

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université « SAAD DAHLAB » de BLIDA 01  
faculté de la technologie  
département des énergies renouvelables  
laboratoire LTSM



---

## THESE DE DOCTORAT TROISIÈME CYCLE

---

Specialité : Énergies Renouvelables

# Contribution a La Simulation Des Charges Thermiques Dans Un Habitat à Plancher Chauffant

présenté par  
LAAFER Abdelkader

Devant le Jury composé de :

<b>Membres de jury</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>	<b>Domiciliation</b>
N. BACHA	Professeur	Président	USDBLIDA 1
M. ROUDANE	MCA	Examineur	USDBLIDA 1
R. KHARCHI	MRA	Examinatrice	CDER
D. SEMMAR	Professeur	Rapporteur	USDBLIDA 1
A. HAMID	Professeur	Co-Rapporteur	USDBLIDA 1
M. BOUROUIS	Professeur	Invité	URV Espagne

Année universitaire 2021/2022

---

## REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au niveau du laboratoire LTSM (Laboratoire de traitement de Surface et Matériaux) faculté de la technologie Département des énergies renouvelables, de l'Université Saad DAHLAB Blida 1 Algerie et au faculté de chimie département de mécanique de l'Université de Rovira i Vergili Tarragona Espagne.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse le Professeur Djaffar SEMMAR de l'Université Saad DAHLAB Blida 1, dont j'ai apprécié son encadrement et sa disponibilité. Je le remerci en particulier pour la confiance qu'il m'a accordé, pour ses conseils qui m'ont beaucoup appris et qui m'ont orienté vers les méthodes de travail.

Egalement, je remercie infiniment mon co-rapporteur de thèse Professeur HAMID Abdelkader de l'Université Saad DAHLAB Blida 1 pour sa disponibilité et temps qu'il m'a consacré afin de m'aider à résoudre les difficultés rencontrées dans cette thèse et aussi pour l'enrichissement scientifique en thermique du bâtiment qu'il m'apporté.

Mes sincères remerciement et ma profonde gratitude, vont à mon Co-encadrant en Espagne dans le cadre de la bourse du programme national exceptionnel (PNE) le Professeur BOUROUIS Mahmoud de l'Université Rovira i Vergili Tarragona en Espagne, pour le bon encadrement, pour ses conseils ainsi que pour ses encouragements dans la réalisation de ce travail. J'aimerais souligner à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité, sa qualité humaine d'écoute et de compréhension ainsi que ses conseils éclairés tout au long de ce travail de recherche, surtout que la période était difficile (COVID 19).

Je tiens également à remercier les membres du jury et en particulier le président du jury Professeur BACHA Nacer de l'Université de Saad SAHLAB Blida 1, les examinateurs Docteur ROUDANE Morad de l'Université de Blida 1 et Docteur KHARCHI Razika de centre de recherche CDER pour avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je remerci ma collègue Marwa BENCHEKROUNE pour m'avoir aidé sur la partie de la rédaction et de m'avoir concacré autant de temps. Un grand merci à mes amis Thanina HAMMOUMA et Abdelkader BOUMAIZA pour leur soutien moral et pour leur aide apportés tout au long de ce travail.

Et enfin, un special remerciement à mes parents, j'adresse aussi à ma famille et mes proches pour leurs encouragements et leur soutien permanent.

---

## Résumé

Cette thèse porte essentiellement sur la modélisation de transfert de chaleur afin d'assurer un niveau acceptable de confort intérieur. Les résultats présentés dans cette contribution ont été obtenus dans le cadre d'un projet pilote dans lequel une maison économe en énergie a été construite sur un site situé à l'ouest d'Alger ( $36^{\circ}707'$  de latitude,  $2^{\circ}914'$  de longitude ; 137m d'altitude). L'objectif de l'étude est double : d'une part, construire une maison en utilisant les piliers fondamentaux de l'efficacité énergétique, à savoir (i) l'enveloppe de performance et (ii) une réglementation adéquate, en d'autre part, intégrer les sources d'énergie renouvelables qui, dans le contexte du nord de l'Algérie, ont été choisies pour présenter l'énergie solaire. Un aperçu du système choisi est également présenté. Un modèle théorique est établi, présentant la charge thermique pour la production de froid. Une simulation utilisant COMSOL a été développée pour déterminer la consommation d'énergie avec une isolation améliorée. Une erreur d'environ 2,32 % a été constatée entre les résultats expérimentaux et théoriques. Il pourrait s'agir d'un bon accord. Deux éléments ont une influence sur le transfert de chaleur du plancher chauffant, à savoir : la température moyenne du fluide dans la tuyauterie du circuit et la position de la tuyauterie par rapport à la surface supérieure du plancher.

Mots-clés : Modélisation COMSOL, Énergie des bâtiments, Transfert de chaleur, Énergie solaire, Efficacité énergétique, plancher chauffant, radiativité.

---

## **Abstract**

This thesis deals with modeling heat transfer in order to ensure an acceptable level of indoor comfort. The results reported in this contribution were obtained through a pilot project in which an energy efficient house was built on a site located west of Algiers (Latitude  $36^{\circ}707'$ , Longitude  $2^{\circ}914'$ ; Altitude 137m). The objective of the study is twofold; in one hand, to build a house using the fundamental pillars of energy efficiency namely (i) performance envelop and (ii) adequate regulation, and on the other hand, to integrate renewable energy sources which, in the context of northern Algeria, was chosen to be solar energy. An overview of the system is presented. A theoretical model is established discerning the thermal load for the cold production. A simulation using COMSOL was developed to determine the energy consumption with improved insulation. An error of about 2.32 % was noticed between experimental and theoretical results. It could be well-thought-out as a good agreement. Two elements have an influence on the heat transfer from the radiant floor to heating space, which are; the average fluid temperature across the circuit piping and the piping position from the upper surface of the floor.

Keywords : Modelling, COMSOL, Buildings energy, Heat transfer, Solar energy, Energy efficiency, heat floor, radiosity.

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة نمذجة نقل الحرارة من أجل ضمان مستوى مقبول من الراحة الداخلية. تم الحصول على النتائج الواردة في هذه المساهمة من خلال مشروع تجريبي تم فيه بناء منزل موفر للطاقة في موقع يقع غرب الجزائر العاصمة (خط العرض  $36^{\circ} 707'$ ، خط الطول  $2^{\circ} 914'$ ؛ الارتفاع 137 م). الهدف من الدراسة ذو شقين. من ناحية، لبناء منزل باستخدام الركائز الأساسية لكفاءة الطاقة وهي (1) غلاف الأداء و (2) التنظيم المناسب، ومن ناحية أخرى، لدمج مصادر الطاقة المتجددة التي تم اختيارها، في سياق شمال الجزائر لتكون طاقة شمسية. يتم تقديم لمحة عامة عن النظام. تم إنشاء نموذج نظري يميز الحمل الحراري للإنتاج البارد. تم تطوير محاكاة باستخدام COMSOL لتحديد استهلاك الطاقة مع تحسين العزل. لوحظ خطأ بنحو 2.32% بين النتائج التجريبية والنظرية. يمكن أن تكون مدروسة بشكل جيد كاتفاق جيد. هناك عنصران لهما تأثير على انتقال الحرارة من الأرضية المشعة إلى مساحة التدفئة، وهما؛ متوسط درجة حرارة السائل عبر أنابيب الدائرة وموضع الأنابيب من السطح العلوي للأرضية. الكلمات المفتاحية: النمذجة، COMSOL، طاقة المباني، نقل الحرارة، الطاقة الشمسية، كفاءة الطاقة، درجة الحرارة، الاختلاف، أرضية الحرارة، الإشعاع.

---

## Nomenclatures

<b>Nomenclature</b>	<b>Sense</b>	<b>Unité</b>
$\rho_s$	masse volumique	$[kg.m^{-3}]$
$\lambda$	conductivité thermique	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
$\alpha$	diffusivité thermique	$[m^2.s^{-1}]$
$C_p$	la chaleur spécifique	$[J.K^{-1}.kg^{-1}]$
R	resistance thermique	$[m^2.K.W^{-1}]$
$R_g$	resistance thermique glibale	$[m^2.K.W^{-1}]$
$U_g$	conductivité thermique globale	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
e	epaisseur	$[m]$
U	la vitesse	$[m.s^{-1}]$
t	temps	$[h]$
h	enthalpie	$[kg.kJ^{-1}]$
$T_{sim}$	température de la simulation[C]	
$T_{exp}$	température expérimentale[C]	
kg	kilogramme	
m	mètre	
W	Watts	
Wh	Watheure	
°C	degré celsuice	
K	Kelvin	
h	heure	
BTS	Brique de Terre Stabilisé	
ml	la fraction massique	
l	quantité	
$R_l$	la production par unité de volume	
dev	deviation	
div	divergence	
grad	gradium	
$\phi$	quantité physique quelconque	
S	le terme source	
MAE	Erreur moyenne absolue en pourcentage	
RMSD	l'écart quadratique moyen	

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>ii</b>
<b>Nomenclatures</b>	<b>v</b>
Liste des figures . . . . .	xii
Liste des tableaux . . . . .	xiii
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>2</b>
<b>1 Chapitre 1 : ETAT DE L'ART</b>	<b>6</b>
1.1 Introduction . . . . .	7
1.2 Habitat passif . . . . .	7
1.3 L'énergie solaire . . . . .	10
1.3.1 Origine . . . . .	10
1.3.2 Caractères particuliers . . . . .	10
1.3.3 Applications thermiques de l'énergie solaire . . . . .	12
1.4 Utilisation de l'énergie solaire dans le chauffage de l'habitat . . . . .	12
1.4.1 Historique du chauffage solaire . . . . .	12
1.4.2 Principe du chauffage solaire . . . . .	13
1.4.3 Le chauffage solaire de l'habitat . . . . .	14
1.5 Les différents systèmes de chauffage solaire de l'habitat . . . . .	15
1.5.1 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'air chaud . . . . .	15
1.6 Le capteur solaire . . . . .	15
1.7 Classification des capteurs . . . . .	16

---

1.7.1	Le fluide de travail utilisé . . . . .	16
1.7.2	L'orientation des capteurs . . . . .	17
1.7.3	Les types des composants . . . . .	19
1.7.4	L'absorbeur . . . . .	20
1.8	Principe du plancher solaire directe . . . . .	20
1.9	Composition d'un système solaire combiné . . . . .	21
1.10	Le stockage thermique . . . . .	22
1.11	L'appoint . . . . .	24
1.12	Avantages et inconvénients du plancher chauffant . . . . .	24
1.12.1	Avantages . . . . .	24
1.12.2	Inconvénients . . . . .	26
1.13	Caractéristiques du plancher chauffant . . . . .	26
1.14	Les équipements terminaux intérieurs et leurs caractéristiques . . . . .	28
1.15	Systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement hydronique . . . . .	29
1.16	Les systèmes à air . . . . .	31
1.16.1	Ventilation (beams) . . . . .	31
1.16.2	Ventilations passives . . . . .	32
1.16.3	Ventilations actives . . . . .	32
1.16.4	Ventilation mixte . . . . .	33
1.16.5	La ventilation par déplacement . . . . .	34
1.16.6	La ventilation personnalisée . . . . .	35
1.16.7	Ventilo-convecteurs . . . . .	36
1.17	Présentations les travaux récents . . . . .	37
1.18	Conclusion . . . . .	57
<b>2</b>	<b>Chapitre 2 : PRESENTATION DU CAS D'ETUDE</b>	<b>58</b>
2.1	Introduction . . . . .	59
2.2	Description du cas d'étude . . . . .	59
2.3	Présentation de la maison . . . . .	59
2.4	Description du dispositif de chauffage . . . . .	61
2.4.1	Schéma général du dispositif . . . . .	61
2.4.2	Stratégie de construction durable . . . . .	64



2.4.3	Principe de fonctionnement de l'installation . . . . .	65
2.4.4	Caractéristique du tube utilisé . . . . .	66
2.5	L'emplacement de la tyauterie dans la maison . . . . .	68
2.6	Caractéristiques des matériaux de construction . . . . .	69
2.6.1	Matériaux de construction . . . . .	70
2.7	Consommation énergétique de l'habitat . . . . .	73
2.8	Contexte et enjeux de l'efficacité énergétique dans le bâtiment . . . . .	73
2.8.1	La conception bioclimatique des bâtiments . . . . .	74
2.9	Présentation du climat Algérien (Alger) . . . . .	75
2.10	Conclusion . . . . .	76
<b>3</b>	<b>Chapitre 3 : MODELISATION ET SIMULATION</b>	<b>77</b>
3.1	Introduction . . . . .	78
3.2	Méthode de calcul . . . . .	78
3.2.1	Démarche éléments finis . . . . .	78
3.3	Description du logiciel . . . . .	82
3.4	Procédure de simulation . . . . .	83
3.5	L'interface graphique (le navigateur de modèle) . . . . .	83
3.5.1	Choix du modèle . . . . .	84
3.5.2	Introduction des propriétés des domaines . . . . .	85
3.5.3	Conditions aux limites . . . . .	86
3.5.4	Le maillage . . . . .	86
3.5.5	Résolution du problème . . . . .	87
3.5.6	Analyse des résultats . . . . .	88
3.6	Modèle mathématique . . . . .	88
3.6.1	Equations de conservation . . . . .	88
3.6.2	Echange radiatif d'un corps grise . . . . .	93
3.7	Conclusion . . . . .	94
<b>4</b>	<b>Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	<b>95</b>
4.1	Introduction . . . . .	96
4.2	Procédure de la résolution . . . . .	96

---

4.3	Validation de la simulation avec des données expérimentales . . . . .	97
4.3.1	Calcul D'erreur . . . . .	99
4.4	Résultats de la simulation . . . . .	100
4.4.1	CFD Profils de température pendant le chauffage du plancher chauffant	100
4.4.2	Effet de la température du fluide caloporteur sur la température de l'air ambiant . . . . .	106
4.4.3	Effet de la température du fluide chauffant sur la radiativité de surface du sol . . . . .	109
4.5	Conclusion . . . . .	114
	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>116</b>
	<b>ANNEXE</b>	<b>126</b>
	<b>ARTICLE</b>	<b>128</b>

# Table des figures

1.1	Schéma des différents utilisation de l'énergie solaire . . . . .	11
1.2	exemple capteur solair a air [1] . . . . .	16
1.3	exemple capteur solair a eau [2] . . . . .	17
1.4	exemple capteur solair fix [3] . . . . .	18
1.5	exemple capteur solair poursuit[4] . . . . .	19
1.6	exemple capteur solair plan [2] . . . . .	20
1.7	Caracteristique du plancher chauffant [5] . . . . .	21
1.8	Système solaire combiné [6] . . . . .	22
1.9	Répartition de la température avec plancher chauffant[5] . . . . .	25
1.10	esthétique du plancher chauffant [5] . . . . .	25
1.11	exepmple d'une ventilation passive [7] . . . . .	32
1.12	exepmple d'une ventilation active [8] . . . . .	33
1.13	exemple ventilation mixte [9] . . . . .	34
1.14	ventilation par déplacement entre deux zones déferentes [10] . . . . .	35
1.15	exepmple d'une ventilation personnalisée [11] . . . . .	36
1.16	exemple des ventilo-convecteurs [60] . . . . .	37
2.1	La maison Prototype . . . . .	60
2.2	Plan architectural de la maison pilote . . . . .	61
2.3	schéma descriptif de l'installation . . . . .	64
2.4	La mise en place des fenètres a double vitrage . . . . .	65
2.5	tube multicouche . . . . .	66
2.6	Quelques emplacements des escargots en PE-Xc/AL/PE-Xc . . . . .	67
2.7	Distribution de l'escargot dans le séjour . . . . .	68

2.8	Emplacement de l'escargot dans le séjours . . . . .	69
2.9	Les murs extérieurs avec isolation . . . . .	72
3.1	Comsol Multiphysics . . . . .	82
3.2	Définition Dimension d'espace . . . . .	84
3.3	Définition la physique d'étude . . . . .	84
3.4	Définition de la géometrie . . . . .	85
3.5	Définition des domaines . . . . .	86
3.6	Définition de maillage . . . . .	87
3.7	calcules les résultats finaux . . . . .	88
3.8	variation du flux suivant x, y, z . . . . .	89
4.1	Maillage tétraédrique . . . . .	97
4.2	Comparaison entre la simulation et les profils expérimentaux de température de l'air ambiant pendant le processus de chauffage . . . . .	98
4.3	Comparaison entre les profils de température théorique et expérimental de l'air ambiant entre les périodes de 72 h et 132 h . . . . .	98
4.4	Distribution de la température de l'air sur 132 h pour une température du fluide du plancher chauffant de 40 °C et une hauteur de 50 cm . . . . .	101
4.5	CFD Gradient de l'isotherme de température de l'air local dans le séjours . . . . .	102
4.6	CFD Gradient de température de l'air local dans le séjours . . . . .	103
4.7	CFD de la variation de la vitesse de l'air local dans le séjours . . . . .	104
4.8	CFD de la variation de la pression de l'air local dans le séjours . . . . .	105
4.9	La variation de la température de l'air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur. . . . .	107
4.10	La variation de la température de l'air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 30°C et début $D=12.75 \text{ W/m}^2$ . . . . .	107
4.11	La variation de la température de l'air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 35°C et début $D=14.87 \text{ W/m}^2$ . . . . .	108
4.12	La variation de la température de l'air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 40°C et début $D=17 \text{ W/m}^2$ . . . . .	108

4.13	La variation de la température de l'air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 45°C et débit $D=19.125 \text{ W/m}^2$ . . . . .	109
4.14	La variation de la température de l'air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 50°C et débit $D=21.25 \text{ W/m}^2$ . . . . .	109
4.15	Radiosité surfacique en fonction du temps à différentes températures du fluide caloporteur. . . . .	110
4.16	Radiosité surfacique en fonction de la température de l'air à différentes températures du fluide caloporteur. . . . .	110
4.17	La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l'air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 30°C et débit $D=12.75 \text{ W/m}^2$ .	111
4.18	La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l'air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 35°C et débit $D=14.87 \text{ W/m}^2$ .	111
4.19	La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l'air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 40°C et débit $D=17 \text{ W/m}^2$ .	112
4.20	La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l'air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 45°C et débit $D=19.125 \text{ W/m}^2$ . . . . .	112
4.21	La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l'air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 50°C et débit $D=21.25 \text{ W/m}^2$ .	113
4.22	Radiosité en 3D en fonction du temps et de la température de l'air. . . . .	113
4.23	Radiation . . . . .	128
4.24	Température . . . . .	129
4.25	Precipetation . . . . .	129
4.26	Durée d'ensoleillement . . . . .	130
4.27	Irradiation Globale . . . . .	130
4.28	Les Températures Max et Min dans la Journée . . . . .	131
4.29	La variation des défférents paramètres . . . . .	131

# Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques thermophysiques des composants du plancher haut . . . . .	70
2.2	Caractéristiques thermophysiques des composants du plancher bas . . . . .	70
2.3	Caractéristiques thermophysiques des composants du mur . . . . .	71
2.4	Composition des ouvertures des locaux chauffés de chaque façade . . . . .	73
2.5	Caractéristiques thermophysiques des composants du plancher bas . . . . .	74
4.1	Écarts de température entre les résultats de la simulation et les données expérimentales . . . . .	99
4.2	Les piques de température entre les résultats de la simulation et les données expérimentales . . . . .	99

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Dans ce travail on met l'accent sur l'actualité qui fait référence au monde du bâtiment, qui entre dans une ère nouvelle, allant jusqu'à l'échelle mondiale, le secteur du bâtiment est responsable de plus de 40 % de la consommation d'énergie produite dans le monde, et de plus de 30 % de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre. 40 % de la masse de la population mondiale est toujours sans électricité en conséquence de la consommation mondiale d'énergie, restée stable pendant très longtemps alors que le monde ne l'utilisait que pour ses propres besoins énergétiques soit électriques ou bien thermiques.

L'énergie est au cœur de nombreux problèmes mondiaux et locaux en termes d'efficacité de production et de pollution [12]. Le bâtiment n'échappe pas à cette règle puisque ce secteur est le plus grand consommateur d'énergie en Algérie avec 45,5 % du total de l'énergie produite, suivi du secteur des transports avec 27,7 % et enfin du secteur industriel avec 26,8 % [13].

Sachant que, la consommation d'énergie finale par habitant est de 0.48 TEP en 1990, son évolution passera de 0.71 TEP en 2000 à 1.35 TEP en 2010 et à 1.88 TEP en 2020 [13].

La consommation du gaz naturel a démarré en 1961 au rythme de 156 millions de  $m^3$ , et elle atteint 1.4 milliards de  $m^3$  en l'an 2000 [13]. En 2019, l'Algérie a consommé 45,2 milliards de  $m^3$  de gaz naturel, en progression de 4,2 % en 2019 et de 73 % depuis 2009.

Pour toutes ces raisons citées, l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment, par une isolation renforcée doit être envisagée avec un meilleur traitement des ponts thermiques favorisant une diminution des besoins thermiques en climatisation et en chauffage. En outre la recherche doit porter sur des systèmes de chauffage du bâtiment performants afin de maîtriser les ambiances habitables à un moindre coût énergétique. En effet le maintien de l'ambiance est confié au système de chauffage dont la qualité dépend fortement de la conception, du dimensionnement et de la mise en œuvre de l'installation. En même temps, le développement technologique dans le domaine du chauffage actuel doit aller dans le sens de la réduction de l'impact environnemental négatif par l'utilisation des sources d'énergies renouvelables pour assurer la sécurité de nos approvisionnements énergétiques face à l'épuisement des ressources d'énergie fossile.

Le plancher chauffant est largement utilisé pour son efficacité énergétique, son confort et sa polyvalence [14],[15],[16]. Comparé au chauffage à air pulsé, il nécessite moins d'énergie car la chaleur rayonnante est directement transférée aux personnes [17]. Son efficacité peut être encore accrue lorsqu'il est combiné à des mesures d'économie d'énergie telles que les matériaux



à changement de phase [18] pour les murs, par exemple le MCP [19],[20], les panneaux solaires passifs [21],[22], et la biomasse comme source de combustible [23]. Cependant, il existe des limites à la température du plancher pour le confort individuel et pour éviter la condensation. Par exemple, la limite supérieure de la température du plancher est d'environ 29 °C [14].

Généralement, la convection est employée, et dépend de la taille relative de la convection et du rayonnement pour un cas spécifique. En conséquence, il serait utile de disposer d'un moyen simple pour déterminer les contributions relatives du rayonnement et de la convection du chauffage par le plancher. [24]

Notre travail traite d'un problème physique concernant le comportement thermique dans un habitat chauffé par un plancher chauffant direct sur le confort thermique des bâtiments, de ce fait nous nous proposons de décrire d'une manière concise le comportement thermique dynamique de l'air intérieur ainsi le phénomène de la convection naturelle et son influence sur la radiosité surfacique du plancher chauffant ainsi que la vérification du couplage de ces deux phénomènes et de ce qu'ils peuvent engendrer.

Ce travail étudie l'influence de la radiosité surfacique dans les systèmes de chauffage par plancher chauffant sur le confort thermique dans les bâtiments. Une analyse est faite des effets individuels et combinés de la radiosité surfacique et de la convection naturelle du flux d'air à l'intérieur des pièces en ce qui concerne le confort thermique. Le comportement de la radiosité surfacique dans les bâtiments, est analysé en fonction du temps. Pour atteindre ces objectifs, une étude théorique d'un système de chauffage par le plancher chauffant dans une maison pilote a été réalisée et validée théoriquement avec logiciel COMSOL avec les données expérimentales d'un projet pilote rapporté par [25].

Pour approuver ce phénomène de couplage entre la convection et la radiosité de surface, il est nécessaire d'analyser le comportement de la radiosité en fonction de la température de l'air et du temps. Ce phénomène est nouveau et n'a pas encore été développé ailleurs auparavant. Dans ce chapitre nous allons aborder la problématique de notre aspect de recherche, ou l'on établira des hypothèses et des objectifs à notre travail de recherche, nous avons également présenter la méthodologie de recherche choisie pour élaborer cette étude.

L'énergie finale consommée par le secteur du bâtiment ont servi à satisfaire (principalement) aux besoins thermiques et électriques et ont généré près de 25 % de  $CO_2$  à cause de la combus-

tion (principalement) de fioul et de gaz naturel pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS).

Le travail développé dans cette thèse porte essentiellement sur la modélisation et le dimensionnement d'un système de chauffage solaire par plancher dont l'apport d'énergie est assuré par un capteur solaire, le principe de la technique du plancher solaire direct, étant de faire circuler directement dans un plancher un fluide chauffé par des capteurs solaires sans utiliser des cuves de stockage intermédiaires. Donc dans notre recherche on se base sur la vérification de l'influence des charges thermiques sur le confort thermique de la maison, la problématique principale de cette recherche étant l'influence du couplage de la convection de l'air sur la radiativité surfacique du plancher chauffant, et de connaître le type de phénomène qui influe sur l'autre, ce qui nous amène à nous poser la question suivante ; est ce que c'est la convection qui influe sur la radiativité ou c'est l'inverse, en vue de minimiser la surchauffe et de vérifier la qualité du confort thermique à l'intérieur de la maison.

La simulation du fonctionnement de l'habitat est effectuée en utilisant la notion des journées types et les données météorologiques de la même période de l'expérimental (2009-2011) de la ville de Soudania Alger Algérie.

La problématique présentée nous est basée sur certaines hypothèses :

- 1- Le changement du débit de fluide caloporteur par l'eau peut modifier la température du plancher chauffant.
- 2- L'impact de la convection naturelle sur le flux radiatif, peut influencer sur l'augmentation de température.

Ce travail de recherche, a pour objectif de :

- 1- Améliorer le confort thermique à l'intérieur des chambres chauffées par le plancher chauffant.
- 2- Évaluer la température adéquate du fluide caloporteur afin d'assurer un confort optimal
- 3- Déterminer la valeur optimale du flux radiatif présentée par la radiativité surfacique pour assurer un meilleur confort thermique.
- 4- Étudier la relation du couplage de la convection sur la radiativité surfacique et son impact sur le comportement thermique de l'habitat.

Notre thèse est organisée en quatre chapitres bien distincts constituant les différentes parties qui composent ce travail de recherche :

Introduction ; il est consacré par une introduction de cette thèse, on y développe la problématique de notre recherche, les hypothèses, les objectifs ainsi que l'intérêt que nous portons à notre thème de recherche.

1eme chapitre ; il est intéressé que les généralités sur les différents types du système actif surtout le plancher chauffant solaire direct et son intégration dans l'habitat et aussi on a basé sur une étude bibliographique sur les travaux récents sur le mode de chauffage par plancher chauffant.

Le 2ème chapitre : il est consacré à la présentation de la maison pilote, les différentes étapes suivies lors de la réalisation de la maison, les matériaux utilisés et leur propriétés thermophysiques, l'orientation de la maison et l'emplacement du serpentín dans la dalle de compression et le modèle météorologique du site intéressé .

Le 3ème chapitre : est réservé pour une présentation du logiciel de simulation utilisé est les différentes étapes suivies lors de la simulation ; avec un petit rappel sur les équations de conservation et les équations de la radiativité surfacique.

Le 4ème chapitre on présente la validation de notre modèle avec le travail expérimental, après on a présenté les différents résultats obtenus à partir de la simulation avec Comsol Multiphysiques 5.3, et confirmé notre nouveauté de la recherche dans la littérature scientifique à l'échelle mondiale.

Et on finalise notre travail par une conclusion générale sur notre travail de recherche et confirmation de notre hypothèse de recherche, et proposition des perspectives pour les prochains travaux de la recherche dans le même domaine.

## **Chapitre 1**

# **Chapitre 1 : ETAT DE L'ART**

## 1.1 Introduction

Dans la littérature scientifique y'a plusieurs chercheurs se sont intéressés par la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment pour cela dans ce chapitre on a présenté la maison passive et après on a traité les différents systèmes de l'intégration dans la maison active, surtout l'intégration du plancher chauffant et les différents types de la ventilation, a la fin de ce chapitre on a analysé les différents recherches qui sont intéressées par l'intégration du plancher chauffant dans l'habitat soit a l'échelle mondial ou bien national

## 1.2 Habitat passif

Un bâtiment est dit « passif » s'il est construit en essayant de profiter des atouts de son environnement extérieur (vent, température, ensoleillement) sur le plan énergétique. Grâce à son inertie thermique, par l'utilisation de matériaux à chaleur massique élevée, il procure des ambiances climatiques stables à l'intérieur pour des grandes variations climatiques extérieur. Le besoin énergétique se fera faiblement sentir. Le recours aux appareils de conditionnement climatique (chauffage /climatisation) ne doit être envisagé que dans un deuxième temps si les conditions de confort l'imposent.

L'utilisation des énergies renouvelables suscite de plus en plus d'intérêt dans le monde. La diminution des réserves mondiales en pétrole et en gaz, les problèmes environnementaux ont amené beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables et propres, telles que l'énergie solaire. Cette énergie est l'une des plus facilement exploitables.

Une maison passive est une maison qui utilise peu d'énergie pour demeurer confortable, à long terme. Sa structure permet de maximiser le rayonnement solaire, qui réchauffe les objets, les planchers, les murs, ce qui permet de réduire les besoins de chauffage en hiver.

C'est son orientation, sa structure, son isolation thermique et son étanchéité qui lui permettent de réduire ses besoins en chauffage de manière significative. Il existe différents types de maisons dites « passives » et le concept évolue en même temps que les connaissances humaines, entraîné par l'expérimentation et la recherche.

Elle a recours à l'énergie solaire, renouvelable, accessible à tous. La consommation passive de cette énergie est sans conséquence sur l'environnement. Par ailleurs, elle génère peu de gaz à effet de serre. Les systèmes de chauffage au charbon, au mazout, au gaz ou à l'électricité issue

de centrales thermiques consomment l'énergie de sources fossiles (exploitation + utilisation) qui émettent des gaz à effet de serre.

L'habitat passif possède 6 leviers différents, qui permettent tous d'effectuer des économies d'énergie et passer d'un logement énergivore à un habitat respectueux des ressources environnementales. Voyons plus en détail ces leviers :

### **Les ponts thermiques**

une bonne isolation thermique d'un logement passe par la suppression des ponts thermiques. Ces derniers correspondent à la jointure entre 2 types de matériaux, qui peut alors causer une perte de chaleur et favorisées par certains emplacements spécifiques dans la construction

### **L'étanchéité de l'air**

assurer une bonne étanchéité de l'air permet d'améliorer la durabilité de l'isolation et de l'habitat en général. Généralement, un test d'infiltrométrie est effectué, en ciblant particulièrement les portes-fenêtres, baies vitrées, et toute autre surface d'où la chaleur pourrait s'échapper. En moyenne, un habitat passif est 5 fois plus étanche qu'une maison classique. Les fuites ne doivent pas dépasser 0,6 fois le volume de la maison par heure, à une pression égale à 50Pa.

### **La ventilation**

puisque une maison passive est étanche, il faut faire attention à ce que l'air circule bien et se renouvelle. C'est pourquoi il est nécessaire d'installer un système de ventilation à double flux. La ventilation nocturne est aussi très importante pour éviter les surchauffes en été ou dans les régions chaudes de France. Pour refroidir l'air de la ventilation de nuit, un récupérateur de chaleur doit être activé en journée. Notons aussi que les besoins annuel en chauffage doivent être inférieur à 15kWh.

### **L'énergie solaire**

clé pour les habitats passifs, un système de production d'énergie solaire permet de recueillir et redistribuer la chaleur. C'est ce qui permet notamment au logement d'être indépendant des

sources externes d'énergie. Cela permet également de réguler la température intérieure et d'alimenter les différents appareils électriques.

### **Les appareils ménagers économes**

avoir une construction passive avec des appareils énergivores serait totalement contre productif. Les appareils doivent utiliser peu d'électricité. Certains fournisseurs développent même des gammes de produits spécialement conçues pour les habitats passifs, pour répondre à leurs besoins énergétiques spécifiques.

### **Energies renouvelables**

Après avoir réduit de 75% la consommation d'énergie, il devient très intéressant d'utiliser les énergies renouvelables. Les panneaux solaires peuvent fournir 40 à 50% des besoins en eau chaude. Des panneaux photovoltaïques ou l'énergie éolienne peuvent couvrir une grande partie des besoins en électricité. Les normes écologiques permettent de rendre ces investissements plus intéressants.

### **Les avantages de la maison passive**

Des factures plus légères. Une maison unifamiliale classique consomme environ 20 000 kWh par an en chauffage.

Une maison de conception solaire passive en consomme jusqu'à 90% de moins

Un système peu coûteux. Comparativement aux autres systèmes de chauffage, les coûts du solaire passif sont minimales. Tout est dans le design de la maison et l'isolation ; on se passe d'équipements de chauffage coûteux.

Une maison sans pannes. Le solaire passif n'utilise aucun appareil pouvant tomber en panne. La durée de vie du système sera aussi longue que celle de la maison.

Si elle est réellement passive, avec une très bonne isolation et une très bonne étanchéité, la maison reste chaude même en cas d'absence, sans pour autant consommer d'énergie.

## **Les inconvénients de la maison passive**

Les pièces orientées au nord sont peu éclairées. Dans une maison solaire passive, on concentre le vitrage au sud. Cependant une bonne répartition des pièces et architecture intérieure permettent de limiter ce problème. Il est aussi possible d'ajouter des fenêtres de qualité thermique exceptionnelle sur la face nord sans perte d'efficacité trop notable.

Bâtiment et végétation doivent s'adapter aux contraintes du solaire passif. Forme spécifique du bâtiment, orientation au sud, arbres feuillus et non conifères du côté sud... Les règles du jeu sont précises.

