, et un faible cout de calcul, et quelques inconvénients tels que une limitation de la géométrie des domaines de calcul, des difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue ainsi que l'absence de résultats de majorations d'erreurs.

Nous donnons dans ce qui suit quelques formules d'approximation des dérivées par des différences finies pour la dérivée première :

- Différence divisée progressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{U_{i+1} - U_i}{h} \quad (1. C)$$

- Différence divisée progressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{-U_{i+2} + 4 * U_{i+1} - 3 * U_i}{2 * h} \quad (2. C)$$

- Différence divisée régressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{U_i - U_{i-1}}{h} \quad (3. C)$$

- Différence divisée régressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{3 * U_i - 4 * U_{i-1} + U_{i-2}}{2 * h} \quad (4. C)$$

- Différence divisée centrée

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{h} \quad (5. C)$$

Avec :

$$h = x_{i+1} - x_i \quad (6. C)$$

## 2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée suffisamment fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction  $u$ , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

La méthode des éléments finis présente les avantages suivants :

Traitement possible de géométries complexes.

Détermination plus naturelle des conditions aux limites.

Possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

Mais également quelques inconvénients dont :

Complexité de mise en œuvre.

Cout en temps de calcul et en mémoire.

Quelques formules d'approximation des dérivées partielles par des différences finies pour les dérivées partielles premières :

- Différences divisées progressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_i) \approx \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} \quad (7.C)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_i) \approx \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\Delta y} \quad (8.C)$$

- Différences divisées régressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_i) \approx \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (9.C)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_i) \approx \frac{U_{i,j} - U_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (10.C)$$

- Différences divisées centrées

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_i) \approx \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j-1}}{2 * \Delta x} \quad (11.C)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_i) \approx \frac{U_{i,j} - U_{i,j-1}}{2 * \Delta y} \quad (12.C)$$

### 3. Méthode des volumes finis

Elle intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit des approximations discrètes conservatives, et apparait particulièrement adaptée aux équations de la mécanique des fluides.

La mise en œuvre de cette méthode est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles, cependant, elle permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme élémentaire quelconque, donc de traiter des géométries complexes.

Dans ce qui suit l'approche des volumes finis en dimension un :

A partir d'un maillage en volume finis, où on prend les inconnues  $x_i$  au centre du volume de contrôle on a :

$$U''(x_i) = \frac{d^2 u}{dx^2}(x_i) = \frac{U_{i+1} - 2 * U_i + U_{i-1}}{h^2} \quad (13.C)$$

## Annexe D

### Méthodes de résolution numérique

#### 1. Méthodes itératives

Il existe deux grandes familles de méthodes numériques qui permettent de résoudre les systèmes d'équations linéaires [1].

- **Les méthodes directes**

Elles conduisent à une solution en un nombre fini d'étapes, et sans les erreurs d'arrondi, cette solution serait celle du système. On peut citer les méthodes de Gauss, de Gauss-Jordan, de Croot et Doolittle et de Cholevsky,.....

- **Les méthodes itératives**

Elles font passer d'un vecteur estimé  $X^{(k)}$  de la solution, à un autre estimé  $X^{(k+1)}$  de cette solution. S'il y a convergence, la solution ne pourrait donc être atteinte qu'après un nombre infini d'opérations. On peut citer les méthodes de Jacobi, de Gauss-Seidel, et de relaxation,...

La méthode de Gauss-Seidel a été choisie pour résoudre les systèmes d'équations obtenus au chapitre III, pour les raisons suivante [1], [2]:

- La matrice obtenue est creuse c'est-à-dire qu'un grand nombre des éléments de la matrice sont nuls en plus du fait qu'elle a une structure bande.
- Elle consomme moins de mémoire car elle ne fait appel qu'à des produits matrice vecteur.
- Elle converge rapidement.

Pour résoudre un système linéaire par la méthode itérative de Gauss-Seidel [8], on opère comme suit :

$$\text{Soit : } AX=B \quad (1.D)$$

A : une matrice carrée d'ordre n.

