

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالأغواط

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Thèse

Présenté pour obtenir le Diplôme de Doctorat 3ème cycle LMD

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Thème

**UTILISATION DU SOLAIRE THERMIQUE PASSIF POUR LE
CONFORT THERMIQUE PAR TRAITEMENT DE L'AIR POUR
DIFFERENTES SAISONS.**

Présenté par Mr. BENCHATTI TOUFIK

Mr. ALLAOUI OMAR,

Professeur UAT LAGHOUAT

Président.

Mr. LEFKEIR IBENKHALDOUN,

Professeur UAT LAGHOUAT

Examineur

Mr. BOUNEIF ABDELHAMID,

Professeur CU RELIZANE

Examineur

Mr. KHRIS SAHRAOUI,

MCA CU TISSMSILT

Examineur

Mr. BOUABDELLAH SAID,

MCA UAT LAGHOUAT

Examineur

Mr. AHMED MEDJELLED,

Professeur UAT LAGHOUAT

Rapporteur

ANNEE UNIVERSITAIRE 2014/2015

TABLE DES MATIERES

Remerciement	
Liste des symboles	
Liste des tables	
Liste des figures	
Liste des graphes	
Résumé	01
Abstract.....	02
ملخص.....	03
Introduction générale	04

Chapitre I

Etat de l'art

1.1 Les exigences énergétiques.....	08
1.2 Développement économique des systèmes solaires thermiques.....	09
1.3 Confort thermique.....	09
1.3.1 Etude du confort thermique en laboratoire.....	11
1.3.2 le confort thermique dans la littérature.....	12
a. Approches analytiques.....	12
1.3.3 Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique.....	13
1.3.4 Les caractéristiques agissant sur le confort thermique.....	14
1.4 Rafraîchissement et climatisation.....	16
1.4.1 Les systèmes « fermés ».....	19
1.4.2 Les systèmes « ouverts ».....	19
1.5 Rafraîchissement solaire.....	20
1.6 Chauffage solaire passif.....	21
1.7 Solaire passif et gain direct.....	22
1.8 Conception de bâtiment.....	23
1.9 Energétique des bâtiments.....	23
1.10 Bâtiments passifs.....	24
1.11 Concepts et réglementations énergétiques des bâtiments.....	25
1.11.1 Le bâtiment à basse consommation ou « basse énergie »	26
1.11.2 Le bâtiment « passif »	26

1.11.3 Le bâtiment « producteur d'énergie ».....	26
1.11.4 Le bâtiment « zéro énergie » ou « zéro net ».....	26
1.11.5 Le bâtiment « à énergie positive ».....	26
1.11.6 Le bâtiment autonome	27
1.12 L'intégration conceptuelle dans le bâtiment.....	27
1.13 Méthodes d'évaluation et d'analyse.....	29
1.14 Analyse énergétique du bâtiment.....	29
1.15 Le bilan d'énergie et ses représentations.....	29

Chapitre II

Energies renouvelables

II.1 Les enjeux énergétiques	32
II.2 Mutation énergétique.....	34
II.3 Evaluation du besoin énergétique pour le chauffage et le rafraîchissement.....	34
II.4 Energie renouvelable.....	35
II.4.1 Classification des énergies renouvelables.....	35
II.4.2 Limite des énergies renouvelables.....	37
II.5 Energie solaire	38
II.5.1 Technologies solaires.....	39
II.5.2 Applications de la technologie solaire.....	40
II.6 capteurs solaires.....	41
II.6.1 Les capteurs solaires à air	41
II.6.2 Les capteurs à concentration parabolique.....	41
II.6.3 Les capteurs solaires photovoltaïques	42
II.6.4 Les capteurs solaires thermiques	42
II.7 Les capteurs solaires appliqués aux techniques de rafraîchissement solaire.....	43
II.8 Fluide caloporteur et récepteur solaire	43
II.8.1 Récepteurs solaires	44
II.8.1.1 Le récepteur à eau-vapeur.....	44
II.8.1.2 Le récepteur à sel fondu.....	45
II.8.1.3 Le récepteur à métal fondu.....	45
II.9 Limites de l'énergie solaire.....	46
II.10 Généralités sur le Soleil et le rayonnement solaire	47
II.11 Théorie de l'énergie solaire.....	49

II.11.1	<i>Translation et rotation de la terre</i>	49
II.11.2	<i>Le spectre solaire</i>	51
II.11.3	<i>Rayonnement solaire a la limite de l'atmosphère</i>	52
a.	<i>Eclairement d'un récepteur plan</i>	52
b.	<i>Le rayonnement solaire direct</i>	54
c.	<i>Le rayonnement solaire diffus</i>	54
d.	<i>Le rayonnement solaire global</i>	55
II.12	<i>L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire</i>	55
II.13	<i>Energie reçue par une surface horizontale située à l'extérieur de l'atmosphère</i>	56
II.14	<i>Estimation de l'éclairement solaire</i>	56
II.15	<i>Estimation solaire instantanée</i>	57
II.15.1	<i>Calcul le rayonnement solaire Direct normal</i>	57
II.15.2	<i>Calcul le rayonnement solaire diffus</i>	58
II.15.3	<i>Calcul le rayonnement solaire global</i>	59
II.16	<i>Rayonnement en Algérie</i>	60
II.17	<i>Diffusion de la chaleur et du froid</i>	60
II.18	<i>Production d'énergie</i>	61
II.19	<i>Conclusion</i>	61

Chapitre III

Confort thermique

III.1	<i>Introduction</i>	64
III.2	<i>La notion de confort thermique</i>	64
III.3	<i>Confort thermique</i>	67
III.4	<i>Les modèles du confort thermique</i>	69
III.4.1	<i>Le modèle de Fanger</i>	70
III.4.2	<i>Le modèle à deux noeuds de Gagge</i>	70
III.4.3	<i>Les modèles approfondis</i>	70
III.4.4	<i>Le modèle de Stolwijk.</i>	71
III.4.5	<i>Le modèle de Givoni</i>	71
III.5	<i>Conditions du confort thermique</i>	72

III.5.1	<i>Équilibre thermique</i>	72
III.6	<i>Confort thermique et Traitement de l'air</i>	72
III.7	<i>Besoin énergétique et confort thermique</i>	73
III.8	<i>Environnement et confort thermique</i>	73
III.9	<i>Paramètres du confort thermique</i>	74
III.9.1	<i>La température résultante</i>	74
III.9.2	<i>La température équivalente</i>	75
III.9.3	<i>La température effective</i>	75
III.9.4	<i>L'humidité de l'air</i>	76
III.9.5	<i>La vitesse de l'air</i>	76
III.10	<i>Confort thermique entre température et humidité</i>	76
III.10.1	<i>La plage de confort température-humidité</i>	76
III.10.2	<i>Condition hivernale</i>	77
III.10.3	<i>Conditions estivales</i>	78
III.11	<i>Détermination des zones de confort thermique</i>	81
III.12	<i>Les paramètres d'inconforts thermiques</i>	81
III.13	<i>Confort adaptatif</i>	83
III.14	<i>Confort et climat</i>	84
III.15	<i>Données climatiques</i>	85
III.15.1	<i>Exploitation des données climatiques</i>	86
III.15.2	<i>Dimensionnement par le climat</i>	87
III.15.3	<i>Le micro climat local</i>	87
III.16	<i>Analyse des éléments du climat</i>	89
III.16.1	<i>L'étude de soleil</i>	89
III.16.2	<i>Les radiations solaires</i>	90
III.16.3	<i>Température de l'air</i>	90
III.16.4	<i>L'humidité</i>	91
III.16.5	<i>L'évaporation</i>	91
III.16.6	<i>L'évapotranspiration potentielle (ETP)</i>	91
III.16.7	<i>Le vent</i>	91
III.16.8	<i>La végétation</i>	92
III.17	<i>Ventilation naturelle Systèmes de circulation d'air</i>	92
III.17.1	<i>Ventilation par mélange</i>	93
III.17.2	<i>Ventilation par déplacement</i>	94

III.17.3 Les systèmes tout air.....	94
III.17.4 Systèmes à débit constant.....	94
III .17.5 Systèmes à débit variable.....	94
III. 17.6 Systèmes utilisés en recyclage total.....	94
III.17. 7 Système fonctionnant avec récupérateur d'énergie.....	95
III.18 Conditions de soufflage.....	95
III.18.1 Soufflage à partir de parois.....	95
III.18.2 Soufflage radial à partir du plafond.....	95
III.18.3 Soufflage en allège sous fenêtre.....	96
III.19 Les échange de chaleur dans le confort thermique.....	97
III.19.1 Les échanges de chaleur sensible.....	98
a. La convection.....	98
b. Le rayonnement.....	99
c. La sensation thermique.....	101

Chapitre VI

Confort d'hiver et chauffage solaire

VI.1 introduction.....	106
VI.2 Confort d'hiver.....	107
VI.3 Chauffage solaire.....	107
VI.3.1 Description générale d'un chauffage solaire à air.....	108
VI.3.2 Choix de l'orientation et de l'inclinaison.....	109
VI.4 Rendement d'une installation de Chauffage solaire.....	109
VI.5 partie expérimentale.....	110
VI.5.1 Site expérimentale.....	110
VI.5.2 Acquisition des données météorologique.....	110
VI.5.3 Principe de fonctionnement.....	111
VI.5.4 Collection des données.....	111
VI.5.5 Description et fonctionnement du dispositif expérimental.....	112
VI.5.6 Résultats et discussions.....	114
VI.5.7 Interprétation des résultats et discussion.....	129
VI.5.8 conclusion.....	130

VI.6	<i>Le stockage de l'énergie renouvelable</i>	131
VI.6.1	<i>Introduction</i>	131
VI.6.2	<i>Types de stockage de l'énergie</i>	132
VI.6.3	<i>Techniques du stockage de l'énergie solaire (thermique)</i>	132
VI.6.4	<i>Systèmes de stockage thermique</i>	133
VI.6.5	<i>les caractéristiques d'un système de stockage thermique</i>	133
VI.7	<i>Milieu souterrain du stockage</i>	134
VI.8	<i>Le stockage souterrain de la chaleur</i>	135
VI.8.1	<i>Les critères du choix des matériaux accumulant de l'énergie</i>	136
VI.8.2	<i>Caractéristiques thermique du sol</i>	137
VI.8.3	<i>Profil de température du sol</i>	137
VI.8.4	<i>Humidité du sol</i>	139
VI.8.5	<i>Influence de l'humidité sur les caractéristiques thermique du sol</i>	139
VI.8.6	<i>Transfert de chaleur dans le sol</i>	140
VI.8.7	<i>Propriétés du sol et variations de température de la surface</i>	141
VI.8.8	<i>Estimation de la température du sol</i>	141
VI.8.9	<i>Comportement général des températures du sol</i>	143
VI.8.10	<i>Avantage du stockage thermique dans le sol</i>	145
VI.9	<i>Analyse thermique</i>	146
VI.10	<i>Modèle physique</i>	146
VI.11	<i>Le Modèle Mathématique</i>	148
VI.11.1	<i>Cas stationnaire</i>	148
VI.11.2	<i>Cas non stationnaire</i>	150
VI.11.3	<i>Conditions aux limites</i>	150
VI.12	<i>Présentation de l'évolution de la température en 3D au cours du temps</i>	152
VI.13	<i>Détermination des dimensions du domaine de stockage</i>	152
VI.14	<i>Coefficient global de transfert de chaleur</i>	153
VI.15	<i>La puissance de stockage</i>	155
VI.16	<i>La quantité de chaleur stockée</i>	157
VI.17	<i>La quantité de chaleur déstockée</i>	158
VI.18	<i>Le rendement d'un stockage thermique</i>	158
VI.19	<i>Comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée</i>	159
VI.20	<i>Commentaires</i>	161
VI.21	<i>Conclusion</i>	162

Chapitre V

Confort d'été et rafraîchissement passif

V.1	Introduction.....	164
V.2	Confort d'été.....	165
V.3	Rafrâichissement passif, climatisation et conditionnement d'air.....	165
V.4	Rafrâichissement passif	166
V.5	Les principes physiques rafraîchissement passif.....	166
V.5.1	Le transfert par conduction.....	167
V.5.2	Le transfert par convection.....	167
a-	Convection naturelle (ou libre).....	167
b-	Convection forcée.....	167
V.5.3	Le transfert par rayonnement.....	167
V.6	Les principes de rafraîchissement.....	167
V.7	Climatisation et l'énergie.....	168
V.8	La climatisation passive.....	168
V.8.1	Système de climatisation.....	169
V.8.2	Les charges de climatisation (bilan énergétique).....	169
a.	Les charges sensibles.....	169
b.	Les charges latentes.....	169
V.9	conditionnement d'air.....	170
V.10	Minimiser les apports de chaleur.....	170
V.11	Evacuation de la chaleur et l'apport du froid.....	171
V.12	Réalisations antérieures.....	171
a.	Le bâtiment de l'OMM - Organisation Météorologique Mondiale.....	171
b.	Le bâtiment Building Research Establishment Architects.....	171
c.	Le bâtiment de l'Office fédéral de la statistique Architectes.....	172
d.	Le bâtiment de l'école «Tanga» Architectes: CNA – Christer Nordström Architects	172
V.13	Généralités Dans Le Domaine De La Dessiccation.....	172
V-13-1	la technologie à dessiccation en cycle ouvert.....	172
V-13-1-1	Le desiccant cooling.....	172

V-13-1-2 système dessiccation utilisant des capteurs à air	174
V.13.2 Déshumidification de l'air par dessiccation.....	175
V.13.3 Types de matériaux dessiccants.....	175
V.13.2.1 Les adsorbants.....	175
a. Les charbons actifs.....	175
b. Les gels de silica.....	175
c. Les alumines activées.....	175
V.14 partie expérimentale.....	176
V.14.1 Collection des données.....	176
V.14.2 Description du dispositif expérimental.....	176
V.14.3 Fonctionnements du dispositif expérimental.....	179
V.14.4 Résultats et discussions.....	180
a. Diffusion par Convection naturelle.....	180
b. Diffusion par Convection Forcée.....	182
c. Diffusion par Convection Forcée avec un circuit d'humidification plus important et un taux de dessiccation plus élevé.....	184
V.14.5 Interprétation des résultats.....	197
Conclusion générale.....	199
Références bibliographiques.....	201
Annexe.....	214

REMERCIEMENT

Je remercie tout d'abord dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie monsieur MEDJELLED AHMED, professeur à l'université de Laghouat. En tant que Directeur de mémoire, pour m'avoir offert les conditions favorables et pour m'avoir parfaitement guidé tout le long de la réalisation de ce travail.

Je remercie aussi monsieur BENCHATTI AHMED, professeur à l'université de Laghouat.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur ALLAOUI OMAR, professeur à l'université de Laghouat, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur LEFKEIR IBENKHALDOUN, professeur à l'université de Laghouat d'avoir accepté d'examiner ce travail doctoral.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à Monsieur BOUNEIF ABDELHAMID, Professeur à l'université de RELIZANE, d'avoir accepté d'examiner ma thèse de Doctorat.

Ainsi, je passe mes salutations distinguées à Monsieur KHRIS SAHRAOUI, Professeur à l'université de TISSMSILT, d'avoir accepté d'examiner cette thèse de recherche.

Enfin, j'adresse mon profond respect à Monsieur BOUABDELLAH SAID, Professeur de l'université de Laghouat, pour avoir bien voulu juger ce travail de recherche.

Je remercie aussi monsieur MOUKHTAR AOUSSE, SEBAA MOHAMED, ET AISSA BENHORMA.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A

Ma mère et Mon père

Ma femme

Mes frères et sœurs

Toute la famille Benchatti Et La Famille Guessoum.

LISTE DES SYMBOLES

M	Taux du métabolisme	[W/m ²]
W	Travail externe	[W/m ²]
Q _{res}	Flux de chaleur échangé par voie respiratoire	[W/m ²]
Q _{sk}	Flux de chaleur échangé à la surface cutané	[W/m ²]
C _{res}	Flux de chaleur échangé par convection respiratoire	[W/m ²]
E _{res}	Flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire	[W/m ²]
C	Flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface du beau	[W/m ²]
R	Flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface du beau	[W/m ²]
K	Flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface du beau	[W/m ²]
E _{sk}	Flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface du beau	[W/m ²]
S _{cr}	Taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps	[W/m ²]
S _{sk}	Taux de chaleur stockée dans le beau	[W/m ²]
α	Fraction de la masse corporelle concentrée dans la beau	
m	La masse corporelle	[kg]
C _{p,b}	Chaleur spécifique du corps	[KJ/Kg.K]
$\theta =$	Temps	[s]
C	Flux de chaleur convectif	[W/m ²]
f _{cl}	Facteur d'habillement.	
h _c	Coefficient d'échange convectif	[W/m ² .K]
t _{cl}	Température de la surface externe du vêtement	[°C]
t _a	Température d'air	[°C]
R	Flux de chaleur radiatif,	[W/m ²]
h _r	Coefficient d'échange radiatif linéarisé,	[W/m ² .K]
t _{cl}	Température de la surface externe du vêtement	[°C]
$\bar{t}_r$	Température radiante moyenne	[°C]
ε	Émissivité moyenne du corps	
σ	Constante de stefan-Boltzmann 5.67×10^{-8}	[W/m ² K ⁴]
f _{eff}	Coefficient effectif de surface rayonnante	
(C+R)	Echange de chaleur sensible cutané	[w/m ²]

t_0	Température opérative	[°C]
h	Coefficient d'échange de chaleur sensible	[W/m ² .K]
R_{cl}	Résistance thermique vestimentaire	[m ² .K/W]
S	Surface extérieure du tube	[m ²]
C_p	Capacité calorifique	[kJ/kg. °K]
H	Teneur en eau	[%]
r	Rayon du cylindre	[m]
r_0	Rayon intérieur du tube	[m]
Q	Quantité de chaleur	[W]
q	Flux de chaleur	[W/ m ²]
T	Température	[°C]
T_i	Température d'entrée	[°C]
T_e	Température de sortie	[°C]
T_s	Température du sol	[°C]
T_∞	Température du sol loin du tube	[°C]
t	Temps	[h]
U	Coefficient global du transfert de chaleur	[W/ m ² .°C]
z	Longueur du tube	[m]
λ	Conductivité thermique	[W/m.°C]
T	La température moyenne pour une période donnée	[°C]
A	La différence entre les températures max et min pour la période donnée,	[°C]
x	La profondeur sous la surface	[m]
a	La diffusivité thermique K/C _v .	[m ² / s]
Δx	Le pas de la grille dans la direction x	[m]

LISTE DES TABLES

Tableau II -1	Durée des saisons.....	50
Tableau II -2	Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique (Ministère de l'énergie et des Mines).....	61
Tableau III-1	Les vitesses des vents (L'échelle de Beaufort des vents).....	82
Tableau III-2	Les échelles de la sensation thermique	104
Tableau VI-1	Température de sortie maximale pour la période de 10 au 20 décembre	129
Tableau VI-2	Température de sortie max du mois de janvier.....	131
Tableau VI-5	Le rendement d'un stockage thermique	162
Tableau VI-4	Comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée	
Tableau V -1	L'écart de température maximal et l'humidité pour la période de 03 juillet au 09 juillet	196

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Schéma de fonctionnement d'une machine à absorption Source : Rhônealénergie - Environnement.....	17
Figure II-1 : La structure du soleil.....	49
Figure II-2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	52
Figure II-3 : Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice.....	54
Figure II-4 : Représentation dans le plan azimutale des coordonnées (a, h) du soleil dans le cas d'un capteur situé dans l'hémisphère nord [91].....	55
Figure II-5 : Rayonnement solaire annuel en [kWh/m ² /an].....	60
Figure III-1: Interaction entre le climat et les activités humaines (Source: OMM, 1997).....	89
Figure III-2: Représentation graphique de la coupe transversale d'un îlot de chaleur urbain.....	90
Figure III-3: Coordonnées horizontales du soleil (azimut et hauteur).....	91
Figure III-4: Puissance solaire reçue en hiver et en été sur les surfaces horizontales et verticales orientées sud et à l'ouest (Source : CERTU Lyon, Juillet 2003).....	92
Figure VI-1: Mini station météorologique.....	110
Figure VI-2: Capteur solaire.....	116
Figure VI-3: Système solaire-géothermique expérimental multifonction couplé à une pompe à chaleur.....	138
Figure VI-4: Exemple de la relation entre la profondeur et les températures annuelles du sol.....	139
Figure VI-5: le modèle théorique simplifié.....	150
Figure VI-6: Le profil de température dans le domaine de transfert en 3D.....	154
Figure VI-7: Système stockage/ déstockage à plusieurs tubes.....	164
Figure V- 1 : Schéma du système à dessiccation.....	173
Figure V- 2: Schéma de principe d'une installation de production de froid par DEC et capteurs à air.....	174
Figure V-3: climatiseur par dessiccation	177
Figure V-4: capture solaire d'air	177
Figure V-5: boîte de dessiccation.....	178
Figure V-6: humidificateur.....	178

Figure V-7: Quatre tuyères pour l'admission de l'air.....	178
Figure V-8: Ventilateurs.....	178
Figure V-9: humidificateur. Longueur 1m.....	184
Figure V-10: boîte de dessiccation avec deux tiroirs de gel- silica.....	185

LISTE DES GRAPHEs

Graphe 1-1 Effet de la masse interne sur les fluctuations de la température intérieure.....	22
Graphe II -1 Variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons.....	52
Graphe II-2 Variations annuelles de l'irradiation quotidienne d'une surface réceptrice horizontale située hors atmosphère avec différentes latitudes.....	53
Graphe II-3 Diagramme solaire [121].....	56
Graphe II-4 Variation de l'énergie extraterrestre reçue par une surface horizontale.....	57
Graphe III-1 Pourcentages prévisibles d'insatisfaits (PPD).....	74
Graphe III-2 : La plage de confort température-humidité.....	78
Graphe III-3 Plages de confort pour une activité de bureau et un habillement d'été ou d'hiver.....	83
Graphe III-4 Températures opératives correspondantes aux différentes plages de confort définies par la norme NBN EN 15251.....	85
Graphe VI -1: la variation de la température pour la journée du (20/12/2013).....	117
Graphe VI -2: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (20/12/2013).....	117
Graphe VI -3: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (20/12/2013).....	117
Graphe VI -4: la variation de la température pour la journée du (21/12/2013).....	118
Graphe VI -5: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (21/12/2013).....	118
Graphe VI-6: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(21/12/2013).....	118
Graphe VI -7: la variation de la température pour la journée du (22/12/2013).....	119
Graphe VI -8: La variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (22/12/2013).....	119
Graphe VI -9: La variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(22/12/2013).....	119
Graphe VI -10: la variation de la température pour la journée du (23/12/2013).....	120
Graphe VI -11: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie	

pour la journée du (23/12/2013).....	120
Graphes VI -12: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(23/12/2013).....	120
Graphes VI -13: la variation de la température pour la journée du (24/12/2013).....	121
Graphes VI -14: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (24/12/2013).....	121
Graphes VI -15: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(24/12/2013).....	121
Graphes VI -16: la variation de la température pour la journée du (25/12/2013).....	122
Graphes VI -17: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (25/12/2013).....	122
Graphes VI -18: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(25/12/2013).....	122
Graphes VI -19: la variation de la température pour la journée du (26/12/2013).....	123
Graphes VI -20: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (26/12/2013).....	123
Graphes VI -21: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(26/12/2013).....	123
Graphes VI -22: la variation de la température pour la journée du (27/12/2013).....	124
Graphes VI -23: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (27/12/2013).....	124
Graphes VI -24: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (27/12/2013).....	124
Graphes VI -25: la variation de la température pour la journée du (28/12/2013).....	125
Graphes VI -26: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (28/12/2013).....	125
Graphes VI -27: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(28/12/2013).....	125
Graphes VI -28: la variation de la température pour la journée du (29/12/2013).....	126
Graphes VI -29: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (29/12/2013).....	126
Graphes VI -30: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(29/12/2013).....	126
Graphes VI -31: la variation de la température pour la journée du (30/12/2012).....	127

Graphe VI-32: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (30/12/2012).....	127
Graphe VI -33: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (30/12/2013).....	127
Graphe VI -34: la variation de la température pour la journée du (31/12/2012).....	128
Graphe VI-35: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (31/12/2012).....	128
Graphe VI -36: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (31/12/2013).....	128
Graphe VI-37: la variation de la température maximal et la température d'entrée ainsi que l'écart de la température ($T_s - T_e$).....	130
Graphe VI -38: la variation de la température maximal et la température d'entrée ainsi que l'écart de la température ($T_s - T_e$)	132
Graphe VI-39: Le profile de température autour et le long du tube.....	155
Graphe VI-40: coefficient global de transfert de chaleur en fonction du débit de fluide caloporteur pour différentes T_e	158
Graphe VI-41: Puissance de stockage.....	160
Graphe V-1: exemples d'évolution des températures pour un logement collectif (a) et pour une maison individuelle (b).....	165
Graphe V-2: Température ambiante dans le temps pour la journée (01-07-2014).....	180
Graphe V-3: Flux naturel d'air en [m^3/s] pour la journée (01-07-2014).....	181
Graphe V-4: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (01/07/2014).....	181
Graphe V-5: Variation de la température avant et après humidification pour la journée (01-07-2014).....	182
Graphe V-6: Variation des températures avant et après humidification pour la journée (02-07-2014).....	183
Graphe V-7: la variation de l'écart de température pour la journée (02-07-2014).....	184
Graphe V-8: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée Du (02/07/2014).....	184
Graphe V-9: la variation de la température ambiante et la température de sortie pour la Journée du(03-07-2014).....	186
Graphe V-10: la variation de l'écart de température pour la journée (03-07-2014).....	186

Graph V-11: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (03/07/2013).....	187
Graph V-12: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (04-07-2013).....	187
Graph V-13: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (04/07/2014).....	188
Graph V-14: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (04/07/2014).....	188
Graph V-15: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (05-07-2014).....	189
Graph V-16: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (05/07/2014).....	189
Graph V-17: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(05/07/2014).....	190
Graph V-18: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du(06-07-2014).....	190
Graph V-19: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (06/07/2014).....	191
Graph V-20: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (06-07-2014).....	191
Graph V-21: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (07-07-2014).....	192
Graph V-22: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie Pour la journée du (07/07/2014).....	192
Graph V-23: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (07-07-2014).....	193
Graph V-24: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (08-07-2014).....	193
Graph V-25: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (08/07/2014).....	194
Graph V-26: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (08-07-2014).....	194
Graph V-27: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (09-07-2014).....	195

Graphe V-28: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (08/07/2014).....	195
Graphe V-29: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (09-07-2014).....	196

RESUME

L'utilisation des énergies solaires n'est pas liée uniquement à ses avantages économiques mais surtout à la protection de l'environnement ou il faut trouver des solutions aux problèmes de pollution (énergie propre). Dans la nature, on trouve plusieurs sources d'énergies renouvelables notamment le solaire. Le solaire thermique est aujourd'hui techniquement fiable et de nombreuses réalisations existent (chauffes eau solaires, maisons solaires, capteurs solaires...).

Notre projet consiste à subvenir aux besoins d'un local ou d'une habitation en chaleur en hiver et en air frais en été par un processus d'humidification. Pour cette raison des dispositifs spécialement conçus pour cette fin ont été réalisés. On compte mener une série de prises de mesures pour différentes saisons pour décider sur les possibilités de son utilisation pour assurer les conditions du confort thermique en termes de température et d'humidité. Tout en essayant de limiter au maximum les pertes de chaleur.

L'énergie solaire peut être utilisée pour assurer le confort thermique de l'homme (chauffage et rafraichissement d'air) avec traitement d'air en jouant sur la variation des paramètres thermiques, température et humidité pour différentes situations de l'homme et la maîtrise de l'aspect architectural qui influent considérablement sur l'assurance des meilleurs conditions exigées par la réglementation pour éviter l'inconfort.

Dans un premier temps, on donne un aperçu sur l'importance de l'énergie renouvelable en général et l'énergie solaire en particulier. Complété par l'étude des conditions du confort thermique chauffage et conditionnement d'air. Les différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire sont exposées et évaluées à partir d'indicateurs énergétiques saisonniers. Complété par un travail expérimental.

L'installation d'une mini station météo pour l'étude des conditions climatiques de la région a permis l'obtention des valeurs réelles, nécessaires pour le projet. L'installation expérimentale pour le rafraichissement a permis la réduction des conditions de l'inconfort dans un local et a donné une bonne sensation chez les occupants. Pour l'hiver, étant donné que la technologie de captation de l'énergie solaire est suffisamment étudiée, le problème posé est le stockage de l'énergie solaire ou le doctorant propose une solution pratique pour l'amélioration de l'efficacité énergétique, en utilisant un support solide continu compose principalement d'un sol sableux insaturé et à l'aide d'une nouvelle approche analytique.

L'intégration de ces méthodes simples et peu couteuses dans le bâtiment et prévu dans cette étude.

ملخص

استخدام الطاقة الشمسية لا يرتبط فقط بالفوائد الاقتصادية، وإنما بمجال حماية البيئة أين من الضروري إيجاد حلول لمشاكل التلوث (الطاقة النظيفة). في الطبيعة، هناك العديد من مصادر الطاقة المتجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية. ويمكن الاعتماد على الطاقة الشمسية الحرارية من الناحية الفنية والعديد من الإنجازات موجودة (سخانات المياه، والمياه بالطاقة الشمسية والمنازل الشمسية، والطاقة الشمسية ...).

مشروعنا يعمل على تلبية احتياجات محل أو مسكن من الحرارة في الشتاء و من الهواء المكيف في الصيف من خلال عملية الترطيب. ولهذا السبب قمنا بتصميم أجهزة لهذا الغرض. وقد أجرينا سلسلة من التجارب لمواسم مختلفة و ذلك لتحديد إمكانيات استخدام هذه الأجهزة لضمان ظروف الراحة الحرارية من حيث درجة الحرارة والرطوبة. مع السعي للحد من فقدان الحرارة.

تستخدم الطاقة الشمسية لضمان راحة الإنسان الحرارية (التدفئة وتبريد الهواء)، وذلك بمعالجة الهواء و تغيير المعلمات الحرارية (درجة الحرارة والرطوبة) لحالات مختلفة للإنسان و التمكن من الجانب المعماري الذي يؤثر تأثيرا كبيرا على ضمان أفضل الشروط التي يتطلبها اللوائح لمنع عدم الراحة.

أولا، قمنا بتحديد أهمية الطاقة المتجددة في العام و الطاقة الشمسية على وجه الخصوص. نستكمل دراسة شروط التكيف الحراري، التدفئة وتكييف الهواء. ومختلف التقنيات لإنتاج البرودة من الطاقة الشمسية وتقييمها من مؤشرات الطاقة الموسمية. نستكمل بالعمل التجريبي

وقد سمح تركيب محطة طقس مصغرة دراسة الظروف المناخية في المنطقة و الحصول على القيم الفعلية اللازمة للمشروع. المنشأة التجريبية الخاصة بالتبريد سمحت بتقليص ظروف عدم الراحة في محل وأعطت شعور جيد لشاغلي المسكن. في فصل الشتاء، و لأن الإقبال على تكنولوجيا الطاقة الشمسية تدرس بما فيه الكفاية، فإن المشكلة تكمن في كيفية تخزين الطاقة الشمسية ابن اقترحنا حلا عمليا لتحسين كفاءة الطاقة، باستخدام دعم قوي مستمر يتألف أساسا من التربة الرملية غير المشبعة وباستخدام المنهج التحليلي الجديد.

دمج هذه الطرق بسيط وغير مكلف في المبنى وهو منصوص عليه في هذه الدراسة..

Abstract

The use of solar energy is not only linked to its economic benefits, but especially in environmental protection or it is necessary to find solutions to pollution problems (clean energy). In nature, there are several renewable energy sources including solar energy. Solar thermal is now technically reliable and many achievements exist (heaters, solar water, solar homes, solar ...). Our project is to meet the needs of a local or a residential with heat in winter and air spawning in summer by a humidification process. For this reason the devices designed for this purpose have been realized. There are conducting a series of measures taken to different seasons to determine the possibilities of its use to ensure the conditions of thermal comfort in terms of temperature and humidity. And trying to minimize heat loss.

Solar energy can be used to ensure human thermal comfort (heating and air cooling) with air handling playing on the variation of thermal parameters, temperature and humidity for different situations of men and mastery of the architectural aspect that significantly affects the assurance of the best conditions required by regulation to prevent discomfort.

First, it outlines the importance of renewable energy in general and solar anergy in particular. Complemented by the study of the conditions of thermal comfort heating and air conditioning. The different cold production technologies from solar energy are exposed and evaluated from seasonal energy indicators. Complemented by experimental work.

The installation of a mini weather station for the study of climate conditions in the region has allowed to obtaining the actual values required for the project. The experimental setup for the refresh to permit reducing conditions in a local discomfort and gave a good feel for occupants. For winter, since uptake of solar energy technology is sufficiently studied, the problem is the storage of solar energy where the student provides a practical solution to improving energy efficiency, using a continuous solid support composed mainly of an unsaturated sandy soil and using a new analytical approach.

The integration of these simple and inexpensive methods in the building and provided for in this study.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

A travers l'histoire, de nombreux philosophes ont décrit la recherche du bonheur comme la première et plus essentielle motivation d'un être humain. Le confort thermique est une composante de ce bonheur qui contribue au bien-être de l'individu en environnement construit.

L'interaction entre l'homme et son environnement a été le sujet de nombreuses études traitant du confort thermique. L'homme étant un homéotherme, il s'adapte aux différentes conditions climatiques en actionnant des mécanismes physiologiques lui permettant de garder une température centrale autour de 37 °C.

La notion du confort thermique est assez difficile à définir de façon précise car elle est très subjective. Certains individus appelleront une ambiance confortable, une ambiance paraissant surchauffée ou encore trop fraîche à d'autres... En fait, il est plus facile de mettre en évidence la notion d'inconfort car on parlera d'ambiance inconfortable ressentie sur le plan physiologique lorsque le corps humain doit faire appel à ses mécanismes régulateurs internes, ce qui se traduit par une sensation désagréable. Le confort thermique est fonction de divers paramètres qui sont imposés par le milieu (température, humidité et vitesse de l'air, température radiante des corps environnants, ...) soit propres aux individus (le métabolisme, l'activité, l'âge, le sexe des individus, ...). Une approche réaliste de l'étude du confort consiste à ne prendre en compte que quelques uns de ces paramètres parmi les plus importants.

Malgré les écarts importants entre individus II est possible de définir clairement une ambiance inconfortable pour un individu donné. Sur un échantillon représentatif d'êtres humains et à partir d'une étude statistique. Tout critère de confort thermique devra être défini [1]. C'est, ce qui est effectivement fait dans les laboratoires qui se préoccupent du confort thermique (Prof .Fanger de l'université de Lingby Danemark). Dans les conditions définies au départ, Il est nécessaire de fixer les paramètres caractéristiques de l'environnement qui peuvent entraîner une sensation d'inconfort.

Actuellement, la prise en compte du confort thermique dans les bâtiments se fait avec des méthodes et des outils élaborés à partir d'approches statiques, simplifiant la complexité des phénomènes interactifs. Ainsi, les exigences constructives et les recommandations pour les concepteurs ne sont pas adaptées pour anticiper des ambiances thermiques changeantes. Elles favorisent le surdimensionnement des équipements de contrôle et de régulation des ambiances thermiques (systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de climatisation), principales sources de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, dans le bâtiment.

Contrairement aux idées reçues, le confort thermique n'est pas qu'une question de température mais également d'humidité relative, ainsi que d'autres paramètres comme la qualité d'air. Le confort thermique est non seulement lié à la solution de chauffage mais également au mode de régulation de température associée. Pour cela le dispositif de régulation et de programmation de température de confort permettra en continu d'obtenir le confort thermique des occupants.

Pendant des siècles, les hommes se sont efforcés de traiter le confort en été de façon passive, par l'architecture et la morphologie urbaine. Les années 70, avec le développement de la climatisation, représentent une révolution culturelle pour la notion de confort d'été.

La notion de confort thermique est essentielle dans le bilan énergétique dans le sens où c'est le premier critère à obtenir, avec certes la meilleure efficacité énergétique possible et l'économie d'énergie les plus importantes possibles.

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1 Les exigences énergétiques

Depuis 20 ans, nous pouvons constater que le comportement et les inquiétudes de l'homme ont évolué face aux problèmes concernant le changement climatique et les consommations d'énergies. En effet, l'être humain a finalement pris conscience qu'il jouait un rôle dominant dans le changement climatique auquel nous faisons face, notamment dus aux émissions de CO₂ provenant de nos consommations d'énergie. Par conséquent et afin de réduire l'utilisation coûteuse des énergies primaires et donc les émissions de CO₂, il est devenu de plus en plus courant de recourir à l'utilisation d'énergies renouvelables et/ou au stockage de la chaleur pour assurer le confort thermique de l'homme.

On appelle énergies renouvelables, les énergies issues de sources non fossiles renouvelables (énergies solaire, éolienne, géothermique, marémotrice, hydroélectrique, bioénergies...) Ces énergies sont présentes partout. Elles sont inépuisables grâce aux cycles naturels, mais sont également diffuses et présentent pour la plupart des potentiels variables selon la localisation géographique et les facteurs climatiques. Par ailleurs, elles n'ont que peu d'impacts négatifs sur l'environnement : leur exploitation n'engendre en effet pas d'émissions de gaz à effet de serre, si bien qu'elles s'avèrent être un outil considérable de lutte contre le changement climatique.

Les usages thermiques à basse température, sont ceux qui peuvent être le plus facilement satisfaits par l'utilisation des énergies renouvelables et qui sont directement à portée de décision du citoyen. On redécouvre à cette occasion tout l'intérêt des systèmes solaires thermiques. Le flux solaire peut en effet être directement converti en chaleur, au moyen de capteurs solaires thermiques actifs. Cette technique est applicable au chauffage des habitations, des piscines, à la production d'eau chaude sanitaire (ECS), ou encore au séchage des récoltes (fourrage, céréales, fruits). L'énergie solaire thermique présente deux avantages fondamentaux : elle est une source inépuisable d'approvisionnement en énergie et son usage ne produit ni émission de polluants, ni déchets.

Ainsi, à l'heure où les questions énergétiques et environnementales sont de plus en plus préoccupantes et où la réglementation thermique appelle à une plus grande prise en compte du confort intérieur, les professionnels du bâtiment font recours à l'usage des sources renouvelables. En effet, moyennement le secteur du bâtiment représente environ 40% de la consommation d'énergie finale et contribue à 36% des émissions de gaz à effet de serre [2]. Le chauffage et la climatisation représentent près de 70% de ces consommations d'énergie et la majeure partie des émissions de CO₂ du secteur [3].

Les installations de chauffage et de climatisation font partie des domaines les plus concernés pour atteindre ces objectifs. En effet, depuis une quinzaine d'années, les exigences des occupants de bâtiments tertiaires ou d'habitations ont sensiblement changé. On observe une demande de confort de plus en plus rigoureuse en particulier en période estivale. Cette augmentation des besoins de climatisation induit un accroissement important de la consommation d'électricité car les technologies classiques (à compression mécanique de vapeur) mises en œuvre sont très énergivores [4].

1.2 Développement économique des systèmes solaires thermiques

Depuis plus de 30 ans, les installations solaires thermiques apportent une contribution importante à la protection du climat et à la stabilité de l'alimentation en énergie [1]. Les systèmes des débuts sont devenus, au cours des 30 dernières années, des installations de niveau professionnel, fabriquées à l'échelle industrielle. Dans de nombreux pays d'Europe, en Asie et autour de la Méditerranée, on assiste à une forte croissance du marché des installations solaires thermiques. Afin de permettre la comparaison du solaire thermique avec d'autres filières énergétiques, un nouvel indicateur présentant l'équivalent de la surface solaire thermique installée en puissance thermique, 0,7 kWth par m² installé, est parfois utilisé. Ce facteur de conversion est agréé par l'IEA-SHC (International Energy Agency – Solar Heating and Cooling Programme) et par les associations de promotion du solaire [5].

Aujourd'hui, la recherche se focalise sur l'étude des procédés de faibles puissances frigorifiques. Ces installations ont pour objectif d'élargir le marché des systèmes de rafraîchissement solaire au résidentiel, ce qui représente un enjeu environnemental important. Toutefois, l'aspect économique reste un frein majeur à leur développement. Le programme européen ROCOCO [6], destiné à évaluer le coût des installations de rafraîchissement solaire en Europe rapporte des coûts variant entre 2745 et 5173 €/kWf pour l'absorption. Les valeurs varient entre 3457 et 4404 €/kWf pour les installations à dessiccation. L'étude et le développement de ces procédés passe donc par une phase d'optimisation des performances globales, en particulier les consommations électriques, mais aussi par la réduction des coûts d'investissement, de fonctionnement et de maintenance.

1.3 Confort thermique

Le domaine du confort thermique de la thermorégulation a été bien étudié par un certain nombre de chercheurs tels que Nicol et al. (1995), McIntyre (1980) et de Hensel (1981) d'une

part et un certain nombre de thèses en PhD dont les travaux ont été publiés dans des revues spécialisés d'une autre part traitant l'étude des paramètres du confort [7], ou l'utilisation du conditionnement de l'air par exemple à Singapour [8], ou le confort sous des conditions non uniformes[9], ou le confort par ventilation personnelle [10-11]. Nous nous intéressons dans cette recherche bibliographique de trouver un point de convergence entre les différents travaux réalisés dans le domaine.

Les modèles de confort thermique reliant les variables de l'environnement et les individus pour déterminer les meilleures conditions dans un local rafraîchi restent toujours subjective à cause de la variabilité des paramètres du confort d'un individu à un autre. La zone du confort a été calculée pour la première fois en 1923 par les ingénieurs F.C. Houghton Et Constantin Yaglou au laboratoire de Pittesbourgh de Américan SOCIETY of Heating and Ventilating Enginneers (ASHVE). Ils ont imaginé et utilisé une variable toute neuve : la température effective qui prend en compte à la fois la chaleur et l'humidité. Elle exige des mesures de la température faites par deux types de thermomètres, le bulbe sec, dry- bulb, et le bulbe humide, le wet-bulb, et l'utilisation de la carte psychométrique, mise au point par Willis Carrier. Les Ingénieurs en froid et de l'air Conditionné de L'American Society of Heating, définissaient le control thermique comme «l'état d'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement ». Comparé à la méthode de mesure des années 20, le calcul de la zone du confort s'est avéré inexact et subjective en tant que définition [12]. Ackermann s'étend sur cette subjectivité à travers l'architecte Heschong (1979) qui détermine les plages de température 14-21°C en Grande Bretagne, 21-27°C aux états Unis par exemple, et résumé par Le Psychologue Rohles (2007) et A. Ackermann (2002) qui ont conclu que les paramètres du confort d'hiver ont changé de 18°C (1923) à 20°C (1941) à 25°C (1960) et cela d'après une statistique durant 40 ans de recherche et d'observation .

Fanger en 1970 indique que les normes de références utilisées dans le domaine du confort thermique sont ceux pour l'organisation pour la Standardisation Internationale (ISO 7730 2005) et la Compagnie des Ingénieurs Américains pour le Chaud et Froid et l'Air Conditionné (ASHRAE 55 2010).

1.3.1 Etude du confort thermique en laboratoire

Les chercheurs du confort en laboratoires sont concernés par la présentation du confort thermique comme une science exacte. Ils considèrent que les études doivent prendre en considération une plage de température ce qui est très vague pour une analyse très sérieuse sans faire des distributions statistiques [13-14], qui varient hautement souvent tout en prenant en compte les erreurs des mesures physiques qui sont généralement mal définies [15], et mettant l'accent sur le fait que le monde réel est complexe à la fois physiquement, socialement, et culturellement. Il faut alors s'éloigner des études en laboratoire et se pencher plus sur les expériences in situ [16]. Le confort thermique adaptif est basé sur des études réelles ou des agents de bureau à travers le monde travaillant régulièrement [17], utilisant principalement soit l'échelle de sensation thermique ASHRAE, soit l'échelle de Bradford.

Il est nécessaire de résoudre cette division entre le confort thermique dans les champs et dans des bureaux à air conditionné en utilisant les outils du confort adaptif pour vérifier les préférences des occupants dans un environnement contrôlé centralement. Une étude similaire fut menée par Schiller qui découvrit que la température optimale définie par l'étude au laboratoire est différente in situ [18].

Baker (1996) introduit une autre définition du confort thermique par la distinction entre la sensation thermique et la satisfaction complétées par les études menées par [19]-[20], qui ont trouvé que les valeurs calculées sont habituellement plus basse que les estimations du in situ ou ils ont déduit que les occupants sont plus confortables quand il fait légèrement plus froid.

Il est possible de déduire un certain nombre de tendances :

1. Une température idéale n'existe pas pour toutes les conditions de travail.
2. Plusieurs températures idéales sont en deçà de la température neutre
3. Il semble qu'il y ait un préjugé de genre dans la température idéale

Comment intègre-t-on toutes ces informations ? Théoriquement il peut être possible d'utiliser ces études pour prédire la bonne température propre au métabolisme. Humpfreys et Nicol ont remarqué dans leurs travaux sur la théorie adaptative, ils ont entrepris une étude de champ pour déterminer comment le confort agit sur la productivité [21].

1.3.2 Le confort thermique dans la littérature

Le confort est une notion relativement subjective. Sa sensation par l'être humain fait intervenir plusieurs facteurs physiologiques, biologiques. Le métabolisme, habillement, température cutanée, température ambiante, humidité relative, température des parois, la vitesse de l'air et ventilation etc..... Le corps humain consomme de l'énergie sous forme d'aliments et par une oxydation il s'échauffe. L'excès de chaleur doit être restitué à l'atmosphère pour assurer le maintien de la température égale à 37°C d'où ces réactions d'échanges avec l'air ambiant soient minimisées. Dans une même ambiance, quelqu'un pourra se sentir à l'aise (sensation de confort) alors que quelqu'un d'autre pourra être gêné (sensation d'inconfort). Il y a en effet une part personnelle dans l'appréciation du confort thermique, liée en particulier de chacun, c'est-à-dire à la production de chaleur du corps. Cette production de chaleur dépend des personnes, de leur activité et de leur état de santé [22].

Le domaine de recherche sur le confort thermique dans le bâtiment se fait par deux approches complémentaires. La première étudie le confort thermique d'une façon analytique, elle n'est pas restreinte aux bâtiments. La deuxième approche, basée sur l'incapacité de la première approche à décrire la réalité du confort thermique dans les bâtiments, c'est l'approche adaptative [23].

a. Approches analytiques

Cette approche est établie pour prédire la sensation thermique des occupants et de déterminer les conditions de confort thermique et cela par l'établissement du bilan thermique du corps humain, se basant essentiellement sur les modèles physiques et physiologiques par l'évaluation des grandeurs physiologiques de l'individu (température cutanée, température interne et mouillure cutanée) et par le développement des modèles physiologiques du système de thermorégulation, des modèles physiques sont aussi utilisés pour calculer les échanges de chaleur entre l'occupant et son environnement (conduction, convection, rayonnement et évaporation).

Dans les bâtiments, les modèles du confort thermique les plus couramment utilisés sont celui de Fanger (ISO 7730:1994) [24], le PMV (vote moyen prévisible), et celui de Gagge [25], le SET (température effective standard).

Le modèle de Fanger sert de base pour la norme internationale ISO 7730 qui porte sur les conditions de confort dans les ambiances thermiques modérées, et celui de Gagge pour la

norme américaine ASHRAE standard 55 qui lui aussi précise les conditions de confort thermique dans les bâtiments.

La définition du confort thermique dans les bâtiments est importante non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir par les équipements d'ambiance. Or l'énergie utilisée pour chauffer, ventiler ou climatiser les bâtiments représentent la majorité de l'énergie consommée par ce secteur [23], un secteur qui à lui seul, utilise plus de 40% de la consommation d'énergie finale et est responsable du quart des émissions de CO₂, principal gaz à effet de serre. Avec les préoccupations grandissantes du développement durable, le secteur du bâtiment doit répondre à deux exigences primordiales, maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur, tout en assurant des ambiances intérieures saines et confortables. Ainsi, une vision globale du confort thermique qui tient compte de sa pluridisciplinarité est indispensable.

Le confort thermique est souvent défini par la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique (ISO 7730: 1994). L'homme doit assurer en continu son équilibre thermique car il dispose d'un système de thermorégulation qui lui permet de régler les échanges de chaleur avec son environnement, le corps humain assure son équilibre thermique. La neutralité thermique résulte d'un équilibre thermique obtenu par peu (ou aucune) de réactions physiologiques [26].

Au delà des facteurs physiques et physiologiques qui régissent la sensation thermique, d'autres facteurs d'ordre psychosociologiques influencent le confort thermique. En effet, la satisfaction perçue, par un occupant dans une ambiance donnée, s'exprime en fonction de l'accord entre les conditions thermiques actuelles dans le bâtiment (satisfaction obtenue) et celles qui correspondent aux attentes de l'occupant (satisfaction anticipée) [27]-[23].

1.3.3 Facteurs ayant une incidence sur le confort thermique.

Il n'est pas anormal que nous voulons une température plus élevée dans la salle à manger ou la chambre d'enfants que dans le hall. Nous voulons que la chambre à coucher ou la salle de bain soient bien réchauffées à certains moments. Dans la pièce où vous repassez votre linge, la température peut être moins élevée que dans le living où vous regardez la télé. Nous voulons contrôler notre budget d'énergie en programmant le chauffage à une température minimale au moment où nous ne sommes pas à la maison. D'autre part nous ne voulons pas entrer dans une glacière si nous ouvrons la porte d'entrée. Le confort thermique désigne ainsi une interaction

forte entre l'occupant et le bâtiment, plus riche que celle d'un simple voisinage décrit par un nombre limité d'équations physiques décrivant les transferts thermiques.

Les principaux facteurs qui régissent les échanges de chaleur entre une personne et son environnement et qui ont une incidence sur son confort thermique sont, [28] son activité physique (production de chaleur par le corps) et l'habillement qui est un moyen complémentaire d'adaptation dont dispose l'homme pour maintenir son équilibre thermique.

Pour l'environnement, Le rayonnement thermique et l'humidité La vitesse de l'air la température des objets avec lesquels la personne est en contact L'un des rôles de l'habitat est de minimiser les échanges thermiques, c'est-à-dire de protéger le corps humain contre les agressions du climat. Dans le cas où il n'y a pas d'échange par rayonnement entre la personne et son environnement (par exemple, absence de rayonnement direct du soleil ou d'une fenêtre froide), on peut considérer que la température opératoire est sensiblement la même que la température de l'air ambiant. Le confort peut aussi dépendre de critères plus subjectifs ou plus personnels (niveau de stress par exemple). Néanmoins, les zones de confort sont définies comme étant les environnements hygrothermiques où 80 % des personnes ressentent une sensation de confort. L'obtention du confort d'été se fait en agissant sur les paramètres environnementaux, il faut veiller à limiter les températures de l'air et des parois et contrôler le taux d'humidité et la vitesse de l'air ambiant. Il est reconnu que parmi les facteurs agissant sur le confort, le contrôle de la température radiante est primordial, il est donc important de veiller à ne pas avoir une pénétration directe du rayonnement solaire, directement sur l'occupant ou sur les parois.

1.3.4 Les caractéristiques agissant sur le confort thermique.

Pour assurer les conditions du confort dans un bâtiment, L'architecte doit Lors de la conception prendre en considération les conditions spécifiques du climat, le local devra être facile à chauffer, mais aussi rester frais en été, avec une consommation d'énergie aussi réduite que possible. La conception doit aussi assurer un confort visuel, acoustique, et une bonne qualité de l'air tout en tenant compte de l'occupation du bâtiment et du comportement des usagers [29].

Cette conception devra avant tout s'attacher à la qualité de l'enveloppe afin de parvenir aux performances que l'on peut attendre d'une telle conception ISO 7726-1985. Les appareils nécessaires au maintien du confort intérieur doivent être régler pour assurer leurs fonctions dans des conditions d'efficacité énergétique optimales [30].

Dans un bâtiment, la consommation d'énergie et le confort thermique des usagers sont directement, mais de nombreux autres paramètres liés au site et à la conception du bâtiment ont une influence. L'enveloppe du bâtiment est le premier des éléments sur lequel le concepteur doit intervenir, pour créer, à l'intérieur de son ouvrage des conditions de confort satisfaisantes. Les architectures climatiques (ou écologiques) jouent sur différents paramètres [31], tel que le rayonnement solaire en hiver, la réduction des apports de chaleur en été et la protection contre le vent froid tout en favorisant la ventilation,

Faire la synthèse entre toutes les données et toutes les exigences est un des rôles premiers des concepteurs et en particulier de l'architecte. Les réglementations thermiques en Algérie exemple le JO du 25 mai 2006 pourront être à l'origine d'une amélioration de la qualité des bâtiments par rapport à la thermique d'hiver, en revanche, le confort d'été n'est que rarement pris en considération.

En Algérie, l'architecture n'a pas su répondre par le passé avec ses moyens à cette contrainte climatique car l'habitat traditionnel, de par le climat clément de la région, n'avait parfois aucun système de chauffage. De nos jours, les habitants exigent du confort (chaleur, fraîcheur, ventilation) et la conception doit utiliser au mieux les différentes techniques existantes pour satisfaire cette demande. Dans une maison, avoir une température stable (entre le jour et la nuit, entre l'été et l'hiver) est un élément important dans le confort. Cette stabilité, peut être obtenue naturellement par l'utilisation d'éléments lourds à l'intérieur de la maison. C'est pourquoi les maisons anciennes avec leurs murs épais restent plus fraîches en été [32]. De plus, une maison avec une forte inertie permettra, notamment en demi-saison, d'accumuler la chaleur reçue des rayons solaires pendant la journée pour la restituer le soir, évitant de rallumer le chauffage. Elle permet ainsi de raccourcir la saison de chauffe.

Cependant, dans les constructions conventionnelles actuelles, les murs (généralement en briques ou en parpaings) sont placés à l'extérieur et l'isolation est placée du côté intérieur (cas de l'Algérie). Les isolants courants comme les polystyrènes et les laines minérales sont très légers, donc offrent très peu d'inertie et c'est pourquoi il est difficile de garder ces maisons fraîches l'été. L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker et de restituer des quantités importantes d'énergie dans sa structure [33].

L'utilisation de l'inertie des bâtiments dans les climats à fortes amplitudes thermiques contribue très largement au confort thermique des bâtiments, elle joue un rôle d'amortisseur sur les variations de température et contribue à la stabilité de celles-ci. La question est donc : comment combiner les avantages d'une bonne isolation compatible avec les exigences actuelles « type maison "moderne » avec une bonne inertie (type maison "ancienne"). De ce

fait, les constructions dotées d'une structure légère au niveau de son enveloppe, ont souffert de la canicule de l'été 2003 qui a entraîné une forte demande en énergie pour faire fonctionner les climatisations. Celles-ci ont engendré, un réchauffement des villes [34],

La forte inertie est un atout pour le confort d'été. L'inertie thermique de la construction fait partie des éléments pris en compte dans les mesures passives du confort thermique d'été.

Le rôle de l'occupant ou de la domotique, est donc primordial pour établir un équilibre d'un jour à l'autre afin de maintenir une température proche du confort [35]. Les règles générales pour concevoir les bâtiments en corrélation avec le climat en Algérie sont a priori les caractéristiques de conception de constructions. En général, au climat saharien très chaud et très sec, le choix du site d'implantation doit obéir à une conception du plan d'urbanisme compact, capable à réduire la surface exposée au soleil et d'augmenter l'inertie thermique des constructions. Les circulations doivent être ombragées au maximum l'été et favoriser la ventilation naturelle. Les bâtiments doivent autant que possible avoir une double orientation et les ouvertures prévues sur les façades permettent une ventilation transversale énergétique la nuit pendant l'été pour refroidir la structure du bâtiment.

1.4 Rafraîchissement et climatisation

Contrairement à la climatisation électrique traditionnelle qui produit du froid en comprimant un fluide, dans les machines à sorption, la compression mécanique est remplacée par une compression thermique. Ces systèmes utilisent également un fluide frigorigène et ses changements de phase (liquide/vapeur) mais provoquent ces changements grâce à un apport de chaleur. Le fluide frigorigène est dans ce cas de l'eau additionnée d'un second composant. Si ce dernier est un liquide, on parle alors d'absorbant et de machine à absorption, si c'est un solide poreux, on parle alors d'adsorbant et de machine à adsorption.

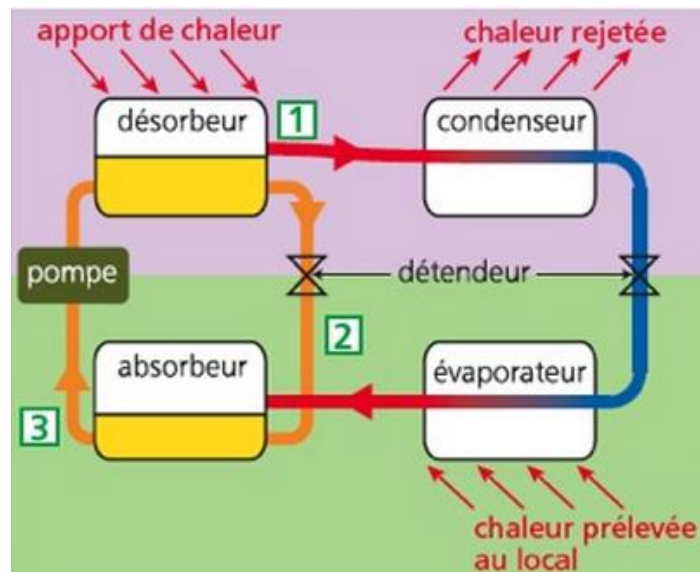


Figure 1-1 Schéma de fonctionnement d'une machine à absorption

Source : Rhônalpénergie-Environnement

Dans les machines frigorifiques à absorption utilisées en climatisation, la substance absorbante est généralement le bromure de lithium (LiBr), le fluide réfrigérant, de l'eau. Le couple ammoniac/eau peut également être utilisé. Ce type de machine permet de refroidir de l'eau jusqu'à 7°C environ. La température de l'eau utilisée pour la décomposition de l'eau et de l'absorbant doit être comprise entre 80°C et 120°C. Pour les machines à adsorption, le gel de silicium fait le plus souvent office d'adsorbant. La machine est composée de deux compartiments.

Il est nécessaire de clarifier la notion de rafraîchissement par rapport à la notion de climatisation et le conditionnement d'air. Car la climatisation impose au système installé d'assurer des conditions strictes de confort dans le bâtiment se référant à des consignes fixes (pour la valeur de la température et parfois d'humidité) par contre le rafraîchissement consiste à refroidir des locaux sans définir de valeur de température de consigne à l'intérieur du local. La plus logique approche serait d'assurer les conditions de confort dans le local, en prenant en considération plusieurs paramètres en même temps par l'évaluation d'un indice appelé indice de confort [36].

Cet indice permet d'intégrer l'influence des paramètres de confort dans l'évaluation de l'état des lieux, ses paramètres sont aussi des moyens d'ajustement du confort sans dépense d'énergie. Plusieurs travaux ont été réalisés [37-38-39]. D'autres normes consistent à assurer un écart de température fixe ou variable entre l'intérieur et l'extérieur, par exemple la norme

allemande DIN 1946 propose un écart variable suivant les conditions extérieures. Ou la norme française qui fixe un écart de 5°C.

Se basant sur les deux normes on va essayer de voir les principales technologies de production de froid solaire et les différents systèmes et installations de rafraîchissement solaire.

Il existe Trois types d'installations de technologies pour la production du froid à partir de l'énergie solaire [40] [41] [42] [43] [44].

- Le premier type consiste à faire fonctionner une machine frigorifique à compression mécanique de vapeur partir de l'électricité produite par des panneaux solaires photovoltaïques.
- Le second type fonctionne suivant un cycle ouvert traitant directement l'air du local à refroidir.
- Le troisième type est basé sur les cycles thermodynamiques fermés utilisant un fluide frigorigène et capables de produire du froid à partir d'un apport de chaleur.

Les procédés de rafraîchissement solaire par dessiccation sont des systèmes ouverts basés sur le refroidissement et la déshumidification de l'air des locaux à traiter. L'eau est utilisée comme seul « réfrigérant » ainsi aucune machine électrique à compression n'est nécessaire.

Un système à dessiccation est composé de deux cycles bien distincts à savoir le cycle de traitement de l'air neuf et le cycle de régénération du déshydratant.

Dans le cycle de traitement de l'air neuf, l'air extérieur chaud et humide pénètre à travers le déshumidificateur où il est chauffé et déshumidifié. Il ressort avec une température supérieure et une humidité absolue et relative inférieure. Il entre ensuite dans un échangeur où il est rafraîchi à humidité absolue constante. Il ressort avec une température plus basse avant de subir une humidification entraînant son refroidissement et une augmentation de son humidité absolue et relative. En effet, en s'évaporant l'eau prélève la chaleur latente de vaporisation et produit un refroidissement de l'air. Cet air peut être éventuellement chauffé à travers un échangeur alimenté par de l'eau chaude produite par le champ de capteurs solaires thermiques avant d'être injecté dans le bâtiment à rafraîchir. On note que la déshumidification est obtenue par adsorption de la vapeur d'eau contenue dans l'air par un matériau solide ou liquide. Ce phénomène qui met en jeu la vapeur d'eau s'appelle la dessiccation. Elle peut se faire par absorption (le matériau déshydratant est performance élevé. C'est pourquoi le

système le plus souvent envisagé fait appel à des cycles thermodynamiques dithermes à compression mécanique de vapeur [36]

Dans le cycle de régénération du déshydratant, l'air repris dans le bâtiment est humidifié pratiquement jusqu'à sa saturation ce qui entraîne son refroidissement. Il est ensuite préchauffé par l'air neuf dans l'échangeur avant d'être chauffé dans un second échangeur alimenté par de l'eau chaude produite par le champ de capteurs solaires thermiques. Il ressort à une température élevée avant de rentrer dans le déshumidificateur où il se refroidit en se chargeant en humidité. Cette étape permet de régénérer le déshydratant. Enfin l'air est expulsé à l'extérieur.

En matière de systèmes de rafraîchissement utilisant l'énergie solaire deux grandes systèmes sont à dénombrer.

1.4.1 Les systèmes « fermés »

Pour les autres systèmes à cycle fermé, parallèlement au refroidissement, il faut, pour des raisons sanitaires, assurer dans le local un apport d'air neuf pris à l'extérieur constituant une charge calorifique sensible et latente souvent très importante, que le système de rafraîchissement doit évacuer. L'apport de chaleur solaire est utilisé pour régénérer le matériau dessiccant ou pour chauffer l'air soufflé. La température de la source chaude nécessaire pour la régénération des matériaux dessiccants et le fonctionnement du système est de l'ordre de 45 à 95°C. Le COP nominal de ces systèmes varie entre 0,5 et des valeurs supérieures à 1.

On trouve dans la littérature que les systèmes fermés produisent, grâce aux machines à sorption, l'eau glacée qui est ensuite utilisée pour le refroidissement ou la déshumidification de l'air, les systèmes ouverts refroidissent directement l'air.

1.4.2 Les systèmes « ouverts ».

Les systèmes ouverts basés sur le refroidissement et la déshumidification de l'air des locaux à traiter. L'eau est utilisée comme seul « réfrigérant » ainsi aucune machine électrique à compression n'est nécessaire.

Les systèmes ouverts constituent actuellement une part relativement faible des installations existantes (de l'ordre de 10 à 15%). Il est clair que, compte tenu du mode de fonctionnement basé sur le refroidissement évaporatif, ces installations sont plutôt destinées aux climats chauds et secs même si certaines études ont été faites en climat humide. L'installation peut en effet fonctionner suivant plusieurs cycles (Cycle Dunkle, Cycle Huan, configuration pour

climat chauds, etc.) en fonction des charges internes du bâtiment et des conditions climatiques [42].

Le procédé dessiccant apporte une solution alternative en utilisant un fluide totalement neutre, l'eau, mais dans un cycle particulier. Un autre avantage important est que ces systèmes assurent une double fonction : le rafraîchissement et le renouvellement d'air hygiénique.

1.5 Rafraîchissement solaire

L'utilisation thermique de l'énergie solaire dans le secteur du bâtiment constitue un véritable enjeu pour les problèmes environnementaux, économiques et sociaux.

L'énergie solaire produit peu de déchets et engendre peu d'émissions de gaz à effet de serre, responsables du réchauffement de la planète. Elle présente aussi de nombreux avantages au regard de la sécurité énergétique puisqu'elle est une source locale inépuisable.

La recherche se focalise aujourd'hui sur l'étude des procédés de rafraîchissement solaire et plus particulièrement sur les systèmes à faibles puissances frigorifiques [36]. L'objectif de ce type d'installation est d'élargir le marché des systèmes de rafraîchissement solaire au résidentiel, ce qui représente un enjeu environnemental important. Toutefois, ces procédés ne sont pas encore rentables économiquement du fait de leur coût d'investissement, de fonctionnement mais aussi de maintenance. Cet aspect économique reste un frein majeur à leur développement. En effet, les systèmes de climatisation classiques sont bon marché et leurs coefficients de performance électrique sont équivalents voire supérieurs à ceux des procédés de rafraîchissement solaire. La stratégie de développement de ces systèmes réside dans l'optimisation des performances globales des installations. Des études expérimentales ont été déjà faites pour étudier les systèmes de rafraîchissement solaire comme l'approche expérimentale [45] [46] [47], dont l'objectif étant la compréhension de cette technologie. Les données expérimentales enregistrées par ces installations permettront d'établir un certain nombre d'éléments nécessaires à la compréhension et au développement de ces procédés.

Le développement de tout procédé de rafraîchissement solaire passe par une étude expérimentale pour valider les solutions proposées dans la phase de recherche et améliorer sa conception et son fonctionnement [45][48][49][50][51][52]. Pour cela, l'élaboration d'un prototype à échelle réelle est un passage essentiel car il permet d'étudier le comportement et l'interaction du procédé avec le milieu dans lequel il évolue. Outre l'approche purement expérimentale, une installation à échelle réelle est un outil important pour faciliter le développement de modèles numériques complexes. Ces modèles reposent sur un certain

nombre de paramètres qu'il est souvent commode d'évaluer expérimentalement. Une seule installation expérimentale peut difficilement permettre de valider à la fois les modèles des composants et les modèles complexes couplés [53]. Il est donc préférable de disposer d'installations différentes et de procéder à des validations par étape [36].

1.6 Chauffage solaire passif

L'énergie solaire pour les bâtiments livre de l'information essentielle sur la conception de bâtiments solaires, dont le chauffage passif à l'énergie solaire, le chauffage de l'air de ventilation, le chauffage de l'eau domestique et l'ombrage [54].

Le bâtiment solaire passif fait appel à trois principes : le captage, le stockage et la distribution de l'énergie du soleil, il tire le maximum des gains solaires pour réduire la consommation d'énergie aux fins de chauffage et de climatisation. Il compte sur les mouvements d'énergie naturels qui s'effectuent à travers les matériaux, en l'occurrence par rayonnement, conduction, absorption ou convection naturelle. Le bâtiment solaire passif met l'accent sur les mouvements d'énergie passifs en chauffage et en climatisation. Il s'agit le plus souvent de gains de chauffage solaire admis directement dans une pièce habitable, le système de gains directs, où les fenêtres tiennent lieu de capteurs et les matériaux intérieurs de moyens de stockage.

Le principe peut également s'appliquer aux capteurs solaires où l'air ou l'eau sont acheminés par convection naturelle jusqu'au thermosiphon pour stockage sans l'intervention de pompes ou de ventilateurs. Le système à l'énergie solaire actif exploite du matériel mécanique pour capter, stocker et distribuer la chaleur du soleil. Le système actif se compose de capteurs solaires, d'un moyen de stockage et d'un système de distribution. Le système actif à l'énergie solaire sert couramment pour :

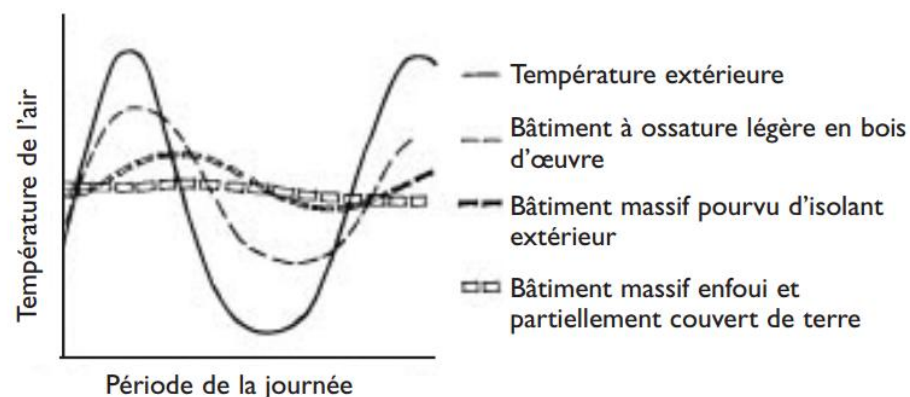
- Le chauffage de l'eau;
- Le conditionnement des locaux;
- La production d'électricité;
- Le traitement de la chaleur;
- L'énergie mécanique solaire.

Les systèmes d'alimentation hybrides combinent au moins deux systèmes d'énergie ou combustibles qui, une fois intégrés, surmontent les contraintes de l'autre, comme les panneaux photovoltaïques qui suppléent à l'énergie fournie par le réseau ou une génératrice diesel. Les systèmes hybrides sont les plus répandus, sauf le système de gains directs, qui est passif.

1.7 Solaire passif et gain direct

Dans sa forme la plus simple, le soleil qui s'infiltré par la fenêtre réchauffe la pièce. La masse thermique à l'intérieur du bâtiment absorbe une partie de la chaleur et la libère le soir venu. La masse thermique interne réduit les fluctuations de température à l'intérieur d'une pièce. Dans un système solaire passif bien conçu, la masse thermique absorbe l'énergie solaire pendant la journée, prévenant ainsi la surchauffe du bâtiment, puis libère l'énergie le soir. La masse thermique a le plus d'efficacité lorsqu'elle peut capter directement l'énergie solaire.

Pour le chauffage solaire passif, la masse thermique idéale se caractérise par une capacité calorifique élevée, une conductance modérée, une densité modérée et une émissivité élevée. Le coût supplémentaire est négligeable si le matériau remplit aussi une fonction structurale ou décorative. Le béton et la maçonnerie constituent d'excellents matériaux de masse thermique. (L'enduit au plâtre, les plaques de plâtre et les carreaux ont également une utilité sur ce plan, mais des calculs s'imposent pour déterminer s'ils ont une masse suffisante, comme cela a été fait dans le cadre de l'étude d'Halifax.) Une maison individuelle solaire passive peut abaisser de 30 à 50 % son énergie de fonctionnement grâce au dimensionnement des fenêtres et au stockage de la masse thermique.



Graph 1-1 : Effet de la masse interne sur les fluctuations de la température intérieure

La masse est reconnue pour être en mesure de réduire la charge de climatisation de pointe lorsque les températures nocturnes sont plus fraîches que celles du jour. Les masses extérieures et intérieures se rafraîchissent le soir et atténuent la demande de climatisation de pointe tout en retardant également la période de gains solaires de pointe au cours de la journée. Par contre, l'efficacité de la masse thermique est proportionnelle à la variation admissible de la température ambiante pendant une journée.