Construire passif en ville est difficile. Difficile de trouver un terrain qui permette d'intégrer les notions d'orientation et d'ombrage... Dans une aire urbaine de haute densité, environnants constituent un obstacle à l'utilisation du solaire passif pour fin de chauffage. On peut cependant, à défaut de construire une maison passive au sens strict, renforcer l'efficacité énergétique de sa demeure. Des problèmes de surchauffe sont assez courants, particulièrement en période d'équinoxe (printemps/automne).

## **1.3 L'énergie solaire**

### **1.3.1 Origine**

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique liée au rayonnement émis par le soleil (150 millions de kilomètres environ, parcourus en quelques 8 minutes par la lumière).

La puissance rayonnée par les réactions thermonucléaires au sein du soleil se traduit, sur notre planète, par un apport énergétique important qui peut atteindre  $1000 \text{ W/m}^2$ . au niveau du sol, sous forme de lumière visible et de proche infrarouge.[31]

Sur la Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et règne végétal, dont dépend le règne animal. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est en fait à l'origine de toutes les énergies sur terre.

### **1.3.2 Caractères particuliers**

Trois principales caractéristiques de l'énergie solaire .[33]

Elle est abondante, et c'est là sa principale qualité. On estime actuellement que la consom-



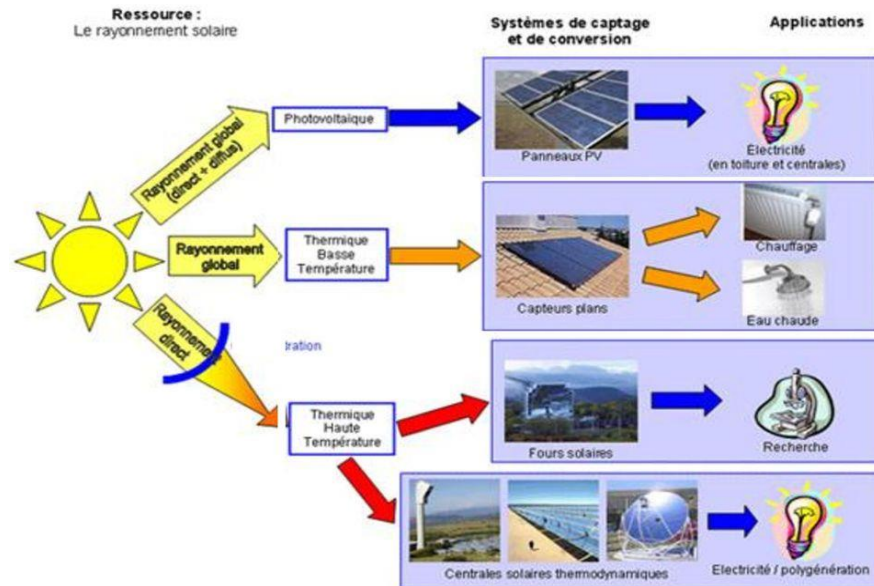


FIGURE 1.1 – Schéma des différents utilisations de l'énergie solaire [32]

mation totale d'énergie sur la terre, sous quelque forme que ce soit, est environ le dix millième de ce que nous apporte le soleil. De plus, cette énergie est inépuisable, du moins à l'échelle humaine, ce qui n'est le cas d'aucune autre source énergétique terrestre.

Elle est dispersée, ce qui est à la fois une qualité et un défaut pour les applications que nous recherchons. En effet si toutes les régions du globe reçoivent plus ou moins de l'énergie solaire, ce qui n'est pas le cas de la plupart des sources énergétiques traditionnelles concentrées en certaines régions, la puissance rayonnée est cependant relativement faible. Au niveau de la terre et au-dessus des couches atmosphériques, la puissance solaire est de l'ordre de  $1.4 \text{ kW}/\text{m}^2$ . Du fait de la traversée des couches atmosphériques, une partie du rayonnement est absorbée (l'ultra-violet par l'ozone, et l'infra-rouge par la vapeur d'eau et le gaz carbonique).

Elle est intermittente, en raison, d'une part de l'alternance des jours et des nuits, des saisons, et d'autre part de la présence de couches qui absorbent la majeure partie du rayonnement sur son trajet vers la terre. Ainsi, dans la plupart des cas, il faudra prévoir le stockage d'une partie de l'énergie solaire captée. [33]

### **1.3.3 Applications thermiques de l'énergie solaire**

Bien que l'exploitation de l'énergie solaire s'intensifie depuis quelques années et que les technologies évoluent sans cesse, les principes et les phénomènes mis en cause sont très bien connus et font aujourd'hui l'objet de large consensus. Le rayonnement solaire a été le sujet de nombreuses études, recherches et discussions, on peut trouver des applications à basse température (chauffage de l'eau, climatisation des habitations, dessalement de l'eau, réfrigération solaire etc.) et des applications à température relativement plus élevée (cuiseurs et fours solaires) nécessitant par conséquent une concentration du rayonnement. [34] Sans être exhaustif on peut citer :

#### **L'eau chaude solaire**

La production d'eau chaude sanitaire est actuellement l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. L'installation classique comprend essentiellement un groupe de capteurs plans, une capacité de stockage et généralement un dispositif de régulation et une source d'appoint. La température de l'eau chaude sanitaire est en effet relativement réduite et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude.[35],[34]

#### **Le chauffage solaire des habitations**

Le chauffage solaire du bâtiment fait appel à des capteurs à air ou à eau, mais avec des surfaces par logement plus grandes. La chaleur peut être distribuée par des radiateurs à eau chaude ou des planchers ou plafonds chauffants. L'utilisation de la chaleur solaire pour le chauffage du bâtiment demande le recours à une forme de stockage. Il est possible de stocker de l'énergie sous forme d'eau chaude dans des réservoirs de plusieurs mètres cubes, ce système permet de s'affranchir en partie du caractère intermittent de l'énergie solaire. [35]

## **1.4 Utilisation de l'énergie solaire dans le chauffage de l'habitat**

### **1.4.1 Historique du chauffage solaire**

Historiquement, l'usage de l'énergie solaire afin de chauffer un fluide, ou un matériau est sans doute une des premières voies de l'utilisation du rayonnement solaire. Les premières réalisations notables datent du XVIIIe siècle par l'usage de capteurs à concentration de conception

complexe et nécessitant un suivi de la course solaire. L'un des premiers fours solaires conçu par Lavoisier atteignait la température remarquable de 1750°C et permettait la fusion des métaux courants.

Le four comprenait une lentille de 1.32 m de diamètre. Durant le XIXe siècle, de nombreuses tentatives de réalisation de four solaire visaient la production de vapeur pour alimenter des machines à vapeur pour une production d'énergie mécanique. En 1910, en Californie, Eneas,[36] installait un capteur de 10 m de diamètre pour la production d'énergie mécanique nécessaire à un dispositif de pompage.

Après la première guerre mondiale et durant cinquante années, de nombreux travaux ont été réalisés afin d'améliorer la conception des capteurs à concentration et ont abouti à deux familles technologiques distinctes : le système centralisé utilisant un champ d'héliostats, avec focalisation du rayonnement sur une tour, et les systèmes décentralisés (capteur parabolique,) Un autre domaine d'intérêt a été la production d'eau chaude pour des usages domestiques dont les premières réalisations ont été obtenues dans les années 1930.

L'industrialisation des chauffe-eau solaires a commencé au début des années 1960 et s'est répandue très rapidement dans le monde entier. Le produit le plus courant consistait en capteurs plans fonctionnant en thermosiphon avec un absorbeur de 3 à 4 m<sup>2</sup>, un ballon de stockage d'eau chaude de 150 à 180 l ainsi qu'un ballon de stockage d'eau froide, l'ensemble étant intégré sur un seul support de l'habitat. Aujourd'hui plus de 30 millions de m<sup>2</sup> de capteurs solaires sont installés dans le monde. Un autre type de chauffe-eau solaire est un système à convection forcée pour lequel les capteurs sont en toiture et le ballon de stockage dans une zone technique du bâtiment. Plus récemment, l'usage de l'eau chaude produite dans les capteurs solaires pour le chauffage des locaux se développe en Europe depuis une dizaine d'années. Cette application prometteuse repose sur le couplage de deux sources thermiques (solaire et appoint provenant d'une chaudière ou d'une pompe à chaleur) et l'usage d'émetteur thermique (plancher chauffant, par exemple) dans le bâtiment fonctionnant à bas niveau de température. [36]

#### 1.4.2 Principe du chauffage solaire

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe, électrovanne. . .) il s'agira d'un système actif. Un tel système nécessite une énergie autre que solaire ; en général celle-ci est électrique vu sa souplesse d'utilisation. Quand la seule énergie utilisée est celle du

soleil, cela sera un système passif.

Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau. L'air est utilisé principalement dans les systèmes passifs. On peut en effet se passer facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir. L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par léchage d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres, ...). Il peut cependant être intéressant de recourir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (ventilation mécanique contrôlée).

L'utilisation de l'eau nécessite un échangeur. Son avantage réside dans le volume de stockage nécessaire, beaucoup plus faible qu'avec l'air. Dans ce cas on trouvera sur le circuit, une ou plusieurs pompes (circulateurs), des électrovannes, etc.[34]

### 1.4.3 Le chauffage solaire de l'habitat

L'avenir du chauffage solaire dépend beaucoup des architectes, qui sont appelés de plus en plus à s'intéresser à ce système de chauffage selon le climat, la situation des bâtiments, leur orientation et leur destination.

Pour faire du chauffage solaire, on emploie actuellement des insolateurs plans, ou des « serres captantes » verticales en façades dans le cas particulier du chauffage par air chaud selon le procédé de F.Trombe et J.Michel.

D'une façon générale, le chauffage est à eau chaude ou à air chaud, les insolateurs étant disposés, selon les cas, sur la toiture ou sur la façade sud, ou même simplement près du sol à l'écart du bâtiment.

Il faut prévoir le stockage de chaleur. Celui-ci peut être fait dans des réservoirs d'eau chaude, ou dans des massifs de maçonnerie ou de pierres, mais l'addition de tels éléments est coûteuse à moins qu'elle ne soit prévue dans la construction. Les réservoirs d'eau chaude bien calorifugés ont des pertes thermiques relativement faibles et la température de l'eau ne baisse pas de plus de 3°C à 4°C en 24 heures. [1]

Les systèmes passifs de même que les systèmes actifs de chauffage comprennent essentiellement les parties suivantes :

Captation : La captation s'effectue généralement par des parois vitrées orientées au sud.

Stockage : peut se faire soit par des parois à haute inertie spécialement conçues à cet effet ou

par les éléments de la structure tels que murs, sol, etc...

La restitution ou distribution de l'énergie : s'effectue directement à partir du stockage par convection naturelle. Contrôles : est assuré soit manuellement par l'occultation nocturne des surfaces de captation, soit par des effets d'ombre sur les murs capteurs pour minimiser la captation en été. [37]

## **1.5 Les différents systèmes de chauffage solaire de l'habitat**

Tous les types de bâtiments, qu'ils soient d'habitation ou tertiaire, nécessitent des systèmes de chauffage plus ou moins complexes pour maintenir, une ambiance confortable.

Ces systèmes apportent, suivant les saisons, chaleur ou fraîcheur, avec plus ou moins d'efficacité (meilleure ambiance pour une moindre consommation). On distingue, suivant la nature du véhicule de chaleur, les chauffages à eau chaude ou à air chaud.[37],[38]

### **1.5.1 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'air chaud**

Pour chauffer de l'air, on peut le faire circuler derrière des panneaux métalliques noirs, placés dans des châssis vitrés installés sur le toit ou la terrasse d'un bâtiment, puis on peut faire du chauffage par air pulsé en faisant circuler l'air chaud dans des canalisations.[1]

Plusieurs études aussi bien expérimentales que numériques ont été réalisées pour améliorer ce type de chauffage solaire d'habitat, on trouve principalement :

## **1.6 Le capteur solaire**

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques : les effets de serre et du corps noir. La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour :

Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.

Activer la croissance des végétaux.

Sécher les grains et les fourrages.

Faire fonctionner des moteurs thermiques.

Alimenter des machines de réfrigération.

## 1.7 Classification des capteurs

[1] On peut classer les capteurs selon

### 1.7.1 Le fluide de travail utilisé

Ce type de capteurs s'adapte aux appareils de chauffage à air pour le séchage des produits agro-alimentaires, et le chauffage des locaux.

#### Des capteurs solaires à air

Ce type de capteurs s'adapte aux appareils de chauffage à air pour le séchage des produits agro-alimentaires, et le chauffage des locaux.

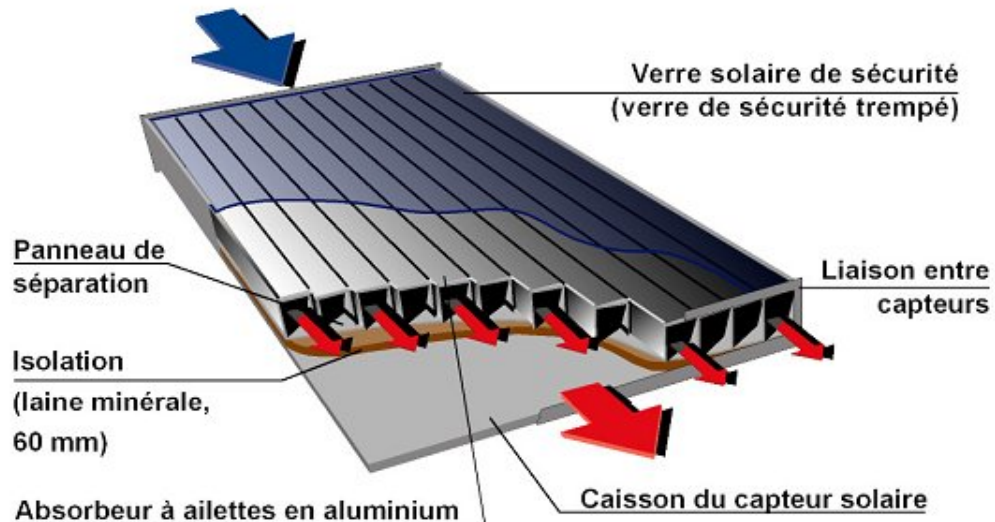


FIGURE 1.2 – exemple capteur solair a air [1]

#### Des capteurs solaires à eau

Ils s'adaptent aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage (la production de l'eau chaude sanitaire).

Les capteurs à eau peuvent être classés en capteurs à :

Faible pression de circulation, tel est le cas du chauffage des piscines.

Haute pression de circulation où le circuit d'eau est généralement constitué de tubes de cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.

L'eau et l'air sont les principaux fluides de travail utilisés pour les capteurs solaires Plans, mais il en existe d'autres, tels que les hydrocarbures qui sont utilisés pour la réfrigération et la génération d'électricité.



FIGURE 1.3 – exemple capteur solaire a eau [2]

### 1.7.2 L'orientation des capteurs

Les capteurs solaires peuvent être :

#### Des capteurs fixes

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, et présentent les propriétés suivantes :

- \* La simplicité et la fiabilité.
- \* Un faible entretien.
- \* Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).

\* L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité.



FIGURE 1.4 – exemple capteur solaire fixe [3]

### **Des capteurs à poursuite**

Le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.





FIGURE 1.5 – exemple capteur solaire poursuit[4]

### 1.7.3 Les types des composants

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivants La couverture Elle peut exister ou pas, on peut alors trouver

#### Les capteurs solaires plans non vitrés

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

#### Les capteurs solaires plans vitrés

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

### 1.7.4 L'absorbeur

L'absorbeur peut être classé suivant sa forme. On trouve :

#### Les capteurs plans

est la pièce maîtresse d'une installation de chauffage de l'eau sanitaire ou de chauffage des locaux. Il est chargé de transformer le rayonnement solaire en chaleur. De forme simple, la technologie plan est la plus utilisée. En fonction de leurs utilisations, on retrouve deux types de capteurs plans : avec vitrage et sans vitrage.

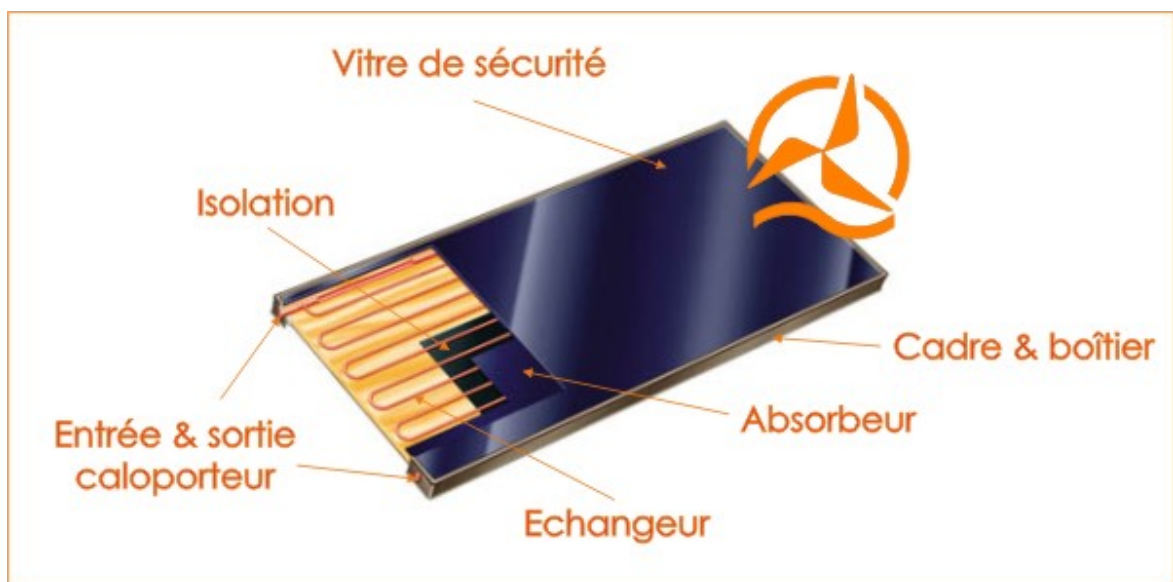


FIGURE 1.6 – exemple capteur solaire plan [2]

## 1.8 Principe du plancher solaire direct

Cette technique de chauffage est simple, économique, éprouvée et respectueuse de l'environnement.

Les différents éléments constituant un plancher solaire direct sont les suivants :

- Des capteurs solaires qui transforment l'énergie solaire en chaleur. Dans l'hémisphère nord les capteurs sont orientés plein sud et leur inclinaison est optimisée (en général  $\alpha \geq 45$ ).

- Une dalle dans laquelle circule le fluide caloporteur chauffé par les capteurs. La dalle sert simultanément à stocker la chaleur apportée par les capteurs et à la restituer de la même façon

qu'un plancher chauffant classique basse température, mais avec un certain décalage dans le temps.

- Un groupe de transfert qui gère le chauffage de la maison et la production d'eau chaude sanitaire. Le chauffage du plancher se fait à basse température (27-29°C).

La sensation des parois froides disparaît.

L'émission uniforme évite la création de zones froides ou chaudes : le confort règne partout.

L'excellente répartition de la chaleur permet là d'abaisser la température des pièces de 2°C par rapport à d'autres modes de chauffage pour une sensation de confort supérieur.

L'air n'est pas desséché.

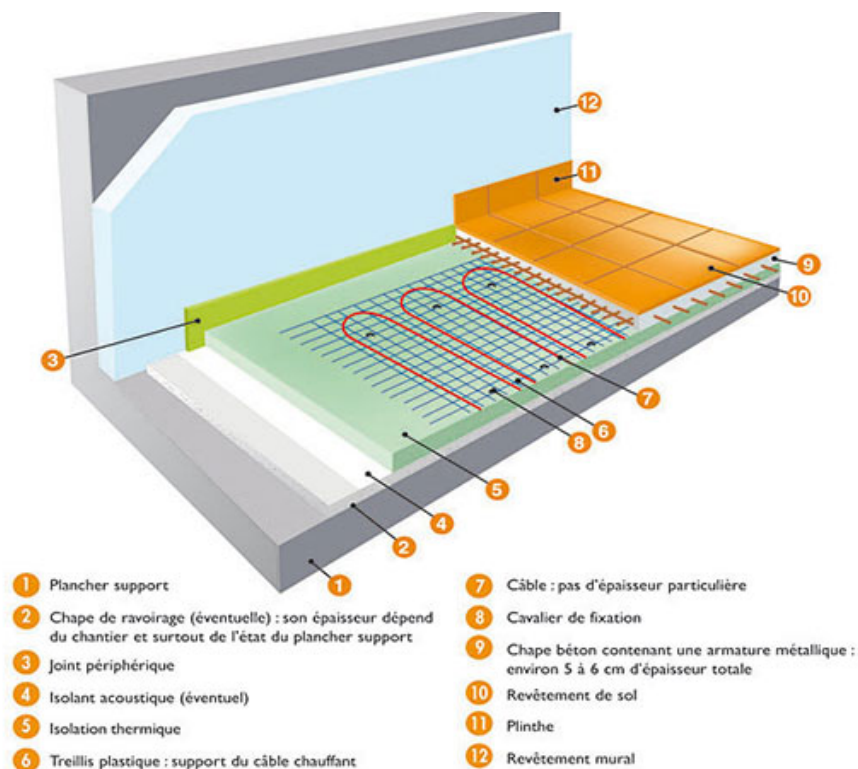


FIGURE 1.7 – Caractéristique du plancher chauffant [5]

## 1.9 Composition d'un système solaire combiné

Le Système solaire combiné est essentiellement composé :

- de capteurs solaires, qui transforment l'énergie solaire en chaleur, ils sont souvent disposés en toiture.

- d'une dalle (PSD), dans laquelle circule le fluide caloporteur chauffé par les capteurs, d'un ballon de stockage, qui gère le chauffage du bâtiment et la production d'eau chaude sanitaire.

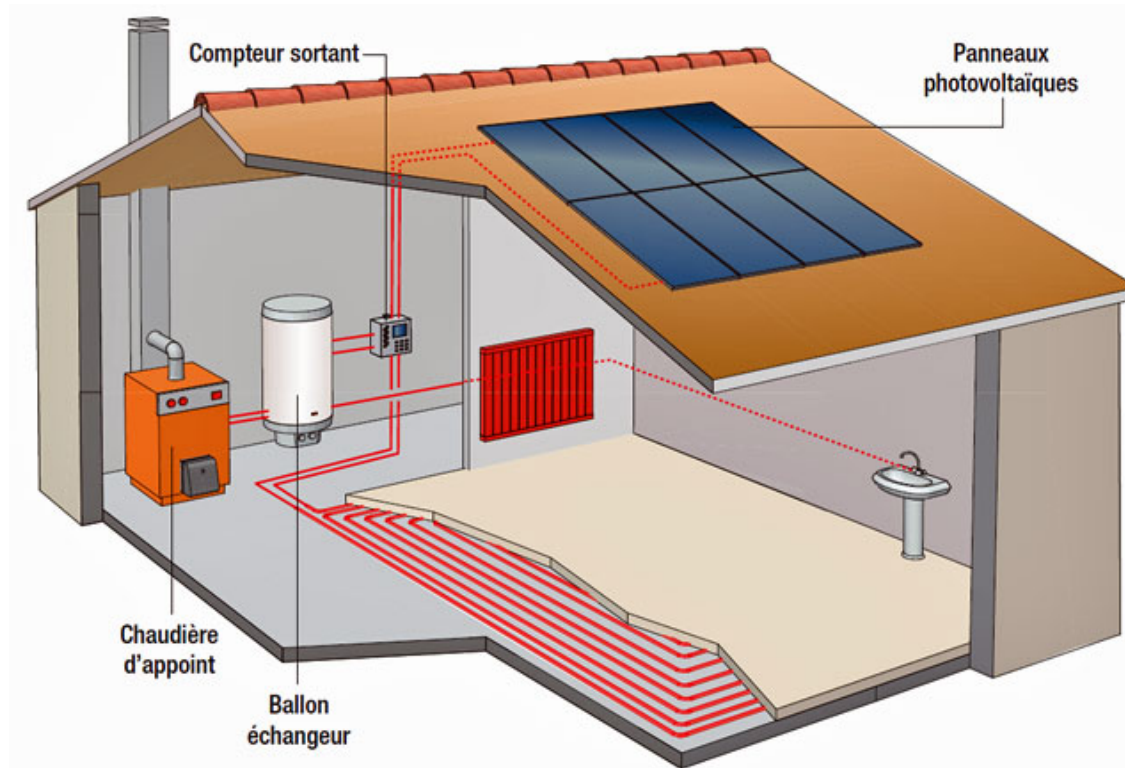


FIGURE 1.8 – Système solaire combiné [6]

## 1.10 Le stockage thermique

[35] Le stockage d'énergie thermique est une exigence fondamentale de pratiquement tout système solaire actif. Il existe deux types de processus de stockage thermique.

### Stockage par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente, le principe est que lorsque de la chaleur est fournie à la matière, elle change de phase de l'état solide à l'état liquide pour le stockage de la chaleur sous forme de chaleur latente de fusion ou de liquide à vapeur sous forme de chaleur latente de vaporisation.

Lorsque la chaleur emmagasinée est extraite par une charge, le matériel subit à nouveau un changement de sa phase de liquide à solide ou de la vapeur à liquide. La chaleur latente de transformation d'une phase solide à liquide est faible.

Les transitions solide-vapeur et liquide-vapeur impliquent de grandes quantités de chaleur de transformation, mais le grand changement de volume correspondant rend le système complexe et peu pratique.

Les transformations solide-liquide par contre impliquent des changements de volume relativement faibles. Ces matériaux sont disponibles dans une large gamme de températures de transition.

Les matériaux à utiliser pour le stockage d'énergie thermique doivent avoir une grande chaleur latente et une grande conductivité thermique.

Ils doivent avoir une température de fusion adaptée à leur utilisation pratique et être chimiquement stables, peu coûteux, non toxiques et non corrosifs. Beaucoup des matériaux de stockage par chaleur latente ont une faible conductivité thermique et donc besoin d'une grande surface d'échange de chaleur.

D'autres sont corrosifs et nécessitent des matériaux de réservoirs spéciaux. Les matériaux de stockage par chaleur latente sont plus chers que les matériaux de stockage par chaleur sensible généralement utilisés, comme l'eau et les roches. En raison de son coût élevé, le stockage de chaleur latente est donc plus susceptible de trouver une application lorsque :

1. Une haute densité énergétique ou une haute capacité énergétique volumique est souhaitée, par exemple, dans un habitat où l'espace est très coûteux, ou dans les transports où le volume et le poids doivent être réduits au minimum.

2. La charge est telle que l'énergie est nécessaire à une température constante ou dans une petite plage de températures.

3. La taille du stockage est faible. Un stockage qui a un petit volume a une surface spécifique élevée, donc le coût des parois est relativement élevé. La compacité est donc très importante afin de limiter les coûts d'investissement.

### **Stockage par chaleur sensible**

Pour le stockage thermique par chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée par le changement de la température du matériau de stockage. Ainsi, la capacité de stockage dépend de la différence de température, de la chaleur spécifique et de la quantité de matériau de stockage. Les systèmes de stockage de chaleur sensible peuvent être classés sur la base du matériau de stockage : stockage par un liquide (l'eau, les liquides à base d'huile, de sels fondus, etc.) ou par

un solide (comme les roches, les métaux et autres).

## **1.11 L'appoint**

Lorsque le soleil est déficient, un appoint est nécessaire. Il peut être :

### **Indépendant**

Cheminée, poêle ou tout autre appareil permettant d'apporter le complément de chaleur nécessaire. L'appoint pour la production d'eau chaude sanitaire sera le plus souvent assuré par une résistance électrique.

### **Couplé au système**

la production de chaleur est assurée par une chaudière traditionnelle qui prend le relais automatiquement.

## **1.12 Avantages et inconvénients du plancher chauffant**

### **1.12.1 Avantages**

#### **Le confort**

Le plancher chauffant utilise des techniques de fabrication récentes : des tubes en matériaux de synthèse et un niveau d'isolation réglementaire. Ces procédés offrent de nouvelles possibilités de chauffage par le sol. La courbe de température obtenue par ce genre de procédé est la plus proche de la courbe de chauffage idéale. On peut aussi parler de phénomène de conduction. En effet, la perte de chaleur par conduction se manifeste si notre corps est en contact avec un autre corps qui se trouve à une température inférieure au notre.

C'est pour cette raison que nous constatons un grand degré de confort en marchant sur des sols froids. Ainsi, le fait que le plancher chauffant produit une chaleur homogène, cela empêche la formation de zones de froid dans l'habitation.

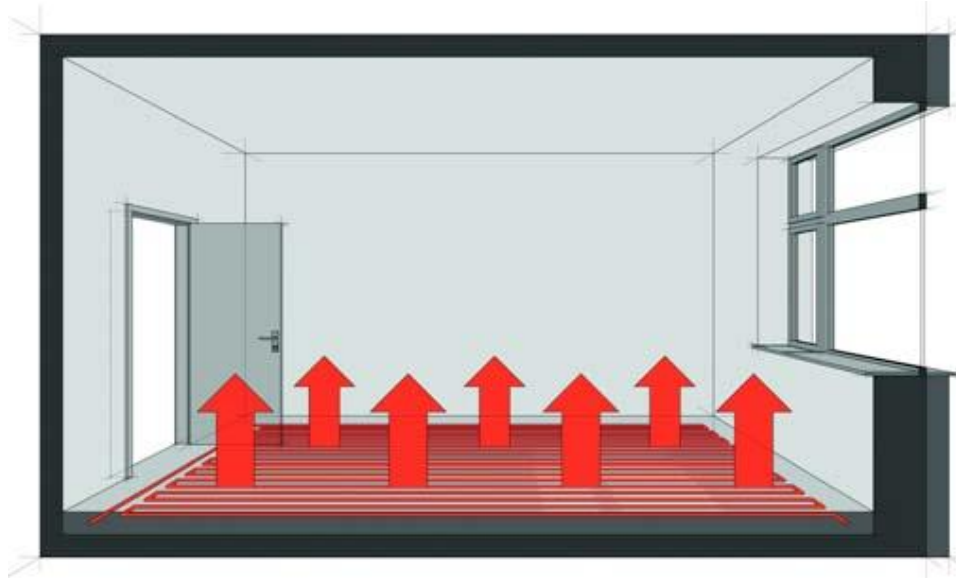


FIGURE 1.9 – Répartition de la température avec plancher chauffant[5]

### L'esthétique

Le chauffage au sol présente l'avantage qu'il n'y ait aucune emprise au sol et par conséquent plus de surface à vivre. L'absence de corps de chauffe sur les murs permet d'utiliser une plus grande surface de plancher estimée à environ 5 %. Ce système permet d'agencer les pièces comme l'utilisateur le souhaite. Finalement l'effet radiatif évite les traces noires sur les murs.



FIGURE 1.10 – esthétique du plancher chauffant [5]

## **L'Économie**

Le système du plancher chauffant permet une température ambiante inférieure de 2 à 3 C° par rapport à un émetteur de chaleur traditionnel. En effet la température du fluide chauffant (30 à 40C°) diminue de manière significative les pertes en ligne. Tous ces éléments font que le coût d'utilisation d'un plancher chauffant est nettement inférieur aux systèmes de chauffage traditionnels. Ceci diminue considérablement l'impact de la consommation d'énergie sur l'environnement.

## **La Réversibilité**

Si l'utilisateur le souhaite, il existe des systèmes mixtes de chauffage-rafraichissement qui procure le confort d'un chauffage basse température en hiver et l'efficacité d'un rafraichissement agréable en été.

### **1.12.2 Inconvénients**

Le plancher chauffant ne peut être installé sur certains planchers en bois et est parfois déconseillé avec de la moquette.

-Ce système de chauffage au sol peut être installé sans souci lors de la construction d'une maison neuve, mais est plus coûteux lors de la rénovation d'une maison existante.

Par ailleurs, ce système rehausse votre plancher de quelques centimètres et peut poser des problèmes pour l'ouverture des portes dans le cas d'une rénovation.

## **1.13 Caractéristiques du plancher chauffant**

Il suffit de prendre à contre-pied les erreurs de conception faites dans les années 1960 pour définir les principales caractéristiques des nouveaux planchers chauffants basse température.

-température de départ de l'eau : 50°C maxi, ce qui donne une température moyenne, avec une chute de 10°C, de 45°C. Afin de ne pas risquer de dépasser la température superficielle du sol, les températures moyennes généralement utilisées sont : 35, 40 et 45°C ce qui permet aussi d'abaisser le coût d'exploitation. Ces températures ne sont pas des obligations, il est tout à fait possible de baser une étude sur une température de départ de 36°C (généralement ça ne doit pas descendre en dessous 35°C) et d'adopter une chute de 8°C ceci donne alors une



température moyenne de 32°C. Il faut savoir qu'en moyenne la température de la peau chez l'homme est d'environ 31°C il est donc difficile, par simple contact, de détecter la présence d'un sol chauffant, on peut tout au plus constater que le sol n'est pas relativement froid.[39]

-une boucle minimum par pièce, ce qui permet d'avoir une indépendance et donc une possibilité d'adapter chaque pièce au confort souhaité. Dans la mesure du possible il faut essayer de ne pas avoir de boucle commune à plusieurs pièces car sinon il y a interdépendance, ce qui génère des problèmes d'équilibrage pour obtenir la température d'équilibre thermique.

-La plus grande partie des émissions se font par le sol car la pose d'un isolant sous les tubes est systématique ce qui évite l'interdépendance verticale. Plus l'isolant est épais, plus les émissions hautes seront élevées et donc, plus les émissions basses seront faibles.