Ecrivons A sous la forme suivante :

$$A=M-N \quad (2.D)$$

L'équation (1.D) peut s'écrire:

$$MX = NX + B \quad (3.D)$$

La méthode itérative associée à l'égalité (3.D) consiste, à partir d'un vecteur initial

La méthode itérative associée à l'égalité (3.D) consiste, à partir d'un vecteur initial  $X^{(0)}$  à générer la suite  $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(k+1)}$  de la manière suivante :

$$X^{(k+1)} = M^{-1}NX^{(k)} + M^{-1}B \quad (4D)$$

Cette suite d'égalités peut être représentée par la relation itérative suivante :

$$X^{(k+1)} = TX^{(k)} + V \quad (5, D)$$

Où :

$$T = M^{-1}N \quad (6.D)$$

$$V = M^{-1}B \quad (7.D)$$

Il est évident qu'on doit choisir une matrice T qui assure la convergence de telle sorte que  $TX+V$  ne soit pas chère à calculer. Dans le cas de la méthode de Gauss-Seidel :

$$A = M - N \quad (8.D)$$

Où :

$$M = D - L \quad (9.D)$$

$$N = U \quad (10.D)$$

On réécrit (5.D) de la manière suivante :

$$X^{(k+1)} = (D - L)^{-1}UX^{(k)} + (D - L)^{-1}B \quad (11. D)$$

Comme l'inverse de (D-L) peut être compliqué à calculer, il est préférable d'écrire le système comme suit:

$$X^{(k+1)} = D^{-1}LX^{(k+1)} + D^{-1}UX^{(k)} + D^{-1}B \quad (12, D)$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient:



La méthode de RK4 est dérivée de la méthode d'Euler, elle utilise trois points intermédiaires pour progresser du point  $(x_i, y_i)$  au point  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  suivant les calculs suivants :

$$T1 = h * f(x_i, y_i) \quad (18, D)$$

$$T2 = h * f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{T1}{2}\right) \quad (19, D)$$

$$T3 = h * f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{T2}{2}\right) \quad (20, D)$$

$$T4 = h * f(x_i + h, y_i + T3) \quad (21, D)$$

$$Y_{i+1} = h * \frac{T1 + 2 * T2 + 2 * T3 + T4}{6} \quad (22, D)$$

Avec

$$h = x_{i+1} - x_i \quad (23, D)$$

Les méthodes de Runge-Kutta présentent les avantages et les inconvénients suivants :