1.8 Conception de bâtiment

La conception attentive d'un bâtiment solaire permet de maximaliser la transmission de l'énergie solaire et son absorption en hiver pour ainsi diminuer, voire réduire à zéro, la consommation d'énergie de chauffage tout en prévenant la surchauffe; permet aussi d'utiliser les gains solaires reçus pour les besoins de chauffage instantané et de stocker le reste sous forme de masse thermique intrinsèque ou de dispositifs de stockage expressément conçus à cette fin; il assure la réduction des déperditions de chaleur grâce à de l'isolant et à des fenêtres autorisant des gains élevés de chaleur solaire; et de planter des arbres à feuilles caduques de façon stratégique pour exclure les gains solaires en été qui autrement ajouteraient à la charge de climatisation et enfin de recourir à la ventilation naturelle pour transmettre la chaleur des zones chaudes aux zones froides en hiver et assurer le refroidissement naturel en été, de faire usage d'une installation géothermique pour assurer le chauffage ou la climatisation en transférant l'énergie du sol à température plus ou moins constante, et d'avoir recours au rafraîchissement par évaporation il permet aussi d'exploiter le rayonnement solaire pour l'éclairage naturel, ce qui requiert une distribution efficace dans les pièces ou sur les plans de travail, tout en évitant l'effet d'éblouissement qui nécessite l'intégration des systèmes solaires passifs à des systèmes actifs de chauffage et de climatisation [55] [56].

1.9 Energétique des bâtiments.

Dans la situation énergétique mondiale actuelle une rapidité dans l'évolution des réglementations thermiques dans les différents pays est constater dont l'objectif est de réduire les besoins en chauffage des bâtiments. Il en est de même pour les bâtiments passifs dont le concept d'utiliser au maximum les apports solaires et les apports internes pour le chauffage et faire un choix d'isolation performant et imposer les ouvertures vers le Sud.

Ces choix ont cependant pour conséquence un confort d'été souvent de faible qualité. En effet, le bâtiment fonctionne comme une bouteille thermos, ce qui convient tout à fait en hiver mais qui est incompatible avec les périodes chaudes de l'été, la chaleur peut difficilement être évacuée. Afin d'assurer des températures tolérables en été, ces bâtiments peuvent avoir recours à des systèmes de climatisation qui viennent augmenter leurs besoins en énergie et dégrader le bilan global malgré les bonnes performances en hiver. On peut donc se demander comment concevoir des bâtiments avec de faibles besoins en chauffage qui permettent d'assurer un bon confort d'été sans nécessiter le recours à des systèmes de type climatisation, coûteux en énergie et néfastes pour l'environnement. Cette prise en compte du

confort d'été, pour qu'il soit obtenu sans surcoût d'énergie, doit se faire très en amont dans la conception et en accord avec les principes d'hiver. Il faut instaurer des stratégies de rafraîchissement passif sans dégrader les principes de chauffage passif. De même que les stratégies de chauffage passif, celles de rafraîchissement sont à adapter en fonction du climat, de l'orientation, du type de bâtiment. De nombreux systèmes de rafraîchissement passif existent, certains très anciens, issus de l'habitat vernaculaire, d'autres issus de recherches récentes. L'émergence d'une dynamique visant à réduire les consommations dans le secteur du bâtiment s'est traduite par l'apparition d'une nouvelle génération de bâtiments. Ce désir de rationalisation énergétique et d'optimisation se traduit de la part des professionnels par la nécessité d'utiliser des outils d'estimation des performances à tous les stades de la conception.

1.10 Bâtiments passifs

Depuis quelques années, les exigences des occupants de bâtiments ont sensiblement changé. On observe en effet une demande de confort de plus en plus rigoureux en particulier en période estivale. Cette augmentation des besoins de climatisation induit un accroissement important de la consommation d'énergie électrique dans les bâtiments, dû à une utilisation majoritaire de climatiseurs à compression mécanique de vapeur. Dans ce contexte énergétique difficile, les systèmes de rafraîchissement solaire font partie des alternatives intéressantes aux systèmes de climatisation classiques, dans la mesure où l'énergie primaire est principalement consommée sous forme de chaleur et provenant du soleil donc gratuite. L'autre grand intérêt de ces procédés est que le besoin en rafraîchissement coïncide la plupart du temps avec la disponibilité du rayonnement solaire [36]

La qualité des installations solaires thermiques est en constante progression grâce notamment aux efforts faits par les industriels pour améliorer les performances des matériels qu'ils produisent et la mise en place de procédures de qualification et de certification des produits. L'augmentation du prix de pétrole, la volonté nationale de diminuer les émissions de gaz à effet de serre ont permis de donner un coup d'accélérateur réel au développement de cette filière. Mais le marché des équipements solaires thermiques restait jusqu'à récemment encore relativement modeste et leur diffusion se trouve freinée par quatre contraintes majeures et fortement liées

- la qualité de leur intégration technique et architecturale aux bâtiments et à leur environnement
- le coût des installations et de leur mise en œuvre.
- la perception de l'esthétique de ces systèmes au sein des bâtiments.

- la distribution et la diffusion assurées par des circuits spécifiques distincts des circuits traditionnels du bâtiment.

Ainsi, l'intégration des composants solaires actifs dans le bâtiment apparaît comme un élément clé qui permet d'éviter des solutions d'implantation parfois inesthétiques, et des surcoûts de réalisation trop importants.

1.11 Concepts et réglementations énergétiques des bâtiments

Les concepts purement énergétiques accompagnent des réglementations visant la performance énergétique des bâtiments (Réglementation Thermique 2005 [57] en France, réglementation Energie einsparverordnung [58] en Allemagne) ou [59] en Suisse, Passivhaus en Allemagne [60], CasaClima/Klimahaus en Italie [61].

L'Algérie est un pays qui jouit d'une position relativement enviable en matière énergétique. Les réserves en hydrocarbures dont il dispose et les niveaux actuels de consommation nécessaires à la couverture de ses besoins propres lui permettent de rester serein pour quelques temps encore [3]. Dans l'immédiat, le problème énergétique de l'Algérie est un problème qui se pose en terme de stratégie de valorisation de ces ressources pour les besoins du développement du pays, de choix d'une véritable politique énergétique à long terme et de définition immédiate d'un modèle cohérent de consommation énergétique couvrant le court et le moyen terme, avant la date fatidique de l'épuisement de ses ressources fossiles stratégiques. Dans ce contexte, la loi algérienne sur la maîtrise de l'énergie [1] et les nouveaux textes réglementaires mis en place récemment [2-4] sont venus fixer le modèle de consommation

énergétique national et définir le cadre général des différentes actions à mener pour parvenir le plus rapidement possible à une rationalisation de l'emploi des énergies disponibles et à une meilleure maîtrise de la consommation énergétique. Outre la nécessaire diversification énergétique qui vise essentiellement une rapide intégration des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et thermique, éolienne, géothermique, biomasse) dont dispose en abondance l'Algérie, le développement des économies d'énergie est un axe très important de la démarche préconisée par cette loi.

L'intégration de sources d'énergies renouvelables au bâtiment [62] permet de faire une classification des types de bâtiments qui existe selon la réglementation des pays. Pour ces approches, les critères évalués sont peu nombreux, bien définis et quantifiables ce qui facilite l'identification des concepts sous-jacents. Ceux qui ont été identifiés sont les suivants :

1.11.1 Le bâtiment à basse consommation ou « basse énergie »

Ce bâtiment se caractérise par des besoins énergétiques plus faibles que les bâtiments standards. Ce premier niveau de performance peut être atteint par l'optimisation de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'accroissement des apports passifs. Ce concept ne comprend a priori aucun moyen de production local d'énergie, sans toutefois l'exclure.

1.11.2 Le bâtiment « passif »

Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids ; il est le plus souvent associé à la ventilation.

1.11.3 Le bâtiment « producteur d'énergie » (en anglais : near zero energy house)

Il est doté de moyens de production d'énergie locaux. Cependant, cette dénomination ne spécifie ni le niveau de consommation ni la part de cette consommation couverte par la production ni même la nature de l'énergie produite. Il s'agit donc plus d'une caractéristique du bâtiment que d'un concept de bâtiment à proprement parler. L'expression "bâtiment producteur d'énergie" est néanmoins parfois employée pour désigner un « bâtiment à énergie positive ».

1.11.4 Le bâtiment « zéro énergie » ou « zéro net » (en anglais : net zero energy house)

Ce bâtiment combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul [63].

1.11.5 Le bâtiment « à énergie positive » (en allemand : Plus energiehaus)

Ce bâtiment producteur d'énergie dépasse le niveau « zéro énergie » : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, ce bâtiment est

raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique [64-65].

1.11.6 Le bâtiment autonome

Un bâtiment est autonome lorsque sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique etc.). Ce type de bâtiment est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux.

1.12 L'intégration conceptuelle dans le bâtiment

L'architecte peut concevoir l'enveloppe du bâtiment selon les principes de conception solaire alors que l'ingénieur conçoit le système de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air selon des températures de calcul extrêmes, faisant fi des avantages que procurent les gains solaires et le refroidissement naturel. Qui donne une installation surdimensionnée qui n'exploite pas le système énergétique intégré à l'enveloppe du bâtiment où les éléments sont bien appariés. Un meilleur esprit de collaboration anime les architectes et les ingénieurs, mais les relations de travail classiques qui existent entre les architectes, les ingénieurs, les gestionnaires immobiliers et les autres experts ne favorisent pas une démarche conceptuelle intégrée.

Alors la réussite à bien concevoir un bâtiment solaire repose avant tout sur le principe primordial de l'intégration, ce concept ne vise pas uniquement à s'allier la collaboration d'experts du domaine de la conception au départ, mais aussi celle des responsables du fonctionnement des systèmes.

Il vaut mieux envisager le bâtiment et le système de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air comme un seul système énergétique et les concevoir ensemble, en tenant compte des synergies possibles misant notamment sur la production d'électricité, le stockage thermique et les mesures de régulation. Les systèmes de chauffage solaire passifs se rangent en deux grandes catégories :

- à gains directs.

- à gains indirects.

Le système passif à gains indirects séparé des locaux chauffés est un système isolé. Compte tenu de la zone climatique et de la fonction du bâtiment, certains systèmes de chauffage/climatisation sont davantage compatibles avec des systèmes passifs. Par exemple, la masse thermique du plancher permet de stocker des gains solaires passifs et ainsi servir de système de chauffage par le sol. Voilà un défi à bien planifier pour offrir aux occupants un confort thermique acceptable. Les principaux aspects de la conception solaire passive reposent sur des paramètres tributaires, interreliés :

- L'implantation et l'orientation du bâtiment;
- L'aire de vitrage, le type et l'orientation des fenêtres.
- La masse thermique et les caractéristiques de l'enveloppe.
- L'isolation thermique.
- Les dispositifs d'ombrage : le type, l'endroit et la superficie.
- Le stockage thermique effectif (isolé du milieu extérieur) ainsi que la quantité et le type.
- Sensible : tel que le béton dans l'enveloppe du bâtiment avec isolant extérieur.
- Latent : matériaux à changement de phase.

L'intégration conceptuelle poursuit l'objectif ultime de réduire les coûts d'énergie tout en préservant le confort intérieur. Une importante masse thermique dans un bâtiment risque de retarder sa réponse par rapport aux sources de chaleur, tels les gains solaires, phénomène qualifié d'inertie thermique. Cette inertie thermique évite l'inconfort pourvu qu'on en tienne compte au moment de choisir la masse thermique, d'adopter les mesures de régulation tout indiquées et de déterminer la capacité du système de chauffage/de refroidissement.

Les premières étapes en matière de conception solaire consistent à :

1. Établir les objectifs de performance des sources d'énergie et de son utilisation.
2. Diminuer les charges de chauffage et de refroidissement grâce à l'orientation, à l'effet de masse, à l'enveloppe et à l'aménagement paysager.
3. Maximaliser l'énergie solaire et les autres énergies renouvelables en fonction de la charge du bâtiment, puis à concevoir un système efficace CVCA intégré autant que possible aux caractéristiques de performance de l'enveloppe du bâtiment.
4. Employer, dans l'évaluation des options, des outils de simulation énergétique simples et des simulations détaillées au début des étapes conceptuelles et plus tard pour évaluer les différentes possibilités.

1.13 Méthodes d'évaluation et d'analyse

Les méthodes d'évaluation concernent essentiellement des bilans (d'énergie ou de matière) se déduisant de grandeurs mesurables telles que : la consommation de combustible ou d'électricité, les températures, les débits de ventilation, l'étanchéité de l'enveloppe, les propriétés thermiques des matériaux etc. De tels bilans, pour faire sens, nécessitent d'être réalisés en suivant une démarche claire et rigoureuse. Le cadre de ces bilans doit être précisément exposé : flux étudiés, limite du système, hypothèses. Mais pour une analyse pertinente du comportement du bâtiment, les bilans sont parfois insuffisants et différents moyens de représentation ou de synthèse peuvent apporter un éclairage complémentaire, fort utile pour bien saisir les enjeux énergétiques et environnementaux du bâtiment.

1.14 Analyse énergétique du bâtiment

L'évaluation et l'analyse des flux énergétiques d'un bâtiment et de ses impacts sur l'environnement nécessitent l'usage de méthodes rigoureuses afin de donner un sens et de fixer des limites aux résultats obtenus. Des outils de calcul spécifiques [66], adaptés aux niveaux de précision et d'analyse souhaités, mettent en œuvre ces méthodes et facilitent leur application. Cette partie présente les principales méthodes et les outils destinés à l'analyse énergétique et environnementale du bâtiment. Ceux qui ont été retenus dans le cadre de la présente étude y sont spécialement décrits.

1.15 Le bilan d'énergie et ses représentations

Établir le bilan énergétique d'un bâtiment revient à évaluer les approvisionnements énergétiques du bâtiment et les usages de cette énergie dans le bâtiment [67].

Le système étudié est le bâtiment, délimité par son enveloppe, ainsi que l'ensemble des systèmes énergétiques qui interagissent avec lui tels que les unités de cogénération, les chaudières, les panneaux solaires, les échangeurs géothermiques, les unités de climatisation etc. Les grandeurs sont mesurées par des compteurs (gaz, électricité etc.) ou évalués à partir de températures mesurées ou de données fournies par les constructeurs. Le bilan est établi uniquement à partir de grandeurs facilement mesurables et accessibles. Les apports passifs et les pertes thermiques ne sont pas directement mesurés. Néanmoins, leur influence nette intervient sur les consommations de chauffage et est donc bien prise en compte.

Chapitre II

Energies renouvelables

II.1 Les enjeux énergétiques

L'histoire des siècles passés nous montre les effets multiplicateurs des réponses apportées aux défis énergétiques successifs; autant de transformations sur la forme de l'énergie utilisée, que de révolutions industrielles. Les temps modernes se caractérisent par un recours de plus en plus marqué à des ressources de haute intensité énergétique largement non renouvelables et très souvent polluantes. Les perspectives de tarissement de gisements majeurs d'énergie sont aussi dans les esprits quand on constate que la consommation des ressources naturelles des 40 dernières années dépasse celles cumulées par toutes les générations qui ont vécu depuis le fond des âges [1]. Dès lors, les démarches actuelles de réflexion, d'analyse et de débats doivent s'orienter sur le type de l'énergie de demain dont l'urgence devient non seulement légitimes mais indispensables, alors que se manifestent les tensions sur l'offre énergétique au regard des besoins, les craintes vis-à-vis de la sécurité et de l'environnement, les interrogations sur le modèle de développement économique.

Pour bien comprendre l'urgence de la mise en place d'une réelle politique d'économies d'énergie et de développement des énergies renouvelables il est important d'étudier le contexte énergétique général et sa problématique environnementale. Car en matière d'énergie, toutes les prévisions actuelles sont fondées sur l'hypothèse que la croissance économique des années passées va continuer tout au long du 21^e siècle. Actuellement la demande mondiale d'énergie croît de 2 % par an en moyenne. Au rythme actuel de notre consommation. Le pétrole sera la première source d'énergie à s'épuiser vers 2040, dans moins de deux générations ... L'uranium et le gaz naturel n'atteindront pas les années 2075. Le charbon est plus abondant, mais ses réserves utiles ne dépassent pas deux ou trois cents ans. Enfin les difficultés de la surgénération et de la fusion nucléaire montrent que la perspective de disposer à court terme d'une énergie abondante et quasi-gratuite reste pour l'instant un mythe. Seule l'utilisation de toutes les formes d'énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, bois et biomasse) et une augmentation de l'efficacité énergétique permettront d'éviter un crash économique.

A l'évidence la maîtrise de l'énergie a été un des facteurs clés qui ont conduit le développement de l'humanité, elle lui a permis d'étendre son emprise sur la terre entière et de partir à la découverte de l'espace [68]. La recherche de nouvelles sources d'énergie, toujours plus abondantes et diversifiées, et leurs stockage a guidé l'homme et accru sa puissance depuis l'origine des temps, tout autant que la mobilisation de ses capacités intellectuelles, accompagnant ses aptitudes manuelles.

Si l'on observe par ailleurs les impacts écologiques, voire climatiques aux conséquences éventuellement irréversibles, on a le sentiment d'avoir atteint les limites de certains équilibres de l'Homme dans son environnement terrestre. Réduire cette disparité criante et accompagner la croissance des populations constituent aussi un devoir pour les nations. Ainsi selon le Département de l'Energie des Etats-Unis, la consommation mondiale de l'énergie devrait augmenter de 60 % sur la période 2010/2030 et cet accroissement proviendrait, en majeure partie, des pays émergents (conséquence en particulier du développement de pays comme la Chine ou l'Inde).

De fait une voie médiane sera probablement suivie. Elle s'appuiera sur la maîtrise de la plupart des options énergétiques considérées comme complémentaires (énergie renouvelable) et de leurs stockages. De plus, la diversification des options énergétiques apparaît indispensable pour prévenir les situations de crise auxquelles nous sommes de plus en plus exposés

La difficulté du marché des énergies fossiles liée à l'économie d'un monde en crise, outre les contraintes environnementales, rendent indispensable le recours aux d'énergies renouvelables qui sont des énergies propres et durables qui peuvent aussi remédier aux coupures répétées d'électricité dues aux surcharges des réseaux de distribution. L'utilisation des énergies renouvelables, et plus particulièrement celle de l'énergie solaire peut être une alternative remarquablement. On notera qu'outre les systèmes faisant appel à la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, les technologies utilisant directement l'énergie solaire thermique pour assurer le confort thermique sont les plus performantes, nous nous intéressant dans notre recherche à la climatisation par dessiccation solaire.

La climatisation en période estivale constitue l'un des grands enjeux de la politique énergétique des pays à climat chaud. Les techniques conventionnelles de rafraîchissement de l'air ont montré leurs limites principalement à cause des pics de consommation électrique engendrés par l'utilisation massive de climatiseurs. La technique du « desiccant cooling » peut constituer une alternative sérieuse particulièrement dans les régions à fort potentiel solaire. Cette solution est d'autant plus attrayante que les besoins en froid coïncident habituellement avec la disponibilité du rayonnement solaire.

Pour l'été, les besoins en climatisation et rafraîchissement augmente considérablement et le recours à la recherche de d'autre moyens comme le rafraîchissement solaire s'avère indispensable dont nous traitons dans la première partie de notre thèse ou un dispositif expérimental est proposé pour étudier le phénomène par traitement naturel de l'air. Pour le chauffage solaire, il est à noter que la problématique réside essentiellement dans les grandes

difficultés de son emmagasinage, dont l'intérêt de la deuxième partie de cette recherche qui représente une contribution théorique dans la voie de l'amélioration de l'efficacité d'un système de stockage pour le chauffage solaire.

II.2 Mutation énergétique

On constate aujourd'hui que la consommation des ressources naturelles des 40 dernières années dépasse celles cumulées par toutes les générations qui ont vécu depuis les origines de l'Homme. Force est d'admettre qu'un certain équilibre entre l'Homme et son environnement terrestre a atteint ses limites. Un autre développement s'impose. Devant la triple conjoncture de réchauffement climatique, d'épuisement des hydrocarbures, et d'une demande croissante géopolitiquement transformée, un changement de système énergétique des sociétés s'impose. Il s'agit d'une mutation gigantesque qui sera d'autant mieux maîtrisée, qu'elle sera anticipée avec des options de court, de moyen et de long terme et qu'elle aura l'accord des populations. Tous les peuples de la Terre ont intérêt à être solidaires et à coopérer pour que chacun d'entre eux maîtrise sa demande énergétique en fonction de ses besoins et de la réponse qu'il y apporte [69]. La crise énergétique qui se profile à l'horizon est mondiale. Il n'existe pas de solution pacifique qui pourrait être strictement nationale, quel que soit le pays. Un des enjeux de la situation actuelle réside dans la capacité qu'aura la communauté internationale d'y faire face avec une maîtrise suffisante pour préserver la paix, car la pénurie énergétique est le risque le plus important que l'Humanité pourrait avoir à affronter

II.3 Evaluation du besoin énergétique pour le chauffage et le rafraichissement

La demande énergétique pour le chauffage et le rafraichissement est évaluée selon différentes méthodes, la méthode des degrés jours (degrés heures), la méthode BIN, la méthode du réseau neurologique (NN) ainsi que la méthode « energy signature approach».

Une version simplifiée d'une expression du second degré est développée pour l'estimation approximative des degrés jours annuels de chauffage à des températures de bases [70]. Les seules données nécessaires pour l'application de cette relation est la valeur des degrés jours à la température de base de référence et la température moyenne annuelle de l'emplacement. La relation quadratique s'est avérée être tout à fait exact lorsqu'elle est appliquée aux données provenant de nombreuses localisations. En dehors de l'estimation des degrés jours de chauffage, l'expression suggérée peut être utile à des fins analytiques, en raison de sa forme

explicite et simple. L'énergie solaire peut également contribuer à répondre à la demande de chauffage, à la fois pour les espaces intérieurs ou d'eau chaude. L'utilisation de méthodes de degrés jours dans l'analyse énergétique des bâtiments est présentée dans plusieurs études [71]. Elle peut être utilisée pour déterminer la consommation de gaz naturel par le chauffage résidentiel par exemple [72]. Une telle analyse constitue un système fiable pour identifier les zones où des mesures d'économie d'énergie sont plus efficaces il est le principal utile pour localiser les installations de stockage et de conception de la grille de distribution du gaz naturel.

Cependant, durant la saison de refroidissement, les gains de chaleur peuvent être éliminés, et le début de refroidissement mécanique peut être différé en ouvrant les fenêtres, surtout pendant la nuit, lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température de base. Par conséquent, les degrés-heures de refroidissement représentent mieux la période où l'équipement est en marche que les degrés-jours de refroidissement, et l'estimation de la consommation énergétique de refroidissement est plus précise [73].

Les bâtiments jouent un rôle vital dans la plupart des aspects de nos vies et de leur consommation d'énergie. Il est important de comprendre l'impact probable de l'augmentation projetée de la température de refroidissement et de chauffage sur les exigences dans les bâtiments dans les climats futurs.

II.4 Energie renouvelable

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent les énergies renouvelables aux énergies propres, mais il faut a priori les distinguer bien que certaines énergies soient renouvelables et propres Le Soleil, principale origine des énergies renouvelables.

II.4.1 Classification des énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une énergie dont le gisement se reconstitue en permanence à un rythme au moins égal à celui de la consommation. Leurs diverses formes ont chacune leurs spécificités selon leur nature. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes.

Les énergies renouvelables (bois, solaire, hydroélectricité...) proviennent principalement de l'énergie solaire (sauf la géothermie et l'énergie marémotrice). De plus, toutes les énergies renouvelables (sauf l'énergie marémotrice) ont pour origine l'énergie nucléaire naturelle du soleil (par fusion nucléaire) ou de la Terre (par désintégration naturelle des roches de la croûte terrestre).

Le pétrole ou le gaz naturel ne sont pas des énergies renouvelables car il faudrait des millions d'années pour reformer la quantité d'énergie fossile que l'on consomme actuellement. De même, l'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable car la réserve d'uranium disponible sur terre est limitée.

La recherche et le développement dans le domaine des énergies renouvelables ont été sévèrement entravés dans beaucoup de nations par l'attribution d'une fraction minuscule des budgets sur l'énergie, avec les sources d'énergie conventionnelles qui continuent à se tailler la part du lion. D'après l'Agence internationale de l'énergie, seulement 7,7% des aides publiques de pays membres sont allées aux énergies renouvelables de 1987 à 2002.

Dans le domaine propre de l'énergie, plusieurs problèmes majeurs ne semblent pas recevoir l'effort de recherche qu'ils méritent et nous recommandons d'y consacrer un effort prioritaire:

1- Les éoliennes actuelles sont capables de produire des puissances de plusieurs MW. L'acceptabilité de leur implantation n'est pas toujours acquise. Cette objection s'applique moins pour des sites en haute mer, mais le coût augmente alors considérablement. Leur principal problème concerne les périodes d'indisponibilité, qui nécessitent de disposer d'une capacité de production en réserve par une centrale. Cette production pourrait être un complément intéressant jusqu'à 10 ou 15 % de la fourniture d'électricité. Au-delà, elle pose le problème du stockage saisonnier de l'énergie.

2- Parmi les biomasses envisagées, l'utilisation des ressources forestières pourrait recevoir un plus grand développement, sans entrer en compétition avec les cultures vivrières. Des recherches complémentaires seraient souhaitables pour étudier la préparation de gaz de synthèse à partir de la biomasse lignocellulosique, permettant ensuite la synthèse sélective de carburants. La production de biocarburants à partir de cultures dédiées est par nature limitée, car elle occupe préférentiellement des terres arables et nécessite un apport d'énergie substantiel pour l'exploitation et la fabrication du carburant, notamment en cas d'une culture intensive. Une analyse comparative devrait être menée avec d'autres types d'allocation des sols.

3- Dans les zones rurales et isolées des pays en développement, une quantité - même faible - d'électricité photovoltaïque permettrait de satisfaire les besoins de première nécessité,

tels que : éclairage, pompage d'eau potable, stockage des produits alimentaires, alimentation de petites antennes médicales, rupture de l'isolement des populations (enseignement). Des avancées sur les matériaux permettraient d'abaisser le coût des capteurs solaires. Ce problème concerne près de 2 milliards d'habitants qui ne sont pas reliés à un réseau électrique (et ne le seront peut-être jamais). Il relève autant du devoir humanitaire et de l'éthique que de la science et de la technique.

4- Le stockage temporaire de l'électricité serait une véritable percée. En effet, les énergies nucléaire, éolienne ou solaire - qui ne produisent pas de CO₂ - ne se prêtent guère au stockage d'énergie en grandes quantités. Les dispositifs indirects de stockage massif par voie hydraulique (barrages utilisés en sens inverse) sont vite saturés. On est actuellement très limité par les batteries, malgré les progrès réalisés. Le stockage de l'électricité permettrait de donner un plus grand développement aux énergies intermittentes, éoliennes ou photovoltaïques. D'une façon générale le stockage de l'énergie, quelle qu'en soit la forme (électricité, hydrogène, chaleur) aura un rôle central à jouer pour remplacer celui joué implicitement jusqu'ici par le stockage du pétrole ou du gaz. Bien que peu évoqué dans les priorités, il s'agit là d'un problème de grande importance dont la solution est loin d'être évidente. Actuellement, la vision politique de production d'énergie et son stockage n'est pas encore pris en charge à sa réelle valeur, malgré une certaine conscience de la gravité des phénomènes. Pour qu'elle ne soit pas brutale et douloureuse, un processus de recherche fondamentale et de développement technologique doit être amorcé dès maintenant, dans tous les domaines de production, de stockage et de l'usage de l'énergie, moyennant un important effort supporté par de grands programmes de recherche.

II.4.2 Limites des énergies renouvelables

Depuis 100 ans, on avait vu quelques inventeurs réaliser des chaudières solaires, distiller de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre dans des châssis couverts d'un vitrage et exposés au soleil. A partir des années 1930 on a vu apparaître dans le commerce des chauffe-eau solaires captant de l'énergie au moyen de capacités très minces en tôle, peintes extérieurement en noir et placées sur des châssis calorifugés et couverts d'un vitrage. C'est surtout depuis 25 ou 30 ans que dans certains pays les recherches ont été plus ou moins poussées dans des directions différentes, maintenant il y'a une activité croissante dans ce domaine dans plusieurs universités et instituts spécialisés, centres de recherche, dans certains milieux industriels et au sein des associations de spécialistes.

Cependant la technologie solaire n'est encore qu'en voie d'élaboration et continue plus ou moins sur certains points, de balbutier. On ne dispose pas toujours de détail sûr et précis dans le domaine technologique. IL est très difficile de faire une synthèse des connaissances acquises et des efforts exercés dans les milieux divers pour faire progresser l'hélio technique, mais il est possible de faire dans les grandes lignes un inventaire des utilisations actuelles et prévisibles de l'énergie solaire.

II.5 Energie solaire

L'utilisation thermique de l'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses avantages propres, ou les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisable et adaptables aux situations de toutes les régions, les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières, la main d'œuvre ne nécessite aucune formation complémentaire aisément maîtrisable, les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles.

Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène.

Les performances actuelles des procédés solaires thermiques les situent à un niveau concurrentiel par rapport aux systèmes photovoltaïques ou aux procédés utilisant d'autres énergies. La conversion en électricité est par exemple obtenue avec un rendement annuel moyen voisin de 14% pour des installations de fortes puissances munie d'un stockage thermique sous un ensoleillement de 2200 kWh/m²/an et mettant en œuvre des cycles thermodynamiques conventionnels. L'utilisation de cycles à plus hautes températures plus performants aux puissances élevées ou la mise en œuvre de cycles combinés à haut rendement laisse envisager de dépasser à moyen terme le seuil de 25% de rendement annuel moyen. Les possibilités d'hybridation des installations solaires à concentration avec des systèmes conventionnels de production de chaleur dégagent des perspectives de stratégies de transition qui permettraient d'atteindre à brève échéance les seuils de compétitivité économique nécessaires au développement industriel de ces filières. L'exemple des centrales américaines SEGS5 est à ce titre tout à fait édifiant. Ces centrales solaires, exploitées

industriellement dans le désert de Mojave en Californie depuis plus de 20 ans, représentent une capacité totale installée de 354 MW.

Elles mettent en œuvre la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques, la plus économique et la plus robuste actuellement. Un fluide caloporteur, à fort coefficient de transfert thermique et à forte capacité calorifique, circule dans le récepteur tubulaire et récupère l'énergie solaire sous forme de chaleur à une température de l'ordre de 350°C. La chaleur, stockée au besoin dans des réservoirs de stockage de fluide, est ensuite délivrée à une boucle de production d'électricité conventionnelle, un cycle de Rankine en l'occurrence. Un apport de chaleur par combustion de gaz naturel, limité à 25% de l'énergie totale, assure la continuité de la production d'électricité en période de faible ensoleillement sans recourir à un énorme stockage thermique qui serait trop onéreux.

L'exploitation de ces centrales a permis de réaliser des progrès significatifs et le rendement annuel moyen est passé de 8% en 1985 à 14% aujourd'hui. De même, l'expérience accumulée a permis de faire baisser les coûts d'exploitation et de maintenance ainsi que les coûts des concentrateurs.

Les progrès des centrales solaires réalisés sur la période 1985-2000 pour la production de l'énergie thermique obtenu grâce aux efforts de chercheurs en Allemagne, en Espagne et aux USA a enregistré un grand pas qui est complété par d'autres études pour le stockage de l'énergie excédentaire [74].

II.5.1 Technologies solaires

L'exploitation de l'énergie solaire à l'aide de capteurs thermiques est techniquement et économiquement rentable dans le cas de grandes installations. Les capteurs solaires sont avant tout utilisés pour la production d'eaux chaudes dans les habitations, locatives ou villas, les centres sportifs, les hôtels et l'industrie. De grandes installations servent également au chauffage de piscines et au séchage du foin. Du fait de sa grande fiabilité et de son rendement pouvant atteindre 85%, une installation solaire thermique peut être un bon complément à une installation traditionnelle, par exemple le préchauffage de l'eau chaude sanitaire est une des applications les plus économiques du solaire. Selon les calculs effectués par « Info énergie », les installations peuvent être normalement amorties dès que la consommation dépasse 1000 litres d'eau chaude par jour, ce qui est le cas de tout locatif, hôtel ou centre sportif ouvert en été.

Pour des maisons unifamiliales le prix d'une installation solaire peut être légèrement plus élevé, mais une telle installation ne présente aucun risque technique. Comme il est difficile

d'assurer la totalité de la production d'eau chaude par le solaire, particulièrement en hiver, les installations sont usuellement dimensionnées de manière à fournir le 100% des besoins en été ce qui conduit à un taux de couverture solaire annuel de 40 à 70 % selon les régions. On évite ainsi de gros stocks saisonniers, mais il faudra par contre prévoir un appoint pour l'hiver et les périodes de mauvais temps un stockage saisonnier). On compte usuellement une surface de captage de l'ordre de 1 m^2 par personne pour les locatifs et de $1,5$ à 2 m^2 par personne dans les maisons unifamiliales (ces surfaces concernant les capteurs vitrés, pour des capteurs non vitrés, compter le double) . Une grande partie des installations construites en Suisse par exemple sont des installations combinées pour le chauffage et la préparation d'eau chaude. Il faut néanmoins être conscient du fait que ce type d'installation produit une énergie relativement chère et n'est pas économique dans les conditions actuelles.

Par contre une telle installation peut fournir une part importante de l'énergie thermique nécessaire, voire même toute cette énergie, si elle comporte un stock saisonnier. L'application du solaire la plus "raisonnable" reste donc le préchauffage de l'eau chaude sanitaire.

II.5.2 Applications de la technologie solaire

Les technologies solaires sont largement caractérisées comme étant soit solaires passives, soit solaires actives selon la façon dont elles capturent, transforment et distribuent l'énergie solaire. Les techniques solaires actives incluent l'utilisation de panneaux photovoltaïques et de capteurs solaires pour exploiter l'énergie SENSE. Les techniques solaires passives incluent le fait d'orienter un bâtiment vers le soleil, de choisir des matériaux présentant une masse thermique ou des propriétés de dispersion de la lumière favorables, et de concevoir des locaux qui laissent circuler l'air naturellement [75].

L'optimisation des processus de conceptions, dimensionnement et de planification des installations solaires est actuellement l'axe de recherche le plus répondu dans le domaine de la recherche dans les énergies renouvelables. Concevoir et dimensionner une installation solaire c'est trouver le meilleur compromis entre le prix du kWh, Les exemples suivants donnent une idée des installations possibles [76].

- Installations solaires autonomes, avec stockage saisonnier.
- Installations combinées avec une pompe à chaleur.
- Installations combinées avec un chauffage traditionnel, à mazout, à gaz ou à bois:
- Installations de préchauffage solaire:

Le problème fondamental que rencontrent de telles installations de chauffage solaire est le fait que l'offre solaire ne répond pas à la demande de chauffage: c'est en hiver que l'on a le plus besoin d'énergie, au moment où il y a le moins de soleil. Des systèmes de chauffage solaire doivent donc comprendre un stock de chaleur qui peut être important.

II.6 Capteurs solaires

II.6.1 Les capteurs solaires à air

Le système de captage dans les capteurs solaires à air peut être une grande surface vitrée placée devant un mur sombre qui emmagasiner la chaleur ou encore un panneau dans lequel circule l'air qui traversera un réservoir rempli de galets.

Le choix d'un chauffage solaire par air nécessite une adaptation de l'architecture. Un système de chauffage solaire passif peut ne comporter qu'une grande verrière que l'on occulte par un rideau extérieur lorsque le besoin de chauffage ne se fait pas sentir ou en l'absence de rayonnement solaire pendant la période froide.

La plus élaborée de ces propositions est le concept « GAST » devenu plus tard « PHOEBUS » [77] étudié par les équipes allemandes de la DLR et ayant donné lieu à l'étude détaillée d'un grand projet.

Le récepteur doit ici réchauffer de l'air à une température très élevée. Des tentatives ont été menées à bien pour obtenir ce résultat à partir d'un absorbeur métallique. C'était d'ailleurs l'option envisagée lors des premières esquisses de Gast. Mais de telles solutions, chères et fragiles, présentent en plus l'inconvénient d'offrir des surfaces de pertes à température plus élevée que celle de l'air chaud produit (du fait du gradient de température existant dans la paroi métallique).

II.6.2 Les capteurs à concentration parabolique

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80 [78]. L'installation typique est constituée de trois éléments principaux : le champ solaire, le système de transfert de la chaleur et le système de génération électrique. L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à une température d'environ 0°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des

échangeurs conventionnels afin de produire de vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique.

Le récepteur à concentration ou parabolique est linéaire au lieu de surfacique, disposant d'un foyer et d'un système optique peu performant [138], on le fait travailler à température modérée (inférieure à 400°C), ce qui permet d'utiliser comme fluide caloporteur une huile de synthèse. il est généralement protégé de pertes thermiques par des dispositions originales et efficaces.

II.6.3 Les capteurs solaires photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable permettant de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. Les cellules solaires sont des plaques de silicium particulièrement préparées et protégées par une vitre. Ce type de capteur produit un courant continu au plus près des lieux de consommation, de manière décentralisée. Plusieurs cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque. Cette installation peut être isolée et fonctionner « en îlot » en chargeant des batteries et répondant à des besoins locaux, ou alimenter un réseau de distribution électrique [79].

Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables, aucune pièce mécanique n'est en mouvement, les matériaux employés résistent aux intempéries. La durée de vie d'un capteur photovoltaïque est de plusieurs dizaines d'années.

II.6.4 Les capteurs solaires thermiques

Un capteur solaire thermique (ou capteur hélio-thermique ou collecteur solaire ou simplement capteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie lumineuse transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels. Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considéré, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre [80].

Le type d'application peut aller du chauffage d'une piscine avec un capteur léger, à une centrale solaire thermodynamique produisant de l'électricité. Le fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau, un mélange antigel, un fluide à changement de phase, ou encore une

huile possédant une température de vaporisation élevée pour les applications nécessitant de hautes températures [81].

II.7 Les capteurs solaires appliqués aux techniques de rafraîchissement solaire

L'utilisation de l'énergie solaire pour le rafraîchissement est une alternative attirante, les technologies basées sur un processus de transformation thermodynamique sont actuellement les plus prometteuses, trois d'entre elles sont développées à un niveau commercial.

Ces trois technologies (absorption, adsorption en cycle fermé et dessiccation en cycle ouvert, ou desiccant cooling) varient selon des indicateurs énergétiques saisonniers. Il est démontré qu'un taux minimum de fourniture d'énergie solaire est nécessaire afin de réaliser des économies d'énergie primaire, qui peuvent aller dans certains cas jusqu'à 60 % [82].

La technologie de froid solaire à dessiccation en cycle ouvert s'appuie sur l'utilisation du potentiel de changement de phase de l'eau pour refroidir l'air soufflé dans un local. Pour maximiser l'effet de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, le flux d'air ventilé est d'abord desséché dans un processus à dessiccation nécessitant un flux d'air chauffé par des capteurs solaires (de 50 à 85°C) [83]. Ce système, appelé « desiccant cooling » ou cycle de Pennington .

II.8 Fluide caloporteur et récepteur solaire

Les trois fluides caloporteurs les plus utilisés sont la vapeur d'eau, l'air et les sels fondus. L'installation pilote de Barstow en Californie a utilisé de la vapeur d'eau comme fluide caloporteur de 1982 à 1988. La vapeur d'eau a ensuite été remplacée par des sels fondus, qui ont l'avantage d'être également un moyen de stockage de l'énergie calorifique. Les premières approches utilisaient des faisceaux de tubes en acier au sommet de la tour pour absorber la radiation solaire. Ce concept a bien fonctionné sur l'installation de Barstow avec les sels fondus, mais a montré ses limites sur d'autres installations européennes lorsque l'air est utilisé comme fluide caloporteur. Des surchauffes locales des tubes en acier ont en effet été constatées ainsi que des transferts de chaleurs inadéquats. Un nouveau concept de récepteur à air a alors été mis au point dans le cadre du projet allemand PHOEBUS [84].

Ce récepteur utilise un maillage de fils métalliques, directement exposé à la radiation solaire incidente. Le bon fonctionnement de ce système a été validé sur une installation pilote de 2.5 MW à Almeria mais n'est pas encore disponible commercialement. Les températures atteintes

sont de 800°C, mais des températures supérieures pourraient être atteintes avec des structures poreuses de SiC ou de Al₂O₃ actuellement en développement.

Le développement des centrales solaires thermodynamiques à tour montre un engouement particulier pour certains types de récepteurs solaires. En effet, ces dernières années de nouveaux types de récepteurs sont apparus. En revanche d'autres ne sont plus fonctionnels, tels que les récepteurs à eau-vapeur et à métal fondu. Actuellement, les travaux de recherche sont orientés vers l'amélioration des performances de deux types de récepteurs : le récepteur à sel fondu et le récepteur à air volumétrique. Dans le processus de conception d'un récepteur à sel fondu, on cherche à optimiser la surface de captation du rayonnement solaire, minimiser les pertes de chaleur (convection, émission et conduction) et déterminer le nombre et le diamètre des tubes qui conviennent le mieux. Pour le récepteur volumétrique à air, les travaux de recherche qui sont menés à ce jour concernent le développement du contrôle des composants, la stratégie de gestion de l'installation, l'amélioration de la performance et la fiabilité des composants.

II.8.1 Récepteurs solaires

Bien que les centrales solaires thermodynamiques à tour soient commercialement moins matures que les systèmes des capteurs cylindro-paraboliques, elles ont fait néanmoins l'objet d'expérimentations et de tests sur le terrain à travers le monde durant ces trente dernières années, démontrant ainsi la faisabilité technique et le potentiel économique de cette technologie [85]. Une centrale solaire à tour se compose essentiellement d'un champ de réflecteurs à deux axes de suivi appelés héliostats. Ces derniers concentrent le rayonnement solaire direct sur un récepteur monté sur une tour. La chaleur transformée dans cette tour solaire peut être utilisée pour la production d'électricité. La littérature propose plusieurs types de récepteurs. On peut énumérer au moins trois types des récepteurs :

II.8.1.1 Le récepteur à eau-vapeur

L'eau est convertie en vapeur dans le récepteur et est utilisée directement pour alimenter une turbine à vapeur avec le cycle de Rankine conventionnelle. Son avantage majeur est sa simplicité et sa puissance considérable. Dans ce cas, on utilise un récepteur à tubes qui est alimenté en eau à haute pression. Avec la surface réceptrice la plus « noir » possible pour assurer le niveau d'absorptivité le plus élevé. Ce problème est général et concerne tous les récepteurs surfaciques

II.8.1.2 Le récepteur à sel fondu

Le récepteur à sel fondu est un appareil robuste car, étant parcouru sur toute sa surface par un liquide à grande vitesse, il est assez tolérant aux variations naturelles de la cartographie des flux. La rupture d'un de ses tubes peut être considérée comme un événement tout à fait exceptionnel, d'où un entretien à priori peu coûteux. De plus, le contrôle de cette cartographie peut être abandonné, surtout dans le cas d'une chaudière en cavité à la surface de réception généreuse (cas de Thémis). Il est donc facile à conduire.

Son fonctionnement entraîne des pertes de charge sévères qui nécessitent la mise en œuvre de pompes de circulation puissantes. Celles-ci entraînent une consommation électrique interne importante qui pénalise le rendement de conversion de la centrale [86].

A cet égard, il serait bien préférable d'absorber le rayonnement solaire dans la masse même du fluide en circulation plutôt que sur une paroi métallique intermédiaire : il serait alors inutile de provoquer ces coûteuses pertes de charge. Un prototype de récepteur à sel de ce type a été essayé par les « Sandia Laboratories » sur leur site d'Albuquerque. Il s'agissait d'un récepteur dans lequel on créait une lame de sel épaisse quasi verticale par écoulement en cataracte sur une tôle légèrement inclinée par rapport à la verticale. Cette tentative n'a pas eu de suite sans doute du fait de la dégradation chimique du sel provoqué par son contact cyclique avec de l'air neuf lors de sa traversée du récepteur.

II.8.1.3 Le récepteur à métal fondu

Actuellement, les travaux de recherche sont orientés vers l'amélioration des performances de deux types de récepteurs : le récepteur à sel fondu et le récepteur à air volumétrique. Dans le processus de conception d'un récepteur à sel fondu, on cherche à optimiser la surface de captation du rayonnement solaire, minimiser les pertes de chaleur (convection, émission et conduction) et déterminer le nombre et le diamètre des tubes qui conviennent le mieux.

L'intérêt d'utiliser un métal fondu comme fluide caloporteur vient de ce qu'il est très bon conducteur de la chaleur et qu'en conséquence il présente des coefficients d'échange thermique avec la paroi particulièrement favorables. De ce fait, un récepteur à métal liquide (le sodium par exemple) peut présenter au flux une surface bien moindre que celle nécessaire à un récepteur à sel. Il pourra par exemple s'inscrire directement dans le plan focal sans avoir besoin de se développer en cavité pour augmenter ses surfaces d'échange. Une des conséquences de ce fait est que, à puissance thermique égale, un récepteur à sodium présentera bien moins de pertes de charge qu'un récepteur à sel [86]. La théorie indique

également qu'il devrait être plus économique à construire. Malheureusement la pratique d'un métal aussi facilement inflammable impose de tels dispositifs de sécurité que les conclusions de la théorie s'avèrent tout à fait exagérées. Si on y ajoute le fait que le développement en cavité de la chaudière, qui renchérit le coût de l'appareil, peut néanmoins présenter un avantage du point de vue de son absorptivité et que le sodium est un calostockeur très médiocre en comparaison du sel fondu, on peut conclure que cette solution aux atouts brillants n'est guère prometteuse [87].

II.9 Limites de l'énergie solaire.

Les variations, en un lieu donné, du flux solaire, tantôt nul, tantôt surabondant, compliquent notablement son utilisation. Il convient de distinguer deux types de variations : les unes liées au mouvement apparent du Soleil provoquent les modulations diurne et annuelle, parfaitement prévisibles à partir des données astronomiques; les autres, dues aux circonstances météorologiques, ont un caractère beaucoup plus aléatoire. Pour régulariser la disponibilité de l'énergie solaire, s'impose une solution évidente sinon facile à mettre en œuvre c'est le stockage de l'énergie thermique.

L'énergie solaire thermique active a toutefois certaines limites car elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations d'une part et d'autre part c'est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple) [88].

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

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, seules sept stations assurent depuis 1970 la mesure de la composante globale et diffuse du rayonnement solaire. Le nombre de ces stations étant

insuffisant et c'est pour cela que divers modèles ont été proposés pour estimer le gisement solaire à une échelle locale ou régionale. Ces modèles s'étendent des codes de calcul les plus complexes et les plus sophistiqués aux simples relations empiriques. Le choix du modèle est dicté par la nature des données et par la précision recherchée.

L'utilisation d'un modèle de l'atmosphère basé fondamentalement sur la connaissance du trouble atmosphérique pour la détermination des différentes composantes du rayonnement solaire d'un site donné notamment l'éclairement solaire direct est très indispensable dans la concentration solaire.

Le rapport entre la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la surface utile du capteur et la puissance que ce capteur fournit au fluide caloporteur, donne la valeur de l'efficacité d'un capteur. Le meilleur rendement est obtenu quand les pertes sont nulles, c'est-à-dire quand la température du capteur est inférieure ou égale à la température ambiante, malgré l'éclairement. Ce cas est par exemple celui où la température d'utilisation est inférieure à la température ambiante extérieure, tel que le chauffage d'une piscine par temps chaud. À l'extrême opposé, le rendement est nul quand le fluide caloporteur est arrêté, la température atteint alors la température de stagnation, où les pertes sont égales à la puissance transformée en chaleur. Cette température permet de juger de la qualité d'isolation du capteur, mais elle ne permet pas de juger des performances du système intégrant ce capteur.

II.10 Généralités sur le Soleil et le rayonnement solaire :

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de 1,39.109m et est à distance moyenne de 1,49.1011m de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 aux régions polaires [23]. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777K. La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de 8.10^6 à 40.10^6 K et la densité est estimée à 100 fois celle de l'eau. Le soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion est déclenché pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie [23].

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace. Les processus radiatif et convectif sont le résultat des états successifs d'émission, d'absorption et de radiation; la gamme de spectre de rayonnement dans le noyau du soleil est comprise entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons gamma, avec une longueur d'onde de radiation qui augmente suivant la diminution de la température à de grandes distances.

Dans la structure schématique du soleil illustré dans la figure I.1, il est estimé que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire située entre 0 et $0,23R$, où R le rayon du soleil, qui représente 40% de la masse du soleil. A distance de $0,7R$ du centre, la température diminue d'environ 130 000 K et la densité de 70 kg/m^3 . Là, le processus convectif du soleil devient important et la zone comprise entre $0,7$ et $1,0R$ est appelée : zone convective. Dans cette zone, la température diminue d'environ 5000 K et la densité d'environ 10^{-5} kg/m^3 [23].

Le rayonnement thermique est un phénomène se caractérisant par un échange d'énergie électromagnétique, sans que le milieu intermédiaire ne participe nécessairement à cet échange. Par exemple, le rayonnement solaire est capable d'échauffer la terre bien que le milieu traversé soit à une température plus basse que la terre.

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

- Emission. Il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique
- Transmission. La transmission de cette énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé.
- Réception. A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption).

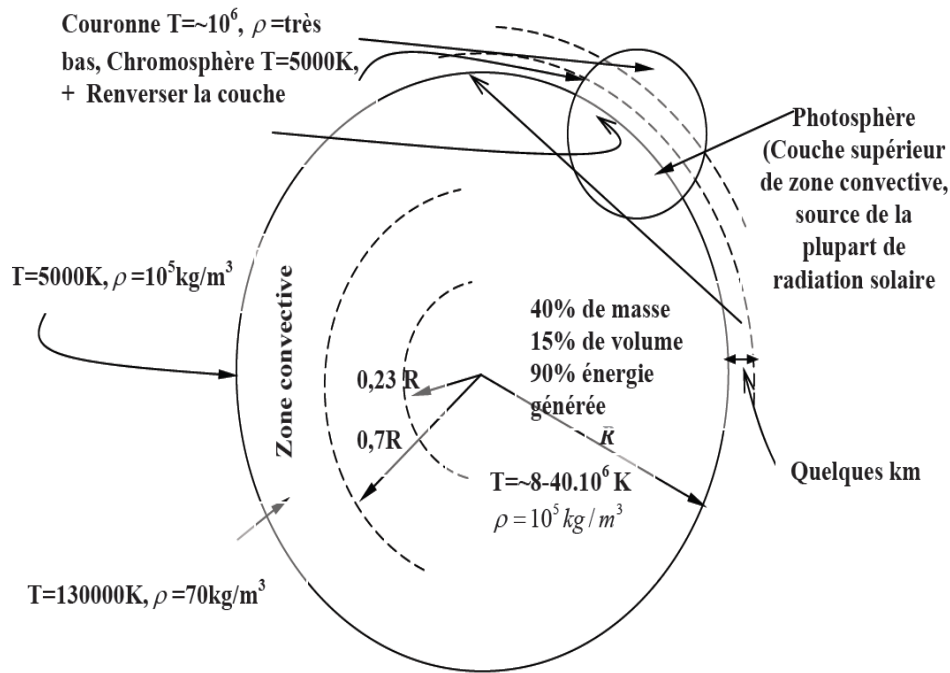


Figure II -1 : La structure du soleil

La surface apparente du soleil est constituée de granules (cellules convectives irrégulières), avec des dimensions de l'ordre de 1000 à 3000 km et leur durée de vie est estimée à quelques minutes. Les autres formes à la surface du soleil sont de petites aires opaques qui s'appellent pores. A des dimensions équivalentes à celles des cellules convectives, il existe d'autres aires opaques avec des dimensions variables qui s'appellent taches solaires. La couche extérieure de la zone convective s'appelle photosphère, sa densité est très faible (environ 10^{-4} celle de l'air au niveau de la mer). Cette couche est composée de gaz à forte ionisation qui peut absorber et émettre des radiations de spectre continue. La photosphère est la source de la plupart des radiations solaires.

II.11 Théorie de l'énergie solaire

II.11.1 Translation et rotation de la terre

On peut décomposer les mouvements de la terre en considérant séparément le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (translation) [29]. En vingt-quatre heures, la terre effectue une rotation complète d'Ouest en Est autour de son axe ; c'est la base de notre système horaire. De cette rotation découle la succession des jours et des nuits [29]. La terre effectue un tour complet autour du soleil en 365,25 jours suivant une orbite elliptique, tandis que la vitesse moyenne de ce mouvement est d'environ 30 km/s. La distance entre les centres de ces deux astres varie d'une valeur minimale au Périhélie ($1,47 \cdot 10^{11} \text{m}$), aux environs du 2 janvier, à une valeur

maximale, à l'Aphélie ($1,52 \cdot 10^{11}\text{m}$), aux environs du 3 juillet, la valeur moyenne étant appelée unité astronomique (UA) [29].

Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont illustrés dans **Figure II -1** alors que le tableau (II -1) montre la durée des saisons conséquentes à ce mouvement :

Saison (Hémisphère N)	Durée moyenne	Du	Au
Printemps	92 jours 20 heures	21/3	21/6
Eté	93 jours 15 heures	21/6	23/9
Automne	89 jours 19 heures	23/9	22/12
Hiver	89 jours	22/12	21/3

Tableau (II -1) : Durée des saisons [110].

En effet, le trajet parcouru par le rayonnement solaire au cours d'une même journée est à son maximum aux premières heures de la matinée et en fin d'après-midi. Par contre, il est à son minimum lorsque le soleil est au zénith. Pour cette même raison, l'intensité du rayonnement est variable au cours des saisons et avec la latitude. Ainsi, le rayonnement solaire global reçu au cours d'une journée peut varier de $0,5 \text{ kWh/m}^2$ pour une journée d'hiver ensoleillée dans les régions nordiques, à plus de $6,0 \text{ kWh/m}^2$ pour une journée ensoleillée dans les régions tropicales.

Evidemment, par temps couvert le rayonnement solaire au sol peut tomber pratiquement à zéro. En revanche, pour une journée ensoleillée et un ciel parfaitement dégagé, le rayonnement solaire diffus tombant au sol peut atteindre 15 à 20% du rayonnement global, mais avec un ciel couvert, le rayonnement parvenant au sol est en totalité un rayonnement diffus [80]. Les centrales solaires à concentration ne sont donc productives que durant

Les heures de beau temps. Leur productibilité est proportionnelle au nombre d'heures annuel de présence du soleil. Ce paramètre est donc nécessaire pour une réflexion sur l'étendue du gisement pour un projet de centrale thermodynamique solaire (la limite inférieure des zones utilisables se situe vers 2500 heures annuelles de présence du soleil). Toute étude, application ou conversion de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et

détaillée du rayonnement solaire dans ce site. Ceci est généralement possible grâce aux stations de mesure météorologique. Cependant, dans la plupart des cas, il n'existe pas de mesures locales du rayonnement solaire et le recours à certaines méthodes appropriés, permettant de prédire les caractéristiques du rayonnement solaire et de l'estimer, est nécessaire [89].

II.11.2 Le spectre solaire

Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire. Le rayonnement ou spectre solaire se présente sensiblement comme celui d'un corps noir à 5 800°K.

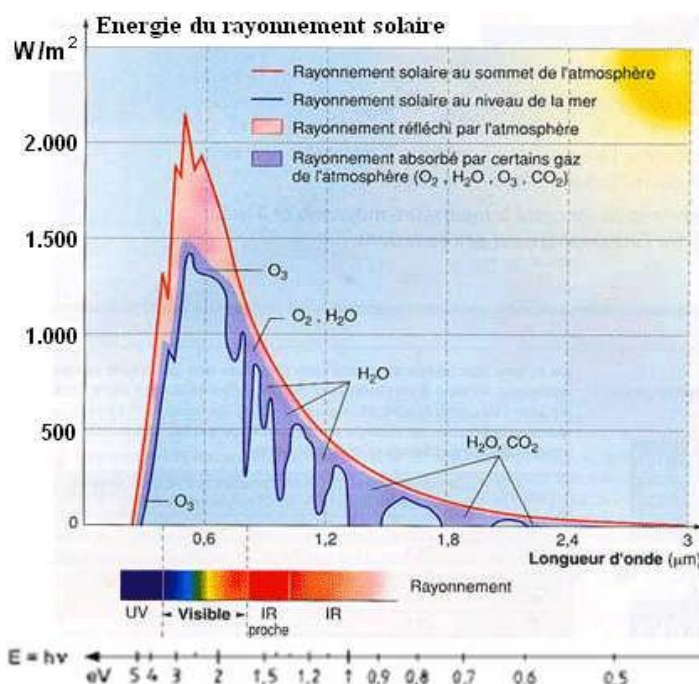
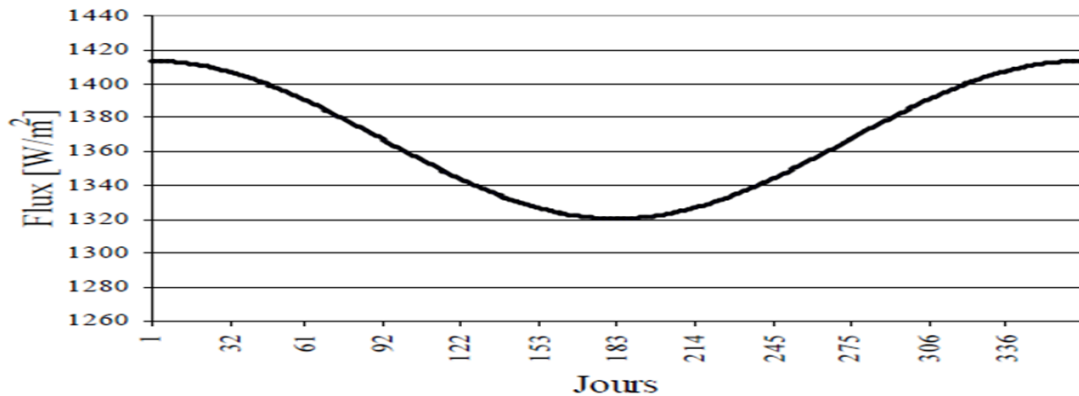


Figure II -2 Répartition spectrale du rayonnement solaire

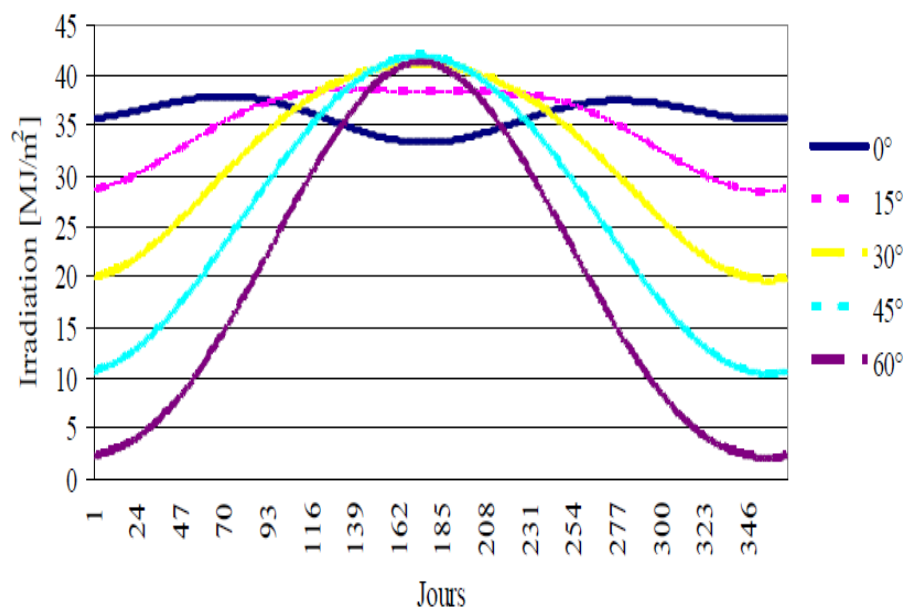
Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre 0,25 μm et 2,5 μm , l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95% environ du total [90]. Mais en traversant l'atmosphère l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion, et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est l'ordre de 1000 W/m^2 [14].

II.11.3 Rayonnement solaire a la limite de l'atmosphère :

L'émission de rayonnement électromagnétique du soleil se manifeste par une puissance moyenne de 1367 W/m^2 [36] dans un plan perpendiculaire au rayonnement, qui varie de $\pm 3.4\%$ environ au cours de l'année [29].



Graph II -1 Variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons



Graph II -2 Variations annuelles de l'irradiation quotidienne d'une surface réceptrice horizontale située hors atmosphère avec différentes latitudes

a. Eclairement d'un récepteur plan

Le coefficient d'incidence $\cos \gamma$ est l'angle formé par le rayonnement solaire incident avec la perpendiculaire issue de la surface considérée. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut et d'autre part par l'orientation (points cardinaux) et

l'inclinaison i du plan récepteur. Ainsi, chaque plan récepteur peut être défini par un couple de valeurs, soit (O, i) . L'orientation est négative vers l'Est et est positive vers l'Ouest, Quant à l'inclinaison, elle est égale à 0° pour un plan horizontal et 90° pour un plan vertical. Si le coefficient d'incidence est négatif, la surface du plan considéré ne reçoit pas de rayon solaire direct.

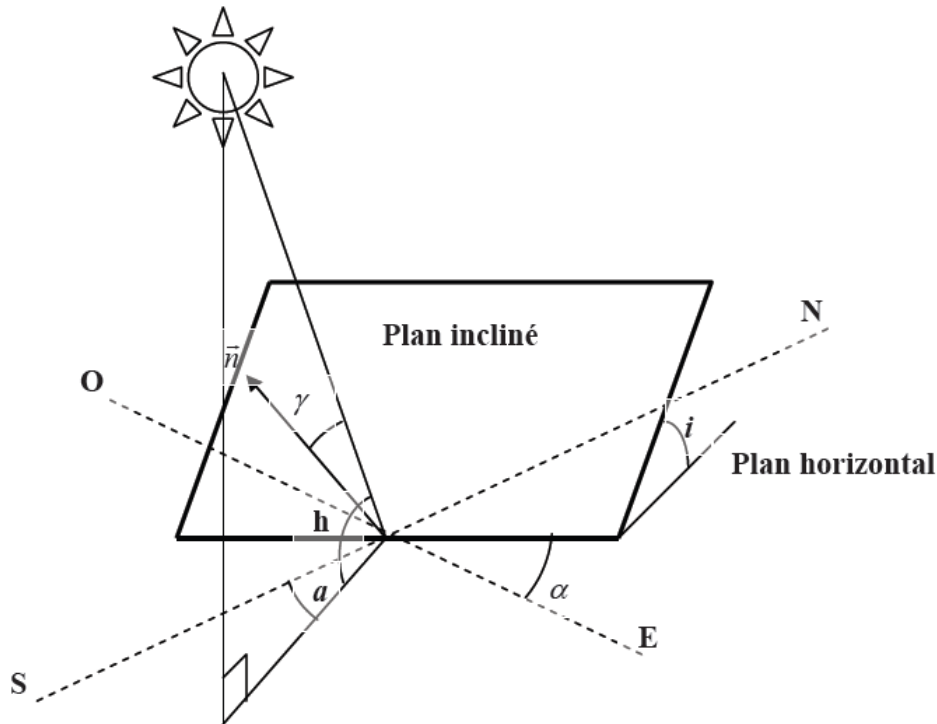


Figure II -3 Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice [91]

L'inclinaison sur l'horizontale est désignée par l'angle compris entre 0° et 90° et par le plan azimutal α compris entre -180° et 0° vers l'Est et entre 0° et 180° vers l'Ouest.

L'éclairement lumineux (W/m^2) est maximal lorsque le rayonnement est perpendiculaire au plan ($\gamma = 0$). L'angle d'incidence θ augmente jusqu'à être le rayonnement à incidence rasante ($\gamma = 90$).

L'éclairement perpendiculaire à un plan, peut être calculé par la formule [91] :

$$S = I_{DN} \cos \gamma$$

L'angle d'incidence γ est défini par les variables a , h , α et i et peut être calculé par [91] :

$$\cos \gamma = \cosh \sin i \cos (a - \alpha) + \sinh \cos i$$

Le rayonnement solaire est ainsi composé de deux types de rayonnement (la proportion du rayonnement dû à l'albédo étant très faible) :

b. Le rayonnement solaire direct

Défini comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

c. Le rayonnement solaire diffus

Correspondant au rayonnement dispersé dans l'atmosphère par la brume, le ciel lui-même, et les nuages. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit. Eclairement énergétique solaire dirigé vers le sol reçu par une surface horizontale, provenant de tout l'hémisphère partant de l'angle solide limité au disque solaire.

$$G = S + D$$

$$G = I_{DN} \cos \gamma + D_{sol} + D_{ciel}$$

L'énergie G^* emmagasinée pendant le temps t est obtenue grâce à la formule suivante :

$$G^* = \int_0^t G dt$$

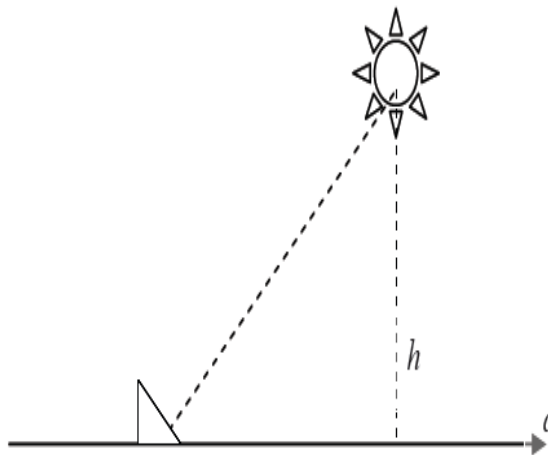
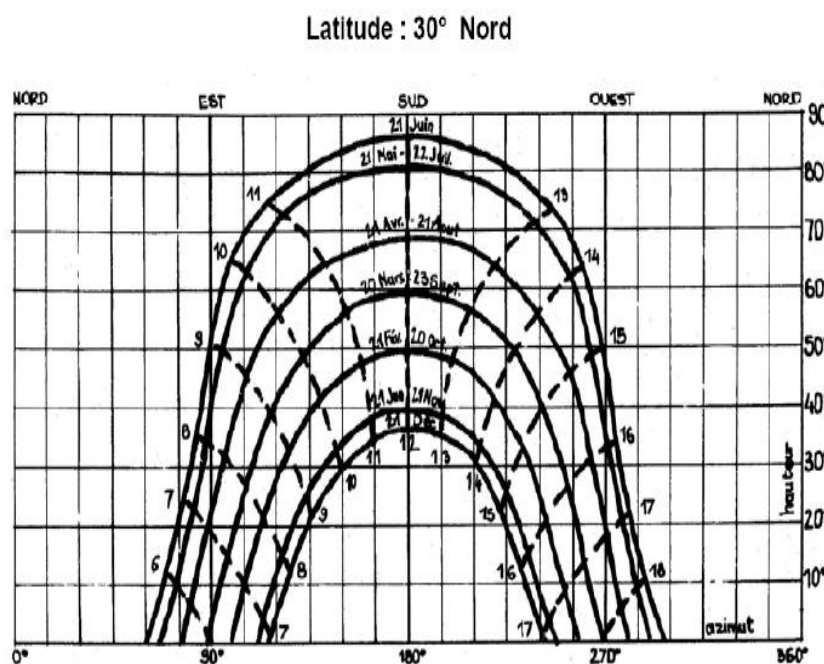


Figure II -4 Représentation dans le plan azimutal des coordonnées (a, h) du soleil dans le cas d'un capteur situé dans l'hémisphère nord [91]

d. Le rayonnement solaire global

Est alors la somme des deux types de rayonnements direct et diffus et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre [23]. Eclairement énergétique solaire reçu par une surface horizontale à partir d'un angle solide Symbole : G .



Graph II -3 Diagramme solaire [121]

L'intérêt du diagramme solaire d'un point de vue énergétique est de renseigner rapidement sur l'effet de masque dû à un obstacle (immeuble, ... etc.) pouvant occulter le soleil pendant une partie du temps.

II.12 L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Lors de son trajet à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses influences :

1. Diffusion par les molécules composant les gaz atmosphériques (diffusion de Rayleigh, Mie). Elle affecte les courtes longueurs d'onde du spectre solaire (loi de variation en λ^{-4}) ; ce qui explique la couleur bleue du ciel.
2. Absorption par les gaz atmosphériques (oxygène, O_3) dans le domaine des courtes longueurs d'ondes (vapeur d'eau...) et dans celui des grandes longueurs d'onde (gaz carbonique...).

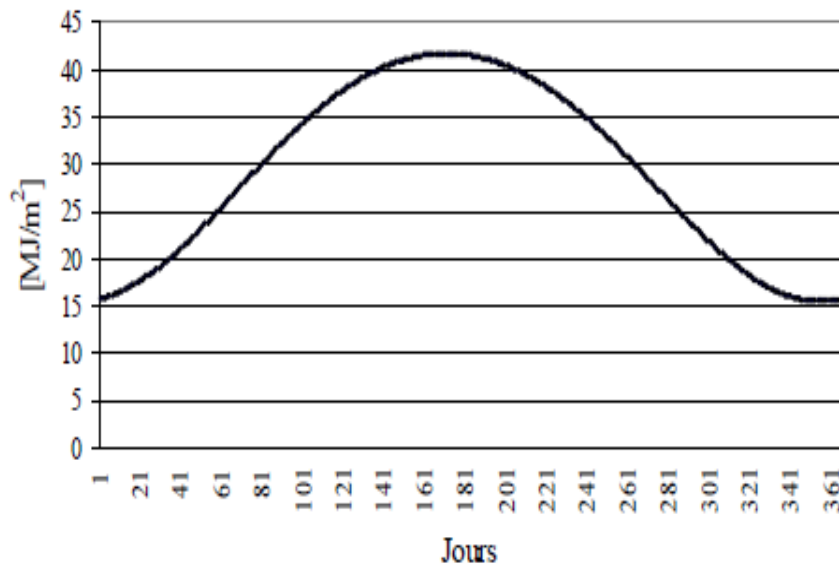
3. Diffusion par les aérosols est les microparticules en suspension dans l'atmosphère, ainsi que par les microcristaux et les gouttelettes constituant les nuages. Là, toutes les longueurs d'ondes sont affectées, ce qui cause parfois des troubles atmosphériques.

II.13 Energie reçue par une surface horizontale située à l'extérieur de l'atmosphère

L'intégration de la formule (I – 3) entre le lever et le coucher du soleil, permet d'estimer l'irradiation (énergie) reçue par une surface réceptrice horizontale, hors atmosphère, ce qui donne la formule suivante [91] :

$$I_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[\frac{\pi}{180} \omega_l \sin \phi \sin \delta + \sin \omega_l \cos \phi \cos \delta \right]$$

$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$: valeur moyenne de la constante solaire.



Graph II -4 Variation de l'énergie extraterrestre reçue par une surface horizontale

II.14 Estimation de l'éclairement solaire

L'éclairement solaire est défini comme étant la puissance (W/m^2) reçue par unité de surface réceptrice plongée dans un flux énergétique. L'énergie solaire (constance solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère, 1367 W/m^2) subit une dégradation lorsqu'elle traverse l'atmosphère, une partie seulement de cette énergie est disponible au sol. Ce rayonnement solaire se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct (I_{DN}) et le rayonnement solaire diffus (D). La somme de ces deux rayonnements est appelée : rayonnement solaire global (G).

II.15 Estimation solaire instantanée

L'éclairement solaire direct S sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs méthodes en fonction des données disponibles.

Nous avons comparé les efficacités géométriques de différents collecteurs en examinant la constance avec laquelle chacun d'eux recueille l'énergie solaire pendant une journée ou un an, indépendamment de leurs dimensions, de l'énergie reçue, de la concentration, et de l'utilisation ultérieure du flux capté. Nous avons pour cela choisi l'heure équivalente comme unité d'énergie.