-la surface du plancher chauffant couvre toute la surface de la pièce (hormis les emprises éventuelles) ce qui permet d'abaisser la température de l'eau ou d'espacer plus les tubes (surface d'échange plus grande). Avec un pas maxi de 35 cm, donc l'homogénéité de la température du sol est assurée.[40]

-Inertie thermique ("temps de réponse thermique", pour plus d'exactitude) relativement plus faible du fait de la faible épaisseur (de 6 à 8 cm en règle générale) de la dalle chauffante (chape) bien isolée en sous face.

-Tubes en matériau de synthèse plus facile à manœuvrer que les tubes en acier. Fournis en couronnes de différentes longueurs pour une plus grande commodité, ils évitent les raccords dans le sol contrairement aux soudures qui étaient faites sur le tube acier.

Il faut savoir malgré tout, qu'il n'est pas si facile de calculer un plancher chauffant, car une multitude de facteurs rentrent en ligne de compte dont il faut définir les valeurs manuellement comme par exemple, la température de départ du fluide qui est en général basée sur la pièce de référence, la chute de température entrée/sortie dans la boucle, le type de support, le diamètre du tube, Un outil informatique (à titre d'exemple le Comsol) est fortement recommandé pour faciliter l'obtention des résultats et surtout, pour faire des simulations afin d'obtenir les résultats les plus à même de donner par la suite toutes satisfactions.

Il ne faut pas non plus tomber dans l'excès car si la température de départ est trop basse, il y a le risque que les émissions thermiques ne puissent couvrir les déperditions des pièces et donc de devoir installer des appoints thermiques, ce qui risque d'augmenter le coût d'exploitation plus que le choix d'une température de départ plus élevée. Il en va de même pour les chutes

de température du fluide. Si ces dernières sont trop faibles, elles entraîneront un débit d'eau important qui risque de créer des bruits si la vitesse du fluide dépasse les 0,75 à 0,85 m/s et qui dit débit plus important dit circulateur plus puissant.[18]

### **1.14 Les équipements terminaux intérieurs et leurs caractéristiques**

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour chauffer ou refroidir les espaces intérieurs des bâtiments. On peut considérer que les systèmes de chauffage et de refroidissement des bâtiments se composent de trois parties principales : l'installation de chauffage et de refroidissement, le système portant le système de distribution du fluide caloporteur, et le système d'émission et d'évacuation de la chaleur (et/ou de l'humidité) - unité terminale.

Les équipements terminaux intérieurs sont des éléments de construction actifs qui utilisent différents mécanismes et supports de transfert de chaleur pour émettre ou retirer de la chaleur (et/ou de l'humidité) vers ou depuis des espaces intérieurs (par exemple, les systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement hydronique, les ventilo-convecteurs, les faisceaux actifs, etc).

Les équipements terminaux reposent principalement sur la convection (naturelle ou forcée), le rayonnement ou une combinaison des deux. Dans les systèmes de CVC utilisés dans le monde entier (par exemple en Europe, en Amérique du Nord, en Asie, etc.), les sources d'énergie et les générateurs d'énergie sont similaires et les principales différences entre les systèmes de CVC sont souvent les unités terminales intérieures.[41]

Les équipements terminaux sont les composants des systèmes de chauffage et de refroidissement les plus proches de l'intérieur et des occupants. Les champs de température et d'humidité intérieures dépendent des équipements terminaux choisis, et le choix des équipements terminaux a donc un impact direct sur le confort thermique global et local. Ce choix affecte également l'ensemble du système de chauffage et de refroidissement, car il détermine les niveaux de température du fluide de chauffage et de refroidissement à utiliser, le dimensionnement de l'unité auxiliaire les composants (pompes, ventilateurs, etc.), les installations de chauffage et de refroidissement, et même les sources et les puits de chaleur qui pourrait être utilisé, ce qui détermine à son tour la performance énergétique de l'ensemble du système.

Les équipements terminaux diffèrent les uns des autres selon certains critères :

-Possibilités (chauffage, refroidissement, ventilation - air frais, humidification et déshumidification);

-Les méthodes d'émission ou d'évacuation de la chaleur (convection, rayonnement ou une combinaison des deux);

-les capacités maximales de chauffage et de refroidissement;

-Moyen de distribution de l'énergie (air, eau ou électricité);

-Masse thermique et capacité de stockage;

-Conditionnement du volume total ou local.

Ces critères sont examinés plus en détail pour les équipements terminaux choisis, qui sont :

-Systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement hydronique;

-Systèmes tout air (mélange, déplacement et ventilation personnalisée);

-Beams (passifs et actifs).

Ces équipements terminaux ont été choisis sur la base de la possibilité de chauffage à basse température et de refroidissement à haute température, et sur le moyen de distribution de l'énergie.

## **1.15 Systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement hydronique**

Un système de chauffage et de refroidissement par rayonnement hydronique (à base d'eau) est un système dans lequel l'eau est le caloporteur (moyen de distribution de l'énergie) et plus de la moitié de l'échange de chaleur avec l'espace conditionné se fait par rayonnement.[42]

Les systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement peuvent être divisés en trois :

-Panneaux de chauffage et de refroidissement par rayonnement;

-Tuyaux isolés de la structure principale du bâtiment (systèmes de surface rayonnante);

-Tuyaux encastrés dans la structure principale du bâtiment (systèmes de construction thermoactifs, TABS).

Il s'agit de systèmes de chauffage à basse température et de refroidissement à haute température. Par conséquent, le caloporteur (eau) qui circule dans les tuyaux à une température basse en mode chauffage et une température élevée en mode refroidissement. Dans certaines construc-

tions TABS (terrasses en béton à noyau creux), l'air a également été utilisé comme caloporteur, et l'électricité peut également être utilisée dans certaines applications de chauffage.

Le sol, les murs et les plafonds peuvent être utilisés comme surfaces qui assurent le chauffage ou le refroidissement de l'espace. Les systèmes de surface à rayonnement hydronique sont capables de s'occuper uniquement du chauffage et du refroidissement sensibles charges. Ils nécessitent donc un système de ventilation pour traiter les charges latentes (pour réguler) et de fournir les taux de ventilation requis pour les problèmes de qualité de l'air intérieur [42]. Radiant Les systèmes de chauffage et de refroidissement permettent des débits d'air plus faibles que les systèmes tout air, dans lesquels l'ensemble du les charges de chauffage et de refroidissement sont prises en charge par le système de ventilation.[43]

L'émission ou l'évacuation de la chaleur dans l'espace se fait par une combinaison de rayonnement et de convection. Coefficients totaux d'échange de chaleur (convection et rayonnement combinés) pour le chauffage par le sol, les murs le chauffage et le chauffage au plafond sont de 11, 8, 6  $W/m^2K$ , et pour le refroidissement au sol, au mur et au plafond sont respectivement de 7, 8 et 11  $W/m^2K$  [3]. Le coefficient de transfert de chaleur rayonnante peut être utilisé comme une valeur constante de 5,5  $W/m^2K$ , avec une erreur de moins de 4% [44]. La différence entre la chaleur totale Les coefficients de transfert sont dus à la convection naturelle. Un aperçu de la convection naturelle Les coefficients sont donnés dans.[45]

Sur la base des températures de surface acceptables (confort et point de rosée [42]), et en supposant une température ambiante de fonctionnement de 20°C pour le chauffage et de 26°C pour le refroidissement, les capacités maximales de chauffage et de refroidissement peuvent être estimées. Les puissances maximales de chauffage et de refroidissement au sol (zone occupée) sont de 99  $W/m^2$  et 42  $W/m^2$ , les puissances de chauffage et de refroidissement des murs sont de 160  $W/m^2$  et 72  $W/m^2$ , et les puissances de chauffage et de refroidissement des plafonds sont de 42  $W/m^2$  et 99  $W/m^2$ , respectivement. Dans les zones périmétriques du plancher, il est possible d'obtenir un chauffage maximal une capacité de 165  $W/m^2$ . [42]

Vous trouverez différents types de construction de systèmes rayonnants dans [42]. La conception, les méthodes d'essai, le contrôle et les principes de fonctionnement des panneaux rayonnants sont donnés dans la norme ISO 18566 : 2013 [46], tandis que la conception, le dimensionnement, l'installation et les principes de contrôle des systèmes rayonnants intégrés sont donnés dans la norme ISO 11855 : 2012. [47]

## 1.16 Les systèmes à air

Il existe huit stratégies de ventilation (distribution de l'air) couramment appliquées dans les espaces intérieurs. Ces stratégies sont la ventilation mixte, la ventilation par déplacement, la ventilation personnalisée, la ventilation hybride distribution de l'air, ventilation en strates, ventilation des zones occupées protégées, ventilation locale par aspiration, et la ventilation du piston [48]. Pour les systèmes de ventilation (climatisation), la principale méthode d'est la convection et le moyen de distribution de l'énergie est l'air. Le mélange, et les systèmes de ventilation personnalisés sont décrits plus en détail ci-dessous.

### 1.16.1 Ventilation (beams)

Bien que ces systèmes soient connus sous le nom de ventilation froides, une publication récente les appelle des ventilations, et cette terminologie sera donc utilisée dans ce qui suit [49]. Les ventilations (passives et actives) sont des dispositifs de recirculation de l'air ambiant qui peuvent chauffer ou refroidir (sensible) un espace en utilisant l'eau comme moyen de distribution de l'énergie. Les ventilations fonctionnent également selon le principe du chauffage à basse température et du refroidissement à haute température.

Les principes de fonctionnement des ventilations sont similaires à ceux des ventilo-convecteurs. Elles sont similaires à un ventilo-convecteur installé au plafond, bien que les ventilations bénéficient du principe de chauffage à basse température et de refroidissement à haute température, et qu'ils soient spécialement conçus pour cela. Dans les systèmes à faisceaux, on utilise généralement des températures d'eau froide élevées de 14-18°C (généralement autour de 14,5°C) et des températures d'eau chaude basses de 32-45°C [49].

Les ventilations actives peuvent fournir de l'air primaire conditionné à un espace puisqu'ils sont couplés à l'unité principale de traitement de l'air [49]. L'air frais est acheminé dans l'espace par un système de ventilation découplé dans les applications à ventilations passives. Les ventilations ne peuvent pas humidifier ou déshumidifier directement l'air ambiant car ils fonctionnent dans des conditions sèches (sans condensation), mais il est possible de contrôler la et pour répondre aux besoins de ventilation avec des ventilations actives [49]. L'émission de chaleur vers Le retrait de l'espace se fait principalement par convection.

### 1.16.2 Ventilations passives

La performance des ventilations passives repose sur la convection naturelle [49]. Dans les ventilations passives, le moyen de distribution de l'énergie de la centrale est l'eau. Il est possible de chauffer et de refroidir un espace avec des ventilations passives mais il n'est pas possible de fournir de l'air frais à l'espace. Bien qu'il soit possible de chauffer avec des ventilations passives, dans la plupart des applications, les ventilations passives sont utilisées pour le refroidissement uniquement et donc un système de chauffage séparé doit être utilisé [49]. En outre, les besoins de ventilation doivent être pris en compte par un système complémentaire (par exemple, par une unité de traitement de l'air)[49]. Il est recommandé d'utiliser des lorsque la charge de refroidissement sensible totale est comprise entre 40 et 80  $W/m^2$ . [50].

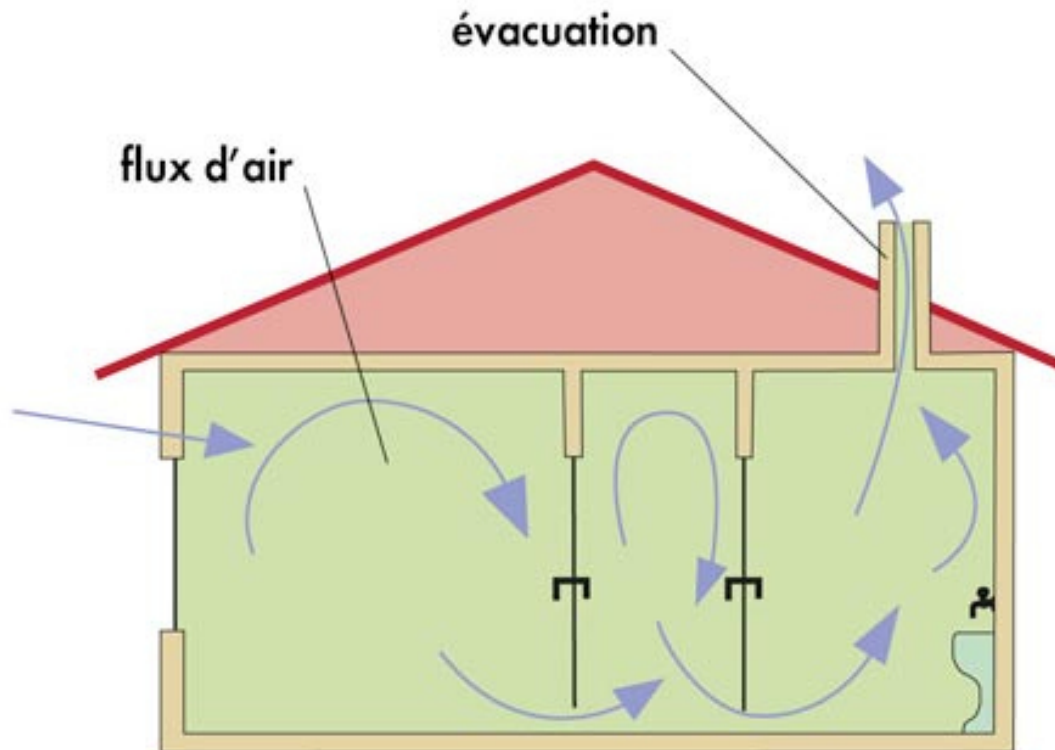


FIGURE 1.11 – exemple d'une ventilation passive [7]

### 1.16.3 Ventilations actives

La performance des ventilations actives repose sur la convection qui est causée par l'induction [49]. Il est possible de chauffer, de refroidir et de fournir de l'air frais à un espace par des ventilations actives. Dans les ventilations actives, le moyen de distribution de l'énergie est à la

fois l'air (air frais de l'unité de traitement de l'air) et l'eau de l'installation de chauffage ou de refroidissement. Les ventilations actives peuvent généralement être utilisés lorsque la charge totale de refroidissement sensible (air et eau) est inférieure à  $120 \text{ W/m}^2$  dans des conditions de confort [49],[50]. La plage de fonctionnement optimale (pour obtenir un confort thermique dans les locaux de type sédentaire) est de  $60 - 80 \text{ W/m}^2$  [50]. Pour le boîtier de chauffage, la plage de fonctionnement optimale est une charge de chauffage de  $25 - 35 \text{ W/m}^2$  et un maximum charge de chauffage de  $50 \text{ W/m}^2$  [50].

Les procédures d'essai et d'évaluation des ventilations passives et actives sont définies respectivement dans les normes EN 14518 : 2005 [28] et EN 15116 : 2008 [51].



FIGURE 1.12 – exemple d'une ventilation active [8]

#### 1.16.4 Ventilation mixte

La ventilation mixte (distribution de l'air des salles de mélange) vise à diluer le pollué et le chaud (ou l'air ambiant avec de l'air d'alimentation propre et plus frais (ou plus chaud)).

L'objectif est de parvenir à une la température et la distribution des contaminants dans la zone occupée [52]. Il est possible de chauffer ou de refroidir une l'espace en mélangeant la ventilation. Il est également possible de fournir des espaces extérieurs déshumidifiés et conditionnés l'air (air frais). La température typique de l'air d'alimentation se situe entre  $34^{\circ}\text{C}$  et  $14^{\circ}\text{C}$  [48]. La température l'effet de chauffage et de refroidissement dépendra du taux de ventilation. Dans certains pays, il y a les réglementations concernant la température maximale admissible de l'air

d'alimentation, par exemple au Danemark, la température maximale admissible de l'air d'alimentation est limitée à 35°C [53]. Il n'est pas recommandé d'avoir une différence de température supérieure à 10 °C entre l'air d'alimentation et l'air ambiant pour obtenir un mélange [52]. Selon [54], une charge de refroidissement spécifique de 90 W/m<sup>2</sup> peuvent être traitées avec le mélange les systèmes de ventilation.

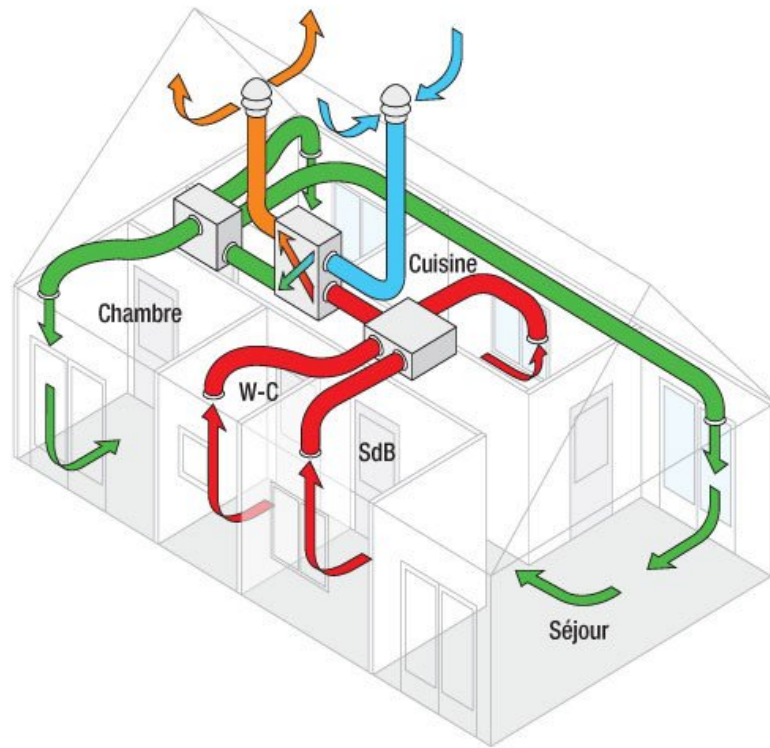


FIGURE 1.13 – exemple ventilation mixte [9]

### 1.16.5 La ventilation par déplacement

La ventilation par déplacement (distribution d'air ambiant par déplacement) consiste à déplacer l'air ambiant pollué avec de l'air frais (air extérieur conditionné) [48]. L'air frais est fourni avec une faible vitesse (0,25 – 0,35 m/s [55]) au niveau ou à proximité du sol, et l'air fourni s'élève sous l'effet des forces d'impulsion et de flottabilité [48],[55]. Il est possible de fournir de l'air extérieur froid, déshumidifié et conditionné avec une ventilation par déplacement. Bien qu'il soit possible de fournir de l'air plus chaud que l'air ambiant avec une ventilation par déplacement d'air (par exemple pour chauffer une pièce inoccupée avant l'occupation [26]), ce n'est pas courant et ce n'est pas recommandé en raison d'un possible court-circuit de l'air d'alimen-



tation. En général, la température de l'air d'alimentation peut être aussi basse que 18°C [48]. Le site la charge de refroidissement que peut supporter un système de déplacement du courant de plancher est de 30-35 W/m<sup>2</sup> d'après [55]. et 50 W/m<sup>2</sup> selon [54].

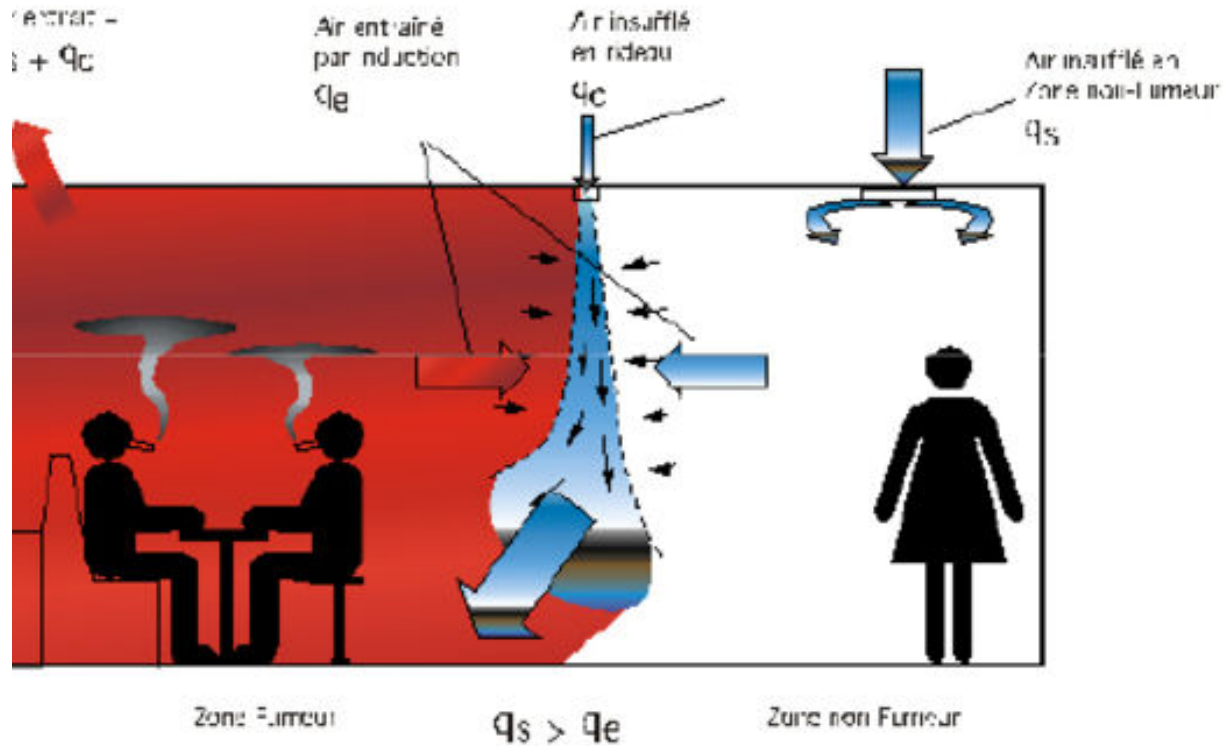


FIGURE 1.14 – ventilation par déplacement entre deux zones différentes [10]

### 1.16.6 La ventilation personnalisée

Outre les deux principes de distribution de l'air en volume total principalement appliqués (mélange et de déplacement d'air), une autre stratégie de distribution de l'air est la ventilation personnalisée, et elle vise à fournir de l'air propre et frais à proximité d'un occupant avant qu'il ne soit mélangé à l'air ambiant [52],[27]. L'avantage le plus important de la ventilation personnalisée par rapport au volume total est son potentiel à fournir de l'air propre, frais et sec à la respiration [27],[28]. Selon [20], la température de l'air d'alimentation peut être aussi basse que 20°C en refroidissement et aussi élevée que 28°C en mode chauffage. Toutefois, il convient de noter que la qualité de l'air perçue (PAQ) pourrait être une Le problème de l'augmentation de la température de l'air d'alimentation [29],[30] et de l'efficacité de la ventilation peut diminuent en fonction du lieu et du terminal d'approvisionnement en air choisi.

Les débits de ventilation requis peuvent être calculés sur la base des normes EN 15251 : 2007 [56], (cette norme est actuellement en cours de révision [57]), CR 1752 : 1998 [44], et ASHRAE 62.1 – 2013 [58].

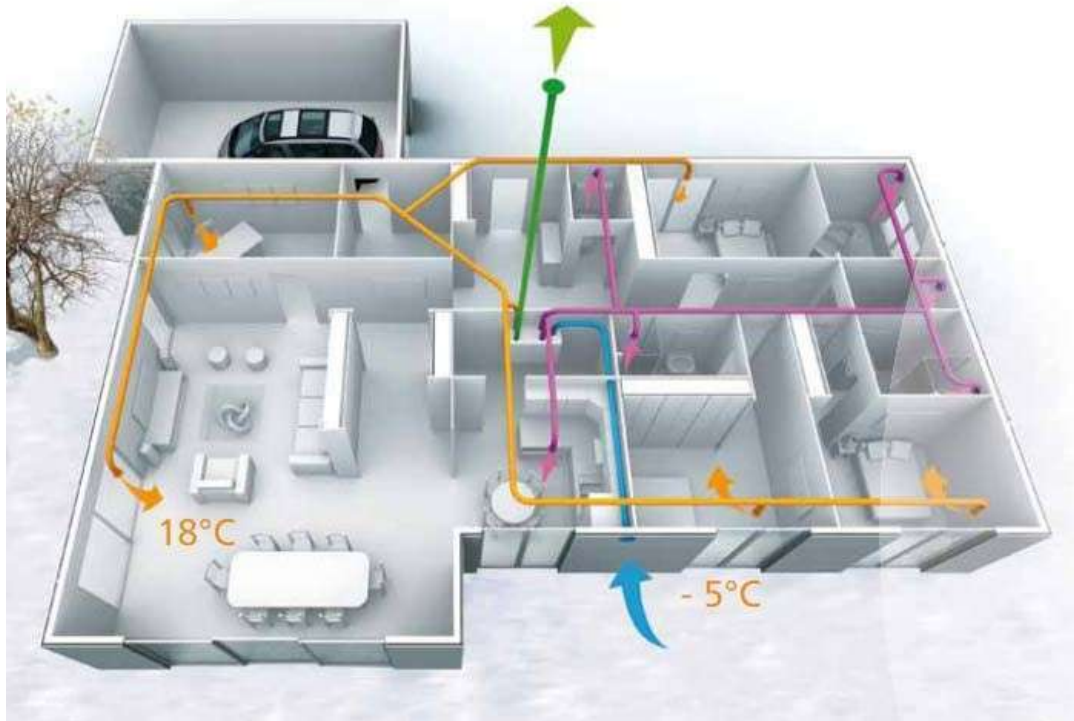


FIGURE 1.15 – exemple d'une ventilation personnalisée [11]

### 1.16.7 Ventilo-convecteurs

Les ventilo-convecteurs sont un autre type d'unités terminales qui sont couramment utilisées dans le monde entier; toutefois, ils n'ont pas été examinés en détail car ils ne sont pas nécessairement des systèmes de chauffage à basse température et de refroidissement à haute température. Ils font principalement recirculer l'air ambiant, mais dans certains cas, ils peuvent également aspirer l'air extérieur. De plus amples informations sur les ventilo-convecteurs sont disponibles dans [54],[59].



FIGURE 1.16 – exemple des ventilo-convecteurs [60]

### 1.17 Présentations les travaux récents

#### **Zero energy balance and zero on-site CO2 emission housing development in the Mediterranean climate, A Ferrante, MT Cascella - Energy and Buildings, 2011 – Elsevier[61]**

Cet article montre que le bilan énergétique zéro est un sujet essentiel et primordial dans la conception des bâtiments. Pour traiter avec ZEB en architecture, l'auteur propose une conception finale pour un nouveau logement. Il met l'accent sur le développement dans le contexte périurbain de Tricase, une ville située dans le sud de l'Italie qui est présentée et utilisée pour les enquêtes sur l'énergie. Dans l'étude de ce cas de référence, on remarque l'association du type du bâtiment, des caractéristiques de l'enveloppe, d'outils passifs sélectionnés pour les économies d'énergie et de systèmes d'installations pour la microgénération énergétique à partir de sources d'énergie renouvelables visant à atteindre des objectifs polyvalents dans le même cadre de bâtiment.

Bien qu'il soit impossible de tirer des conclusions génériques d'une seule étude de cas, l'auteur espère que ce cadre inspirera et permettra à d'autres chercheurs et concepteurs d'effectuer des études semblables dans d'autres domaines climatiques, contribuant ainsi à diffuser la conception du bilan énergétique zéro dans les pratiques et routines de construction des bâtiments.

**Design and performance of the solar-powered floor heating system in a green building, XQ Zhai, JR Yang, RZ Wang - Renewable Energy, 2009 - Elsevier[62]**

Dans ce travail, l'auteur montre que le bâtiment vert de l'Institut de recherche en sciences du bâtiment de Shanghai, que l'équipe d'évacuation des capteurs solaires tubulaires d'une surface totale de  $150\text{ m}^2$  ont été installés pour assurer le chauffage de l'installation. La surface couverte est de  $460\text{ m}^2$ . Les tuyaux utilisés sont des serpentins de chauffage par le sol en cuivre pur de haute qualité, avec un diamètre  $12\text{X}0,7\text{ mm}$ .

D'après le travail présenté par l'auteur, le rapport entre les émissions de gaz à effet de serre la zone de chauffage était d'environ  $1/3$  par temps froid.

Dans des conditions météorologiques typiques de Shanghai, le système de chauffage par le sol à l'énergie solaire était capable de satisfaire les besoins en chauffage intérieur. La capacité de chauffage moyenne était de  $25,04\text{ kW}$  pendant les heures de travail de 9 : 00 à 17 : 00. Le COP électrique moyen du système de plancher chauffant était de  $19,76$  pendant le fonctionnement du système. L'auteur observe que l'insolation solaire quotidienne avait un effet plus important sur la température de l'air que sur la température, influence marquée sur la performance des planchers alimentés à par l'énergie solaire que par la température ambiante.

**An Italian pilot project for zero energy buildings : Towards a quality-driven approach, E Bruni, L Sarto - Renewable energy, 2013 – Elsevier[63]**

Dans ce travail, la lumière est mise sur un marché du bâtiment orienté vers une efficacité énergétique toujours plus grande, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est un enjeu majeur. Sous réserve de discussions et de débats au niveau international, la mise en œuvre et l'application du suivi des expériences pilotes peuvent fournir des informations utiles pour gérer la complexité de l'expérience inhérente à cette nouvelle génération de bâtiments. L'évolution de la procédure et son application a permis d'émettre des recommandations et d'identifier les améliorations à apporter. Certains aspects mis en évidence par des considérations liées au projet pilot pourraient également être intégrée à l'analyse du cycle de vie des bâtiments.

L'auteur souligne que le fait de mettre en œuvre l'obligation d'élaborer un manuel d'utilisation et d'entretien. L'un des leçons apprises est que promouvoir efficacement une procédure ZEB, c'est l'implication nécessaire de tous les acteurs qui doivent absorber le plus grand nombre d'émissions de gaz à effet de serre. Il n'y a pas de règles pour définir les caractéristiques des

ZEB en Italie, bien que les bâtiments pour lesquels ses caractéristiques sont les suivantes pertinentes ont fait leur apparition sur le marché. Le projet pilote de SACERT ZEB, décrit dans le présent document, et testé par le biais d'une étude de cas, est le premier système volontaire appliqué dans les pays de l'Italie pour la conception et la certification ZEB.

En ce qui concerne la procédure utilisée, l'auteur démontre qu'elle est ouverte à des changements dans la méthode de calcul, mais reste fortement axée sur la qualité, il est raisonnable d'affirmer que l'expérience acquise dans le cadre de ce projet sera utile aux méthodologies officielles à l'étude.

### **Possibilities and limitations of radiant floor cooling, BW Olesen - 1997 - osti.gov[64]**

Cet article aborde l'évaluation de l'utilité du refroidissement par plancher chauffant, il est important de tenir compte du confort, de la capacité de refroidissement, du contrôle et de la conception. La température de la surface du sol est un facteur limitatif. Dans les espaces avec des personnes assises ou debout, la température du plancher ne doit pas être inférieure à 19C pour des raisons de confort. Pour des niveaux d'activité plus élevés, une température de surface de plancher plus basse peut être acceptable et la limite sera alors la température du point de rosée dans l'espace. Ce travail pointe le coefficient d'échange thermique entre un plancher refroidi et la pièce, qui est généralement d'environ  $7W/m.C$ , où  $5,5W/m.C$  et la température radiante dans les espaces où les occupants sont le plus souvent assis, la limite supérieure de confort pour la température de fonctionnement en été et de 26C, cela signifie que, d'après l'échange de chaleur entre la surface du plancher et la pièce, la capacité de refroidissement maximale d'un système de plancher est d'environ  $50 W/m$ . Dans plusieurs espaces, tels que les atriiums, les halls d'entrée ou d'autres espaces avec des façades vitrées, il y aura souvent beaucoup de soleil direct sur le sol. Dans ces cas, la capacité de refroidissement est significativement plus élevée et peut atteindre 100 à 150  $W/m$ . La capacité de refroidissement dépend également de la construction du sol, de la distance entre les tubes, du débit d'eau et du revêtement de sol. L'influence de ces paramètres est discutée dans ce document, ainsi que la méthode de dimensionnement qui est basée sur une norme européenne est présentée.

**Système solaire combiné estimation des besoins énergétiques : R. Kharchi, B. Benyoucef et M. Belhamel Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007)[65]**

Dans ce travail, les besoins énergétiques d'un tel système ont été évalués dans le cas d'une famille de cinq personnes sur un site de Bouzaréah à Alger. La surface chauffée par le plancher solaire direct est de  $100 \text{ m}^2$  avec un niveau d'isolation moyen. La demande de chauffage varie linéairement avec la température extérieure, proportionnelle au coefficient de pertes de chaleur (UA en  $W/C$ ). La demande de chauffage mensuelle atteint environ  $1700 \text{ kWh}$  en hiver, en prenant comme température désirée,  $T_c = 21^\circ\text{C}$  pour une température extérieure d'environ  $10^\circ\text{C}$ .

La demande en eau chaude sanitaire d'une famille de cinq personnes peut atteindre les  $400 \text{ kWh/mois}$ , mais peut varier de  $\pm 20 \%$ . L'énergie solaire couvre totalement les besoins en été, en mi-saison plus de  $50 \%$  et en hiver environ  $20 \%$ , pour cela l'appoint est primordial.

**Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation, D Song, T Kim, S Song, S Hwang, SB Leigh - Applied Thermal Engineering, 2008 - Elsevier[66]**

Dans cette recherche, l'auteur présente le système de refroidissement par plancher radiant pouvant être utilisé comme alternative aux systèmes de refroidissement à air pulsé, l'auteur a utilisé le système Ondol existant en Corée pour économiser l'énergie et maintenir le confort thermique à l'intérieur. Malheureusement, un système de refroidissement de plancher radiant peut causer de la condensation sur la surface du plancher dans des conditions chaudes et humides pendant la saison de refroidissement. La régulation par rétroaction de la température a ensuite été utilisée pour répondre aux changements de charge interne.