Les avantages

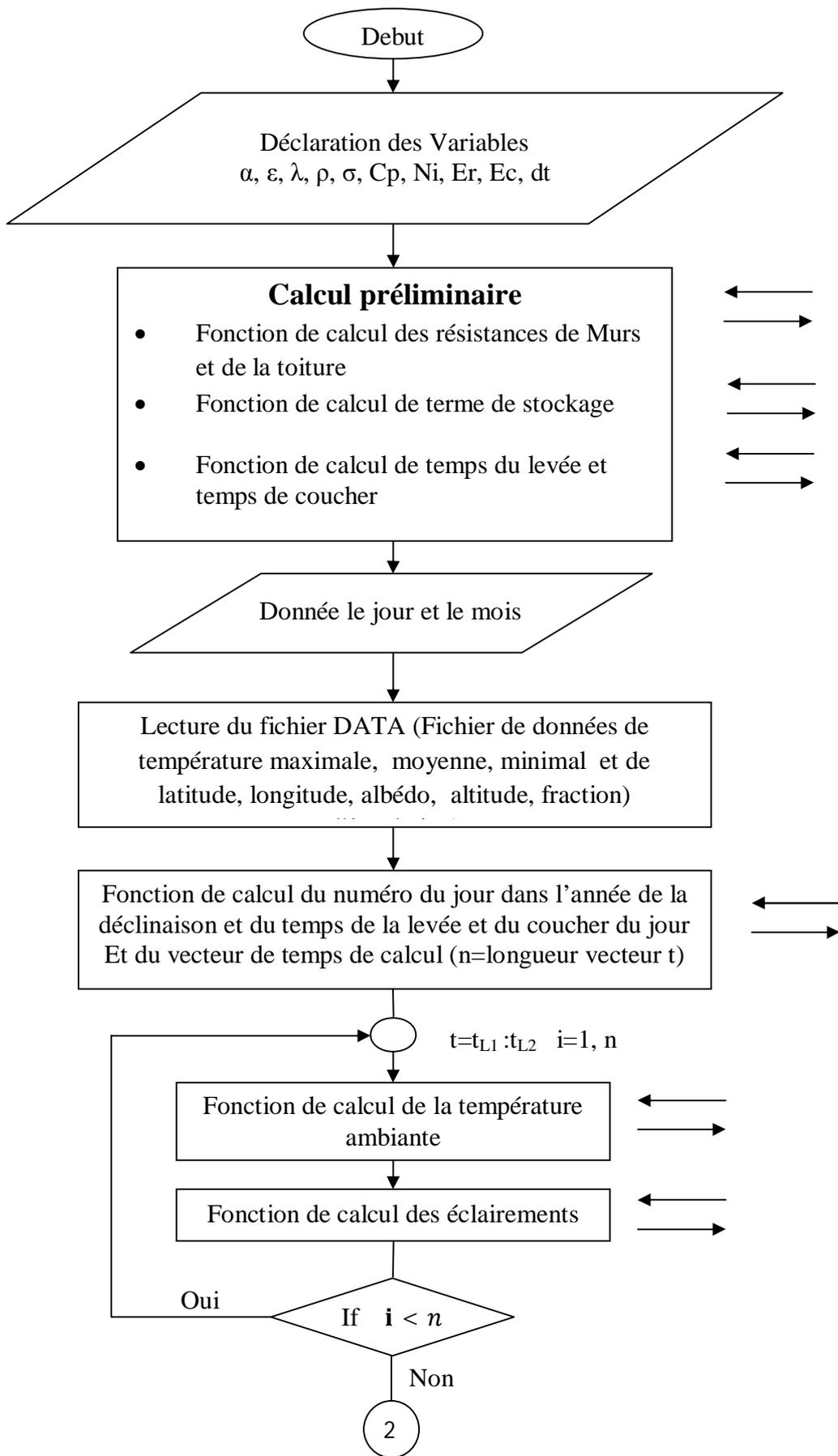
- Elles sont des méthodes à mise en route autonome grâce à l'utilisation des conditions initiales dès le début du calcul.
- Ce sont des méthodes pas à pas : pour obtenir  $y_{i+1}$  on n'a besoin que de l'information obtenue au point précédent  $(x_i, y_i)$ .
- Elles ne nécessitent pas le calcul des dérivées de  $f(x, y)$ .