Nous avons considéré cinq (5) types fondamentaux :

- Capteur asservis sur le soleil,
- Capteur fixe
- miroir cylindrique fixe à facettes
- capteur mobile autour d'un axe (miroir Cylindro-Parabolique par exemple),
- miroir sphérique fixe.

II.15.1 Calcul le rayonnement solaire Direct normal :

Le rayonnement solaire direct arrive à traverser l'atmosphère mais subit malgré tout atténuation de son intensité. Le calcul ce rayonnement suit des différents méthodes parmi c'est méthode :

- La pression atmosphérique en fonction de l'altitude du point local [18]

$$P_{atm} = P_0 \left(1 - 2.26z / 10^{-5}\right)^{5.26}$$

z : Altitude en mètre.

Définition de la pression de la vapeur saturante P_{vs} [18], le taux moyen d'humidité relative HR et la pression partielle de vapeur d'eau P_v :

$$P_{vs} = 2.165 \left(1.098 + \frac{T_{amb}}{100}\right)^{8.02}$$

$$P_{vs} = 661 \exp \left(\frac{T_{amb}}{0.059T_{amb} + 13.706} \right)$$

$$\overline{HR} = 50\%$$

$$P_v = P_{vs} HR$$

T_{amb} : Température de l'air en °C.

- La masse d'air optique relative m d'où en découle l'épaisseur optique de Rayleigh ER qui détermine l'atténuation due à la diffusion, la solution de l'équation (I- 27) a été faite par Kasten [18]

$$m = \frac{P_{atm}}{P_0 \sinh + 1519,75(3,885 + h)^{-1.253}} \quad (\text{I} - 33)$$

Où Dans l'atlas solaire, Capderou [92] a utilisé la formule suivante:

$$m = \frac{1}{\sinh + 9,40.10^{-4}(\sinh + 0,0678)^{-1.253}} \quad (\text{I} - 34)$$

$$E_R = \frac{1}{0,9m + 9,4} \quad (\text{I} - 35)$$

Où h est la hauteur du soleil en degré.

- Le facteur de trouble de Linke :

$$T_L = 2,4 + 14,6\beta + 0,4(1 + 2\beta)\ln P_V \quad (\text{I} - 36)$$

Où β est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend les valeurs de :

β : 0,02 pour un lieu en montagne ;

β : 0,05 pour un lieu rural ;

β : 0,10 pour un lieu urbain ;

β : 0,20 pour un lieu industriel (atmosphère polluée).

Le rayonnement solaire sur un plan récepteur normal à ce rayonnement vaut donc :

$$I_{DN} = I_{SC} \exp(-E_R m T_L) \quad (\text{I} - 37)$$

En simplifier l'obtention :

$$I_{DN} = I_{SC} \exp\left(-\frac{T_L}{0,9 + 9,4 \sinh}\right) \quad (\text{I} - 38)$$

II.15.2 Calcul le rayonnement solaire diffus

Le rayonnement solaire diffus arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol, on suppose que le rayonnement solaire diffus n'a pas une direction bien déterminé, l'orientation du plan récepteur n'a pas importance, seul l'inclinaison en tenir compte [91].

$$D = 125 \sin(h)^{0.4} \left(1 + \frac{\cos i}{2}\right) + 211,86 \sin(h)^{1.22} \left(\frac{1 - \cos i}{2}\right)$$

Ou par l'utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure [133] :

$$D = 54,8 \sqrt{\sin(h)} [TL - 0,5 - \sqrt{\sin(h)}]$$

II.15.3 Calcul le rayonnement solaire global

La somme de deux rayonnements représente le rayonnement global [121] :

$$G = S + D$$

Ou S est la valeur de rayonnement solaire direct sur un plan récepteur qui égal à :

$$S = I_{DN} \cos \gamma$$

L'énergie solaire effective reçue est alors mesuré sur l'année en énergie thermique pour un emplacement donné. Les pays du sud de la Méditerranée ont un grand potentiel tel que démontré dans la figure :

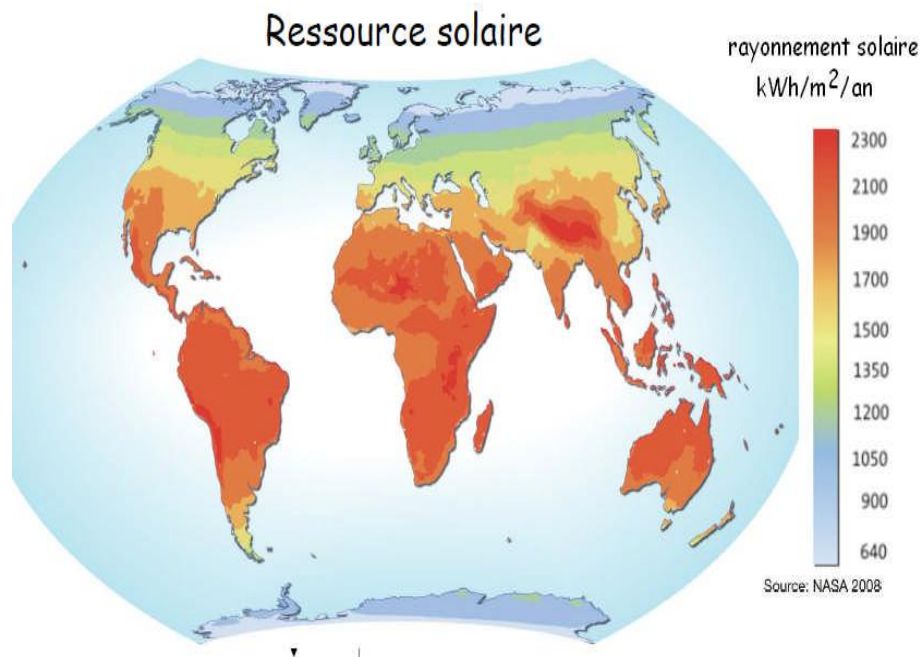


Figure II -5 Rayonnement solaire annuel en [kWh/m²/an]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence spatiale allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen [135-136]. La puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1KW/m^2 . L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6KW/m^2 et l'énergie annuelle maximale est de l'ordre de 2500 KW/m^2 [137].

II.16 Rayonnement en Algérie

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m^2 . L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6Kw/m^2 et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 Kw/m^2 .

L'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique est résumé dans le tableau suivant

Régions	littoral	Haut plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energy, moy reçue (kwh/m²/an)	1700	1900	2650

Tableau II -2 : Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique
(Ministère de l'énergie et des Mines)

II.18 Diffusion de la chaleur et du froid

Le chauffage aéraulique, utilisant le réseau de ventilation pour la diffusion de la chaleur, semble la solution la plus simple et la plus économique à mettre en œuvre au sein d'un bâtiment à énergie positive. En effet [93], cette solution nécessite un équipement peu encombrant. Elle possède une bonne réactivité aux besoins de puissance du fait de sa faible inertie et est donc particulièrement adaptée aux bâtiments très isolés, où le moindre apport solaire ou interne suffit à atteindre la température de consigne : l'arrêt du système doit alors être très rapide.

II.18 Production d'énergie

L'électricité nécessaire au fonctionnement du bâtiment peut être produite sur place à partir de ressources renouvelables disponibles localement : le soleil (conversion photovoltaïque ou thermique), le vent (conversion électromécanique par aérogénérateur) ou l'énergie mécanique de l'eau (hydroélectricité). La chaleur nécessaire au maintien du confort intérieur et au chauffage de l'eau sanitaire est assurée, soit par des panneaux solaires thermiques (dits aussi «héliothermiques »), soit par un équipement de cogénération fonctionnant de préférence avec un combustible renouvelable. L'usage d'une pompe à chaleur peut-être envisagé dès lors que la production locale d'électricité à partir de ressources renouvelables est suffisant. Les apports internes de chaleur, issus du métabolisme des occupants ou du fonctionnement des appareils domestiques doivent être comptabilisés car ils peuvent fortement contribuer au chauffage du bâtiment en hiver ou à sa surchauffe en été.

II.19 Conclusion

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil .Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu. Par exemple les capteurs installés à laghouat sont inclinés de 33.67°). L'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Compte tenu de son potentiel énorme, le solaire à concentration se développe aujourd'hui dans plusieurs pays, en particulier dans le sud-ouest des Etats-Unis et en Espagne où de très nombreux projets sont en cours de réalisation. Les puissances électrique produites par les centrales solaires se situ actuellement de 10 à 300MWe plus faible comparés à celles des centrales thermiques nucléaires 800 à 1600 MWe. Mais ces projets génèrent des milliers d'emplois ainsi qu'une énergie propre et durable.

Chapitre III

Confort thermique

III.1 Introduction

Actuellement, les technologies disponibles sont suffisamment mures pour pouvoir maîtriser le confort intérieur selon une demande standard tout en gardant un bon ratio de consommation énergétique. La Suisse par exemple fixe la température intérieure de confort à environ 21°C. Si cette température était le standard partout, il est bien entendu que dans des pays à climat bien plus chaud comme l'Asie du sud-est, le travail sur le bâtiment, l'installation technique et la consommation en énergie (énergie grise) serait bien plus conséquente.

Dans la plupart des pays à climat tropical, les bâtiments standards sont équipés d'appareils ou d'installations à air conditionné. Dans la plupart des cas le type de construction est relativement économique et simple, les bâtiments sont très peu isolés menant à une grande perte énergétique. La chaleur externe chauffe trop facilement le bâtiment et en retour le froid fourni par les climatiseurs sort trop facilement. Cette situation est souvent présente également dans des pays riches (USA, Japon, Corée du Sud, etc...). La réflexion sur la physique des bâtiments en rapport aux conditions climatiques locales semble trop rarement prise en compte. Quand elle a lieu, une recherche sur les caractéristiques des matériaux disponibles pour améliorer l'isolation thermique de la construction est trop souvent vite bouclée. Le maître d'œuvre ou l'architecte se tournant rapidement vers des choix d'appareils permettant un contrôle total du climat intérieur quelle que soit la situation extérieure.

III.2 La notion de confort thermique

Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique et hydrique entre le corps humain et son environnement. Il dépend de l'activité physique, du métabolisme, de l'habillement et de la sensibilité (aspect psycho-sociologique) de chaque individu, d'une part, et de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air et de l'humidité, d'autre part. De plus, le comportement de l'individu aux conditions d'ambiance tend à réduire l'inconfort. Ainsi, les notions de confort et d'inconfort sont très délicates à caractériser et de nombreuses méthodes ont été proposées. Néanmoins, par des méthodes statistiques, Différentes définitions sont données pour le confort thermique selon que l'être humain est considéré comme un objet physique, une machine thermique autorégulée, ou une personne active affectée par ses sensations. Citons par exemple : - Conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale [32], Etat d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique [94-95].

La majorité des définitions renvoie à l'aspect physiologique du confort thermique, la neutralité thermique, l'absence des tensions ou même l'agrément. L'agrément est souvent associé à la stimulation qui tend à ramener la température interne du sujet vers la température de consigne et donc à réduire les mécanismes de thermorégulation. Au contraire, une stimulation qui tend à éloigner la température interne de la température de consigne et donc à augmenter les mécanismes de thermorégulation, est jugée désagréable [96]. Mais au-delà de l'aspect physiologique du confort thermique, la relation entre le sujet et son entourage (la façon dont il le perçoit), son humeur, ses expériences thermiques sont des facteurs psychologiques qui affectent la perception thermique et amène le sujet à agir sur son environnement pour garantir son confort. **La figure 1.4 montre une** schématisation de la relation entre une personne et son environnement, la relation avec l'ambiance thermique y faisant partie [97]. Cette schématisation montre que le confort thermique n'est pas seulement lié aux conditions thermiques et aux variables physiologiques. Selon les caractéristiques personnelles (psychologiques), les expériences thermiques et la culture, des attentes se forment chez les personnes quant à la qualité de leurs ambiances thermiques, et les amène à anticiper les conditions ou le changement dans les conditions thermiques. Si les conditions actuelles ne correspondent pas à ce qu'ils ont anticipé, la réponse va être différente selon la personne, l'importance et la nature des écarts (plus ou moins favorables), les conséquences prévues, et l'opportunité à changer les conditions. L'interaction sensorielle (visuelle, ou acoustique) peut aussi avoir une influence sur le confort thermique. Si par exemple le confort thermique est assuré dans un local par ouverture des fenêtres (en été ou mi-saison), la présence d'un bruit extérieur peut encombrer le confort thermique. La présence d'une contrainte pour l'une des composantes du confort sensoriel, constitue une entrave pour les autres [97].

La notion est assez difficile à définir de façon précise car elle est très subjective. Certains individus appelleront une ambiance confortable, une ambiance paraissant surchauffée ou encore trop fraîche à d'autres... En fait, il est plus facile de mettre en évidence la notion d'inconfort car on parlera d'ambiance inconfortable ressentie sur le plan physiologique lorsque le corps humain doit faire appel à ses mécanismes régulateurs internes ; ce qui se traduit par une sensation désagréable. Il est donc possible de définir clairement une ambiance inconfortable pour un individu donné. Reste le problème des écarts importants entre individus. Aussi, tout critère de confort thermique se voulant le plus exhaustif possible devra être défini à partir d'une étude statistique portant sur un échantillon représentatif d'êtres

humains. C'est, ce qui est effectivement fait dans les laboratoires qui se préoccupent du confort thermique (Prof.Fanger de l'université de Lingby Danemark).

Différentes définitions sont données pour le confort thermique selon que l'être humain est considéré comme un objet physique, une machine thermique autorégulée, ou une personne active affectée par ses sensations. Citons par exemple : - Conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale [32]. Etat d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique [94-95] La majorité des définitions renvoie à l'aspect physiologique du confort thermique, la neutralité thermique, l'absence des tensions ou même l'agrément. L'agrément est souvent associé à la stimulation qui tend à ramener la température interne du sujet vers la température de consigne et donc à réduire les mécanismes de thermorégulation. Au contraire, une stimulation qui tend à éloigner la température interne de la température de consigne et donc à augmenter les mécanismes de thermorégulation, est jugée désagréable [96]. Mais au-delà de l'aspect physiologique du confort thermique, la relation entre le sujet et son entourage (la façon dont il le perçoit), son humeur, ses expériences thermiques sont des facteurs psychologiques qui affectent la perception thermique et amène le sujet à agir sur son environnement pour garantir son confort. La figure 1.4 montre une schématisation de la relation entre une personne et son environnement, la relation avec l'ambiance thermique y faisant partie [97]. Cette schématisation montre que le confort thermique n'est pas seulement lié aux conditions thermiques et aux variables physiologiques. Selon les caractéristiques personnelles (psychologiques), les expériences thermiques et la culture, des attentes se forment chez les personnes quant à la qualité de leurs ambiances thermiques, et les amène à anticiper les conditions ou le changement dans les conditions thermiques. Si les conditions actuelles ne correspondent pas à ce qu'ils ont anticipé, la réponse va être différente selon la personne, l'importance et la nature des écarts (plus ou moins favorables), les conséquences prévues, et l'opportunité à changer les conditions. L'interaction sensorielle (visuel, ou acoustique) peut aussi avoir une influence sur le confort thermique. Si par exemple le confort thermique est assuré dans un local par ouverture des fenêtres (en été ou mi-saison), la présence d'un bruit extérieur peut encombrer le confort thermique. La présence d'une contrainte pour l'une des composantes du confort sensoriel, constitue une entrave pour les autres [97].

Pour étudier le phénomène du confort ; il est nécessaire de définir les paramètres caractéristiques de l'environnement qui peuvent, dans certaines conditions, entraîner une sensation d'inconfort. Ces paramètres sont pour l'essentiel la température ambiante , l'humidité de l'air ambiant , les écarts de température subis dans le temps et dans l'espace , les

mouvements de l'air ambiant et le bruit environnant d'une part et connaissances de les paramètres pour l'étude des transferts thermiques entre corps humain et ambiance d'autre part.

Le confort thermique n'est donc pas défini dans l'absolu. Il dépend du contexte et des caractéristiques individuelles. Il peut être conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques. Enfin, compte tenu de l'aspect subjectif du confort thermique apparaissant comme un jugement affectif, son évaluation nécessite l'utilisation de trois échelles essentielles : l'une relative à la sensation, l'autre à l'agrément, et la troisième à la préférence. La norme internationale ISO 10551 précise les méthodes d'évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs

III.3 Confort thermique

Le domaine du confort thermal et de la thermorégulation a été bien étudié par un certain nombre de chercheurs tels que Nicol et al. (1995), McIntyre (1980) et de Hensel (1981) d'une part et un certain nombre de thèses en PhD dont les travaux ont été publiés dans des revues spécialisées d'une autre part traitant l'étude des paramètres du confort [7], ou l'utilisation du conditionnement de l'air par exemple à Singapour [8], ou le confort sous des conditions non uniformes [9], ou le confort par ventilation personnelle [10-11]. Nous nous intéressons dans cette recherche bibliographique de trouver un point de convergence entre les différents travaux réalisés dans le domaine.

Les modèles de confort thermique reliant les variables de l'environnement et les individus pour déterminer les meilleures conditions dans un local rafraîchi restent toujours subjective à cause de la variabilité des paramètres du confort d'un individu à un autre. La zone du confort a été calculée pour la première fois en 1923 par les ingénieurs F.C. Houghton Et Constantin Yaglou au laboratoire de Pittsburgh de l'American SOCIETY of Heating and Ventilating Engineers (ASHVE). Ils ont imaginé et utilisé une variable toute neuve : la température effective qui prend en compte à la fois la chaleur et l'humidité. Elle exige des mesures de la température faites par deux types de thermomètres, le bulbe sec, dry-bulb, et le bulbe humide, le wet-bulb, et l'utilisation de la carte psychométrique, mise au point par Willis Carrier. Les Ingénieurs en froid et de l'air Conditionné de l'American Society of Heating, définissaient le confort thermique comme « l'état d'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement ». Comparé à la méthode de mesure des années 20, le calcul de la zone du

confort s'est avéré inexact et subjective en tant que définition [12]. Ackermann s'étend sur cette subjectivité à travers l'architecte Heschong (1979) qui détermine les plages de température 14-21°C en Grande Bretagne, 21-27°C aux états Unis par exemple, et résumé par Le Psychologue Rohles (2007) et A. Ackermann (2002) QUI ONT conclu que les paramètres du confort d'hiver ont changé de 18°C (1923) à 20°C (1941) à 25°C (1960) et cela d'après une statistique durant 40 ans de recherche et d'observation .

Fanger de 1970 indique que les normes de référence utilisée dans le domaine du confort thermique sont ceux pour l'organisation pour la Standardisation Internationale (ISO 7730 2005) et la Compagnie des Ingénieurs Américains pour le Chaud et Froid et l'Air Conditionné (ASHRAE 55 2010).

Les chercheurs du confort en laboratoires sont concernés par la présentation le confort thermique comme une science exacte. Ils considèrent que les études doivent prendre en considération une plage de température ce qui est très vague pour une analyse très sérieuse sans faire des distributions statistiques[13-14], qui varient hautement souvent tout en prenant en compte les erreurs des mesures physiques qui sont généralement mal définies[15], et mettant l'accent sur le fait que le monde réel est complexe à la fois physiquement, socialement, et culturellement. Il faut alors s'éloigner des études en laboratoire et se pencher plus sur les expériences in situ [16]. Le confort thermique adaptif est basé sur des études réelles ou des agents de bureau a travers le monde travaillant régulièrement [17], utilisant principalement soit l'échelle de sensation thermique ASHRAE, soit l'échelle de Bradford.

Il est nécessaire de résoudre cette division entre le confort thermique dans les champs et dans des bureaux à air conditionné on utilisant les outils du confort adaptif pour vérifier les préférences des occupants dans un environnement contrôlé centralement. Une étude similaire fut menée par Schiller qui découvrit que la température optimale définit par l'étude au laboratoire est différente in situ [18].

Baker (1996) introduit une autre définition du confort thermique par la distinction entre la sensation thermique de la satisfaction complétés par les études menées par [19]-[20], qui ont trouvé que les valeurs calculées sont habituellement plus basse que les estimations du in situ ou ils ont déduit que les occupants sont plus confortables quand il fait légèrement plus froid.

Il est possible de déduire un certain nombre de tendances :

1. Une température idéale n'existe pas pour toutes les conditions de travail.
2. Plusieurs températures idéales sont en deçà de la température neutre
3. Il semble qu'il y ait un préjugé de genre dans la température idéale

Comment intègre-t-on toutes ces informations ? Théoriquement il peut être possible d'utiliser ces études pour prédire la bonne température propre au métabolisme. Humpfreys et Nicol ont remarqué dans leurs travaux sur la théorie adaptative, ils ont entrepris une étude de champ pour déterminer comment le confort agit sur la productivité [21].

III.4 Les modèles du confort thermique

Dès le début du siècle dernier en se rendant compte de l'importance de l'effet du confort thermique sur la santé et la productivité des hommes, de nombreux travaux de recherche ont été menés pour fixer les meilleures conditions du confort thermique [25]. Généralement ces travaux sont effectués dans des chambres climatiques avec des êtres humains. Ils visent à comprendre les mécanismes mis en jeu avec identification des conditions de confort et d'acceptabilité des ambiances thermiques. A la suite de ces travaux, plusieurs indices de confort thermique ont été développés. Les modèles développés sont de différentes natures [98]. Il y a les modèles physiques qui sont souvent basés sur l'identification des mécanismes mis en jeu pour l'identification des conditions de confort dont les réponses physiques à l'ambiance thermique sont semblables à celles du corps humain. Il y a aussi les mannequins thermiques souvent utilisés pour la détermination des caractéristiques thermiques des vêtements [98]. Enfin, il y a les modèles empiriques qui établissent à travers les expérimentations, dans les chambres climatiques ou in situ, une régression statistique en combinant les effets de deux ou plusieurs variables physiques et/ou physiologiques en une seule variable et les modèles rationnels. Les modèles empiriques. Les modèles rationnels sont fondés sur des estimations des différentes formes d'échanges de chaleur entre le corps humain et les ambiances thermiques, ainsi que du bilan thermique et de la contrainte physiologique résultante.

De nombreux modèles analytiques ont été développés pour prévoir les réponses thermiques et physiologiques du corps humain en fonction des conditions environnementales, dans les conditions stationnaires ou transitoires. Dans les modèles les plus simples, le corps est traité comme un bloc unique. Les modèles plus complexes divisent le corps en plusieurs segments et permettent de simuler la dynamique des réponses physiologiques on peut citer

L'application du modèle au cas des bâtiments de bureaux naturellement ventilés nous a permis de déterminer les conditions qui permettent d'établir le confort thermique avec des ressources énergétiques limitées, en utilisant un ventilateur local ou la ventilation nocturne, selon l'inertie du local, l'orientation, les protections solaires, et le climat

L'interaction entre l'homme et son environnement a été le sujet de nombreuses études traitant du confort thermique [99]. L'homme étant un homéotherme, il s'adapte aux différentes conditions climatiques en actionnant des mécanismes physiologiques lui permettant de garder une température centrale autour de 37 °C. Les modèles mathématiques, dont le but est de prédire la sensation thermique, sont basés sur le calcul du bilan thermique du corps humain. Ils font intervenir des paramètres physiques, et physiologiques. Les paramètres physiques font intervenir les échanges de chaleur entre le corps et l'environnement externe (conduction, convection, rayonnement, évaporation). Les paramètres physiologiques, eux, font intervenir des réactions de protection (sudation, vasodilatation, vasoconstriction, frisson). Le modèle de Stolwijk a été conçu initialement pour la NASA [1] [100]. Il modélise le corps humain par 25 nœuds. Six segments représentant la tête, le tronc, les bras, les mains, les jambes et les pieds. Chaque segment est constitué de 4 couches (noyau, muscles, graisse, peau). Le 25ème nœud illustre le flux sanguin. Dans le modèle de [2] [101], le corps humain est composé de deux compartiments cylindriques (la peau et le noyau central). Ce modèle, qui est l'un des plus simples, a été développé pour un individu se trouvant dans un milieu homogène.

III.4.1 Le modèle de Fanger

La méthode de Fanger consiste à déterminer de façon analytique les échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement. Puis en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée (bilan thermique) par le corps humain vêtu,

III.4.2 Le modèle à deux nœuds de Gagge

Gagge a développé un modèle dynamique simplifié de la thermorégulation [25]. Ce modèle représente le corps humain en deux nœuds concentriques représentant le centre du corps et la peau. Les échanges entre les deux compartiments considérés isothermes sont modélisés sous forme de conduction tissulaire et convection sanguine. Contrairement au modèle de Fanger, ce modèle permet de calculer les variables physiologiques (températures cutanées et internes, mouillure cutanée) dans des conditions transitoires.

III.4.3 Les modèles approfondis

Le développement rapide de l'informatique pendant les dernières décennies a permis d'approfondir la recherche dans le domaine du confort thermique en créant et en affinant les modèles thermiques du corps humain. Il s'agit d'une simulation dynamique du comportement

thermique et physiologique du corps humain dans une ambiance thermique donnée (bâtiment, voiture, scaphandre, etc.), transitoire et hétérogène, à travers un système d'équations différentielles. Les modèles thermiques comportent une description du système passif (le corps humain) qui est sujet aux différents échanges thermiques ayant lieu à l'intérieur du corps et avec l'ambiance, et du système actif de thermorégulation.

III.4.4 Le modèle de Stolwijk.

Pour le modèle Conçu initialement pour la NASA [102], il servira à étudier l'impact des systèmes de chauffage, de ventilation et de refroidissement sur les sensations ressenties par l'être humain. C'est un modèle basé sur la sensation thermique en régime transitoire et en milieu non homogène. Il représente le corps humain et sa thermorégulation ou le corps est divisé en 6 segments : tête (sphérique), tronc, bras, mains, jambes et pieds (cylindriques). Chacun de ces segments est composé de 4 couches : peau, graisse, muscles et noyau. Le 25ième segment du modèle représente le sang et assure un lien thermique entre tous les compartiments. Le vêtement est modélisé par une couche d'air sous une couche de tissu. Chaque couche (physiologique et vêtement) est considérée homogène et isotherme. Il n'y a aucun échange au sein d'une même couche, aucun transfert dans le sens longitudinal. Les transferts par conduction entre les segments sont négligés, ils ne sont reliés entre eux que par le débit sanguin. Le métabolisme est réparti dans toutes les couches, le métabolisme d'activité ou de frisson n'a lieu que dans les muscles. Le débit sanguin est constant au centre et dans la graisse. Les pertes respiratoires sont prises en compte dans la couche centrale de la tête et du tronc. Le bilan thermique détaillé (débit de chaleur et températures) est calculé pour chaque compartiment du modèle. Il prend en compte l'environnement thermique (qui peut être transitoire et spatialement hétérogène) et les réactions thermo physiologiques de l'individu. Le système de régulation est composé de trois éléments : les récepteurs, l'intégrateur et le répartiteur, et permet une représentation simple de du système de thermorégulation humain sous forme des températures de consigne. Selon le signal d'écart détecté par l'intégrateur, une commande est envoyée et répartie entre les différents organes effecteurs en fonction des coefficients de contrôle.

III.4.5 Le modèle de Givoni

Établi par Burach Givoni à peu près à la même époque que le modèle de Fanger, ce modèle de détermination du confort thermique intègre l'évapotranspiration. Issu de ce modèle, le diagramme de Givoni, établi pour une activité sédentaire et avec un habillement

adapté à l'été, définit, sur le diagramme de l'air humide, des zones de confort correspondant à différentes plages de vitesse d'air (jusqu'à 1,5 m/s, vitesse au-delà de laquelle un risque de nuisance existe). Largement utilisé en Amérique du Sud et dans les DOM TOM, il a fait l'objet d'études récentes menées par le laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion et revalidé par une série d'enquêtes sur un bâtiment non climatisé (IUP de Saint-Pierre).

Les vitesses supérieures ne peuvent être atteintes que grâce à des dispositifs mécaniques (brasseurs d'air), dans le cadre des plages de vitesse confortables décrites plus haut.

III.5 Conditions du confort thermique

III.5.1 Équilibre thermique

Nous savons que le confort thermique est lié aux stimuli des thermorécepteurs, aux réponses thermorégulatrices et à beaucoup d'autres qu'il est difficile de mesurer... On peut, en première analyse, distinguer les régimes transitoires du régime stationnaire, où la notion de confort se confond avec celle de neutralité :

D'après les observations, il doit être possible de trouver une relation entre le Confort et le flux de chaleur métabolique (par unité de surface de peau) , la résistance de la vêtue , la température de l'air , la température moyenne des surfaces ambiantes ,la vitesse relative de l'air , la température de la peau variable selon le débit sanguin dans les vaisseaux périphériques ,la pression de la vapeur d'eau de l'air et la perte thermique par transpiration Cette condition est cependant insuffisante pour caractériser le confort thermique. On sait en effet que les variables physiologiques, sont dépendantes de la thermorégulation. Ce système de thermorégulation est assez efficace et l'équilibre thermique peut dès lors être atteint dans une plage de conditions d'ambiance assez large, afin de maintenir une température de noyau constante. Il s'agit là d'une question de survie et non de confort thermique... On peut dès lors distinguer deux types de problèmes, à savoir le problème physique et le problème physiologique. Le problème physique est de calculer la charge en fonction des variables physiques ou, éventuellement, d'une température équivalente. Le problème physiologique sera alors de passer de la charge (le stress) à la gêne (le strain). Au voisinage de la neutralité, nous mesurerons la gêne par un vote subjectif (V).

III.6 Confort thermique et Traitement de l'air

Les diverses recherches conduites sur le milieu ambiant ont montré l'importance d'un bon climat intérieur sur la santé des personnes et leur productivité. Le maintien de la qualité de l'air intérieur, détérioré par l'emploi de nouvelles machines dans les différents locaux,

constitue un facteur de développement important de la diffusion tant dans les bureaux que dans les locaux industriels. Des concepts comme la maîtrise de l'énergie et l'étanchéité des bâtiments accroissent les exigences d'un système de ventilation.

Dans les années 70, l'expérience a démontré qu'il fallait mettre en œuvre des volumes d'air frais plus importants avec une efficacité supérieure du système de ventilation. «RT 2000-2005» L'application de la Réglementation thermique 2000 et 2005 permet d'ajouter un cadre précis à l'amélioration des performances d'un bâtiment tout en réalisant les économies d'énergies nécessaires. Dans le cas d'ambiance normale (locaux non contaminés), les questions essentielles concernent le bruit généré par le système de climatisation et le climat intérieur, à savoir les facteurs qui déterminent le respect de l'équilibre thermique humain (température et vitesse d'air principalement).

Il existe dans le domaine du génie climatique plusieurs types de systèmes que l'on peut classer en trois catégories :

- les centrales unizones.
- les centrales multizones.
- les systèmes autonomes.

III.7 Besoin énergétique et confort thermique

Avec les besoins actuels d'économie d'énergie et de maîtrise des impacts environnementaux du bâtiment, certains doutes se posent sur la définition du confort thermique et la façon de créer et maintenir les conditions de confort. En effet, les normes actuelles considèrent le confort thermique sous une approche analytique, réductrice de la complexité du réel. Les études in situ du confort thermique ont permis de constater une surestimation du niveau de l'inconfort perçu en réalité par rapport à celui prévu par ces normes surtout dans les bâtiments naturellement ventilés pendant les périodes chaudes. Ces études ont servi à mettre les bases de l'approche adaptative, qui caractérise le confort thermique à travers les interactions adaptatives entre l'occupant et son environnement. L'utilisation des normes peut conduire à un recours systématique à la climatisation alors que l'approche adaptative permet d'assurer le confort thermique avec des consommations d'énergie plus modestes.

III.8 Environnement et confort thermique

Les conditions d'un environnement thermique acceptable sont définies dans la norme 55-1992 et son addenda 1995 de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) intitulée Thermal Environmental Conditions for Human

Occupancy. Cette norme spécifie des conditions dans lesquelles 80 % ou plus des personnes en bonne santé trouveront une ambiance confortable. En effet, en raison des différences de perception d'un individu à l'autre, il est impossible de déterminer une ambiance thermique qui soit satisfaisante pour tous. La norme ASHRAE peut servir de repère pour l'évaluation d'une situation de travail. Il serait souhaitable de vérifier aussi l'appréciation subjective qu'en donne chacun des travailleurs à l'aide d'un questionnaire (voir page 15). Les recommandations qui suivent s'appliquent à des activités sédentaires ou légères exercées par des personnes portant une tenue vestimentaire normale. Le travail de bureau constitue le meilleur exemple de ce type d'activités. Les recommandations relatives aux conditions environnementales ont été regroupées sous deux thèmes : d'une part, celles qui visent à assurer le confort thermique général, c'est-à-dire du corps dans son ensemble, et, d'autre part, celles qui concernent le confort thermique local.

III.9 Paramètres du confort thermique

Les paramètres influant le confort thermique sont principalement le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°C, l'habillement, qui est équivalente à la résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement, la température ambiante de l'air, la température moyenne des parois, l'humidité relative de l'air, qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température t_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température et la vitesse de l'air, qui influence les échanges de chaleur par convection.

III.9.1 La température résultante

La température résultante est un indice de confort intégrant l'effet de la convection et du rayonnement. Elle est en fait définie comme la température d'une enceinte isotherme dans laquelle un occupant échange la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'enceinte dans laquelle il se trouve réellement [26].

Cet indice est pris égal à la température mesurée à l'intérieur d'un globe noir dont le diamètre est déterminé de façon que les échanges de chaleur par convection et rayonnement soient dans les mêmes proportions que pour le corps humain. Pour une convection naturelle avec une vitesse d'air faible (entre 0.1 et 0.15 m/s) [103].

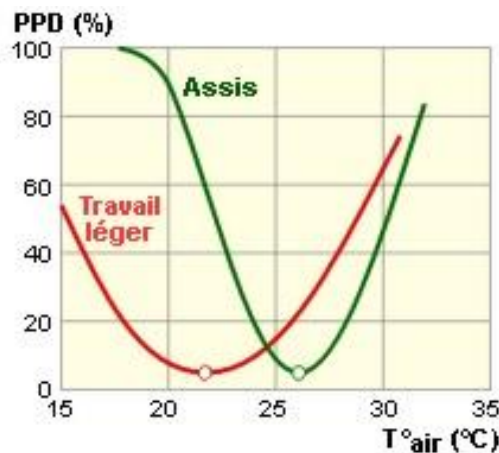
III.9.2 La température équivalente

La température équivalente est définie comme étant la température d'une enceinte isotherme ayant une vitesse d'air nulle, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur sensible, par convection et rayonnement, que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Elle permet de prendre en compte les effets des températures d'air, de rayonnement et de la vitesse d'air. Elle peut être calculée à partir de la température à l'intérieur d'un globe chauffé.

III.9.3 La température effective

La température effective est définie comme étant la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. L'indice ET^* prend en compte les effets de la température et de l'humidité, et pour le calculer, il faut connaître la mouillure cutanée et l'indice de perméabilité à la vapeur d'eau des vêtements. L'ASHRAE a établi des échelles de confort basées sur cet indice pour des sujets exerçant une activité faible.

Dans les conditions habituelles, l'homme assure le maintien de sa température corporelle autour de $36,7^{\circ}\text{C}$. Cette température est en permanence supérieure à la température d'ambiance, aussi un équilibre doit-il être trouvé afin d'assurer le bien-être de l'individu.



Graphique III -1 Pourcentages prévisibles d'insatisfaits (PPD).

Il est impossible de définir une température qui convienne à tous : il reste au mieux 5 % d'insatisfaits !

Il est intéressant de constater que la courbe des sujets au repos est centrée sur 26C°, et qu'elle est plus resserrée : ces personnes sont plus sensibles à de faibles variations de température.

La courbe représentant le travail léger glisse vers les basses températures : les personnes ayant plus de chaleur à perdre préfèrent des températures plus basses.

III.9.4 L'humidité de l'air

Elle crée les conditions des échanges thermiques par évaporation cutanée. Elle s'exprime habituellement en humidité relative HR, rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température de cet air et la quantité maximale d'eau que peut contenir l'air (saturation) à cette même température. La plage de confort est suffisamment large, de 30 % d'humidité relative à 70 %, de sorte qu'en climat tempéré, l'humidité est rarement un facteur déterminant du confort.

III.9.5 La vitesse de l'air

La vitesse de l'air (et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération, car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s.

A titre de comparaison : se promener à la vitesse de 1 km/h produit sur le corps un déplacement de l'air de 0,3 m/s.

Le mouvement de l'air abaisse la température du corps, facteur recherché en été, mais pouvant être gênant en hiver (courants d'air) car Elle favorise l'évapotranspiration et les échanges thermiques par convection. Ce faisant, la vitesse d'air abaisse la température de surface, ce qui est intéressant en été mais gênant en hiver. Cet effet n'est vraiment sensible qu'au-dessus d'une vitesse de 0,20 m/s.

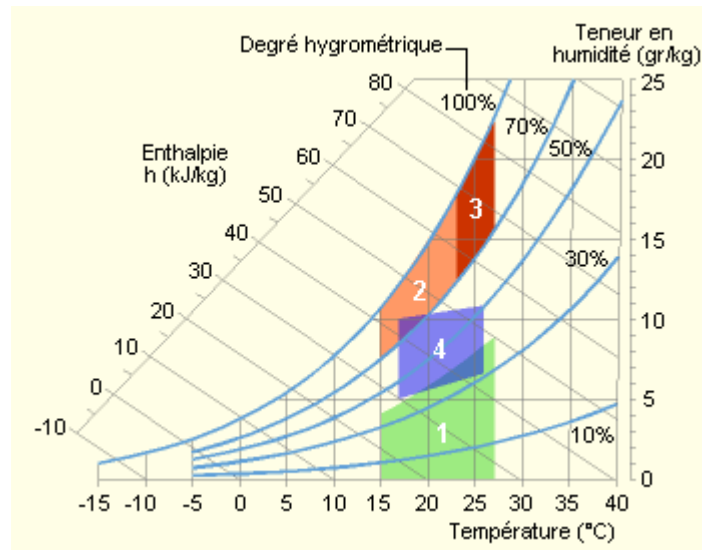
III.10 Confort thermique entre température et humidité

III.10.1 La plage de confort température-humidité

Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, on peut dès lors recommander que l'humidité relative soit gardée entre 40 et 65 %.

Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant (extrait de l'article de R. Fauconnier L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les

bâtiments tertiaires parut dans le numéro 10/1992 de la revue Chauffage Ventilation Conditionnement).



Graph III -2 : La plage de confort température-humidité

Les zones 1, 2 et 3 sont des zones à éviter la zone 4 représente polygone de confort hygrothermique.

A noter enfin que les limites d'humidité imposées en Suisse par la SIA V382/1 sont beaucoup moins exigeantes : on admet une humidité située en permanence entre 30 et 65 % HR, avec des pointes entre 20 et 75 % HR durant quelques jours par an. De tels taux momentanés sont supportables physiologiquement, sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à une humidification artificielle.

III.10.2 Condition hivernale

En hiver, la température extérieure est pratiquement toujours en dessous des températures de confort. Les pertes de chaleur vers l'extérieur sont permanentes, souvent plus importantes la nuit que le jour parce qu'il fait généralement plus froid, mais avec des écarts quotidiens relativement faibles de l'ordre de quelques degrés Celsius seulement. Pendant cette période, il faut réduire les pertes pour limiter l'usage de systèmes de chauffage coûteux en énergie et polluants.

L'isolation doit être optimisée en fonction de la construction et du climat local. Chaque cas est particulier. Trop faible, elle conduirait à une dépense énergétique mensuelle prohibitive doublée d'une pollution qui aurait pu être évitée et, trop importante, elle entraînerait un surcoût d'investissement inacceptable. Ce sont les calculs thermiques qui permettent de déterminer le niveau d'isolation de chaque type de paroi, sol, mur et toit.

Les épaisseurs des matériaux peuvent varier de manière considérable en fonction de leur qualité thermique propre, du climat, de la compacité de la construction, des apports thermiques gratuits du soleil, des prévisions d'occupation intérieure... De 12cm pour les isolants les plus performants dans le sud de la France, les épaisseurs des isolants classiques des façades peuvent atteindre 25 à 30cm ou plus dans les climats froids, notamment les climats de montagne. Ces épaisseurs d'isolation par l'extérieur, sans pont thermique, n'ont rien à voir avec les huit à dix centimètres des isolants classiques intérieurs, amoindris par les multiples ponts thermiques, qui sont généralement mis en œuvre quelle que soit la situation géographique des constructions habituelles en France.

De façon plus précise la fourniture d'air frais pour la ventilation d'un local n'entraîne en principe qu'un mouvement très faible de l'air.

Le confort est donc directement lié à la qualité de la diffusion de l'air dans la pièce, afin d'assurer une vitesse réelle inférieure à 0,25 m/s au droit des occupants.

III.10.3 Conditions estivales

En été, le problème est différent parce que les écarts de température entre la nuit et le jour peuvent être considérables, notamment dans le sud de la France. Si la nuit, les températures peuvent être proches des situations de confort, dans la journée, il en est tout autrement. Des températures d'air de 38°C sont de moins en moins rares et des surfaces de parois, trop sombres, exposées au soleil, qui dépassent largement les 60°C sont courantes. Les écarts de températures peuvent considérablement dépasser les 40°C. Les inerties thermiques qui jouent avec ces variations de température ont alors un rôle important à jouer. Dans les constructions passives, l'isolation par l'extérieur, optimisée pour l'hiver, protège aussi de la chaleur en été mais cette fonction est beaucoup moins marquée parce que le concept a été établi en Allemagne, pays où le froid hivernal est beaucoup plus pénalisant que la chaleur estivale. L'isolation protège d'autant mieux en été qu'elle est efficace en hiver mais, dans cette situation, l'inertie par transmission présente un intérêt important alors qu'elle n'en présente aucun en hiver.

L'inertie par transmission permet de décaler, dans le temps, le moment où la chaleur pénètre dans la construction, après avoir entièrement traversé les façades et les toitures exposées aux rayons du soleil. L'idéal est que la chaleur arrive sur la face intérieure des parois extérieures lorsque la nuit est tombée et que la ventilation peut être poussée au maximum, soit par la VMC en zone de bruit ou de risque d'insécurité, soit, bien mieux, en créant une ventilation transversale grâce à l'ouverture des fenêtres dans les zones qui ne présentent pas

ces

désagréments.

À qualité d'isolation équivalente, les matériaux peuvent avoir des déphasages très différents qui dépendent de leur épaisseur et de leur diffusivité. Ces caractéristiques sont particulièrement importantes pour les façades surchauffées par le soleil en été. Le flux de chaleur qui pénètre les parois ralentit dès que le soleil disparaît. La chaleur emmagasinée dans les parois poursuit alors en partie sa route vers l'intérieur, pour constituer des panneaux rayonnants contre-productifs, tandis qu'une partie repart vers l'extérieur dont la température baisse parce que la source de chaleur a disparue. Cette deuxième partie du flux de chaleur sera d'autant plus importante que la chaleur restera longtemps dans les isolants à faible diffusivité. Ce type d'isolant ralentit, non seulement, la vitesse de pénétration de la chaleur par conduction dans les parois extérieures mais, de plus, réduit le flux de chaleur global qui la traverse en améliorant encore le confort.

La chaleur d'été n'est pas uniquement le fait des apports de chaleurs dus à l'échauffement des façades par les rayons directs du soleil. Il résulte également de l'augmentation des températures des parois extérieures, en contact avec l'air chaud, ainsi que du renouvellement de l'air intérieur. Cette augmentation de la température intérieure peut être limitée et régulée par l'inertie d'adsorption de toutes les parois. Les augmentations de température intérieures sont absorbées par toutes les parois, dans la journée, alors que les baisses de la température nocturnes sont limitées par la chaleur qu'elles relâchent, pour tendre vers un équilibre improbable du fait des modifications permanentes des conditions extérieures. Cette réaction naturelle de tout système pour rester en équilibre, ou pour y revenir, limite considérablement les variations de température intérieure. Les murs jouent le rôle d'éponge avec la chaleur comme une vraie éponge le ferait avec l'eau. Les amplitudes des variations de température intérieures sont rabotées tant sur les hausses que sur les baisses. Le confort est amélioré par la limitation des écarts journaliers de température et par le fait que les maximums et minimums sont considérablement réduits. De plus, comme pour l'inertie par transmission, pendant les périodes de forte chaleur, une amplification de la ventilation nocturne permet d'évacuer la chaleur stockée dans la journée et de reconstituer la capacité de stockage de la chaleur de toutes les parois pour le lendemain.

Pour les températures de locaux comprises entre 21 et 24°C, un déplacement d'air à la vitesse de 0,5 à 1 m/s donne une sensation rafraîchissante confortable à des personnes assises n'ayant que de faibles activités. Mais lorsqu'on fournit un travail musculaire dans des endroits chauds, des vitesses d'air de 1,25 à 2,5 m/s sont nécessaires pour apporter un soulagement. On produit parfois des vitesses plus élevées lorsque des hommes sont soumis pour de courtes

périodes à une chaleur rayonnante intense. Ce mouvement d'air sera obtenu à l'aide de ventilateurs.

L'importance du mouvement d'air nécessaire pour obtenir un effet rafraîchissant peut être évaluée dans une certaine mesure par l'expérience personnelle des vitesses extérieures de l'air. La sensation de fraîcheur produite par un vent léger soufflant par une fenêtre pour une chaude journée est familière à chacun. La vitesse généralement désignée par "brise légère" est de l'ordre de 2,5 m/s. L'échelle de Beaufort des vents reproduite sur le tableau ci-dessous donne des vitesses des vents en km/h et en m/s.

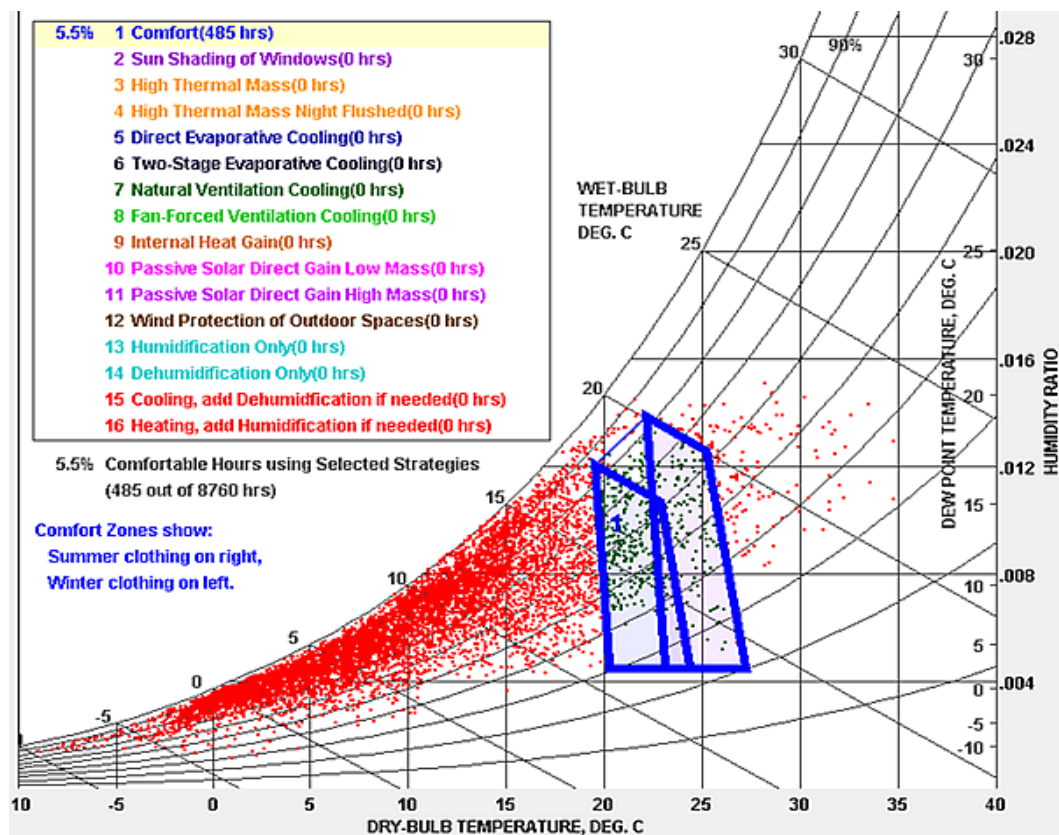
Force du vent a l'échelle beaufort n°	Nature du vent	Vitesse en m/s	Vitesse en km/h
0	Calme	-	-
1	Air léger	1.5	5.4
2	Brise légère	3	10.8
3	Brise douce	5	18
4	Brise modérée	7	25
5	Brise fraîche	9	32.4
6	Brise forte	11	39.6
7	Vent modéré	13	47
8	Vent frais	15	54
9	Vent fort	18	65
10	Grand vent	21	76
11	Tempête	28	100
12	Ouragan	45	160

Tableau III -1 : les vitesses des vents (L'échelle de Beaufort des vents).

III.11 Détermination des zones de confort thermique

Le corps humain possède un mécanisme de régulation qui adapte ses pertes de chaleur aux conditions thermiques de l'ambiance.

Ce mécanisme d'autorégulation laisse apparaître une zone où la variation de sensation de confort thermique est faible : c'est la zone dite de confort thermique. Il existe donc pour chaque situation une plage de conditions confortables. Cette plage se représente soit graphiquement sur des diagrammes psychrométriques, soit au moyen d'un indicateur unique regroupant les 6 paramètres cités plus haut. A cet effet l'indice de vote moyen prévisible (PMV) est utilisé et le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) est calculé.



Graphes III -3 Plages de confort pour une activité de bureau et un habillement d'été ou d'hiver, selon l'ASHRAE [104].

III.12 Les paramètres d'inconforts thermiques

Ils sont liés à l'hétérogénéité des ambiances [105] comme par exemple l'inconfort par asymétrie de rayonnement qui provient d'une trop grande différence de température de rayonnement de paroi de chaque côté du corps. En hiver une paroi froide dont la température de surface serait de 10 à 12°K inférieure à celle des parois du local, peut créer de l'inconfort.

En d'été, il faudrait une différence de température beaucoup plus importante pour qu'il y ait le même inconfort,

En confort d'été, et pour les bâtiments non climatisés, la principale limite du modèle de Fanger est sa sensibilité à la vitesse de l'air qui a toujours, quelle que soit la température, un impact négatif (au mieux neutre au-dessus de 32°C) sur le confort. Cet inconfort, lié à des vitesses d'air supérieures à 0,2 m/s, est réel en conditions d'hiver et de chauffage, soit pour des températures opératives inférieures à 25°C. Ce n'est plus vrai pour des températures plus élevées. Au contraire, en facilitant l'évapotranspiration et en éliminant la « mouillure cutanée », des vitesses d'air plus élevées sur la peau améliorent le confort. C'est l'effet « brise d'été ». La plage 0 m/s correspond aux modèles de confort classiques (valables jusqu'à 0,20 m/s). La plage 0,5 m/s peut être atteinte avec des dispositions de ventilation naturelle.

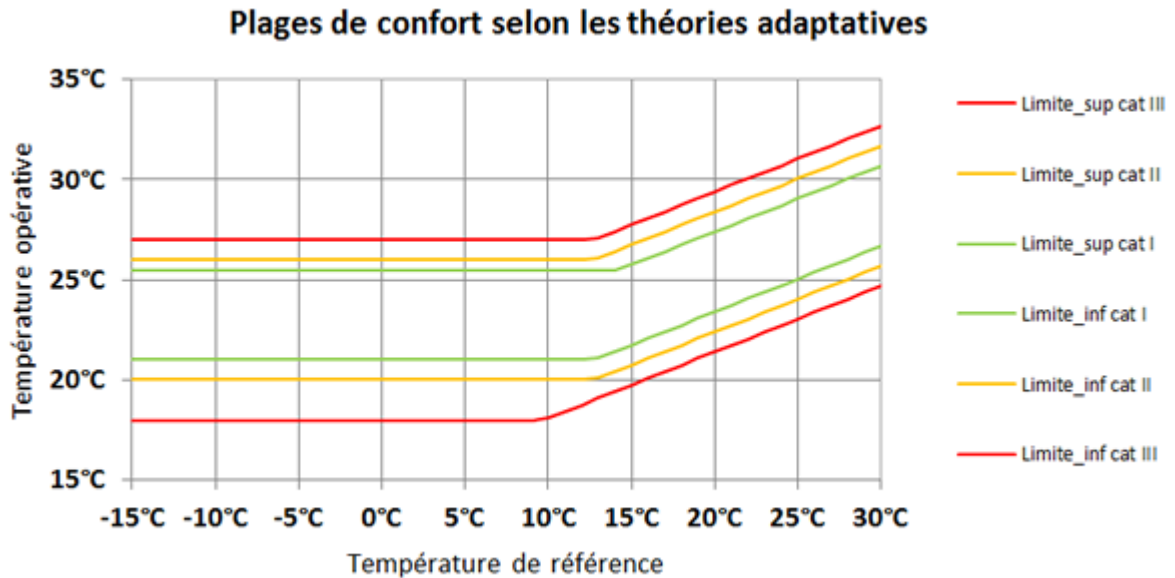
Les expériences en chambres climatiques et les enquêtes in situ constituent les principaux moyens d'investigation sur le confort thermique. Les chambres climatiques permettent une instrumentation et un contrôle parfait des conditions de l'ambiance. Les valeurs des différentes variables physiques de l'ambiance (températures, vitesse et humidité d'air, éclairage ou niveau sonore) ainsi que celles des sujets expérimentés (activité, vêtue, températures cutanées ou internes, réponses perceptives et affectives) sont toutes identifiables, la plupart sont souvent maintenues à des niveaux constants ou varient dans des intervalles prédéterminés. Les conditions de confort sont ainsi identifiées en analysant les données obtenues. Malgré la maîtrise des aspects physiques et physiologiques du confort thermique, les chambres climatiques présentent certaines limitations en excluant les composantes psychologiques des mécanismes de régulation qui régissent le confort thermique. Les sujets doivent exécuter certaines tâches précises en subissant les conditions d'ambiance, leurs comportements restent limités aux consignes du protocole expérimental. Or le contexte peut biaiser les réponses des sujets dans ces conditions. La norme internationale NF ISO 7730 qui précise les conditions de confort thermique dans les ambiances modérées, s'appuie sur des indices (PMV et PPD) déterminés à partir des études en chambres climatiques. Les enquêtes in situ visent à explorer le confort thermique auprès des sujets sur leurs lieux de vie ou de travail habituels à travers les mesures physiques de l'ambiance et les réponses perceptives et affectives des sujets. Les réponses recueillies in situ tiennent compte de la complexité du confort thermique en intégrant les différentes interactions qui régissent la relation entre l'homme et son environnement. L'analyse des données recueillies permet d'identifier les conditions qui ont été jugées confortables, ou même de développer des indices de confort thermique empiriques tel que la température équivalente développée par Bedford ou l'indice

d'été tropical de Sharma et Ali [106]. Mais la validité des résultats obtenus reste limitée au contexte, et aux conditions sous lesquelles les enquêtes ont été menées. Pour cela il est nécessaire de multiplier les enquêtes sous différentes circonstances (climat, saison, type de bâtiment). Si certaines enquêtes sur le confort thermique ont été menées dès le début du siècle dernier, leur vrai intérêt n'est apparu que dans les années soixante-dix avec le travail de Humphreys et Auliciems qui ont permis de mettre en évidence la dépendance contextuelle du confort thermique [98]. Depuis, des nombreuses études ont été menées dans les différentes régions et climats, et ont permis d'adopter une nouvelle approche sur le confort thermique, l'approche adaptative [107].

III.13 Confort adaptatif

Comme l'a montré la théorie du confort adaptatif, les plages de confort ne devraient pas être vues comme des valeurs statiques, définies une fois pour toutes. En réalité, elles sont susceptibles de varier selon la capacité d'action de l'occupant, l'historique météorologique, etc. C'est déjà partiellement reflété par l'intégration de l'habillement et de l'activité dans les représentations traditionnelles, mais cela reste trop partiel.

Il faut reconnaître qu'il est difficile de représenter clairement une zone de confort définie sur base de six paramètres, en intégrant en plus la variabilité de ceux-ci. Heureusement, les recherches ont montré que parmi ces 6 paramètres, la température opérative était prédominante, et que la plupart des facteurs d'adaptation sont liés à la température moyenne extérieure. Les développeurs des théories du confort adaptatif ont donc pu simplifier la représentation de leurs résultats. On trouve aujourd'hui dans la littérature des figures donnant des plages de confort intérieur, exprimées uniquement sur base de la température opérative, en fonction d'une température de référence, généralement définie comme une moyenne des températures relevées sur quelques jours. Certains auteurs font cependant remarquer que ces représentations sont trop simplistes et font oublier les autres paramètres du confort thermique, notamment l'humidité.



Graphe III -4 Températures opératives correspondantes aux différentes plages de confort définies par la norme NBN EN 15251.

En outre, ces plages de références ne sont utilisables que pour certains ‘profils de bâtiment’, et surtout d’occupants. Les théories du confort adaptatif l’on montré, la capacité d’action de l’occupant sur son environnement est un paramètre fondamental du confort. Il est donc nécessaire d’en tenir compte lorsque l’on choisit des systèmes techniques

III.14 Confort et climat

Plus de la moitié de la population mondiale vit de nos jours en ville, cette proportion atteignant 80% dans les pays développés. De plus, les zones urbaines concentrent la grande majorité du capital (logements, distribution d’eau, infrastructures de transport). Une telle concentration de population conduit à un accroissement des préoccupations sociétales, économiques et environnementales.

A ces préoccupations s’ajoutent le microclimat spécifique des villes, la forme urbaine affectant la circulation du vent, l’humidité proche de la surface, la fréquence d’apparition des phénomènes de brouillard, et augmentant la brise urbaine et la turbulence atmosphérique. La caractéristique principale du climat urbain est l’îlot de chaleur urbain.

Ce phénomène a été observé dès 1820 par Luke Howard sur la ville de Londres : il consiste en une température plus élevée dans la ville que dans les banlieues, elles mêmes plus chaudes que les campagnes environnantes. De nos jours, cette différence de température peut atteindre

10 degrés pour les grandes agglomérations, avec des conséquences sensibles sur le confort des habitants et la santé publique, en particulier la nuit et en période de canicule.

Ce fut le cas lors de la canicule de 2003, la vague de chaleur qui a touché l'Europe a provoqué plus de 70 000 morts, la plupart en milieu urbain

La caractéristique principale du climat urbain est l'îlot de chaleur urbain. Son amplitude dépend de nombreux paramètres, y compris la taille et la morphologie de la ville et les activités qui y règnent. Il varie donc d'une ville à l'autre (figure ci-contre). En période de canicule, l'îlot de chaleur s'intensifie, avec des conséquences directes sur le confort thermique, la santé des habitants et la consommation d'énergie électrique due à l'utilisation accrue de la climatisation. La prise en compte de ces phénomènes dans les politiques d'aménagement urbain est essentielle afin d'anticiper l'adaptation des villes au changement climatique.

Il faut alors introduire les concepts de base de la climatologie urbaine afin de mieux comprendre le climat des villes et le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Celui-ci consiste en une température plus élevée dans le centre des villes que dans les banlieues, elles mêmes plus chaudes que les campagnes environnantes. On verra que quelque soit l'échelle d'observation (agglomération, quartier, rue), les hétérogénéités climatiques sont significatives et en relation directe avec l'aménagement urbain.

III.15 Données climatiques

Le degré de caractérisation locale d'un climat peut varier en subtilité, selon le zonage climatique et le nombre de stations de mesures disponibles dans un pays donné. Il s'agit de bien connaître l'évolution des données classiques de température sèche de l'air, de l'humidité et donc des variables associées importantes comme la température humide ou la température de rosée, la vitesse et direction du vent, le rayonnement solaire direct et diffus et la pluviométrie. De plus, indirectement défini par les variables décrites ci-dessus, la température du sol au contact du bâtiment est également une condition limite importante à estimer correctement. Enfin, en parallèle des données de rayonnement solaire, les données de luminosité extérieure sont également importantes pour évaluer l'éclairement naturel dans les locaux. Il existe deux types fondamentaux de données climatiques : les données dites représentatives, généralement pour une période trentenaire, et dérivées de mesures et d'algorithmes. Et puis il y a les séries de données mesurées sur une certaine période de temps. L'usage de ces deux formats est différent.

Les données représentatives sont utilisées en conception et par suite pour réaliser des estimations de besoins, consommation et confort. Les données mesurées peuvent être utilisées dans le cadre d'un contrat de performance énergétique avec protocole strict de mesure et vérification. Ces données mesurées sont souvent incomplètes et nécessitent des extrapolations pour « remplir les trous » qui peuvent aussi être remplacés par des extraits du fichier représentatif. La température du sol est indirectement une donnée climatique et il est important de bien la définir, en particulier pour des projets RDC ou R+1 de plain-pied pour lesquels la contribution thermique relative du plancher bas peut devenir importante. Il est recommandé d'effectuer un calcul en différence finie pour déterminer ce paramètre de façon rigoureuse.

III.15.1 Exploitation des données climatiques

Le plus souvent, les sources de données météo se distingueront plus par la façon dont le rayonnement solaire est modélisé que par les DJU (Degrés Jour Unifiés). Ces derniers présentent en effet généralement une bonne homogénéité entre les divers formats de données. En revanche, nous avons déjà observé de grandes différences sur la répartition entre la part directe et diffuse du rayonnement solaire. Cela est important à considérer quand on veut dimensionner des protections solaires ou des systèmes solaires photovoltaïques ou thermiques.

Les données climatiques s'utilisent sous diverses fréquences selon les caractéristiques que l'on cherche à étudier. Par exemple :

- Les données annuelles sont souvent utilisées comme des sommes, par exemple pour évaluer le gisement solaire pour les énergies renouvelables ou le solaire passif.
- Les données mensuelles sont usuellement utilisées pour caractériser les températures et humidités d'un lieu. Elles sont aussi utilisées pour le rayonnement solaire dans les méthodes simplifiées d'évaluation du gisement solaire.
- Les données quotidiennes sont typiquement utilisées pour la définition des degrés-jours, qui servent à faire une estimation simplifiée des besoins de chauffage et caractérisent jusqu'à un certain degré les besoins de climatisation.
- Les données horaires sont utilisées dans les simulations thermiques dynamiques et sont également des données indispensables pour identifier les maxima et minima d'un lieu. On peut également en extraire n'importe quelle statistique désirée lors des études.

Pour notre étude le laboratoire de mécanique de l'université de laghouat a mis a notre disposition une mini station météo a travers quoi on a enregistré les données climatiques pour l'exploitation in situ et le dimensionnement de notre installation expérimentale.

III.15.2 Dimensionnement par le climat

Les données climatiques sont d'abord, dans la chronologie d'un projet, des éléments dimensionnant. Cela pose la question du choix « statistique » fait pour dimensionner les dispositifs et systèmes du projet considéré. Les pratiques courantes de dimensionnement pour la climatisation et la déshumidification décrites par [108] sont basées sur des grandeurs de dimensionnement correspondant à 0,4 %, 1 % ou 2 % des fréquences cumulées d'occurrence. Les standards recommandent que les températures de 1 % d'occurrence soient retenues pour les cas normaux. Les températures de 0,4 % ou les extrêmes sont réservés à des cas exceptionnels (bâtiment qui requiert un contrôle extrême des conditions, une exigence particulière de sécurité...). Pour un dimensionnement de rafraîchissement naturel, l'occurrence de 1 % des fréquences cumulées peut être retenue. Une vérification dans des conditions de réchauffement climatique dimensionnée avec une occurrence de 2 % est suffisante.

En outre, il convient de noter que certains locaux n'ont pas leur charge maximale de climatisation lors du jour le plus chaud mais lors du jour où ils reçoivent le plus d'apports solaires, ces deux jours n'étant pas nécessairement confondus selon la proportion de vitrage et l'orientation. De plus, le pic de température intérieure ou le pic de charge ne coïncide pas forcément avec le pic d'apports solaires transmis ou le pic de température extérieure. Tout dépendra de l'inertie du local et des autres apports internes. Seule une simulation thermique dynamique permet de déterminer précisément la valeur de ces pics et l

III.15.3 Le micro climat local

Le micro climat local, essentiellement artificiel, peut transformer la ville en îlot de chaleur (voir figure suivante), l'accumulation des polluants augmente sensiblement les concentrations de gaz à effet de serre. Ce qui peut élever les précipitations et modifier la transparence de l'atmosphère. André Hufty conclut qu'une multitude de microclimats existe au niveau des rues et dépend de leur orientation, de leur degré d'ouverture vers le ciel et de la présence de surfaces et matériaux très hétérogènes suivant les quartiers. Par ailleurs les immeubles élevés accentuent la force du vent et les tourbillons formés, peuvent endommager les constructions et

nuire au confort des habitants. Aussi, la rugosité des constructions modifie l'ensemble des échanges convectifs, ce qui traduit un nouvel équilibre microclimatique.

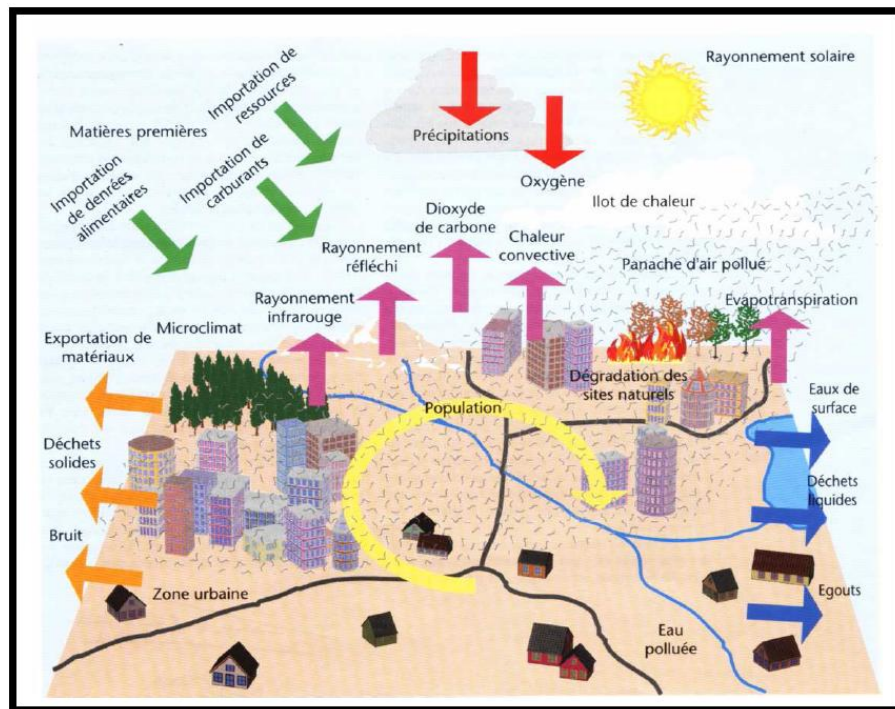


Figure III -1 Interaction entre le climat et les activités humaines (Source: OMM, 1997)

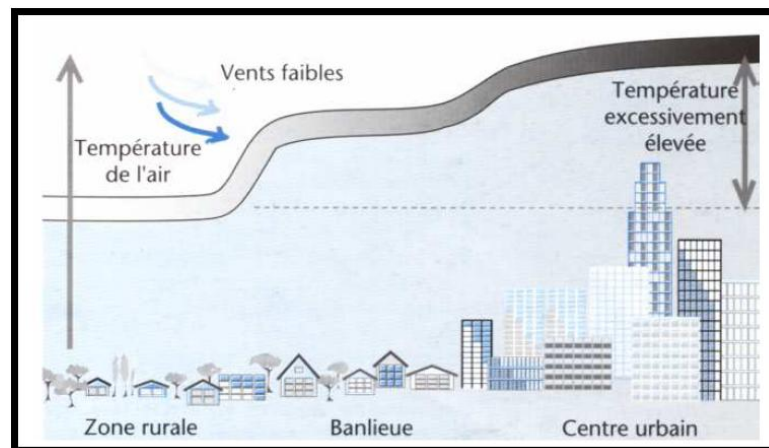


Figure III -2 Représentation graphique de la coupe transversale d'un îlot de chaleur urbain

III.16 Analyse des éléments du climat :

Le système climatique de notre planète est d'une grande complexité puisque, outre l'atmosphère interviennent aussi l'océan, la cryosphère (les zones recouvertes par les glaces), les mers émergées, l'eau douce et la végétation, l'élément moteur étant l'énergie rayonnée par le soleil.

Le soleil est donc la source de tout réapprovisionnement énergétique quotidien qui crée le vent, la pluie et réchauffe la terre. Ces paramètres climatiques avec le soleil constituent des éléments essentiels à considérer en toute phase amont de conception des bâtiments. Ce ci nécessite en premier lieu d'établir une étude détaillée de chaque paramètre à part.

III.16.1 L'étude de soleil

L'alternance des jours, nuits et des saisons est due à la rotation de la terre autour du soleil selon un plan écliptique. La position du soleil peut être connue grâce à la détermination de la hauteur et l'azimut solaire.

La hauteur est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation, et le plan horizontal passant par ce point. L'azimut quant à lui est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal sud au nord, et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil (Figure III -3).

Une série d'abaques donne l'ensemble des positions apparentes du soleil sous forme graphique. La plus juste et la plus pratique est la projection sphérique équidistance qui ne déforme pas le voisinage du zénith, et surtout est compatible avec la vue d'un objectif fish-eye

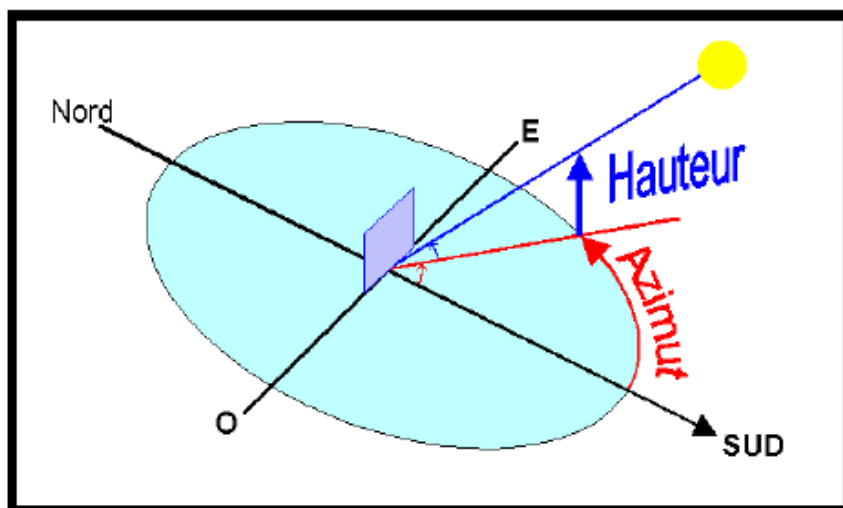


Figure III -3 Coordonnées horizontales du soleil (azimut et hauteur)

III.16.2 Les radiations solaires :

L'intensité des radiations solaires dépend de l'altitude du lieu, de la saison, de l'heure, du vent, de la quantité de vapeur d'eau, et des particules en suspension. On distingue les radiations directes, diffuses et réfléchies. Les radiations solaires directes sont la source la plus importante d'échauffement de l'air et des surfaces. Durant l'hiver, le soleil est très bas dans le ciel (même à midi) et ses rayons sont proches de l'horizontal. Ils frappent les façades sud des constructions et (proche du sud) en milieu de journée avec un faible angle d'incidence. Ces façades reçoivent donc plus d'irradiations solaires qu'en surface horizontale, elles sont favorables au placement de baies vitrées qui pourront capter ces apports solaires bénéfiques. Alors qu'en été une surface horizontale est fortement exposée à l'irradiation solaire en milieu de journée à cause de la quasi-verticalité des rayons. Les surfaces verticales sud (et proche du sud) reçoivent une irradiation très modérée. Mais en milieu de matinée et l'après midi, lorsque le soleil se trouve à l'est puis à l'ouest, ses rayons frappent de front les surfaces verticales est et ouest qui doivent en être protégées (Figure III -4).