Pour évaluer la performance du système de refroidissement du plancher radiant intégré à la ventilation déshumidifiée, une expérience physique mise dans un environnement de laboratoire et une simulation TRNSYS pour un appartement en Corée ont été réalisées. L'efficacité du système proposé en matière de contrôle de l'environnement thermique intérieur dans des conditions de confort acceptables a été prouvée par un test en laboratoire et une simulation TRNSYS. Les résultats de cette étude sont résumés ci-dessous :

Il a été constaté que le système de refroidissement radiant par le sol intégré à une ventilation déshumidifiée et ne résout pas seulement le problème de la condensation sur une surface de sol en abaissant la température du point de rosée mais l'on doit aussi améliorer la réactivité aux

changements de charge interne en utilisant la commande de réinitialisation extérieure et la commande de retour de température intérieure.

D'après les résultats de la simulation, l'applicabilité de la norme les systèmes proposés ont fait leurs preuves dans des situations réelles, même si pour la saison chaude et humide de juillet-août, quand les charges de refroidissement sont les plus élevées et le potentiel élevé de condensation en général.

**Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings : H Lim, JH Jo, YY Kim, MS Yeo, KW Kim - Building and Environment, 2006 - Elsevier[67]**

Cette étude démontre que lors de l'application d'un système de refroidissement radiant du plancher, son système de contrôle doit empêcher la condensation à la surface du plancher par temps chaud et humide. Dans ce cas les effets de la commande du système de refroidissement sur les conditions intérieures peuvent être modifiés en raison de l'inertie thermique de l'appareil. L'auteur explique qu'il existe différents types de systèmes de contrôle pouvant également être composés en fonction des méthodes de contrôle, ce qui peut affecter la construction. Étant donné que le mode de vie des Coréens consiste à s'asseoir sur le sol, il est nécessaire d'évaluer si un plancher influencera le confort thermique des occupants.

Cette étude a pour but de clarifier les méthodes de contrôle de l'irradiation par le système de refroidissement du plancher et d'analyser la performance et l'applicabilité de chaque méthode de contrôle est choisie par rapport au plancher, à la condensation de surface et le confort par des simulations sur ordinateur et des expériences sur les méthodes de contrôle du refroidissement radiant du sol système.

Il explique également que dans les systèmes de refroidissement par plancher chauffant, la condensation et le confort de la surface du plancher sont des préoccupations majeures pour le personnel sur le terrain. Selon les méthodes de contrôle, les effets sur la condensation sont différents, et cela peut avoir une incidence sur le coût de construction dans la région visée par l'évaluation environnementale.

Cette étude visait à clarifier le contrôle des méthodes de refroidissement par rayonnement du plancher et d'analyser la performance du contrôle ainsi que l'applicabilité de chaque contrôle. La méthode en ce qui concerne la condensation de la surface du sol et le confort par des simu-

lations et des expérimentations sur les méthodes de contrôle du système de refroidissement du plancher radiant. Au début de la période de démarrage, le dépassement se produit normalement dans l'eau.

**Buttock responses to contact with finishing materials over the ONDOL floor heating system in Korea, GS Song - Energy and Buildings, 2005 - Elsevier[68]**

Cet article a étudié les réponses de corps humain au contact avec les matériaux de revêtement de sol utilisés dans le système de chauffage par le sol ONDOL. Bien que la température de l'eau d'alimentation fût la même, la température à la surface du plancher et la température de la peau variaient selon la conductivité et la chaleur spécifique. Le corps humain doit être confortable dans son ensemble. Si une partie du corps n'est pas à l'aise du point de vue thermophysiological, il faut se procurer un système de chauffage ou de refroidissement.

Pendant les saisons de printemps et l'automne, par exemple, un système de chauffage devrait être utilisé sur les planchers avec finition au mortier. Si le plancher est fini avec du bois, le chauffage ne sera pas nécessaire parce que le bois a une faible conductivité et une faible chaleur spécifique. Cette étude montre que la température de la peau est un indice fiable pour évaluer le confort thermique d'une personne à posture sédentaire. En tant que tel, il devrait être pris en considération dans la formulation de la conception des systèmes de planchers.

**Etude d'une boucle régulée capteur-plancher solaire ; F. MOKHTARI 2005 Thèse Thèse de magister université de BLIDA 2005 [69]**

Ce travail porte sur la modélisation d'un système de chauffage d'un local par plancher solaire parcouru d'un serpent in dont l'apport d'énergie est assuré par les capteurs solaires.

Le système est modélisé suivant la méthode nodale, basée sur les bilans thermiques de chaque élément constituant le dispositif de chauffage : fluide caloporteur, plancher constituer d'une dalle en béton et le local. Les températures du plancher et du local sont considérées uniformes, alors que celle du fluide caloporteur est supposée varier uniquement suivant la longueur du plancher, donnant autant de nœuds que de passages du serpent in dans la dalle.

Une comparaison a été faite en première partie entre les résultats obtenus dans ce travail avec ceux de l'expérimental (études réalisées au sein de CDER), une deuxième partie consiste à l'adoption d'un système de régulation, avec une confortation des résultats de températures d'une



étude expérimentale tout en utilisant la même stratégie de régulation.

**Transient heat conduction in one-dimensional composite slab. A 'natural' analytic approach, F de Monte - International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000 - Elsevier[70]**

Dans ce travail, l'auteur expose un nouveau type de relation d'orthogonalité, qui est développée et utilisée pour obtenir la solution finale de série complète. Les erreurs, qui apparaissent lorsque les termes les plus élevés de la solution de série sont négligés, sont également étudiées. Une approche analytique « naturelle » pour résoudre la conduction thermique transitoire unidimensionnelle dans une dalle composite, dont les couches sont en contact thermique parfait a été développée. Des variables et des groupes sans dimension ont été introduits pour simplifier la représentation de la solution formelle au problème transitoire à deux couches.

Un exemple numérique a permis de calculer le profil de température de la dalle et la chaleur échangée avec le fluide environnant pendant le processus transitoire. Les résultats ont été présentés sous forme de tableaux pour référence immédiate. Aucune équation spéciale n'a été dérivée pour une très courte période et aucune approximation particulière n'a été utilisée pour une période d'une durée aussi longue dans les cas suivants vue d'ensemble de la très haute technologie informatique disponible aujourd'hui. La méthode d'analyse peut être appliquée aux composites à différent nombre de couches, bien que les solutions pour seulement deux dalles en matériau composite aient été présentées en ce papier.

**Transient heat conduction in the composite slab-analytical method, X Lu, P Tervola - Journal of Physics A : Mathematical and General, 2004 - iopscience.iop.org[71]**

Dans cet article, une nouvelle approche analytique de la conduction thermique dans une dalle composite soumise à des changements périodiques de température a été développée. En tirant parti des propriétés périodiques des changements de limites, la solution analytique correspondante est obtenue et exprimée explicitement. Dans cet article, une approche analytique de la conduction thermique ou de la diffusion de masse dans une dalle composite sous réserve des changements périodiques généraux de température a été présentée. Une marque de fabrique du résultat est sa forme mathématique simple et concise des solutions explicites donnent un aperçu de l'interaction entre les décroissances d'amplitude, les décalages temporels et l'amplitude du signal.

D'autres paramètres physiques, peuvent conduire à une meilleure compréhension du processus thermique dans un environnement de dalle composite.

La conclusion finale à en tirer est que les solutions analytiques sont vraiment précises même si une formule d'approximation a été utilisée pour dériver les solutions de l'équation.

**Verification solution for partial heating of rectangular solids, JV Beck, A Haji-Sheikh, DE Amos, D Yen - International Journal of Heat Transfer Mass, 2004 - Elsevier[72]**

L'auteur propose des solutions pour utiliser la séparation des variables pour les problèmes de conduction thermique en régime permanent dans la conduction thermique multidimensionnelle peuvent nécessiter plus d'une forme de solution, en particulier aux limites. Ces solutions peuvent être tout à fait satisfaisantes, en particulier si seul l'état d'équilibre est nécessaire. Cependant, pour obtenir des solutions robustes de vérification avec des solutions transitoires également intéressantes, la méthode de partitionnement temporel offre certains avantages. Même après l'obtention des solutions, un traitement spécial des termes hyperboliques peut être nécessaire.

Des intégrales spéciales ont été mises au point pour faciliter l'évaluation des intégrales à l'aide de la variable fictive cotîmes.

**Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software, A Laouadi - Building and Environment, 2004 - Elsevier[73]**

Dans ce papier, un modèle détaillé a été développé pour les systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement pour intégration dans un logiciel de simulation énergétique. Le modèle cible les logiciels de simulation énergétique qui utilisent la modélisation numérique unidimensionnelle pour calculer le transfert de chaleur dans les assemblages de construction du bâtiment. Le transfert de chaleur à l'intérieur du milieu rayonnant est résolu à l'aide de la modélisation numérique unidimensionnelle déjà intégrée dans le logiciel de simulation énergétique, et une solution analytique bidimensionnelle y est ajoutée. Le transfert de chaleur de la tuyauterie du circuit vers le fluide adjacent est résolu à l'aide d'un modèle analytique. L'avantage de ce modèle est qu'il prédit avec précision la température de la surface de contact entre le tube du circuit et le béton, qui est nécessaire pour calculer la capacité thermique de la chaudière/du refroidisseur, et les températures minimales et maximales des pièces, qui sont nécessaires pour la condensation de l'humidité, le confort thermique et l'économie d'énergie.

**An optimized RC-network for thermally activated building components, T Weber, G Jóhannesson - Building and Environment, 2005 -Elsevier[74]**

Des réseaux RC ont été développés pour étudier le transfert de chaleur dans les constructions des bâtiments activées thermiquement. Un réseau en étoile simplifié ainsi qu'un réseau triangulaire ont été utilisés. Bien que le réseau en étoile soit moins complexe que le réseau triangulaire, il ne peut être utilisé que pour un type de construction restreint comme les dalles de béton activé. Le réseau triangulaire peut être utilisé aussi bien pour les systèmes radiants de surface tels que le chauffage par le sol et le refroidissement du plafond que pour le conditionnement des noyaux en béton. Un réseau mod-Y-RC et un réseau D-G RC ont été utilisés.

Bien que le réseau mod-Y-RC soit plus facile à optimiser, il échouera lorsque la couche de béton supérieure ou inférieure au-dessus ou au-dessous de la conduite deviendra trop mince. Le réseau D-G RC peut même gérer de telles constructions là où le réseau mod-Y-RC tombe en panne. Pour le refroidissement et le chauffage des pièces en béton, il sera plus simple d'utiliser le réseau mod-Y-RC car il nécessite un préprocesseur moins compliqué. Un autre avantage du réseau mod-Y-RC est qu'il peut être couplé à des ensembles de simulation existantes en utilisant les routines de calcul pour les murs du noyau de liaison.

Pour le chauffage par le sol et le refroidissement du plafond, il sera nécessaire d'utiliser le réseau D-G RC.

Pour le réseau D-G RC, l'optimisation peut être effectuée dans un préprocesseur à l'aide d'une procédure d'optimisation en utilisant un pas encore plus fin dans les fréquences du calcul FEM, le réseau D-G RC peut être optimisé en fonction de la géométrie et de la plage de fréquences attendues sur la construction du bâtiment à activation thermique.

**Uneven gridding of thermal nodal networks in floor heating simulations, R Holopainen, P Tuomaala, J Piippo - Energy and Buildings, 2007 - Elsevier[75]**

Dans cet article, l'auteur explique l'utilisation d'un réseau nodal inégal dans la simulation du chauffage par le sol avec la méthode du bilan thermique par différence finie est examinée. Deux étages des cas d'essais de chauffage, sols homogènes et multicouches, sont présentés. Les deux cas de test démontrent qu'un réseau nodal avec un maillage inégal diminue clairement le nombre de nœuds thermiques nécessaires pour obtenir un résultat de simulation fiable. Avec une structure de sol homogène, le nombre de nœuds a pu être réduit de 95 % et avec une structure

de sol multicouche plus réaliste, de 55 % sans perdre la précision de la simulation.

Par conséquent, le nombre minimal des nœuds dans la direction z est de 7 avec le boîtier de plancher homogène et de 15 avec l'étui de sol multicouche. Avec moins de nœuds obligatoires à la plus grande partie des nœuds peut être placée de façon inégale.

L'un des avantages évidents de la méthode de quadrillage inégal est que l'algorithme les temps de simulation sont plus courts. Avec une structure de sol multicouche, les temps de simulation sont réduits de moitié.

**A parametric study on radiant floor heating system performance, S Sattari, B Farhanieh - Renewable Energy, 2006 - Elsevier[17]**

Dans cette étude, on expose des systèmes de chauffage par rayonnement efficaces, et qui sont des technologies prometteuses pour économiser l'énergie dans les secteurs commerciaux et du bâtiment, ainsi que pour améliorer le confort thermique des occupants. Cependant, la performance thermique des systèmes radiants dans les bâtiments n'a pas été entièrement comprise et prise en compte dans les logiciels de simulation énergétique des bâtiments actuellement disponibles.

Dans cet article, les effets des paramètres de conception sur la performance d'un système de plancher chauffant rayonnant typique ont été étudiés en utilisant la méthode des éléments finis. Il est à noter que le type et l'épaisseur du revêtement de sol sont les paramètres les plus importants dans la conception des systèmes de chauffage par rayonnement.

Dans cet article, une analyse de sensibilité a été effectuée pour illustrer l'influence des paramètres de conception d'un système de plancher chauffant sur son rendement. La méthode des éléments finis a été utilisée pour la solution d'un domaine considéré typique. Trois mécanismes de transfert de chaleur, soit la conduction, la convection et le rayonnement, ont été considérés comme fonctionnant dans ce domaine. En se basant sur les résultats, il est conclu que différents paramètres de conception ont des effets différents sur la performance du système de plancher chauffant dans une pièce.

En résumé, le type et le diamètre des tuyaux ont le moins d'effets sur la performance thermique du système de plancher chauffant. Ce résultat démontre également que le rayonnement est le mécanisme dominant du transfert de chaleur dans un système de plancher chauffant. Parmi ces deux paramètres, l'épaisseur de la couverture a des effets plus importants sur la performance

du système de plancher chauffant.

**A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system, X Jin, X Zhang, Y Luo - Energy and Buildings, 2010 - Elsevier [76]**

Dans cet article, une méthode de calcul de la température de la surface du sol dans un système de chauffage / refroidissement par le plancher chauffant est proposée, une nouvelle formule est dérivée pour estimer la température de la surface du sol.

La corrélation pour la conductivité thermique de la couche inférieure est développée sur la base du modèle numérique du système de plancher chauffant construit dans cet article. Cette étude présente une méthode de calcul de la température de la surface du plancher dans un système de chauffage et de refroidissement par rayonnement. Une nouvelle formule est dérivée pour estimer la température de la surface du plancher. La méthode suppose que le sol est divisé en deux couches. Avec cette méthode, la température de la surface du sol peut être obtenue facilement sans avoir à résoudre les équations différentielles partielles.

Les résultats montrent que les valeurs de la température de la surface du plancher dérivées sont en accord avec la méthode expérimentale et des valeurs numériques.

**Plancher solaire direct mixte à double réseau en habitat bioclimatique conception et bilan thermique réel, T. DE LAROCHELAMBERT, DECEMBRE 1995, Revue Générale de Thermique.[77]**

L'article présente une nouvelle technique de Plancher Solaire Direct épais à double réseau permettant l'utilisation conjointe du chauffage solaire et d'un chauffage d'appoint. Conçue pour garantir le stockage et la diffusion de la totalité de l'énergie solaire disponible en régulant physiquement l'appoint par l'apport solaire sans gestion informatique centralisée, cette technique simple est testée et suivie dans des conditions réelles d'utilisation en habitat bioclimatique pour étudier l'influence d'une enveloppe sans inertie à grand apport solaire passif sur la productivité de l'installation solaire.

Des bilans journaliers, mensuels et annuels effectués sur trois ans, complétés par des mesures en temps réel sur site, ont permis de vérifier les propriétés fonctionnelles attendues de cette technique (stockage solaire, déphasage et lissage thermique, asservissement du circuit d'appoint, économie de l'énergie d'appoint).

Une analyse du fonctionnement et du bilan global est proposée et ce à travers les concepts de productivité solaire horaire, d'énergie primaire économisée et de taux de couverture solaire corrigé pour comparer les performances énergétiques de différents types d'installations solaires. Laboratoire Gestion des Risques et Environnement, Université de Haute-Alsace, CNRS EP J0082 25 rue de Chemnitz, 68200 Mulhouse (France).

**Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in a Mediterranean climate, K Imessad, L Derradji, NA Messaoudene, F Mokhtari - Renewable energy, 2014 - Elsevier[78]**

Cette étude présente l'analyse thermique d'un prototype de bâtiment, qui a été conçu et construit conformément aux mesures d'efficacité énergétique pour améliorer le confort thermique intérieur, en particulier en été. Le prototype du bâtiment est situé à Souidania l'ouest d'Alger. L'emplacement est caractérisé par un climat méditerranéen tempéré. La présente étude suggère que pour les bâtiments situés à des latitudes d'environ 36N, la longueur optimale de la projection des débords pour les fenêtres orientées vers le sud peuvent être calculées à l'aide de la corrélation expression donnée dans Eq  $P/H = 0,56 (G + H)/H$ .

Une ventilation nocturne naturelle de 8 vol/h peut réduire la demande d'énergie de refroidissement pendant la journée d'environ  $10 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . En conclusion, il est suggéré que la combinaison de différentes techniques de refroidissement passif telles que l'isolation, la masse thermique, les stores de fenêtres et la ventilation nocturne est la stratégie la plus efficace tant du point de vue des économies d'énergie que de la protection thermique intérieure.

**Etude du comportement thermique d'une maison munie d'un système de chauffage solaire, F. Mokhtari, N. Ait Messaoudène, A. Hamid et M. Belhamel, 09 Septembre 2006[79]**

Le travail présenté est l'étude d'un système de chauffage solaire pour une locale monozone. Le système est composé d'un champ de capteurs solaires plans, d'une cuve de stockage d'eau chaude, et d'un local à chauffer. Le système de distribution est composé d'un serpentin en cuivre intégré au milieu du plancher.

La modélisation mathématique du système est basée sur le calcul des bilans thermiques au niveau des éléments constituant le système de chauffage : fluide caloporteur, plancher et air intérieur du local.

Les équations différentielles obtenues sont résolues par la méthode des différences finies avec un schéma explicite. Les résultats obtenus du modèle ont été confrontés aux résultats d'une étude similaire du Pr. Zaheer-Uddin. La confrontation montre une bonne concordance. Le modèle a été utilisé ensuite pour simuler le comportement thermique du système complet sur le site de Bouzaréah (Alger).

**A passive wall design to minimize building temperature swings for Algerian Saharan climate, F Mokhtari, L Loukarfi, M Chikhi, K Imessad, N Ait Messaoudene- Science and Technology for the Built Environment, 2017 - Taylor and Francis[80]**

Dans cette étude, l'effet d'une isolation thermique élevée et d'une masse thermique élevée est étudié numériquement à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS dans des conditions périodiques stables.

Afin de réaliser cette analyse et d'obtenir les meilleures performances, plusieurs configurations de murs extérieurs sont proposées. L'étalonnage du modèle est effectué par une étude comparative des résultats numériques de température avec les données expérimentales. Les résultats montrent que de bonnes performances thermiques sont obtenues par la configuration blocs de terre stabilisés - gypse hémihydraté/fibres de palmier dattier.

**Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct, R. KHAR-CHI Thèse de Magister Université de Blida 2002[33]**

Ce travail se résume à étudier le comportement thermique du plancher solaire direct, plus particulièrement la répartition de la température dans la dalle. Une campagne de mesures a été effectuée sur une longue durée pour tester la réponse de la dalle, ces résultats expérimentaux ont été confrontés à des résultats théoriques obtenus d'un modèle mathématique tout en utilisant la méthode des différences finies avec un schéma explicite- la variation de température dans le béton a été prise en bidimensionnel. L'étude a cerné aussi l'influence de certains paramètres thermo -physiques sur le comportement thermique de la dalle. Les résultats ont montré que la diffusivité thermique prise concorde avec les résultats expérimentaux ( $\alpha = 0.78 E - 6m^2/s$ ). La température de la dalle est générée par la température du fluide circulant dans la grille de chauffe. Le flux conductif est important au démarrage, puis reste constant et avoisine les 100 Watts dans la journée du 22 février 2000.

**Développement d'un code de calcul permettant l'optimisation des systèmes de chauffage de planchers ou sols à l'aide de tubes enterrés, O. Guerri. Communiqué aux JITH 2001, El Marsa Tunis[81]**

Cette étude a comme objectif de déterminer la distance optimale entre les tubes de chauffage de planchers ou de sols afin d'obtenir une température uniforme à la surface (du plancher ou du sol), pour différentes valeurs de la profondeur de pose. Ce travail est basé sur la résolution dans le cas permanent et bidimensionnel de l'équation de diffusion en coordonnées curvilignes. Un maillage presque orthogonal est généré par la résolution numérique d'un système d'équations différentielles. L'équation de diffusion est ensuite exprimée en coordonnées curvilignes ( $\xi, \eta$ ) puis résolue par la méthode des volumes finis. Un code de résolution des équations de Navier-Stokes en coordonnées cartésiennes, polaires ou axisymétriques a été étendu à la résolution de l'équation de diffusion en coordonnées curvilignes.

Le système d'équations obtenu est résolu par la méthode TDMA avec double balayage, le programme de calcul développé est d'abord validé par la comparaison des résultats obtenus avec des valeurs publiées. Il est ensuite appliqué au problème des serres chauffées à l'aide de conduites enterrées. Les distributions de température à la surface du sol sont déterminées en fonction de trois paramètres de contrôle qui sont le nombre de conduites enterrées, la profondeur de pose et la température à la surface des conduites. Le nombre optimal de conduites est en fonction de la température maximale admissible à la surface et de la profondeur de pose possible.

**Optimal Operation of an Embedded-piping floor heating system with control input constraints, M.Zaheer-Uddin, G.R. Zheng and Sung-Hwan Cho. Energy Convers-Vol.38 No.7, page 713-725.1997 [82]**

Dans cette étude, un modèle dynamique et un contrôle optimal du flux de chaleur dans un système de dalle +serpentin ont été étudiés, le système est composé d'une seule zone à chauffer munie d'un plancher chauffant (dalle + serpentin). L'eau chaude circulant dans les tubes est chauffée par une chaudière à gaz. Une solution numérique est mise au point pour un contrôle optimal de 24h prenant en considération les contraintes de la capacité thermique du système de plancher chauffant. Les résultats montrent qu'avec un choix adéquat du modèle numérique, on peut minimiser l'énergie fournie à la chaudière et éventuellement garder une température de confort à l'intérieur de la zone. L'intégration d'un système de régulation au dispositif a été



modélisée également.

**Performance analysis of a solar energy driven heating system, PJ Martinez, A Velázquez, A Viedma - Energy and Buildings, 2005 - Elsevier[83]**

Cet article étudie la température de fonctionnement des systèmes de chauffage solaires permettant l'utilisation d'un plancher chauffant pour transférer la chaleur dans les espaces conditionnés. La connaissance de ces données est importante pour établir des stratégies de contrôle qui mènent à un fonctionnement optimal de ces systèmes. Le second était pour instrumenter le système de chauffage solaire et surveiller son fonctionnement et la troisième consistait à comparer les performances enregistrées données avec les fractions solaires estimées par le f-chart méthode. Cet écart s'explique par la différence entre le coefficient de perte globale théoriquement calculé du bâtiment et sa valeur réelle.

Une certaine expérience a été acquise en ce qui concerne la régulation du système de chauffage pendant son fonctionnement au cours de cette saison de chauffage. Plusieurs idées ont également vu le jour. L'une d'elles consiste à faire en sorte que les collecteurs et la chaleur travaillent de la pompe simultanément, cela va évidemment quelque peu réduire l'efficacité des collecteurs, mais en même temps, mais il permettra d'améliorer la COP de la pompe à chaleur, car elle fonctionnera à des températures extérieures plus élevées.

**Conducting finite element convergence studies using COMSOL 4.0, DW Trott, KG Mathias - Proceedings of the COMSOL Conference, 2010 -comsol.itcitetrott2010conducting**

La théorie de la méthode des éléments finis dans cet article rend ces comparaisons quantitatives en estimant la convergence ordre de l'erreur MEF sur une séquence de mailles progressivement plus fines. L'auteur montre comment réaliser les études de convergence de ce type dans le graphique dans logiciel COMSOL 4.0 sur l'exemple de Lagrange des éléments de différents degrés polynomiaux, qui fera également ressortir l'avantage d'utiliser des éléments d'ordre. Dans cette sous-section, il a utilisé des étapes afin de réaliser une étude de convergence. Il a raffiné à plusieurs reprises le maillage qui a été utilisé pour calculer la solution FEM, aussi il a recalculé la solution et sa norme d'erreur, puis il a copié toutes les normes d'erreur calculées.

Après avoir suivi la procédure tout en effectuant 4 affinements consécutifs, il peut copier les données des carrés  $E2r$  des erreurs MEF du tableau sous l'onglet Résultats dans un autre

logiciel, tel que MATLAB, pour un traitement ultérieur. C'est ainsi que les carrés E2r colonne du tableau dans cet article ont été obtenus. Les autres colonnes ont été facilement calculées en utilisant les quantités Rr et Qr définies à la section.

**Comparison of indoor air temperatures of different under-floor heating pipe layouts, R Gao, A Li, O Zhang, H Zhang - Energy Conversion and Management, 2011 – Elsevier[84]**

Dans cet article, le climat intérieur d'un système de chauffage par le sol dans lequel les tuyaux de chauffage sont posés de façon uniforme et non uniforme à un espacement central de 300 mm, 400 mm et 500 mm a été prédit par la simulation du groupe de renormalisation k-ε et du rayonnement en ordonnées discrètes. Des simulations de CFD et une analyse de variance ont été utilisées pour étudier les différences de gradients de température de l'air et d'homogénéité thermique sur le plancher.

Les résultats de cet article sont validés par les récentes publications présentées par Hasan et Catalina. En comparaison avec cinq types de disposition des tuyaux de chauffage par le sol, il est recommandé que la meilleure méthode de disposition soit le tuyau de chauffage par le sol posé uniformément à un espacement de 400 mm, ce qui répond aux exigences de la norme *NEN – EN – ISO7730*, *ASHRAE 55 – 2004* et *GB 50019 – 2003*.

La différence de température entre les zones de plancher avec et sans tuyau de chauffage peut atteindre 4 °C lorsque les tuyaux de chauffage au sol sont posés de manière non uniforme.

**Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system, D Zhang, N Cai, Z Wang - Energy and buildings, 2013 - Elsevier[85]**

Dans cette étude, l'auteur analyse les caractéristiques de fonctionnement du système de chauffage par rayonnement à partir du plancher, qui ont été analysées par des expériences et des calculs numériques. Un modèle de transfert de chaleur pour l'évaluation de ce système a été effectué et un programme de calcul correspondant a été mis au point. Les effets des paramètres de conception sur la performance de ce système ont été étudiés au moyen d'un programme de calcul préalablement validé par une campagne expérimentale réalisée en laboratoire. Pendant ce temps, la capacité de transfert de chaleur, la distribution du champ de température et le confort thermique du système LRFH ont été analysés par des expériences. Les résultats indiquent que le système LRFH présente une stabilité thermique fine et un confort thermique.

Dans cet article, un modèle de transfert de chaleur du système LRFH a été étudié et un programme de calcul correspondant a été développé.

L'auteur met en évidence les résultats obtenus et indique que la Température de la surface supérieure du plancher et température de l'air intérieur diminue lorsque la distance entre les tuyaux se rapproche et augmente ou lorsque la température moyenne de l'approvisionnement en eau et le reflux des eaux diminue.

Lorsque le système LRFH a atteint un état de fonctionnement stable, la capacité de transfert de chaleur par rayonnement occupe 60 % du total.

La température de l'air intérieur montre une distribution uniforme et peut répondre à la demande de confort thermique.

**Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow, O Bozkır, S Canbazoğlu - Energy and Buildings, 2004 - Elsevier [86]**

Dans cette étude, les performances thermiques instables d'une salle d'essai chauffée par circulation d'air chaud sous le plancher ont été analysées avec un modèle mathématique développé sur l'équilibre de transfert de chaleur entre le flux d'air, le sol et l'air intérieur. Les variations temporelles de la température de l'air intérieur pour le système de chauffage par le sol en série de conduits ont été étudiées théoriquement et expérimentalement. Les résultats théoriques et expérimentaux ont montré un bon accord.

Cette étude définit le transfert thermique instable théorique et expérimental entre le flux d'air chaud, le plancher et l'air intérieur. Bien que le système de plancher chauffant à air chaud par rayonnement ait une faible efficacité de chauffage, il peut être utilisé comme système de chauffage de rechange au système conventionnel de plancher chauffant par rayonnement à eau chaude si des sources de chaleur résiduelle telles que les gaz d'échappement chauds ou les gaz de cheminée sont disponibles.

Le rendement d'un système de plancher chauffant par rayonnement à air chaud peut être satisfaisant pour les maisons bien isolées dans des conditions climatiques douces et pour les maisons beaucoup plus isolées dans des climats plus rigoureux, car le système de plancher chauffant par rayonnement offre une meilleure qualité de chauffage et plus de confort que le système de chauffage à air direct, et la distribution de la chaleur dans un système de plancher chauffant par

rayonnement est généralement uniforme et constante dans toute la pièce : il n'y a pas de courants d'air, de points chauds ni de points froids.

**Utilisation d'un circuit hydraulique dans un plancher pour chauffage et le rafraîchissement dans le contexte Maghrébin , A.Mokhtari, H. Kazeoui, Y.Boukezzi et G.Achard, Revue des Energies renouvelables Vol.1, N°1, pp17- 27 1998.[87]**

Dans ce travail sont présentés les résultats de l'utilisation d'un circuit hydraulique dans un plancher pour le conditionnement climatique des bâtiments. La technique du plancher solaire direct a été utilisée pour le chauffage. Le principe est de faire circuler directement dans un plancher un fluide chauffé par des capteurs solaires sans utiliser de cuves de stockage intermédiaires. Le système ainsi obtenu présente de nombreux avantages par rapport aux systèmes classiques de chauffage solaire sur le plan des coûts, de l'encombrement et de la fiabilité. Dans le souci d'assurer un conditionnement climatique pendant toute l'année, nous avons pensé à exploiter le plancher chauffant, comme circuit hydraulique conditionné, pour le rafraîchissement des ambiances en été, ceci sans investir dans un système de refroidissement de l'air. Il s'agit surtout de valoriser l'installation de plancher chauffant. Les résultats théoriques obtenus nous ont permis de définir l'épaisseur de la dalle chauffante (vide sanitaire/terre-plein) et la surface des capteurs solaires. Pour confirmer les résultats théoriques acquis, ils ont installé une cellule expérimentale alimentée avec PSD.

**Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimée,H Benouali, A Brara, M Mahdad, F Mokhtari - 2011 - dspace.univ-tlemcen.dz[25]**

L'objectif de ce travail est justement de quantifier les performances en saison estivale et hivernale. Dans ce contexte, le CNERIB a construit et instrumenté deux bâtisses en BTC, en vue de décrire leur comportement thermique d'été et d'hiver, vis-à-vis d'une sollicitation climatique extérieure représentative de la région Nord du pays. Cette investigation a nécessité de mettre en place une chaîne de métrologie pour la collecte de mesures in situ.

Dans cet article, le comportement thermique de ces deux bâtisses est décrit et les paramètres de l'inertie thermique des parois de mur en BTC déterminés.

Le but de ce travail est de valoriser et évaluer les performances thermiques en saison estivale et

hivernale des bâtisses en blocs de terre comprimées. L'analyse de la sollicitation thermique en série temporelle a révélé une composante périodique marquée sur une journée pour une paroi homogène en BTC et que, par ailleurs l'épaisseur choisie est correcte pour traiter les problèmes de l'inertie thermique de l'ordre d'une journée. La bâtisse réalisée en mur homogène est apte à remplir les conditions d'un fonctionnement passif, et est donc bien adapté au climat algérien. Sur cet aspect, le rôle de l'isolant reste mitigé pour le contexte étudié car non seulement il risque de freiner l'évacuation de l'excès de chaleur la nuit mais aussi, seul un chauffage écologique et à faible impact sur l'environnement rendrait intéressante cette solution.

Cette étude a mis également en évidence une variabilité dans les modes de transfert de chaleur intervenant lors des échanges diurnes et nocturnes.

**Integration énergétique dans les batiments : Utilisation combinée de l'énergie solaire et de la géothermie basse température, Valentin Trillat-Berdal, Bernard Souyri, Gilbert Achard [88]**

Dans ce travail, l'auteur démontre que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la lutte contre les dérèglements climatiques impliquent le développement et la mise au point de systèmes énergétiques intégrant les énergies renouvelables disponibles sur les sites de construction. Cet article présente l'étude d'un procédé intégrant simultanément l'énergie solaire thermique et la géothermie basse température, et répondant aux besoins de chauffage, de rafraîchissement et de production d'eau chaude sanitaire des bâtiments. Le système a été récemment installé dans une maison individuelle de 180 m<sup>2</sup> en Savoie. Les résultats expérimentaux de la première saison de fonctionnement (de novembre 2004 à août 2005) ont permis d'analyser le fonctionnement du système, de mettre en évidence la décharge thermique du sol générée par le fonctionnement de la pompe à chaleur, et la contribution des capteurs solaires à la recharge thermique du sol lors des périodes de surproduction d'énergie thermique d'origine solaire. Malgré la consommation électrique des auxiliaires, qui pénalisent d'environ 15 % la performance énergétique du système, le coefficient de performance saisonnier est supérieur à 3,1 sur la période considérée. Le taux de couverture solaire pour la production d'eau chaude sanitaire a, quant à lui, une valeur moyenne de 65 % sur les dix premiers mois de fonctionnement. Les résultats issus de la simulation dynamique du procédé réalisés à l'aide du logiciel TRNSYS permettent de procéder à une optimisation technico-économique du système.