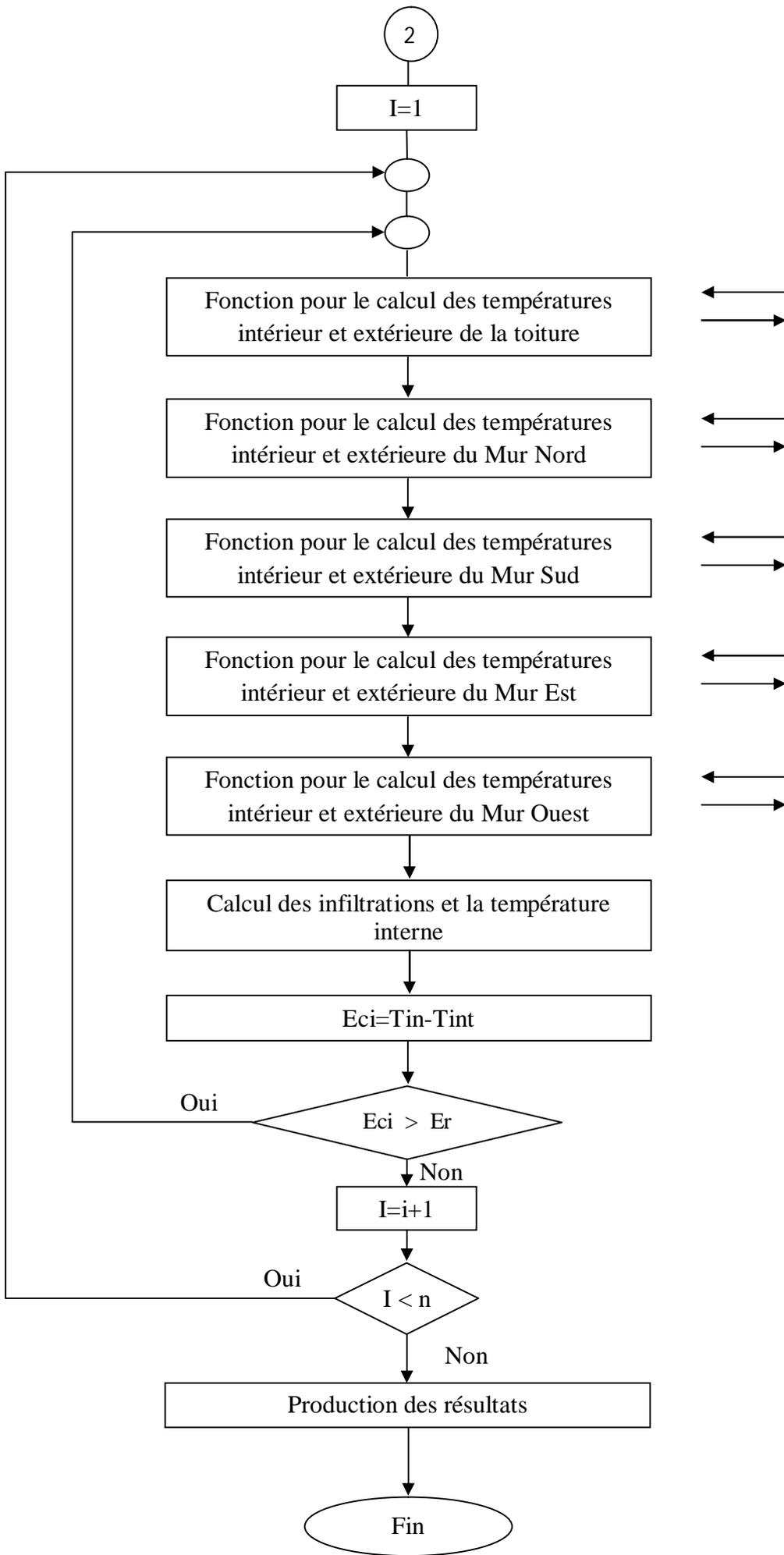
Les inconvénients

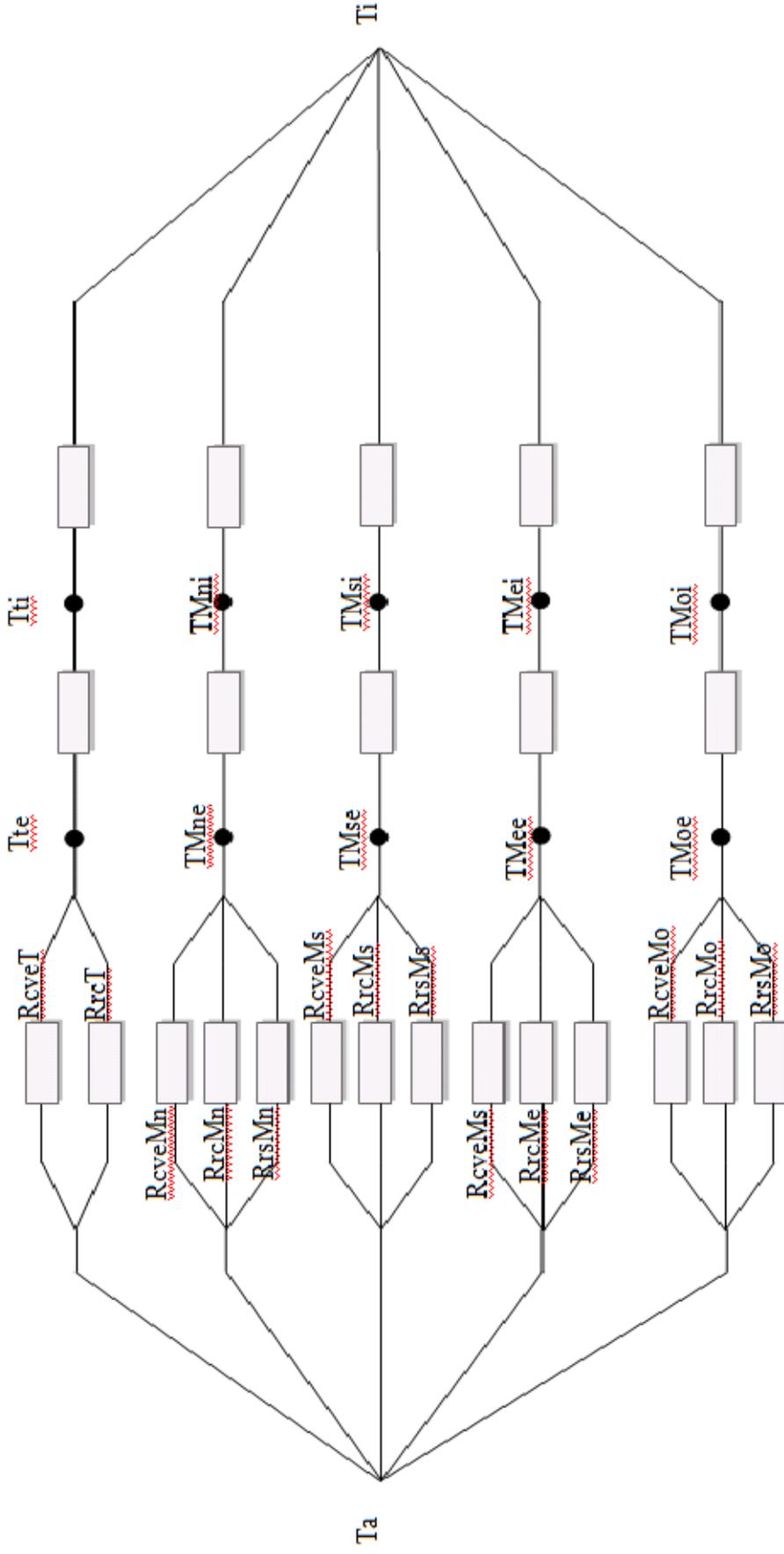
- Elles sont assez longues, exigeant à chaque pas plusieurs calculs de  $f(x, y)$ . La détermination de l'erreur de troncature n'est pas aisée. Cependant, certains auteurs ont donné des règles simples, comme Collatz si :  $\frac{|T2-T3|}{|T1-T2|}$  dépasse quelques centièmes il faut diminuer  $h$ .
- Ces méthodes peuvent donner dans certains cas de mauvais résultats même si les erreurs de troncature sont faibles, ce phénomène est dit « instabilité partielle » et l'équation différentielle est raide (de petites erreurs : troncature, arrondissement).

[1] Ch, Perrin de Brichambaut; C, Vauge. Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).

[2] J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).







**Schéma électrique de la cellule**

- $R_{cvT}$  : Résistance de convection externe toiture
- $R_{cvMn}, R_{cvMs}, R_{cvMe}, R_{cvMo}$  : Résistance de convection externe Mur nord, sud, est, ouest respectivement.
- $R_{rcT}$  : Résistance de rayonnement Toiture – Ciel
- $R_{rcMn}, s, e, o$  : Résistance de rayonnement Murs – Ciel
- $R_{rsMn}, s, e, o$  : Résistance de rayonnement Murs - Sol
- $T_{te}$  : Température toiture externe.
- $T_{Mee}, oe, se, ne$  : Température Murs externe est, ouest, nord, sud.
- $T_{Mei}, oi, si, ni$  : Température Murs interne est, ouest, nord, sud.