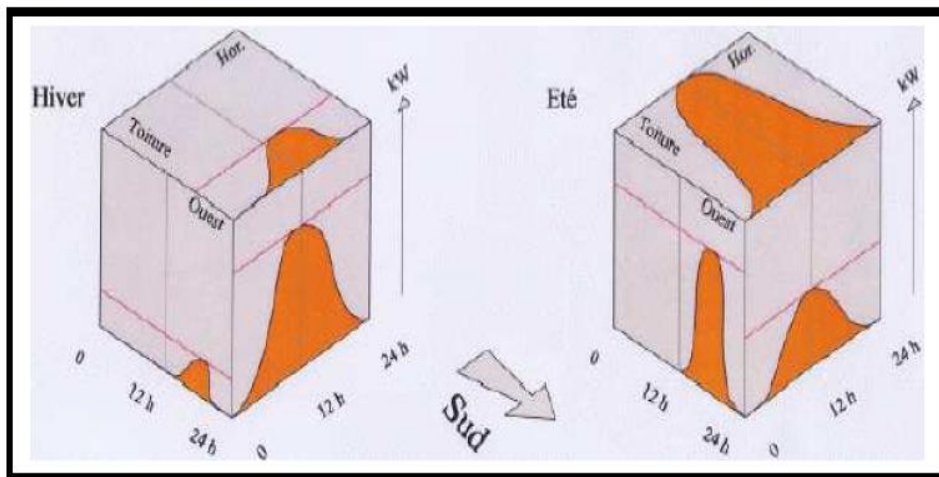


Figure III -4 Puissance solaire reçue en hiver et en été sur les surfaces horizontales et verticales orientées sud et à l'ouest ([CERTU Lyon, Juillet 2003](#)).

III.16.3 Température de l'air

La température dépend d'abord des apports solaires, mais aussi de la pression atmosphérique, de la teneur en eau, des échanges possibles avec les corps environnants (sol par exemple). Elle peut être modifiée avec le changement d'altitude, où elle décroît en moyenne de 0.65°C par 100m de dénivelé.

En architecture, on utilise surtout les températures moyennes mensuelles et les amplitudes de températures extrêmes. L'usage le plus fréquent est celui du calcul de degrés heures ou degrés jours pour l'évaluation des charges de chauffage ou de climatisation d'un édifice.

III.16.4 L'humidité :

« L'air est une éponge dont l'avidité croît avec la température ». Si la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air (en provenance des surfaces d'eau et de la transpiration des êtres vivants) est très variable, elle ne peut cependant dépasser un certain maximum. Celui-ci étant fonction de la température. Le plus souvent, il y a moins de vapeur d'eau dans l'air que ces quantités maximales. Le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité maximale qu'il peut contenir à une température donnée s'appelle l'humidité relative, exprimée en %. On distingue aussi l'humidité absolue en g/m^3 .

Une autre façon d'évaluer l'humidité de l'air est de calculer le point de rosé. Exprimé en ($^{\circ}\text{C}$), ce dernier est la température à laquelle la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air est égale à la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir à cette température.

Les valeurs de l'humidité relative nécessaires pour le concepteur sont les moyennes maximales et minimales mensuelles ainsi que les valeurs extrêmes.

III.16.5 L'évaporation :

La pression d'évaporation est créée par une quantité variable de vapeur d'eau contenue dans l'air. Sur les continents la vapeur d'eau provient de deux sources: l'advection en provenance d'une zone plus humide, souvent d'un océan, et l'évapotranspiration locale qui régénère les nuages. Selon Brubaker et al en 1993, cette dernière se situe autour de 10 à 30% de l'apport total.

III.16.6 L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Est la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée, et pendant une période bien définie en considérant les apports d'eau suffisants.

III.16.7 Le vent

Le vent est un mouvement d'air horizontal, né par les différences de pressions d'un lieu à l'autre. Défini par sa direction, sa fréquence et sa vitesse. D'autres facteurs affectent sa distribution comme la rotation de la terre, la variation journalière de la température et la topographie du lieu. De plus il y a des vents qui sont causés par des situations particulières tel que la présence des montagnes et les grandes surfaces d'eau.

Les fluctuations quasi instantanées des vents ont mené les météorologistes à choisir comme mesure de base la moyenne du vent sur 10mn à 10mètres de hauteur. Les données retenues sous forme d'un tableau de fréquence, permettent de dessiner le graphique de la rose du vent.

Une méthode de simulation des mouvements atmosphériques en laboratoire en imitant l'atmosphère par un modèle, pour lequel il est lisible de modifier les conditions de l'expérience et dont les résultats sont explicables par des lois physiques connues. Cette approche a été suivie notamment par RIEHL et FULTZ à l'université de Chicago.

Le vent est un paramètre essentiel dont il faut tenir compte. Par exemple l'impression du froid ressentie par le corps humain à 20°C, avec un vent de 20 milles à l'heure sera la même que si la température était à 10°C et le vent de 3 milles. (**Tableau III -1**)

III.16.8 La végétation :

Le monde végétal, et les arbres en particulier sont fondamentaux pour l'équilibre de la planète. Ce sont les arbres et les plantes qui ont peu à peu transformé l'atmosphère de notre planète, en absorbant le gaz carbonique et en rejetant de l'oxygène ...Élément vivant, l'arbre s'impose par sa verticalité, sa beauté, sa symbolique et son utilité s'enracine dans la mémoire collective des hommes [109].

La végétation clarifie et met en valeur l'espace urbain. Elle assure la protection contre les vents, les radiations solaires et l'éblouissement. Elle influence aussi le climat local, où les recherches montrent qu'il y a une différence de température de 3,5°C entre la ville et la banlieue. Surtout que la minéralisation des sols et la réduction du couvert végétal perturbent le bilan hydrique et raréfient l'eau sous toutes ses formes et privent la ville du refroidissement naturel par la consommation de chaleur latente. Certaines plantes peuvent aussi contribuer à la purification de l'air. Le lierre et la sansevieria par exemple absorbent le benzène (10µg par cm² de feuille), ainsi que le formaldéhyde (2 à 3µg par cm² de feuille).

Les plantes servent également de filtre contre les poussières en humidifiant l'ambiance, un ficus par exemple peut émettre de 10 à 20g d'eau par heure. Par ailleurs les jeunes arbres captent plus efficacement le carbone et favorisent son stockage. La conférence de Rio préconise leur extension, et en particulier dans le secteur de la construction.

III.17 Ventilation naturelle Systèmes de circulation d'air

La ventilation naturelle fonctionne grâce aux écarts de pression engendrés par des différences de masse volumique et par le vent. Sur le Plateau suisse, les différences de pression naturelles sont petites (le plus souvent inférieures à 10 Pa) et irrégulières. Il n'existe pas de recette simple pour garantir un apport d'air suffisant avec une ventilation naturelle. Il

faut donc trouver des solutions spécifiques à chaque fois. La ventilation naturelle n'offre que des avantages réduits en comparaison avec une ventilation mécanique:

La diffusion de l'air dans les locaux doit toujours être optimisée afin d'être efficace et confortable. Différentes techniques sont envisageables suivant les usages (froid seul, froid et chaud) et les configurations de locaux. Dans les locaux de grand volume ou de grande hauteur, la diffusion d'air par déplacement (soufflage d'air frais à faible vitesse, en partie basse) permet à la fois des économies d'énergie (on ne traite que la zone d'occupation) et une meilleure efficacité de ventilation (entraînement des polluants vers le haut) ; elle limite également les risques de courants d'air (en raison des faibles vitesses de soufflage).

L'effet de la charge thermique joue un rôle important sur la forme de la circulation d'air. En particulier, la charge externe sur les parois est différente selon les saisons. Ce problème se résout par l'installation d'un système de climatisation périphérique et l'adoption d'une bonne isolation thermique des parois. La veine d'air froid peut alors pénétrer profondément dans l'enceinte avant d'atteindre la zone occupée. L'induction est suffisante pour que la vitesse diminue et que la température soit uniforme.

La manière, par laquelle l'air introduit dans une enceinte circule et atteint la zone occupée, dépend non seulement de la forme de l'U.T.D [110], mais aussi de sa situation par rapport aux parois du local, des courants de convection créés par les apports calorifiques internes positifs, et des apports extérieurs positifs ou négatifs selon la saison. On peut distinguer 2 méthodes principales de distribution de l'air, universellement connues sous le nom de ventilation par mélange et ventilation par déplacement. Ces deux méthodes peuvent coexister et être affectées par le déplacement de l'air provoqué par l'effet thermique.

III.17.1 Ventilation par mélange

La distribution par mélange est le type le plus couramment employé. Elle peut se réaliser de plusieurs façons ; néanmoins dans tous les cas, l'air est introduit à une vitesse suffisante pour se mélanger avec l'air du local et atteindre la zone occupée. Cette distribution est relativement stable avec des petits débits et peu sensible aux sources de chaleur. On obtient un certain effet de déplacement en situant les unités de soufflage et d'extraction sur des côtés opposés. Avec cette distribution, la concentration de polluants et la température sont uniformes dans l'enceinte.

Au contact des sources chaudes, l'air va se réchauffer et s'élever, de la zone occupée évacuant calories et polluants. Il en résulte un gradient de température dans le sens du mouvement de l'air, et une concentration des polluants à l'extraction.

III.17.2 Ventilation par déplacement

La distribution par déplacement se caractérise par un mouvement de flux d'air quasi unidirectionnel. L'air est introduit en quantité suffisamment importante pour alimenter le courant convectif à basse vitesse (0,2 - 0,6 m/s) et à une température légèrement inférieure à la température ambiante (0 - 6°C) dans ce cas on peut rencontrer plusieurs systèmes.

III.17.3 Les systèmes tout air

Dans ce type de système, afin d'éviter que l'air extérieur ne vienne polluer celui du local, on augmente légèrement la pression intérieure par rapport à la pression atmosphérique. L'intérêt du caisson de mélange est de réaliser des économies importantes d'énergies (respect de l'environnement). On a donc dans ce cas un débit massique d'air soufflé supérieur au débit massique d'air repris, ce type de procédé est généralement utilisé dans les bureaux, les salles de cinéma...

Dans ce type d'installations l'air est traité dans une centrale puis distribué via un réseau de conduits aéraulique.

III.17.4 Systèmes à débit constant

On distingue les systèmes uni zones et les systèmes multizones. Pour le premier type, l'air est distribué à un ou plusieurs locaux avec des caractéristiques identiques. Pour le second, on peut avoir des batteries de réchauffage par zone ou des registres de mélange terminaux.

III.17.5 Systèmes à débit variable

Dans les installations précédentes, le débit d'air était constant et la température de l'air soufflé dans les locaux était variable. Ici, c'est le débit d'air qui change et la température qui est constante. En définitive, les systèmes à air sont plutôt adaptés au traitement des grands volumes "monozones": centre commerciaux, auditoriums, salles polyvalentes?. La distribution multizone pose des problèmes de régulation terminale.

III.17.6 Systèmes utilisés en recyclage total

Dans ce type de procédé, le renouvellement d'air neuf sera obtenu soit par un système de ventilation mécanique contrôlée ou le mélange d'air s'effectuera directement dans le local, soit l'air neuf sera préparé dans une centrale dite "centrale d'air neuf". Cet air est directement soufflé aux conditions intérieures du local. Un circuit d'air neuf particulier assure le renouvellement d'air neuf, et on aura un débit d'air rejeté égal au débit d'air neuf apporté.

III.17.7 Système fonctionnant avec récupérateur d'énergie

Dans ce cas l'air extrait, plus frais que l'air extérieur donne ses "frigories" à l'air neuf via un échangeur exactement selon le même principe que pour la récupération de chaleur.

III.18 Conditions de soufflage

Pour déterminer les conditions de soufflage de l'air dans un local, il faut connaître :

- le débit massique d'air sec au soufflage.
- le taux de brassage (le taux de brassage est le rapport entre le débit d'air soufflé et le volume du local traité)
 - l'écart de température entre le soufflage et le local,
 - le point de soufflage, dont les coordonnées sont déterminées en reportant sur un diagramme psychométrique deux valeurs comme l'enthalpie et la teneur en eau, par exemple.

Plusieurs types de soufflage sont alors énumérés.

III.18.1 Soufflage à partir de parois

La disposition des U.T.D. doit être telle que les courants de convection maintiennent la veine d'air froid dans la partie supérieure du local. Quand les courants de convection rencontrent la veine d'air soufflé, cette dernière est obligée de descendre prématurément dans la zone occupée; ceci occasionne un courant d'air et une non uniformité des températures dans la zone occupée. Le type de faux-plafond installé constitue un facteur déterminant ; il est préférable de prévoir un faux-plafond lisse et plat, sans obstacle. Les obstacles sont à prendre en compte.

III.18.2 Soufflage radial à partir du plafond

Le soufflage de l'air froid par des diffuseurs circulaires au plafond génère une veine radiale capable de satisfaire un besoin en rafraîchissement élevé, surtout si la veine peut s'accrocher. Les sources de chaleurs externes ou internes influencent le parcours de la veine d'air, provoquant une déviation de la circulation. Avec une veine radiale, le mélange de l'air de la veine et de l'enceinte est bon ; dans la majorité des cas, les conditions dans la zone occupée sont acceptables. Si la hauteur sous plafond est particulièrement faible, on recommande d'obturer un secteur de 90° dans le col du diffuseur, en vis-à-vis de la paroi extérieure ou d'un obstacle éventuel. En hiver, le soufflage de l'air chaud produit une stratification de température dans la partie haute du local avec de l'air froid près du sol.

Les U.T.D. à soufflage vertical permettent de pallier partiellement au problème, mais conduisent à des conditions inacceptables pendant les périodes de rafraîchissement. Une source de chaleur située sous la fenêtre où bien un rideau d'air chaud vertical ascendant ou descendant élimine le courant d'air froid qui descend le long de la paroi extérieure. De cette façon, l'air insufflé par le diffuseur radial peut être à la même température que l'air ambiant, ou à une température inférieure. Cette solution assure une bonne uniformité de température. Dans tous les cas, la distribution de l'air est améliorée quand la veine d'air peut s'accrocher au plafond. Le diffuseur doit être conçu pour produire une veine horizontale.

III.18.3 Soufflage en allège sous fenêtre

Le soufflage de l'air à travers une grille située sous une fenêtre produit une circulation d'air telle qu'indiquée par le schéma. Les courants de convection provoqués par les sources de chaleur et la veine d'air soufflé s'inter-actionnent pour créer un courant qui glisse le long du plafond. Il se produit une bonne uniformité de température de la veine d'air avant d'atteindre la zone occupée.

Le confort thermique est d'une grande importance pour le bâtiment afin de lui permettre d'atteindre ses objectifs de fonctionnalité tout en justifiant les coûts des installations et des équipements d'ambiance (chauffage, ventilation et climatisation).

Selon l'intensité des échanges thermiques et des réactions mis en jeu dans un environnement donné, le corps peut éprouver une sensation de neutralité thermique, de tiédeur ou de fraîcheur. Il peut avoir chaud ou froid dans des conditions extrêmes qui peuvent le plonger dans une hyperthermie ou hypothermie lors d'une exposition prolongée mettant en péril sa vie et par un inconfort thermique marqué [112].

L'environnement thermique est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement.

L'étude du confort thermique doit être menée en considérant ses différents aspects physiques, physiologiques et psychologiques pour prendre en compte les interrelations entre les conditions thermiques de l'environnement, les réponses physiologiques, et les phénomènes psychologiques (sensation, comportement) [98]. Ce qui nous intéresse ici c'est L'approche physique du confort thermique qui représente l'homme comme une machine thermique et

considère les interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur. La réponse de l'individu dans un environnement résulte de l'interaction entre ces différents mécanismes.

Quand le corps humain est exposé à un environnement thermique, il réagit par une interaction dynamique mobilisant un ensemble de réactions rétroactives, volontaires et involontaires, qui permettent de contrôler les échanges thermiques avec cet environnement afin de satisfaire les exigences de l'homéothermie.

III.19 Les échanges de chaleur dans le confort thermique

Le maintien de la température interne du corps humain autour de 37°C nécessite un équilibre thermique avec son environnement. Pour cela, la chaleur produite à l'intérieur du corps humain et véhiculée à sa surface cutanée doit être compensée par des déperditions de chaleur dans l'environnement. Les fluctuations dans les conditions externes et internes impliquent un état d'équilibre dynamique, l'homéostasie. Si la chaleur produite dans le corps dépasse celle perdue à l'environnement, le corps se réchauffe et sa température interne s'élève et dans le cas inverse il se refroidit avec un abaissement de sa température interne.

Selon ASHRAE [25]. Le bilan thermique du corps s'écrit de la façon suivante.

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S = (C + R + K + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + S_{sk} + S_c$$

Avec

M	Taux du métabolisme, [W/m ²]
W	Travail externe, [W/m ²]
Q _{res}	Flux de chaleur échangé par voie respiratoire, [W/m ²]
Q _{sk}	Flux de chaleur échangé à la surface cutané, [W/m ²]
C _{res}	Flux de chaleur échangé par convection respiratoire, [W/m ²]
E _{res}	Flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire, [W/m ²]
C	Flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface du beau, [W/m ²]
R	Flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface du beau, [W/m ²]
K	Flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface du beau, [W/m ²]
E _{sk}	Flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface du beau, [W/m ²]
S _{cr}	Taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, [W/m ²]
S _{sk}	Taux de chaleur stockée dans le beau, [W/m ²]

Les flux de chaleur à la surface de la peau sont exprimés en fonction des variables de l'environnement thermique à savoir la température d'air, la température de rayonnement, la vitesse d'air et l'humidité relative. Ils sont souvent calculés par unité de surface corporelle (elle est prise égale à 1,8 m² pour une personne standard [98].

La chaleur gardée par le corps peut être exprimée en fonction de la capacité thermique et le taux de changement de la température dans le temps [25].

$$S_{cr} = \frac{(1-\alpha)mc_{p,b}}{A_D} \frac{dt_{cr}}{d\theta}$$

$$S_{sk} = \frac{\alpha mc_{p,b}}{A_D} \frac{dt_{sk}}{d\theta}$$

Avec

α Fraction de la masse corporelle concentrée dans la peau

m La masse corporelle, [kg]

$C_{p,b}$ Chaleur spécifique du corps, [KJ/Kg.K]

θ = temps, [s]

III.19.1 Les échanges de chaleur sensible

L'échange de chaleur sensible à la surface du corps passe à travers les vêtements. Cet échange de chaleur peut être considéré comme :

- (1) l'échange de chaleur de la surface externe du corps à la surface externe des vêtements à travers l'épaisseur des vêtements.
- (2) l'échange de chaleur de la surface externe des vêtements à l'environnement.

Les trois modes d'échange de chaleur sensible sont la conduction, la convection et le rayonnement. Les échanges par conduction sont souvent négligés car les zones corporelles concernées sont petites [111], et quand des parties plus grandes de la surface corporelle sont en contact avec des éléments de mobilier (chaise, fauteuil, canapé, lit) les tissus en contact se mettent rapidement en équilibre et se comportent comme un isolant thermique par rapport à l'ambiance [112].

a. La convection

La convection correspond aux échanges de chaleur entre le corps et l'air entourant.

Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, en cas de convection naturelle. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps [113]. Le mouvement de l'air peut aussi être imposé en cas de convection forcée ou mixte. En plus, il faut prendre en compte la chaleur produite par le mouvement relatif de l'air par rapport au corps en cas de certaines activités (marche, course,...) qui s'ajoute au mouvement effectif de l'air.

L'échange convectif dépend de la différence entre la température d'air et celle du corps, et du mouvement de l'air autour du corps. Il est calculé par l'expression suivante [25].

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

Avec

C flux de chaleur convectif, $[W/m^2]$.

f_{cl} facteur d'habillement.

h_c coefficient d'échange convectif, $[W/m^2.K]$.

t_{cl} température de la surface externe du vêtement, $[^{\circ}C]$.

t_a température d'air, $[^{\circ}C]$.

Le facteur d'habillement f_{cl} est le rapport de la surface vêtue du corps à la surface totale du corps, il est égal à 1 pour un sujet nu. ASHRAE [25], propose plusieurs expressions empiriques pour calculer le coefficient d'échange convectif h_c selon différentes configurations de l'air effectif autour du corps.

Il dépend aussi de la posture et de l'activité.

b. Le rayonnement

L'échange radiatif est le mode d'échange de chaleur à distance par ondes électromagnétiques entre deux corps. On distingue deux catégories selon la bande d'émission : les échanges courts longueurs d'onde (rayonnement solaire) non pris en compte dans les bâtiments, et les échanges grandes longueurs d'onde (rayonnement infrarouge) avec les parois qui entourent le sujet.

A la température ambiante, toutes les surfaces émettent des radiations principalement dans l'infrarouge, le corps humain émet en permanence une chaleur radiative liée à sa température et son émissivité, de même que les parois qui l'entourent.

Selon Thellier, 1989 [114] le flux radiatif échangé par le corps correspond à la différence entre le rayonnement émis par celui-ci et le rayonnement reçu de son environnement. Si le

rayonnement reçu par le corps est supérieur à sa propre émission, le corps se réchauffe, et se refroidit dans le cas inverse.

Pour écrire l'équation du flux radiatif en raison des faibles écarts de température.

ASHRAE (1997) [25] propose une expression considérons l'environnement thermique comme homogène, et prenant en compte la température moyenne de rayonnement. C'est une moyenne pondérée des températures de surface des parois du local en fonction de leur émissivité et de leurs positions relatives par rapport au corps étudié avec une approximation linéaire est utilisée

$$R = f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - \bar{t}_r)$$

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot f_{eff} \cdot \left[273.2 + \frac{t_{cl} + \bar{t}_r}{2} \right]^3$$

- R Flux de chaleur radiatif, W/m^2
- f_{cl} Facteur d'habillement.
- h_r Coefficient d'échange radiatif linéarisé, $[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$.
- t_{cl} Température de la surface externe du vêtement, $[\text{°C}]$.
- $\bar{t}_r$ Température radiante moyenne $[\text{°C}]$.
- ε Émissivité moyenne du corps.
- σ Constante de stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$.
- f_{eff} Coefficient effectif de surface rayonnante.

Dans la plupart des cas, les environnements thermiques dans les bâtiments peuvent être considérés homogènes dans les zones occupées [25]. Le coefficient f_{eff} qui est le rapport entre la surface du corps qui rayonne et la surface corporelle totale. Il joue le rôle d'un facteur de forme et dépend de la posture : 0.70 pour une personne assise et 0.73 pour une personne debout. Quant à l'émissivité, elle est typiquement proche de l'unité.

Si Mais si l'environnement radiatif est fortement hétérogène (large baie vitrée, panneaux rayonnants), la température moyenne de rayonnement est insuffisante, il faut prendre en compte l'asymétrie de rayonnement. Les équations du flux convectif et du flux radiatif précédentes sont souvent combinées en vue d'exprimer l'échange total de chaleur sensible, par convection et rayonnement, on aura alors

$$(C + R) = f_{cl} \cdot h \cdot (t_{cl} - t_o)$$

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

$$h = h_r + h_c$$

Avec

(C+R) Echange de chaleur sensible cutané, [w/m²].

t_o Température opérative, [°C].

h Coefficient d'échange de chaleur sensible, [W/m².K].

Les transferts de chaleur sensible entre le vêtement à température t_{cl} considéré comme une seule couche à travers laquelle les transferts de chaleur la peau à température t_{sk} se font uniquement par conduction l'expression du transfert s'écrit alors de la façon suivante.

$$(C + R) = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R_{cl}}$$

$$(C + R) = \frac{t_{sk} - t_o}{R_{cl} + 1/(f_{cl} h)}$$

Avec

R_{cl} = résistance thermique vestimentaire, m².K/W

c. La sensation thermique

Les messages sensoriels des différents thermorécepteurs reçus par le corps qui les intègre en une information globale capable de donner information de l'état thermique de l'individu [96] exprimant ainsi La sensation thermique par ses deux aspects qualitatif (chaud ou froid, localisation) et quantitatif (intensité). De telle différence existe parce que la perception globale naît de l'aspect sensoriel intégré, [112].

Il est important de distinguer la sensation thermique qui dépend de l'agrément et la préférence. Car un retour dans un intérieur chauffé de quelqu'un qui vient d'être exposé de façon prolongée au froid lui donnera une perception tiède ou chaude, mais sa sensation thermique sera toujours froide ou fraîche. L'ambiance sera jugée agréable mais pas l'état thermique personnel.

Il apparaît donc important de faire la part entre l'état thermique du sujet qui l'amène à donner une expression de sa sensation personnelle, l'état thermique de l'ambiance qui est jugée à

travers la perception sensorielle du climat, et le sentiment de confort qui prend aussi en compte la relation entre le sujet et son environnement [112].

Si la sensation thermique dépend uniquement de l'état thermique personnel (l'activité des thermorécepteurs) et non pas de l'environnement thermique, la psychophysique a montré la possibilité d'évaluer la sensation thermique en fonction du stimulus physique telle que la température. Les différents travaux de recherche ont montré que la sensation du froid dépend de la température cutanée, et la sensation de la chaleur dépend de la température cutanée au départ puis de la température interne. Alors que le désagrément dû à la chaleur est lié à la mouillure cutanée [98].

Pour évaluer la sensation thermique, différentes échelles ont été développées. Les plus largement utilisées sont l'échelle de Bedford et l'échelle de l'ASHRAE (Tableau III -2).

L'échelle de l'ASHRAE est souvent utilisée en affectant à la sensation neutre la valeur zéro (sensation chaude = +3, sensation froide = -3 et ainsi de suite) [102]. L'échelle de l'ASHRAE est préférée à celle de Bedford qui confond la sensation et l'agrément. Enfin, il est important de ne pas confondre entre l'équilibre et la neutralité thermique. L'équilibre thermique du corps humain peut être assuré dans une large zone de conditions d'ambiance grâce aux mécanismes de thermorégulation, la neutralité thermique correspond en revanche à une bande plus étroite pour laquelle les phénomènes de thermorégulation décrits précédemment ne sont pas (ou peu) mis en jeu.

L'échelle de Bedford	L'échelle de l'ASHRAE
7 Très chaud	7 (+3) Très chaud
6 Chaud	6 (+2) Chaud
5 Confortablement chaud	5 (+1) Confortablement chaud
4 Confortable	4 (+1) Confortable
3 Confortablement froid	3 (-1) Confortablement froid
2 Froid	2 (-2) Froid
1 Très froid	1 (-3) Très froid

Tableau III -2 Les échelles de la sensation thermique [102].

Chapitre VI

Confort d'hiver et chauffage solaire

VI.1 introduction

L'évolution des réglementations thermiques dans le domaine du confort thermique se base sur la volonté de réduire les besoins en chauffage des bâtiments et l'élimination des pertes et le recours aux énergies renouvelables comme pour les bâtiments passifs dont le concept est d'utiliser au maximum les apports solaires et les apports internes pour chauffer le bâtiment. Afin de se mettre en accord avec ces préceptes, les concepteurs s'orientent donc notamment vers un choix d'isolation performante et d'ouvertures au Sud.

La conception globale dans le domaine du confort consistant à trouver un compromis entre stratégie d'hiver et stratégie d'été est à mettre en place, étant donné qu'un système de rafraîchissement passif est généralement couplé à un système de chauffage passif.

Techniquement, le confort thermique d'hiver se gère avant tout par une bonne isolation intérieur/extérieur de manière à garder le chaud à l'intérieur et à ne pas laisser pénétrer le froid extérieur, cette isolation doit veiller à éviter au maximum les ponts thermiques, l'hétérogénéité des performances thermiques des parois (génère des surfaces froides donnant lieu à de la condensation) et la perméabilité à l'air de l'enveloppe d'une part et éviter également l'effet des parois froides lié à la présence de parois vitrées notamment au nord considérées comme zone d'inconfort et pertes thermiques d'une autre part. La solution la plus économique en énergie consiste ensuite à capter et accumuler au maximum le rayonnement solaire direct.

De point de vue économique et au niveau de l'utilisateur d'un bâtiment, "confort thermique d'hiver" est bien souvent mentalement associé avec une facture insurmontable. Or les deux sont dissociables. L'économie financière découle logiquement de l'économie d'énergie et elle même peut facilement découler non de la qualité réelle du confort mais bien d'un comportement volontaire adapté. plusieurs moyens sont à appliqués pour réduire la facture et le plus important c'est le stockage de l'énergie.

VI.2 Confort d'hiver

Il est très nécessaire de le meilleur compromis entre confort thermique d'hiver et confort thermique d'été, selon la région et le site par le choix de l'implantation et l'orientation du bâtiment ou de la maison et des différentes pièces qui doivent être étudiées de manière à assurer le confort permanent et cela par la récupération au maximum des apports solaires en hiver et de la réduction de ces mêmes apports en été, notamment les rayonnements directs du soleil. D'une manière générale, si le confort d'été est prioritaire, les orientations ouest et sud sont à éviter,

VI.3 Chauffage solaire

Afin de profiter de la chaleur et de la lumière du soleil, il faut aménager les bâtiments en fonction des apports solaires. Par exemple les techniques passives exploitent d'une part les caractéristiques architecturales des bâtiments, principalement les murs, les fenêtres, les planchers et le toit d'une part et les éléments du milieu environnant par la capture l'énergie solaire thermique et son stockage d'une autre part. Dont le principe est assuré par des ouvertures vitrées adéquates orientées vers le soleil et une bonne isolation pour éliminer les déperditions calorifiques. Il faut aussi stocker la chaleur afin de continuer à chauffer le bâtiment lorsque le soleil est absent. En milieu tempéré, il faut s'assurer que le dispositif est bien exposé plein sud. De plus, les vitrages doivent être conçus pour capter au maximum le soleil l'hiver, sans surchauffer la maison l'été. D'où l'obligation de mettre des occultations solaires. La chaleur est stockée dans les éléments inertes du bâti (murs, dalles, ...) ou dans des dispositifs spécifiques de stockage.

Il existe de nombreuses possibilités pour utiliser l'énergie solaire thermique dans le bâtiment comme par exemple le chauffage passif, ou il s'agit d'utiliser la chaleur naturelle émise par le soleil. Ce principe est appliqué principalement dans la conception de bâtiments, qui nécessitent alors moins d'apports supplémentaires de chaleur (voir chapitre sur la conception des bâtiments), ou le solaire thermique qui permet d'utiliser la chaleur émise par le soleil pour fournir de l'eau chaude sanitaire ou pour les systèmes de chauffage.

Le système de chauffage par énergie solaire doit être utilisé en complément d'autres sources de chauffage comme une chaudière à gaz, une chaudière électrique, pour les cas où il n'y aurait pas ou très peu de lumière.

VI.3.1 Description générale d'un chauffage solaire à air

Le chauffage d'air est un moyen simple et économique de chauffer l'air à usage domestique. C'est un élément de substitution aux divers moyens de pour chauffer l'air tel que les échangeurs de chaleur, le chauffage ...etc. en effet le chauffage solaire d'air profite de la convection thermique du rayonnement solaire, ce qui le rend écologique. De plus, l'utilisation du soleil pour la production d'air chaud permet de préserver les énergies non renouvelables telles que le pétrole et le gaz, ou le charbon, afin de les réserver à des usages pour lesquels il n'existe pas encore d'alternative.

Le chauffage solaire à air compose de :

- L'absorbeur est l'élément essentiel du capteur solaire, il doit absorber la plus grande partie du rayonnement solaire et transmettre la chaleur produite vers l'air avec le minimum de perte. Il doit être le plus léger possible afin d'éviter l'inertie de mise en régime et construit avec un matériau bon conducteur. A ces deux qualités, il faut ajouter celles d'ordre mécanique et chimique (bonne tenue à la pression, à la dilatation, résistance à la corrosion, fiabilité dans le temps).

D'autre part il doit être réalisé économiquement. Le contact entre l'absorbeur et l'air doit d'être le meilleur possible.

- Un vitrage pour favoriser l'effet de serre et réduire les pertes par convection. Les capteurs vitrés de bonnes qualités utilisent tous le verre. Les polycarbonates ou autres matériaux de synthèse, même s'ils sont moins chers, n'ont pas des qualités de résistance mécanique et de stabilité dans le temps suffisantes (certains jaunissent dans le temps sous l'action des UV, et peuvent devenir fragiles).

Le verre reste donc le matériau de prédilection pour la couverture des capteurs. Il peut cependant subir des transformations afin d'améliorer ses qualités. Le verre trempé a une très bonne résistance aux chocs (chute de grêle). Il est possible d'obtenir des verres à haute transmission énergétique ($\tau = 0,92$) en éliminant la plupart des oxydes de fer lui donnant sa couleur verte.

Un traitement antireflet diminue la part perdue par réflexion. On peut aussi ajouter de couches d'oxydes métalliques réfléchissantes sur la surface inférieure, afin de créer des verres sélectifs qui retiennent d'autant mieux les infrarouges (effet de serre).

- Les isolants pour face arrière des capteurs les plus souvent utilisés sont les fibres minérales (laine de verre ou laine de roche) ou les mousses de polyuréthane. Il faut que les produits

utilisés résistent aux températures de fonctionnement qui dépassent largement les 100°C pour les capteurs modernes, dans certains cas (capteur en stagnation).

Les isolants tels que le polystyrène sont donc à bannir (il commence à mollir et à fondre à partir de 80°C).

Pour ce qui est de la structure, ces éléments peuvent être enfermés dans un caisson ou bien intégrés en toiture. Un joint d'étanchéité en matériau élastique a pour principale fonction de maintenir l'étanchéité du capteur en empêchant l'eau de pénétrer quand il pleut.

VI.3.2 Choix de l'orientation et de l'inclinaison

Le choix de l'orientation et de l'inclinaison des capteurs peut être guidé par des préférences architecturales, cependant d'une manière optimale, les capteurs sont orientés plein sud (dans l'hémisphère nord) avec une inclinaison proche de 33° sous nos latitudes.

Il y a tout de même un degré de liberté assez large quant à l'implantation sans que les performances ne s'en fassent trop ressentir. Mais la tolérance dépend de l'utilisation du capteur (ECS seule ou chauffage + ECS) L'inclinaison peut varier entre 30° et 60° selon que l'on veut privilégier le rayonnement d'été que les performances ne s'en fassent trop ressentir. Mais la tolérance dépend de l'utilisation du capteur (ECS seule ou chauffage + ECS) L'inclinaison peut varier entre 30° et 60° selon que l'on veut privilégier le rayonnement d'été (haut sur l'horizon) ou celui d'hiver (bas sur l'horizon). Bien entendu plus les capteurs se rapprochent de la verticale, plus l'orientation aura de l'importance. La présence de masques (montagnes au lever ou au coucher de soleil) peut aussi influencer l'orientation.

VI.4 Rendements des capteurs solaires

Grâce à des capteurs d'un niveau technique élevé et une installation adaptée, l'utilisation économique de l'énergie solaire n'est plus une vision d'avenir, mais une réalité qui a déjà fait ses preuves dans l'utilisation quotidienne. Dans un capteur, une partie du rayonnement solaire qui l'atteint sera perdue par réflexion et une autre sera absorbée. Le rendement prend les déperditions en compte ainsi que les déperditions qui se produisent à l'entrée du fluide caloporteur. Le rendement est le maximum de la courbe caractéristique lorsque la différence entre la température des capteurs et la température ambiante est de zéro et que les capteurs solaires ne cèdent pas de déperditions calorifiques à l'environnement.

T. Letz et M.Lallemant [139], ont monté un modèle basé sur une résolution des équations des bilans thermiques par une méthode nodale par l'analyse du comportement d'un capteur

solaire plan à air fonctionnant en régime dans différents régimes. La validation a été faite à partir des essais effectués en ensoleillement naturel et en ensoleillement artificiel ou ils ont évalué l'écart absolu entre les rendements théoriques et expérimentaux. Ils ont conclu que La qualité du rendement est due essentiellement de point de vue construction à la qualité de l'absorbeur, de l'importance des fuites d'air, et des conditions de fonctionnement du capteur. Et de point de vue thermique au débit d'air dans le capteur et la température d'entrée qui ont une grande influence, et de point de vue positionnement du capteur comme l'inclinaison et l'orientation ou les données solaires comme par exemple l'éclairement qui n'ont qu'une légère influence sur le rendement. On note qu'une amélioration considérable des rendements lorsque la température d'entrée de l'air est élevée. Les fuites, inévitables dans les capteurs à air sont réduites, augmentant la température de sortie de l'air. Ils ont noté que ce type de capteurs, a une inertie relativement importante qui entraîne une faible valeur du rendement en début de journée, et une valeur plus élevée en fin de journée.

VI.5 PARTIE EXPERIMENTALE

VI.5.1 Site expérimentale

Le déroulement des expériences a été effectué au niveau du l'université de Laghouat (département de mécanique), qui à les paramètres suivants : Latitude: 33°48'24 Nord, Longitude: 2°52'56°Est, Altitude: 765 m.

VI.5.2 Acquisition des données météorologique

Les expériences ont été effectuées à l'aide d'une station météorologique principale qui se compose des appareils de mesure proprement dits.

La station météorologique vous permet de détecter d'une façon précise la direction du vent, la vitesse du vent, la température, l'humidité relative et la pluviosité.



Figure VI- 1: Mini station météorologique.

VI.5.3 Principe de fonctionnement

Une partie de l'irradiation solaire qui arrive sur le vitrage traverse celui-ci pour atteindre l'absorbeur. Ce dernier s'échauffe et transmet la chaleur à l'air, l'absorbeur émet un rayonnement (en grande partie dans les infrarouges) qui est d'une part absorbé par le vitrage, d'autre part réfléchi par le film placé sur l'isolant. L'isolant a pour fonction de limiter les déperditions thermiques avec l'extérieur.

VI.5.4 Collection des données

Les données ont été collectées en continu par la station météorologique principale entre la période de 10 décembre 2013 jusqu'à 31 janvier 2014.

VI.5.5 Description et fonctionnement du dispositif expérimental

Le prototype est constitué de :

- un boîtier réalisé en bois, de dimensions (2,7 x 0,57) m, ouvert sur le côté exposé au rayonnement solaire, sur les côtés latéraux, haut et bas on a laissé des ouvertures pour l'entrée et la sortie de l'air
- deux vitrages de dimensions (2x0,5) m qui couvrent le boîtier et assurent le phénomène 'd'effet de serre'.
- une plaque absorbante de dimensions (2x0,5) m qui transmet la chaleur à l'air.
- un isolant de 30mm d'épaisseur (polystyrène), qui a pour rôle de limiter les pertes vers l'extérieur.

Pour l'étude, on a supposé que la température d'entrée est égale à la température ambiante. L'air circule naturellement à l'intérieur du capteur sous l'effet de la différence de densités due à son échauffement.

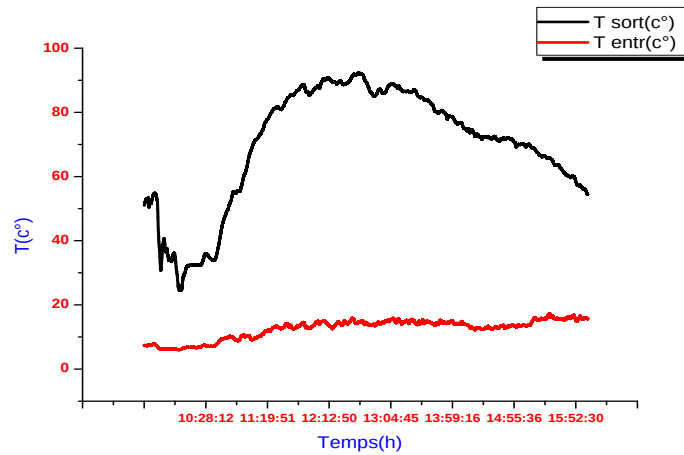




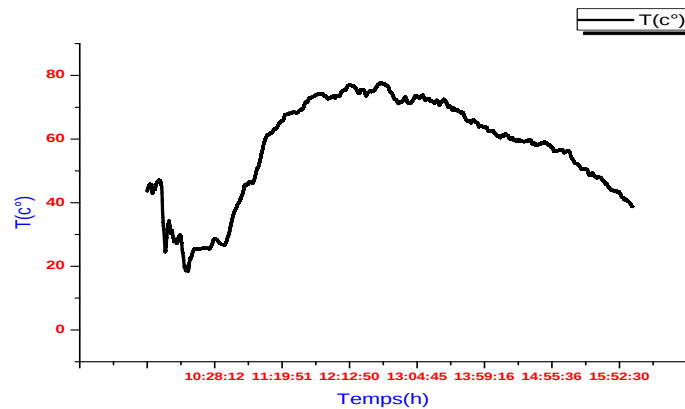
Figure VI- 2: Capteur solaire

VI.5.6 Résultats et discussions

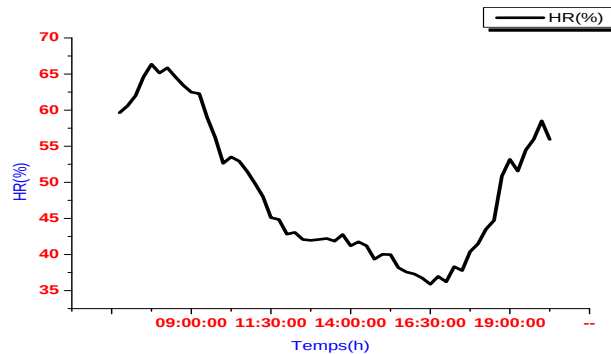
Les résultats sont représentés sous forme de graphes :



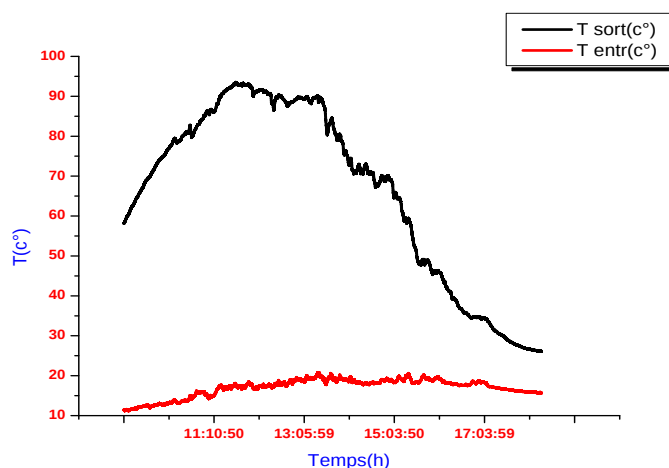
Graph VI -1: la variation de la température pour la journée du (20/12/2013).



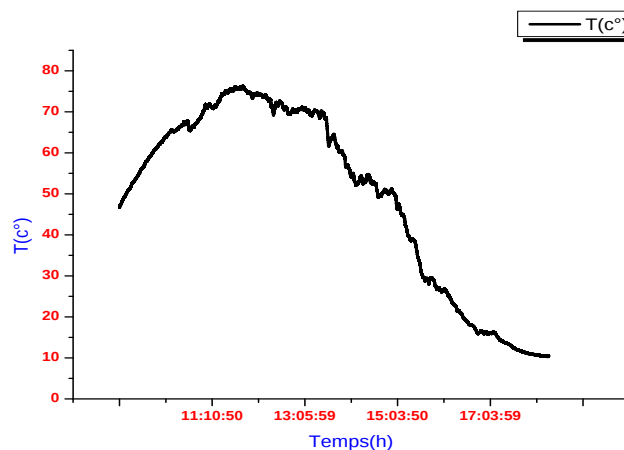
Graph VI -2: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (20/12/2013).



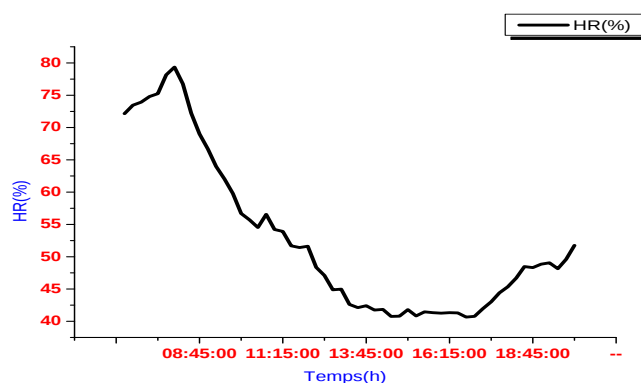
Graph VI -3: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (20/12/2013).



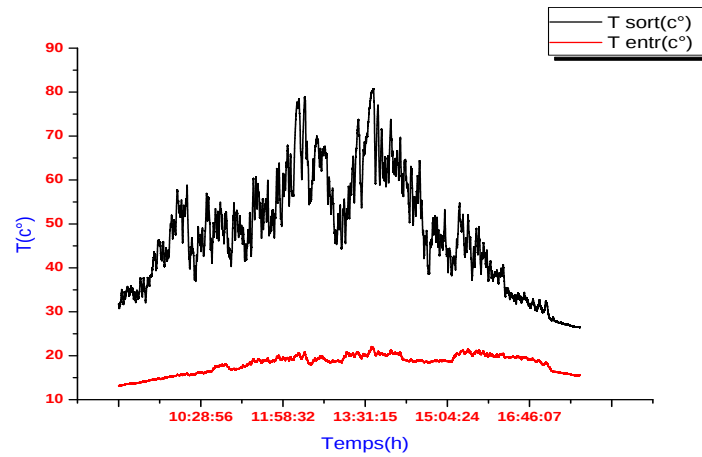
Graph VI -4: la variation de la température pour la journée du (21/12/2013).



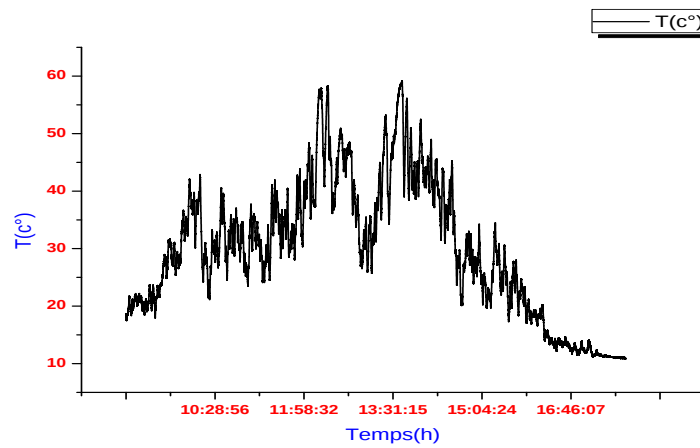
Graph VI -5: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (21/12/2013).



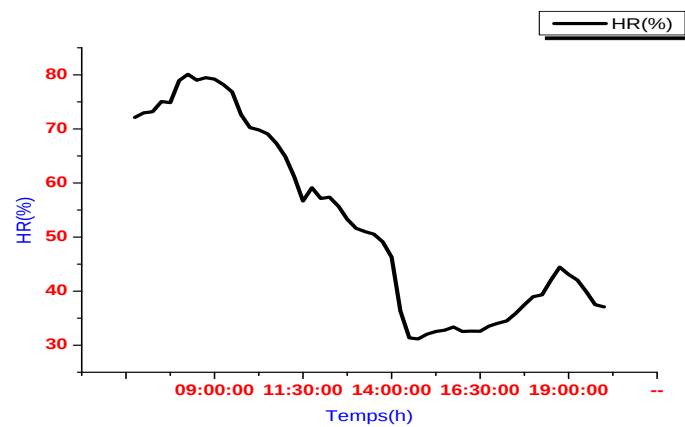
Graph VI -6: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(21/12/2013).



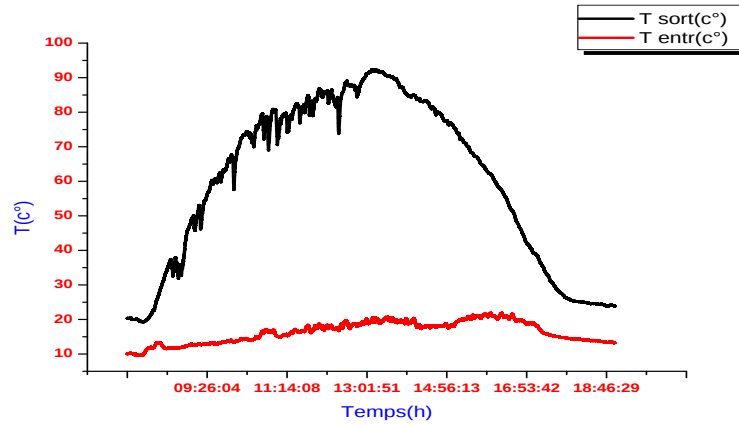
Graphe VI -7: la variation de la température pour la journée du (22/12/2013).



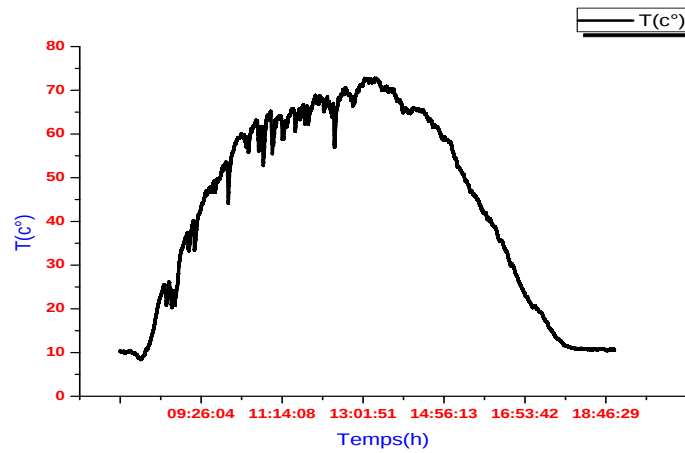
Graphe VI -8: La variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (22/12/2013).



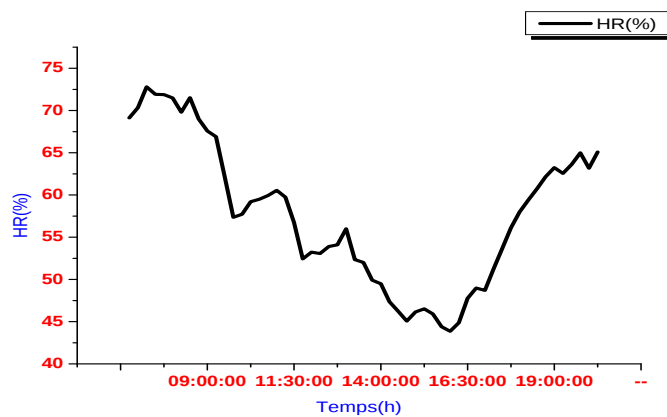
Graphe VI -9: La variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(22/12/2013).



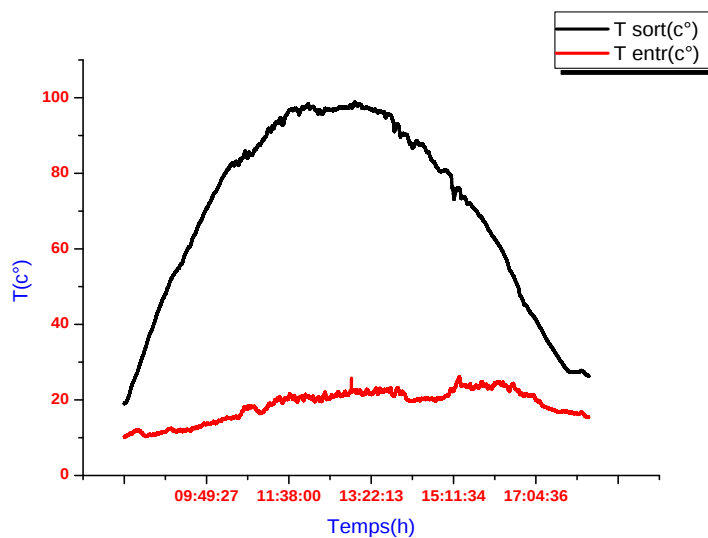
Graphe VI -10: la variation de la température pour la journée du (23/12/2013).



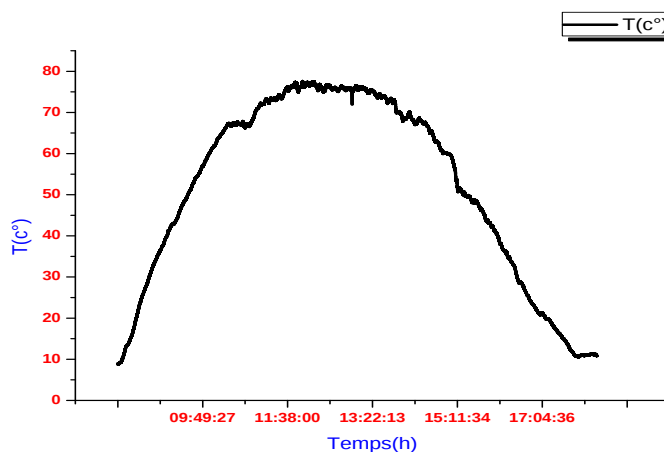
Graphe VI -11: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (23/12/2013).



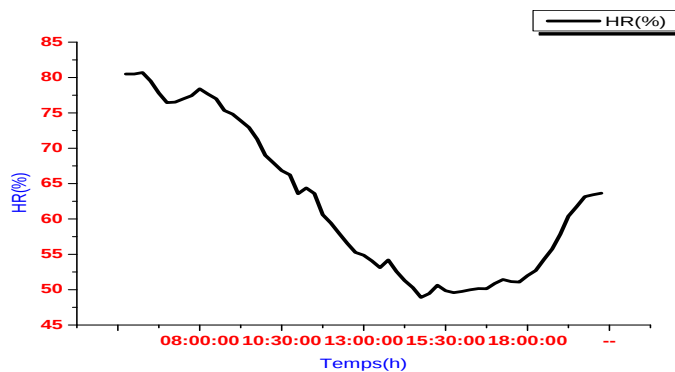
Graphe VI -12: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(23/12/2013).



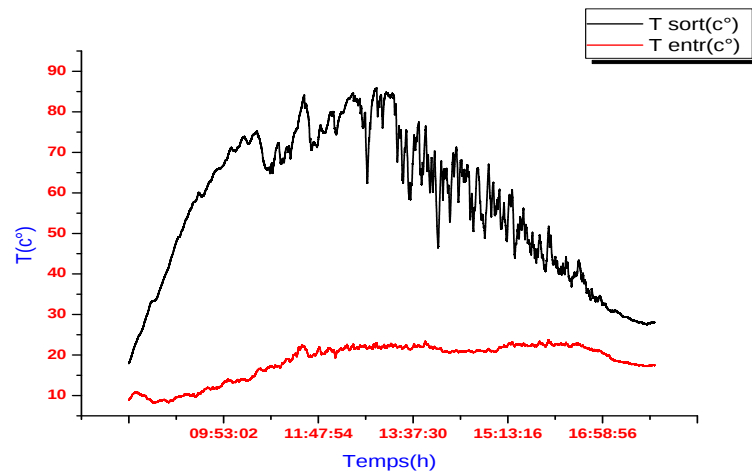
Graphe VI -13: la variation de la température pour la journée du (24/12/2013).



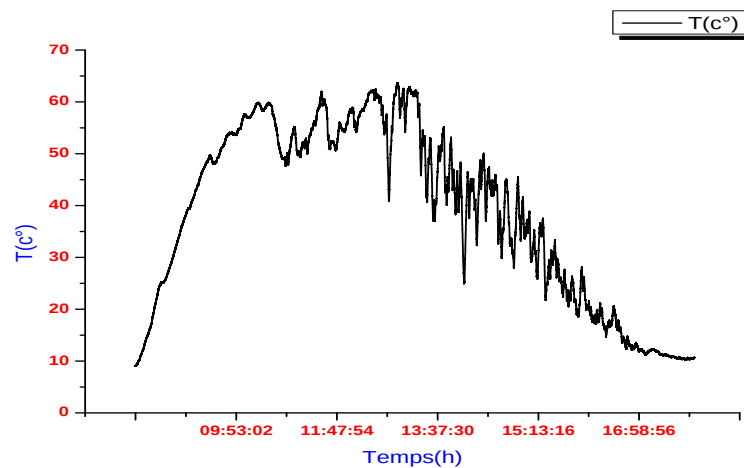
Graphe VI -14: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (24/12/2013).



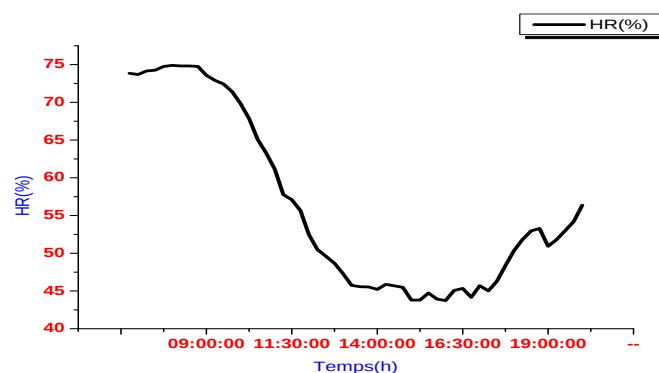
Graphe VI -15: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(24/12/2013).



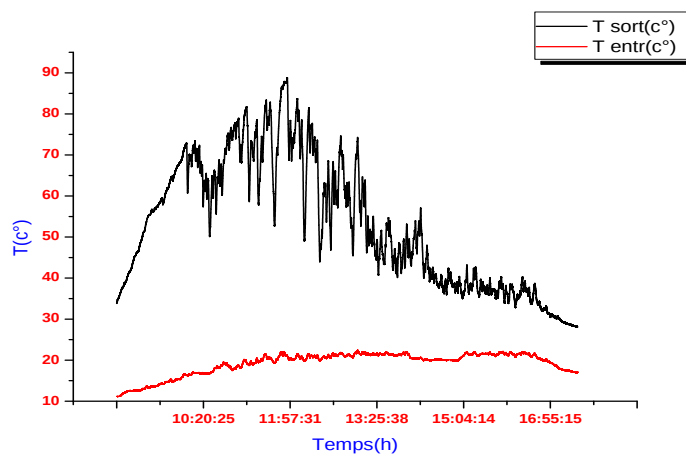
Graph VI -16: la variation de la température pour la journée du (25/12/2013).



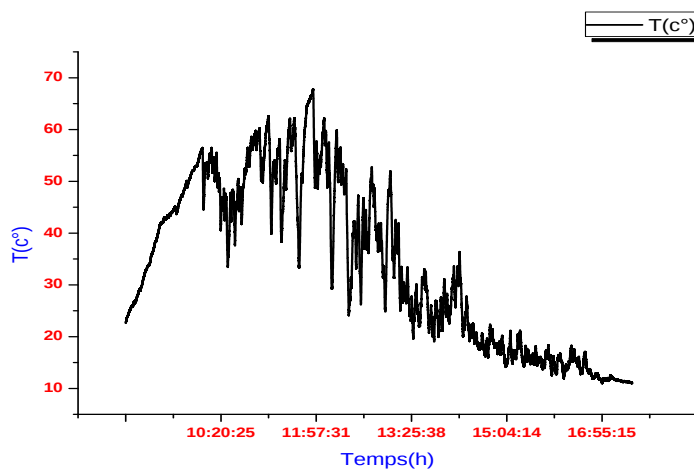
Graph VI -17: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (25/12/2013).



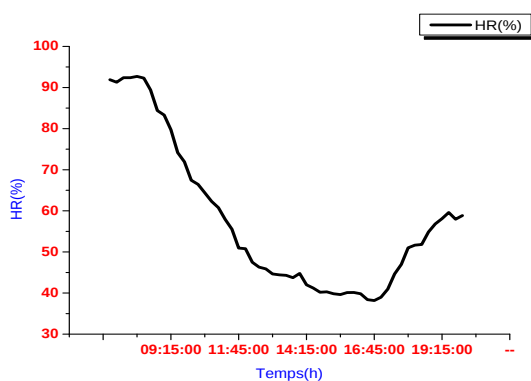
Graph VI -18: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (25/12/2013).



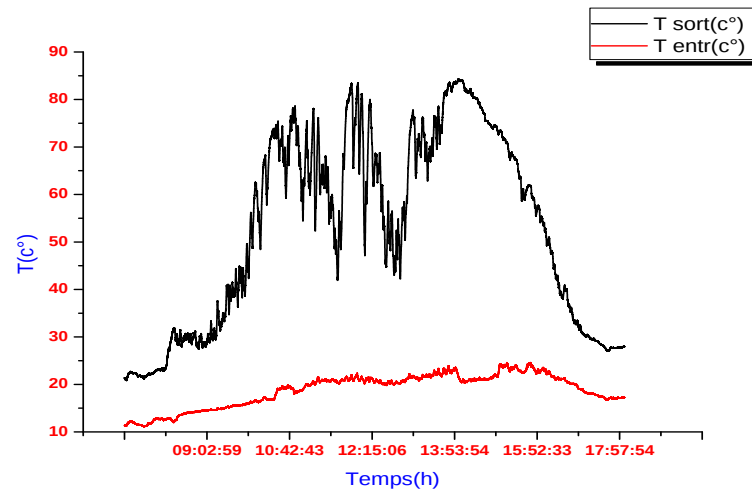
Graphe VI -19: la variation de la température pour la journée du (26/12/2013).



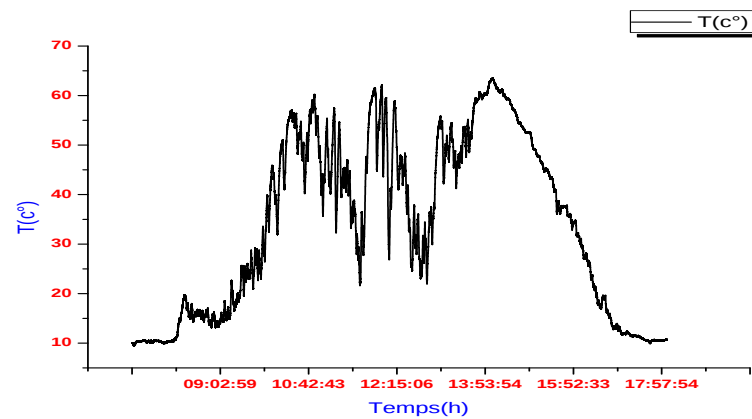
Graphe VI -20: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (26/12/2013).



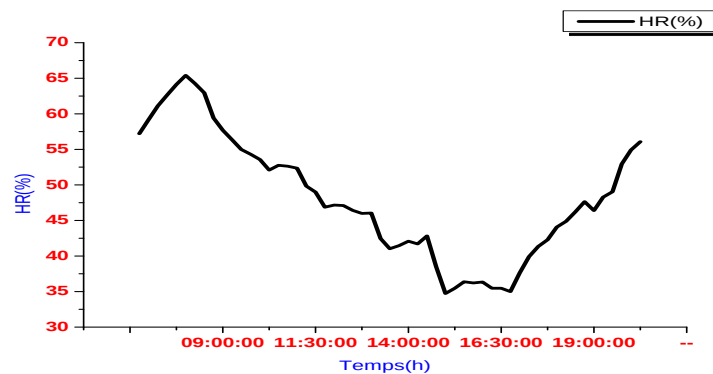
Graphe VI -21: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(26/12/2013).



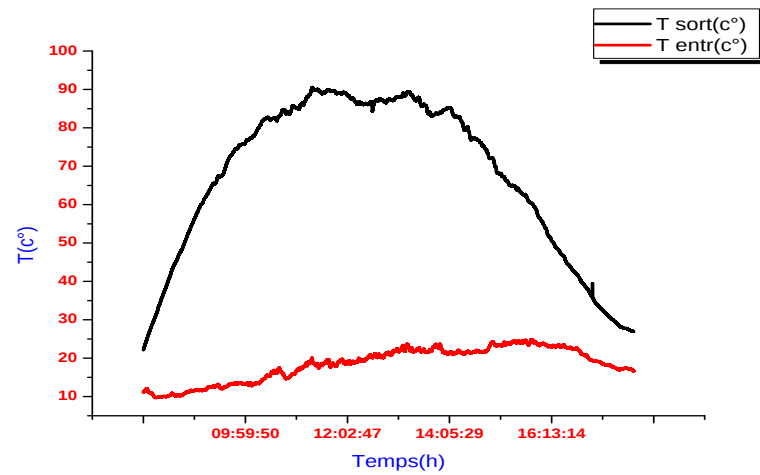
Graphe VI -22: la variation de la température pour la journée du (27/12/2013).



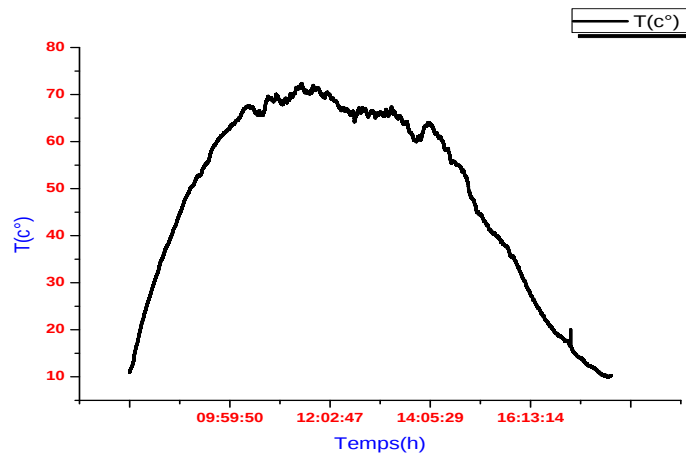
Graphe VI -23: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (27/12/2013).



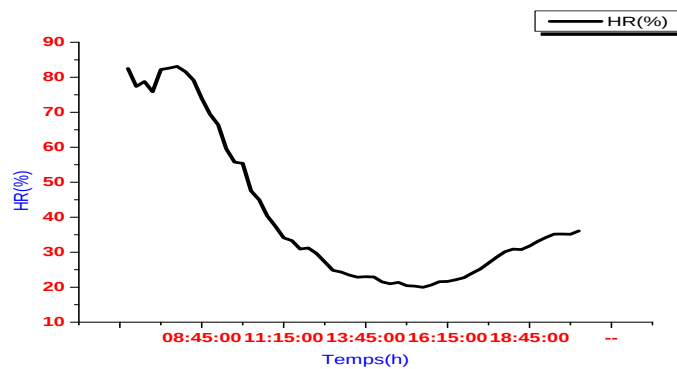
Graphe VI -24: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (27/12/2013).



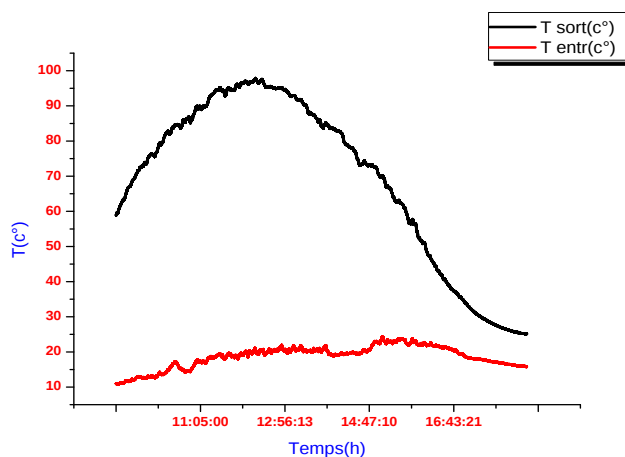
Graphe VI -25: la variation de la température pour la journée du (28/12/2013).



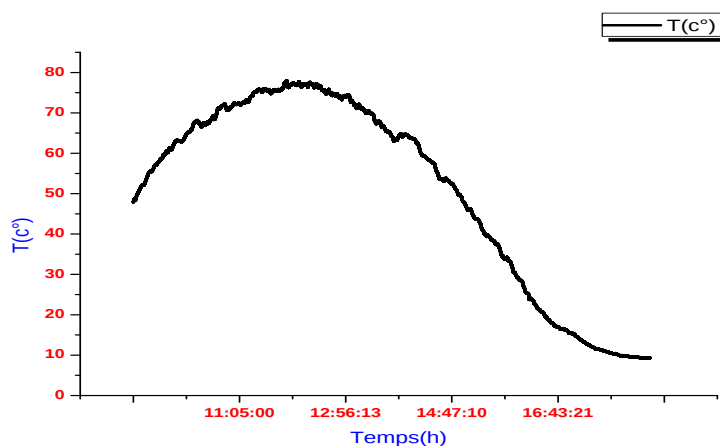
Graphe VI -26: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (28/12/2013).



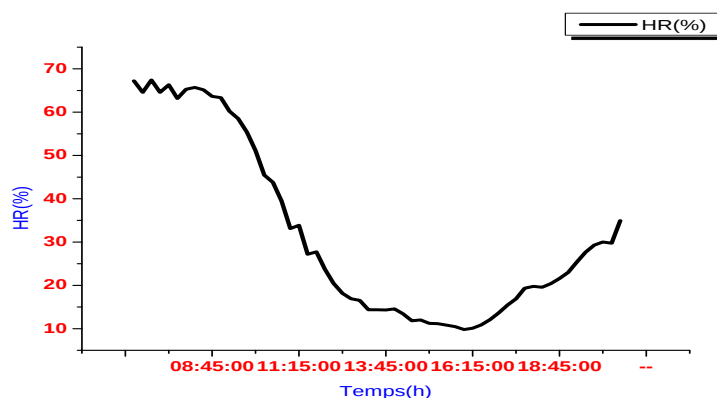
Graphe VI -27: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(28/12/2013).



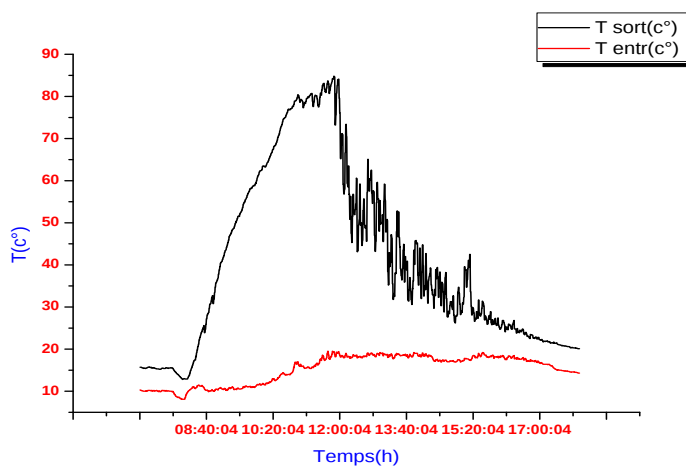
Graph VI -28: la variation de la température pour la journée du (29/12/2013).



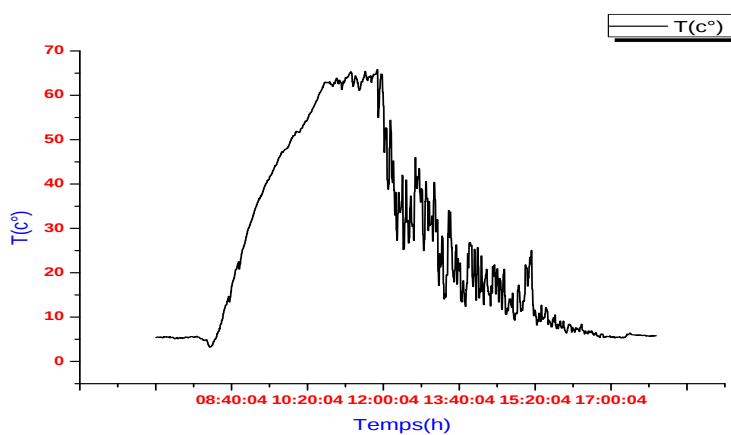
Graph VI -29: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (29/12/2013).