**Etude de l'influence de la typologie des constructions sur la performance énergétique des bâtiments dotés de plancher solaire direct ,Habiba. KAZELOUI, Abdelkader. TAHA-KOURT, Abdelkrim. AIT-MOKHTAR, Rafik. BELARBI [89]**

Dans cette étude, ils ont associé la construction en matériaux locaux avec l'utilisation de l'énergie solaire par le chauffage par plancher direct (PSD) . Pour cela, Ils ont été amenés à utiliser un code dynamique de simulation thermique des bâtiments « TRNSYS ». Le travail proprement dit a porté sur l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments types : traditionnels et modernes. Ces derniers utilisent des matériaux de type béton ou brique alors que les premiers sont faits à base de matériaux locaux tels que l'adobe ou la pierre traditionnelle. Pour cela, les besoins énergétiques de chaque bâtiment ont été calculés sans et avec le système de plancher solaire. Ceci a permis l'évaluation de la contribution du système solaire dans la réduction de la consommation énergétique de chaque type de bâtiment. Le confort thermique à l'intérieur de chaque bâtiment, sans et avec PSD, a aussi été étudié. Deux évaluateurs importants de confort ont été analysés : la température intérieure et les indices de confort, PMV l'indice de vote moyen prévisible et PPD qui représente le pourcentage prévisible d'insatisfaits.

**Contribution de l'Énergie Solaire dans le Chauffage de l'Habitat par le Plancher, R. Khar-chi, A. Hamid et M. Belhamel,[90]**

L'article présente l'étude des performances thermiques d'un plancher solaire direct. Un système simple constitué d'une dalle épaisse et d'un capteur plan solaire est testé. Ce travail présente également la variation des différents paramètres influençant l'efficacité d'un tel système (énergie solaire reçue, température ambiante extérieure). Des valeurs mensuelles de température et de rendement thermique du plancher sont présentées par des courbes qui confirment l'efficacité du PSD.

**Viability of integrating solar water heating systems into high energy performance housing in Algeria. S Sami, D Semmar, A Hamid, R Mecheri, M Yaiche - Energy, 2018 - Elsevier [91]**

Les auteurs dans cet article montre que résultats ont révélé des valeurs élevées très prometteuses de la fraction solaire dans presque toutes les régions étudiées et qu'une politique de

financement adéquate permettra d'établir un bon équilibre entre la performance et la conception du système, ce qui se traduira par une plus grande compétitivité de l'énergie solaire par rapport aux énergies conventionnelles. Tout d'abord, le calcul énergétique a révélé des valeurs élevées très prometteuses de la fraction solaire mensuelle  $F_k$  dans presque toutes les régions étudiées qui, selon l'emplacement et les besoins énergétiques, permettent de couvrir de 45 % à 100 % des besoins en eau chaude en utilisant l'énergie solaire. Cependant, l'étude économique a montré que la surface optimale de capteur  $S_{op}$  qui minimise le coût de l'installation solaire est fortement influencée par les coûts du capteur et de l'énergie conventionnelle respectivement  $P_c$  et  $P_f$ . Dans l'ensemble, les résultats indiquent clairement qu'une augmentation de  $P_f$  associée à une diminution de  $P_c$  entraîne une plus grande compétitivité de l'énergie solaire par rapport à l'énergie conventionnelle avec la possibilité d'investir dans des surfaces de capteurs optimales  $S_{op}$  plus importantes.

Dans le contexte algérien, cette situation pourrait être atteinte par la mise en œuvre d'une nouvelle politique de financement consistant à supprimer la politique de subvention de l'énergie conventionnelle mise en œuvre depuis plusieurs décennies et à la remplacer par une nouvelle politique de subvention sur le coût des capteurs solaires. Pour la gamme de paramètres utilisés dans notre étude, les résultats ont révélé qu'une telle politique de financement pourrait aider à économiser une quantité d'énergie conventionnelle jusqu'à 46 % dans les régions du nord et 57 % dans les régions du sud avec une économie correspondante dans le coût d'exploitation annuel du système solaire d'environ 51 % et 69 % respectivement. Cela fera sans aucun doute de l'investissement dans l'énergie solaire un succès économique en Algérie.

## 1.18 Conclusion

Cet état de l'art sur l'application des énergies renouvelable dans l'habitat bioclimatique a permis de cibler de connaissances sur le contexte de l'intégrations des outils actifs et ces propriétés et comment les intégrer dans le bâtiment au niveau mondial et en Algérie, et aussi sur les travaux de la recherche réalisés dans l'intégration du plancher chauffant dans l'habitat et son amélioration sur l'enveloppe du bâtiment. Cette partie a permis d'avoir une vision générale sur la méthodologie à adopter pour l'étude.

## **Chapitre 2**

# **Chapitre 2 : PRESENTATION DU CAS D'ETUDE**



## 2.1 Introduction

Cette partie est parler sur le choix du bâtiment de référence. Notre cas d'étude construit dans le cadre du projet 'MED-ENEC', réalisé en 2009. cette maison c'est une F3 de type rural. Ce chapitre décrit la maison prototype en détaillant les étapes de la réalisation de cette construction. L'intégration des solution passives ayant appliquées sur ce projet soit des fenêtres performantes, les murs extérieurs avec une bonne isolation, cette dernière aussi intégré sur la toiture, protections solaires et une ventilation à l'intérieur de la maison. pour assurer le chauffage par plancher chauffant y'a un système solaire intégré pour réduire au maximum la consommation énergétique. le mode de fonctionnement du système solaire et la composition de cette maison sont présentés dans ce chapitre.

## 2.2 Description du cas d'étude

La première bâtisse d'efficacité énergétique en Algérie, un chalet réalisé à Souidania (Alger), Le contrôle de performance qui a débuté juste après l'achèvement de la bâtisse, été 2009, a montré qu'il est possible d'arriver à une économie d'énergie de 60 %.Le projet qui s'inscrit dans le cadre du programme MEDENEC(Energy Efficiency in the construction Sector of the Mediterranean) de l'Union européenne, a été réalisé en partenariat avec le CNERIB (Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment) et le CDER ( centre de développement des énergies renouvelables). Le programme a pour objectif de relancer les mesures relatives à l'efficacité énergétique et à l'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur de la construction, en vue de réduire la consommation énergétique dans les pays du bassin méditerranéen. [92]

## 2.3 Présentation de la maison

La maison rurale de type F3, objet de ce projet, couvre une superficie de  $80 m^2$  et un volume total de  $240 m^3$ . Elle est située à Alger, dans l'enceinte du CNERIB, le choix de ce type d'habitation n'est pas fortuit, il se justifie par le souci de reproductibilité dans le cadre du programme quinquennal du gouvernement Algérien pour la construction de 1.200.000 logement [80], dont le tiers sera de type rural. L'étude est ce faite pour une implémentation de la maison dans la région d'Alger. Cette région fait partie de la zone climatique (A) qui est caractérisée par des tempéra-

tures de base. [93]



FIGURE 2.1 – La maison Prototype

La figure suivante présente le plan architectural détaillé de la maison bioclimatique pilote de CNERIB de notre cas d'étude ; ce plan présente toute les pièces soit chauffés par un plancher chauffant ( chambre 1, chambre 2, Séjour ) et les pièces non chauffées présenté par les sanitaires, salle d'eau la cuisine et le couloire.

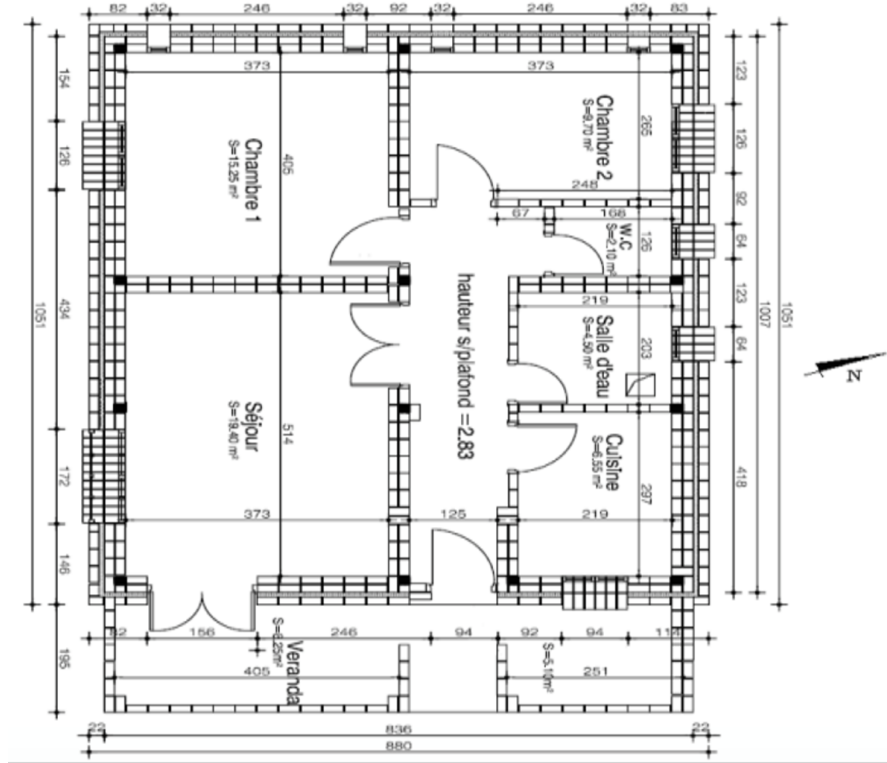


FIGURE 2.2 – Plan architectural de la maison pilote

## 2.4 Description du dispositif de chauffage

### 2.4.1 Schéma général du dispositif

Les systèmes combinés sont des systèmes de chauffage solaire qui fournissent de la chaleur à la fois pour l'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage des locaux. Le système combiné installé dans la maison pilote a été conçu pour une seule famille. Le chauffage des pièces était assuré par un plancher chauffant (PSD). Ce système est un moyen efficace d'obtenir un confort thermique dans les bâtiments et avec une faible consommation d'énergie. Le système de chauffage comprenait  $8 \text{ m}^2$  de capteurs solaires thermiques situés sur le toit de la maison et orientés vers le sud avec une pente de  $45^\circ$ . L'angle d'inclinaison des capteurs est supérieur à la latitude ( $36^\circ 707'$ ) à Souidania car le système est principalement destiné au chauffage en hiver. La capacité de stockage assurant la distribution d'eau chaude de 300 L. Le bon fonctionnement du système combiné était assuré par une vanne de dérivation différentielle reliée au plancher chauffant.

Le plancher chauffant (PSD) était constitué d'une dalle de sol encastrée de tubes en serpentine

où l'eau chaude circulait au moyen d'une pompe de circulation et de conduites de distribution. Les tubes serpentins du plancher chauffant étaient fabriqués en polyéthylène réticulé (PEX) de haute qualité pour :

- Flexibilité : ils peuvent se courber dans un virage à grand rayon si l'espace le permet.
- Acheminement direct des tuyaux ; coût réduit des matériaux ; installation plus facile.
- Possibilité d'alimenter le nouveau PEX avec les systèmes existants en cuivre et en PVC.
- Avantages pour l'environnement : Le PEX est plus respectueux de l'environnement que le cuivre.
- Longévité et inflammabilité lors de l'installation.

Du point de vue écologique, ensuite, l'écoconstruction se concentre sur le bilan énergétique global du matériau (le BTS dans notre cas) et donc tant sur l'énergie utilisée lors de sa production que celle qu'il permettra d'économiser une fois intégré dans le bâtiment. Parmi les mesures d'efficacité énergétiques utilisées dans ce projet pilote, on cite :

- Utilisation des matériaux locaux, BTS (Béton de Terre Stabilisé) : c'est un système intéressant de par sa consommation énergétique, ses propriétés sismiques, ainsi que la disponibilité locale de la matière première ;
- Climatisation passive ;
- Grande inertie thermique : Plancher bas : 15 cm béton lourd (chauffage par plancher hiver). Plancher haut : 20 cm béton (climatisation été) ;
- Isolation horizontale et verticale (16 cm EPS en plancher haut, 9 cm EPS murs extérieurs et 6 cm PSX plancher bas) ;
- Orientation adéquate de l'ouvrage : gains solaires en hiver ; L'orientation du logement est un facteur très important à considérer, surtout pour la distribution des ouvertures :

L'exposition nord ne peut être retenue,

Les expositions est ouest sont à éviter en raison des surchauffes d'été.

L'exposition sud est intéressante car elle permet de profiter pleinement des apports.

solaires en hiver et moyennant des protections solaires adéquates évitent les surchauffes d'été.

L'idéal est donc une maison dont la façade principale, la plus vitrée, regarde vers le sud.

**Principe de fonctionnement**

La quantité d'énergie fournie par le soleil varie selon l'endroit, l'heure de la journée et les conditions climatiques. Le potentiel solaire de Souidania (région d'Alger) couvre les besoins énergétiques pour le chauffage en hiver. Selon le schéma d'installation, présenté dans la figure 2.3, les capteurs solaires couvrent une surface de  $8 \text{ m}^2$  orientée vers le sud avec une inclinaison de  $45^\circ$  (angle optimal pour le chauffage).

Ces capteurs solaires sont connectés en parallèle afin d'augmenter le débit puisque le système doit couvrir simultanément les besoins en chauffage et en eau chaude. Le principe de fonctionnement est décrit comme suit :

La chaleur produite par les capteurs solaires (1) est distribuée au réservoir (3) ou aux tubes en serpentin de la dalle de plancher (4) par le biais du fluide thermique. Ce fonctionnement est assuré par une pompe de circulation (2). La pompe ne sera effectivement activée que si la sortie de la température chaude du capteur solaire atteint un certain niveau de température ( $35^\circ\text{C}$ ). La priorité est donnée à l'ECS, lorsque la température du réservoir supérieur atteint le point de consigne de  $55^\circ\text{C}$ ; la vanne à trois voies (5) est activée pour alimenter directement le serpentin du plancher en eau chaude solaire. Cette eau chaude circule ensuite dans les tubes. L'échange de chaleur avec l'air ambiant se fait par rayonnement et par convection à partir de la surface de la dalle. En raison de la capacité thermique élevée de la dalle du plancher, la réponse du système a tendance à être lente, mais c'est aussi un avantage pour maintenir un environnement intérieur confortable plus stable. Les systèmes solaires thermiques de production d'eau chaude nécessitent une source de chaleur auxiliaire, c'est-à-dire une chaudière (6), qui fournit la chaleur auxiliaire, si l'une des conditions de base suivantes s'applique :

- L'énergie solaire est insuffisante pour chauffer l'eau.
- Pas d'énergie solaire pour chauffer l'eau.

Plusieurs éléments composent notre installation de chauffage ces éléments peuvent être résumés dans la figure 2.3

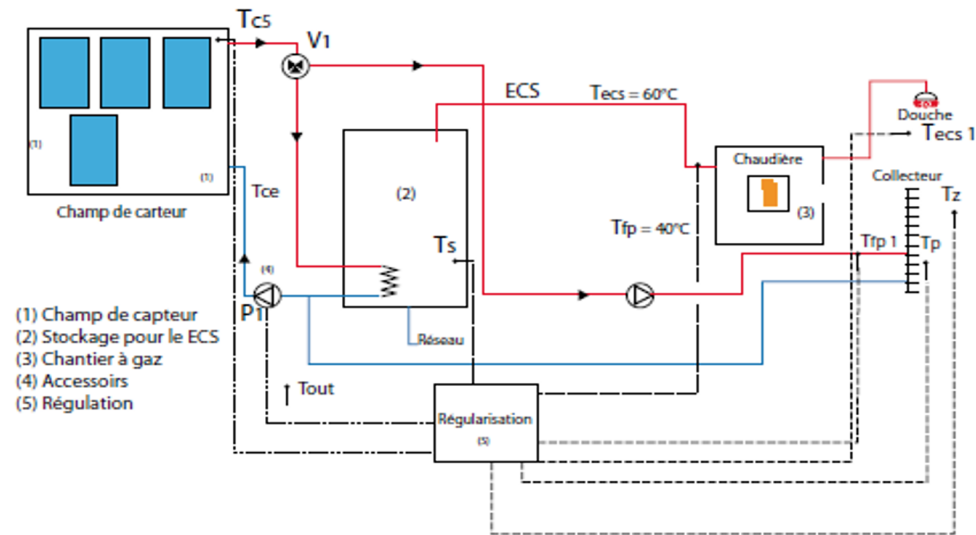


FIGURE 2.3 – schéma descriptif de l'installation

## 2.4.2 Stratégie de construction durable

### Double vitrage

isolation aussi bien thermique que phonique Le double vitrage permet d'utiliser la faible conductivité thermique de l'air. L'insertion d'une lame d'air de quelques millimètres entre 2 feuilles de verre réduit le coefficient de transmission, global  $U_g$  du vitrage de  $5,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  à  $2,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ;

- Traitement des ponts thermiques qui représentent jusqu'à 20 % des déperditions ;
- Ventilation hygiénique par un système statique de type Astato ;
- Eau chaude solaire pour les besoins domestiques à appoint gaz séparé ;
- Plancher solaire direct (PSD) :  $8 \text{ m}^2$  de capteurs solaires plans ;
- Rafraîchissement par ventilation nocturne : orientation des ouvertures de ventilation.

Selon la direction des vents frais dominants d'été ; C'est une bonne méthode d'économie d'énergie, facile à mettre en oeuvre. Il est nécessaire de ventiler les locaux pour assurer une ambiance intérieure confortable et de bonne qualité par l'élimination du gaz carbonique, de l'humidité et de tous les composés organiques volatils.

Le système de ventilation naturelle doit comporter :

- Des entrées d'air : elles permettent l'entrée de l'air extérieur et peuvent être auto-réglables et anti-retour,
- Des dispositifs de transfert de l'air : grilles ou détalonnage sous les portes,
- Des sorties d'air dans les pièces humides ou de service (cuisines, SDB, douches, WC, etc.).
- Brasseurs d'air ;
- Végétation façade ouest : protection contre les vents froids hivernaux ;
- Ombrage (diminution de la charge de climatisation) : protections solaires horizontales et verticales.
- Optimisation de l'éclairage naturel et utilisation d'appareils électriques à basse consommation.



FIGURE 2.4 – La mise en place des fenêtres a double vitrage

### 2.4.3 Principe de fonctionnement de l'installation

Le système est composé de quatre capteurs solaires, du plancher chauffant, d'un ballon d'eau chaude solaire et d'un fluide caloporteur (eau). L'eau est chauffée dans le capteur solaire par le rayonnement du soleil puis circule directement dans les tuyaux du plancher (PE-Xc). C'est donc lui qui permet de véhiculer la chaleur du soleil jusque l'air de local à chauffer. Grâce à une forte

inertie de la dalle, le fluide peut stocker et restituer la chaleur produite.

#### 2.4.4 Caractéristique du tube utilisé

Le PEX utilisé dans la maison prototype a une conductivité thermique de  $\lambda = 0,43 \text{ W/m.K}$  et un diamètre de  $\Phi = 16 \text{ mm}$ . La tuyauterie de distribution a été assemblée en boucle pour chaque zone afin d'obtenir le confort thermique souhaité.

La figure 3.8 montre que la tuyauterie est fixée au treillis d'acier soudé, qui est placé à son tour avec une épaisseur d'isolation de 6 cm de polystyrène extrudé.

Une distance de 15 cm a été choisie entre les tuyaux à proximité des murs extérieurs, et augmentant jusqu'à 30 cm en direction du centre du sol, afin d'éviter d'avantage de pertes thermiques.

Le PE-Xc il est favorisé dans cette étude vue ses avantages en terme du coût, dans ce qui suit une présentation de quelques propriétés de ce matériau. Le tube multicouche Henco se compose d'un tube en aluminium soudé bout à bout dans le sens de la longueur, pourvu d'une couche interne et externe en polyéthylène réticulé.

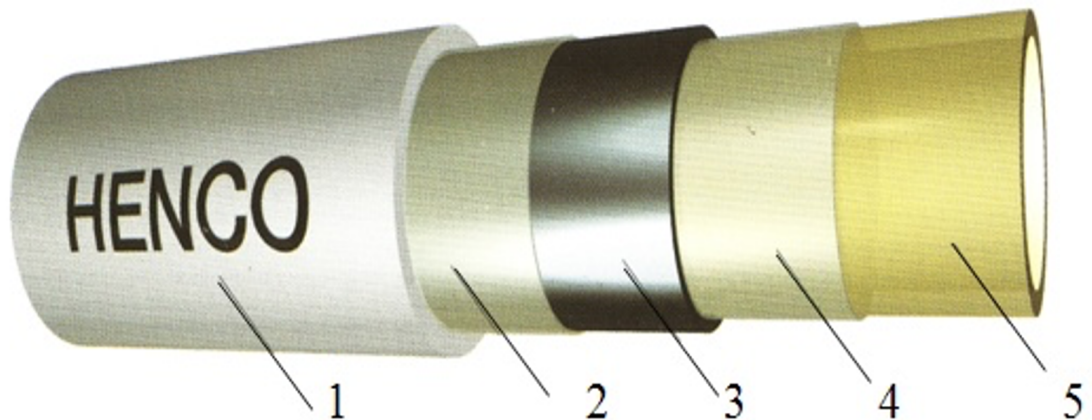


FIGURE 2.5 – tube multicouche

Par faisceau d'électrons. Les différentes couches sont raccordées entre elles par une couche d'adhérence de qualité supérieure. Le résultat c'est un tube multicouche que réunissent en soi tous les avantages des tubes en matière synthétique en métal.

1, 5 : Tube externe et interne en PE-XC polyéthylène de haute densité.

2, 4 : Couche d'adhérence de qualité supérieure pour un assemblage homogène entre le tube en aluminium et le tube intérieur en PE-Xc.



3 : Tube en aluminium (AL) soudé bout à bout dans le sens de la longueur et contrôlé automatiquement.

N.B : PE-Xc c'est le polyéthylène réticulé par faisceau d'électrons.

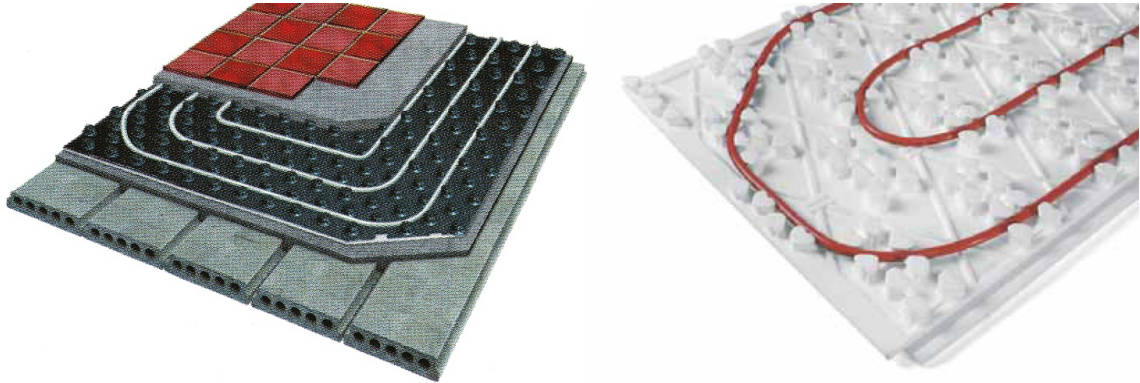


FIGURE 2.6 – Quelques emplacements des escargots en PE-Xc/AL/PE-Xc

#### Caractéristique du tube Multicouche

Supporte à la température est à l'eau  $T_{max} = 95^{\circ}C$  est  $P_{max}$  jusqu'à 10 bars.

-Dilatation linéaire minimale : grâce à la présence de la couche d'aluminium, le coefficient de dilatation de tube est comparable à celui du cuivre et 8 inférieurs à celui d'un tube synthétique ordinaire.

-Résiste à la corrosion.

-Longue durée de vie jusqu'à 50 ans.

Indéformable : après avoir plié, le tube garde la forme souhaitée. Il n'a pas de mémoire thermique comme les tubes en matière synthétique. Ceci simplifie et accélère la mise en œuvre et le montage des tubes et le montage des raccords.

#### La distribution des tuyauteries

La distribution des tuyauteries est faite d'une manière pour assurer une répartition homogène de la température à l'intérieur des locaux chauffés, pour cela on trouve que le pas des nœuds diminue, en approchant vers les murs extérieurs (pas de 15 cm), par contre, il augmente en s'éloignant des murs extérieurs (pas de 30 cm).

La longueur de l'escargot. La longueur de la tuyauterie du séjour est de l'ordre de  $L_s = 85m$ .

Pour la chambre 1, elle est estimée de  $L_{ch1} = 51m$  environ.

Pour la chambre2, elle est estimée de  $L_{ch2}=37m$  environ.

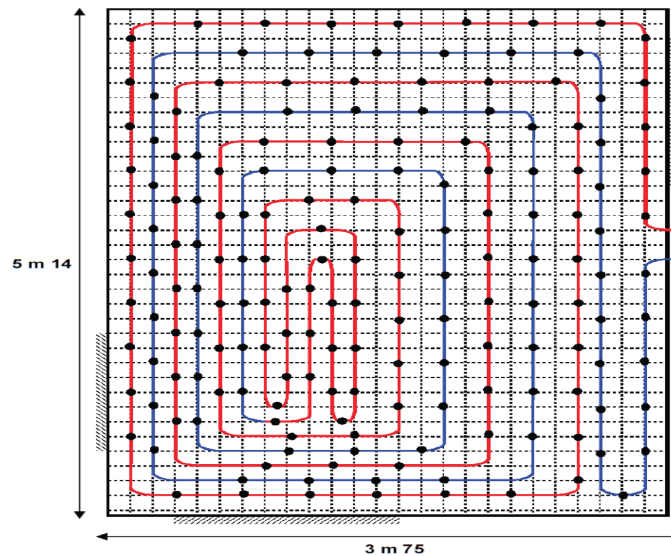


FIGURE 2.7 – Distribution de l'escargot dans le séjour

## 2.5 L'emplacement de la tyauterie dans la maison

Dans la figure 3.8 on voit que le type d'installation de la tuyauterie du plancher chauffant en escargot. Les tuyaux d'un plancher chauffant ne doivent jamais se chevaucher et pour cela, ils sont installés en escargot. Les tubes seront plus ou moins espacés selon la puissance voulue, ainsi, l'escargot sera plus compact. Le matériau des tubes est le PER (polyéthylène réticulé), il est plus souple et moins cher que le cuivre qui était utilisé auparavant. Il est également plus facile à mettre en place puisqu'il n'y a aucune soudure à faire.

Pour le plancher chauffant, le pas (distance entre 2 tuyaux) est calculé par rapport à un besoin de chauffage. Pour le plancher chauffant, le pas est fixe. En général, on va plutôt changer le débit pour adapter la température par pièce. De plus, vu qu'un plancher chauffant est très réactif, on peut utiliser un thermostat pour régler la température au plus juste.

Pour un plancher chauffant, le pas est, de nos jours très faible dans la moyenne de 10 cm pour permettre une restitution uniforme de la chaleur au travers des quelques centimètres de béton. Dans le cas d'un plancher chauffant, le diffuseur permet de répartir la chaleur sur toute la largeur de la dalle. Le confort et la puissance de chauffe viendront de la surface couverte par les

diffuseurs et du type de matériaux utilisé.



FIGURE 2.8 – Emplacement de l'escalot dans le séjours

## 2.6 Caractéristiques des matériaux de construction

Pour certains bâtiments, l'enveloppe (les murs, les toitures, les sols, les fenêtres, les portes) peut avoir un impact significatif sur la consommation d'énergie. L'auditeur énergétique doit déterminer les caractéristiques actuelles de l'enveloppe. Pendant l'enquête, une fiche d'évaluation de l'enveloppe du bâtiment sera établie pour inclure les informations sur les matériaux de construction (niveau d'isolation des murs, sols et toitures), la surface et le nombre des différents composants de l'enveloppe (type et nombre de vitrages pour les fenêtres). De plus, les commentaires sur les besoins de réparation et les remplacements récents seront notés pendant l'enquête. Quelques mesures classiques pour améliorer la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment sont indiquées ci-dessous ;

### Remplacement des fenêtres

si les fenêtres occupent une partie importante des surfaces exposées des bâtiments, l'utilisation des fenêtres à haut rendement (une valeur de rendement élevé, un vitrage avec couche à faible émissivité, l'étanchéité à l'air, etc.) peut réduire la consommation d'énergie et améliorer le confort intérieur.

### 2.6.1 Matériaux de construction

#### Les murs

Les murs de la maison ont été construits en utilisant du béton de terre stabilisée (BTS). La brique BTS est un matériau de construction écologique qui offre un excellent contrôle de l'humidité, une longue durée de vie, de bonnes caractéristiques d'isolation, d'excellentes qualités acoustiques et une capacité de stockage thermique intéressante. Pour augmenter la durée de vie utile des blocs de BTS, un stabilisateur (ciment) a été ajouté avec un volume de quantité allant de 3 à 6 %. Il s'agit d'une alternative écologique aux matériaux conventionnels.

#### Le plancher haut

Représentation	Couche	Epaisseur [m]	$\lambda$ [W/m.°C]	R [ $m^2.C/W$ ]
Plancher haut	1/he			0.05
	Polystyrène expansé	0.016	0.046	3.47
	Béton lourd	0.2	1.75	0.11
	Plâtre	0.05	0.35	0.14
	1/hi			0.11
				Total = 3.88

TABLE 2.1 – Caractéristiques thermophysiques des composants du plancher haut

#### Le plancher bas sur terre pleine

Représentation	Couche	Epaisseur [m]	$\lambda$ [W/m.°C]	R [ $m^2.C/W$ ]
Plancher bas	1/he			0.17
	Béton lourd	0.02	1.75	0.01
	Polystyrène expansé	0.06	0.046	1.54
	Béton lourd	0.27	1.75	0.154
	Mortier + sable	0.03	1.15	0.03
	Carelage	0.02	1.7	0.01
	1/hi			0.11
				Total = 1.914

TABLE 2.2 – Caractéristiques thermophysiques des composants du plancher bas

## Les murs extérieurs

Représentation	Composants	Epaisseur [m]	$\lambda$ [W/m.°C]	R [ $m^2.C/W$ ]
Mur exterieur	1/he			0.06
	BTS	0.14	1.15	0.12
	Polystyrène	0.10	0.05	2.13
	BTS	0.29	1.15	0.25
	1/hi			0.11
				Total = 2.67

TABLE 2.3 – Caractéristiques thermophysiques des composants du mur

## L'isolation

La densité des murs de la BTS est d'environ  $1700 \text{ kg.m}^3$ . Son coefficient de transmission thermique (U) est de  $3,6 \text{ W/m}^2.K$  lorsque l'épaisseur de la paroi est de 14 cm, et de  $2,54 \text{ W/m}^2.K$  dans le cas de 29 cm [25]

. Dans le cas de la présente étude, une isolation supplémentaire des murs était nécessaire. Cela a été fait de la manière suivante :

- Dans les murs extérieurs, une couche intermédiaire de 9 cm de polystyrène expansé a été utilisée. En outre, un film de polyéthylène de 1 mm a été ajouté comme pare vapeur.
- Le plafond a été bien isolé avec 16 cm de polystyrène expansé et une couche de 1 mm de film de polyéthylène pour la protection contre la diffusion de l'humidité.
- Le sol a été isolé avec 6 cm de polystyrène extrudé (XPS).



FIGURE 2.9 – Les murs extérieurs avec isolation

### L'orientation

L'orientation du bâtiment a bénéficié de stratégies solaires actives et passives. L'orientation a également facilité la modération de la température et l'éclairage naturel du jour. Comme le montrent la figure 3.1, la façade de la maison, qui comprend la zone 1 (pièce 1) et la zone 2 (pièce 2), était orientée vers le sud. Le nord est le mur le plus froid de la maison pilote ; il confine une salle de bain, une cuisine et un mur de la zone 3 (salle de séjour). Cette configuration minimise les pertes de chaleur. Les murs ouest et est empêchent la surchauffe par l'absence d'ouvertures sur le côté ouest, et assurent le refroidissement par les vents naturels de l'été sur le côté nord-est.

### Les fenêtres

Les fenêtres et les cadres représentent généralement le "point faible" d'un bâtiment à haut rendement énergétique. Le choix de fenêtres appropriées peut optimiser la combinaison de l'éclairage naturel, de la ventilation, du contrôle du bruit, de la sécurité et de l'agrément visuel qui relie les espaces intérieurs aux espaces extérieurs. Les fenêtres de la maison pilote étaient à double vitrage avec des châssis Upvc. L'Upvc a de meilleures propriétés isolantes que l'aluminium. Les caractéristiques des fenêtres sont les suivantes :

- Coefficient de transmission thermique du vitrage,  $U_g = 1W/m^2.K$  ;
- Coefficient de transmission thermique du cadre,  $U_f = 1,2W/m^2.K$  ;

- Coefficient de transmission thermique de tous les éléments de la fenêtre,  $U_w = 1,2W/m^2.K$ .

Façade	Composition	Dimension [mm]
Chambre 1	Fenêtre	126x140
Chambre 2	Fenêtre	170x140
Séjours	Porte fenêtre	141x220

TABLE 2.4 – Composition des ouvertures des locaux chauffés de chaque façade

Le cadre occupait 20 % de la surface totale de la fenêtre [80].

### Les ponts thermiques

Les ponts thermiques sont des discontinuités dans toute barrière thermique. Ils sont plus prononcés lorsque le matériau créant le pont est un conducteur thermique élevé. Pour minimiser les pertes de chaleur et limiter le risque de condensation, les normes algériennes DTR recommandent de choisir des matériaux appropriés afin de garantir que l'estimation du pont thermique ne dépasse pas 20 % des pertes de transmission thermique [25].

### Ventilation naturelle

Comme la maison pilote est située sur un site au climat modéré, l'utilisation de la ventilation naturelle, qui est une technique de refroidissement passif, peut offrir un potentiel important d'économies d'énergie. Le système de ventilation naturelle a été assuré par des fenêtres ouvrables permettant d'alimenter l'air extérieur la nuit. En outre, les fenêtres sont équipées de stores qui permettent de bloquer les rayons du soleil en été.

## 2.7 Consommation énergétique de l'habitat

## 2.8 Contexte et enjeux de l'efficacité énergétique dans le bâtiment

Les enjeux environnementaux en termes d'épuisement des ressources et de changement climatique sont très importants. Pour ces raisons, de nombreux efforts de recherche se portent sur l'efficacité énergétique des bâtiments et plus précisément sur la réduction de leur consommation énergétique. Cette volonté conduit à deux voies de recherche distinctes.

### 2.8.1 La conception bioclimatique des bâtiments

La conception bioclimatique des bâtiments permet de réaliser des constructions intégrées à leur environnement et optimales pour les besoins énergétiques. Aussi elle a pour objectif de réduire les besoins énergétiques des bâtiments et d'obtenir des conditions de vie adéquates et confortables (température, taux d'humidité, luminosité...etc.) de manière la plus naturelle possible grâce à une conception intelligente des bâtiments.

L'efficacité énergétique d'un bâtiment est influencée par divers facteurs : orientation, forme, qualité de l'isolation thermique, choix des fenêtres, utilisation de protections solaires, etc. Pour limiter les besoins en chauffage et en climatisation, et par là même les rejets polluants dans l'atmosphère, les communes pourront veiller à ce que tous ces aspects soient optimisés dès le stade de la construction.

Le tableau de la consommation d'énergie, ci-dessous, montre les très fortes variations dans la performance énergétique un logement classique par rapport au logement étudiant. Cependant, malgré le renforcement de l'isolation thermique et l'efficacité des équipements de chauffage, la consommation d'énergie globale ne cesse d'augmenter. Les raisons principales sont l'augmentation de la surface des logements par rapport au nombre d'occupants et une amélioration générale du confort.

Mois	Consommation énergétique de la maison étudiant [kWh]	Consommation énergétique ( habitat classique) [kWh]
Janvier	1210	2467
Fevrier	560	1802
Mars	116	1802
Avril	85	1320
Mai	96	800
Juin	98.5	695
Juillet	101	1264
Aout	101	1132
Septembre	98.5	755
Octobre	85	664
Novembre	145	1483
Décembre	783	2058
Total [kWh]	3478	16470

TABLE 2.5 – Caractéristiques thermophysiques des composants du plancher bas



## 2.9 Présentation du climat Algérien (Alger)

Le climat Algérien est formé d'un climat Méditerranéen au nord et un climat désertique au sud. Le climat méditerranéen se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. D'autres régions dans le monde possèdent les mêmes caractéristiques climatiques comme : la Californie, le centre du Chili, la région du Cap en Afrique du Sud et le sud-ouest de l'Australie. Ces régions sont connues par la sécheresse estivale pendant le mois le plus chaud et aussi la rareté des précipitations. En revanche les hivers peuvent être bien arrosés et connaissent leurs précipitations maximums dans les régions Nord-ouest en automne et Nord-est en printemps. Les températures sont très variables en été sur les façades océaniques et les étés sont tempérés par la fraîcheur dans l'océan près des côtes. Contrairement au tour de la Méditerranée et à l'intérieur des terres, les étés sont très chauds ( $T_{moy} = 22\text{ C}^\circ$ ) ; sur les surfaces intérieures des terres la température maximale dépasse les  $30\text{ C}^\circ$  en été et approche les  $40\text{ C}^\circ$  vers l'est ou le sud du bassin, y compris les régions montagneuses. Par contre l'hiver est doux et les températures moyennes du mois le plus froid sont généralement supérieures à  $9\text{ C}^\circ$ . Le climat désertique est caractérisé par une précipitation très peu abondante. Ce qui explique la non présence de la vie des animaux et du végétale. Il se caractérise aussi par des températures chaudes et froides, ce qui donne une très grande différence de température entre le jour et la nuit. Il existe une classification thermique des communes d'Algérie, proposé dans le document technique réglementaire c3-2 par le centre national d'étude et de recherche intégré du bâtiment (CNERIB), qui considère les zones climatiques en Algérie sous 04 grandes zones A, B, C, D et deux sous zones B' et D'. Dans notre étude on s'intéressera seulement au climat de la région d'Alger, qui se divise selon le DTR C 3-2, en une seule zone climatique et qui est la zone A qui correspond au rivage de la mer et parfois les versants des chaînes côtières ;

L'implantation de notre bâtiment se fera dans la zone A, là où la station météorologique de mesure climatique Souidania se situe. Les mesures climatologiques ont été prises par le logiciel MétéoNorm 7.2, dont les mesures peuvent parfois être approximatives, lorsque les mesures sont prises par interpolation entre les stations les plus proches.

## **2.10 Conclusion**

Dans ce chapitre on a défini le cas d'étude et ces propriétés thermophysique, on a aussi montré le schéma général du dispositif du système de chauff eau solaire intégré et l'implentation de la tuyauterie sur la dalle chauffée, aussi on aussi défini les caractéristiques des matériaux de construction comme les murs, les plancher haut et bas, l'isolation thermique, remplacement des ouvrants, aussi on a défini le concept bioclimatique de la maison prototype, et on a finalisé par la définition du climat influ sur notre maison prototype.

## **Chapitre 3**

# **Chapitre 3 : MODELISATION ET SIMULATION**

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre on vas parler sur la méthode des éléments finis et le modele basique theorique ; après un résumé sur le modèle physique présenté par le logiciel Comsol multiphysics et a la fin on vas parlé sur le modèle mathématique qui présente les équations de de conservation et les équations de la radiosité surfacique.

### 3.2 Méthode de calcul

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) ou Neumann (gradients aux bords) ou de Robin (relation gradient/valeurs sur le bord).

Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, où, grâce à la formulation variationnelle, les solutions du problème vérifient des conditions d'existence plus faibles que celles des solutions du problème de départ et où une discrétisation permet de trouver une solution approchée. Comme de nombreuses autres méthodes numériques, outre l'algorithme de résolution en soi, se posent les questions de qualité de la discrétisation :

existence de solutions,

unicité de la solution,

stabilité,

convergence,

mesure d'erreur entre une solution discrète et une solution unique du problème initial.

#### 3.2.1 Démarche éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes :

– discrétisation du milieu continu en sous domaines ;

- construction de l’approximation nodale par sous domaine ;
- calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- assemblage des matrices élémentaires ;
- prise en compte des conditions aux limites ;
- résolution du système d’équations.

### Discrétisation géométrique

Cette opération consiste à procéder à un découpage du domaine continu en sous domaines :

$$D = \sum_{e=1}^{n_e} D_e \quad (3.1)$$

telque :

$$\lim_{e \rightarrow 0} (U_e D_e) = D \quad (3.2)$$

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie souvent complexe du domaine étudié par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune.

Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés.

### Approximation Nodale

L’approximation par éléments finis est une approximation nodale par sous domaines ne faisant intervenir que les variables nodales du domaine élémentaire  $D_e$  :

$$\forall M \in D_e, u^*(M) = N(M)u_n \quad (3.3)$$

où  $u^*(M)$  représente la valeur de la fonction approchée en tout point  $M$  de l’élément et  $N$ , la matrice ligne des fonctions d’interpolation de l’élément  $u_n$  variables nodales relatives aux nœuds d’interpolation de l’élément.

### Équation de la chaleur

L'équation de la chaleur est une équation aux dérivées partielles parabolique, introduite au début du XIXe siècle par Fourier pour décrire le phénomène physique de conduction thermique.

Soit  $\Omega$  un domaine de  $R^3$  de frontière  $\Gamma = \partial\Omega$  et  $T(x,t)$  un champ de température sur ce domaine (champ de scalaires). En présence d'une source thermique dans le domaine, et en l'absence de convection, i.e. de transport de chaleur (i.e. on s'intéresse à la propagation de la température au sein d'un milieu « stable », i.e. qui ne bouge pas ; on ne s'intéresse pas à la propagation de chaleur due par exemple à l'existence d'un courant d'air, d'un courant de convection. La convection est plutôt un problème de mécanique des fluides.), l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\forall x \in \Omega, \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = D\Delta T(x,t) + \frac{f}{\rho c} \quad (3.4)$$

ou :

$\Delta$  est l'opérateur Laplacien ;

$D$  est le coefficient de diffusivité thermique (en  $m^2/s$ ) ;

$f$  une éventuelle production volumique de chaleur (en  $W/m^3$ ) ;

$\rho$  est la masse volumique du matériau (en  $kg/m^3$ ) ;

$c$  la chaleur spécifique massique du matériau (en  $J/kg.K$ ).

L'équation de la chaleur est donc une équation de la forme :

$$u' - \Delta u = f \quad (3.5)$$

Elle est parabolique. Pour que le problème soit bien posé, il faut spécifier :  
une condition initiale :

$$\forall x \in \Omega, T(x, 0) = T_0(x) \quad (3.6)$$

une condition aux limites sur le bord du domaine, par exemple :  
de Dirichlet :

$$\forall x \in \partial\Omega, T(x, t) = 0 \quad (3.7)$$

de Neumann :

$$\forall x \in \partial\Omega, \frac{\partial T(x,t)}{\partial n} = n(x) \cdot \nabla T(x,t) = 0 \quad (3.8)$$

où  $n(x)$  est le vecteur normal unitaire au point  $x$ . L'équation de la chaleur, introduite initialement pour décrire la conduction thermique, permet de décrire le phénomène de diffusion. La diffusion est un phénomène de transport irréversible qui se traduit à terme par une homogénéisation de la grandeur considérée (par exemple la température dans un domaine, la concentration en produits chimiques dans une solution...). D'un point de vue phénoménologique, et au premier ordre, ce phénomène est régi par une loi de Fick (par exemple sorption d'eau dans les matériaux composites, diffusion d'actifs au travers de la peau). Dans l'équation précédente,  $T$  représente alors la répartition de la grandeur considérée (eau dans un composite, concentration d'un constituant chimique...) et le terme source dans  $\Omega$  est souvent nul (i.e.  $f = 0$ ).

#### Équation de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens (visqueux) dans l'approximation des milieux continus. Elles modélisent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Nous considérons l'équation de Navier-Stokes sous la forme :

$$\rho u + \rho(u \cdot \nabla)u - \eta \Delta u - \left(\xi + \frac{\eta}{3}\right) \mathbf{grad}(\text{div}u) = \rho f - \nabla p \quad (3.9)$$

où :

$u$  est la vitesse du fluide ;

$p$  est la pression dans le fluide ;

$\rho$  est la masse volumique du fluide ;

$\eta$  est la viscosité dynamique en cisaillement du fluide ;

$\xi$  est la viscosité dynamique en compression du fluide ;

$f$  est une force massique s'exerçant dans le fluide.

Si de plus le fluide est incompressible (bonne approximation pour les liquides), alors ( $\text{div}u =$

0) et l'équation se simplifie :

$$\rho u + \rho(u \cdot \nabla)u - \eta \Delta u = \rho f - \nabla p \quad (3.10)$$

### 3.3 Description du logiciel

Le logiciel Comsol Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par élément finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, ainsi que multiple phénomènes physiques modélisées en EDP. Développé initialement comme une toolbox de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin de géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

COMSOL a été lancé par les étudiants diplômés à Germund Dahlquist reposant sur des codes mis au point pour un cours universitaire à l'Institut royal de technologie (KTH), à Stockholm, en suède.

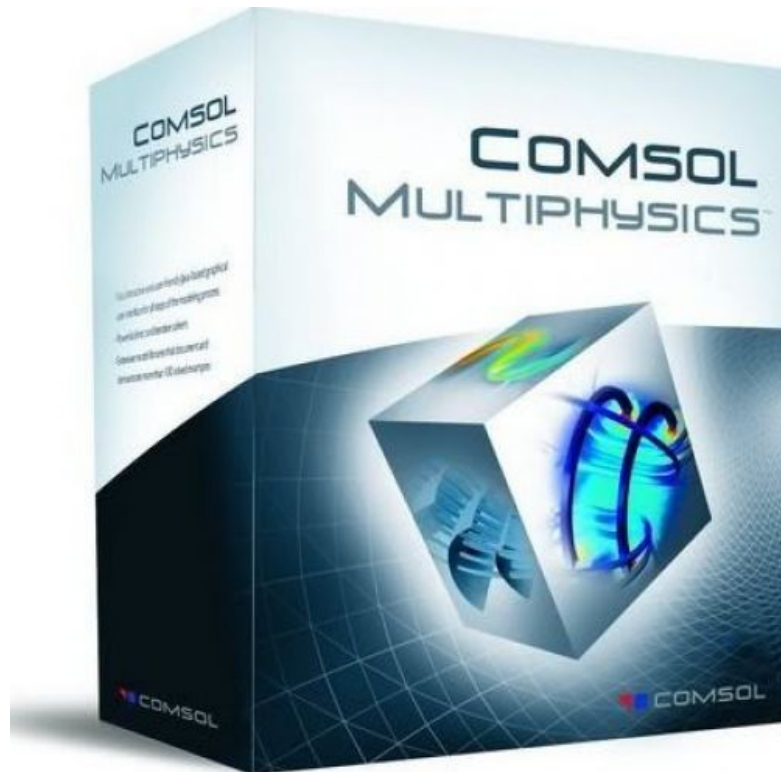


FIGURE 3.1 – Comsol Multiphysics



### 3.4 Procédure de simulation

Les étapes essentielles de conception d'un modèle en utilisant COMSOL Multiphysics sont :

Utilisation d'une physique prédéfinie

Implémentation et résolution d'un modèle Multi Physiques

Définition de propriétés physiques dépendant de la solution recherchée

Analyse temporelle

Les étapes de construction d'un modèle comprennent notamment :

Définition de la géométrie

Définition de la physique et des conditions aux limites

Maillage

Résolution

Post-traitement et analyse des résultats

### 3.5 L'interface graphique (le navigateur de modèle)

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. Celui ci permettra de créer une nouvelle page de simulation, vérifier les physiques et bien entendu d'obtenir de l'aide. En choisissant **model wizard** dans la section **model** de la fenêtre **new**, Comsol nous demande par la suite choisir la dimension de l'espace dans la quelle nous voulant travailler, c'est la fenêtre **Select Space Dimension**.

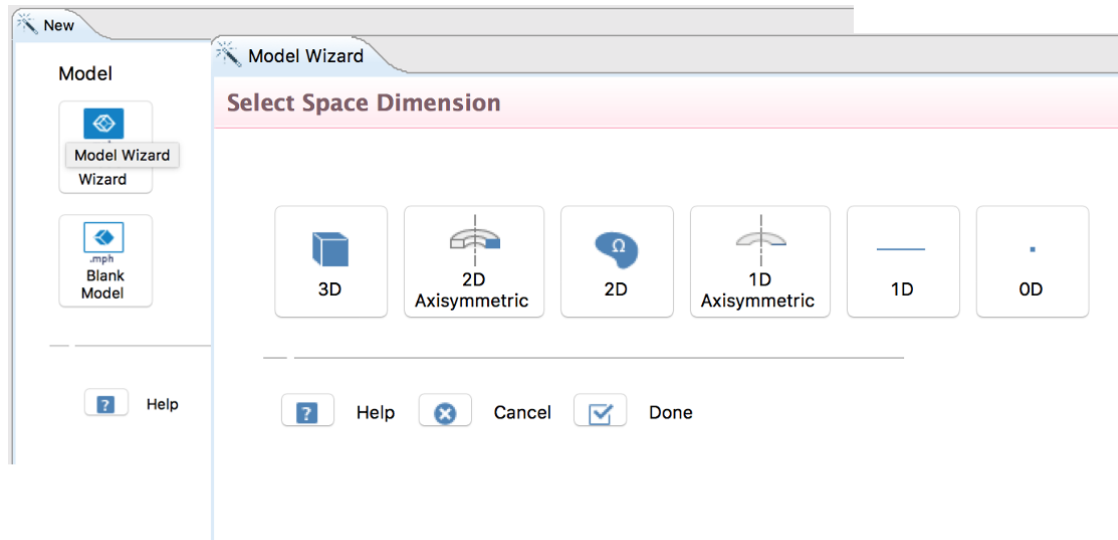


FIGURE 3.2 – Définition Dimension d'espace

### 3.5.1 Choix du modèle

Nous allons commencer par l'étude du champ de flux de chaleur par rayonnement et par convection de température. Lanceons donc le module transfert de chaleur dans le navigateur de modèle. Nous allons ici étudier à une étude à 3 dimensions.

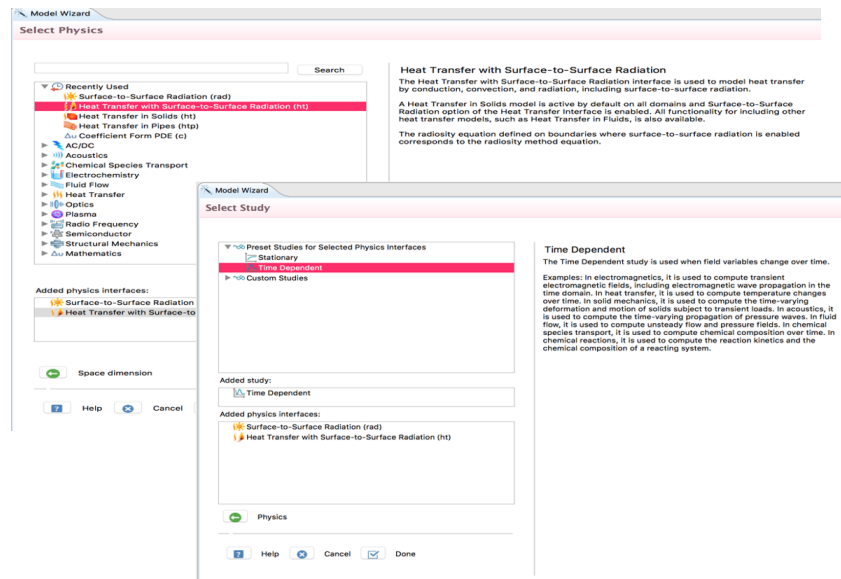


FIGURE 3.3 – Définition la physique d'étude

## Définition de la géométrie

Une fois le mode choisi, l'interface graphique s'ouvre. On doit d'abord commencer par déterminer la géométrie du problème qui définit concrètement l'espace où sont résolues les équations.

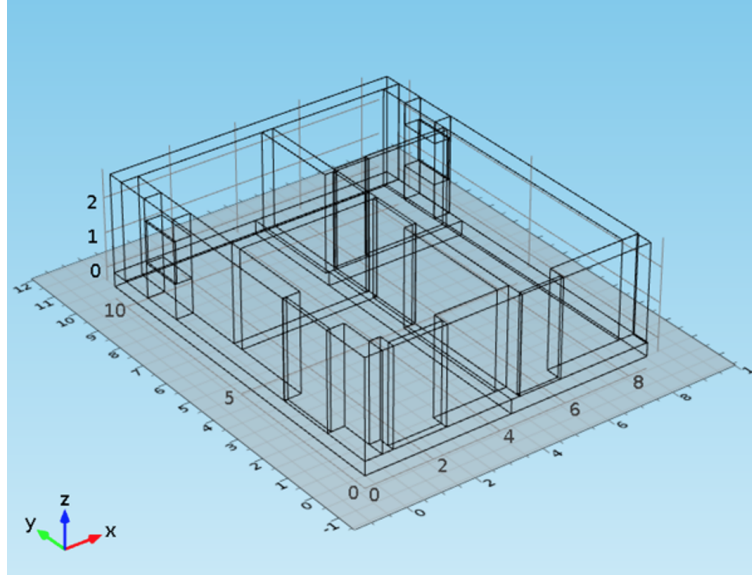


FIGURE 3.4 – Définition de la géométrie

Une fois la géométrie créée, il existe pour le logiciel des sous-domaines qui correspondent à des portions de l'espace initial. Dans l'exemple traité, l'espace initial est de dimension deux et les sous-domaines définis par la géométrie sont l'espace compris à l'intérieur du milieu. Les équations et les conditions initiales sont définies sur les sous-domaines de la géométrie, de même pour les conditions aux limites.

### 3.5.2 Introduction des propriétés des domaines

Le but est ici de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : masse volumique, capacité calorifique, la conductivité, de chaque matériau. Les paramètres sont évidemment liés au modèle physique étudié. Il est également possible d'écarter un des domaines du modèle étudié.

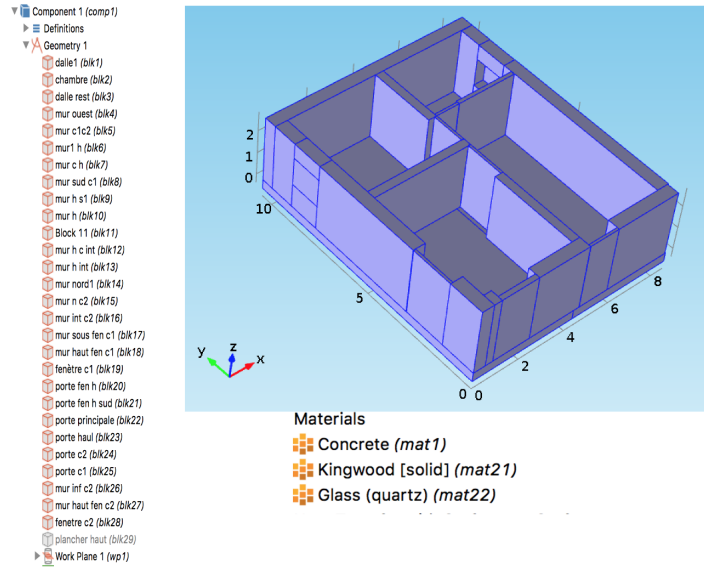


FIGURE 3.5 – Définition des domaines

### 3.5.3 Conditions aux limites

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes. A chaque surface de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu’il s’agisse ou non d’une surface intérieure au système.

Choisissons de manière pertinente les différentes conditions aux limites. Nous pouvons les changer plus tard, de manière à voir leur influence.

### 3.5.4 Le maillage

Le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en volumes élémentaires (appelés mailles) définis par des points (appelés nœuds). Ces nœuds constituent les connexions entre les mailles.

Le maillage est réalisé automatiquement par le logiciel. L’algorithme prend pour point de départ les éléments de la géométrie et crée des nœuds supplémentaires jusqu’à satisfaire des critères prédéfinis comme le nombre de mailles ou la taille maximale des mailles. On peut utiliser les tailles prédéfinies (extra grossier, grossier, normal, fine, extra fine...) par le logiciel ou agir sur les paramètres de génération du maillage.

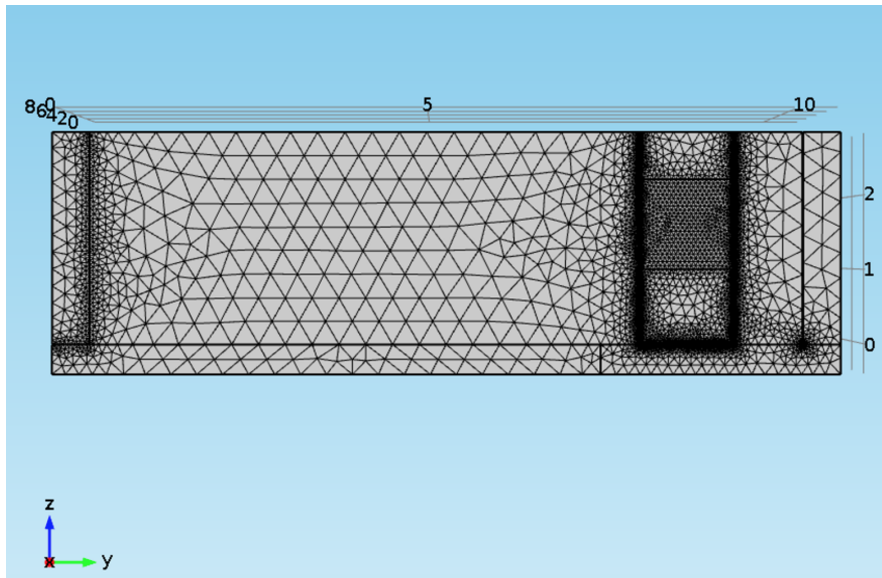


FIGURE 3.6 – Définition de maillage

### 3.5.5 Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour paramétrer la résolution. De même, lors de la résolution d'un problème multiphysique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables. S'il y a des problèmes de convergences, il est possible que le problème soit mal posé (conditions aux limites, ...).

La résolution est d'autant plus longue que le nombre de nœuds du problème est élevé. Sa vitesse dépend également du type de solveurs choisis. Il est possible de fixer une initialisation qui peut être une valeur, ou une solution précédemment enregistrée. On peut choisir la ou les variables que l'on souhaite résoudre, dans le cas d'un problème multi physique que l'on peut découpler. Le jeu de données à créer pour la résolution numérique complète comprend le modèle de comportement, les propriétés physiques, émissivités et conductivité du matériau, et les conditions aux limites imposées sur le maillage. Ces données sont saisies conventionnellement par l'interface de maillage et stockées sur un fichier texte. Ce fichier pourra être ultérieurement modifié par l'éditeur de texte. Il suffit à l'utilisateur d'ordonner au logiciel la résolution en désignant le fichier donné, précédemment créé et le fichier contenant le maillage.

### 3.5.6 Analyse des résultats

Lorsque le programme a convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de postprocessing, qui permet d'analyser les résultats.

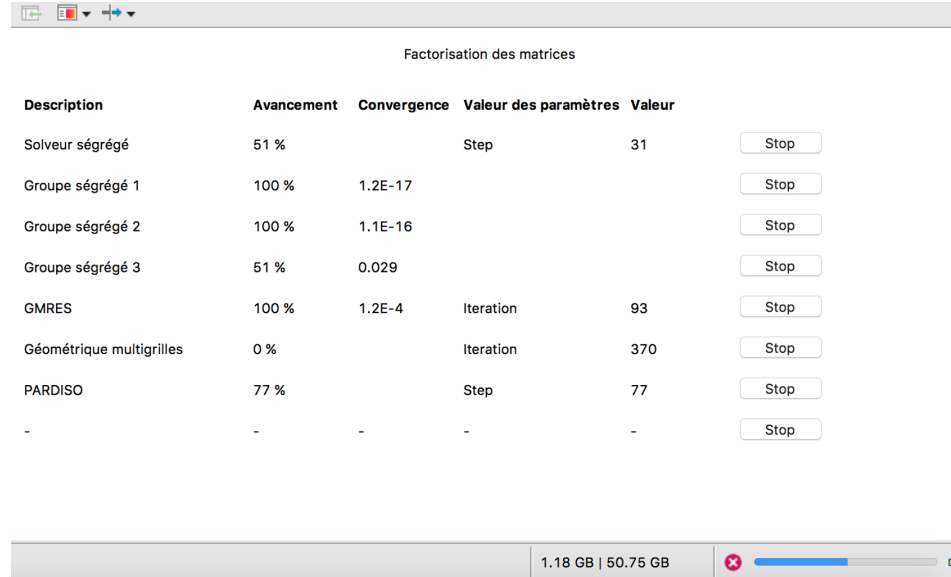


FIGURE 3.7 – calculs les résultats finaux

## 3.6 Modèle mathématique

### 3.6.1 Equations de conservation

La simulation du n'importe quel phénomène physique nécessite le passage par les lois mathématiques, pour un problème thermique on se trouve face aux équations fondamentales de conservation de masse (équation de continuité), de quantité de mouvement (2ème loi de Newton) et de l'énergie (1er principe de la thermodynamique).

Une simulation numérique a été réalisée pour analyser comment la conduction et la convection naturelle influençaient les profils de température de l'air à l'intérieur des chambres. Les équations, qui décrivent les différents processus dans le système, sont présentées dans les sous-sections suivantes.

Soit un volume de contrôle  $\mathbf{V}$  traversé par quantité physique  $\phi$ . On désigne par  $\vec{\mathcal{J}}$  la densité de flux de  $\phi$ , par diffusion. Pour établir le bilan  $\phi$  dans  $\mathbf{V}$ , il est nécessaire de déterminer les différents flux entrants et sortants ainsi que la variation temporelle de  $\phi$  dans  $\mathbf{V}$ .

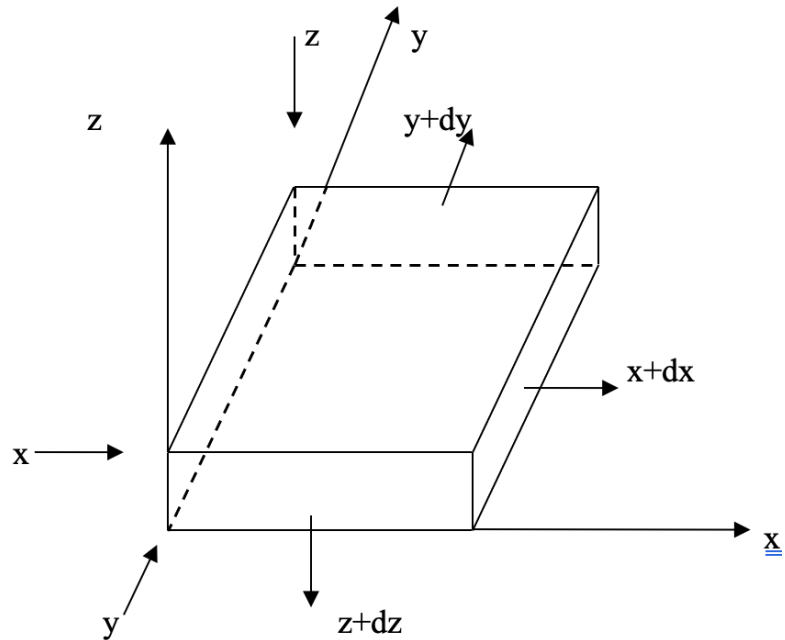


FIGURE 3.8 – variation du flux suivant x, y, z

**Les flux entrants sont**

$(J_x, dy, dz)$  suivant x

$(J_y, dx, dz)$  suivant y

$(J_z, dx, dy)$  suivant z

**Les flux Sortants sont**

$(J_x * dx)dydz = (J_x)dydz + \frac{\partial J_x}{\partial x} dx dy dz$  suivant x

$(J_y * dy)dx dz = (J_y)dx dz + \frac{\partial J_y}{\partial y} dx dy dz$  suivant y

$(J_z * dz)dx dy = (J_z)dx dy + \frac{\partial J_z}{\partial z} dx dy dz$  suivant z

**Le flux net par diffusion est alors**

$$J_{\text{sortie}} - J_{\text{entree}} = \left( \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right) dx dy dz = (\text{div } \vec{J}) dv \quad (3.11)$$

**Equation de conservation de masse**

Soit  $ml$  la fraction massique de la quantité  $l$  et  $U$  la vitesse avec laquelle se déplace un système.

- Les flux entrants de la quantité  $l$  par convection sont donnés par :

$$(\rho U_x ml dy dz) \text{ suivant } x$$

$$(\rho U_y ml dx dz) \text{ suivant } y$$

$$(\rho U_z ml dx dy) \text{ suivant } z$$

- Les flux sortants par convection sont :

$$(\rho U_x m1) dy dz + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x m1) dx dy dz \text{ suivant } x$$

$$(\rho U_y m1) dx dz + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y m1) dx dy dz \text{ suivant } y$$

$$(\rho U_z m1) dx dy + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z m1) dx dy dz \text{ suivant } z$$

Si  $Rl$  est la production par unité de volume et  $\frac{\partial}{\partial t} (\rho m1) dx dy dz$  la variation par unité de volume et de temps, alors le bilan de matière de  $l$  s'écrit en tenant compte du flux net de diffusion :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m1) = Rl - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x m1) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y m1) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z m1) \right] - \left[ \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right] \quad (3.12)$$

ainsi :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m1) = Rl - \text{div}(\rho \vec{U} m1) - \text{div}(\vec{J}) \quad (3.13)$$

Avec :

$$\vec{U} = [U_x U_y U_z]^T$$

Et :

$$\vec{J} = [J_x J_y J_z]^T$$

D'après la loi de **Fick** :

$$\vec{J} = -\tau [(\overrightarrow{\text{grad}}) m_l] \quad (3.14)$$

Où  $\tau$  : coefficient de diffusion



L'équation (4.3) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_1) + \text{div}(\rho \vec{U} m_1) = R_1 + \text{div}[\tau(\overrightarrow{\text{grad}})m_1] \quad (3.15)$$

Cette dernière équation traduit la conservation de masse.