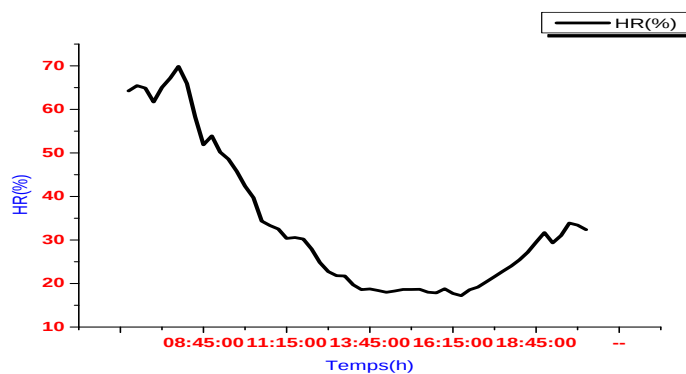
Graph VI -30: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (29/12/2013).



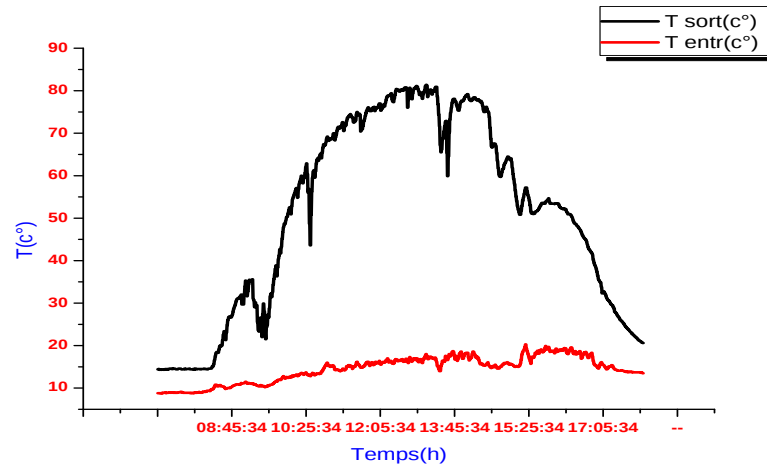
Grphe VI -31: la variation de la température pour la journée du (30/12/2012).



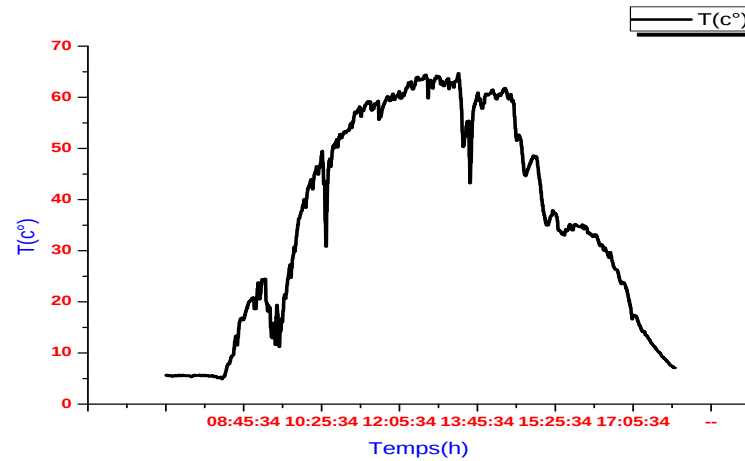
Grphe VI -32: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (30/12/2012).



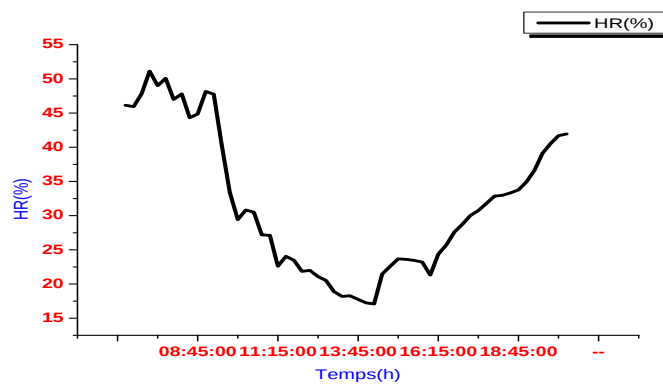
Grphe VI -33: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (30/12/2013).



Graphe VI -34: la variation de la température pour la journée du (31/12/2012).



Graphe VI -35: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (31/12/2012).



Graphe VI -36: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (31/12/2013).

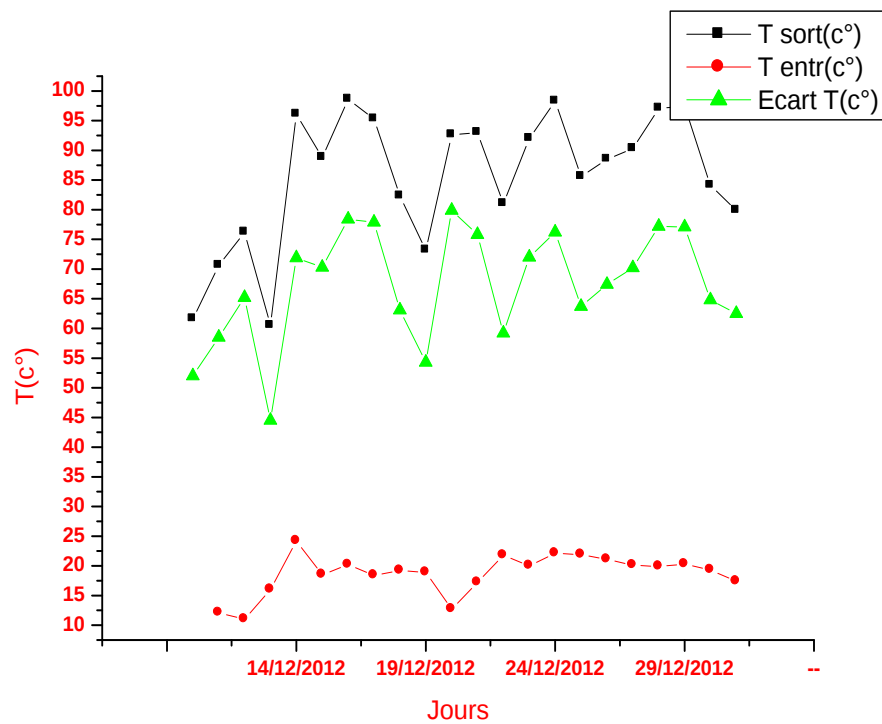
VI.5.7 Interprétation des résultats et discussion :

Le tableau montre les résultats de la température de sortie maximale obtenue ainsi que la température d'entrée et l'humidité pour chaque jour et l'heure qui correspond pour le mois de décembre.

Remarque : les résultats (les graphes) de la période de 10 au 20 décembre sont présentés dans l'annexe 01.

Jour/heure	Température de sortie Max (°C)	Température d'entrée (°C)	Ecart (°C)	(Ts-Te)	Humidité (%)
10/12/2012/14:05:12	61.60	09.60	52		57.36
11/12/2012/12:07:26	70.60	12.10	58,5		63.20
12/12/2012/10:35:45	76.20	11.00	65,2		42.29
13/12/2012/12:44:15	60.50	16.00	44,5		52.90
14/12/2012/11:20:50	96.10	24.20	71,9		39.81
15/12/2012/12:20:34	88.80	18.50	70,3		53.13
16/12/2012/13:29:33	98.60	20.20	78,4		19.64
17/12/2012/12:41:43	95.30	18.40	77,9		48.12
18/12/2012/10:51:20	82.30	19.20	63,1		63.36
19/12/2012/12:19:33	73.20	18.90	54,3		56.02
20/12/2012/12:36:56	92.60	12.70	79,9		42.00
21/12/2012/11:41:49	93.00	17.20	75,8		51.42
22/12/2012/13:40:22	81.00	21.80	59,2		49.80
23/12/2012/13:14:03	92.00	20.00	72		52.35
24/12/2012/13:02:57	98.30	22.10	76,2		54.87
25/12/2012/12:56:00	85.60	21.90	63,7		47.98
26/12/2012/11:58:38	88.50	21.10	67,4		50.80
27/12/2012/11:19:39	90.30	20.10	70,2		49.57
28/12/2012/12:21:04	97.10	19.90	77,2		28.89
29/12/2012/12:26:20	97.40	20.30	77,1		19.30
30/12/2012/11:50:34	84.10	19.30	64,8		29.21
31/12/2012/13:12:04	79.90	17.40	62,5		18.90

Tableau VI -1: Température de sortie maximal pour la période de 10 au 20 décembre



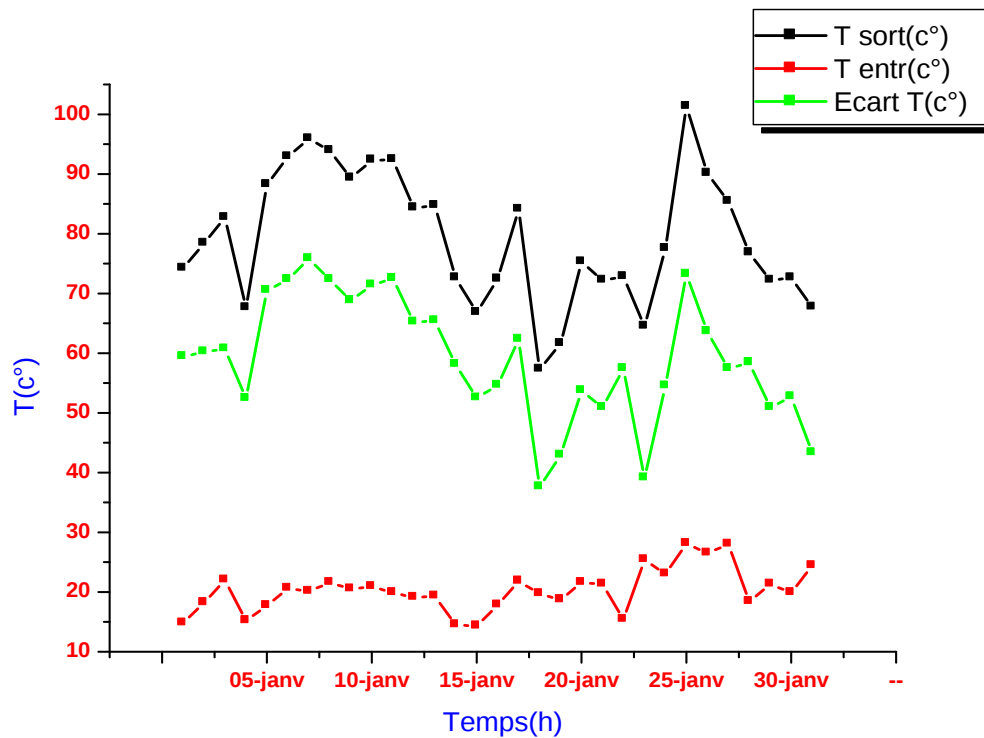
Graphe VI -36: la variation de la température maximal et la température d'entrée ainsi que l'écart de la température ($T_s - T_e$).

Le tableau montre les résultats de la température de sortie maximale obtenue ainsi que la température d'entrée et l'humidité pour chaque jour et heure qui corresponde pour le mois de janvier.

Remarque : les résultats (les graphes) du mois de janvier sont présentés dans l'annexe 01.

Jour/heure	Température de sortie Max (°C)	Température d'entrée (°C)	Ecart (Ts-Te) (°C)	Humidité (%)
01/01/2013/12:05:04	74.20	14.80	59,4	46.80
02/01/2013/12:55:38	78.40	18.20	60,2	48.50
03/01/2013/12:08:48	82.70	22.00	60,7	35.25
04/01/2013/13:07:04	67.60	15.20	52,4	37.70
05/01/2013/12:36:34	88.20	17.70	70,5	36.10
06/01/2013/11:57:04	92.90	20.60	72,3	41.45
07/01/2013/12:15:04	95.50	20.10	75,8	54.45
08/01/2013/12:35:34	93.90	21.60	72,3	38.45
09/01/2013/12:20:04	89.30	20.50	68,8	38.56
10/01/2013/11:03:04	92.30	20.90	71,4	54.50
11/01/2013/11:46:34	92.40	19.90	72,5	39.15
12/01/2013/11:58:04	84.30	19.10	65,2	48.90
13/01/2013/11:41:04	84.70	19.30	65,4	49.70
14/01/2013/11:23:04	72.60	14.50	58,1	45.94
15/01/2013/11:15:04	66.80	14.30	52,5	50.57
16/01/2013/12:18:18	72.40	17.80	54,6	31.18
17/01/2013/12:54:48	84.10	21.80	62,3	21.56
18/01/2013/10:11:04	57.30	19.70	37,6	12.90
19/01/2013/10:33:34	61.60	18.70	42,9	42.35
20/01/2013/11:53:18	75.30	21.60	53,7	50.35
21/01/2013/12:05:48	72.20	21.30	50,9	50.90
22/01/2013/12:08:34	72.80	15.40	57,4	54.12
23/01/2013/13:53:48	64.50	25.40	39,1	40.15
24/01/2013/11:27:18	77.50	23.00	54,5	59.23
25/01/2013/12:35:48	101.3	28.10	73,2	55.30
26/01/2013/12:51:18	90.10	26.50	63,6	62.50
27/01/2013/11:01:18	85.40	28.00	57,4	62.30
28/01/2013/12:00:18	76.80	18.40	58,4	63.51
29/01/2013/12:05:48	72.20	21.30	50,9	63.55
30/01/2013/11:43:18	72.60	19.90	52,7	58.01
31/01/2013/10:51:48	67.70	24.40	43,3	46.01

Tableau VI -2: Température de sortie maximale pour le mois de janvier



Graphe VI -38: la variation de la température maximal et la température d'entrée ainsi que l'écart de la température ($T_s - T_e$) pour le mois de janvier.

A partir de l'expérience réalisée nous pouvons déduire que :

- on note qu'il ya une augmentation de la température dans la période matinale jusqu'à 14:05, après on remarque diminution de la température. Résultat parfaitement compatible avec l'intensité du rayonnement
- la température d'entrée qui est en même temps la température ambiante dépend de l'intensité de rayonnement solaire.
- la Température de sortie est en fonction de l'intensité de rayonnement solaire.
- l'écart entre la température de sortie et la température d'entrée croît avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire.
- la température de sortie est maximale dans la période entre 10:00 à 14:00.
- la température dépend à la présence du soleil.

VI.5.8 conclusion

Les résultats de ces travaux de recherche ont permis de tirer la conclusion suivante:

Bien que le solaire thermique est disponible et pouvant constituer une alternative avec moindre coups aux ressources énergétiques fossiles polluantes. Peu d'efforts ont été fournis en vue de l'intégration de cette ressource dans le milieu d'habitation humaine, pour subvenir aux besoins élémentaire nécessaires au confort thermique de l'homme, tel que le chauffage en hiver ou le rafraichissement de l'air en été.

Dans notre travail nous avons mené une série de mesures pour explorer les possibilités d'utilisation des dispositifs simples, dans le but de capter de l'énergie thermique solaire a l'aide d'un capteur plan et l'utiliser directement pour le confort thermique par traitement de l'air (chauffage des locaux ou d'habitations).

VI.6 Le stockage de l'énergie renouvelable.

VI.6.1 Introduction

Ces dernières années diverses études sur le stockage thermique ont été menées dans le but d'élaborer et de compléter les éléments technologiques et économiques nécessaires au développement du stockage de l'énergie qui reste le moyen le plus important pour l'optimisation des systèmes énergétiques générant et utilisant la chaleur.

Le stockage de l'énergie est une exigence fondamentale pour la rentabilisation de tout système énergétique actif. Ce stockage peut se faire sous forme thermique ou chimique.

La terre est un milieu perméable, non homogène, constituée de différents matériaux solides, gaz et liquides (de l'eau en général), pour cela le processus du transfert de chaleur est reconnu comme étant complexe. Son étude pose d'énormes difficultés, du fait de l'incapacité de cerner la totalité des caractéristiques thermiques de ses constituants qui changeant de façon aléatoire dans l'espace et dans le temps (le transfert de chaleur est lié directement aux caractéristiques physico-chimiques de la terre). Le transfert de chaleur dans le sol se fait par conduction et par convection avec ou sans changement de phases et du fait de la présence de l'air et de l'eau, il est généralement associé au transfert de masse sur la base des considérations dynamo thermiques non réversibles [140]. La difficulté primordiale réside dans l'analyse des paramètres influents sur le processus, car l'eau et sa vapeur se diffuse des hautes vers les basses concentrations. Lors du chauffage d'un élément de terre, l'eau contenue dans cet élément s'évapore et se mélange avec l'air qui se dilate en provoquant un transfert simultané de chaleur et de masse vers la région la moins chaude [141]. Plusieurs chercheurs ont étudié la conduction thermique dans le sol ainsi que le transfert de masse. Ils ont établi plusieurs relations mathématiques très développées pour le calcul du flux de chaleur pour différents types de terre et sa relation avec l'humidité du sol considéré [142]. On conclut on peut écrire que le traitement macroscopique bidimensionnel des équations du bilan d'énergie dans un milieu (sol non saturé) avec une configuration cylindrique décrivant le système du transfert de la chaleur et de la matière donné par différents auteurs [116] montre que la diffusion de la chaleur dans le sol par la conduction s'avère prédominante pour le cas de chauffage, Le transfert par convection devient significatif à très haute température sinon il devient négligeable. Sur le plan fondamental, on peut considérer, comme l'ont montré des travaux récents consacrés au stockage de chaleur dans le sol que le fait de ne pas prendre en compte la thermomigration se justifie dans le cas où la température des tuyaux est assez basse ($T < 45\text{ °C}$) [143]. Par contre, pour des températures plus élevées, le poids de ces

échanges devient très important, d'autant plus qu'ils modifient aussi considérablement les propriétés thermiques du sol. L'analyse des travaux concernant le stockage thermique dans le sol réalisés jusqu'à présent permet de désigner plusieurs problèmes importants qu'il faut continuer à étudier, qui sont relatifs à la distribution de température du sol autour de la conduite de fluide chaud (ou froid) fixée en régime thermique non stationnaire ? C'est à dire comment varie le champ de température du sol autour de la conduite du fluide chaud en période de chauffage, ou froid en période de l'extraction de la chaleur, la profondeur maximale du sol ou l'influence des caractéristiques thermiques de la surface n'aura aucun effet sur le processus de transfert, et la relation optimale entre la puissance thermique du fluide et le volume nécessaire du sol autour de la conduite ou circule le fluide pour le stockage et le déstockage de la chaleur ? Cela est vraiment nécessaire et utile pour calculer le nombre des tubes et choisir la façon de les installer dans le volume du sol donné (le nombre des tubes et le nombre des rangs des tubes).

VI.6.2 Types de stockage de l'énergie :

Divers procédés de stockage de l'énergie solaire sont sujet à recherche dans de nombreux laboratoires dans différents pays, parmi lesquels on énumère:

- le stockage hydraulique.
- le stockage par voie chimique.
- le stockage par voie photochimique.
- le stockage au moyen des volants d'inertie.
- le stockage thermique (sujet de notre projet).

VI.6.3 Techniques du stockage de l'énergie solaire (thermique).

On admet souvent, bien à tort, que le stockage de l'énergie solaire est très difficile, sinon impossible en grandes quantités. Parfois il faut installer des réservoirs d'eau de très grande dimension, ou l'accumulation de la chaleur dans les cavités rocheuses, ce qui est difficile à réaliser pratiquement. Si l'on opte pour le stockage de l'énergie solaire sous forme d'électricité, il faut prévoir un nombre important de batteries d'accumulateurs électriques. Par conséquent, nous constatons que les modes de stockage mentionnés ci-dessus ne sont pas économiques. Ce qui nous incite à chercher d'autres alternatives. La conversion biologique de l'énergie solaire par voie photosynthèse et son stockage indirect sous forme de combustible fossile exploité actuellement est un exemple concret d'un processus naturel qui date depuis que la vie existe sur terre. L'action du rayonnement solaire sur les eaux marines et continentales produit de la vapeur d'eau contenu dans l'atmosphère, dont la

chaleur latente est d'environ 600 cal/g, et qui sera cédée quand la vapeur se condense; Cette condensation est à l'origine des nuages, des pluies et des orages. En particulier, le remplissage des barrages réservoirs par les pluies est un maillon de la chaîne qui va de l'énergie solaire à l'énergie hydraulique utilisée pour actionner les turbines, et de ce fait un barrage réservoir est un véritable accumulateur d'énergie.

VI.6.4 Systèmes de stockage thermique

Les systèmes de stockage thermique sont le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente d'un changement de phase du matériau de stockage. On peut concevoir les systèmes de stockage à court terme ou à long terme, ils se différencient essentiellement par la taille des installations prévues. Le stockage à long terme (par exemple, le stockage inter saisonnier) est rarement rentable car un problème d'emmagasiner de l'énergie à long terme est posé.

Dans le cas du stockage sous forme de chaleur sensible, une matière (le plus souvent de l'eau, des pierres ou une huile thermique) est portée à une température plus élevée chaque fois qu'il se produit un excédent de chaleur, et refroidie lorsque nécessaire. Dans ces systèmes, on a toujours besoin d'un réservoir et aussi le plus souvent d'une surface d'échange. Le prix de revient de ces éléments est généralement le facteur qui limite son application économique.

Le stockage de chaleur à base de chaleur latente peut se faire à l'aide d'une matière qui passe d'une phase à une autre (par exemple solide liquide) et exige pour ce faire un grand apport de chaleur dans un sens, tandis que la transformation inverse libère une grande quantité de chaleur. Si on choisit avec soin la température de fusion de la matière utilisée, la capacité thermique d'un stock à changement de phase par unité de volume peut être sensiblement plus élevée que dans les systèmes de stockage à eau ou à lit de pierres.

VI.6.5 Les caractéristiques d'un système de stockage thermique :

A partir de l'analyse de l'étude faite par Despois, J. Nougrède, F 1977 [4], qui nous donne une idée générale sur le principe du stockage thermique souterrain, nous entamons notre étude de stockage thermique dans le sol. La méthode la plus pratique actuellement est le stockage thermique à cycles thermodynamiques réversibles afin d'assurer la récupération de cette énergie sous une autre forme (par exemple: énergie mécanique.)

Un grand intérêt a été porté à la recherche dans cette direction afin de mieux développer le stockage de la chaleur à très haute température (1000°C à 1200°C). Les températures recherchées sont selon les cas:

- Environ 3500°C pour les fours à très hautes températures.
- De 200 à 500°C pour les chaudières et le chauffage industriel à moyenne ou haute température.
- Au moins 90°C pour la distillation de l'eau de mer.
- En général 80°C pour le chauffage central.
- Entre 60 à 70°C pour la distribution domestique d'eau chaude.
- Environ 40°C pour le chauffage par rayonnement.
- Environ 25°C pour le chauffage d'eau d'une piscine.

VI.7 Milieu souterrain du stockage

Contrairement à ce qui se passe pour un milieu de stockage liquide, qui peut souvent se décrire par séparation des paramètres capacitif et convectif (modèles à un nœud), les échanges thermiques avec un milieu solide comme le sol pour notre cas, est de nature conductif [59], induit des déphasages et amortissements de température souvent difficile à caractériser de façon intuitive, l'inhomogénéité du champs de température ne permettant généralement pas la mise en œuvre de modèles mathématiques simples. Si, à défaut de mieux, certain auteurs utilisent tout de même de tels modèles pour le dimensionnement d'échangeurs de ce type, il reste à priori difficile, particulièrement en condition non stationnaire [94], d'estimer les paramètres fondamentaux tels que le coefficient d'échange thermique et le profile du champs de température effective du sol.

Hormis une solution approximative, basée sur une solution stationnaire et pour une géométrie restreinte [115], une des études analytiques les plus abouties [116] donne la solution exacte de la transmission de la chaleur latérale d'un tube cylindrique soumis à un flux de chaleur. Elle est complétée [117] par l'effet qui en résulte sur la variation longitudinale de la température du flux d'air. Bien qu'y soit prise en compte le couplage thermique du sol avec sa surface libre, considérée plane et soumise à excitation périodique déphasée, pour le reste de la géométrie la diffusion dans le sol se poursuit virtuellement à l'infini, c.à.d. sans restriction sur la quantité de terrain à disposition. Il manque surtout à cette étude une interprétation physique ainsi qu'une présentation simple et opérationnelle des résultats obtenus.

Jusqu'ici dans la littérature, la distribution de la température stationnaire au-dessous de la surface du sol soumis à une source a été rapportée sous une forme intégrale ou asymptotique. Dans notre thèse, une solution analytique exacte est fournie, qui permet la détermination des températures au-dessous du sol autour d'un tube enterré transportant un fluide caloporteur (l'eau). La solution est basée sur les fonctions spéciales (Bessel et fonctions hypergéométriques).

VI.8 Le stockage souterrain de la chaleur

La chaleur, utilisable directement pour le chauffage ou indirectement pour la production de l'énergie mécanique, était jusqu'à maintenant principalement fournie par la combustion. La chaleur potentielle contenue dans les combustibles est considérable. En outre, les chaudières sont des installations relativement coûteuses. On a donc intérêt à se procurer le combustible et à calculer les foyers et les chaudières en fonction des besoins de pointe. Ceci est aussi vrai pour un petit chauffage d'un appartement que pour une centrale électrique. La recherche d'économie de combustibles fossiles conduit à adopter des sources de chaleur nouvelles, nécessitant des investissements coûteux, (énergie nucléaire par exemple), ou fonctionnant sous des contraintes sévères, telles qu'un horaire de production imposé (énergie solaire, récupération de la chaleur industrielle perdue). Ce qui mène à se pencher sur des alternatives de substitution à bon marché et leur stockage principalement.

Le stockage de l'énergie solaire dans le sol est jugé comme étant le plus pratique. Ce mode continu d'être étudié. Dans ce cas, la chaleur peut être transportée par un fluide (souvent liquide) et accumulée dans des empilements de matériaux réfractaires (par exemple: sol, sable, béton, roche, pierres etc.), à partir desquels on restitue la chaleur emmagasinée durant les périodes sans ensoleillement. On peut aussi utiliser des tubes enterrés dans lesquels circule le fluide (liquide), la chaleur est ainsi transmise au sol (aux matériaux) ou elle sera emmagasinée, elle peut être ensuite récupérée par un liquide arrivant à basse température (en inversant le gradient de températures) pour diverses utilisations à savoir le chauffage de l'eau, le chauffage des habitations, la climatisation, la production du froid et glaces et dans le domaine agricole. Pour le chauffage domestique solaire, il y'a des systèmes d'accumulation de la chaleur dans des murs en béton (maisons solaires de CNRS en France), ou dans des matériaux divers (plusieurs tonnes de pierres dans des réalisations américaines), ou encore dans des réservoirs d'eau chaude.

VI.8.1 Les critères du choix des matériaux accumulant de l'énergie

Les critères du choix des matériaux accumulant de l'énergie sont les suivants:

- une chaleur de fusion très grande.
- un matériau qui limite considérablement le volume de stockage nécessaire.
- une chaleur spécifique très grande.
- la température de fusion doit être en harmonie avec le cycle thermodynamique choisi.
- la conductibilité thermique à l'état solide des matériaux envisagée doit être sensible.

Ces critères de choix sont cités ici par ordre d'intérêt décroissant. On peut retenir aussi une stabilité chimique excellente à la température de fonctionnement et une masse volumique élevée.

Constituants de base du système de stockage thermique souterrain :

Dans les systèmes solaires destinés au chauffage des bâtiments et des habitations, les systèmes les plus complets et qui peuvent couvrir les besoins de chauffage presque à 100 % sont les systèmes équipés d'un dispositif de stockage thermique. Dans notre recherche bibliographique effectuée pour mettre à jour ce travail, nous avons remarqué qu'un certain nombre de composants bien précis se répète et dont la présence est indispensable. Autrement dit, dans toute installation les capteurs solaires, le ballon de stockage, la pompe à chaleur, et les capteurs enterrés sont des constituants de base omni présente pour une installation solaire avec stockage souterrain destiné pour le chauffage ou le refroidissement comme le montre les figures suivantes : De ce fait on a jugé utile d'expliquer le rôle de chaque appareil dans l'installation, mais un intérêt spécial sera porté aux échangeurs verticaux enterrés qui sont l'outil de stockage thermique

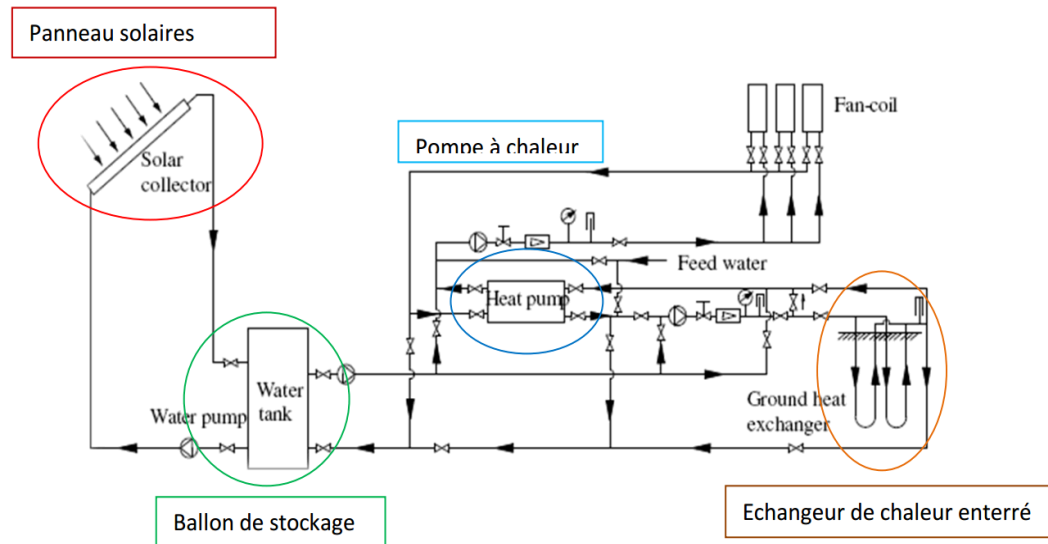


Figure VI- 3: Système solaire-géothermique expérimental multifonction couplé a une pompe a chaleur.

VI.8.2 Caractéristiques thermique du sol

Le sol est un milieu non homogène constitué de différents matériaux solides contenant parfois des gaz et de l'eau tandis que les couches souterraines peuvent contenir des matériaux de nature organique. La composition spécifique du sol dépend généralement de la position géographique et de la profondeur considérée.

L'évaluation des caractéristiques thermiques du sol est très complexes et une grande partie reste insaisissable jusqu'à présent car elles ne sont pas constantes et changent avec la variation des différents paramètres (humidité, température, composition chimique, propriétés physiques du milieu, profondeur etc.). Le stockage de la chaleur dans le sol dépend généralement de sa capacité thermique, et la propagation de la chaleur dans ce milieu dépend de sa conductivité thermique. Il est souvent difficile de trouver le coefficient de transfert de chaleur dans la littérature. Un recours à l'expérience pour l'évaluer s'impose à chaque fois (après la variation d'un paramètre quelconque).

VI.8.3 Profil de température du sol

Aston,D (1973) [23] montre que la connaissance de la répartition des températures dans les couches intérieures du sol à une grande importance pratique. Cette connaissance est utile non seulement aux chercheurs qui étudient les plantes ou le sol, mais encore aux hydrologues, aux climatologues et aux ingénieurs de la construction. Les températures du sol ont même des répercussions en météorologie, car elles reflètent les phénomènes de transfert

de chaleur qui surviennent à la surface terrestre et qui jouent un rôle important dans la formation des mouvements atmosphériques. Le profil de la température du sol Aston,D.(1973) [23] révèle les phénomènes de transfert de chaleur dans le sol. C'est une fonction du rapport de chaleur à la surface, de la conductivité thermique, de la capacité calorifique du sol et de l'évolution thermique du sol. La capacité calorifique du sol a pour effet d'emmagasinier la chaleur dans le sol, diminuant de ce fait les fluctuations de température imposées à la surface au fur et à mesure que s'accroît la profondeur. Du fait que le profil de température produit par un apport de chaleur variable à la surface dépend à la fois de la conductivité thermique et de la capacité calorifique du sol, on réunit souvent ces deux valeurs en un seul paramètre que l'on appelle diffusivité thermique. Si l'on connaît la diffusivité thermique, on peut calculer la réduction d'amplitude et le retard de phase, lorsqu'une onde de température imposée à la surface du sol descend dans une colonne étudiée du sol. L'amortissement de l'onde de température avec l'accroissement de la profondeur dépend de la période de l'onde; les fluctuations à courte période sont plus touchées que celles à longue période. Dans un sol typique, l'amplitude des ondes de température du cycle diurne ne vaut plus, à une trentaine de centimètres de profondeur, que le dixième de sa valeur à la surface; en revanche, l'onde représentant le cycle annuel ne subit pareille diminution qu'à une profondeur d'environ six mètres. On pourrait utiliser les diminutions et les changements de phase observés dans les ondes de température selon la profondeur pour estimer la diffusivité thermique en des endroits particuliers. On pourrait se servir de cette diffusivité déduite pour calculer certaines données relatives à l'emplacement choisi, notamment le bilan thermique la tendance au gel, la profondeur de pénétration du gel selon les différentes couvertures végétales et la teneur en humidité du sol.

Le sol récupère de petites quantités de chaleur des phénomènes internes biologiques et chimiques, de la radioactivité naturelle et de la conduction du noyau terrestre; cependant, presque partout dans la couche supérieure de l'écorce terrestre de quelques dizaines de mètres d'épaisseur, la plus grande partie de la chaleur provient du rayonnement et de l'échange de chaleur à la surface terrestre; c'est le rayonnement solaire qui représente la principale source d'énergie. Cet apport d'énergie peut varier considérablement selon l'emplacement, la saison, la nébulosité, la couverture végétale et la nature ou la couleur de la surface du sol.

Le besoin de connaître avec précision et exactitude les températures du sol est évident si l'on considère le grand nombre de problèmes auquel ces données peuvent s'appliquer. Il serait utile qu'un observateur vérifie les données lors de leur rassemblement afin de s'assurer que

les indications sont cohérentes et compatibles avec les principes physiques qui régissent le flux de chaleur du sol.

VI.8.4 Humidité du sol

La description quantitative de la phase liquide repose sur la notion de teneur en eau ou humidité du sol . Celle-ci varie principalement en fonction de la structure du sol et de sa porosité. Selon qu'on la rapporte à la masse ou au volume, la teneur en eau d'un sol peut s'exprimer par la teneur en eau volumique ou humidité volumique : rapport du volume d'eau présent dans le sol au volume apparent de ce sol (volume de sol en place). La teneur en eau volumique varie entre une valeur minimale, la teneur en eau résiduelle, et une valeur maximale, la teneur en eau à saturation. Celle-ci est en principe égale à la porosité efficace (définie comme le rapport du volume des vides au volume total du milieu), un indice de saturation défini comme le rapport du volume d'eau au volume des pores. Cette grandeur exprime le volume des pores occupé par l'eau. Elle varie entre un minimum résiduel et la valeur de 100%.

VI.8.5 Influence de l'humidité sur les caractéristiques thermique du sol

On a montré que la teneur en eau du sol influence le flux de chaleur et la répartition des températures dans le sol, le phénomène inverse est aussi important: les gradients de température de sol engendrent le mouvement de l'humidité du sol, surtout dans les sols qui sèchent. Ce mouvement de l'eau se produit par suite de l'augmentation de la tension de vapeur de saturation en fonction de la température. Dans un sol partiellement sec, la phase de l'eau n'est pas continue entre les pores, mais ne se rencontre qu'à certains endroits de la gangue terreuse. Dans ces circonstances, le mouvement de l'eau est surtout dû à la diffusion de la vapeur. En présence d'un gradient de température, l'eau tend à s'évaporer des endroits les plus chauds pour se condenser dans les endroits les plus froids. Par suite des effets de la chaleur latente, ce phénomène participe au transfert de chaleur. Il peut donc venir renforcer de beaucoup le flux total de chaleur au fur et à mesure que le sol sèche. Du fait de l'emmagasinement de la chaleur et de la constance relative des températures dans les couches inférieures du sol, le flux d'humidité dû aux gradients de température s'effectue généralement vers le bas en été et vers le haut en hiver. Le mouvement ascendant d'hiver est particulièrement intéressant parce qu'il contribue au gel des sols « secs » et au dégel boueux qui s'ensuit, même en l'absence de précipitations, et à la formation, dans les couches

supérieures du sol, de lentilles de glace qui peuvent provoquer de graves soulèvements par le gel.

VI.8.6 Transfert de chaleur dans le sol

Le sol est souvent soumis à l'influence de différents paramètres qui peuvent être classés selon trois grandes catégories comme donnés par Gold, L.W 1967[118] :

- les variables météorologiques,
- les variables du terrain
- les variables du sous-sol.

Dans le sol, la transmission de la chaleur dépend des propriétés physiques des particules du sol, de leur degré de compacité et de la teneur en humidité. Le sol étant poreux et contenant des quantités variables d'air et d'eau, l'analyse du flux de chaleur dans le sol est beaucoup plus compliquée que dans un corps solide homogène dont la conductivité thermique et la capacité calorifique sont des paramètres établis et bien définis. Le sol se compose de particules minérales, de matières organiques et de pores qui peuvent contenir soit de l'eau, soit de l'air. Ces éléments ont tous des caractéristiques thermiques très différentes. Ainsi, la conductivité thermique des particules minérales est cinq fois plus élevée que celle de l'eau, dix fois plus élevée que celle des matières organiques et cent fois plus élevée que celle de l'air. Par conséquent, la conductivité thermique du sol peut varier considérablement selon la proportion de ces éléments. Même si le sol présente une teneur uniforme en matières minérales et organiques et une porosité constante, sa conductivité dépend de façon marquée de la teneur en eau, à cause de la grande différence entre la conductivité thermique de l'eau et celle de l'air. Pour un sol donné, la conductivité thermique tend à augmenter en fonction de la profondeur, à cause de l'accroissement de la compacité du sol et de la diminution de la teneur en air.

Pour une description théorique du transfert de chaleur un sol que l'on considère comme un milieu non homogène et anisotrope une approche macroscopique doit être adoptée. Toutes les quantités physiques se rapportent à une moyenne spéciale sur cellule unité du sol. La dimension linéaire d'une telle cellule unité est large si comparée aux dimensions des grains et des pores, et petite en la comparant à l'échelle typique de la variation de la température et la composition.

Les mécanismes de transfert de chaleur dans le sol sont, suivant l'ordre d'importance [36], la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction se produit à travers le sol, mais le principal flux de chaleur se fait à travers les parties solides et liquides. La convection est négligeable dans la plus part du temps, sauf aux cas d'infiltrations rapides d'eau. Ca ne tient pas

pour le transport de la chaleur latente par la vapeur d'eau qui peut contribuer considérablement au transfert de chaleur dans les pores pleins de gaz. Le transfert de chaleur du au mécanisme de radiation est d'importance uniquement dans le sol sec à haute température à l'intérieur des larges pores.

VI.8.7 Propriétés du sol et variations de température de la surface

Les propriétés du sol déterminant sa réponse aux variations de température en surface sont les suivantes:

1. la capacité de chaleur volumétrique, C_v .
2. la conductivité thermique, K .
3. la chaleur latente (chaleur nécessaire au gel ou du dégel d'une unité volumique de sol gelé).
4. la teneur en eau.
5. La diffusivité thermique, aspect important pour le calcul du taux de transmission de la chaleur dans le sol.

La teneur en eau est une variable et agit directement sur les valeurs de la capacité thermique, de la conductivité thermique et de la chaleur latente. Ainsi, plus la teneur en eau n'est élevée, plus la capacité thermique, la conductivité thermique et la chaleur latente sont élevées. La réponse du sol aux variations de la température devient plus complexe à cause des changements qui se produisent lors du chauffage ou du refroidissement.

VI.8.8 Estimation de la température du sol

L'analyse de Fourier peut être utilisée pour le calcul des températures du sol dans les cas où la variation de température en surface ne peut être bien exprimée par l'équation (1). Si les propriétés thermiques du sol varient avec le temps, cette méthode peut ne pas être assez précise ou pratique, particulièrement si le gel de l'eau est notable lors de la période de pénétration du gel dans le sol. Des programmes de calcul de la température du sol par ordinateur ont donc été prévus pour les cas les plus complexes. Les méthodes de simulation par ordinateur peuvent être très efficaces pour l'étude de problèmes complexes, par exemple ceux qui portent sur les sols stratifiés, les sous-sols chauffés, les patinoires artificielles, les couches de neige, etc. Dans la plupart des cas cependant, il n'est pas nécessaire d'utiliser une méthode aussi détaillée, et de simples méthodes graphiques peuvent suffire. Si les températures du sol sont déjà connues, on peut utiliser l'équation (2), pour déterminer la température moyenne annuelle du sol et la diffusivité thermique.

Presque tous les changements autres que ceux naturels apportés au terrain modifient les températures du sol en surface et en profondeur, bien que dans la plupart des cas ces modifications ne soient pas effectuées uniquement dans le but de changer le régime thermique du sol. Il peut toutefois être souhaitable de modifier délibérément la température du sol dans certaines situations, par exemple pour augmenter la capacité thermique du sol en vue de l'utilisation de la chaleur solaire ou modifier des propriétés thermiques du sol pour réduire les pertes thermiques dans les sous-sols des habitations. Il ne faut pas oublier que ces températures ne peuvent être limitées que dans une certaine mesure car l'homme ne maîtrise pas le climat qui est responsable des différences régionales. Les températures du sol peuvent généralement être modifiées en changeant soit les conditions de la surface du sol ou ses propriétés thermiques du sol. Une couche isolante en surface ou à proximité de celle-ci permet de modifier la condition de la surface, d'où l'utilisation d'isolant sous les chaussées en vue de réduire l'effet du gel. L'augmentation de l'épaisseur de la couche de neige au moyen de clôtures à neige constitue aussi une autre application de ce principe. La meilleure méthode pour modifier la capacité thermique du sol consiste à modifier sa teneur en eau, par exemple en l'inondant. Diverses méthodes de modification des températures du sol ont été mises en application avec succès en agriculture mais leur utilisation ne s'est toutefois pas étendue au domaine de la construction.

VI.8.9 Comportement général des températures du sol

Un bilan énergétique à la surface du sol fait intervenir de nombreux phénomènes physiques (météorologie de l'air, radiation solaire, pluie, neige,...), topographie, occupation du sol, évapotranspiration de la végétation etc. Tous ces conditionnent les transferts de chaleur en surface et influencent la température du terrain à son voisinage. Le plus important paramètre ici est la température annuelle moyenne de l'air ambiant.

La température moyenne annuelle du terrain vers la surface est généralement proche de cette dernière. L'influence des variations journalières et saisonnières de la température de l'air ambiant sur la température du terrain proche de la surface est illustrée par la résolution de l'équation de la chaleur (1) pour un milieu semi infini et homogène dont la surface est soumise à une variation sinusoïdale de la température, la solution de ce problème est l'équation classique d'une onde de chaleur donnée par les auteurs par G. P. Williams et L. W. Gold 1977 [29] qui ont étudié Les principales caractéristiques des variations entre la température de l'air et celle de la surface du sol et ont établi qu'il peuvent généralement s'exprimer par l'équation suivante:

$$T_s = \bar{T} + A \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_0}\right) \quad (1)$$

Où

T_s : est la température à un moment précis

$\bar{T}$: la température moyenne pour la période donnée, qui comprend un ou plusieurs cycles complets de variations,

A : est la différence entre les températures maximales et minimales pour la période donnée,

t : est la durée de l'expérience.

t_0 : la durée d'un cycle complet.

Si les propriétés thermiques du sol sont constantes, la température produite dans le sol par la variation cyclique peut être obtenue par l'équation suivante:

$$T(x, t) = \bar{T} + A \cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot t_0}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_0} - x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot t_0}}\right) \quad (2)$$

Avec :

x : représente la profondeur sous la surface

α : la diffusivité thermique K/C_v .

L'équation de l'onde de chaleur (2) montre que l'amplitude des variations de température dans le terrain est atténuée par un facteur qui décroît exponentiellement avec la profondeur qui dépend à son tour de la diffusivité thermique du terrain d'une part, et la variation de la température à la surface du sol correspond généralement à l'amplitude de la variation de la température de l'air. L'équation (2) indique que l'amplitude diminue de façon exponentielle en fonction de l'éloignement de la surface, à un taux prescrit par le temps nécessaire à un cycle complet. Ceci est représenté par la figure suivante :

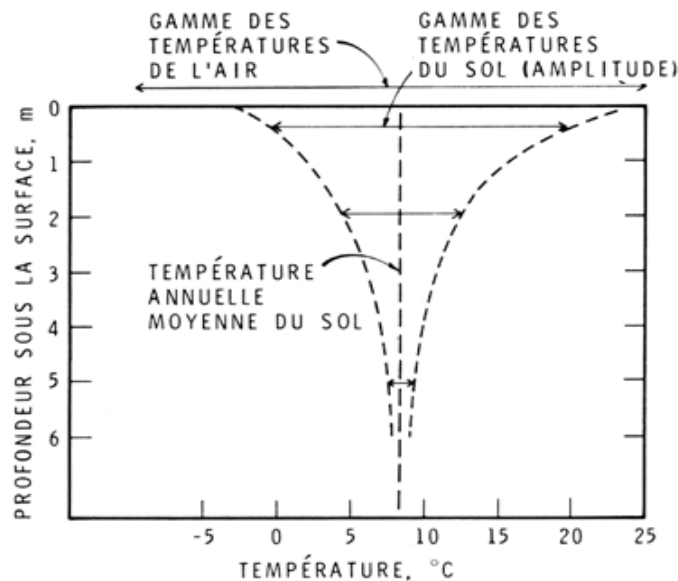


Figure VI- 4: Exemple de la relation entre la profondeur et les températures annuelles du sol

Dans le cas des variations annuelles. Les températures du sol sont généralement constantes au cours de l'année pour des profondeurs supérieures à 5 et 6m. La température moyenne annuelle du sol est presque constante avec la profondeur, elle augmente toutefois d'environ 1°C par 50 m à cause de la chaleur géothermique provenant du centre de la terre.

La température de la surface du sol demeure presque en phase avec celle de l'air. Toutefois, les valeurs maximale ou minimale des couches sous la surface sont atteintes plus tard qu'en surface, le retard augmentant linéairement selon la profondeur, comme l'indique le cosinus de l'équation (2) qui représente ce comportement. A une profondeur de 5 à 6 m, la température maximale du sol est atteinte environ 6 mois après la température maximale moyenne de la surface qui a lieu en été. La température du sol subit un cycle quotidien (un cycle associé aux variations météorologiques) en plus du cycle annuel. Ces variations se limitent aux couches souterraines près de la surface, les cycles quotidiens se faisant sentir à une profondeur de pénétration d'environ 0.5 m sous la surface et les cycles météorologiques à environ 1 m. Les

variations quotidiennes de température constituent un aspect intéressant pour ce qui a trait aux problèmes de construction, mais elles sont encore plus utiles pour les agriculteurs.

VI.8.10 Avantage du stockage thermique dans le sol

Le stockage thermique souterrain utilise la température du sol ou de l'eau afin de rafraîchir ou de chauffer des bâtiments (cas du chauffage ou de la climatisation). Par exemple, une pompe à chaleur peut extraire de la chaleur se trouvant sous terre afin de chauffer un bâtiment. En été, la pompe peut être inversée et servir de système de climatisation en expulsant l'air chaud hors de l'immeuble et en l'envoyant dans le sol.

Il est plus efficace d'utiliser Le stockage thermique souterrain qu'un appareil de chauffage à combustion, parce que le transport de la chaleur d'un endroit à un autre nécessite moins d'appareillages qu'une installation mécanique ou énergétique. Au Canada par exemple, plus de 30 000 installations d'énergie du sol sont utilisées à des fins résidentielles, commerciales, institutionnelles et industrielles. Le stockage thermique souterrain est largement utilisé dans le nord de l'Europe, notamment dans les pays scandinaves, qui ont adopté rapidement cette technologie. Le stockage thermique souterrain devient de plus en plus courant dans le sud des États-Unis, où l'on s'en sert pour la climatisation des bâtiments. Les systèmes de stockage thermique souterrain peuvent aussi réduire l'émission de gaz à effet de serre.

Les systèmes de stockage thermique souterrain offrent les avantages suivants :

- Les coûts de fonctionnement des systèmes de stockage thermique souterrain sont beaucoup plus faibles que ceux d'un appareil de chauffage à combustion munie d'un climatiseur d'air. Toutefois, en moyenne, un système du stockage thermique souterrain peut permettre de réaliser des économies correspondantes aux deux tiers des coûts de chauffage et de climatisation à l'électricité.
- Le stockage thermique souterrain peut fournir de la chaleur en hiver et de l'air frais en été, ainsi que de l'eau chaude pour une utilisation domestique durant toute l'année.
- Un système de stockage thermique souterrain peut réduire les émissions de gaz à effet de serre dans une proportion pouvant atteindre plus des deux tiers de ceux produits par les systèmes semblables qui utilisent un combustible à base de charbon. Les réductions dépendent toutefois de la source d'électricité employée afin de faire fonctionner les éléments du système. Il est plus que jamais important de réduire les gaz à effet de serre en raison des efforts internationaux visant à la réduction du réchauffement du globe et de la modification climatique.

- Les systèmes de stockage thermique souterrain ne produisent pas d'odeur que l'on a constatée avec les appareils de chauffage au gaz naturel, au mazout ou au propane. Cette technique peut être ainsi parfaite pour les bâtiments hautement isolés ou pour les personnes allergiques ou sensibles aux gaz nocifs et à l'air de mauvaise qualité.
- Le stockage thermique souterrain, en raison de l'absence de combustion, ne peut exploser et le dispositif du stockage de combustible (la réserve de combustible) n'est donc pas nécessaire.

VI.9 Analyse thermique

Comme dans tous les domaines de la physique, il est fondamental avant de procéder à la résolution d'un problème et avant d'entreprendre une étude d'en faire une analyse pratique qui conduira à des équations adaptées.

Cette analyse permet l'établissement des hypothèses simplificatrices, parfois volontairement simplificatrices pour obtenir une solution simple qui permet de dégager des éléments sur l'influence des différents paramètres.

En Conduction de la chaleur, il conviendra de s'interroger sur :

- le type de régime de transfert.
- les échanges aux frontières et les équations qui en découlent.
- les symétries du système.

Ceci fait, la méthodologie pour obtenir les équations repose sur la conservation de l'énergie appelée "bilan énergétique". A ce stade, il conviendra d'envisager la résolution mathématique, analytique ou numérique.

VI.10 Modèle physique

Le modèle physique est composé d'un seul tube en cuivre enterré dans le sol de 2m de longueur, de 22 mm diamètre extérieur de 20 mm de diamètre intérieur. L'eau chaude est pompée à travers le tube horizontal se situant à 5m en dessous de la surface du sol à l'intérieur du domaine du stockage représenté par un cylindre (domaine du stockage) avec un rayon de 2m et dont l'axe est traversé par le tube transportant l'eau chaude (Figure 1). On suppose que Le sol est un milieu homogène continu et isotopique, L'ensemble de propriétés du sol peuvent être représentées par des paramètres constants pour des valeurs fixes du taux d'humidité, La température du sol est toujours en dessous du point de congélation. Cette supposition est raisonnable dans une région au climat chaud, le tube est enterré à une profondeur telle que la température de la surface du sol n'a pratiquement aucun effet, le sol

est non saturé dans la région de stockage et que la dissipation de la chaleur est symétrique par rapport à l'axe du tube.

Le modèle physique est représenté par

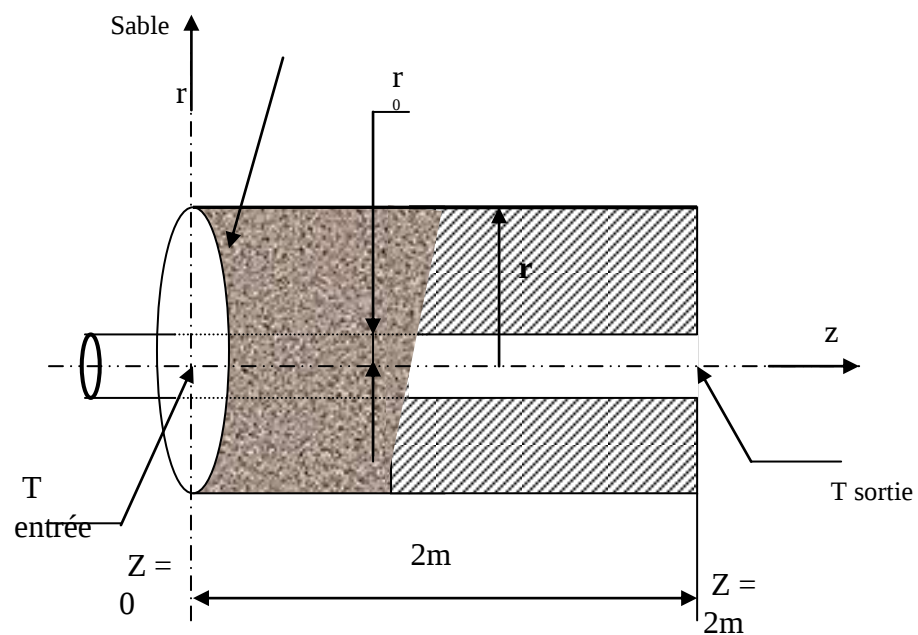
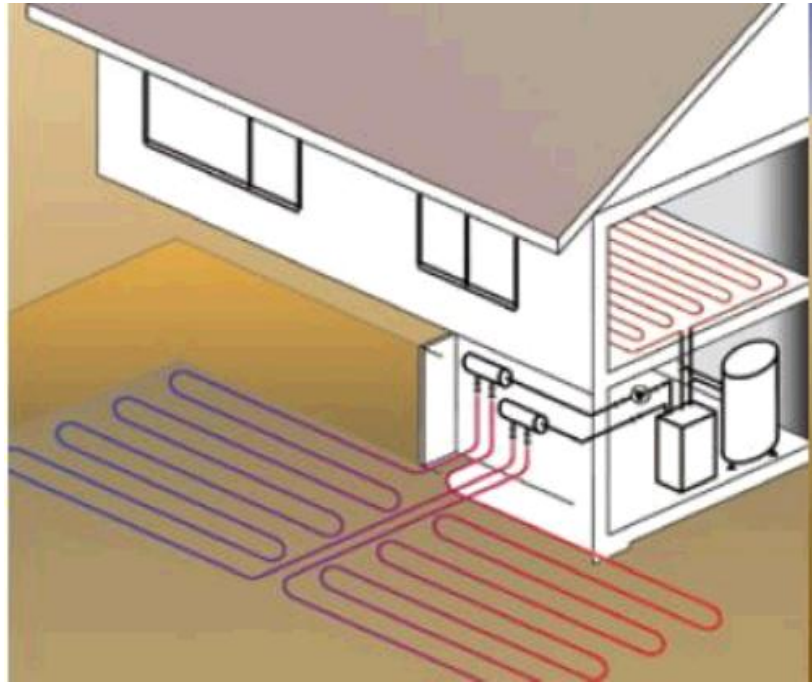


Figure VI- 5: le modèle théorique simplifié.

VI.11 Le Modèle Mathématique

Après avoir pris en considération les suppositions relatives au modèle physique, le modèle mathématique décrivant le processus de transfert de chaleur au sein du domaine en question est représenté par l'équation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (03)$$

Si les conditions aux limites sont spécifiées pour notre cas d'étude on peut trouver une solution de l'équation et ainsi obtenir la distribution, de la température dans le sol entourant le tube comme fonction de l'espace et du temps. La solution pour le cas stationnaire présente une particularité du problème quand le gradient

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$$

Cette solution est évidemment la plus simple en comparaison avec le cas transitoire, toutefois elle peut servir comme une bonne approximation à long terme. C'est ce cas que l'on va considérer en premier lieu.

La solution de l'équation est donnée sous la forme suivante [144]-[145] :

$$T(r, z, \tau) = U(r, z, \tau) + V(r, z, \tau) \quad (04)$$

La fonction $V(r, z, \tau)$ est donnée en terme des conditions aux limites à r_0 et r_∞ , permettant l'introduction d'une large gamme de conditions initiales et aux limites, indépendamment de la seconde solution $U(r, z, \tau)$

VI.11.1 Cas stationnaire

L'équation différentielle aux dérivées partielles qui gouverne le transfert de chaleur du tube vers le sol en régime stationnaire dans un domaine cylindrique bidimensionnel est la suivante :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (05)$$

Où

T : est la température.

r : le rayon du tube

z : l'axe horizontal de symétrie traversé par le tube.

Conditions aux limites :

Les conditions aux limites envisagées sont :

- Si l'on admet que la température sur la surface du tube dépend uniquement de z , $T(r_0, z)$ définie la température du sol à la surface de contact avec le tube on peut écrire alors :

$$\text{si } r=r_0 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right]_{r=r_0} = 0, \quad \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]_{r=r_0} = 0 \Rightarrow T(r_0, z) = A + Bz$$

- Très loin du tube on admet que la température peut être considérée comme constante et égale à la température ambiante du sol, soit :

$$T(r_\infty, z) = T_\infty. \quad (06)$$

- Pour une valeur constante de z , la température est fonction de r seulement. $T(r, z_0)$ et $T(r, z_l)$ sont calculées à partir des équations (08) et (09).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (07)$$

Ce qui permet d'écrire

$$z = z_0 = 0 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]_{z=0} = 0 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{z=0} = 0 \Rightarrow T(r, 0) = a \ln r + b$$

$T(r, 0) = a \ln r + b$ On écrit alors :

$$T(r, z_0) = a \ln r + b \quad (08)$$

Et

$$z = z_1 = 1 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]_{z=1} = 1 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{z=1} = 1 \Rightarrow T(r,1) = c \ln r + d$$

$T(r,1) = c \ln r + d$ On écrit alors :

$$T(r, z_l) = c \ln r + d \quad (09)$$

a, b, c et d sont constants.

VI.11.2 Cas non stationnaire

La détermination exacte de la distribution de la température dans un milieu solide (sable) autour d'un tube transportant un fluide caloporteur implique la résolution en 2D de l'équation de la conduction de la chaleur en coordonnées cylindriques pour une configuration creuse (cylindre creux $r_0 < r < r_\infty$) au cours du temps avec des conditions aux limites spécifiées, ou déterminées à partir des températures réelles mesurées directement sur le site.

Soit l'équation de la chaleur donnée par:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

Avec

r est le rayon du cylindre

a est la diffusivité thermique du milieu

VI.11.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites envisagées dans notre cas sont les suivantes:

- a- à $\tau = 0$, la température initial est supposée constante sur le domaine, et égale à la température moyenne du sol, ainsi : $T(r, z, 0) = T_0$ exception faite pour $r = r_0$.
- b- Si on admet que la température à la surface du tube dépend uniquement de z , $T(r_0, z, \tau)$ définie ainsi la température du sol à la surface de contact avec le tube.

c- Très loin du tube la température du sol est suppose constante, et égale à la température ambiante du sol, ainsi on peut écrire que: $T(r_{\infty}, z, \tau) = T_{\infty}$

d- Pour une valeur constante de z , la température est fonction de r seulement, donc on

peut poser: $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = 0$

Les températures $T(r, z_0, \tau)$ et $T(r, z_l, \tau)$. Sont calculées à partir de l'équation (12) pour r constant, ce qui donne:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

Menant à :

$$T(r, z_0) = a \cdot \ln r + b$$

et

$$T(r, z_l) = c \cdot \ln r + d$$

b , c et d sont constantes.

e- à $\tau = 0$; $T = T(r, z, 0) = T_0$ (12)

Exception faite à $r = r_0$

VI.12 Présentation de l'évolution de la température en 3D au cours du temps

Présentation du champ de température en « 3D » après 15, 30, 60 et 120 minutes de circulations d'un fluide caloporteur à l'intérieure du tube enterré dans le sol.

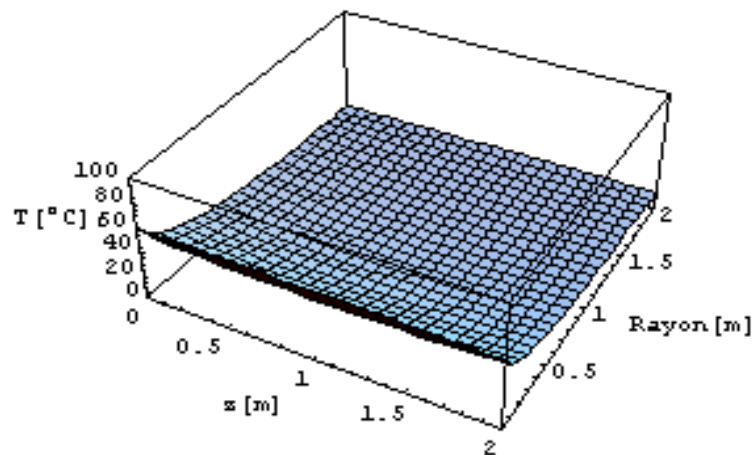
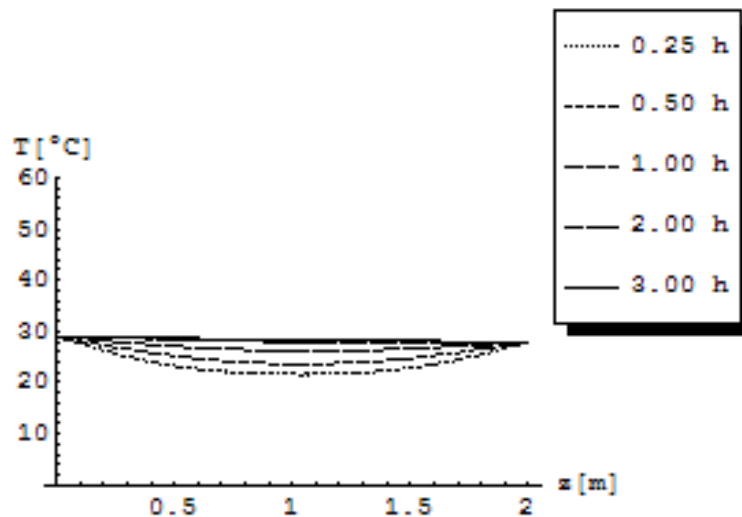
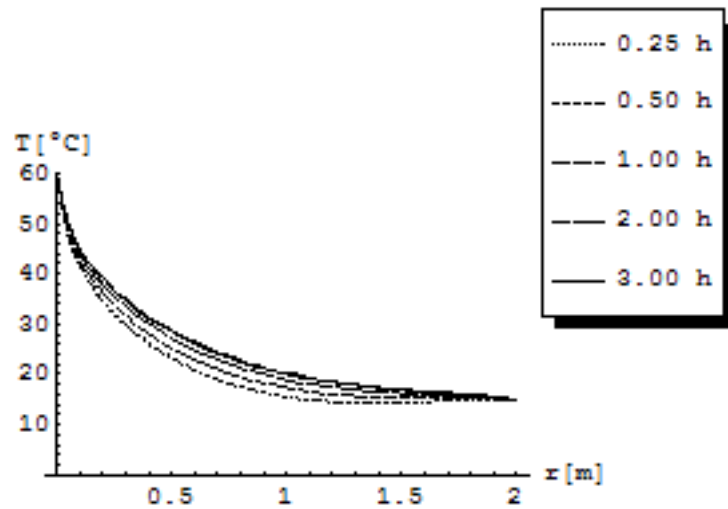


Figure VI-6 : Le profile de température dans le domaine de transfert en 3D.

a : Autour du tube



b : Le long du tube

Graph III -43: Le profile de température autour et le long du tube.**VI.13 Détermination des dimensions du domaine de stockage.**

Les courbes (Graph III-43-a) décrivant la distribution de la température en fonction du rayon du domaine de stockage (autour du tube) nous permettent de constater qu'après une période de stockage (passage de fluide caloporteur dans le tube) allant jusqu'à de 10 heures, qui correspond moyennement à une période de stockage journalier de 8h le matin jusqu'à 18h de l'après midi), qu'à partir d'une distance loin de la surface de tube égale au maximum à 1 mètre la température reste constante et égale à la température de sol, cette distance ne peut être que le rayon du domaine de stockage $r = 1$ m. Le domaine de stockage de la chaleur

dans le sol devient alors un cylindre de 2m de diamètre. Pour une configuration utilisant plusieurs tubes parallèles horizontaux l'optimum séparant deux tubes successifs doit être égal à 2m.

VI.14 Coefficient global de transfert de chaleur

Pour déterminer le coefficient global de transfert de chaleur entre le fluide caloporteur circulant dans le tube et le sol environnant on va déterminer la puissance de stockage de chaleur cédée par le fluide et celle reçue par le sol [146].

La puissance thermique cédée par le tube [148] :

$$P = \dot{m}_p c_p (T_e - T_{msf}) \quad (13)$$

La puissance thermique reçue par le sol [149] :

$$P = \frac{AG.(T_{mf} - T_{ms})}{\tau_s} \quad (14)$$

Par l'utilisation de l'expression de la température suivante :

$$T(r, z, \tau) = [U(r, z, \tau) + V(r, z, \tau)] \quad (15)$$

La puissance cédée par le fluide pendant la période de chauffage est donnée par l'expression suivante :

$$P = m_p \cdot c_p \left[\frac{\int_0^{\tau_s} (T_e - T_{sf}) d\tau}{\Delta \tau} \right] \quad (16)$$

$$T_{sf} = T(r_0, z_l, \tau) = U(r_0, z_l, \tau) + V(r_0, z_l, \tau) \quad (17)$$

$$P = m_p \cdot c_p \left[\frac{\int_0^{\tau_s} (T_e - [U(r_0, z_l, \tau) - V(r_0, z_l, \tau)]) d\tau}{\tau_s} \right] \quad (18)$$

La puissance reçue par le sol pendant la période de chauffage est donnée par l'expression suivante [149] :

$$P = \frac{A.G.(T_{mf} - T_{ms})}{\Delta \tau} \quad (19)$$

T_{mf} = La température moyenne de fluide elle sera donnée par l'expression suivante :

$$T_{mf} = \frac{\int_0^{\tau_s} \int_0^{z_l} [U(r_0, z, \tau) + V(r_0, z, \tau)] dz \cdot d\tau}{z_l \cdot \tau_s} \quad (20)$$

T_{ms} = La température moyenne du domaine de stockage elle est donnée par l'expression suivante :

$$T_{ms} = \frac{\int_0^{\tau_s} \int_0^{z_l} \int_0^{r_0} [U(r, z, \tau) + V(r, z, \tau)] dr \cdot dz \cdot d\tau}{r_0 \cdot z_l \cdot \tau_s} \quad (21)$$

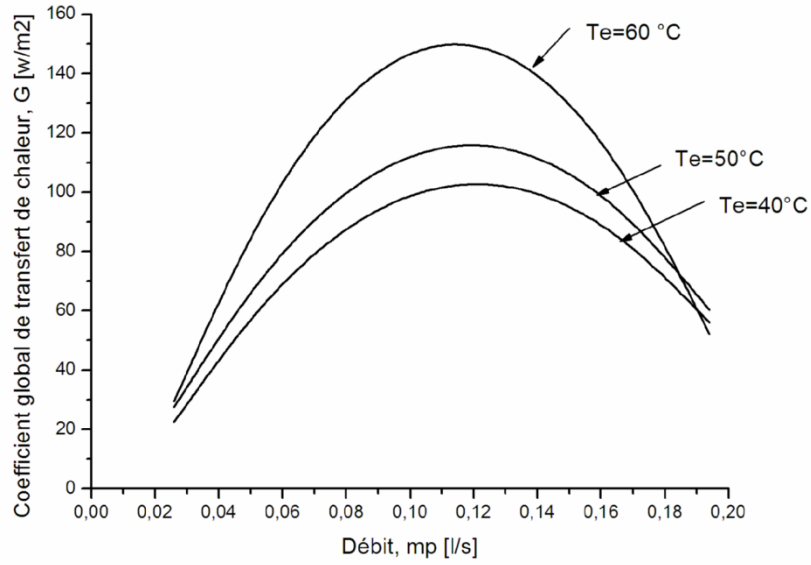
Le bilan énergétique donne :

$$\frac{A.G.(T_{mf} - T_{ms})}{\tau_s} = m_p \cdot c_p \cdot \left[\frac{\int_0^{\tau_s} (T_e - T(r_0, z_l, \tau)) d\tau}{\tau_s} \right] \quad (22)$$

Alors

$$G = \frac{\Delta \tau \cdot m_p \cdot C_p \cdot \left[\frac{\int_0^{\tau_s} (T_e - T(r_0, z_l, \tau)) d\tau}{\Delta \tau} \right]}{A \cdot (T_{mf} - T_{ms})} \quad (23)$$

Le coefficient global du transfert thermique sera donné par le graphe suivant :



Graph III -44: coefficient global de transfert de chaleur en fonction du débit de fluide caloporteur pour différentes T_e

VI.15 La puissance de stockage :

La puissance reçue par le sol est donnée par la formule suivante :

$$P = c_{ps} \cdot (T_{ms} - T_{\infty}) \cdot \frac{M}{\Delta t} \quad (24)$$

$$M = \rho_s \cdot \pi \cdot r_{ds}^2 \cdot z_l$$

M est la masse du domaine de stockage [kg]

T_{ms} = la température moyenne du volume de stockage elle est donnée par :

$$T_{ms} = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} \int_0^{z_l} \int_0^{\tau_s} [U(r, z, \tau) + V(r, z, \tau)] dr dz d\tau}{r_\infty \cdot z_l \cdot \tau_s}, \quad (25)$$

$$P = c_{ps} \left[\left(\frac{\int_{r_0}^{r_\infty} \int_0^{z_l} \int_0^{\tau_s} [U(r, z, \tau) + V(r, z, \tau)] dr dz d\tau}{r_\infty \cdot z_l \cdot \tau_s} \right) - T_\infty \right] \cdot \left[\frac{\rho_s \cdot \pi \cdot r_\infty^2}{\tau_s} \right] \quad (26)$$

Pour connaître la variation de la puissance stockée avec l'humidité H du sol, il faut introduire l'expression de la capacité calorifique basée sur la formule de De Vries [36] :

$$c_{ps} = c_{cte} + c_\theta \cdot H \quad (27)$$

$$\text{Avec } c_{cte} = 1.26 \times 10^3$$

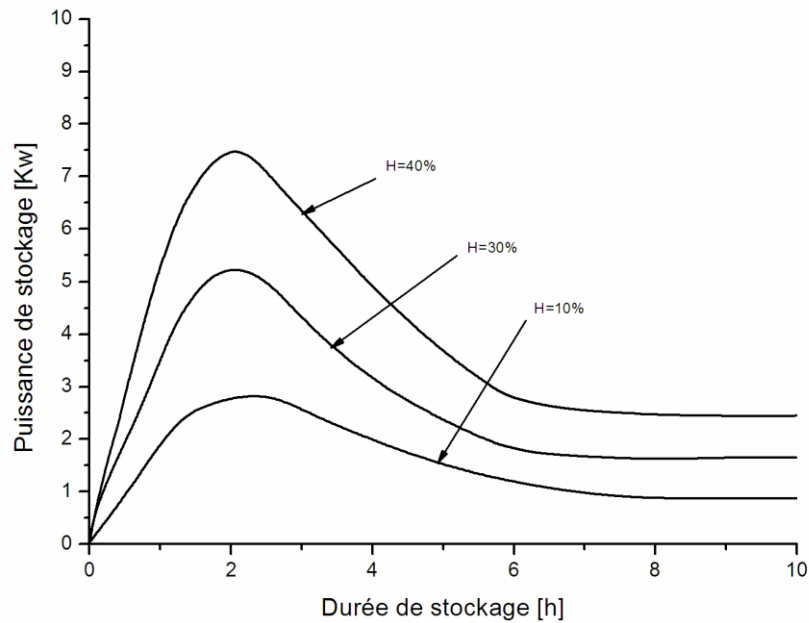
$$c_\theta = 4.2 \times 10^3$$

H est l'humidité du sol

$$P = (c_{cte} + c_\theta \cdot H) \left[\left(\frac{T_{ms}}{r_\infty \cdot z_l \cdot \tau_s} \right) - T_\infty \right] \cdot \left[\frac{\pi \cdot z_l \cdot r_\infty^2}{\Delta \tau} \right] \quad (28)$$

$$P = (1.26 + 4.2 \cdot H) \times 10^3 \cdot [T_{ms} - T_\infty] \cdot \left[\frac{\pi \cdot z_l \cdot r_\infty^2}{\tau_s} \right]$$

La puissance cédée sera exprimée pour différentes humidités 10%, 30% et 40 % par les courbes suivantes :



Grphe III -45: Puissance de stockage.

VI.16 La quantité de chaleur stockée :

La quantité de chaleur stockée Q dans le domaine de stockage pendant le jour sera donné par :

$$Q = \int_0^{\tau} P d\tau \quad (29)$$

La puissance de stockage

$$P = c_{ps} \cdot (T_{ms} - T_{\infty}) \cdot \frac{M}{\tau} \quad (30)$$

La quantité de chaleur stockée est :

$$Q = c_{ps} \int_0^{\tau_s} \left[(T_{ms} - T_{\infty}) \cdot \frac{\rho_s \pi r_{\infty}^2}{\tau} \right] d\tau \quad (31)$$

VI.17 La quantité de chaleur déstockée :

Pour la nuit le circuit inverse sera mis en marche pour la récupération de la chaleur stockée Q' qui sera exprimée par :

$$Q' = \int_{\tau_s}^{\tau_d} P' d\tau \quad (32)$$

La puissance de déstockage

$$P' = -c_{ps} \cdot [T_{ms} - T_{md}] \frac{M}{\tau} \quad (33)$$

La quantité de chaleur déstockée est

$$Q' = -c_{ps} \int_{\tau_s}^{\tau_d} \left[\frac{(T_{ms} - T_{md})M}{(\tau_d - \tau_s)} \right] d\tau \quad (34)$$

$$T_{md} = \left[\frac{\int_{r_0}^{\infty} \int_0^{Z_l} \int_{\tau_s}^{\tau_d} [U(r, z, \tau) + V(r, z, \tau)] dr \cdot dz \cdot d\tau}{r_{\infty} \cdot Z_l \cdot (\tau_d - \tau_s)} \right], \quad (35)$$

$$P' = -c_{ps} \cdot \left[T_{ms} - \frac{\int_{r_0}^{\infty} \int_0^{Z_l} \int_{\tau_s}^{\tau_d} [U(r, z, \tau) + V(r, z, \tau)] dr \cdot dz \cdot d\tau}{r_{\infty} \cdot Z_l \cdot (\tau_d - \tau_s)} \right] \cdot \frac{\pi \cdot Z_l \cdot r_{\infty}^2}{(\tau_d - \tau_s)} \quad (36)$$

VI.18 Le rendement d'un stockage thermique :

L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. À la fin d'un cycle, le système de stockage retrouve son état initial. Le rendement d'un cycle correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée

sur la quantité d'énergie que l'on a cherché initialement à stocker. En effet, chacune des deux opérations de stockage et de déstockage induit invariablement des pertes d'énergie ou de matière, une partie de l'énergie initiale n'est pas réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement récupérée. Le rendement d'un cycle de stockage d'énergie dépend énormément de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en œuvre pour assurer les opérations de stockage et de déstockage.

$$\eta = \frac{|Q'|}{Q} \quad (37)$$

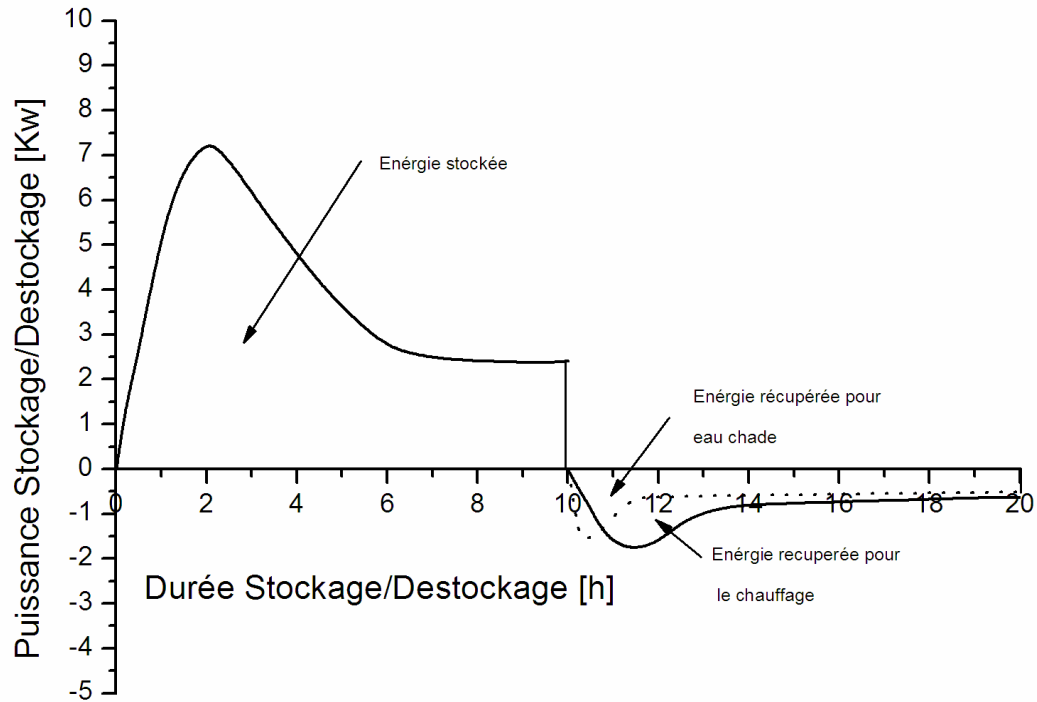
Les résultats sont représentés par le tableau suivant

Humidité du sol [%]	Q quantité de chaleur stockée [KJ]	Q' quantité de chaleur stockée [KJ]	Rendement du stockage [%]
10	24.95	6.97	28
30	38.41	9.32	24
40	61.09	11.28	19

Tableau VI -3: Le rendement d'un stockage thermique

VI.19 Comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée

Pour pouvoir faire une comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée pour une teneur en eau de 30 % et le débit du fluide caloporteur de 0.2l/s, on fait la comparaison entre son utilisation pour le chauffage et pour la fourniture de l'eau chaude. On pose comme condition initiale $T_e = 15^\circ\text{C}$ pour la fourniture de l'eau chaude et $T_e = T(r_0, z_0, \tau)$ avec $\tau_s < \tau < \tau_d$ (τ_d et la durée de déstockage) on obtient :



Graph III -46: Comparaison entre stockage et déstockage pour le chauffage et la fourniture de l'eau chaude

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Usage	T_e °C	Q quantité de chaleur stockée [KJ]	Q' quantité de chaleur stockée [KJ]	Rendement du stockage [%]	Durée effective
Chauffage	15	38.41	9.32	24	De 2 à 2h30mn
Eau chaude sanitaire	$T_e = T(r_0, z_0, \tau)$ $\tau_s < \tau < \tau_d$	38.41	3.97	10	30mn

Tableau VI -4: Comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée

VI.20 Commentaires :

On remarque que la quantité de chaleur stockée dans le sol augmente avec l'augmentation de son humidité mais la quantité de chaleur récupérée par le système de déstockage (système inverse) n'est pas très importante et donne un petit rendement de stockage cela est probablement dû aux pertes de chaleur vers le sol environnant. D'autre part on remarque que pour une durée de stockage de 10 heures on a seulement une durée de déstockage effective (chaleur récupérée et qui peut être utilisée) est de 2.5 heures environ (voir courbes de déstockage) et la chaleur récupérée pendant le reste de temps n'est pas très importantes et de ce fait perdue. Pour améliorer le rendement de stockage il faut prévoir :

- Un bon isolement du domaine de stockage
- Choisir un débit de fluide caloporteur qui favorise le transfert de chaleur (courbe)
- L'augmentation du nombre de tube transportant le fluide caloporteur est les disposer verticalement et horizontalement,
- L'utilisation de tous les tubes pour le stockage
- L'utilisation des tubes au centre pour le déstockage (les tubes extérieurs joueront le rôle d'un isolement thermique.
- La réduction du temps de déstockage.
- Pour rentabiliser toute installation de stockage thermique souterrain journalier, il est recommandé d'utiliser l'énergie récupérée pour le chauffage seulement.

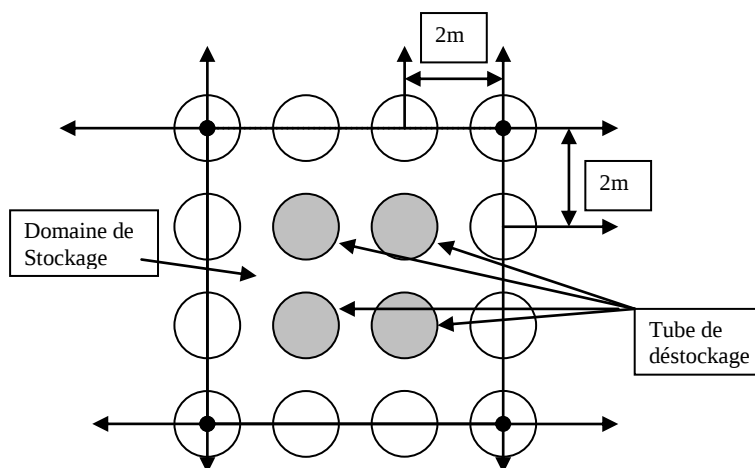


Figure VI- 7: Système stockage/ déstockage à plusieurs tubes

VI.21 Conclusion :

A la lumière des considérations théoriques faites pour l'utilisation de l'approche analytique concernant la résolution de l'équation de la chaleur nous avons pu utiliser les résultats obtenus pour déterminer le profil de température autour et le long de tube transportant le fluide caloporteur. Alors la connaissance de cette distribution exacte permet de calculer avec exactitude le coefficient global de transfert de chaleur, la puissance de stockage et de déstockage, la quantité de chaleur stockée et le rendement de stockage, et aussi de tirer des conclusions qui permettent l'amélioration des différentes installations de stockage, nous constatons pour le cas étudié qu'il faut travailler sur l'amélioration des systèmes de récupération de la chaleur pour augmenter le rendement de stockage et le temps d'utilisation de l'énergie récupérée et cela par l'isolation du domaine de stockage pour éviter les pertes thermiques et trouver d'autres configurations pour l'installation du système de déstockage.

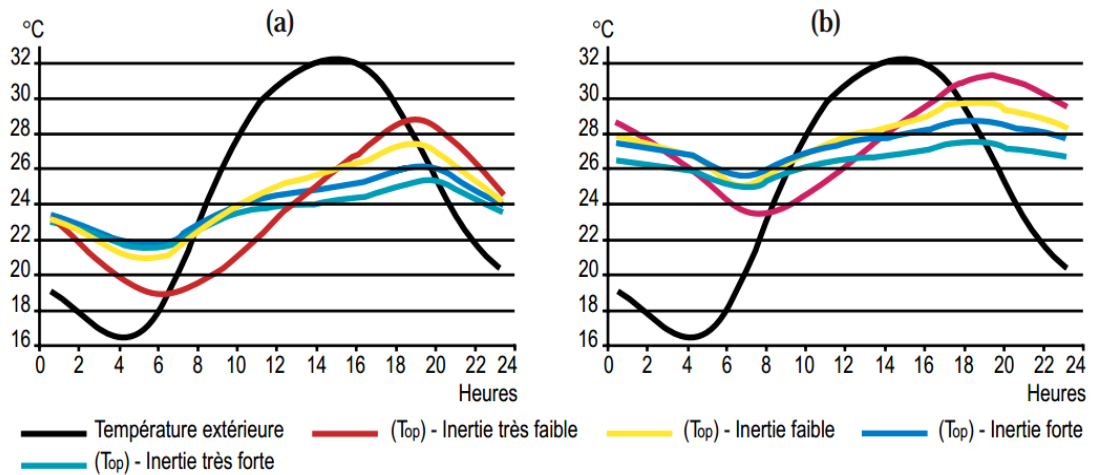
Chapitre V
Confort d'été et
rafraichissement passif

V.1 Introduction

La recherche du confort thermique en été constitue un élément de préoccupation croissant pour les concepteurs ainsi que pour les habitants des logements. Il est principalement la conséquence de l'irradiation solaire du bâtiment. Il est en général possible d'obtenir un confort satisfaisant dans les bâtiments résidentiels en été en jouant seulement sur la conception du bâtiment (inertie thermique, protections solaires, exposition des façades) et sur la gestion de la ventilation. Un habitat bien conçu par rapport à la problématique du confort thermique d'été doit donc être non seulement apte à minimiser la température maximale atteinte dans la journée, mais aussi à empêcher de trop fortes variations de température entre le jour et la nuit pour ne pas obtenir une température trop fraîche en fin de nuit. Dans ce contexte, l'inertie thermique permet de lisser les flux thermiques et donc les températures extrêmes. Associée aux autres facteurs et notamment à la ventilation nocturne de l'habitat, elle permet d'obtenir un bon confort thermique d'été dans la majeure partie des cas, en stockant la fraîcheur nocturne qui sera restituée pendant la journée [41].

Une trop forte chaleur à l'intérieur d'une habitation est un facteur d'inconfort important. Si cela est souvent vécu comme une fatalité, la demande d'un environnement climatique intérieur maîtrisé, tout au long de l'année, est pourtant de plus en plus forte chez les usagers. La recherche du confort thermique d'été et la nécessité d'éviter les surchauffes sont des préoccupations croissantes pour les maîtres d'œuvre. Comme la protection contre le soleil et l'aptitude à la ventilation nocturne, l'inertie thermique de la construction est un des paramètres qui influent sur le confort thermique d'été dans l'habitat.

À travers les deux scénarii de l'étude, la figure A montre l'impact de l'inertie d'un bâtiment considéré sur l'évolution journalière de la température opérative, comparée à la température extérieure. La température opérative (Top) correspond à la moyenne de la température de l'air et de la température moyenne des parois. La lecture des courbes met en évidence que plus l'inertie du bâtiment est importante, plus la (Top) maximale est faible, et plus la variation de température est également faible. Cela illustre que l'augmentation de l'inertie du bâtiment apporte un réel bénéfice à l'utilisateur.



Graphes V- 1: exemples d'évolution des températures pour un logement collectif (a) et pour une maison individuelle (b). [41].

V.2 Confort d'été

Dans les bâtiments modernes le confort d'été est un paramètre thermique dont il faut tenir compte si l'on ne veut pas obtenir de surchauffe. L'isolation thermique ne suffit pas. La climatisation n'est pas une obligation pour obtenir un confort d'été. En parallèle avec des bâtiment de mieux en mieux isolés et étanches; Une bonne inertie des matériaux doit permettre d'accumuler les frigories récupérables la nuit en l'absence d'ensoleillement. Les protections contre l'ensoleillement direct (stores et écrans solaires) sont un moyen efficace pour éviter que l'énergie solaire ne surchauffe les pièces en été.

V.3 Rafraîchissement passif et climatisation

La climatisation et le rafraîchissement fonctionnent sur le principe de la pompe à chaleur. Cette technologie utilise les capacités physiques des fluides frigorigènes qui, en changeant d'état (en passant de l'état gaz à l'état liquide ou l'inverse) absorbent ou libèrent de l'énergie thermique (de la chaleur). A l'échelle d'une habitation, il est possible de récupérer ou de rejeter la chaleur dans le milieu extérieur c'est-à-dire le sol, l'eau ou l'air. En récupérant les calories dans l'environnement, on chauffe l'habitation et en les rejetant on la refroidit. C'est cette technologie qui est utilisée pour faire fonctionner nos réfrigérateurs. Il existe de nombreuses possibilités de climatisation l'habitation. Mobiles ou fixes, réversibles ou pas.

V.4 Rafraîchissement passif

Réduire les besoins en chauffage des bâtiments est le principal objectif des réglementations thermiques qui reste la volonté des chercheurs en con. Il en est de même pour les bâtiments passifs dont le concept est confort et rafraîchissement et cela par la maîtrise de l'utilisation au maximum des apports solaires et les apports internes pour chauffer le bâtiment [122]. Afin de se mettre en accord avec ces préceptes, dans les conceptions architecturales les ingénieurs s'orientent donc notamment vers un choix d'isolation performante et d'ouvertures au Sud. Ces choix ont cependant pour conséquence un confort d'été souvent de faible qualité [123]. Afin d'assurer des températures tolérables en été, ces bâtiments peuvent avoir recours à des systèmes de climatisation qui viennent augmenter leurs besoins en énergie et dégrader le bilan global malgré les bonnes performances en hiver. On peut donc se demander comment concevoir des bâtiments avec de faibles besoins en chauffage qui permettent d'assurer un bon confort d'été sans nécessiter le recours à des systèmes de type climatisation, coûteux en énergie et néfastes pour l'environnement. Cette prise en compte du confort d'été, pour qu'il soit obtenu sans surcoût d'énergie, doit se faire très en amont dans la conception et en accord avec les principes d'hiver [124]. Comment instaurer des stratégies de rafraîchissement passif sans dégrader les principes de chauffage passif qui peuvent sembler incompatibles ? De même que les stratégies de chauffage passif, celles de rafraîchissement sont à adapter en fonction du climat, de l'orientation, du type de bâtiment

V.5 Les principes physiques rafraîchissement passif

Il est nécessaire de revenir aux principes physiques qui régissent les transferts de chaleur [125]. Il est en effet important de bien les connaître afin de savoir comment les éviter pour privilégier un rafraîchissement du bâtiment.

Un transfert thermique est en réalité un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique. Pour assurer un rafraîchissement thermique, un équilibre thermique entre les différents corps doit être assuré car le corps chaud cède de l'énergie au corps froid [126], il y a donc échange de chaleur et non de fraîcheur. Le rafraîchissement passif est basé sur la limitation de ses échanges thermiques entre l'air chaud extérieur qui peut réchauffer l'air intérieur plus frais pendant la journée. Il peut se produire des transferts thermiques vers un système dont la température reste constante, Différents types de transferts thermiques se distinguent.

V.5.1 Le transfert par conduction a lieu dans toute matière présentant une répartition de température non uniforme (gradient de température) ou au contact direct d'un corps plus chaud ou plus froid. Le flux de chaleur se transmet de proche en proche, par contact des molécules.

V.5.2 Le transfert par convection a lieu lorsqu'un fluide en mouvement côtoie un corps inerte à une température différente. Les échanges sont d'autant plus importants que l'écart de température entre les deux est grand. Le transfert d'énergie s'accompagne de mouvement de molécules dans un fluide (liquide ou gaz). Deux types de transfert par convection sont à distinguer [127].

a- **Convection naturelle (ou libre)** : l'échange de chaleur est responsable du mouvement. Le transfert thermique provoque le mouvement.

b- **Convection forcée** : un dispositif mécanique entraîne les molécules vers le dispositif chauffant. Le mouvement favorise le transfert thermique.

V.5.3 Le transfert par rayonnement a lieu par propagation d'un rayonnement infrarouge dans le vide ou dans tout matériau transparent à ce rayonnement. L'intensité du transfert dépend de la température du corps et de l'émissivité du matériau.

V.6 Les principes de rafraîchissement

Après avoir vu les différents principes physiques et actions qui régissent les transferts de chaleur et permettent d'assurer un rafraîchissement, nous pouvons définir quatre principes de rafraîchissement [128].

- Minimiser les apports de chaleur, à la fois internes et externes, en limitant le rayonnement et la conduction à travers les parois.
- Apporter de la masse thermique, afin d'amortir la chaleur extérieure pénétrant dans le bâtiment.
- Ventiler, avec de l'air frais, en favorisant les échanges par convection.
- Humidifier, afin d'apporter de la fraîcheur par évaporation ou évapotranspiration en présence de plantes.

Les transferts de fraîcheur n'existent pas au sens physique du terme [129].

Les différents principes physiques permettant un transfert de chaleur. Lorsque des corps sont à des températures différentes [130], l'équilibre se fait toujours en faveur du corps le plus

froid. C'est en effet le corps chaud qui transmet de l'énergie au corps froid pour atteindre un équilibre.

Il n'existe donc pas réellement de principes physiques de rafraîchissement. Il évite les transferts de chaleur puisque. Nous allons donc mettre en avant trois actions de base qui permettent d'éviter ces transferts de chaleur et les analyser d'un point de vue physique.

V.7 Climatisation et l'énergie

La climatisation dévore beaucoup d'énergie souvent produite à partir de sources d'énergie polluante. Selon une étude réalisée par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie pour la France), lors d'un été « normal », les climatiseurs accroissent la consommation d'énergie de quelques 2000 kWh pour une période de trois mois pour une petite surface (45 m²). Sur ces courtes périodes d'utilisation, ces appareils mettent en danger de mettre les systèmes de production d'électricité à rude épreuve. De fait, si la tendance actuelle se poursuit, l'Europe devra connaître pour l'été 2020 une pointe de puissance électrique en plus des autres utilisations de 35 GW vers 19 h contre 20 GW en milieu d'après midi. Or 35 GW représente grossièrement 35 tranches nucléaires (il y en a en tout et pour tout 135 en Europe). On retrouve déjà de telles proportions en région PACA où en période estivale, au plus chaud de la journée, 40% de l'énergie électrique consommée l'est par les systèmes de climatisation.

V.8 La climatisation passive.

Afin de réduire la sensation de chaleur, il est possible d'agir sur trois facteurs : la température de l'air et des murs, la circulation d'air et le degré d'humidité. Il existe des moyens passifs agissant sur ces facteurs :

- Température de l'air et des murs : le meilleur moyen de ne pas avoir chaud est de ne pas laisser la chaleur entrer. Ainsi il est impératif de fermer ses volets le jour, d'avoir une bonne isolation et d'utiliser des masques (arbres à feuilles caduques au sud, avancées horizontales au dessus des fenêtres...). Notez que les stores intérieurs n'empêchent pas les rayons du soleil de rentrer, ils n'ont donc pas d'effet positif.

- Circulation d'air : il est important, pour améliorer le confort thermique, d'assurer une circulation douce d'air en aménageant des ouvertures si la température extérieure est inférieure à la température intérieure. De plus il est possible d'utiliser des ventilateurs brasseurs d'air (3 ou 4 pales accrochées au plafond.)

- Hygrométrie : il est impossible d'agir passivement sur ce facteur.

V.8.1 Système de climatisation

Avant d'installer un système de climatisation il est nécessaire de connaître les conditions du confort à assurer dans un local comme la température et l'hygrométrie intérieures et extérieures [131].

Ces valeurs dépendent de la saison et de la situation géographique. Les données météorologiques déjà classifiées permettront de fixer les températures sèches et les hygrométries. Ces données vont permettre de calculer les charges maximales à évacuer.

Les températures et hygrométries intérieures dépendent du type de local et des saisons, par exemple pour les habitations individuelles, les bureaux ou grands magasins, la température et l'hygrométrie dépendront des saisons et pour les locaux industriels, elles dépendront l'usage ou la destination

V.8.2 Les charges de climatisation (bilan énergétique)

Le bilan énergétique du local pour évaluer les charges thermiques (apports et déperditions du local), qui permettra de déterminer la valeur de la puissance à mettre en jeu pour maintenir les conditions de confort en température et humidité.

Les charges de climatisation représentent la puissance que doit fournir le système de climatisation pour maintenir l'ambiance confortable. On définit deux types de charges :

a. Les charges sensibles

La variation de la température intérieure en l'absence de climatisation, entraînent l'existence des apports sensibles climatiques (air extérieur en été, rayonnement solaire sur les parois) et intérieurs (personnes, éclairage, machines) soit des pertes sensibles (air extérieur en hiver).

On distingue les charges instantanées qui agissent immédiatement sur la température intérieure (rayonnement solaire sur une vitre, renouvellement d'air extérieur) et les charges différées qui agissent avec un certain retard (charges climatiques au travers des parois plus ou moins inertes, charges internes).

b. Les charges latentes

En l'absence de climatisation, entraînent une modification de l'humidité intérieure. Ce sont soit des pertes (air extérieur d'hiver trop sec introduit à l'intérieur pour le renouvellement d'air), soit des apports (air extérieur humide dans les pays équatoriaux, les personnes ou les machines à l'intérieur).

V.9 Le conditionnement d'air [132]

Réaliser un microclimat intérieur confortable quelles que soient les conditions météorologiques extérieures et les apports de chaleur internes au local passe par le conditionner l'air qui consiste à préparer et introduire de façon continue dans le local considéré une certaine quantité d'air dont les caractéristiques sont telles que les conditions d'ambiance du local sont réalisées. Ces conditions portent sur :

- la température de l'air
- son humidité.
- son renouvellement
- sa pureté.

Ces conditions météorologiques et ces apports internes définissent les charges que doit équilibrer le système de climatisation. Suivant la période pour laquelle est conçu le système,.

Quand il y'a une forte variation des charges qui peuvent être dues à

- des conditions climatiques sévères (climats chauds et humides en particulier)
- des apports de chaleur interne importants et variables dans le temps (salles de spectacle par exemple) il faut prévoir un système de conditionnement d'air lors des conceptions architecturale (nombreuses baies vitrées au sud, utilisation de matériaux de construction très légers conduisant à une très faible inertie de la construction)

V.10 Minimiser les apports de chaleur

Il est nécessaire de limiter les apports de chaleur, aussi bien les apports de chaleur internes qu'externes. Dans les bâtiments performants, les apports de chaleur sont difficiles à évacuer ; il est donc encore plus important de les limiter.

Les apports internes proviennent en premier lieu des habitants Il est variable en fonction de l'activité de l'occupant. Les apports internes proviennent également des équipements électriques

Afin de limiter cet apport direct, on peut d'une part agir sur

- a. le type de vitrage qui aura une transmission des rayons lumineux plus ou moins importante.
- b. des protections solaires doivent être mises en place afin d'éviter tout simplement cet effet de serre, même si des apports diffus seront tout de même possibles.
- c. un travail d'isolation au niveau des parois, peut être réalisé pour limiter les apports par conduction à travers la paroi,

V.11 Evacuation de la chaleur et apport du froid

Les apports de chaleur dans le bâtiment sont inévitables, en premier lieu car un bâtiment a pour vocation d'être occupé et que les occupants dégagent de la chaleur. Des solutions pour évacuer la chaleur sont alors à mettre en place. Une stratégie de ventilation semble assez adéquate pour répondre à ce besoin puisqu'elle permettrait d'évacuer l'air chaud. Il est alors nécessaire de ne pas apporter de l'air chaud pour le remplacer, mais plutôt d'apporter du frais. Il faut alors apporter de l'air plus frais et favoriser les échanges par convection [134]. L'air plus frais va se réchauffer au contact de l'air intérieur plus chaud. Le mouvement ainsi induit permettra l'évacuation de cet air tiède jusqu'à obtenir une température satisfaisante. L'apport de fraîcheur est également un des principes de base du rafraîchissement passif. Cela permet de refroidir directement la pièce. Au sens physique du terme, il ne s'agit pas d'un apport de fraîcheur mais d'une prise de chaleur. Comme lors des changements d'état, de l'énergie est nécessaire et elle est donc prise sous forme de chaleur dans l'air ambiant. Par ailleurs, nous verrons que l'air peut être rafraîchi en lien avec l'humidité de la pièce.

V.12 Réalisations antérieures

Plusieurs plan architecturaux doté d'un système de rafraîchissement solaire ont été réalisé a travers le monde on peut citer par exemple

a. Le bâtiment de l'OMM - Organisation Météorologique Mondiale,

Bâtiment emblématique du Siège de l'Organisation Météorologique Mondiale se situant sur l'avenue de la Paix à Genève. L'immeuble administratif de huit étages à haut rendement énergétique par rafraîchissement naturel, le Concept énergétique pour ce bâtiment est basé sur l'élimination de la climatisation artificielle trop gourmande en énergie, mais un système de ventilation naturelle astucieux et révolutionnaire à multiples facettes. Cet ensemble intègre, en plus, les fonctions de chauffage, refroidissement et humidification. La ventilation est presque entièrement intégrée dans la structure porteuse du bâtiment.

b. Le bâtiment Building Research Establishment Architectes:

Feilden Clegg Architects Ingénieurs techniques spéciales: Max Fordham and Partners Situé à Watford au nord de Londres, construit en 1997, dont le Concept énergétique est basé sur La ventilation est entièrement naturelle et fonctionne grâce aux cheminées de ventilation en façade sud. L'air chaud qui entre dans les cheminées, réchauffé par les apports internes, monte naturellement pour être évacué au-dessus de la cheminée. Le mouvement de l'air à

travers l'extrémité de la cheminée favorise également le tirage. Les parois extérieures des cheminées orientées au sud sont constituées de blocs de verre afin d'augmenter encore la température de l'air dans les cheminées par les apports solaires et d'améliorer ainsi le tirage.

c. Le bâtiment de l'Office fédéral de la statistique Architectes:

Bauart (Architectes SA Ingénieurs énergies), et Sorane SA (Développement durable et budget restreint). Implanté à Neuchâtel, le premier bâtiment de l'Office fédéral de la statistique (OFS), Le programme de cette construction entièrement vouée à des activités de type administratif, se définit autour du thème du développement durable, le concept énergétique établi dans le cadre de ce projet consiste à réduire la demande de chaleur à un niveau nettement inférieur à celui de réalisations courantes par la valorisation systématique des rejets de chaleur (transfert d'air dans le bâtiment en utilisant les espaces de circulation comme vecteurs), et le recours à une installation solaire avec stockage saisonnier de chaleur couvrant une partie des besoins de chaleur restants.

d. Le bâtiment de l'école «Tanga» Architectes:

Christer Nordström Architects en coopération avec Efem Architects Ingénieurs énergies: Ake Blomsterberg, WSP - SP The Swedish Testing Institute L'école, située dans une zone suburbaine est équipé d'un système de ventilation hybride : une ventilation naturelle avec cheminée solaire, mais assistance d'un ventilateur lorsque nécessaire.

V.13 Généralités Dans Le Domaine De La Dessiccation.

V -13-1 la technologie à dessiccation en cycle ouvert

V -13-1-1 Le desiccant cooling

Le dessiccant cooling est un cycle ouvert, qui s'appuie principalement sur l'utilisation de l'eau et de son potentiel de changement de phase pour refroidir l'air soufflé dans un local.

Pour maximiser l'effet de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, le flux d'air ventilé est tout d'abord desséché dans une roue à dessiccation (roue composée d'une matrice circulaire de fibre de verre ou d'aluminium sur laquelle est déposé le matériau dessiccant), puis refroidi dans un échangeur, et enfin humidifié adiabatiquement dans un laveur d'air (Figure V- 1).

Le fonctionnement d'un tel système nécessite un flux d'air de régénération qui permet de refroidir l'air du process dans l'échangeur, puis de régénérer le matériau dessiccant après avoir été réchauffé à partir de 50°C à l'aide d'un collecteur solaire [150].

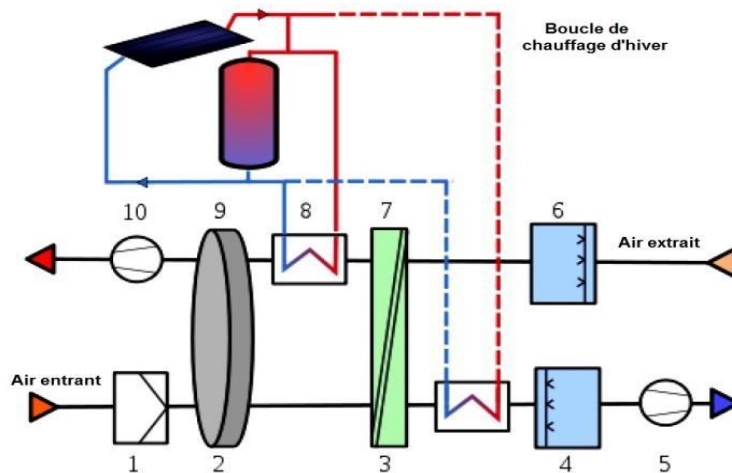


Figure V- 1 : Schéma du système à dessiccation [150]

D'après la figure V- 1, l'air subit le processus suivant:

Air entrant

- 1 - Filtration de l'air.
- 2 - Déshumidification: l'air passe dans une roue dessiccante qui lui retire une grande partie de son humidité et augmente par là même sa température.
- 3 - Passage dans un échangeur de chaleur 3/7: l'air entrant et sec revient à température de l'air extrait, lui-même refroidit au maximum (étape 6 de l'air sortant).
- 4 - Réhumidification: au contact avec l'air sec, l'eau pulvérisée s'évapore en prenant à l'air la chaleur latente de vaporisation nécessaire, ce qui se traduit par une diminution de sa température et permet de rétablir un taux d'humidité acceptable.
- 5 - Ventilation.

Air sortant

- 6 - Rafraîchissement par humidification: l'air extrait est saturé en humidité afin d'abaisser au maximum sa température, et donc abaisser au maximum la température de l'air entrant à l'étape suivante.
- 7 et 8 – l'air extrait est chauffé afin de lui permettre d'absorber encore plus d'humidité;

d'abord par récupération de la chaleur de l'air entrant, puis par chauffage dans le radiateur 8 au travers d'une boucle solaire.

9 - Régénération de la roue dessiccante: l'air extrait, chauffé de 45 à 90 °C permet de vaporiser les molécules d'eau retenues dans les pores de la roue à sorption. De cette manière, la roue dessiccante peut de nouveau absorber l'humidité de l'air entrant.

V -13-1-2 système dessiccation utilisant des capteurs à air

Pour les configurations avec DEC et capteurs à air, l'installation est beaucoup plus simple que dans les cas précédents. A noter que cette configuration mettant en œuvre des capteurs à air avec la technologie DEC est peu répandue par manque d'expérience sur l'utilisation des 2 technologies en même temps. Cependant, dans certaines conditions (proximité entre champ de captation et système DEC), cette solution est très pertinente et prometteuse.

L'air de régénération de la roue à dessiccation est directement chauffé par l'air des capteurs solaires en mode été, suivant un trajet 11-9-10 (suivant Figure V-2). L'air neuf de soufflage suit le trajet 1-2-3-4-5 alors que l'air extrait suit le trajet 6-7-8. En mode hiver, l'air neuf est réchauffé par les capteurs solaires avant d'entrer, suivant le trajet 11-2-3-4-5. [152]

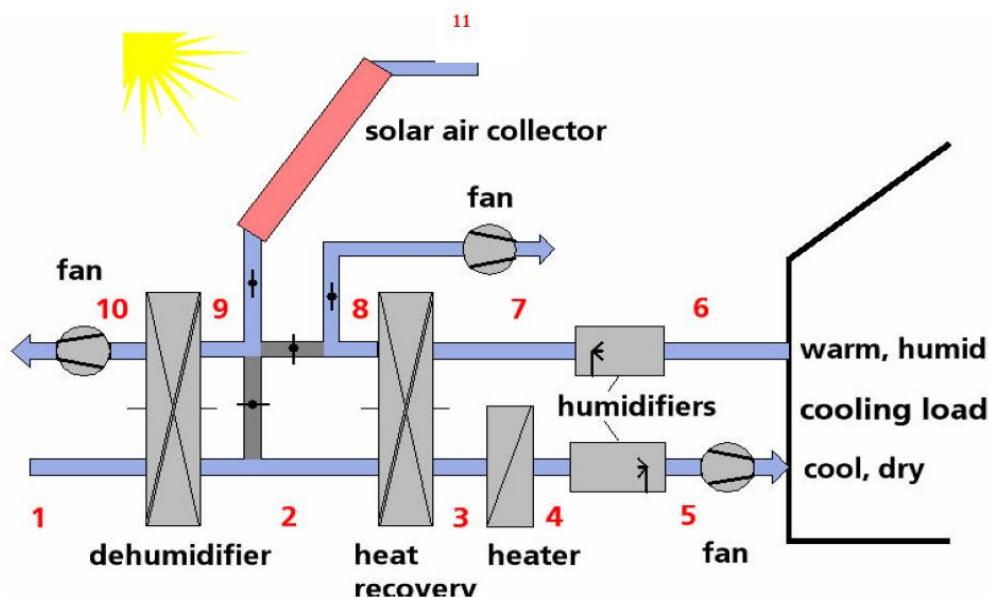


Figure V-2: Schéma de principe d'une installation de production de froid par DEC et capteurs à air [152].

V.13.2 Déshumidification de l'air par dessiccation

Dans les applications de conditionnement d'air, il existe deux moyens principaux de déshumidifier l'air :

- Par condensation de la vapeur d'eau sur une batterie froide
- Par contact avec un matériau dessiccant.

V.13.3 Types de matériaux dessiccants [151]:

V.13.2.1 Les adsorbants

a. Les charbons actifs

Les charbons actifs sont de loin les adsorbants les plus fabriqués et utilisés industriellement. Ils peuvent être obtenus à partir d'un grand nombre de matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétroliers, etc.), par des processus de carbonisation suivis de processus d'activation dûment contrôlés. Ils sont fréquemment utilisés pour la récupération des vapeurs de solvant et d'hydrocarbures, la décoloration de sucres, etc. [151].

b. Les gels de silica

Les gels de silice ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) peuvent être obtenus par précipitation de silice en faisant réagir une solution de silicate de sodium avec un acide minéral (sulfurique ou chlorhydrique). Le gel obtenu est ensuite lavé, séché et activé. La structure des pores est créée par l'agglomération des particules sensiblement sphériques de dimension à peu près uniforme comprise entre 2 et 20 nanomètre. Ces gels adsorbent de préférence les molécules polaires comme l'eau et l'alcool. [151].

c. Les alumines activées

Elles sont obtenues par déshydratation thermique du tri hydrate d'alumine. Comme les Gels de silice, les alumines activées sont très hydrophiles et sont couramment utilisés pour le séchage. [151].

V.14 Partie expérimentale

V.14.1 Collection des données

Les données ont été collectées en continu par la station météorologique principale dans la première semaine du mois de juillet 2014.

V.14.2 Description du dispositif expérimental

Le prototype est schématisé par les figures V- (2, 3, 4, 5, 6,7,8,9). Il comprend :

- Un boîtier réalisé en bois, de dimensions 1,95 x 0,52 m (1m²) ouvert sur le côté exposé au rayonnement solaire, sur les côtés latéraux, on a réalisé des ouvertures pour l'entrée et la sortie de l'air.
- Une plaque absorbante qui transmet la chaleur de l'air.
- Un vitrage double qui couvre le boîtier et assure le phénomène 'd'effet de serre'.
- Un canal d'humidificateur réalisé en bois et toile à sacs.
- quatre tuyères pour l'admission de l'air.
- Boit de dessiccation.
- .Le boit est dotée de trois ventilateurs qui brassent de l'air à l'intérieur du capteur dans le cas de la convection forcée.
- Un étage vertical de gel silica (tiroir de Silica)
- Un compte-gouttes d'eau.



Figure V- 3: climatiseur par dessiccation



Figure V-4: capture solaire d'air



Figure V- 5: boîte de dessiccation



Figure V- 6: humidificateur



Figure V -7: Quatre tuyères pour l'admission de l'air.



Figure V-8: Ventilateurs

V.14.3 Fonctionnements du dispositif expérimental

La climatisation par dessiccation est une méthode de rafraîchissement d'air basée sur l'évaporation de l'eau. On parle aussi bio climatisation, de rafraîchissement d'air par évaporation ou de climatisation naturelle. Le principe est simple, l'air chaud et sec qui passe à travers un échangeur humide se refroidit naturellement.

L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est extraite de l'air qui en conséquence se refroidit. Ce système gagne en efficacité avec l'augmentation de la température extérieure. Au-delà de 30°C, l'air peut se refroidir de plus 10°C ce qui se traduit par un rendement de rafraîchissement très efficace.

Dans un rafraîchissement d'air par évaporation, un simple système (Un compte-gouttes) fait circuler de l'eau sur filtres absorbants (humidificateur). Le ventilateur aspire l'air chaud extérieur et le fait passer à travers les filtres humides. L'air est alors refroidi par évaporation.

Pour que ce système fonctionne correctement, les bâtiments doivent être bien ventilés afin de pouvoir rapidement évacuer l'humidité engendrée par le système. Les appareils sont le plus souvent installés à l'extérieur. Un système de gaine permet d'amener l'air dans la zone à rafraîchir avant d'être évacuée par les ouvertures naturelles ou par des systèmes d'extraction. Ce type de rafraîchissement convient particulièrement aux grands volumes ainsi qu'à tout bâtiment où les apports thermiques sont importants.

Le rafraîchissement par évaporation est un processus adiabatique à enthalpie constante. Il consiste à diminuer la chaleur que nous percevons (chaleur perceptible) et augmenter la chaleur que nous ne percevons pas et que nous évacuons par ventilation (chaleur latente). Un processus qui ne demande pas de variation de chaleur.

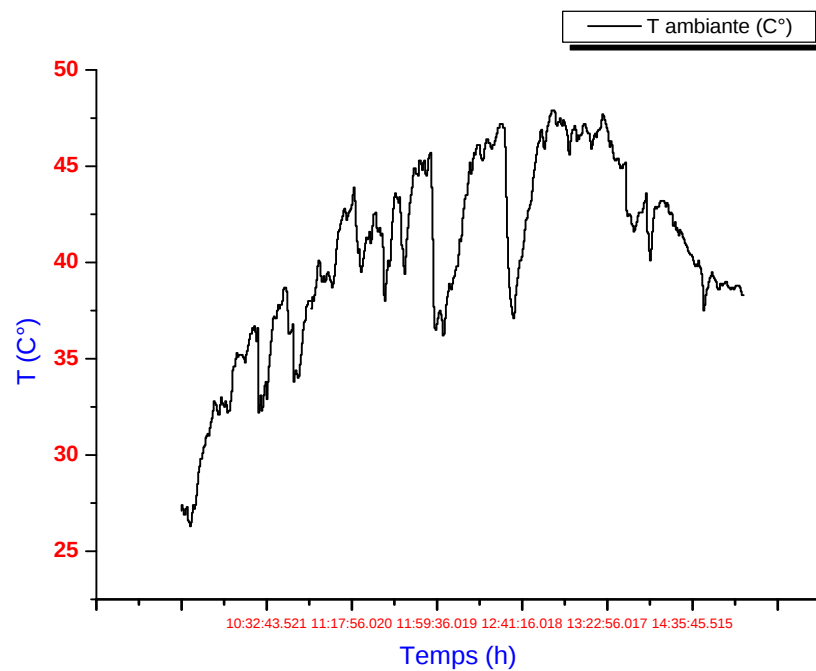
Ce système présente de nombreux avantages grâce au renouvellement constant de l'air qui améliore le bien-être des occupants et permet l'évacuation efficace des odeurs et des fumées. L'air entrant est filtré, il est donc propre et sain. Le rafraîchissement d'air par évaporation n'assèche par l'air, ce qui procure une meilleure sensation de confort en plus de pouvoir être utilisé en système «free-cooling» en mi- saison. Ce système n'utilise aucun réfrigérant, il n'a besoin que d'eau potable pour fonctionner et présente des coûts d'investissements et d'exploitations très bas. Par contre, il est impératif d'avoir une bonne maîtrise de la ventilation des locaux. En effet, l'humidité apportée dans les locaux habités peut provoquer une gêne si elle met du temps à s'évacuer. En complément, ce système fonctionne moins bien lorsque le climat extérieur est chaud et humide. L'air étant déjà chargé en hygrométrie sa capacité à évaporer l'eau et donc à abaisser la température de l'air s'en trouve réduite. La

température de soufflage est liée à celle de l'extérieure. On ne peut maintenir une pièce à 15°C toute l'année.

V.15.4 Résultats et discussions

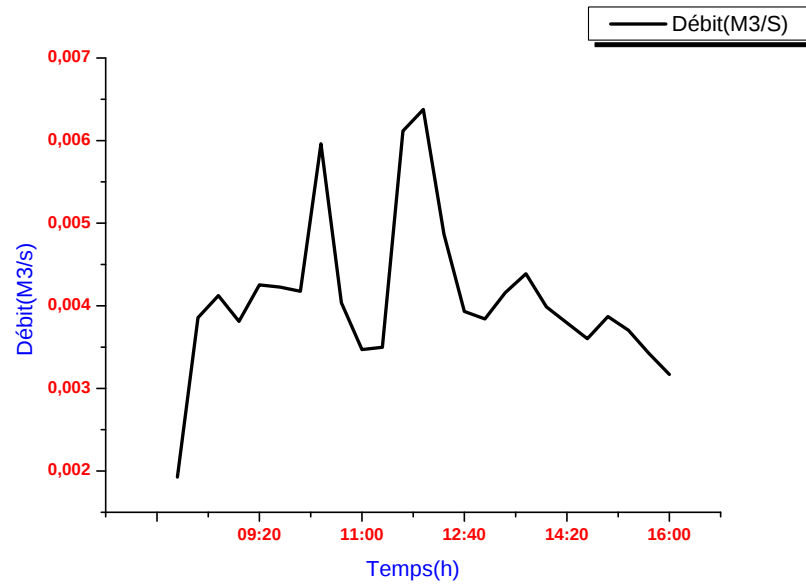
a. Diffusion par Convection naturelle

La convection naturelle est un phénomène de la mécanique des fluides, qui se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide. Le gradient peut être de différentes natures, telle que la température ou la concentration d'un soluté. La masse volumique est en général fonction de la température et un gradient de température implique une différence de masse volumique au sein du fluide. Cette différence de masse volumique implique une différence de la Poussée d'Archimède et donc crée un mouvement. De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Ils sont à l'origine de certains phénomènes océanographiques (courants marins).



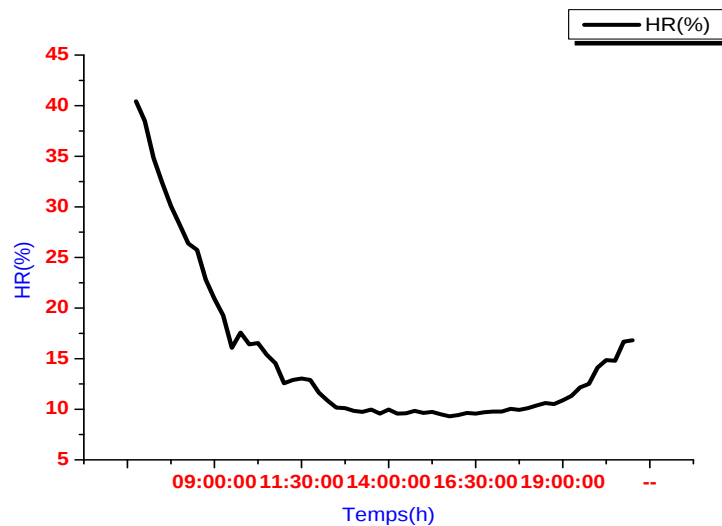
Graph V -2: Température ambiante dans le temps pour la journée (01-07-2014)

L'évolution de la température ambiante pour la journée considérée présente une irrégularité dans sa progression journalière due aux passages nuageux qui ont interrompu le déroulement des expériences (Graphe 42).

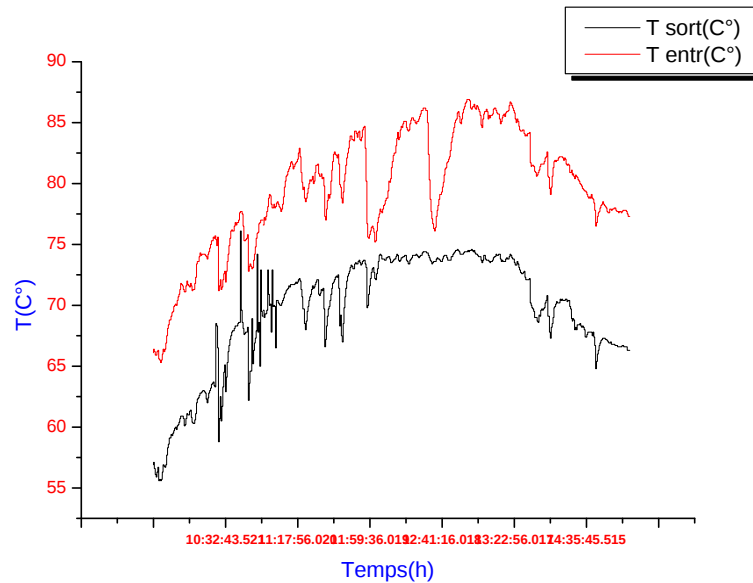


Graph V-3: Flux naturel d'air en $[m^3/s]$ pour la journée (01-07-2014)

On remarque que le flux d'air est affecté par l'intensité du rayonnement à différentes heures de la journée. Son maximum est à midi, avec un certain recul en raison des nuages.



Graph V-4: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (01/07/2014).

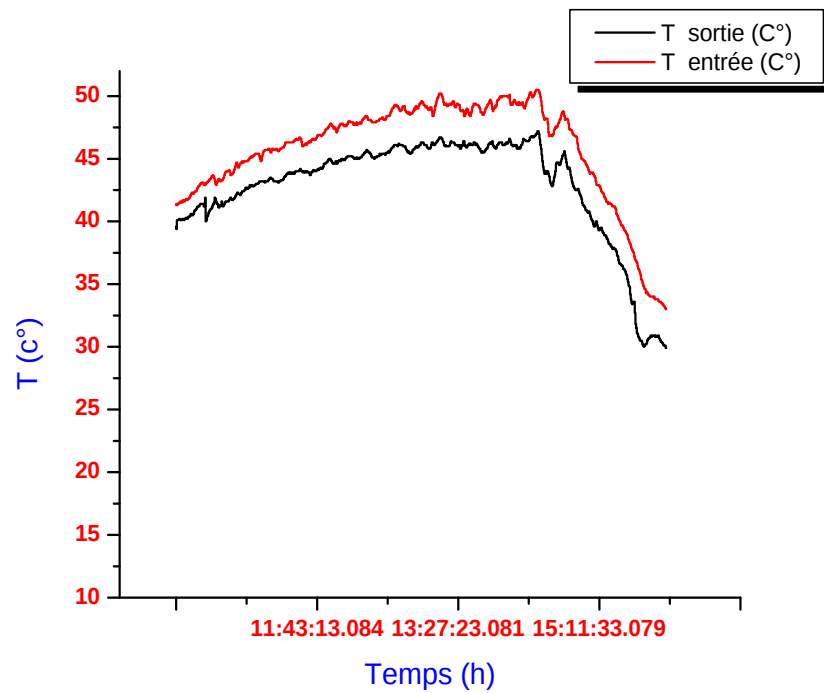


Graph V-5: Variation de la température avant et après humidification pour la journée (01-07-2014).

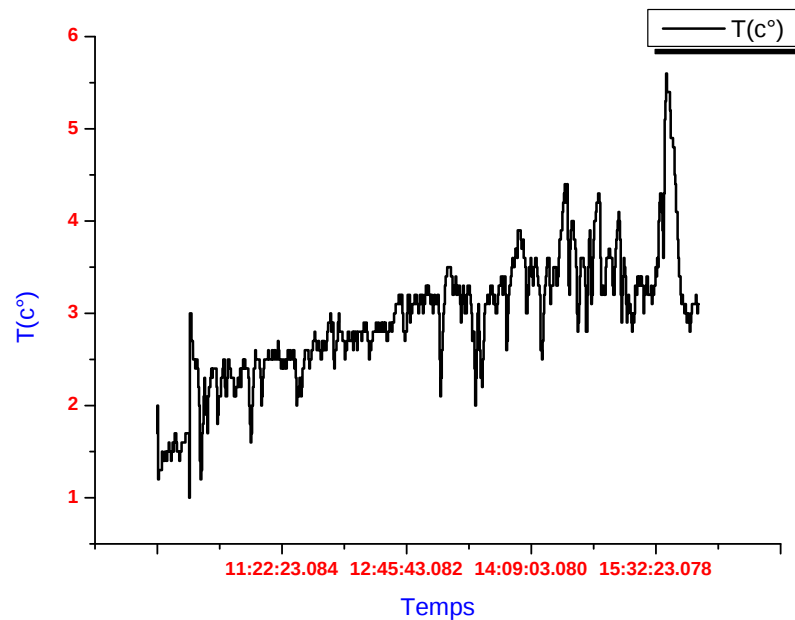
On remarque que les valeurs des températures de sortie et d'entrée sont assez élevées après humidification en raison de l'échauffement de l'air par le rayonnement solaire malgré que la température de l'air a légèrement diminué après l'humidification, mais elle reste tout de même élevée pour la climatisation.

c. Diffusion par Convection Forcée

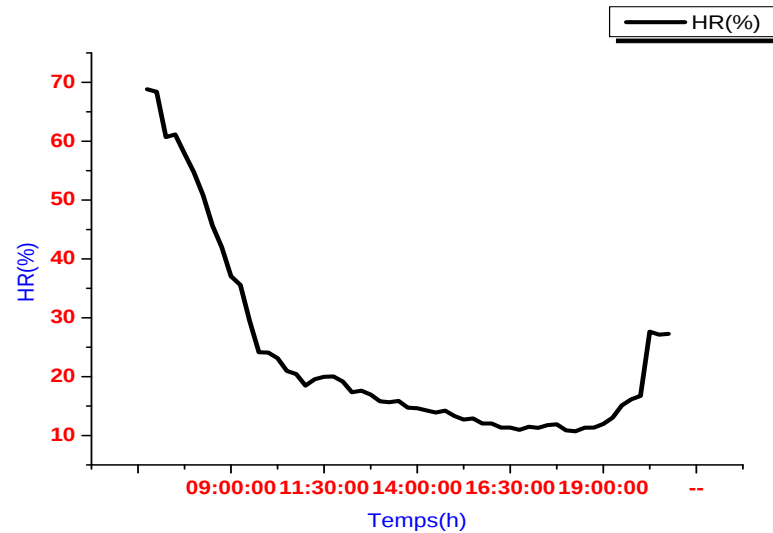
La convection forcée est provoquée par une circulation artificielle, (ventilateur,...) d'un fluide. Le transfert est plus rapide que dans le cas de la convection naturelle. Voici quelques exemples de convection forcée dans des appareillages : chauffage central avec accélérateur, chauffages électriques avec soufflerie, le corps humain a son propre système de convection forcée dans la circulation sanguine



Graph V-6: Variation des températures avant et après humidification pour la journée (02-07-2014)



Graph V-7: la variation de l'écart de température pour la journée (02-07-2014).



Graph V-8: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (02/07/2014).

L'écart entre les deux températures de sortie et d'entrée reste modeste Malgré que la circulation de l'air dans le circuit devienne plus importante à cause de l'introduction de la ventilation artificielle.

- d. **Diffusion par Convection Forcée avec un circuit d'humidification plus important et un taux de dessiccation plus élevé**

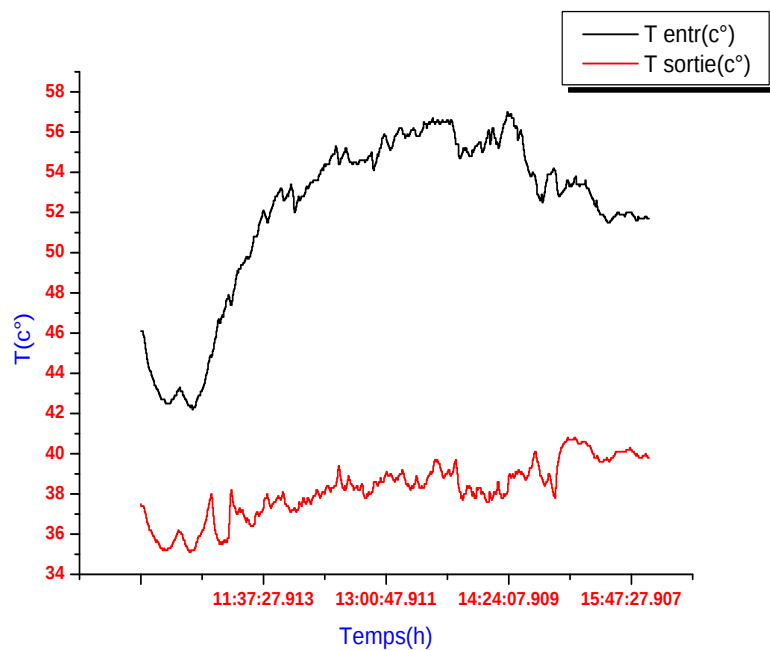


Figure V- 9: humidificateur. Longueur 1m.

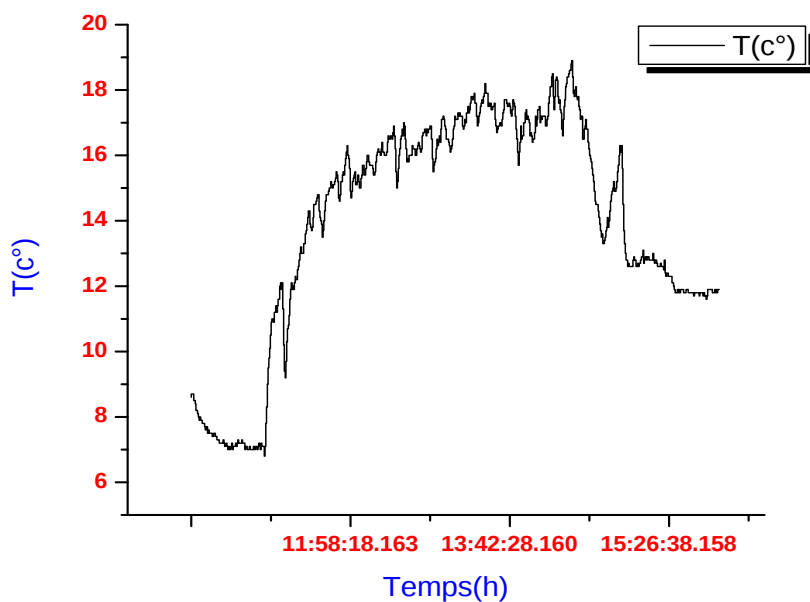


Figure V- 10: boîte de dessiccation avec deux tiroirs de gel- silica.

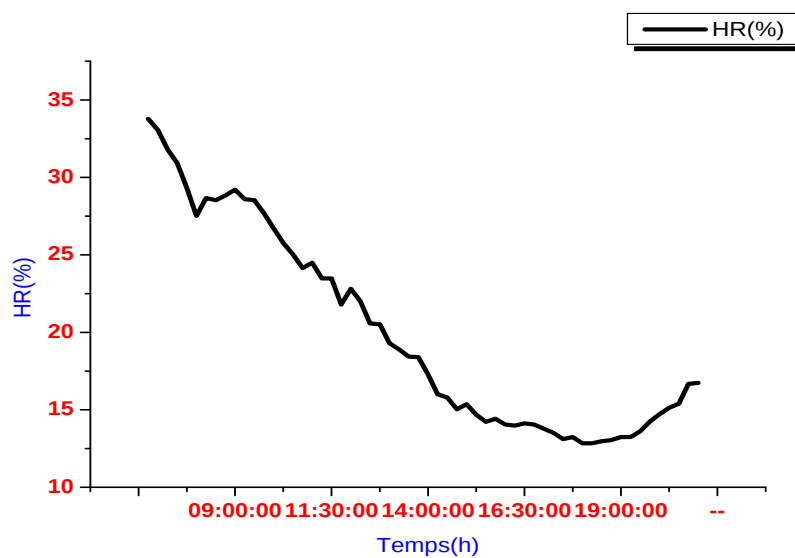
Les résultats sont représentés sous forme de graphes :



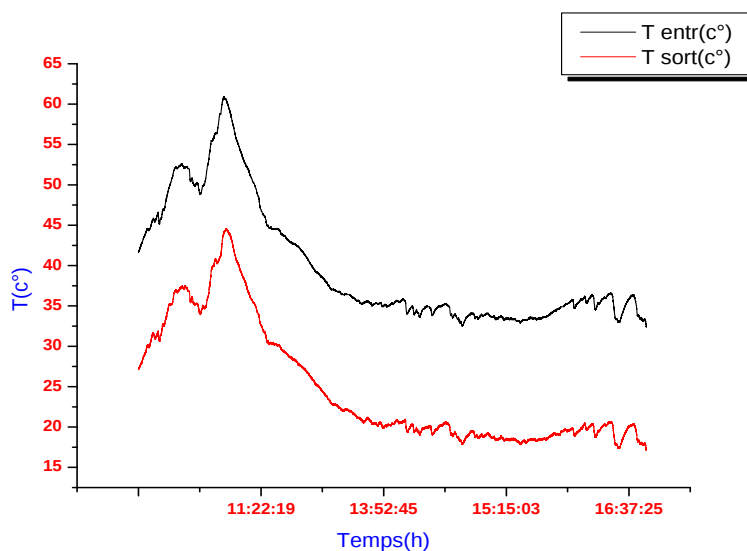
Graphe V-9: la variation de la température ambiante et la température de sortie pour la journée du (03-07-2014).



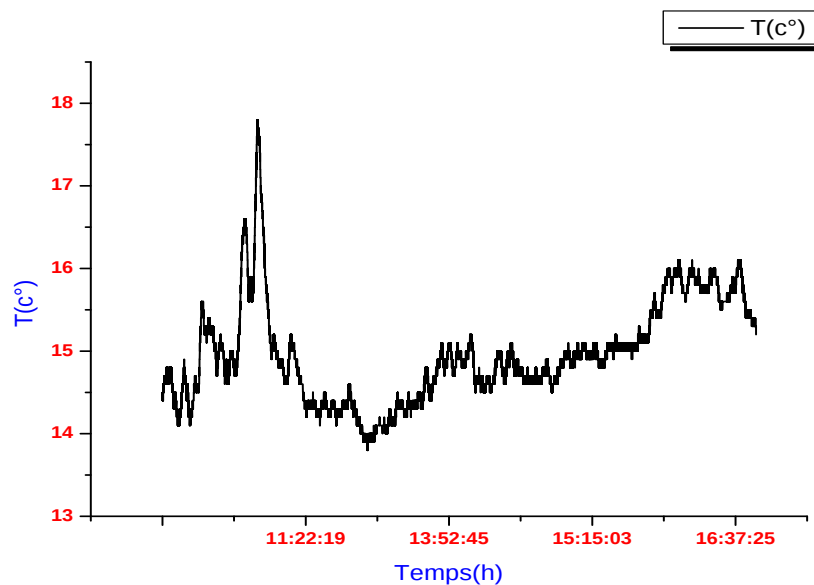
Graphe V-10: la variation de l'écart de température pour la journée (03-07-2014).



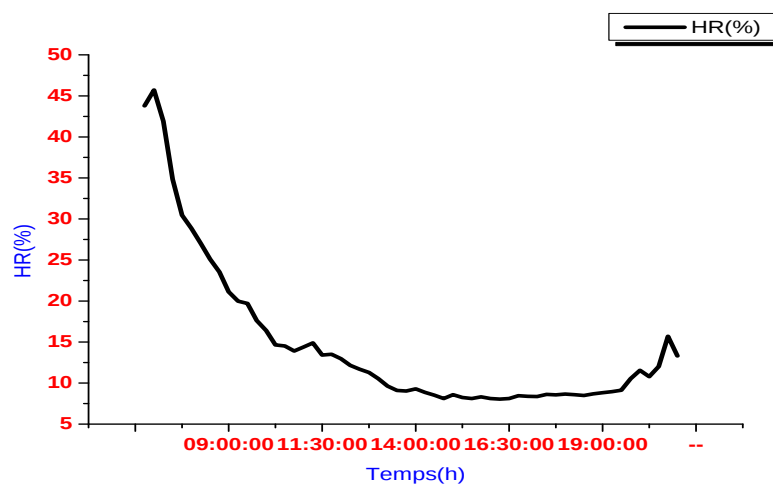
Graphe V-11: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (03/07/2013).



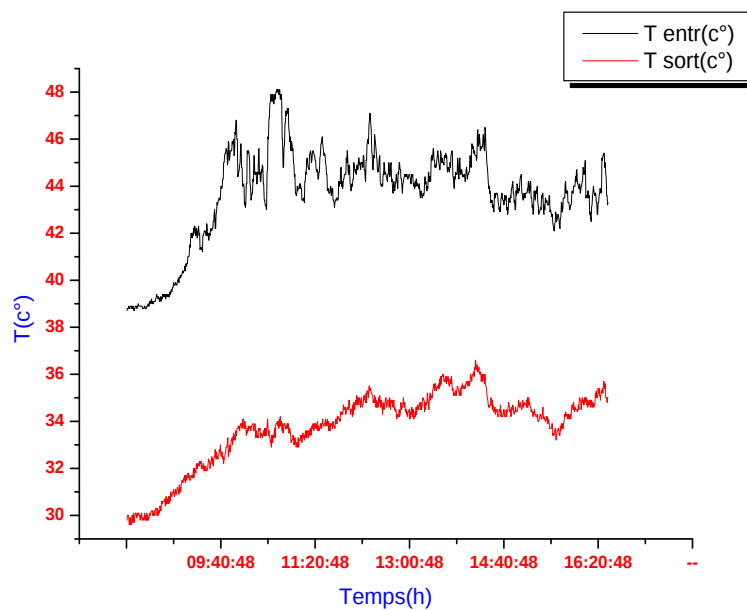
Graphe V-12: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (04-07-2013).



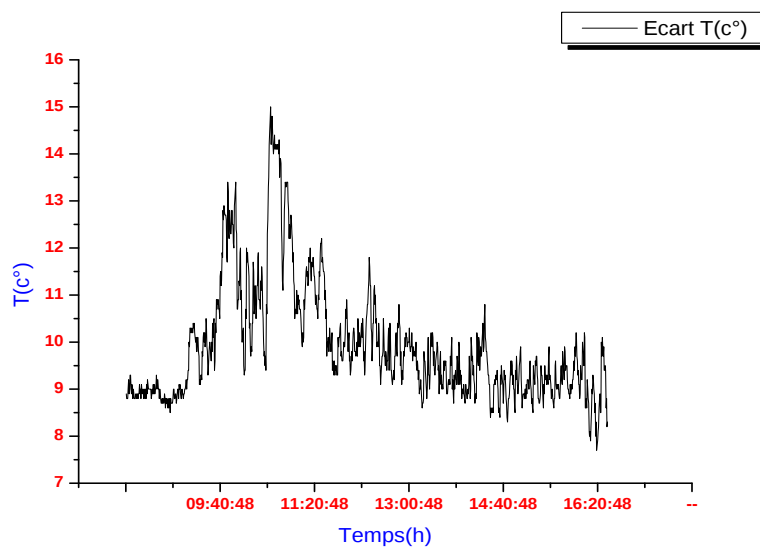
Grphe V-13: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (04/07/2014).



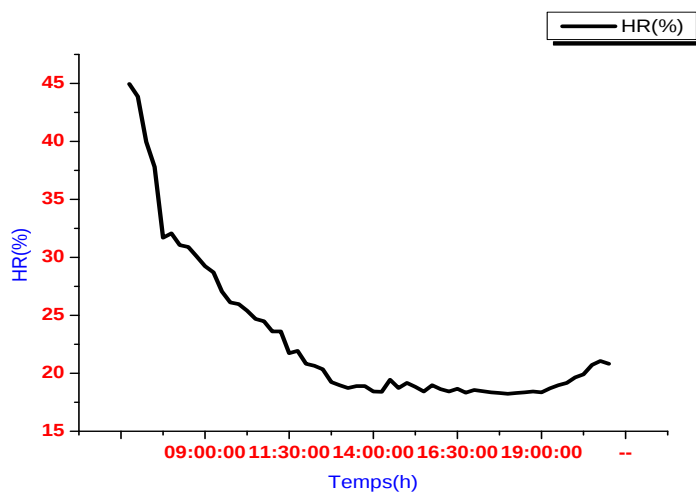
Grphe V-14: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (04/07/2014).



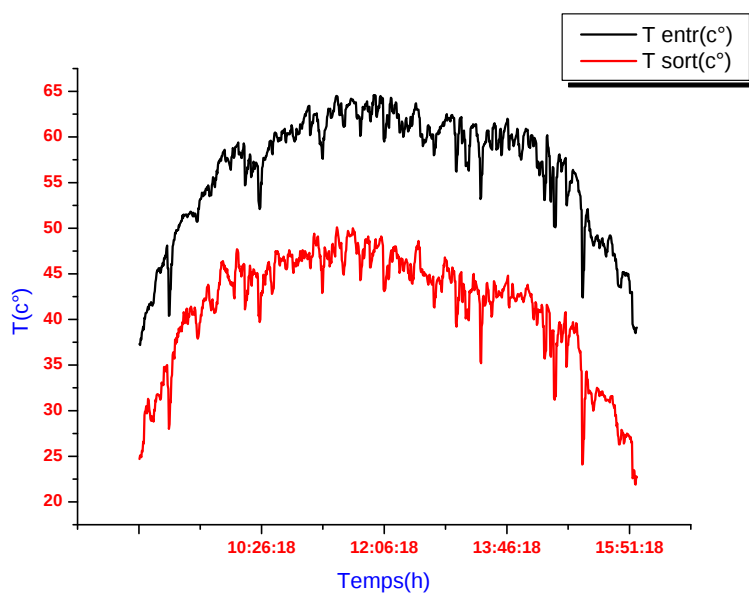
Graphe V-15: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (05-07-2014).



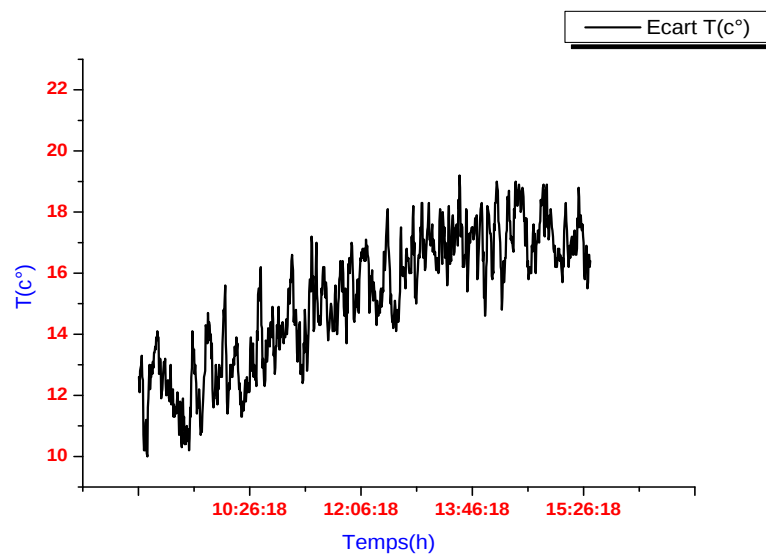
Graphe V-16: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (05/07/2014).