#### Equation de conservation de l'Énergie

Soit  $h$  l'enthalpie massique et  $R$  la production d'énergie par unité de temps et de volume. En se référant à l'équation (4.3), l'équation de l'énergie s'écrit comme

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = R - \text{div}(\vec{J}) - \text{div}[\rho (\vec{U})h] \quad (3.16)$$

Ou encore :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \text{div}[\rho (\vec{U})h] = R - \text{div}(\vec{J}) \quad (3.17)$$

Où

$h = C_p T$  D'après la loi de FOURIER, la densité de flux  $\vec{J}$  est donné par :

$$\vec{J} = -\lambda(\overrightarrow{\text{grad}})T$$

L'équation (4.7) devient alors :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \text{div}[\rho (\vec{U})C_p T] = R + \text{div}[\lambda(\overrightarrow{\text{grad}})T] \quad (3.18)$$

L'Équation (4.8) traduit la conservation de l'énergie.

#### Équation de conservation de la quantité de mouvement

De la même façon que pour l'équation de conservation de matière, les équations de mouvement de mouvement suivant  $x$  : Les flux entrants par convection sont donnés par :

• Les flux entrants par convection sont donnés par :

$$(\rho U_x) U_x dy dz \text{ suivant } x$$

$$(\rho U_x) U_y dx dz \text{ suivant } y$$

$$(\rho U_x) U_z dx dy \text{ suivant } z$$

• Les flux sortants par convection sont :

$$(\rho U_x)U_x dydz + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x U_x) dx dy dz \text{ suivant } x$$

$$(\rho U_x)U_y dx dz + \frac{\partial}{\partial y}(\rho U_x U_y) dx dy dz \text{ suivant } y$$

$$(\rho U_x)U_z dx dy + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U_x U_z) dx dy dz \text{ suivant } z$$

En s'aidant des équations (4.3) et (4.7), la conservation de quantité de mouvement suivant  $x$  s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_x) + \text{div}(\rho U_x \vec{U}) = -\text{div}(\vec{J}) + S \quad (3.19)$$

Où  $S$  est le terme source

Et  $\vec{J} = -\mu(\overrightarrow{\text{grad}})\rho U_x$ ; Pour un fluide Newtonien

L'Equation(4.9) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_x) + \text{div}(\rho U_x \vec{U}) = S + \text{div}(\mu \overrightarrow{\text{grad}}\rho U_x) \quad (3.20)$$

Des équations similaires à cette dernière pour les quantités de mouvement suivant  $y$  et  $z$ .

### Equation générale

Les équations (3.15), (3.19) et (3.20) présentent la même forme ; il devient alors intéressant de donner une équation qui permet de s'adapter aux différents bilans cités ci-dessus.

En effet, si  $\phi$  est une quantité physique quelconque, alors l'équation de conservation de  $\Phi$  s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho \vec{U} \phi) = \text{div}(\tau \overrightarrow{\text{grad}}\phi) + S \quad (3.21)$$

Où  $\phi$  serait :

$m_l$  pour la conservation de masse.

$h$  pour la conservation de l'énergie.

$U_j$  pour la conservation de la quantité de mouvement ( $j = x, y$  ou  $z$ ).

Dans le cas d'un bilan global de matière ( $m_l = 1$ ) ; l'équation (3.21) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} + \text{div}[\rho (\vec{U})] = 0 \quad (3.22)$$

Qui représente l'équation de la continuité.

### 3.6.2 Echange radiatif d'un corps grise

La radiosité surfacique a été utilisée pour décrire le flux radiatif de la surface. On suppose que les parois sont diffuses et grises.

Un corps gris n'absorbe pas toute l'énergie des rayons incidents qui tombent sur sa surface : il en réfléchit une fraction. On définit ainsi la réflectivité,  $\rho_i$ , comme la fraction de l'énergie totale incidente qui est réfléchi, Un corps gris n'émet pas le maximum d'énergie à une température donnée. On définit l'émissivité,  $\epsilon_i$ , comme la fraction de l'énergie qui serait émise si le corps était noir.

Les surfaces considérées sont supposées homogènes

Les surfaces considérées sont supposées opaques

Les surfaces considérées sont supposées isotherme

Les surfaces considérées sont supposées diffuses

Les surfaces considérées sont supposées émissives

Les éclaircissements sont supposés homogènes et les réflexions diffuses.

#### Flux incident

$$J = \epsilon M_1^0 + \rho G_i \quad (3.23)$$

D'après loi de Kirchhoff

$$\epsilon + \rho = 1 \quad (3.24)$$

Remarque :

$$\alpha = \epsilon = 1 - \rho \text{ D'après 3.24}$$

En a

$$\rho = 1 - \epsilon \quad (3.25)$$

En remplace 3.25 dans 3.23 on trouve :

$$J = \varepsilon M_1^0 + (1 + \varepsilon)G_i \quad (3.26)$$

Et en a aussi :

$$M_1^0 = \rho T_1^4 \quad (3.27)$$

En remplace 3.27 dans 3.26 et nous obtenons :

$$(1 - \varepsilon)G_i = J - \varepsilon\sigma T_1^4 \quad (3.28)$$

Avec :

$$\sigma = 5.675 * 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$$

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différentes étapes suivies la définition la méthode des éléments finis lors d'une simulation d'une maison solaire avec le logiciel Comsol Multiphysics®, et un petit rappel sur les équations de conservation et les équations du flux radiatif qui forment la règle de base qui régit les phénomènes physiques. Le modèle mathématique dans ce chapitre été développé pour vérifier tous les équations intégrés sur Comsol Multiphysique pour faire les calculs théorique.

Ces équations dévise sur deux principales Parties : convection qui montre les équations de mouvement d'air et la deuxième partie qui montre les équations de la radiosité surfacique.

## **Chapitre 4**

# **Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre on choisit quatre paramètres pour étudier leurs influences sur le comportement d'une maison munie d'un système de chauffage solaire et voir les différents phénomènes, les paramètres étudiés sont :

- 1- Comparaisons des résultats expérimentaux qui à été fait avant par [25] et validation de notre modèle.
- 2- Etude de l'influence de la variation des températures de fluide caloporteur sur la température de l'air à l'intérieur des chambres chauffées.
- 3- Etude l'influence de la radiosité surfacique sur la température de l'air en fonction de la variation du fluide caloporteur.
- 4- Etude le comportement du couplage de la convection avec le flux radiatif.

## 4.2 ProcEDURE DE LA RÉSOLUTION

L'étude expérimentale rapport e par [25]. indique que les charges thermiques ont été calcul es au moyen de plusieurs mesures de température d'entrée et de sortie qui ont été prises dans la maison pilote à l'aide de thermocouples placés sur l'enveloppe ainsi que dans certains éléments du système de chauffage. Toutes les mesures dans l'étude de [25] . ont été collect es via un enregistreur de données [80], et la simulation numérique dans cette étude a été d velopp e par le logiciel Comsol Multiphysics 5.3a.

Le modèle numérique a été construit en utilisant un maillage séquentiel 2D contrôlé par la physique avec une taille d'élément extra fine. Chaque domaine a été discr t s  à l'aide d'éléments tétraédriques libres, formant un maillage non structurel et linéaire dans les limites entre les couches, comme le montre la figure 4.1. La cellule de grille présente un maillage de 291107 nœuds et 24089 limites internes, avec un pas de temps de simulation de 30 minutes. La durée de la simulation était d'environ 2 heures 4 minutes et 33 secondes. Elle a été r alis e sur un ordinateur de type Macintosh équipé d'un processeur intégré i7 quad-core de 4<sup>eme</sup> génération à 2.0 GHz, boosté jusqu'à 3.2 GHz pendant le calcul avec 8 Go de mémoire ram. Celle-ci a encore été boost e à 64 Go pendant le calcul grâce au disque dur de type SSD et à une carte graphique iris pro de 2 GHz.

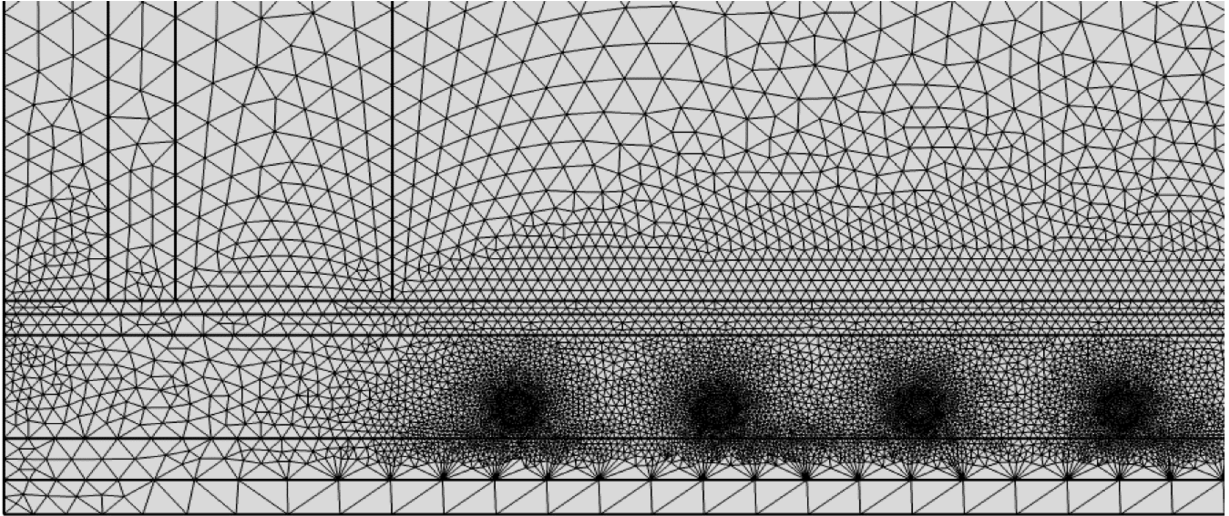


FIGURE 4.1 – Maillage tétraédrique

### 4.3 Validation de la simulation avec des données expérimentales

La figure 4.2 montre les résultats de la simulation obtenus pour ce travail de la variation de la température de l'air à l'intérieur de la pièce pour 132h de chauffage par plancher chauffant. Elle montre également les résultats des données expérimentales rapportées par [25]. Les conditions d'entrée dans le processus de la simulation ont été définies comme suit :

système de chauffage éteint, température de la pièce à 0 °C,

température de l'eau dans le circuit de chauffage à 40 °C

calculs à 50 cm de hauteur.

Le débit volumique a été maintenu constant à  $17 \text{ l/h.m}^2$ .

De façon remarquable, le profil de température, pour les résultats de la simulation, distingue deux périodes de temps différentes. Dans la première période, de 0 à 72h, on observe une augmentation de la température depuis le point de départ du chauffage jusqu'au point d'équilibre. Il s'agit d'une augmentation de 0,58 °C/h pour les premières 12h de la journée, et de 0,14 °C/h pour les 60h suivantes. Cela peut être dû au flux d'air et à l'effet de variation de température jour-nuit qui se produit à 50 cm de hauteur dans la pièce. Dans la deuxième période, de 72h à 132h, la température de la pièce se stabilise à un niveau d'équilibre de 15 °C comme indiqué dans le travail expérimental et ceci est dû à une diminution de la vitesse du flux d'air à la même hauteur de 50 cm.

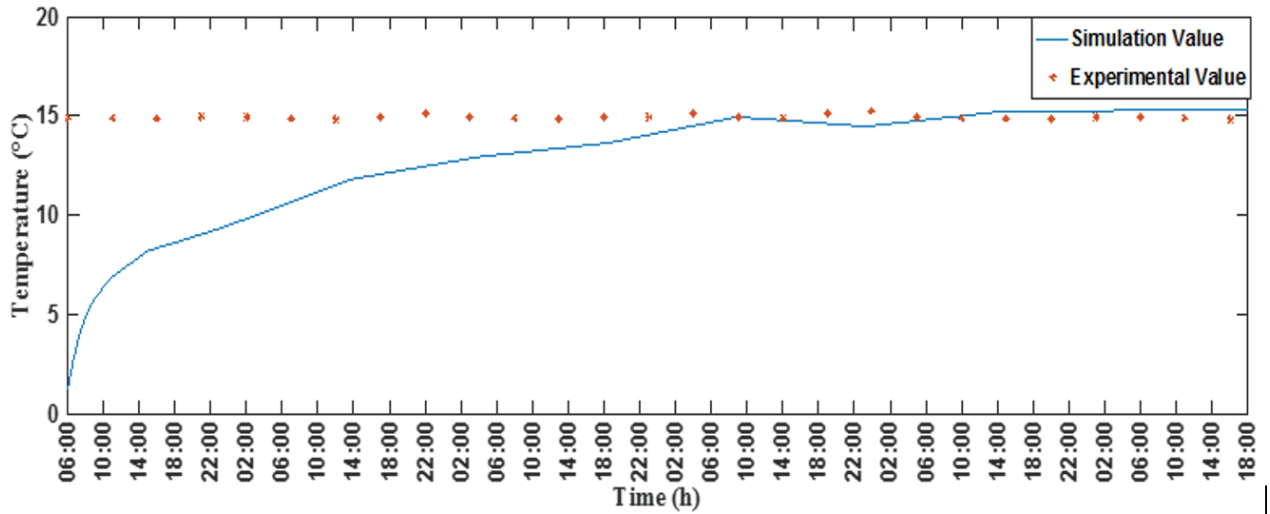


FIGURE 4.2 – Comparaison entre la simulation et les profils expérimentaux de température de l’air ambiant pendant le processus de chauffage

Les résultats de la simulation ont été validés avec les valeurs expérimentales de la 72ème heure pour une durée de 60 heures (Figure 4.3). Les valeurs de déviation de température de la simulation et des données expérimentales montrent dans le tableau 3 que la déviation maximale de 0,75 et la déviation minimale de 0,02 donnent une valeur moyenne de 0,35, ce qui est une déviation très insignifiante. Ceci confirme la validation de notre approche de simulation.

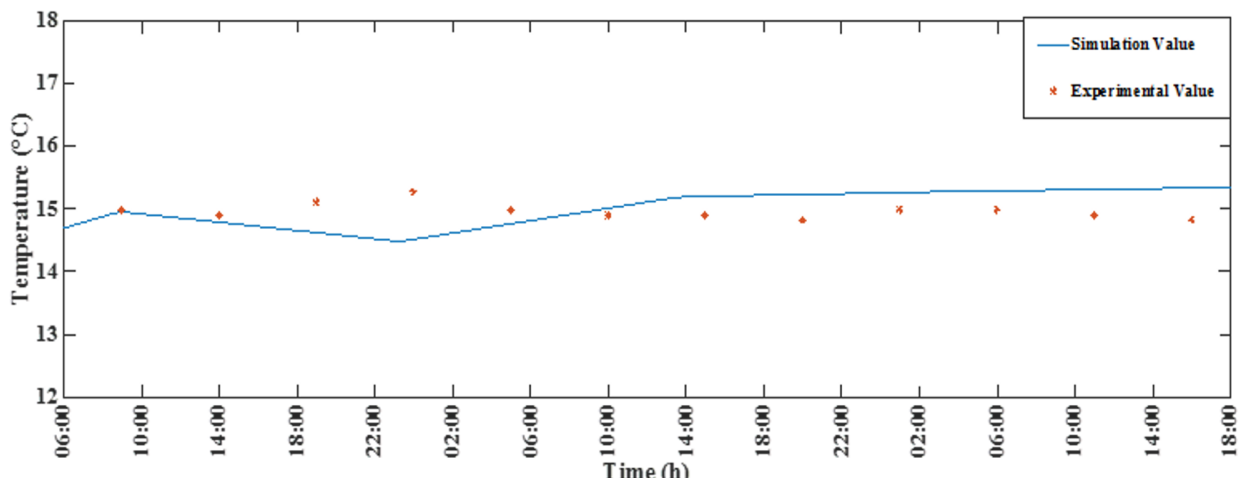


FIGURE 4.3 – Comparaison entre les profils de température théorique et expérimental de l’air ambiant entre les périodes de 72 h et 132 h



Deviation	Tsimulation (°C)	Texperimentale (°C)	$ T  =  T_{simulation} - T_{experimentale} $
	14.15	15.12	0.60
	14.95	14.98	0.02
	14.78	14.90	0.11
	14.62	15.12	0.49
	14.51	15.27	0.75
	14.76	14.98	0.21
	15.01	14.90	0.11
	15.20	14.90	0.30
	14.30	14.83	0.40
	15.26	14.98	0.28
	15.28	14.98	0.30
	15.31	14.90	0.41
	15.33	14.83	0.50
	15.34	14.98	0.36
	15.01	14.97	0.34
Dev Max			0.75
Dev Min			0.02
Dev Moyenne			0.35

TABLE 4.1 – Écarts de température entre les résultats de la simulation et les données expérimentales

Après la comparaison de la température de l'air avec la simulation et les résultats de la température de l'air en expérimentales comparées durant la saisons hivernal (hivers) dans la semaine défavorable la plus froide en vérifiant de ce tableau les valeurs principales et la comparaison entre les résultats.

Mode de Calcule	Valeur Maximale	Valeur Minimum	Valeur Moyenne
Experimentale	15.27	14.83	14.97
Simulation	15.34	14.49	15.00

TABLE 4.2 – Les piques de température entre les résultats de la simulation et les données expérimentales

### 4.3.1 Calcul D'erreur

Pour comparer les résultats simulés obtenus par le modèle numérique de cette étude avec les résultats expérimentaux, on a quantifié l'écart quadratique moyen (RMSD) et l'erreur moyenne

absolue en pourcentage (MAE) par les relations suivants :

$$MAE(\%) = \frac{100}{n} \sum_1^n \left| \frac{X_{simulation,i} - X_{experimentale,i}}{X_{experimentale,i}} \right|$$

$$RMSD(\%) = 100 * \sqrt{\frac{\sum_1^n \left( \frac{X_{simulation,i} - X_{experimentale,i}}{X_{simulation,i}} \right)^2}{n}}$$

Après les calculs de RMSD et MAE avec Microsoft Excel on trouve les valeurs suivantes :

$$MAE(\%) = 2.3256$$

$$RMSD(\%) = 2.6520$$

## 4.4 Résultats de la simulation

Les graphes suivantes présentent les résultats de la simulation pour une semaine complète, entre le 9 et le 13 janvier 2011. Le mois de janvier a été choisi car c'est l'un des mois les plus froids de l'année en Algérie. Ces jours représentent la semaine la plus froide de l'année. La température extérieure moyenne mesurée durant cette période est de 10,5 °C, avec une valeur minimale de 5,4 °C et une valeur maximale de 16,5 °C. Une grande fluctuation journalière peut être observée à l'extérieur, allant jusqu'à 11 °C.

### 4.4.1 CFD Profils de température pendant le chauffage du plancher chauffant

La figure 4.4 montre la distribution de la température de l'air pendant 132 h à une température de fluide de plancher de 40 °C et prise à une hauteur de 50 cm. Comme le montrent ces figures, la simulation a commencé avec une température de fluide caloporteur de 40 °C.

La température de l'air à l'intérieur de la maison a été fixée à 0 °C à une hauteur de 50 cm [30].

Après 24 heures de chauffage, la température de l'air dans le salon a augmenté jusqu'à 10,5 °C. Cette augmentation s'est poursuivie jusqu'à 13,0 °C.

Cette augmentation s'est poursuivie jusqu'à 13,0 °C après 48 heures de chauffage.

Après 70, 96 et 132 heures de chauffage, la température avait atteint 14,5, 14,8 et 15,2 °C, respectivement. La température de l'air dans le salon s'est stabilisée à une moyenne de  $15,1 \pm 0,35$  °C, prise à 50 cm de hauteur, après 70 h du cycle de chauffage.

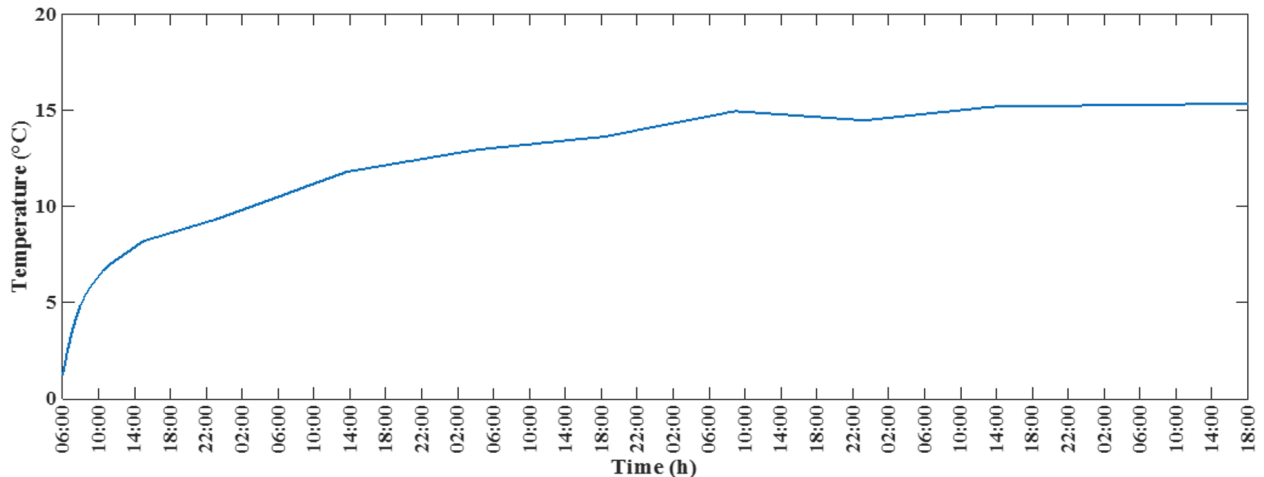


FIGURE 4.4 – Distribution de la température de l'air sur 132 h pour une température du fluide du plancher chauffant de 40 °C et une hauteur de 50 cm

Les figures 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 (a-f) montre la distribution de la (température moyenne, l'isotherme de la température, la vitesse et la pression) de l'air à l'intérieur du salon avec le plancher et les tuyaux pour 132 heures (5,5 jours) de chauffage. La différence de température de l'air, issue des simulations CFD, entre l'air ambiant du salon et l'eau chaude du système de chauffage au sol à différents pas de temps, à savoir : 0h, 24h, 48h, 70h, 96h et 132h. Dans la première période, il y a un faible transfert de chaleur à l'intérieur de la pièce entre le chauffage par le sol (source chaude) et l'espace intérieur (air) et les surfaces. Ce faible chauffage est dû à l'inertie thermique des murs froids et du plancher bas. Les murs, notamment les murs hauts, présentent également des pertes de chaleur. Ensuite, pendant la deuxième période, la température se stabilise grâce au flux d'air à faible vitesse (break flow) qui a déjà provoqué une augmentation de la température de l'air à l'intérieur de la pièce. Cette température reste stable, mais la différence de température entre le système de chauffage par le sol et l'air à l'intérieur de la pièce est élevée, en raison d'une perte de chaleur accrue qui se produit au niveau du plancher haut.

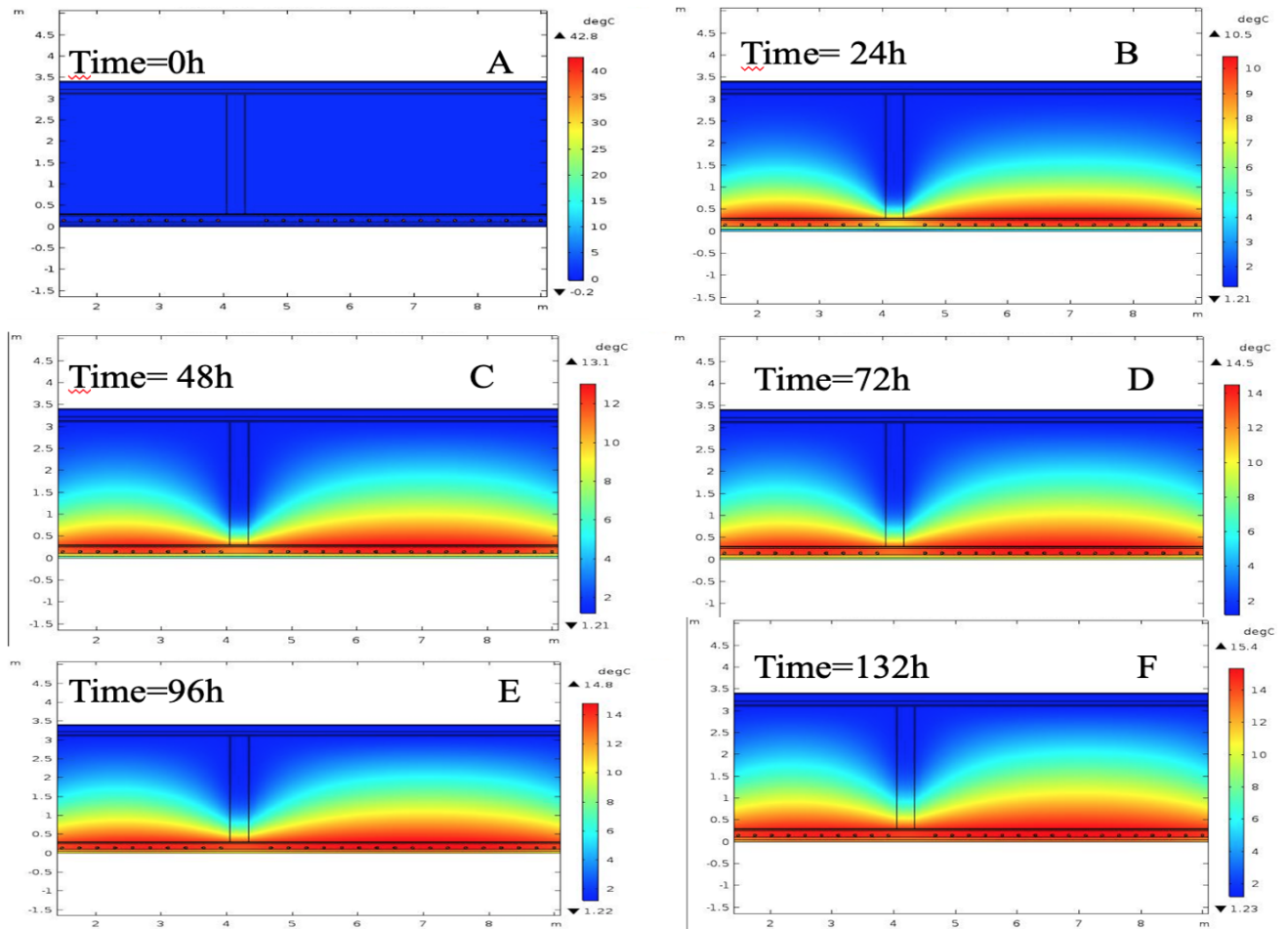


FIGURE 4.5 – CFD Gradient de l'isotherme de température de l'air local dans le séjours

Cette figure représente la variation de la température sur les locaux chauffé durant toute la periode de la simulation, les déférents couleurs présente les déférents niveaux de la température, la couleur bleu c'est la température la plus faible, et la couleur rouge la température la plus haute.

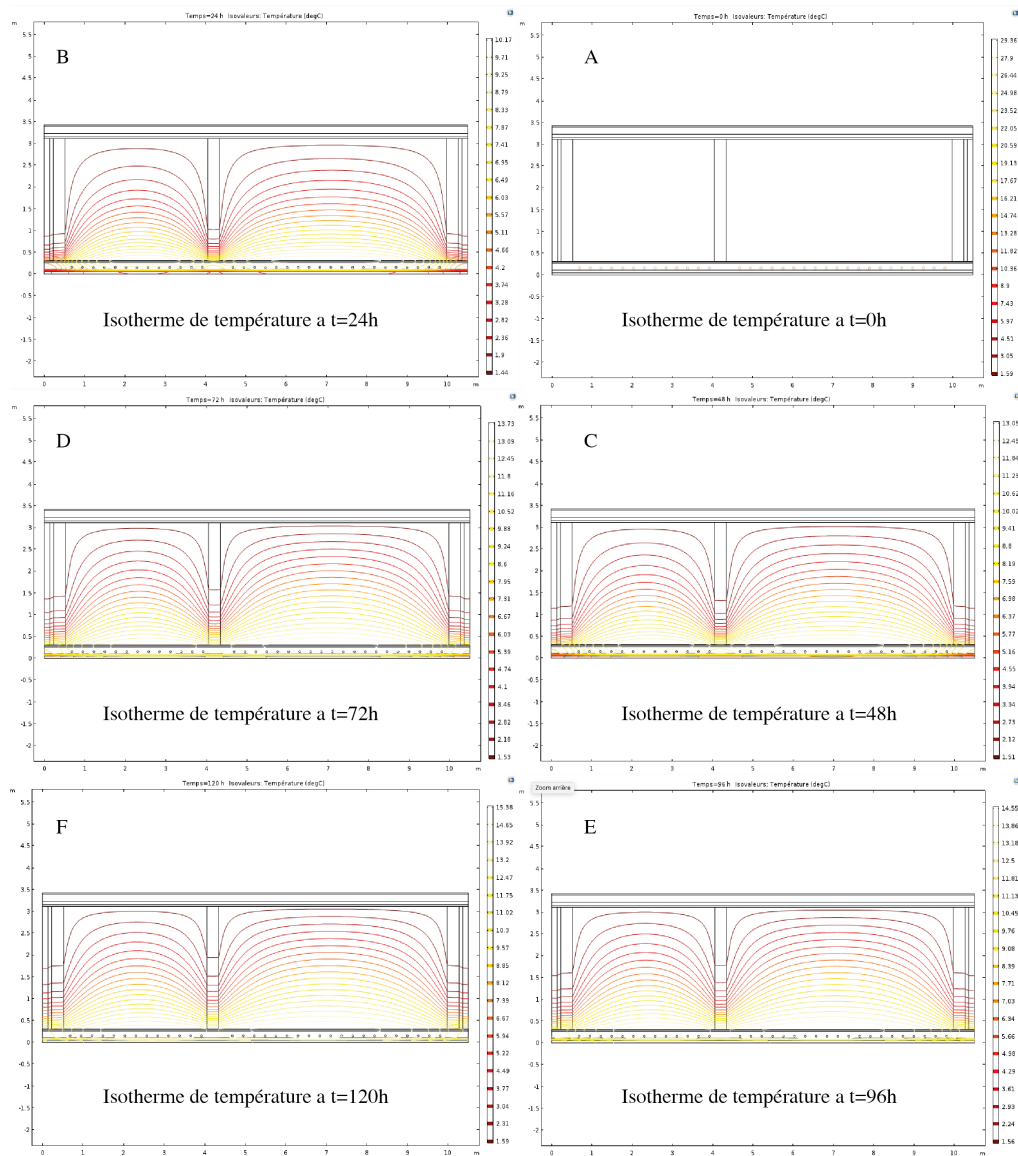


FIGURE 4.6 – CFD Gradient de température de l'air local dans le séjours

Cette figure représente la variation de la température sur les locaux chauffé durant toute la periode de la simulation, mais cette fois les isothermes représente toute la variation de la température plus précisément que le graphe précédent, les différents couleurs présente les différents niveaux de la température, la couleur rouge c'est la température la plus faible, et la couleur jaune la température la plus haute.

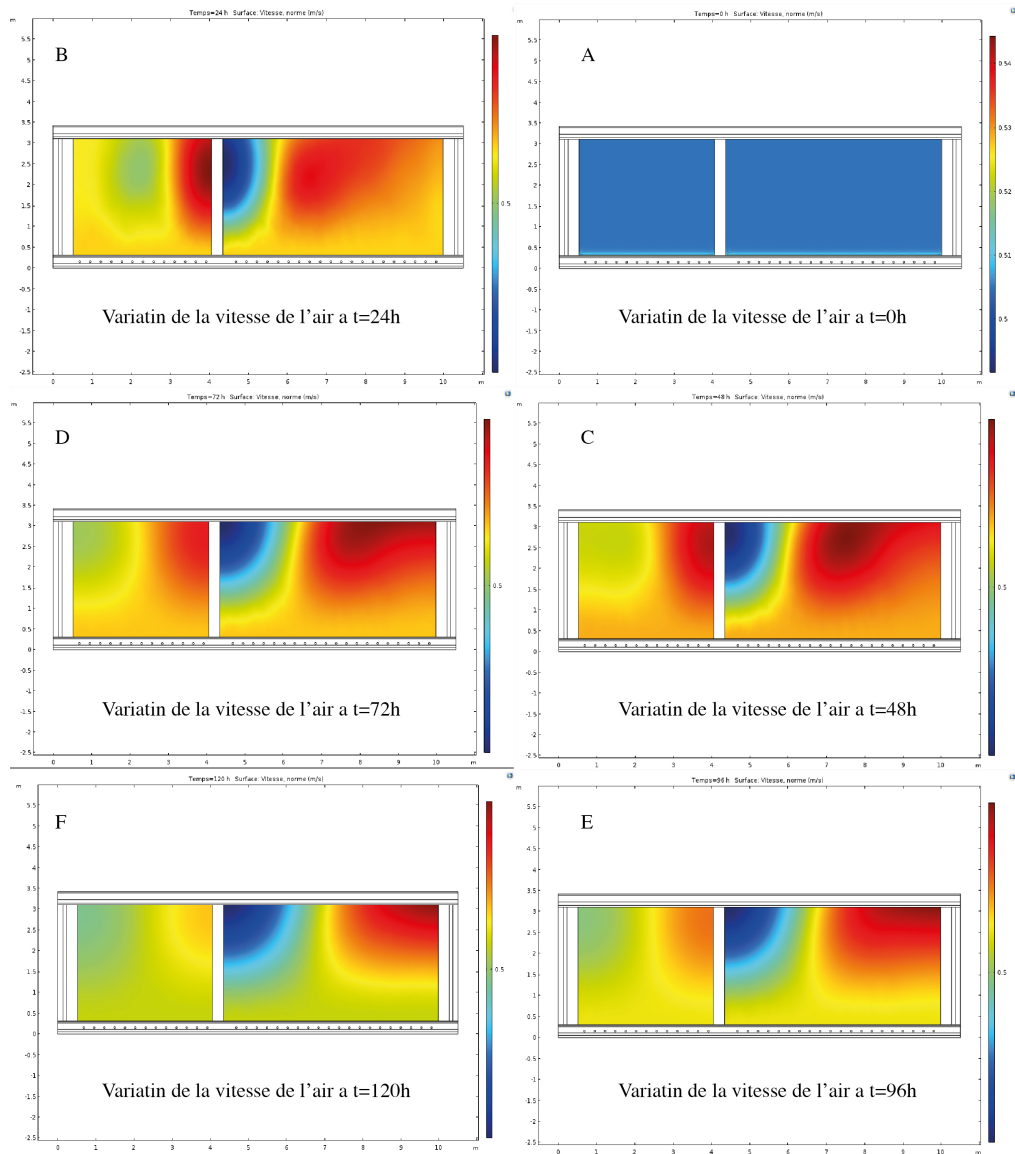


FIGURE 4.7 – CFD de la variation de la vitesse de l'air local dans le séjours

Cette figure représente la variation de la vitesse de l'air sur les locaux chauffé durant toute la periode de la simulation, les déférents couleurs présente les déférents niveaux de la température, la couleur rouge c'est la vitesse la plus élevée, et la couleur bleu la vitesse la plus basse.