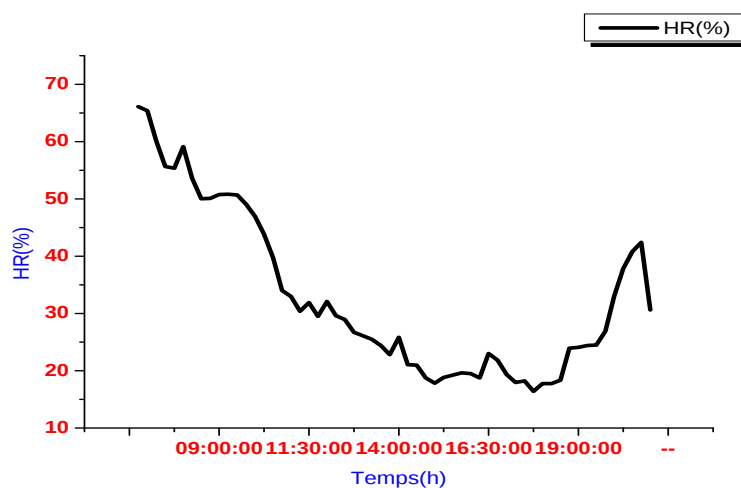
Graphe V-17: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(05/07/2014).



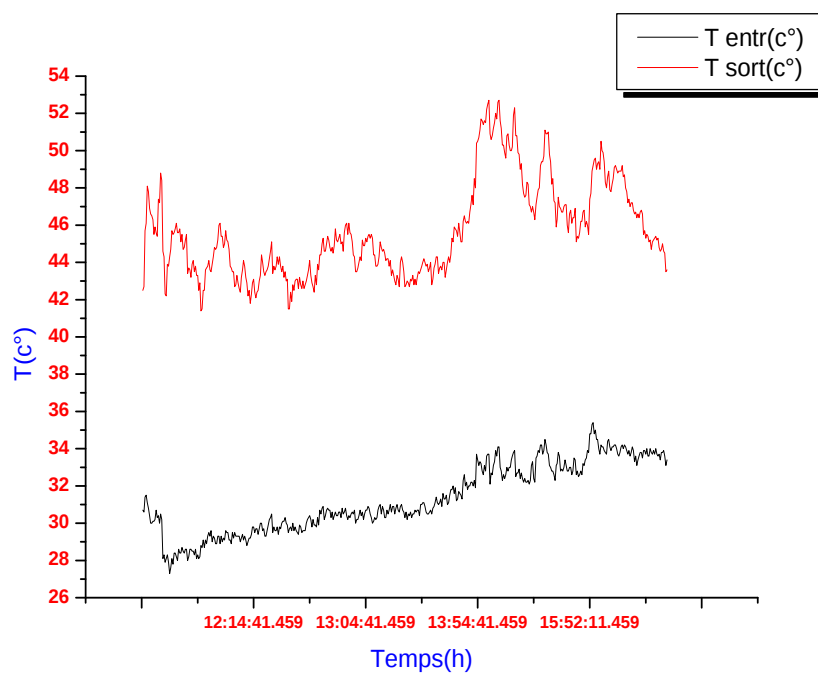
Graphe V-18: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (06-07-2014).



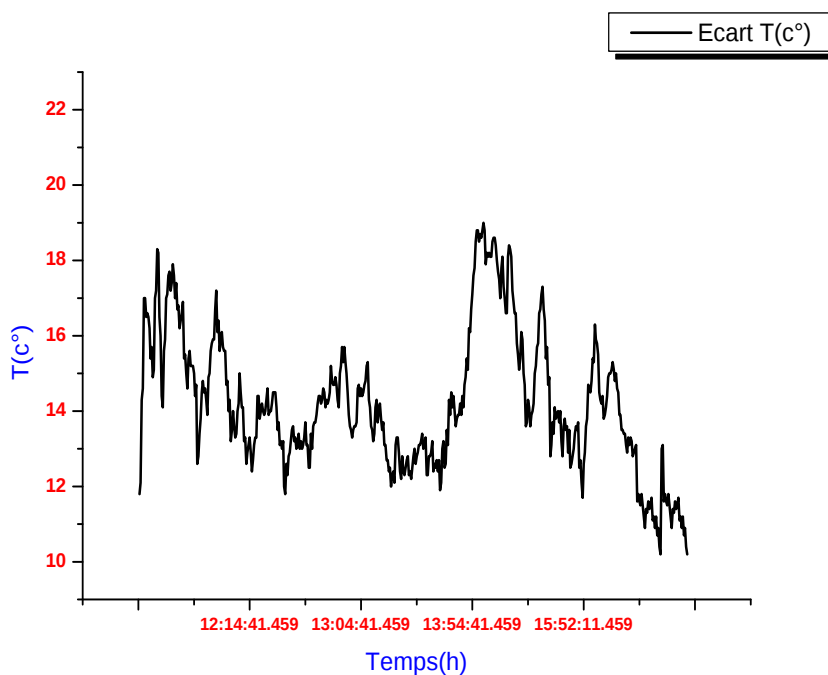
Graphe V-19: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (06/07/2014).



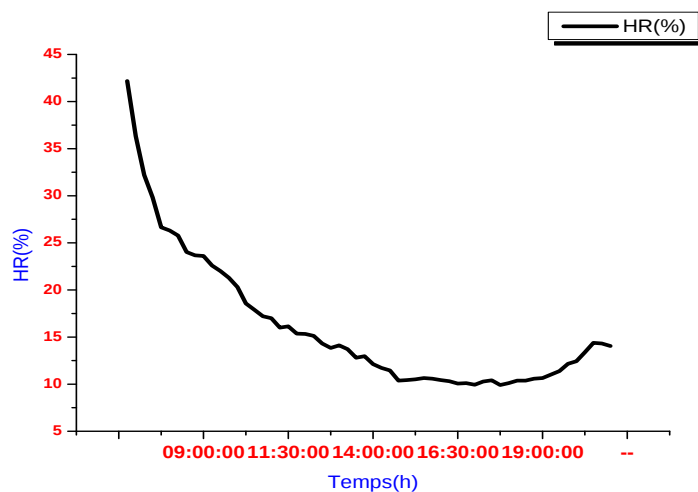
Graphe V-20: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (06-07-2014)



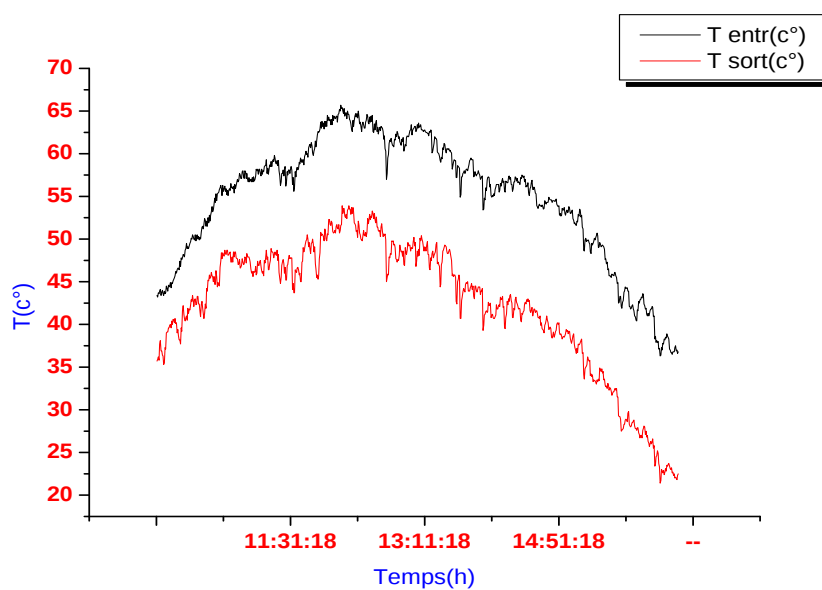
Graphe V-21: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (07-07-2014).



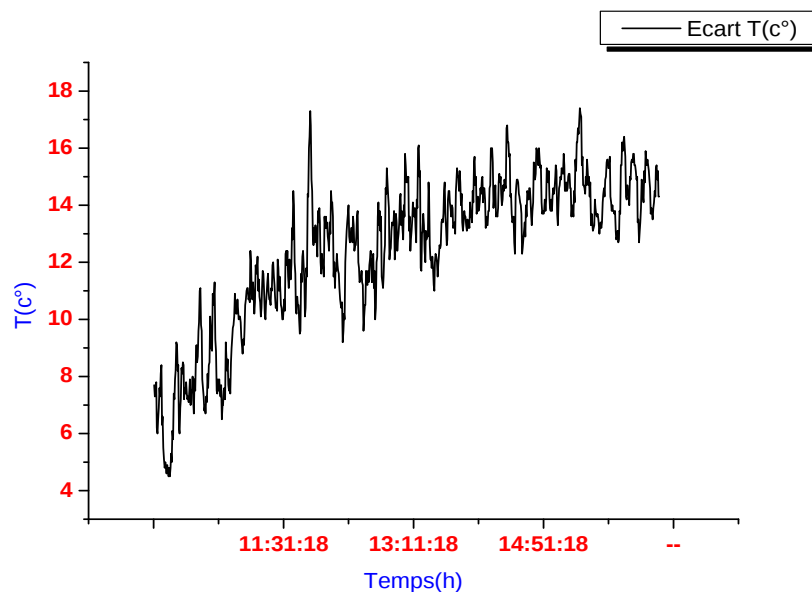
Graphe V-22: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (07/07/2014).



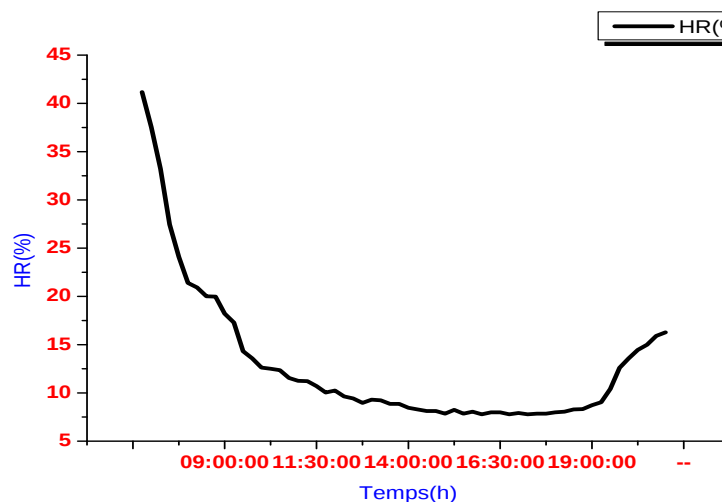
Graphe V-23: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (07-07-2014).



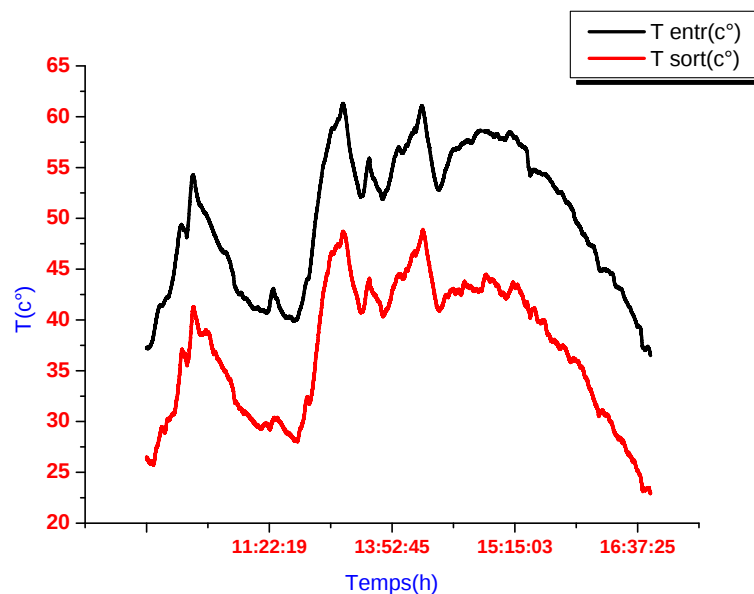
Graphe V-24: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (08-07-2014).



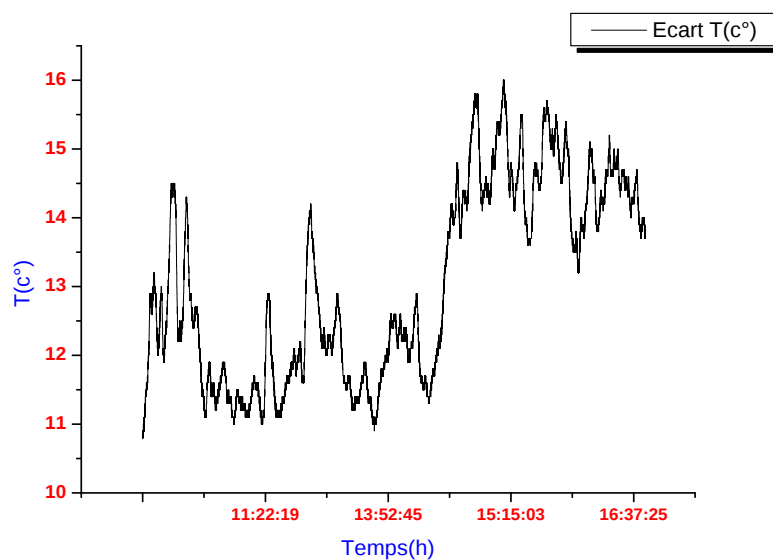
Graphe V-25: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (08/07/2014).



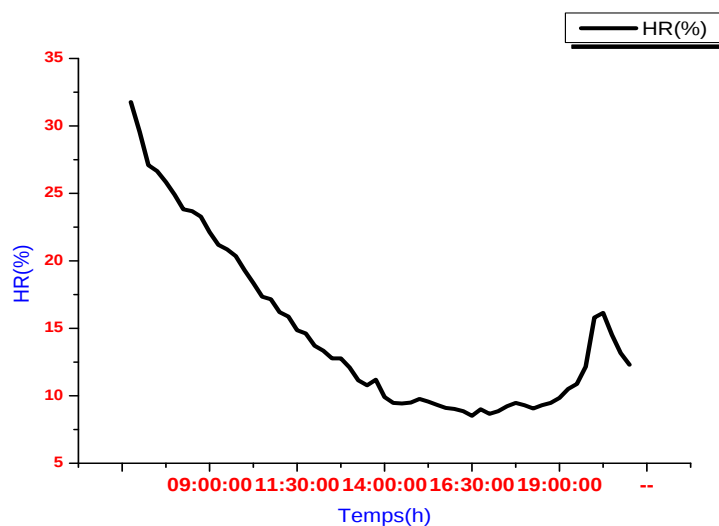
Graphe V-26: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (08-07-2014).



Graph V-27: la variation de la température en fonction du temps pour la journée du (09-07-2014).



Graph V-28: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (08/07/2014).



Graph V-29: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (09-07-2014).

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Le jour	Heure	Ecart de température Max (°C)	Humidité (%)
03-07-2013	14:22:55	18.80	18.92
04-07-2013	10:55:56	17.80	12.36
05-07-2013	10:34:18	15.00	17.20
06-07-2013	13:34:58	19.20	10.30
07-07-2013	14:01:41	19.00	09.30
08-07-2013	11:51:48	17.30	09.35
09-07-2013	15:36:36	15.50	08.85

Tableau V -1: L'écart de température maximal et l'humidité pour la période de 03 juillet au 09 juillet.

V.15.5 Interprétation des résultats

A partir de l'expérience réalisée nous pouvons déduire que :

- l'écart entre les températures d'entrée et celle de sortie est considérable varie entre 15 et 19.2 °C pour la période du 03 au 09 juillet 2013.
- Le résultat Cela peut être considéré comme indice de performance de l'installation.
- La température de sortie de l'air varie en fonction de l'humidité de l'air et la température d'entrée.
- Le système fonctionne efficacement dans les zones semi arides.
- En gardant l'installation du deuxième essaie nous pouvons utiliser ce système pour le chauffage.

Conclusion

Conclusion

L'objectif principal de notre travail consiste à proposer un nouveau système pour assurer les besoins d'un local ou d'une habitation en chaleur en hiver et en air frais en été par un processus d'humidification. Pour cette raison des dispositifs spécialement conçus pour cette fin ont été réalisés. Nous avons mené une série de mesures pour explorer les possibilités d'utilisation des dispositifs simples pour le chauffage solaire et le rafraîchissement passif, et l'utiliser directement pour le confort thermique par traitement de l'air (chauffage des locaux ou d'habitations la climatisation).

Les travaux réalisés et les résultats obtenus nous ont permis de définir quantitativement l'intérêt de l'introduction de la climatisation par dessiccation dans le domaine de rafraîchissement d'air et son utilisation pour assurer les conditions du confort thermique en termes de température et d'humidité.

L'écart entre les températures entre l'entrée et la sortie après rafraîchissement est considérable (varie entre 15 et 19.2 °C pour la période du 03 au 09 juillet 2013 par exemple). Cela peut être considéré comme indice de performance de l'installation.

Les zones semi arides (cas de la ville de Laghouat), sont caractérisées par un taux d'humidité réduit ce qui n'exige pas beaucoup d'effort dans l'opération d'assèchement de l'air ce qui rend la réduction de la température par l'effet de la réhumidification de l'air peu coûteuse.

Les résultats de ces études sont très encourageants, ils permettent de confirmer l'intérêt de ce type d'installation (chauffage solaire et rafraîchissement passif) soit pour les climats chauds et secs ou les climats froids comme le cas de la ville de Laghouat. Le plus grand problème rencontré c'est l'absence de source de l'énergie la nuit ou pendant de longue période en hiver alors on a consacré une partie de cette thèse à l'amélioration et l'augmentation de l'efficacité d'un système de stockage de chaleur souterrain se basant sur étude théorique faite ultérieurement au laboratoire de mécanique.

À la lumière des considérations théoriques faites pour l'utilisation de l'approche analytique concernant la résolution de l'équation de la chaleur nous avons pu déterminer la distribution exacte de la température autour d'un tube enterré dans le sol et par le calcul avec exactitude de coefficient global de transfert de chaleur ce qui permet d'évaluer la puissance de stockage et de déstockage, la quantité de chaleur stockée et le rendement du stockage, et aussi de tirer des conclusions qui permettent l'amélioration des différentes installations de stockage,

Nous constatons pour le cas étudié qu'il faut travailler sur l'amélioration des systèmes de récupération de la chaleur pour augmenter le rendement de stockage et prolonger le temps

d'utilisation de l'énergie récupérée et cela par l'isolation du domaine de stockage pour éviter les pertes thermique et trouver d'autres configurations pour l'installation du système de déstockage.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- [01] Le livre vert sur l'Europe, la politique européenne de recherche et de développement, Rapport du parlement européen 2005.
- [02] Simon A., Lemaire J. , Boissel P. & P. Maître "A joint experimental and theoretical study" . Competition between agostic WCH and HWCH⁺. J. Chem. Phys., 115, 2510-2518, 2001.
- [03] Velardj.R., Seenraj.RV, Hafner.B., Faber, C. and Schwarzerk.K "Heat transfer enhancement in a latent heat storage system" 1999, Solar energy, Vol. 65, No 3, pp 171- 180.
- [04] Despois, J; Nougrède, F" 1977 « Stockage souterrains de chaleur » Revue Générale de Thermique, 184, 357-366. April 1978
- [05] EUROBSERV'ER. Baromètre du solaire thermique. Systèmes solaires, 2005, n° 168, pp. 39- 51.
- [06] ROCOCO. (2005). "Reduction Of Costs of Solar Cooling Systems." from http://ec.europa.eu/energy/res/fp6_projects/solar_heating_cooling_en.htm.
- [07] Adamon, Building climatology and thermal comfort : thermal environments and occupant (comfort) , responses in philippine office buildings (PhD), university of adelaide. 2005.
- [08] Kishnani, Climate buildings and occupant expectation : A comfort based model for the design and operation of office buildings in hot-humid conditions. Bentley : curtin university of technology.2002
- [09] Zhang, Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments. Ph. D. Thesis, CEDR, University of California at Berkeley, 415pp. 2003
- [10] Yang Thermal comfort and indoor air quality evaluation of ceiling mounted personalized ventilation system integrated with an ambient mixing ventilation system. Thesis. University of singapore, singapore. 2009.
- [11] Schiavon, * Energy saving with personalized ventilation and cooling fan*.Italy , University of Padua. 2009
- [12] Ackermann, M. Cool comfort, America's romance with air conditioning. Washington. DC : Smithsonian institution press. 2002, pp. 166-167).
- [13] Humphreys, M.A. (1975). Field studies of thermal comfort compared and applied: J. Inst. Heat. & Vent. Eng. 44, pp 5-27.

- [14] Pagliano Allowing for thermal comfort in free-running buildings in the new European Standard EN15251L. Pagliano Politecnico di Milano, Italy 2007.
- [15] ASHRAE (de Dear et al 1997) Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report on ASHRAE RP-884. Macquarie University, Sydney.
- [16] Nicol Thermal comfort of factory works in northern India, standards for thermal comfort : indoor air temperature standards for the 21 st century ; spon FN publishers, LONDON.1995 p.22).
- [17] ASHRAE RP 884, de Dear, R.J., Brager, G., Cooper, D., 1997. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report on ASHRAE RP-884. Macquarie University, Sydney.
- [18] SCHILLER G.E. A comparison of measured and predicted comfort in office buildings. ASHRAE transactions, 1990, vol. 96, part 1, pp. 609-622.
- [19] Wong, N.Y. et S.S. Khoo, Thermal comfort in classrooms in the tropics, *Energy and buildings*, 35 (4), pp. 337-351. 2003,
- [20] Kahkonen, E. (1991) "Draft, radiant temperature asymmetry and air temperature- a comparison between measured and estimated thermal parameters". *Indoor Air*. 1. pp. 439-447.
- [21] Humphrey et Nicol 2007).Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach *Advances in Building Energy Research*, 1 (2007), pp. 55–88
- [22] ASHRAE, 1995) American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Addendum to Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy; ANSI/ASHRAE Standard 55a-1995, Atlanta, (NO 023406 - 1995).
- [23] Aston, D "Soil temperature data 1958-1972" , Environment Canada, Atmospheric Environment Service, CLI-2-73, 1973.
- [24] ISO 7730:1994, Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. AFNOR. Paris.
- [25] ASHRAE. Chapter 8 : Thermal Comfort. In: ASHRAE handbook of fundamentals. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 1997, p. 8.1-8.28.
- [26] Bruant, 1997. BRUANT Marc. (1997). Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance. Thèse de doctorat : INSA de Lyon. Lyon
- [27] Brager Gail S., de Dear Richard J., "Thermal adaptation in the built environment : a literature review", *Energy & Buildings*; 27 (1), 1998.

- [28] SCHREIBER, L. Normes sur les conditions d'ambiances thermiques acceptables pour le confort, 1985, 33 p., (CS-000220).
- [29] G. P. Williams et L. W. Gold « Les températures du sol », Digest de la Construction au Canada, 180F, pp. 5, February, 1977.
- [30] ARENE. Guide de recommandation pour la conception des logements à hautes performances énergétiques en Ile –de-France- ADEME , ARENE, GDF, NOV,1999.
- [31] Shaviv, E., Yezioro, A., Capeluto, I. G., Peleg, U. J., Kalay, Y. E. (1996) Simulations and knowledge-based computer-aided architectural design (CAAD) systems for passive and low energy architecture. *Energy and Buildings* 23, 257-269.
- [32] Givoni, 1978, L'homme, l'architecture et le climat, Editions du Moniteur, Paris, 1978.
- [33] Sidi Mohamed Karim El Hassar National Center for building and research and studies Souidania , Algiers , Algeria.
- [34] Pierre Lavigne .Architecture climatique une contribution au développement durable, Edisud,Aix-en , Provence ,1998.
- [35] SOL A.I.R, Conception thermique de l'habitat. Edisud 1988.
- [36] De Vries, D. A., and N. H. Afgan,, Heat transfer in soils, in *Heat and Mass Transfer in the Biosphere*, I. Transfer processes in plant environment (Wiley, New York, 1975) pp. 1-28.
- [37] Garde, F., H. Boyer, et al. (1999). "Demand side management in tropical island buildings. Elaboration of global quality standards for natural and low energy cooling in buildings." *Building and Environment* 34: 71-84.
- [38] Bastide, A., P. Lauret, et al. (2006). "Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates. Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of wellventilated living spaces in buildings using natural ventilation." *Energy and Buildings* 38(1093-1103).
- [39] Garde, F., A. Bastide, et al. (2007). Improvment of the building design and indoor conditions in the mid-highlands of the French tropical island of La Réunion. Application to a green building high school "Le Tampon Trois Mares". *Clima*. Helsinki, Finlande.
- [40] Praene, J.-P. (2007). Intégration et modélisation dynamique de composants d'un système de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment, Université de La Réunion.
- [41] Kim, D. S., C. A. Infante Ferreira (2008). "Solar refrigeration options - a state-of-the-art review." *Int. J.Refrigeration* 31: 3-15.
- [42] Bourdoukan, P. (2008b). Etude numérique et expérimentale destinée à l'exploitation des techniques de rafraîchissement par dessiccation avec régénération solaire, Université de La Rochelle.
- [43] Lucas, F. (2009). Contribution à l'étude de technologies et de méthodes durables pour la conception des bâtiments en climat tropical, Université de La Réunion. HDR.

- [44] Martins, M. (2010). Nouveau procédé thermo-hydraulique appliqué au rafraîchissement solaire de l'habitat. Analyse et optimisation thermodynamiques, Université de Perpignan.
- [45] Pérez de Vinaspre, M., (2004). "Monitoring and analysis of an absorption airconditioning system." *Energy and Building* 36: 933-943.
- [46] Gommed, K., G. Grossman (2007). "Experimental investigation of a liquid desiccant system for solar cooling and dehumidification." *Solar Energy* 81: 131-138.
- [47] Pongtornkulpanich, A., S. Thepa, et al. (2008). "Experience with fully operational solar-driven 10-ton LiBr/H₂O single-effect absorption cooling system in Thailand." *Renewable Energy* 33: 943-949.
- [48] Eicker, U., D. Pietruschka (2008). "Design and performance of solar powered absorption cooling systems in office buildings." *Energy and Buildings* 41(1): 81-91.
- [49] Mateus, T., A. C. Oliveira (2008). "Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different building types and climates." *Applied Energy* 86(6): 949-957.
- [50] Bourdoukan, P. (2008b). Etude numérique et expérimentale destinée à l'exploitation des techniques de rafraîchissement par dessiccation avec régénération solaire, Université de La Rochelle.
- [51] Tsoutsos, T., E. Aloumpi, et al. (2010). "Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital." *Energy and Buildings* 42: 265-272.
- [52] Zhai, X. Q., R. Z. Wang "Experimental investigation and performance analysis on a solar adsorption cooling system with/without heat storage." *Applied Energy* 87: 824–835. (2010).
- [53] Lucas, F. Développement et validation de modèles thermo-hydrauliques dans les bâtiments ; Influence de la condensation et des systèmes de traitement d'air couplés aux bâtiments. Université de La Réunion. PhD. (2001).
- [54] J.P. DUMAS, “ Le stockage du froid par chaleur latente “ *Techniques de l'Ingénieur Tome Génie Energétique* (2002) BE 9 7751-22.
- [55] L'éclairage naturel des bâtiments à l'adresse, http://www.cmhc.ca/en/inpr/bude/himu/coedar_001.cfm
- [56] Processus de conception intégré au, http://www.cmhc.ca/fr/prin/coco/toenha/peinar/peinar_002.cfm
- [57] JORF Journal Officiel. (2006). Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles des bâtiments, Journal Officiel de la République Française no 121 du 25 mai 2006.
- [58] EnEV 2004,

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“. Réglementation thermique allemande. Disponible en ligne.
URL : <http://enev-normen.enev-online.de>

[59] Minergie (2008). Site Internet. URL : <http://www.minergie.ch>

[60] Passivhaus Institut (2008). Site Internet ; URL : <http://www.passiv.de>

[61] Klimahaus/Casaclima 2008. Site Internet : <http://www.klimahausagentur.it/>

[62] JORF Journal Officiel. Arrêté du 8 mai 2007 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique », Journal Officiel de la République Française no 112 du 15 mai 2007.

[63] BERNIER, M. Simulation de maisons « zéro-net ». Journée thématique SFT-IBPSA. Chambéry. Communication orale. (2006).

[64] DISCH, R. Das Plusenergiehaus. Site internet. URL <http://www.plusenergiehaus.de>. (2008).

[65] MAUGARD, A., MILLET, J.-R., QUENARD, D. Vers des bâtiments à énergie positive. Présentation du CSTB. Disponible en ligne.

URL : http://www.cstb.fr/batimat2005/presentations/vers_des_bepos.pdf.

[66] Stéphane THIER, bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, l'école nationale supérieure des mines de paris. 2008

[67] THIERS, S., PEUPORTIER, B. Bilans énergétique et environnemental simulés d'un bâtiment passif équipé d'un échangeur air-sol en Picardie. Conférence IBPSA-France, Lyon, novembre 2008.

[68] G. Cognet, Perspective sur l'énergie et exigence d'efficacité dans son usage, Conférence internationale sur la conversion et la maîtrise de l'énergie (CIMME), Sousse- mai 2008.

[69] Claude Aufort *Le défi énergétique du 21ème siècle* Economie Et Politique 620-621 Mars-Avril 2006.

[70] John J. Gelezenis "A simplified quadratic expression for the approximate estimation of heating degree-days to any base temperature", Applied Energy 86 (2009) 1986–1994.

[71] Dombaycı. O A, "Degree-days maps of Turkey for various base temperatures", Energy 34 (2009) 1807–1812.

[72] Sarak H, Satman A, "The degree-day method to estimate the residential heating natural gas consumption in Turkey: a case study", Energy 28 (2003) 929–939.

[73] Papakostas K, Kyriakis N, "Heating and cooling degree-hours for Athens and Thessaloniki, Greece », Renewable Energy 30 (2005) 1873–1880.

[74] (Michèle PAPPALARDO).

[75] Gauvin Laetitia). "Radiation Laws and Planck's Constant" January 17, 2005.

[76] R. Pasquetti et Al "Thermal Conversion of Solar Radiation" Solar Energy Vol. 21. pp. 129-138, 1978.

[77] Meinecke W and Staiß F (1994) Solar Thermal Power Plants and Solar Process Heat in the Mediterranean Region (in German), published in booklet Solarthermie by Forschungsverbund Sonnenenergie, Topics 1993-1994, pp. 44-56, c/o DLR-Köln.

[78] Meinecke W Solar Thermal Plants, Comparison of Technologies: Central Receiver, Parabolic Trough, Parabolic Dish and Solar Chimney Plants (in German). DLR-Köln: Springer Publishing House. (1992).

[79] Y.B. Assoa et al . Y.B. Assoa, C. Menezes, G. Fraisse, et al., Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector, Solar Energy, (2007), 1132-1143.

[80] Duffie, John A. et Beckman J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', John Wiley & Sons, 2nd edition, New York, 1991.

[81] Mauthner, F. et Weiss W (2012). Solar Heat Worldwide - Markets and Contribution to the Energy Supply 2010. Paris, France: International Energy Agency - Solar Heating and Cooling Programme.

[82] Thibaut Vitte. Etude D'un Bâtiment Basse Energie ; Développement Et Application Du Principe De Rafraichissement Solaire
Thibaut Vitte– thibaut.vitte@insa-lyon.fr, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA) – CETHIL.2007.

[83] Hildbrand, C, P. Dind, et al. "A new solar powered adsorption refrigerator with high performance." Solar Energy 77(3): 311-318. (2004).

[84] Hans Müller _ Steinhagen, 'Concentrating solar power, a review of the technology', Ingenia, 2003.

[85] Antonio L. Avila-Marin. Volumetric receivers in solar Thermal Power plants with central receiver système technology, A reveiw solar Energy 85 (2011) 891-910.

[86] Jesús M et all . A high flux central receivers of Molten salts for the new generation of commercial stand-alone solar power energy engineering May 2008, vol 130

[87] Hiroshi Hasuike et al. Study on design of Molten salt Solar receivers for beam down solar concentration , solar energy 80 (2006) 1255-1262.

[88] A. Khouya et Al, "Contribution à l'étude comparative de trois configurations de capteurs solaires plans à air et à application au séchage du bois" 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.

- [89] A.A.SFEIR, G.GUARRACINO « Ingénierie des systèmes solaires application à l’habitat ». Edition Technique et. Documentation 1981.
- [90] DL Slegel and LR Davis, “Transient heat and mass transfer in soils in the vicinity of heated porous pipe” 1977, ASME J. Heat Transfer, 99, 541—546.
- [91] Michael P. Deru et Allan T. Kirkpatrick, “Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings Part 1–Analysis and Modeling” Journal of Solar Energy Engineering -- February 2002 Volume 124, Issue 1, pp. 10-16.
- [92] SAWHNEY, R.L. and U. Mahajan, “Heating and cooling potential of an underground air-pipe system”, International Journal of Energy Research, 1994, vol. 18, pp. 509-524.
- [93] Razika kharchi étude énergétique de chauffage, rafraichissement Et eau chaude sanitaire d’une maison type en Algérie. Thèse de doctorat en physique énergétique et matériaux 2013. Université Abou bekr belkaïd – TLEMCEM.
- [94] M. Piechowski “Heat and mass transfer model of a Ground Heat Exchanger: theoretical development” International Journal of Energy Research ,1999,Volume 23, Issue 7,Pages: 571-588.
- [95] AFNOR. NF EN ISO 7730 : Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. Paris: AFNOR, 1995, 27 p.
- [96] NARÇON SANDRINE. Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire - Contribution à l’étude de l’influence des interactions sensorielles sur le confort. Thèse Neurosciences et Comportement. Paris: Ecole Pratique des Hautes Etudes, 2001.
- [97] BERGER XAVIER. Thermal comfort, study and code - PASCOOL report. Athènes: University of Athens, 1995, 69 p.
- [98] PARSONS KEN. Human thermal environment. 2nd Edition. London: Taylor & Francis, 2003, 527 p.
- [99] K. Imessad MODELE DE CONFORT THERMIQUE ET DE COMPORTEMENT PHYSIOLOGIQUE DE L’ETRE HUMAIN
Khaled IMESSAD Centre de Développement des Energies Renouvelables, Alger, Algérie. 2005
imessad@gmail.com
- [100] J.A.J STOLWIJK, “A model of physiological temperature regulation in man”. NASA contractor report, NASA CR-1855). Washington, DC (1971).
- [101] A.P. Gagge, A.P. Fobeletes and L.G. Berglund, ‘A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment’, ASHRAE Transactions 92(2B), pp 709 – 731, 1986.

[102] C. Huizenga, H. Zhang and E. Arens, 'A Model of Human Physiology and Comfort for Assessing Complex Thermal Environments', Building and Environment, Vol. 36, pp. 691 – 699, 2001.

[103] Nicol, characterising occupant behaviour in buildings : towards a stochastic model of occupant use of windows , lights, blinds, heaters, and fans, Proceedings of the seventh international. IBPSA conference, Rio, part 2 international building, performance simulation association UK 2001 ,1073-1075.

[104] l'ASHRAE Handbook of Fundamentals Comfort Model, 2005 superposées au climat de Bruxelles.

[105] Bassam MOUJALLED' * Modélisation dynamique du confort thermique* thèse de doctorat présentée à l'institut des sciences appliquées de Lyon, France,2007

[106] HUMPHREYS M.A. Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort. ASHRAE transactions, 1998, vol. 104, part 1, pp. 991-1004.

[107] DE DEAR R. J.,. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, <http://atmos.es.mq.edu.au/~rddedear/RP884_Final_Report.PDF>. (consulté le 12.05.2003).

[108] ASHRAE (load calculation application manual)

[109] Reyssset, Pascal Aménager la ville : l'art d'habiter - Paris : Sang de la Terre, 2008. ISBN 978-2-86985-194-8

[110] Energie solaire, les machines élévatoires, archives document FAO, dpt du développement durable.

[111] MCCULLOUGH E.A. et OLESEN B.W. Thermal insulation of chairs. ASHARE transactions, 1994, vol. 100, Part 1, pp. 795-802.

[112] CANDAS VICTOR. Confort thermique. In: Génie énergétique. Vol. BE 4. Paris: Techniques de l'ingénieur, 1998, p. BE 9085.

[113] NICOL F. Thermal comfort, a handbook for field studies toward an adaptive model. London: University of East London, 1993.

[114] THELLIER FRANÇOISE. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat, une approche de l'étude confort. Énergétique. Toulouse: Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1989, 163 p.

[115] KOSCHENZ, M., B. LEHMANN.,' Thermoaktive Bauteilsysteme tab's, Dübendorf, EMPA 2000.

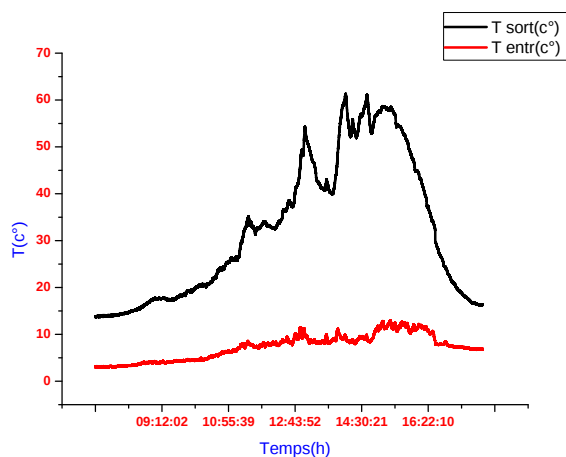
[116] CLAESSEN, J., A. DUNAND, 'Heat extraction from the ground by horizontal pipes: a mathematical analysis', Stockholm, Swedish Council for Building Research, 1983.

- [117] SAWHNEY, R.L. and U. Mahajan, "Heating and cooling potential of an underground air-pipe system", *International Journal of Energy Research*, 1994, vol. 18, pp. 509-524.
- [118] Gold, L.W "Influence of surface conditions on ground temperatures" , *Can. J. Earth Sci.*, Vol. 4, p. 199-208, Apr. 1967.
- [119] R. Alvarez, Effect of temperature on soil microbial biomass and its metabolic quotient in situ under different tillage systems , *Biology and Fertility of Soils* , Volume 19, Numbers 2-3 / February, 1995 pages 227-230
- [120] HOUPEURT, A. (1975). *Eléments de mécanique des fluides dans les milieux poreux*. Editions Technip.
- [121] Ladislaus Rybach et Burkhard Sanner "Ground-Source heat pump systems, THE EUROPEAN EXPERIENCE" *GHC BULLETIN*, March 2000.
- [122] HABERT F., FALGARI J. L'inertie thermique, Mémoire de fin de stage HQE, Lyon 2004.
- [123] L'ICEB, Alain Bornarel (TRIBU)). Confort d'été passif, www.asso-iceb.org/wp.../07/guide_bio_tech_confort_d_ete_passif 1 avril 2014.
- [124] TEXIER.N * De la notion de confort à la notion d'ambiance* in revue du laboratoire cresson de l'école d'architecture de Grenoble et CNRS Ambiances architecturales et urbaines, France 2007.
- [125] MAEREFAT M., HAGHIGHI A.P. Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporating cooling cavity, *Renwable Energy*.35,2040-2052.2010.
- [126] BREESCH H., BOSSAER A., JANSSENS A Passive cooling in a low energy office building. *Solar Energy* ;2004 pp 682-696.
- [127] Fanger, P. *Thermal Comfort*, Danish technical press, copenhagen. 1970.
- [128] Stabat P. *Etude D'un Batiment Basse Energie Developpement Et Application Du Principe De Rafrachissement Solaire*
Thibaut Vitte– thibaut.vitte@insa-lyon.fr
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA) – CETHIL.2003.
- [129] Hollmuller P., Lachal B., Pahud D. *Rafrâichissement par géocooling: bases pour un manuel de dimensionnement*. Rapports de recherche de cuepe N 05 du 2005, Genève.

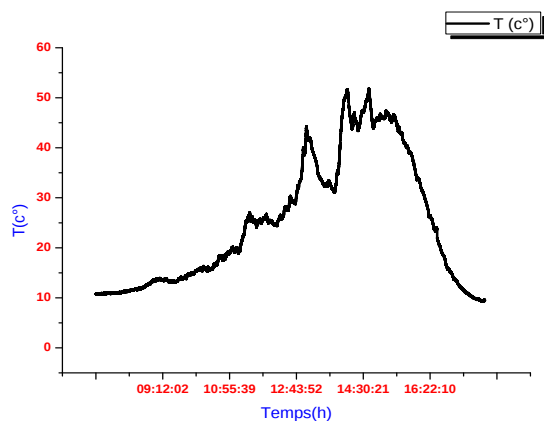
- [130] DUPERRON Océane Modelisation Thermique Dynamique Du Rafraichissement Passif le 31 août 2011.
- [131] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Climatisation>
- [132] <http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-espaces/GC/thermique/chapG/0schap/conditionnement.pdf>
- [133] Krarti, M. and Claridge, D., “Two Dimensional Heat Transfer from Earth-Sheltered Buildings”, ASME Journal of Solar Energy Engineering, Volume 112, pp. 43-50, 1991
- [134] Knudsen, H.N.; Kjaer, U.D.; Nielsen, P.A. Characterisation of emissions from building products : long terme sensory evaluation , the impact of concentration and air velocity in : proceeding of indoor air 96, Nogoya, internationale conference of indoor air quality and climate, vol 3,pp 551-556.
- [135] Bensabat, J., C. Doughty, E. Korin, A. Nir, and C.-F. Tsang, “Validation experiments of seasonal thermal energy storage models in unsaturated soils”, presented at Jigastock 88, Journées internationales sur le stockage de l’énergie thermique et la géothermie appliquée, Versailles, France, October 17-20, 1988.
- [136] Hadron J.-C & Raybach L, Commission fédérale de géothermie et du stockage souterrain de chaleur ,de 1975 à 1995 Rapport final. Office Fédéral de l’énergie Berne.
- [137] Mostafa A. Karam, “A Thermal Wave Approach for Heat Transfer in a Non uniform Soil” *Soil Science Society of America Journal* 64:1219-1225
- [138] F. Pharabod « Les centrales solaires LUZ » Comité d’action pour le solaire, 1991.
- [139] T. Letz et M. Lallemand, Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air en régime dynamique, *Rev. Phys. Appl. (Paris)* 21, 727-734 (1986)
- [140] Vasiliev LL , Heat pipes for ground heating and cooling. *Heat Recovery Systems and CHP*, 8(2) , pp. 125-139, (1988).
- [141] Dempsey BJ. A mathematical model for predicting coupled heat and water movement in unsaturated soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geoméchanics*, 2(1) , pp. 19-34, (1978).
- [142] Carslaw HS, Jaeger JC, *Conduction of heat in solids*. Clarendon Press: Oxford, (1946).

- [143] Thomas HR , A nonlinear analysis of two-dimensional heat and moisture transfer in partly saturated soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12(1) , pp. 31-44, (2005).
- [144] Benchatti A, Medjelled A, Thomas JR, Bounif A, Bouhadek K., Analytical Solution of Steady State 2D Heat Conduction Equation (Case of Horizontal Pipe Buried in an Unsaturated Soil). *International Journal of Heat Technonology* 2006, 24(1), pp. 17-25, (2006).
- [145] Benchatti A, Medjelled A, Bouhadek K , Analytical Solution of Unsteady State 2D Heat Conduction Equation (Case of Horizontal Pipe Buried in an Unsaturated Soil). *International Journal of Heat Technology*, 24(2), pp. 95-102, (2006).
- [146] O. Ercan Ataer , STORAGE OF THERMAL ENERGY, in *Energy Storage Systems*, [Ed. Yalcin Abdullah Gogus], in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK, (2006).
- [147] Medjelled, A. Benchatti, A. Bounif, "Experimental model for the study of heat transfer in unsaturated soil". *IJHT*, Volume 26, N° 1, pp. 97-104, (2009).
- [148]- Ibrahim Dincer and Marc A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications, Second Edition* , John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [149]- Michael F. Hordiski, *New technologies for energy efficiency* , The Fairmont Press, (2003).
- [150] T. Vitte, J. Brau and N. Chatagnon, ‘*Technical and Economical Comparison of Solar Dessicant Evaporative Cooling with Solar Absorption and Traditional Compression Systems*’, Climated Conference, Lyon, France, 2006.
- [151] M. Chadi. Université de La Rochelle. « Étude du potentiel de rafraîchissement d’un système évaporatif à désorption avec régénération solaire ». 2006.220 page.
- [152] Étude Réalisée Pour Le Compte De L’ademe .« Conception, réception, suivi des opérations de démonstration recherche de production de froid solaire »..2007.65 page

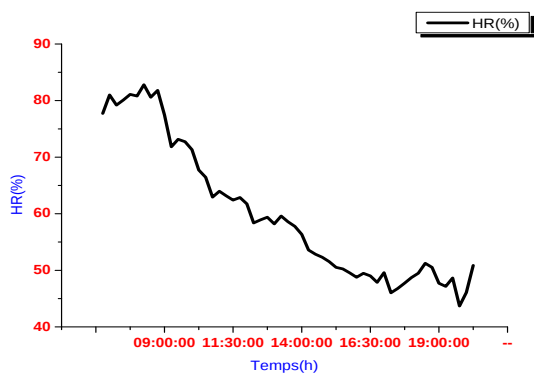
ANNEXE



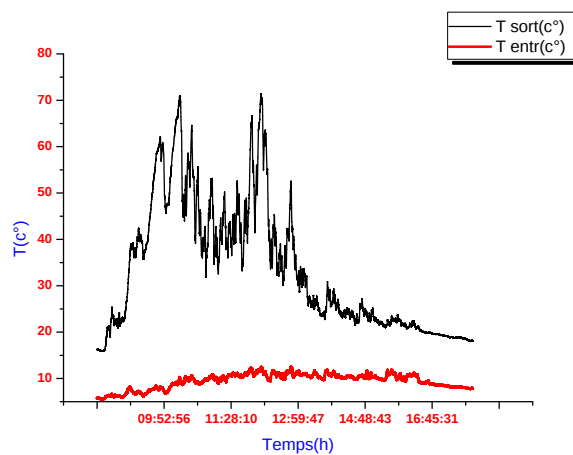
Graph 1 : la variation de la température pour la journée du (10/12/2013).



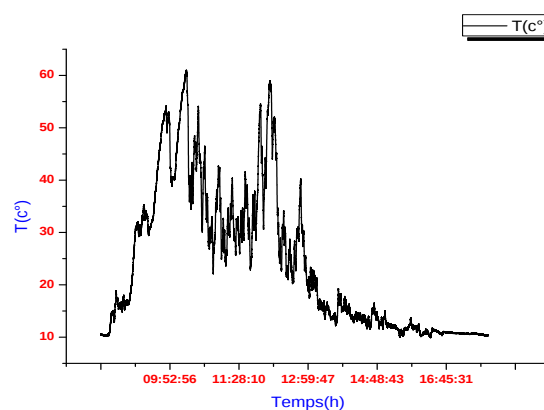
Graph 2 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (10/12/2013).



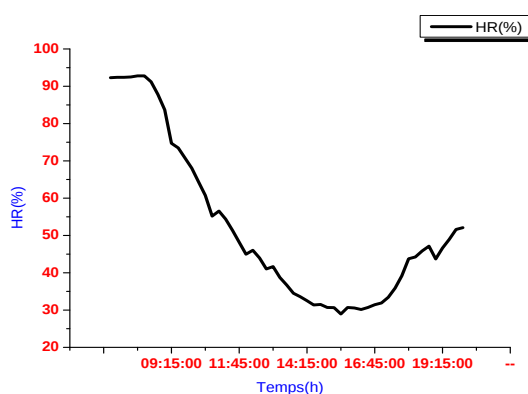
Graph 3 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (10/12/2013).



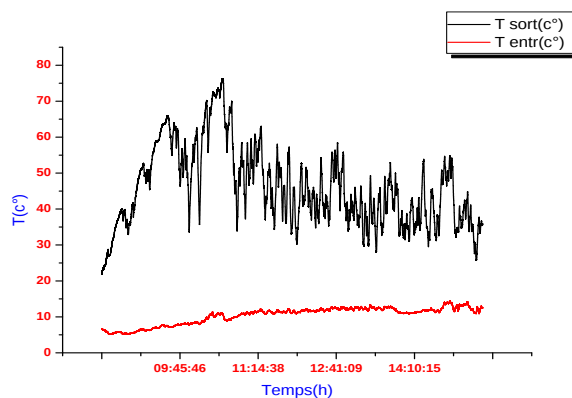
Graph 4: la variation de la température pour la journée du (11/12/2013).



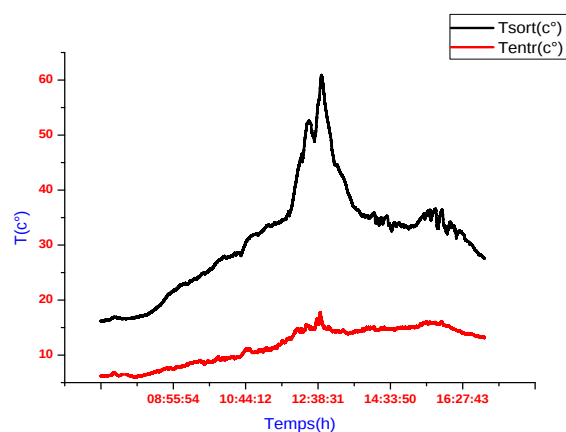
Graph 5: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (11/12/2013).



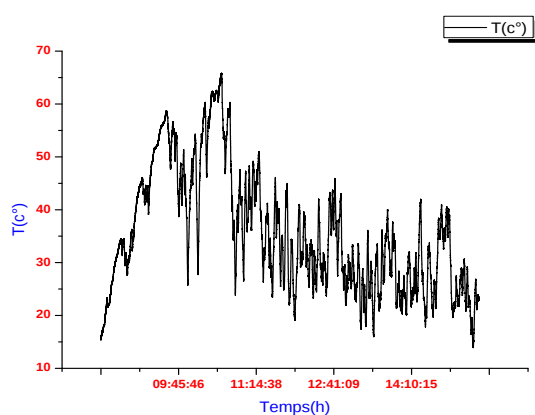
Graph 6 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (11/12/2013).



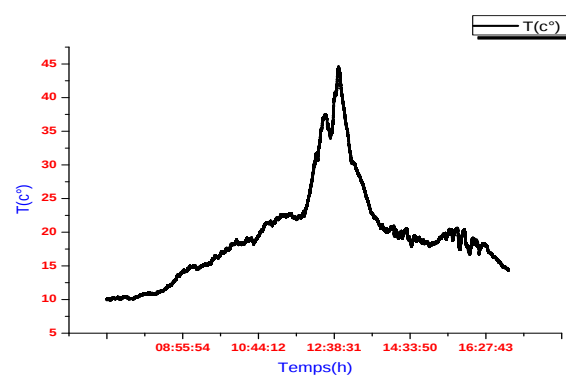
Graph 7: la variation de la température pour la journée du (12/12/2013).



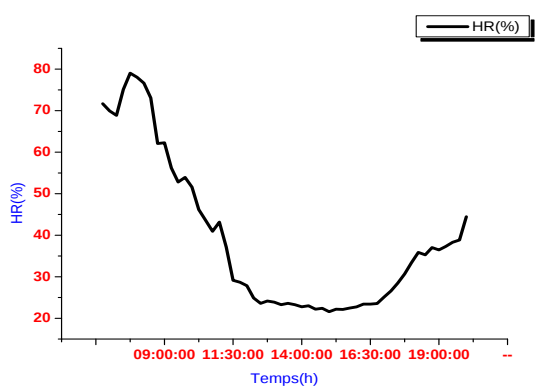
Graph 10: la variation de la température pour la journée du (13/12/2013).



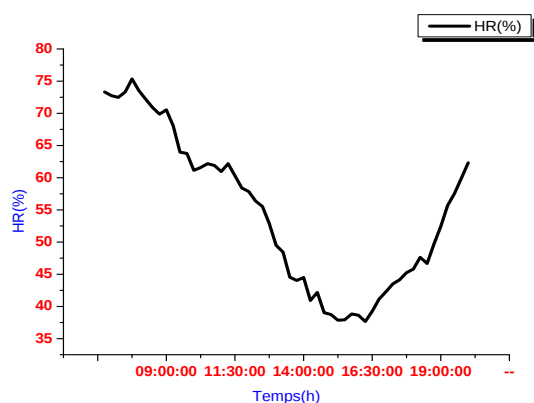
Graph 8: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (12/12/2013).



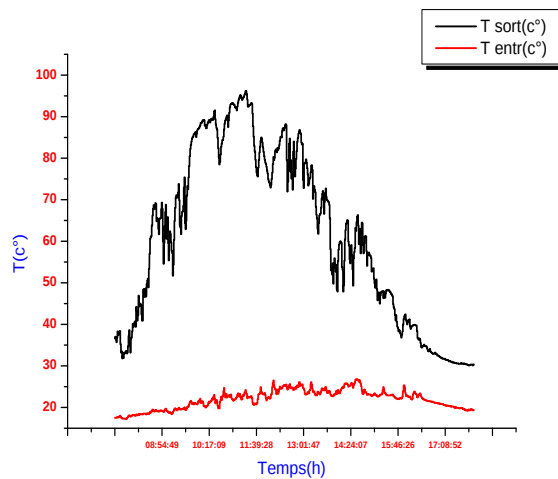
Graph 11: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (13/12/2013).



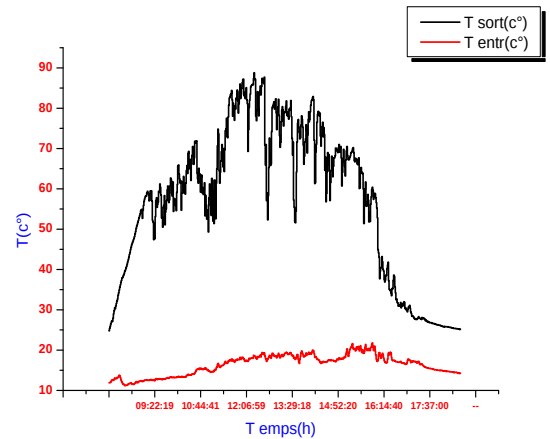
Graph 9 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (12/12/2013).



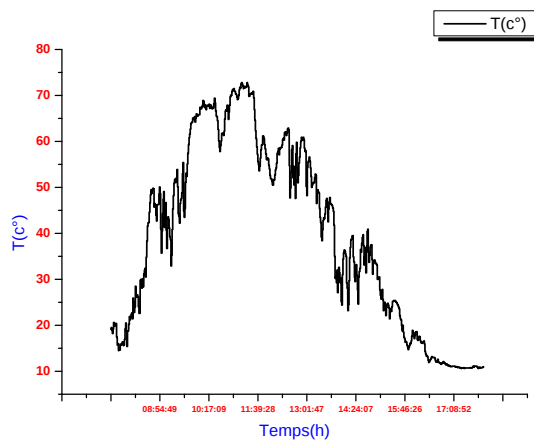
Graph 12: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (13/12/2013).



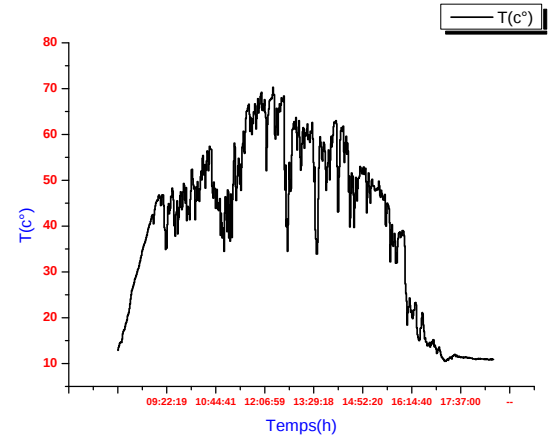
Graph 13 : la variation de la température pour la journée du (14/12/2013).



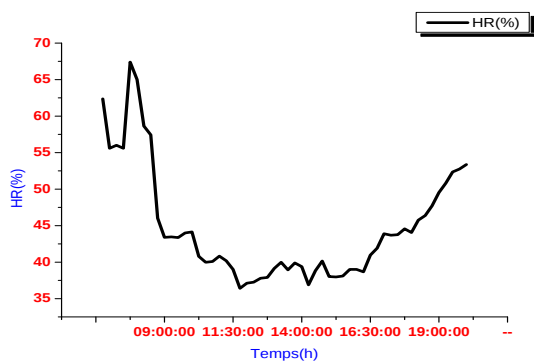
Graph 16: la variation de la température pour la journée du (15/12/2013).



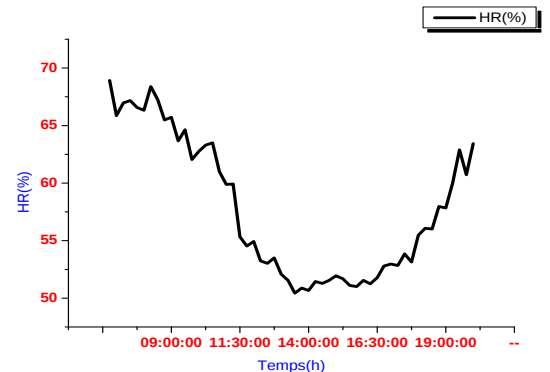
Graph 14: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (14/12/2013).



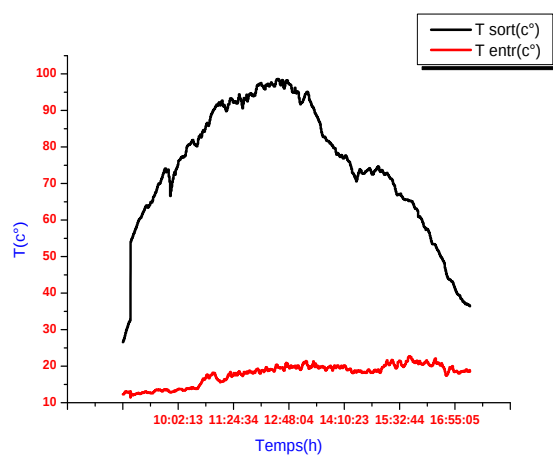
Graph 17: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (15/12/2013).



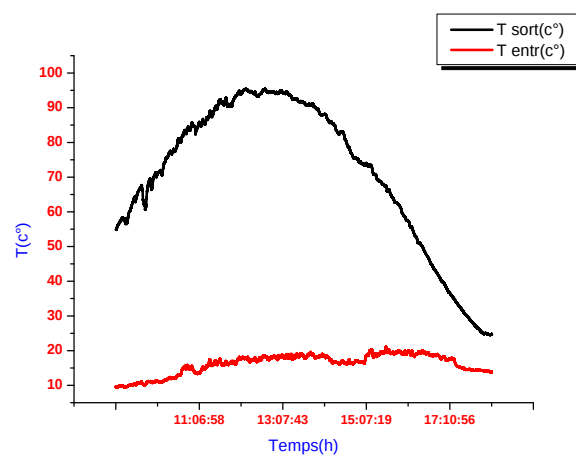
Graph 15 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(14/12/2013).



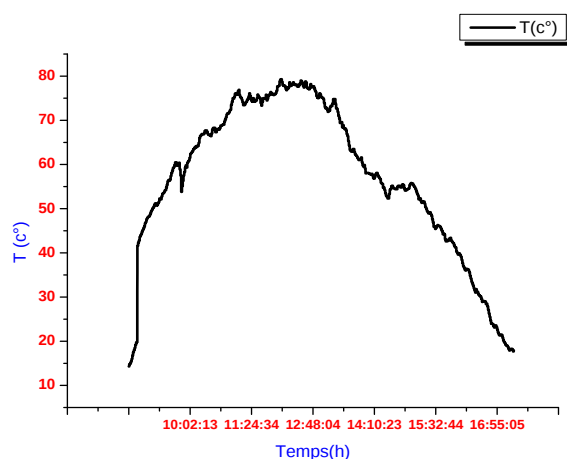
Graph 18 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(15/12/2013).



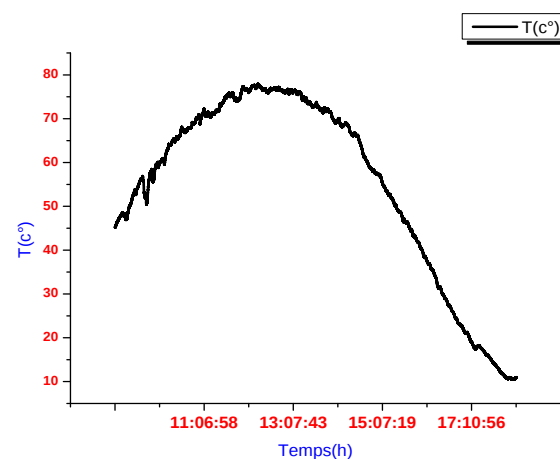
Graph 19: la variation de la température pour la journée du (16/12/2013).



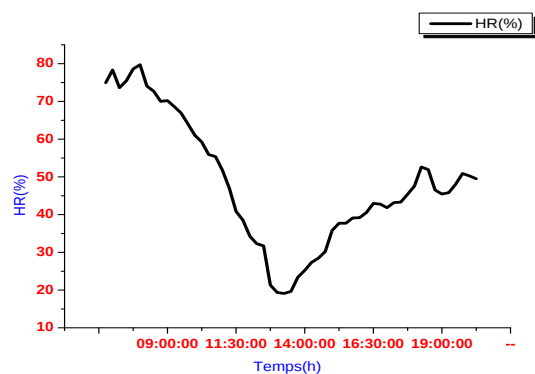
Graph 22 : la variation de la température pour la journée du (17/12/2013).



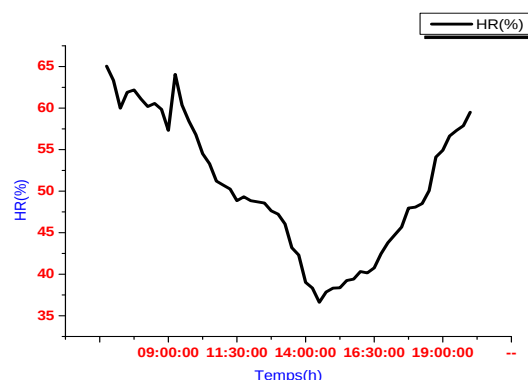
Graph 20 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (16/12/2013).



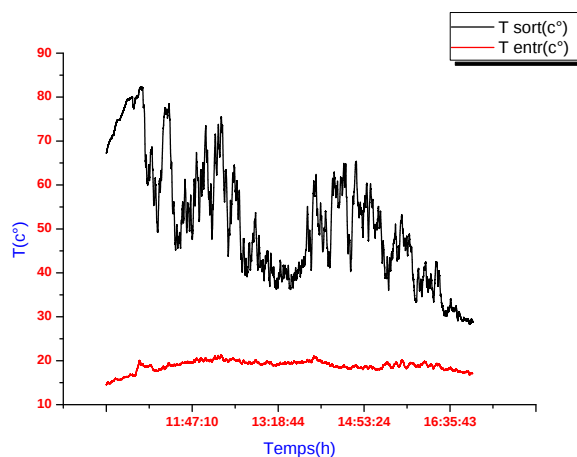
Graph 23 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (17/12/2013).



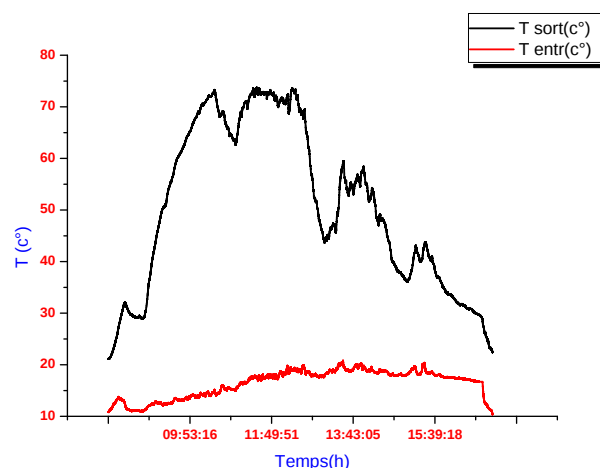
Graph 21 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(16/12/2013).



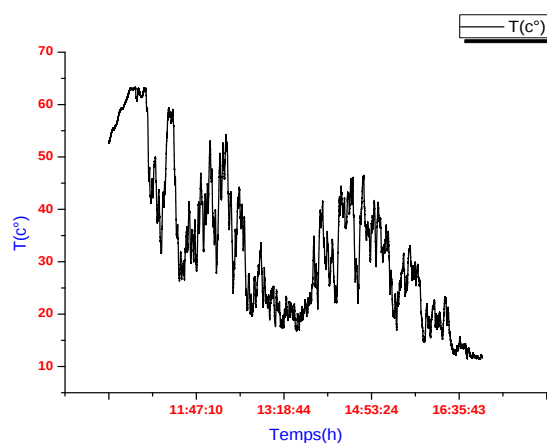
Graph 24 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du(17/12/2013).



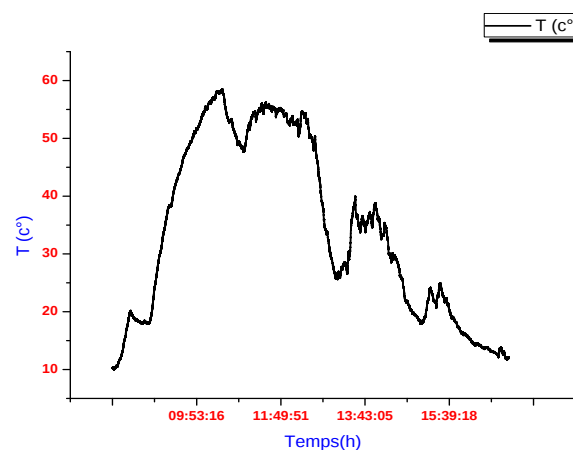
Graph 25 : la variation de la température pour la journée du (18/12/2013).



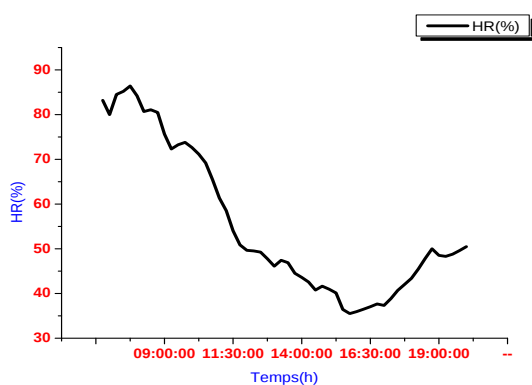
Graph 28 : la variation de la température pour la journée du (19/12/2013).



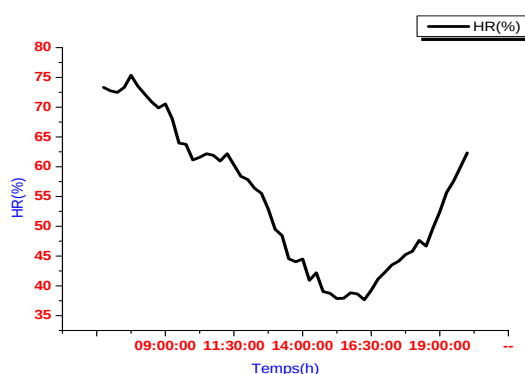
Graph 26 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (18/12/2013).



Graph 29 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (19/12/2013).

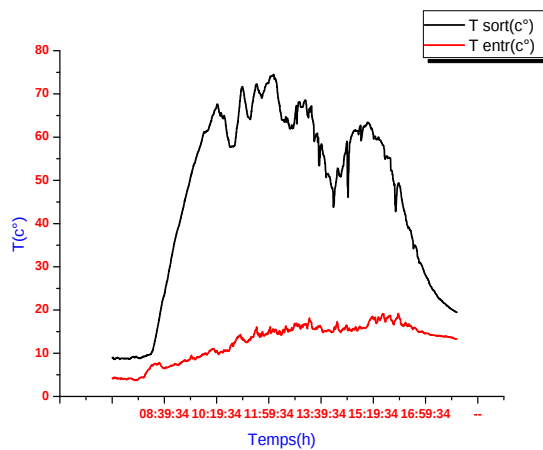


Graph 27 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (18/12/2013).

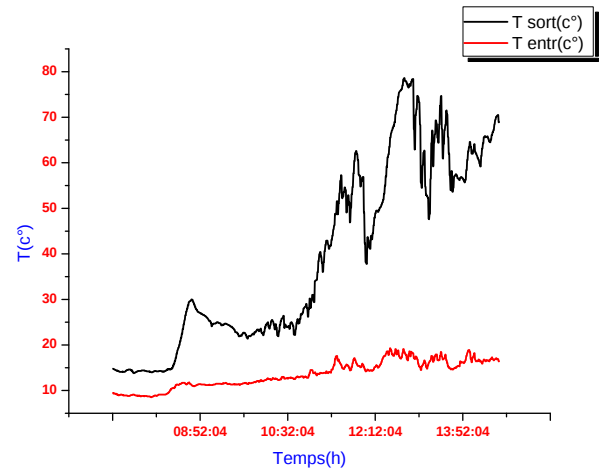


Graph 30 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (19/12/2013).

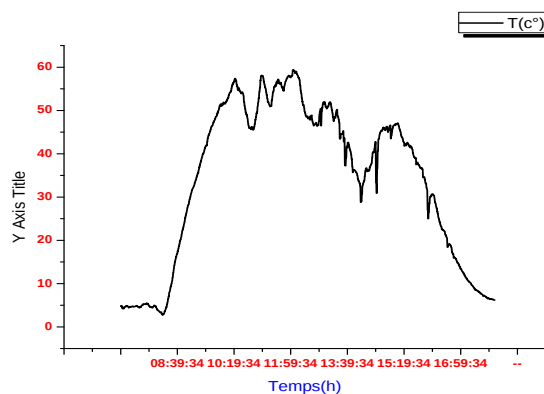
Les graphes du mois de janvier :



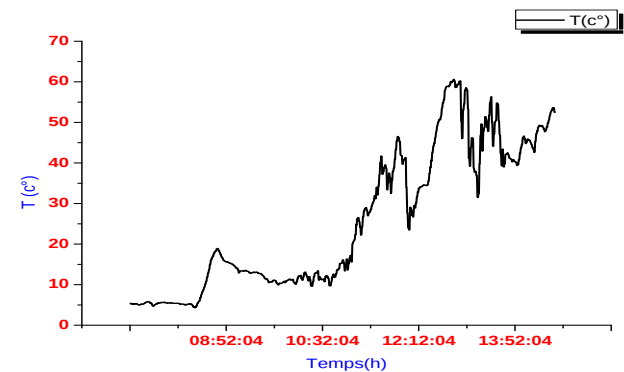
Graph 31: la variation de la température pour la journée du (01/01/2013).



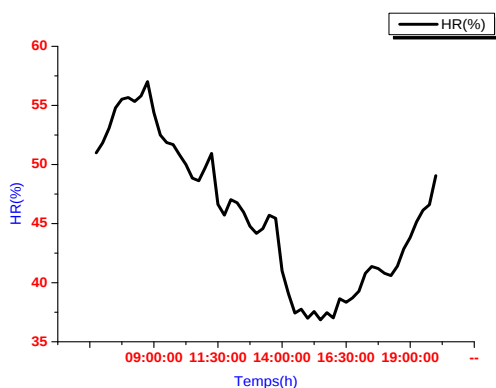
Graph 34: la variation de la température pour la journée du (02/01/2013).



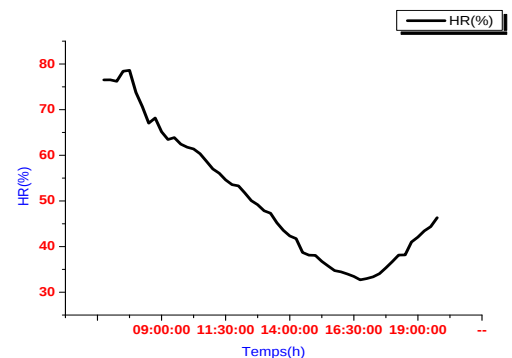
Graph 32: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (01/01/2013).



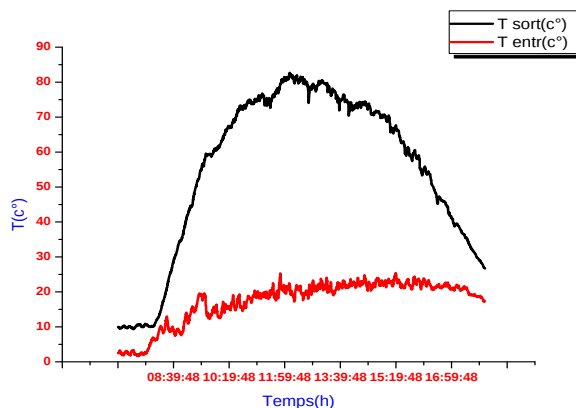
Graph 35: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (02/01/2013).



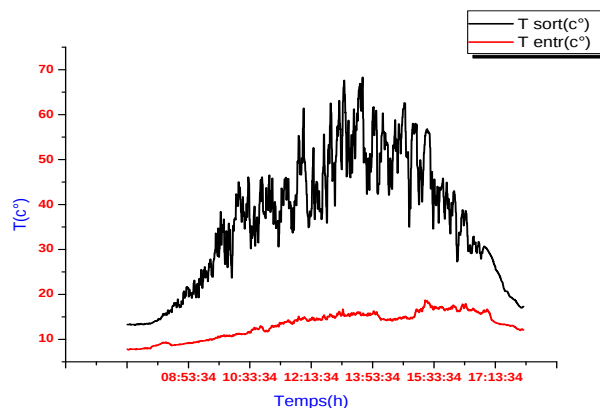
Graph 33: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (01/01/2013).



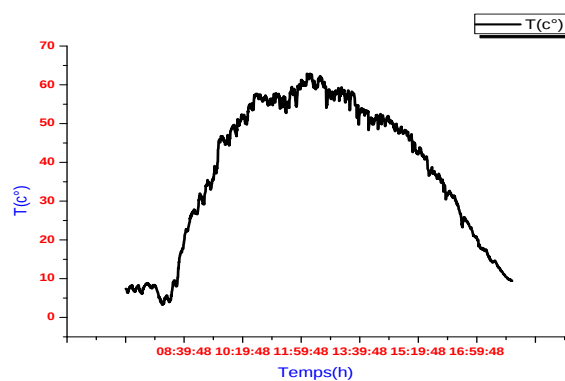
Graph 36 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (02/01/2013).



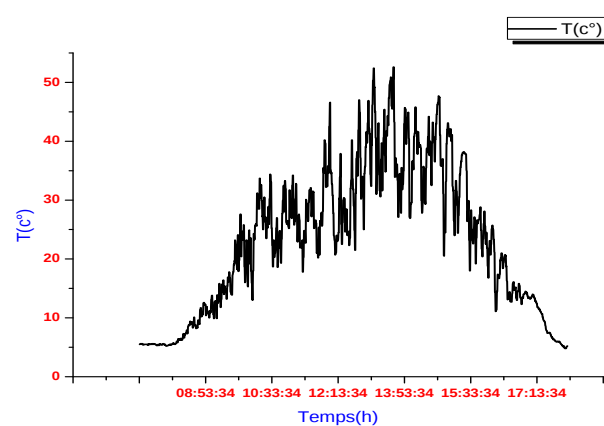
Graphe37 : la variation de la température pour la journée du (03/01/2013).



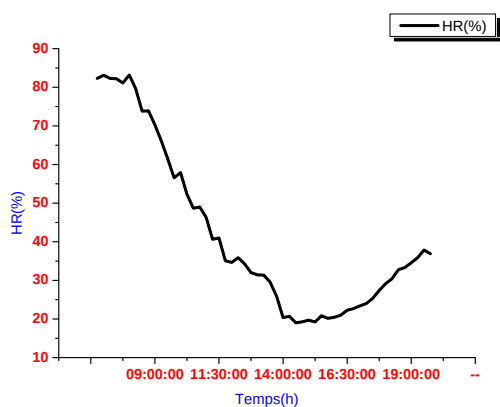
Graphe 40 : la variation de la température pour la journée du (04/01/2013).



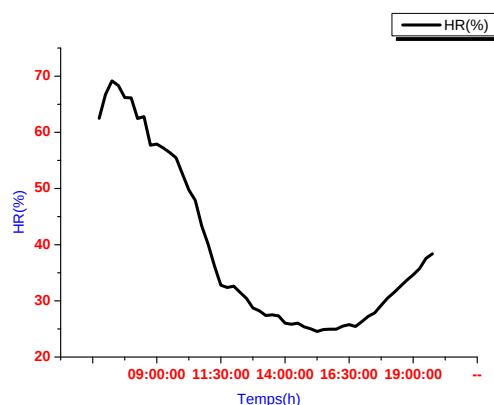
Graphe 38 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (03/01/2013).



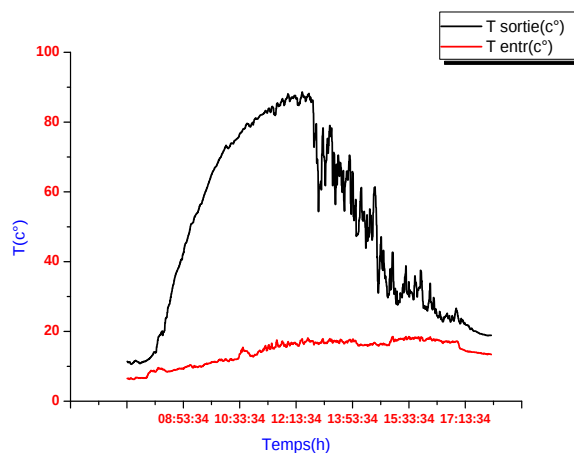
Graphe 41 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (04/01/2013).



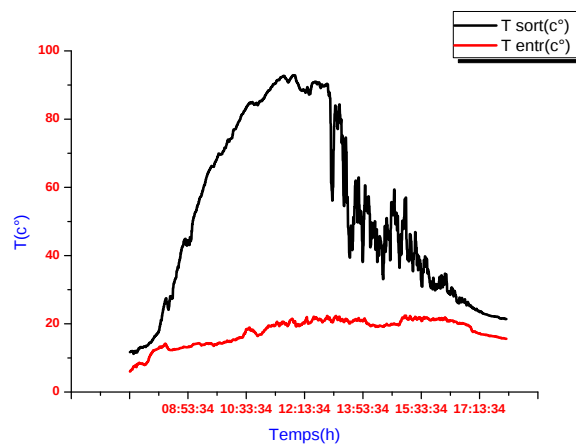
Graph 39 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (03/01/2013).



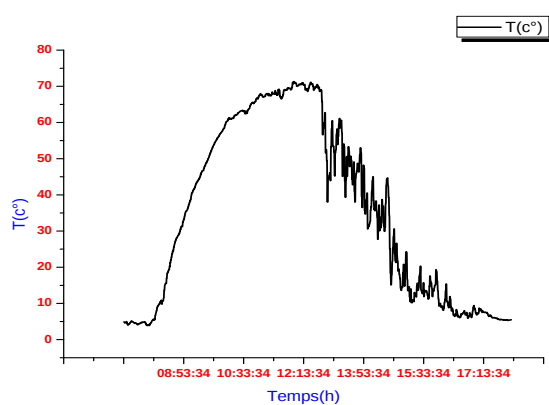
Graph 42 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (04/01/2013).



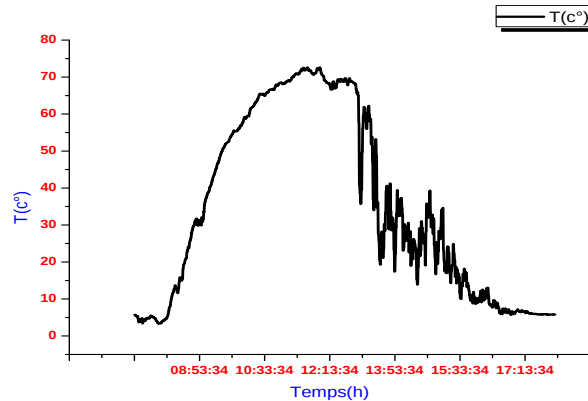
Graph 43: la variation de la température pour la journée du (05/01/2013).



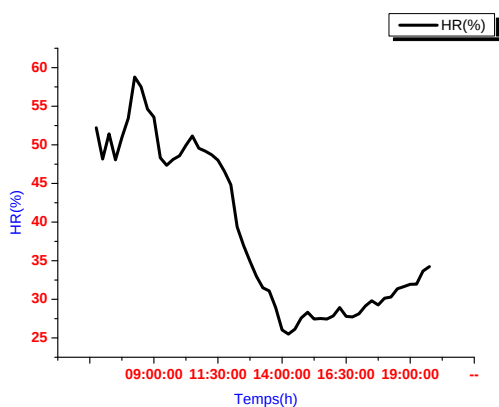
Graph 46: la variation de la température pour la journée du (06/01/2013).



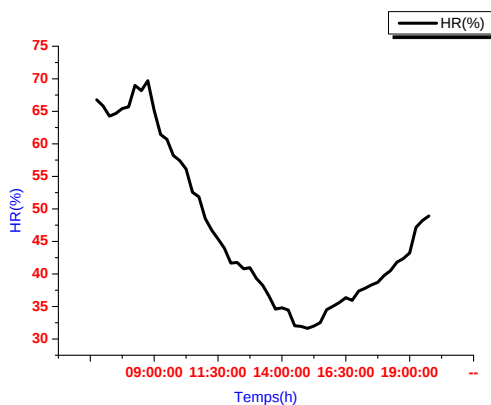
Graph 44: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (05/01/2013).



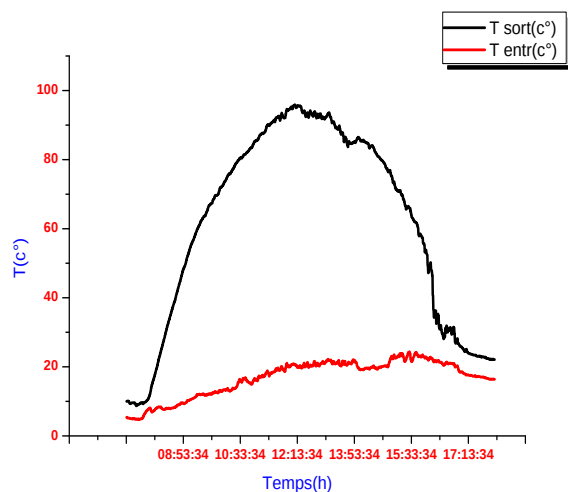
Graph 47 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (06/01/2013).



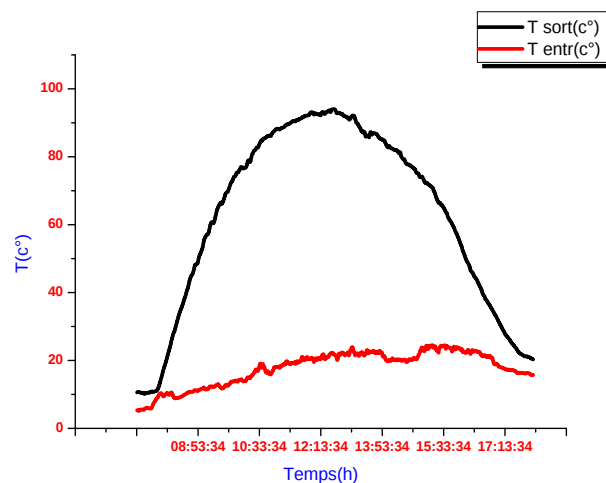
Graph 45 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (05/01/2013).



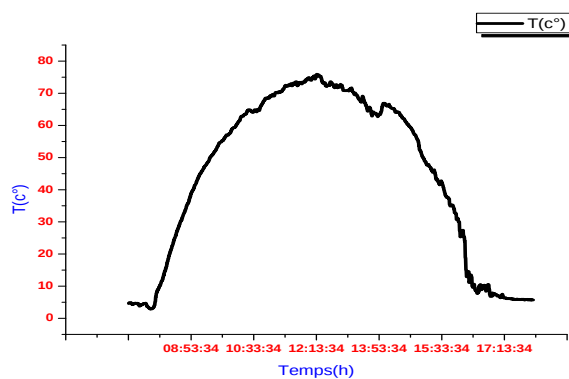
Graph 48 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (06/01/2013).



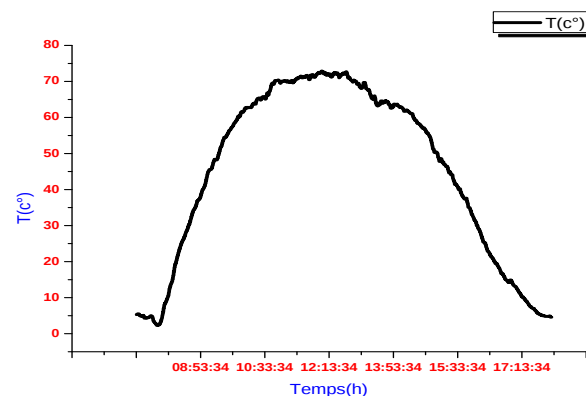
Graphe 49 : la variation de la température pour la journée du (07/01/2013).



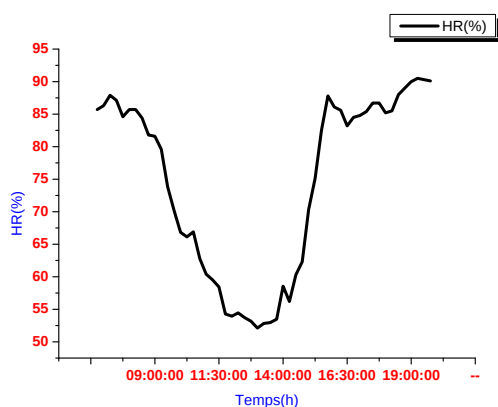
Graphe 52 : la variation de la température pour la journée du (08/01/2013).



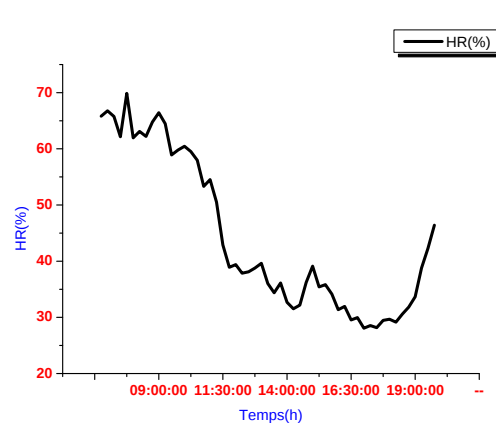
Graphe 50: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (07/01/2013).



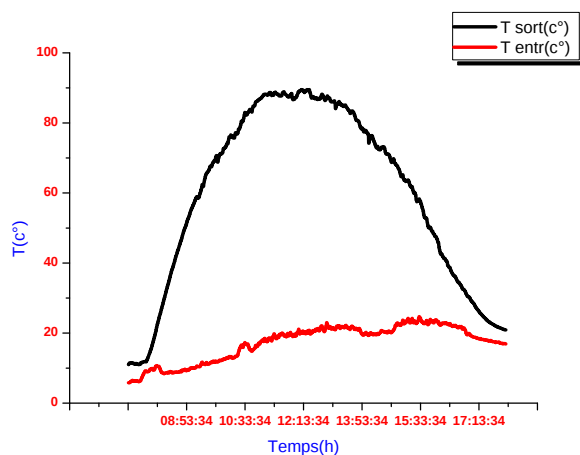
Graphe 53 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (08/01/2013).



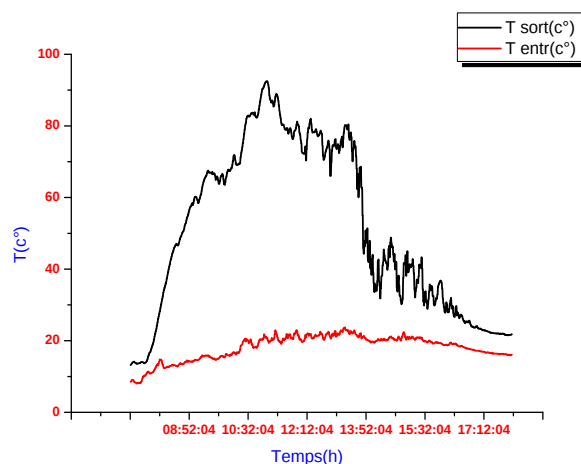
Graphe 51 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (07/01/2013).



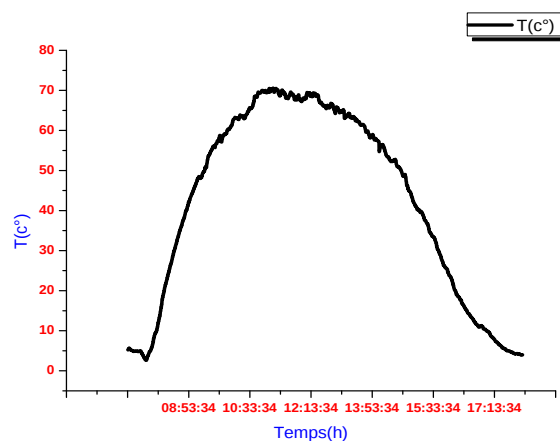
Graphe 54 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (08/01/2013).



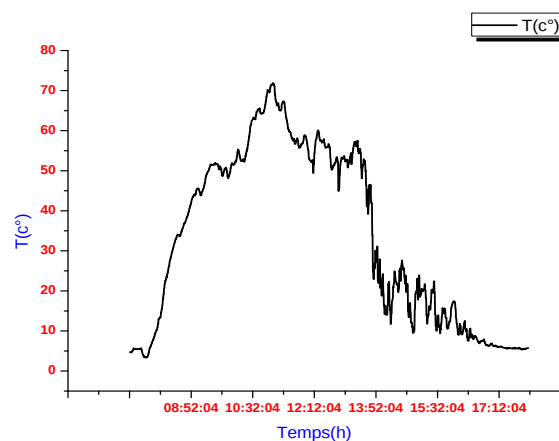
Graphe 55: la variation de la température pour la journée du (09/01/2013).



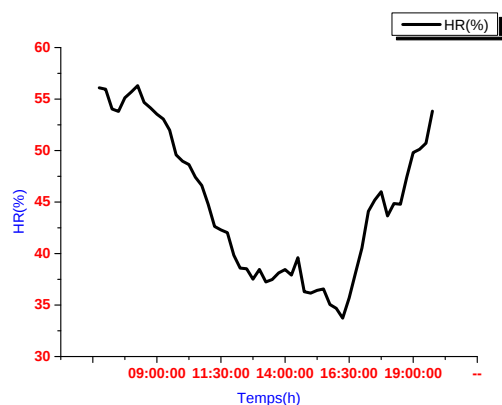
Graphe 58 : la variation de la température pour la journée du (10/01/2013).



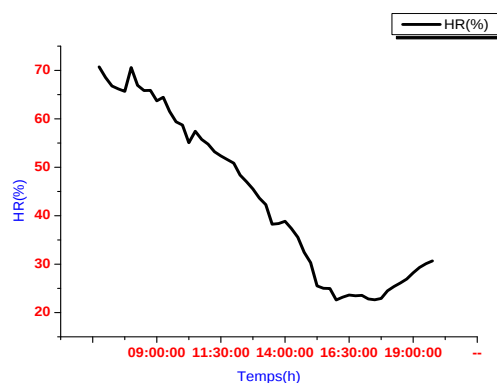
Graphe 56: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (09/01/2013).



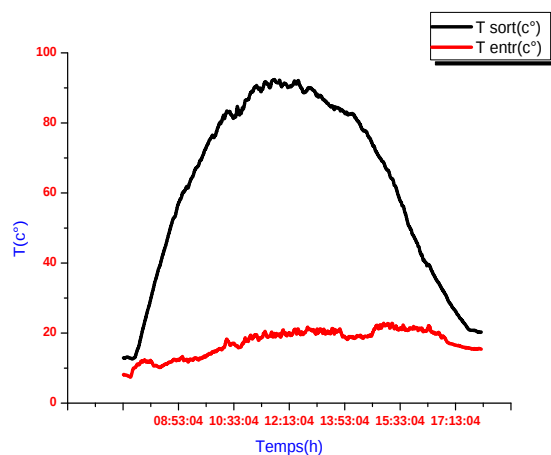
Graphe 59 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (10/01/2013).



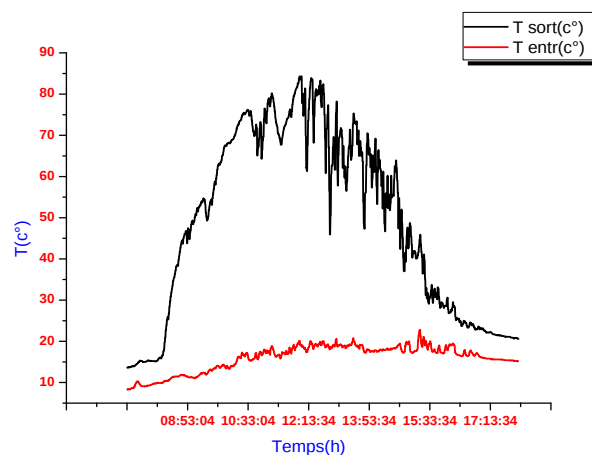
Graphe 57 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (09/01/2013).



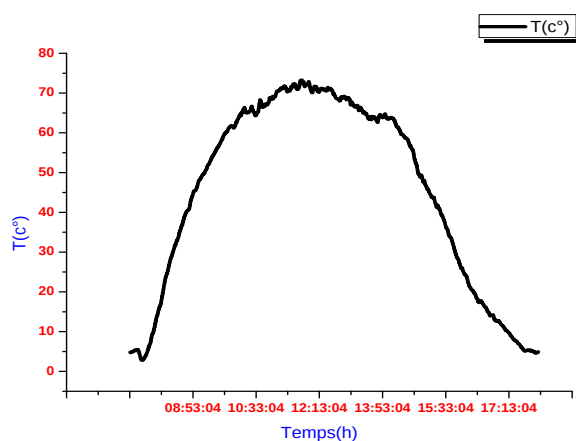
Graphe 60: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (10/01/2013).



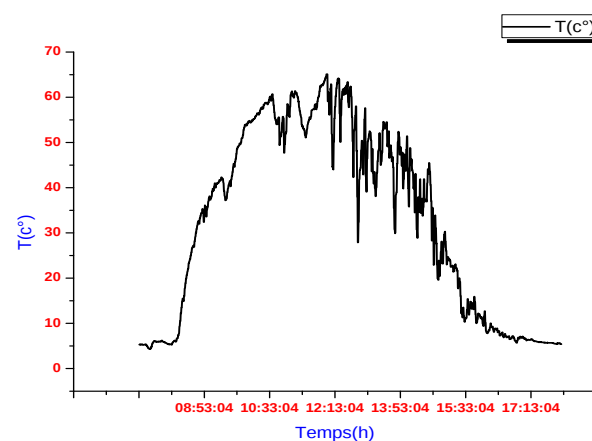
Graphe 61 : la variation de la température pour la journée du (11/01/2013).



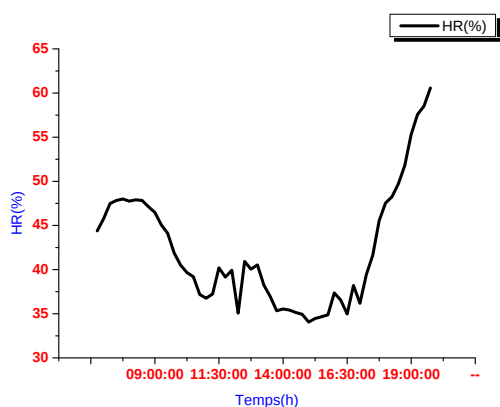
Graphe 64: la variation de la température pour la journée du (12/01/2013).



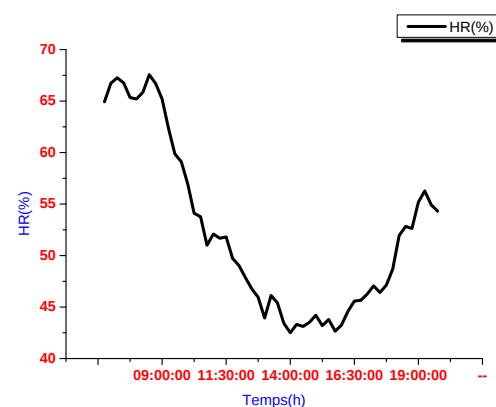
Graphe 62 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (11/01/2013).



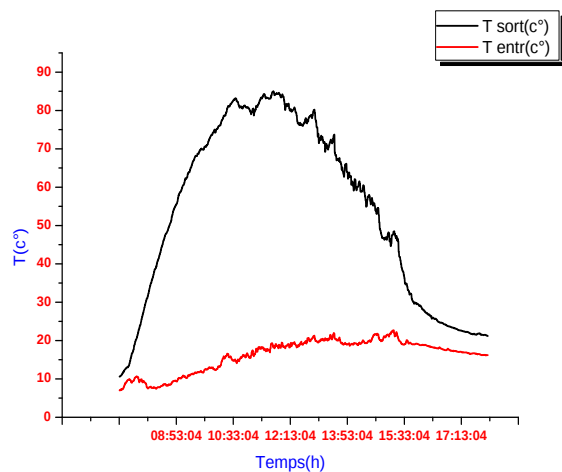
Graphe 65: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (12/01/2013).



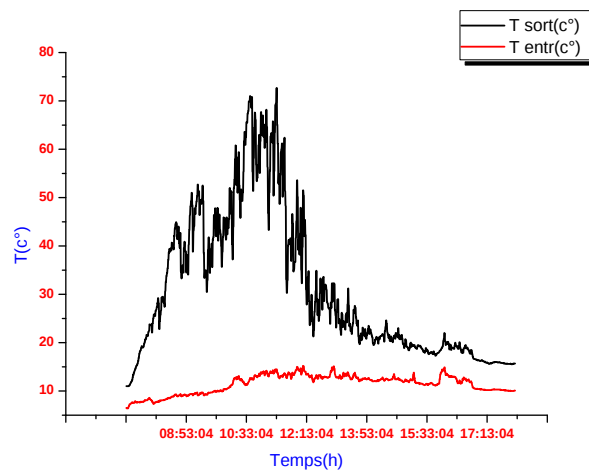
Graphe 63 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (11/01/2013).



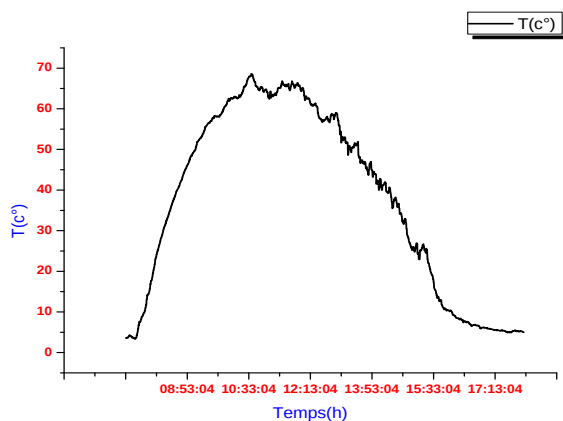
Graphe 66 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (12/01/2013).



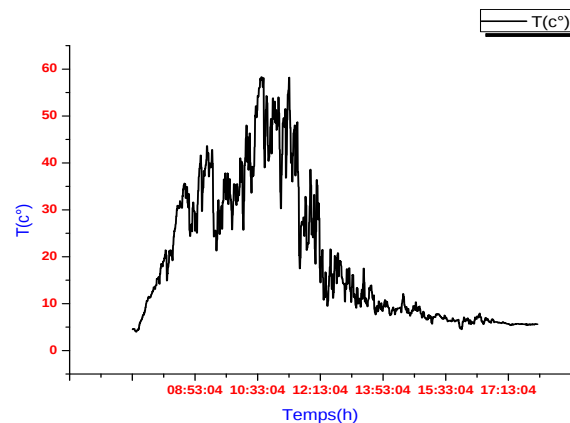
Graph 67: la variation de la température pour la journée du (13/01/2013).



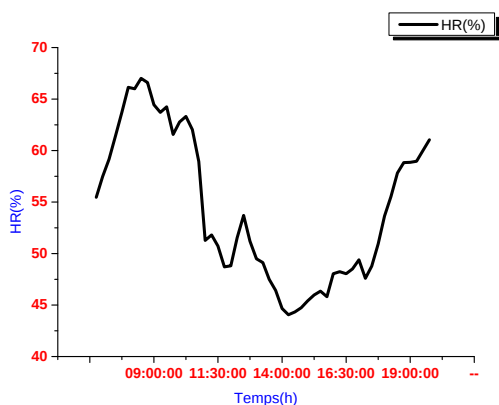
Graph 70: la variation de la température pour la journée du (14/01/2013).



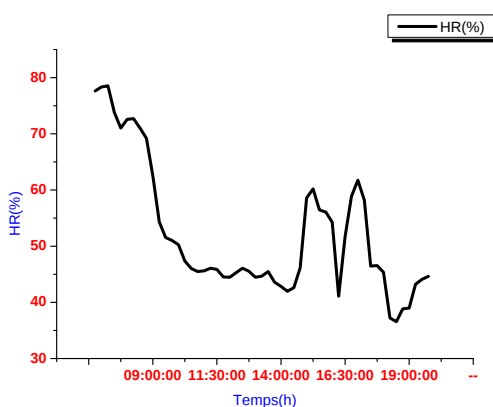
Graph 68: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (13/01/2013)



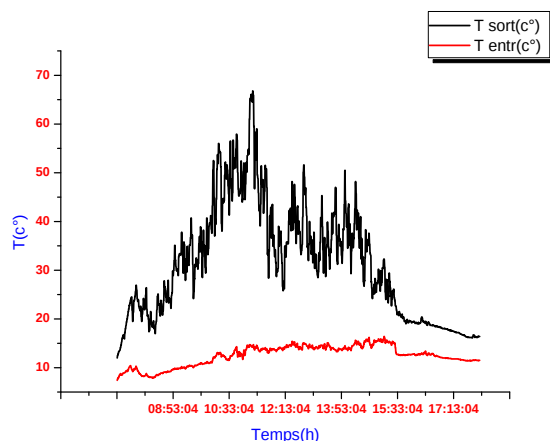
Graph 71: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (14/01/2013).



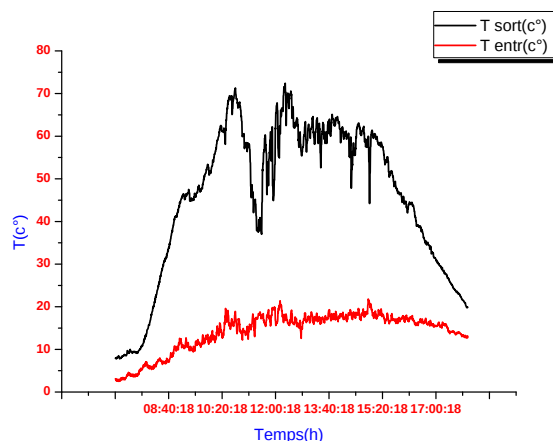
Graph 69 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (13/01/2013).



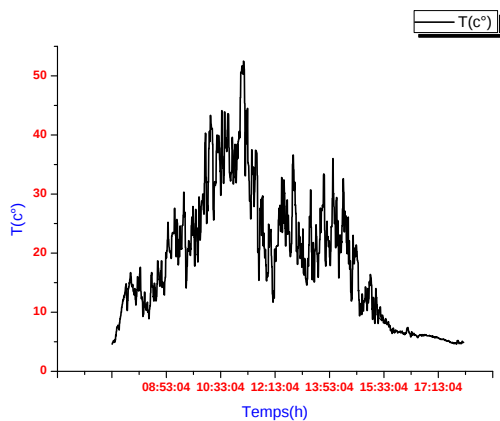
Graph 72: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (14/01/2013).



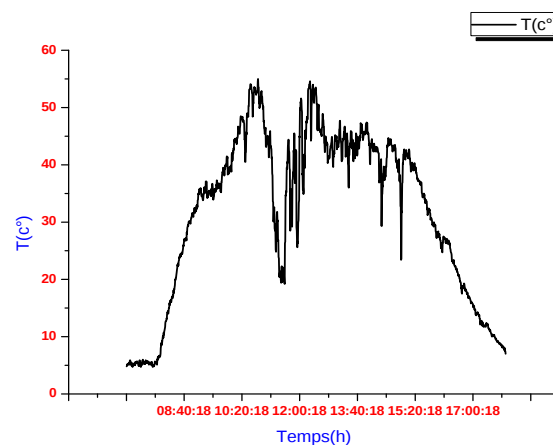
Graphe 73: la variation de la température pour la journée du (15/01/2013).



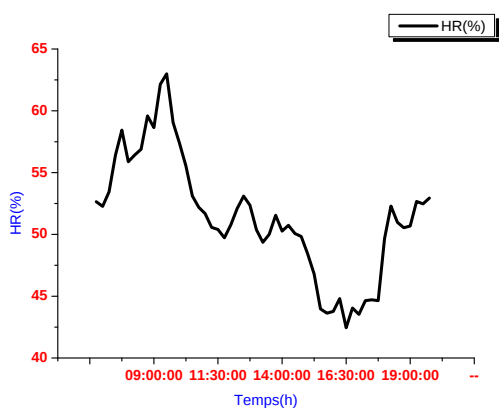
Graphe 76: la variation de la température pour la journée du (16/01/2013).



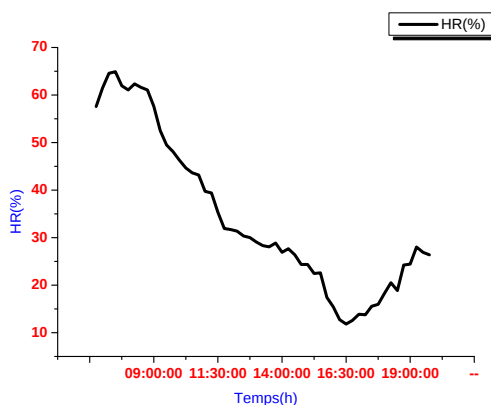
Graphe 74 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (15/01/2013).



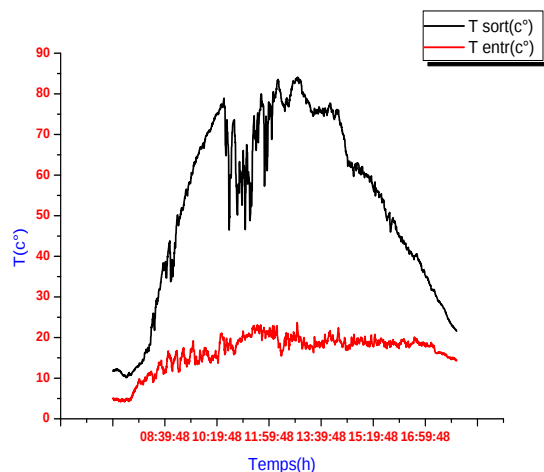
Graphe 77 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (16/01/2013).



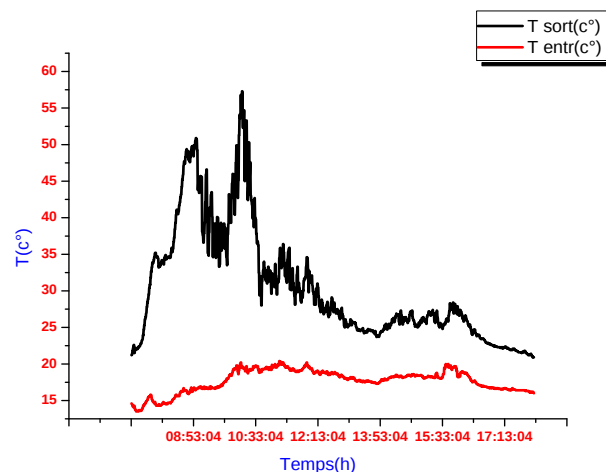
Graphe 75 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (15/01/2013).



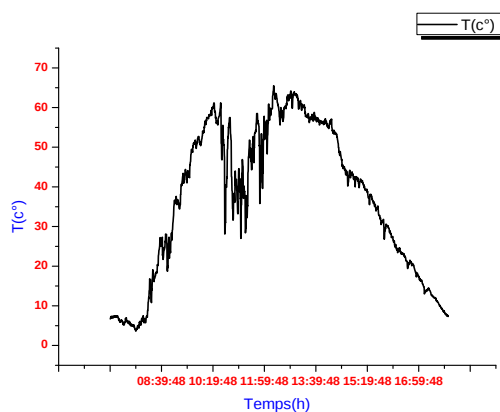
Graphe 78 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (16/01/2013).



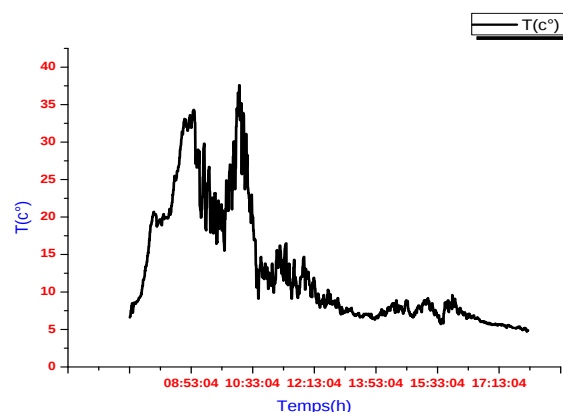
Graphe 79 : la variation de la température pour la journée du (17/01/2013).



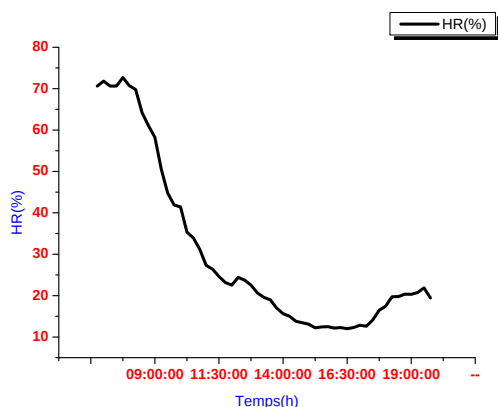
Graphe 82 : la variation de la température pour la journée du (18/01/2013).



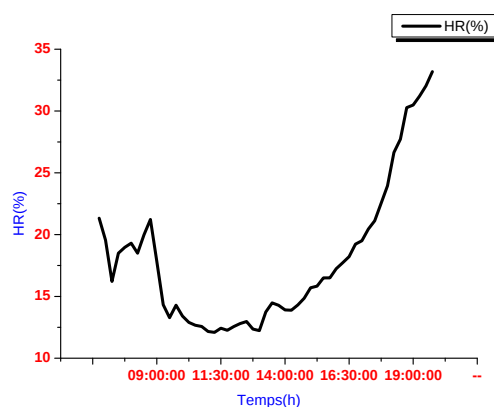
Graphe 80 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (17/01/2013).



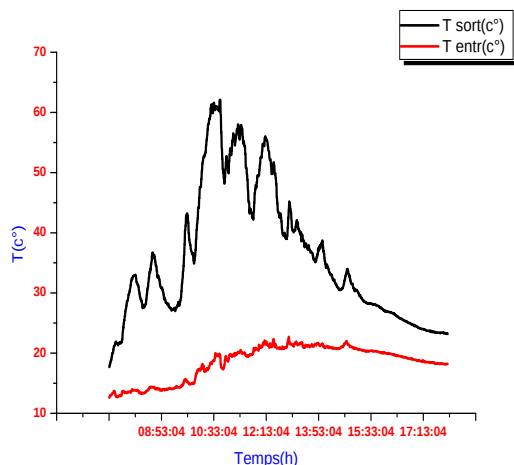
Graphe 83 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (18/01/2013).



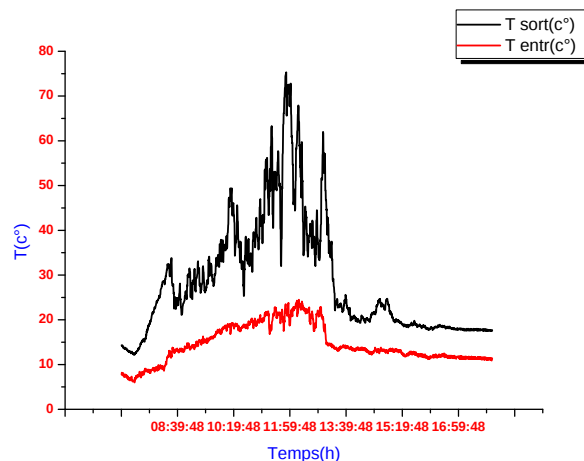
Graphe 81 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (17/01/2013).



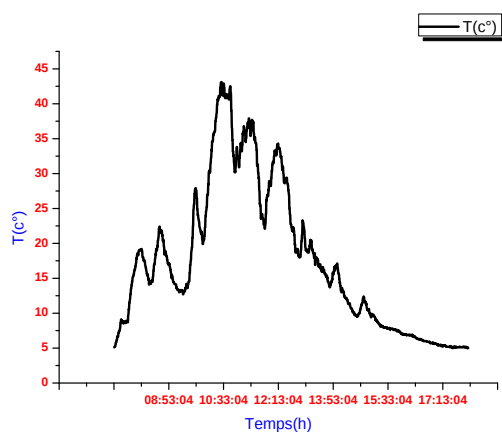
Graphe 84 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (18/01/2013).



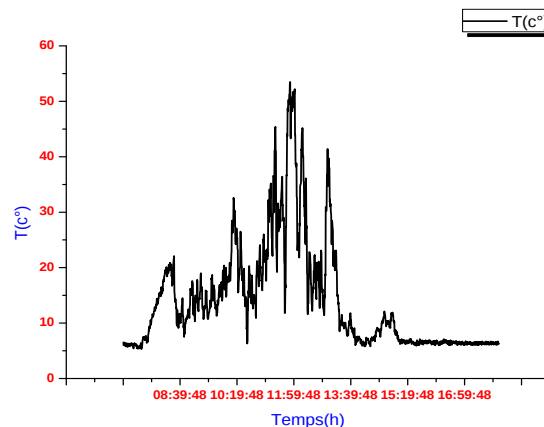
Graphe 85 : la variation de la température pour la journée du (19/01/2013).



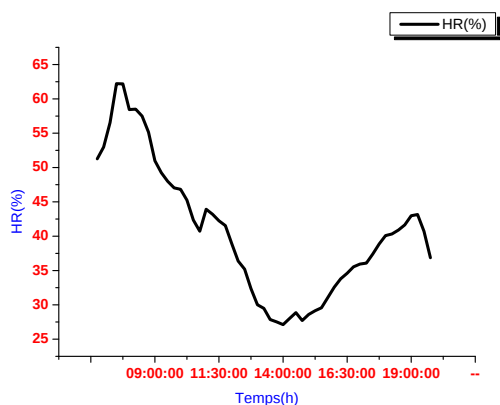
Graphe 88: la variation de la température pour la journée du (20/01/2013).



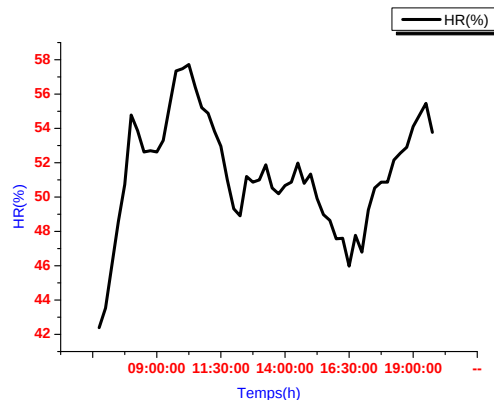
Graphe 86: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (19/01/2013).



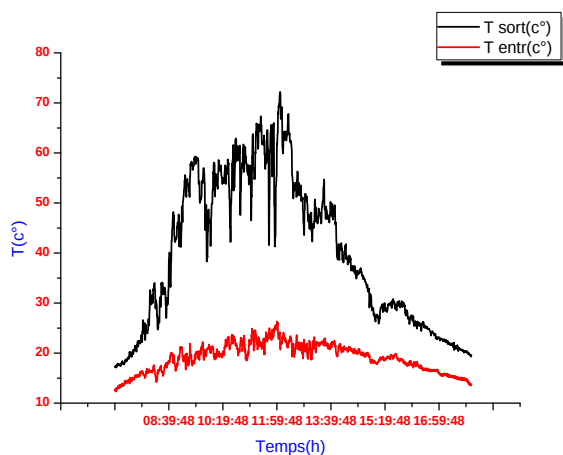
Graphe 89: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (20/01/2013).



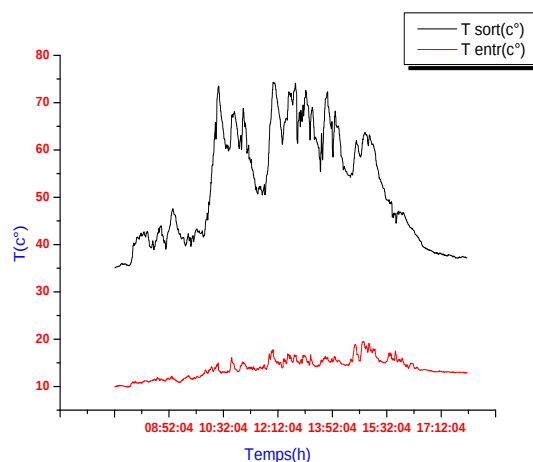
Graphe 87: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (19/01/2013).



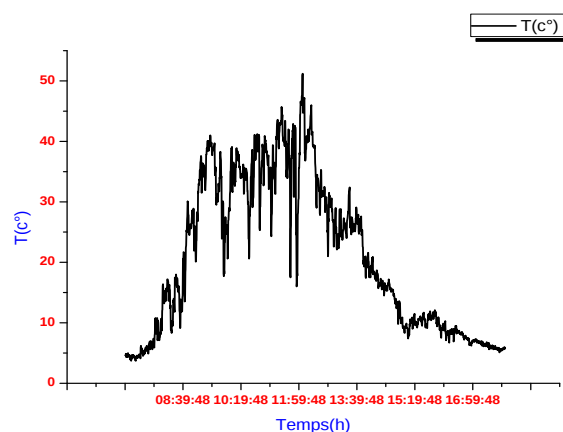
Graphe 90: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (20/01/2013).



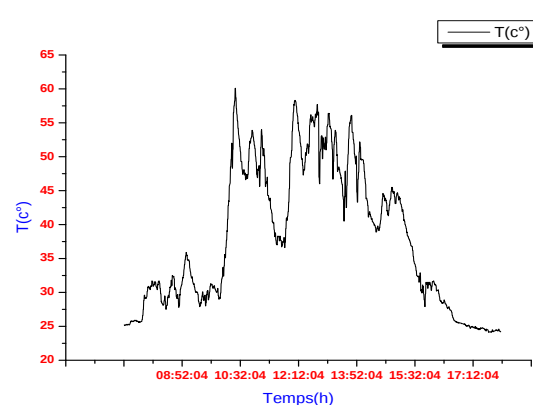
Graphe 91 : la variation de la température pour la journée du (21/01/2013).



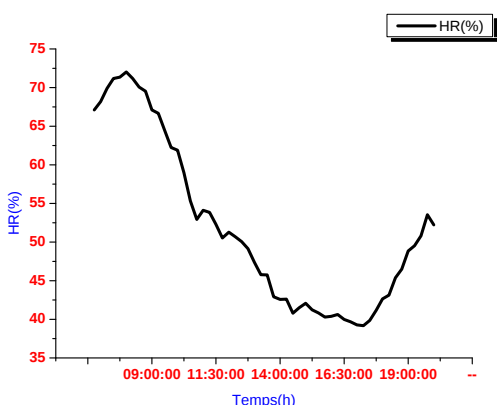
Graphe 94: la variation de la température pour la journée du (22/01/2013).



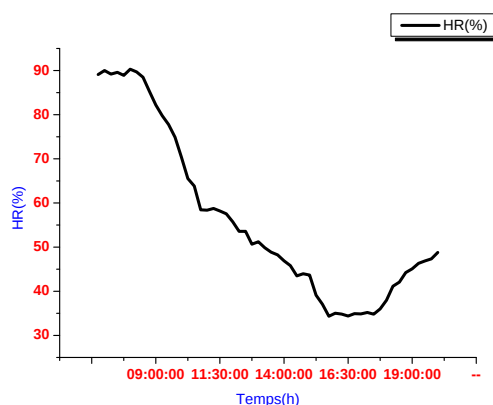
Graphe 92 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (21/01/2013).



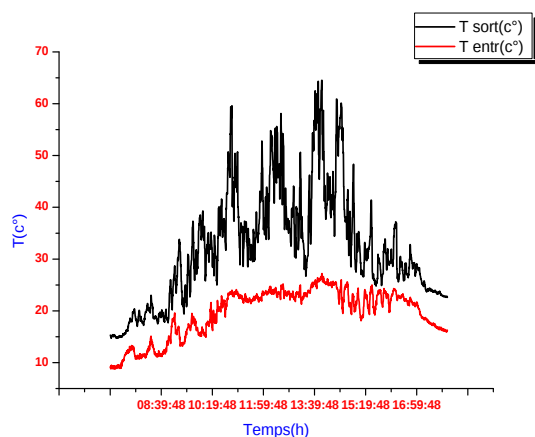
Graphe 95 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (22/01/2013).



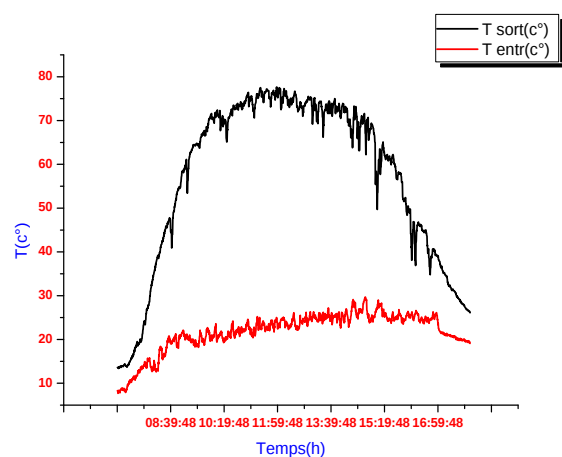
Graphe 93 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (21/01/2013).



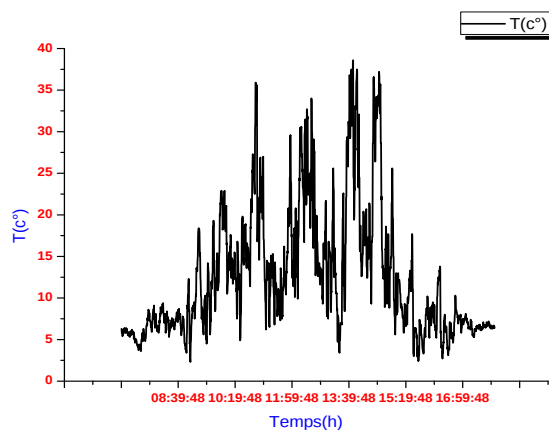
Graphe 96 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (22/01/2013).



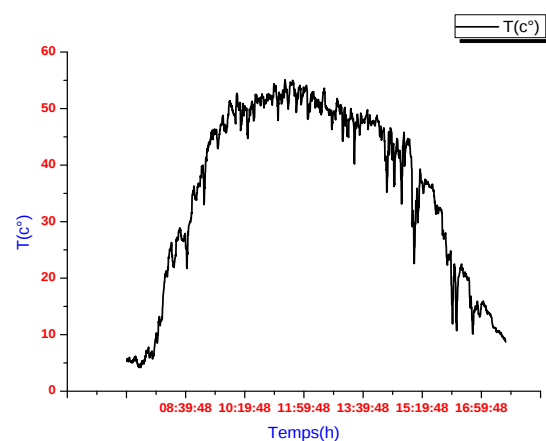
Graph 97: la variation de la température pour la journée du (23/01/2013).



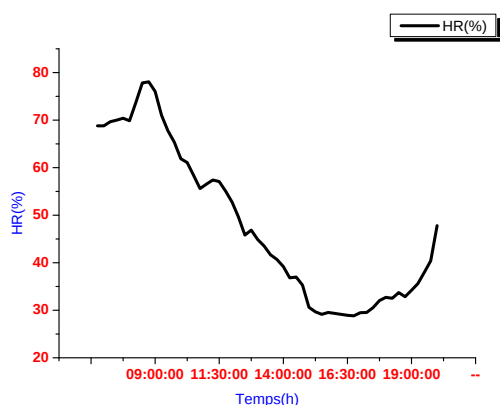
Graph 100: la variation de la température pour la journée du (24/01/2013).



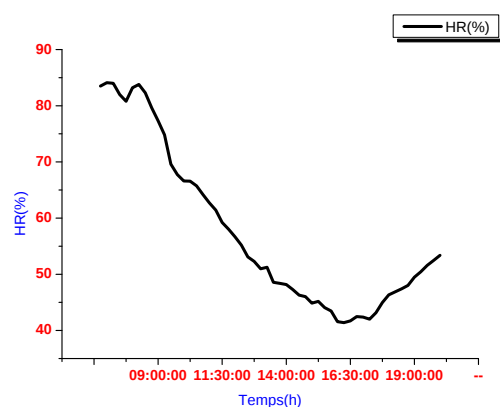
Graph 98: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (23/01/2013)



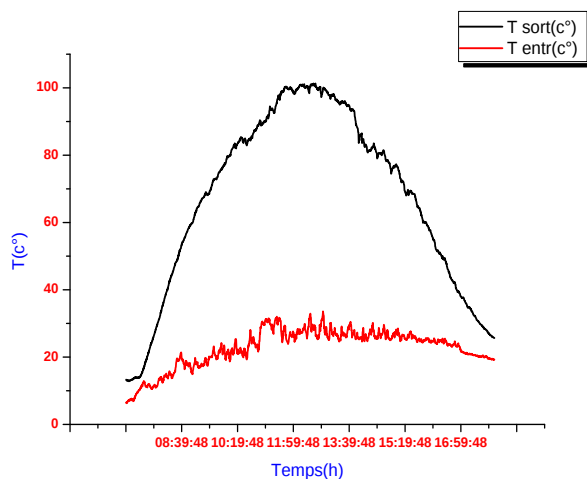
Graph 101 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (24/01/2013).



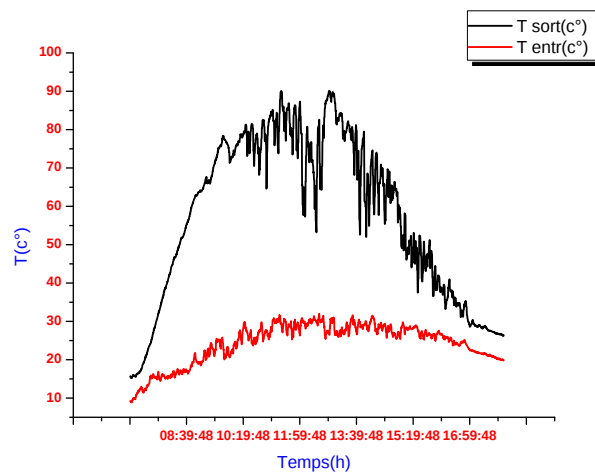
Graph 99: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (23/01/2013)..



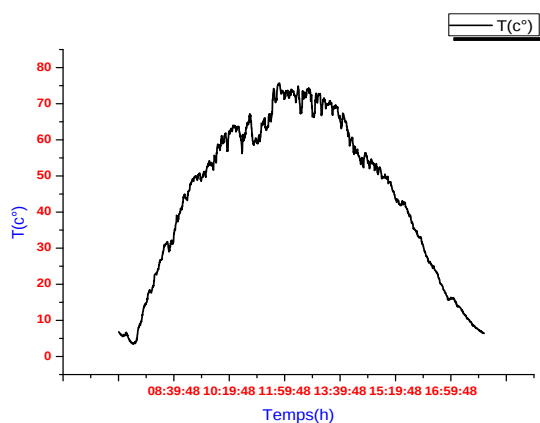
Graph 102: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (24/01/2013).



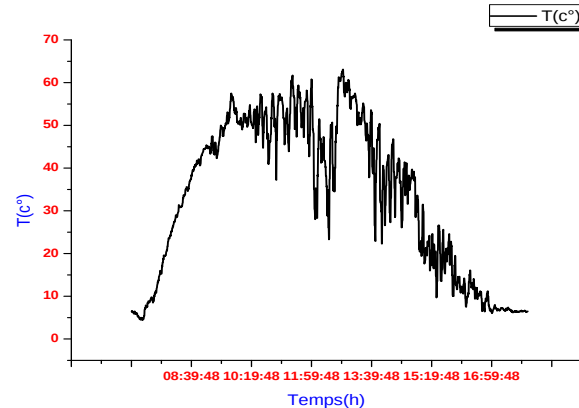
Graph 103 : la variation de la température pour la journée du (25/01/2013).



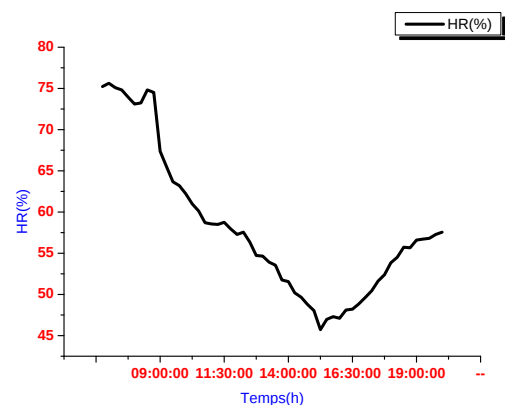
Graph 106 : la variation de la température pour la journée du (26/01/2013).



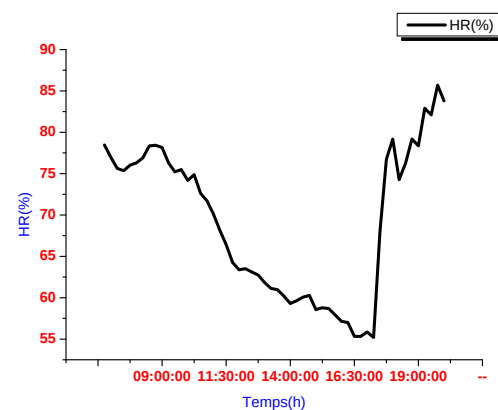
Graph 104 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (25/01/2013).



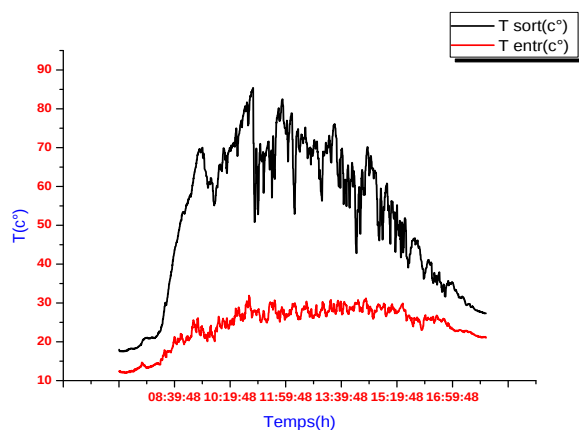
Graph 107 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (26/01/2013).



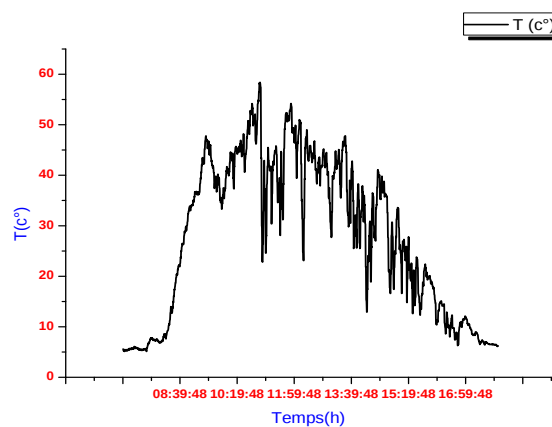
Graph 105: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (25/01/2013).



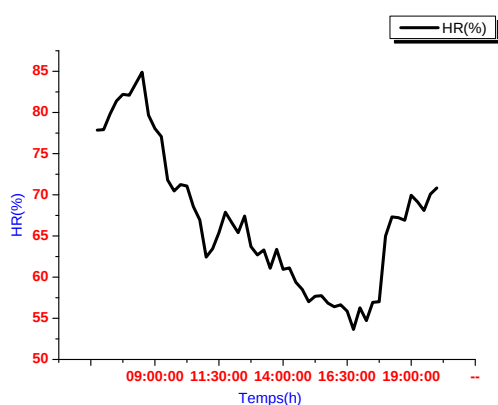
Graph 108: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (26/01/2013).



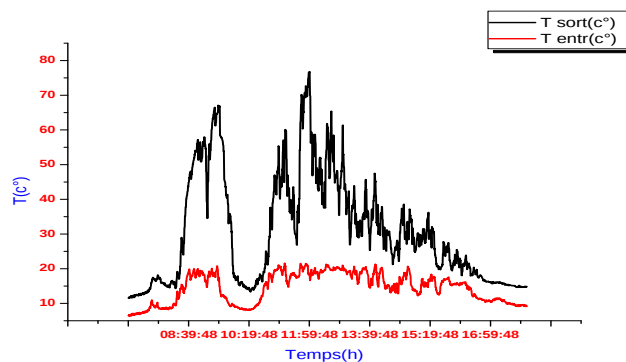
Graph 109 : la variation de la température pour la journée du (27/01/2013).



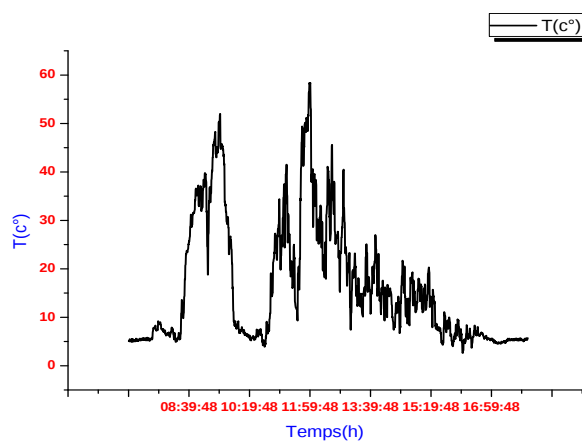
Graph 110: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (27/01/2013).



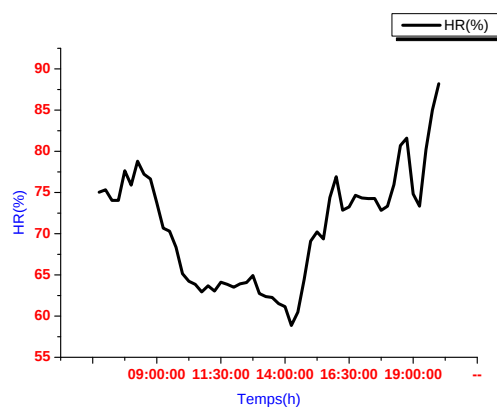
Graph 111 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (27/01/2013).



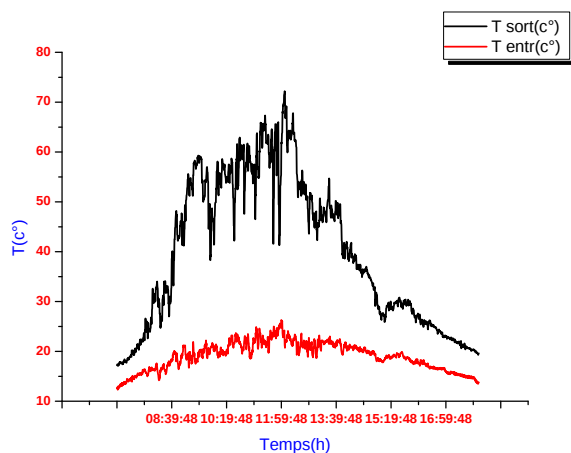
Graph 112: la variation de la température pour la journée du (27/01/2013).



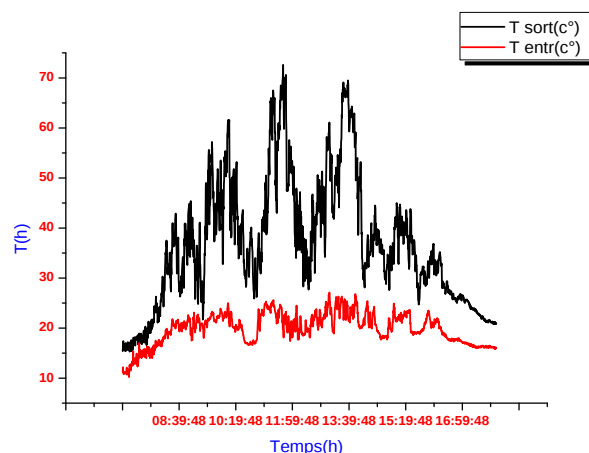
Graph 113: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (28/01/2013).



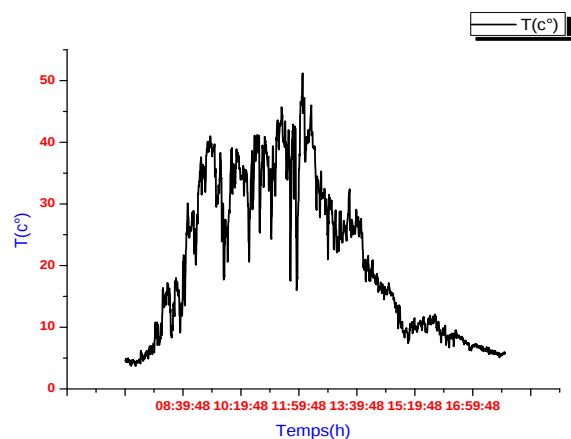
Graph 114 : la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (28/01/2013).



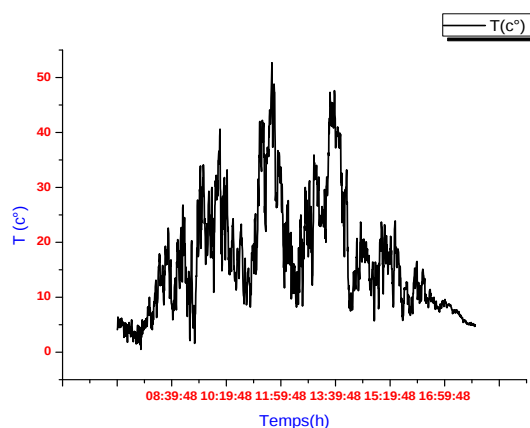
Graphe 115 : la variation de la température pour la journée du (29/01/2013).



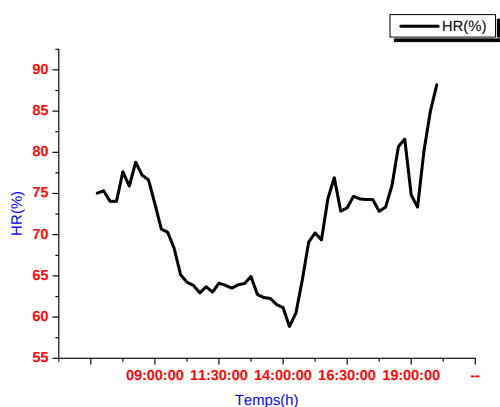
Graphe 118: la variation de la température pour la journée du (30/01/2013).



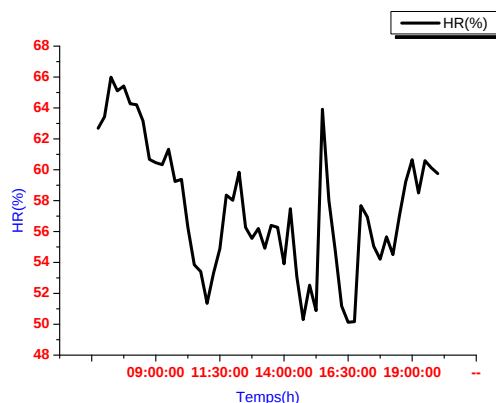
Graphe 116 : la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (29/01/2013).



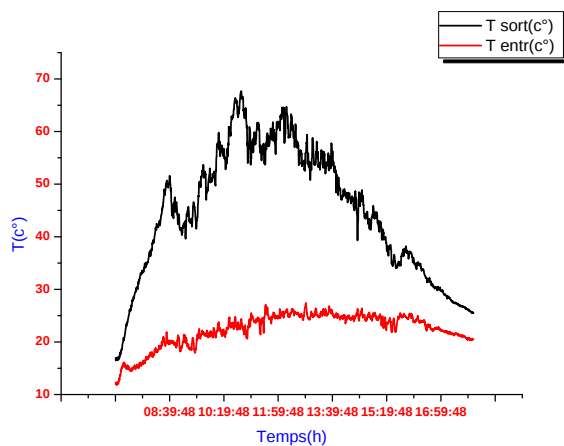
Graphe 119: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (30/01/2013).



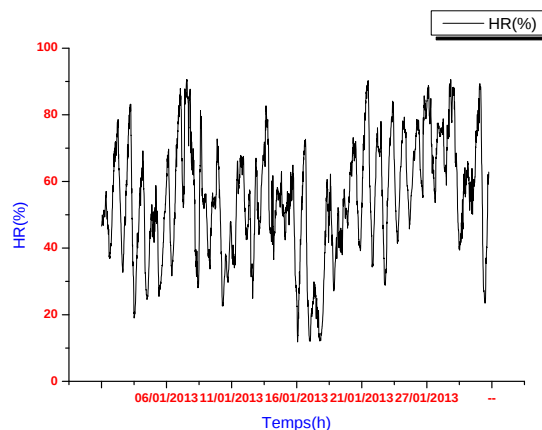
Graphe 117: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (28/01/2013).



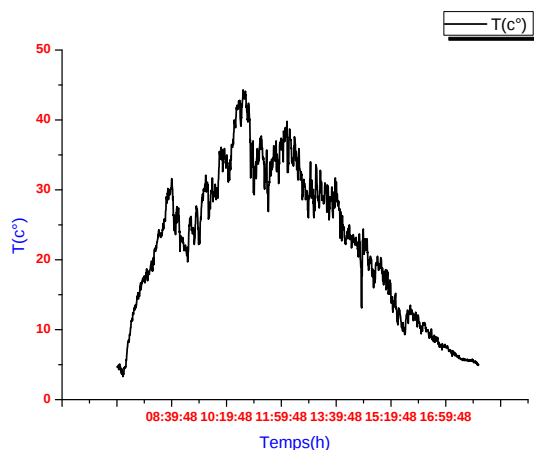
Graphe 120: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (30/01/2013).



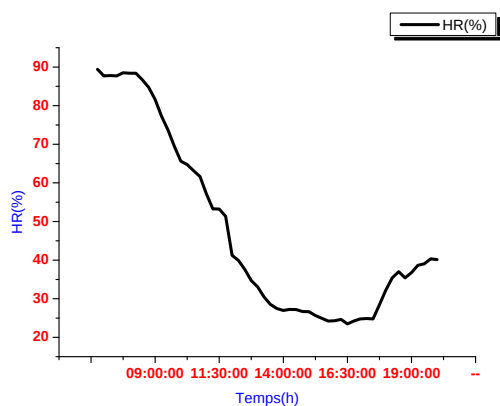
Graphe 121: la variation de la température pour la journée du (31/01/2013).



Graphe 124: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour le mois de janvier.



Graphe 122: la variation de l'écart entre la température d'entrée et la température de sortie pour la journée du (31/01/2013).



Graphe 123: la variation de l'humidité relative en fonction du temps pour la journée du (31/01/2013).