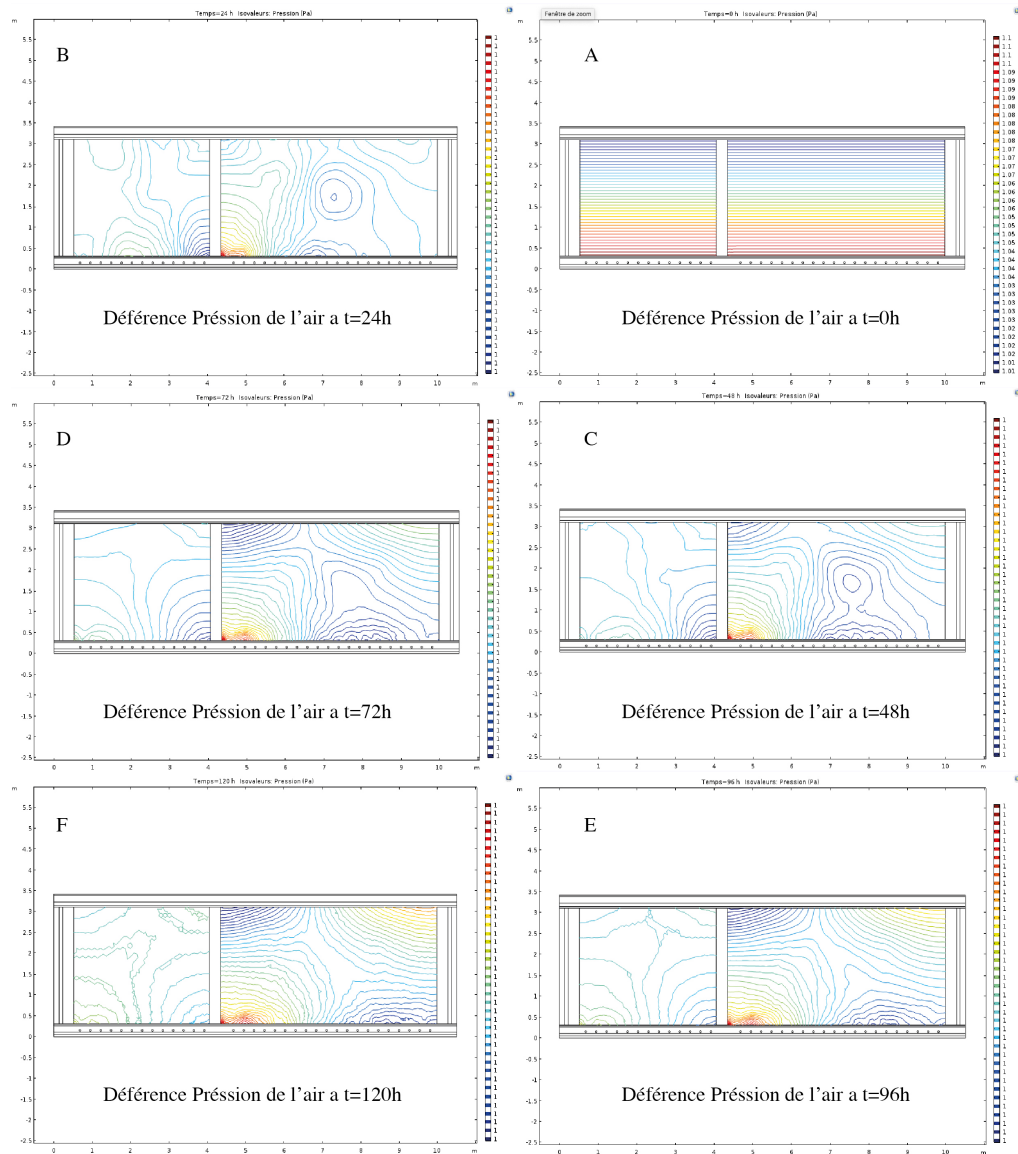


FIGURE 4.8 – CFD de la variation de la préssion de l'air local dans le séjours

Cette figure représente la variation de la préssion de l'air sur les locaux chauffé durant toute la periode de la simulation, les déférénts couleurs présente les déférénts niveaux de la température, la couleur rouge c'est la préssion la plus élevée, et la couleur bleu la préssion la plus basse.

- (A) : Avant le chauffage,
- (B) : Après 24h de chauffage
- (C) : Après 48 heures de chauffage,
- (D) : Après 70 heures de chauffage
- (E) : Après 96 heures de chauffage,

(F) : Après 132 heures de chauffage

#### **4.4.2 Effet de la température du fluide caloporteur sur la température de l'air ambiant**

La figure 4.9 montre la variation de la température de l'air en fonction du temps dans la pièce pour des températures de fluide caloporteur allant de 30 à 50 °C et à des intervalles de 5 °C (figures 4.10, 4.11, 4.12, 4.13,4.14). Les profils de température montrent la même tendance lorsque la température du fluide de transfert de chaleur augmente de 30 à 50 °C. L'effet de la température du fluide caloporteur sur la température de l'air à l'intérieur de la pièce prise à 50 cm de hauteur n'est pas significatif tant que la température initiale du fluide caloporteur reste dans la plage de 30 à 50 °C, c'est-à-dire 10 °C en dessous ou au-dessus de la température nominale fixée à 40 °C. De plus, la température de l'air a augmenté et a atteint une valeur presque constante de  $15,1 \pm 0,35$  °C après 72h, quelle que soit la température initiale du fluide chauffant, et le système de chauffage est resté stable en raison de l'inertie thermique du plancher. De plus, la température interne a montré une variation insignifiante après stabilisation, ce qui démontre la fiabilité de ce système pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

D'après d'autres travaux réalisés sur des systèmes de radiateurs conventionnels, le système de chauffage par le sol présente une distribution uniforme du gradient de température dans la maison par rapport au système de radiateurs, qui présente un faible chauffage loin de la source unique.



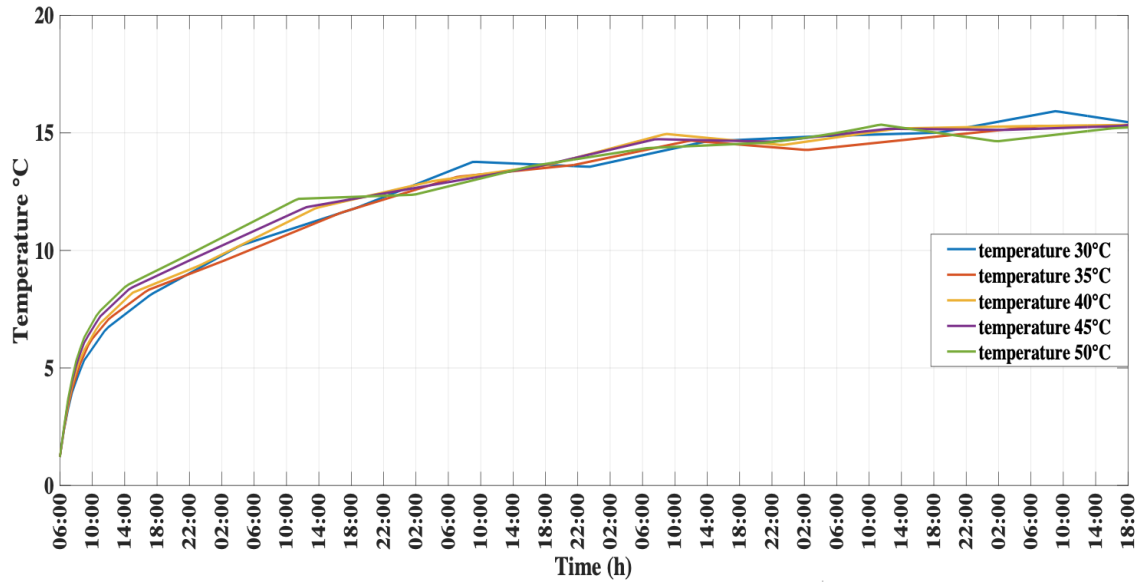


FIGURE 4.9 – La variation de la température de l’air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur.

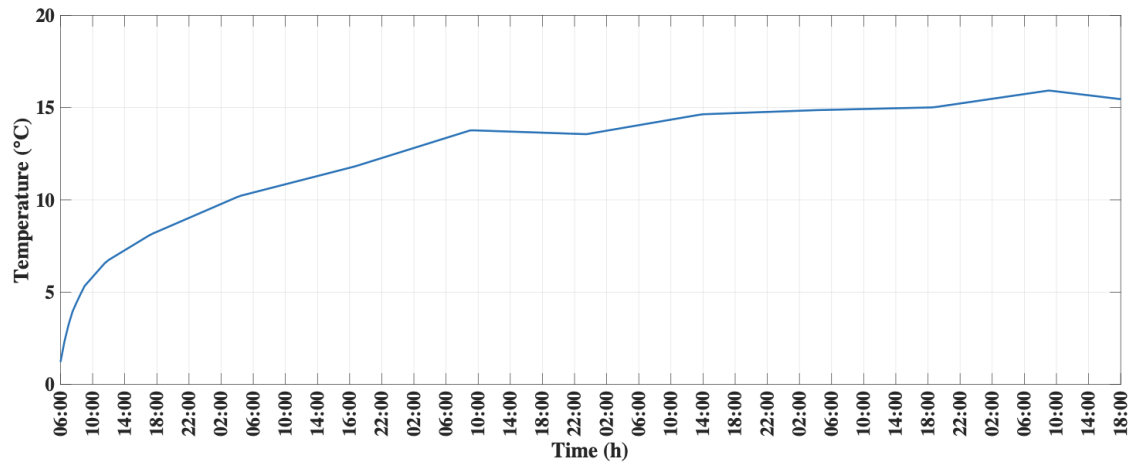


FIGURE 4.10 – La variation de la température de l’air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 30°C et débit  $D=12.75 \text{ W/m}^2$ .

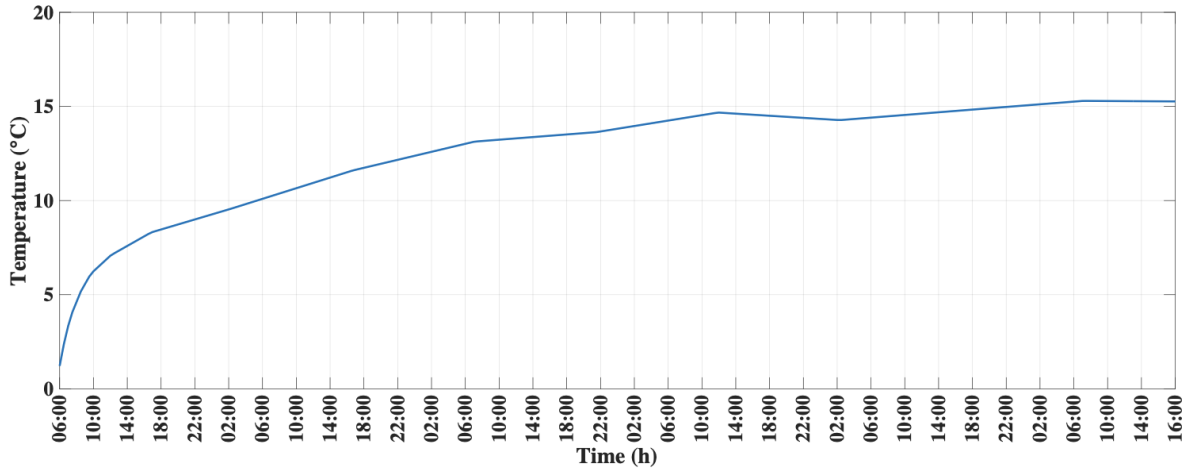


FIGURE 4.11 – La variation de la température de l’air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 35°C et débit  $D=14.87 \text{ W}/m^2$  .

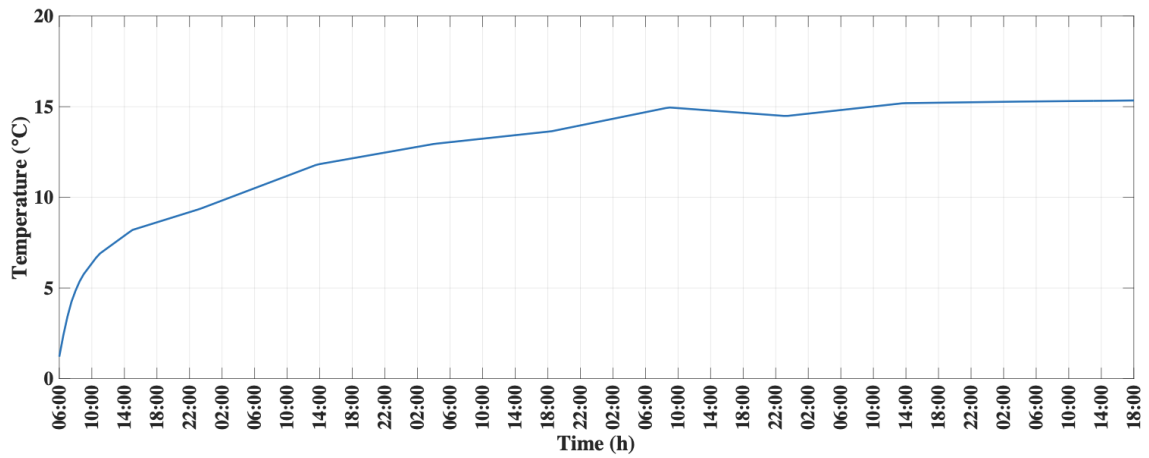


FIGURE 4.12 – La variation de la température de l’air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 40°C et débit  $D=17 \text{ W}/m^2$  .

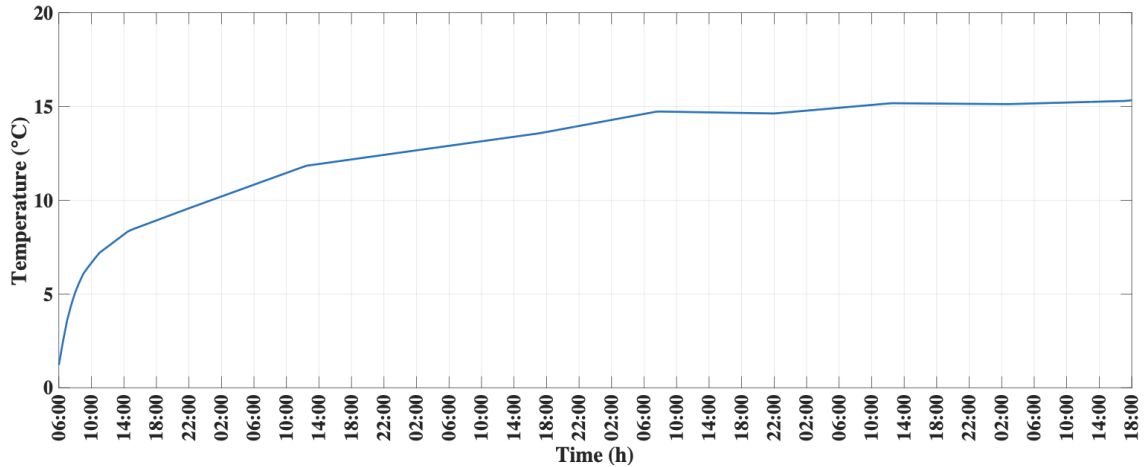


FIGURE 4.13 – La variation de la température de l’air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 45°C et débit  $D=19.125 \text{ W}/m^2$  .

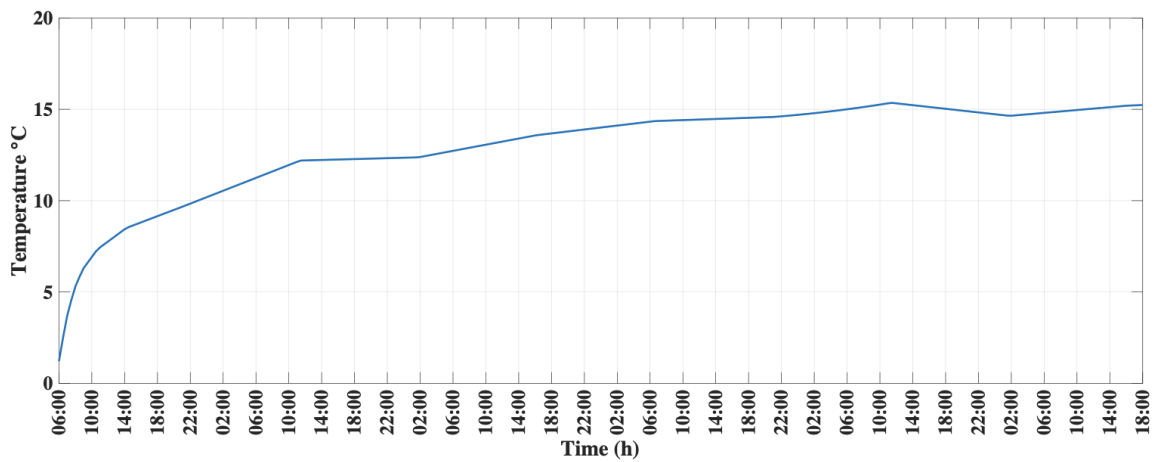


FIGURE 4.14 – La variation de la température de l’air en fonction du temps avec la variation de la température du fluide caloporteur a 50°C et débit  $D=21.25 \text{ W}/m^2$  .

#### 4.4.3 Effet de la température du fluide chauffant sur la radiativité de surface du sol

La variation de la radiativité surfacique en fonction du temps et de la température de l’air est présentée dans les figures 4.15 et 4.16, respectivement. Les données ont été prises sur une semaine à des températures de fluide de plancher allant de 30 à 50 °C à un intervalle de 5 °C figures(4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21). La radiativité surfacique du plancher à une température de fluide chauffant de 50 °C est supérieure de cinq ordres de grandeur à celle de 30 °C et est soumise à une variation de 2,68 % pour chaque intervalle de 5 °C dans la première période de

0h à 72h. La radiosité augmente en fonction du temps et est sujette à des déviations jour-nuit. Elle atteint une valeur presque constante de  $380 \pm 5 \text{ W/m}^2$  après 72h en raison de l'équilibre thermique régnant dans la pièce. Sur la base de ce résultat et des variations de la température de l'air présentées sur le gradient de la figure 4.15, il est clair que la variation de la radiosité a une influence insignifiante sur la température de l'air pendant la première période et après stabilisation à 72h.

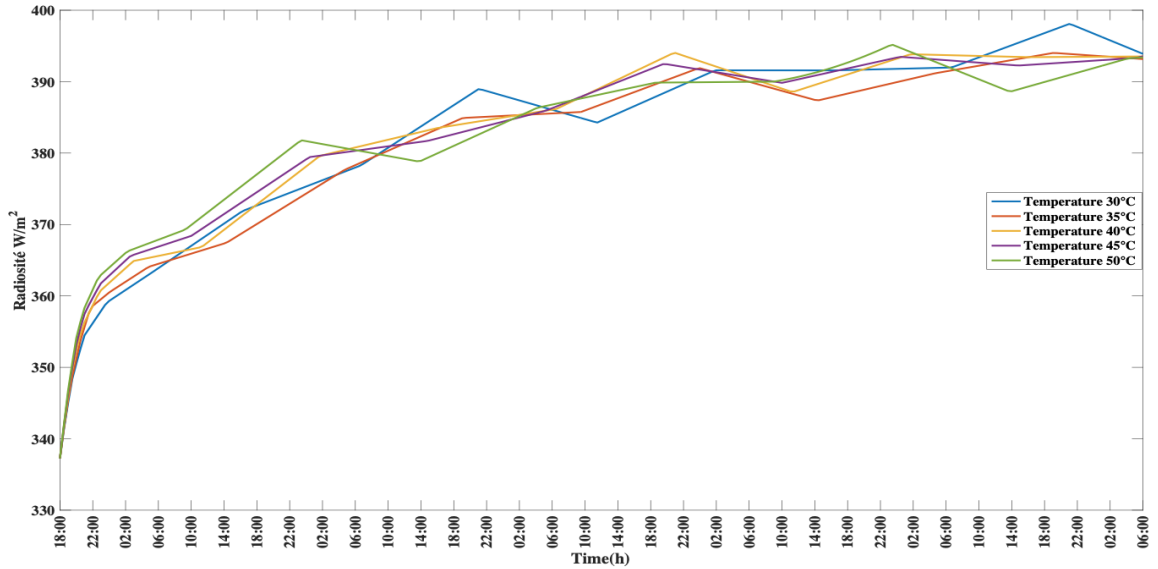


FIGURE 4.15 – Radiosité surfacique en fonction du temps à différentes températures du fluide caloporteur.

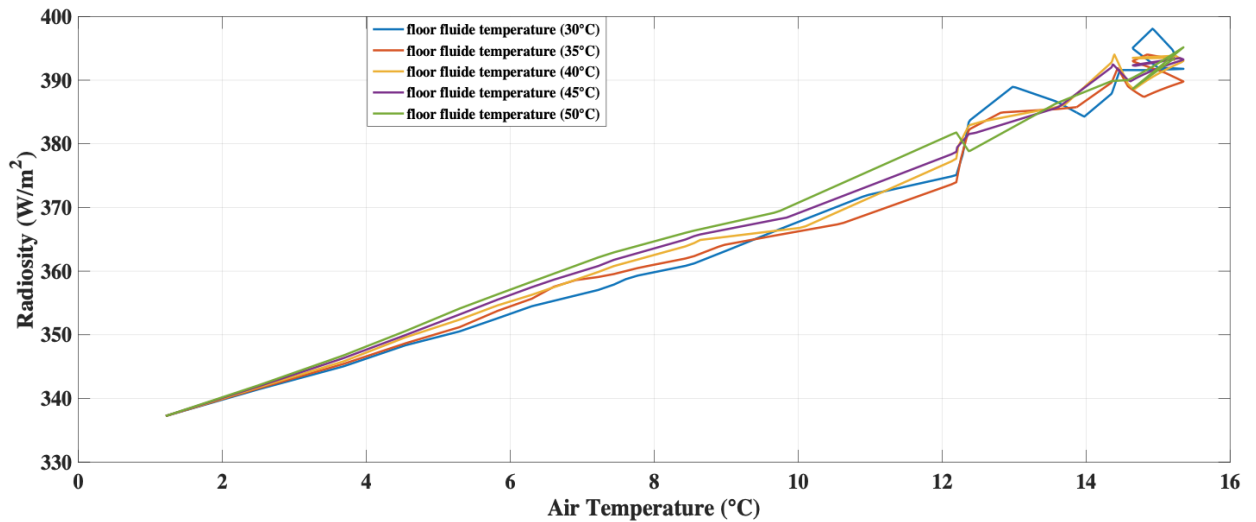


FIGURE 4.16 – Radiosité surfacique en fonction de la température de l'air à différentes températures du fluide caloporteur.

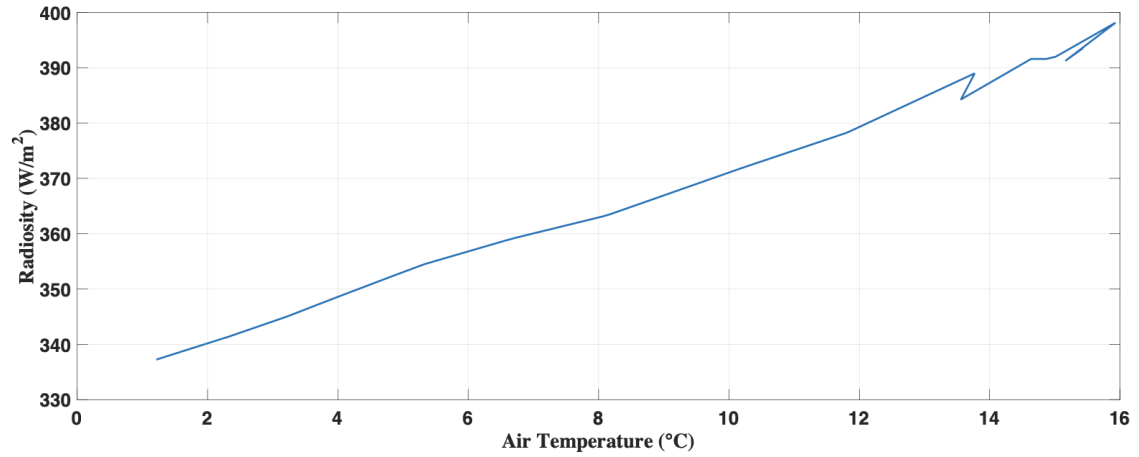


FIGURE 4.17 – La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l’air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 30°C et début  $D=12.75 \text{ W}/m^2$  .

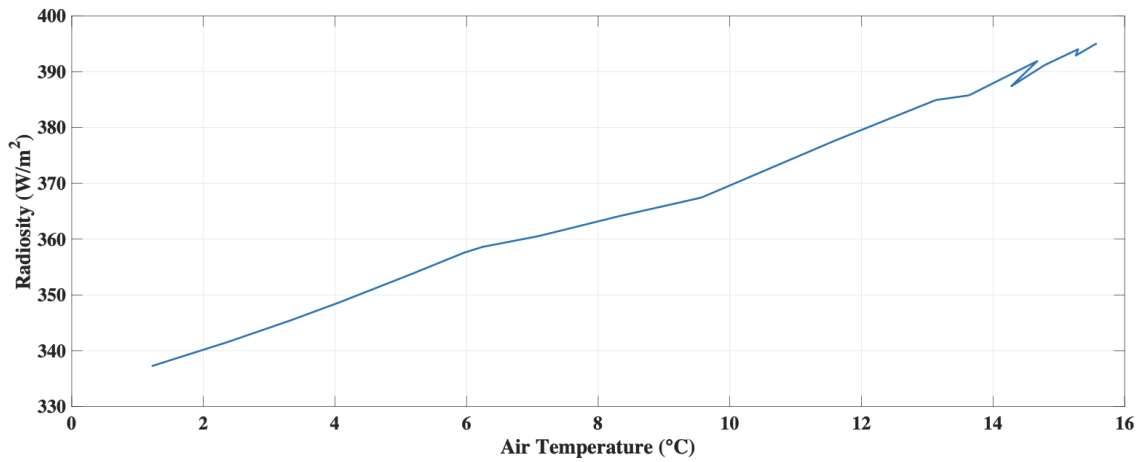


FIGURE 4.18 – La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l’air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 35°C et début  $D=14.87 \text{ W}/m^2$  .

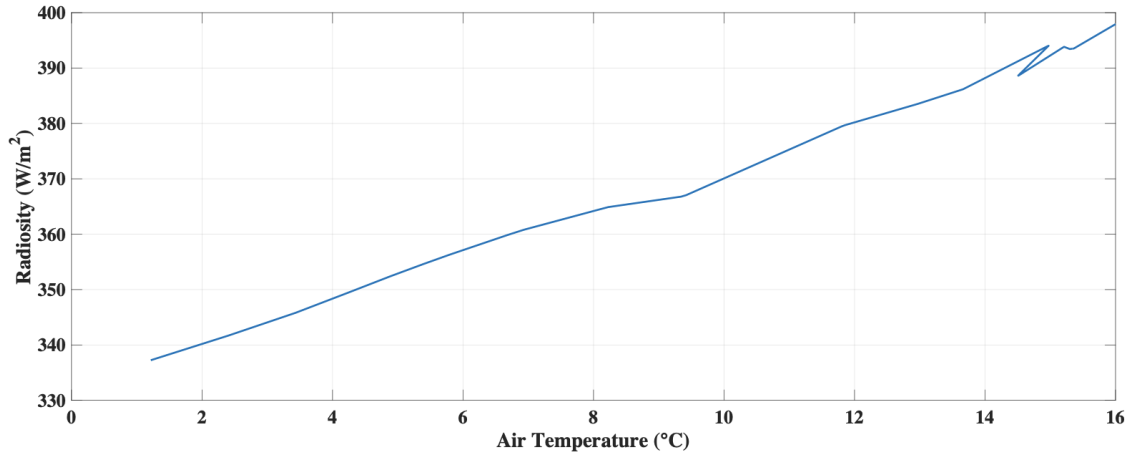


FIGURE 4.19 – La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l’air avec la variation de la température du fluide caloporteur a  $40^{\circ}C$  et début  $D=17 W/m^2$  .

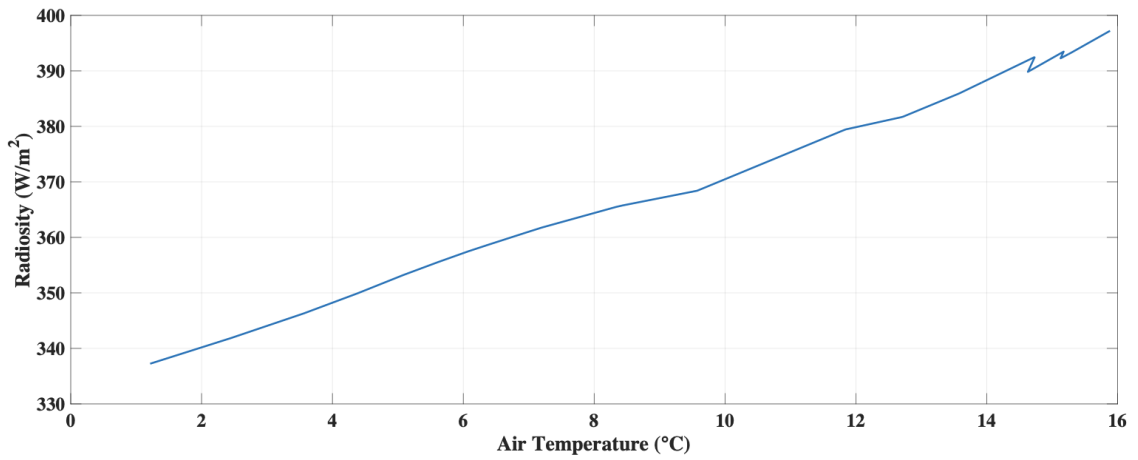


FIGURE 4.20 – La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l’air avec la variation de la température du fluide caloporteur a  $45^{\circ}C$  et début  $D=19.125 W/m^2$  .

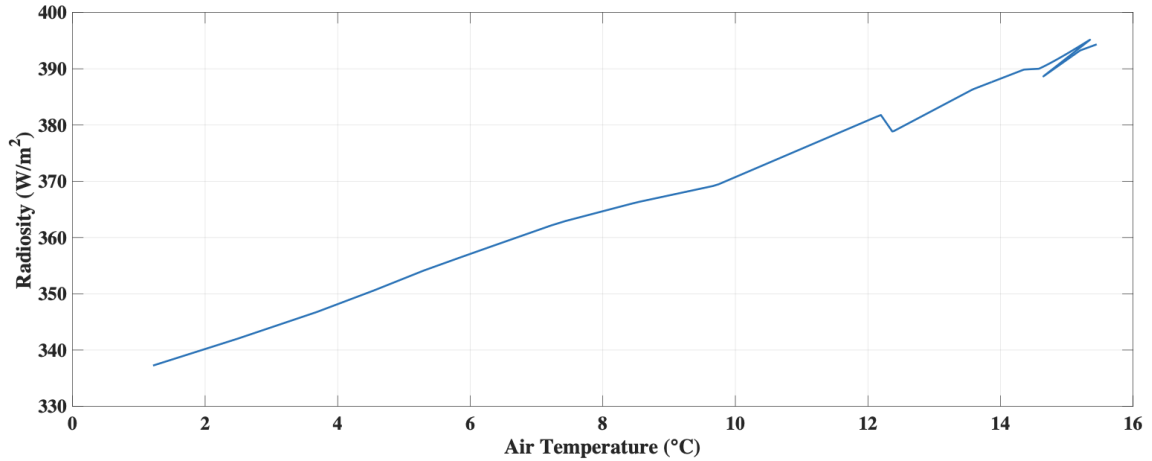


FIGURE 4.21 – La variation de la radiosité surfacique en fonction de température de l’air avec la variation de la température du fluide caloporteur a 50°C et début  $D=21.25 \text{ W/m}^2$  .

La variation de la radiosité surfacique en fonction du temps et de la température de l’air est présentée dans la Figure 4.22. Le graphique 3D montre la variation de la radiosité par unité de surface, à l’intérieur des pièces chauffées par le système de chauffage par plancher chauffant, en fonction du temps et de la température de l’air. La radiosité montre une tendance linéaire avec des augmentations jusqu’à la valeur de 15,1 °C en fonction de la température de l’air, et jusqu’à 72 heures en fonction du temps. Comme mentionné précédemment, après 72h de chauffage, la radiosité par unité de surface reste stable car la température de l’air par convection reste stable.

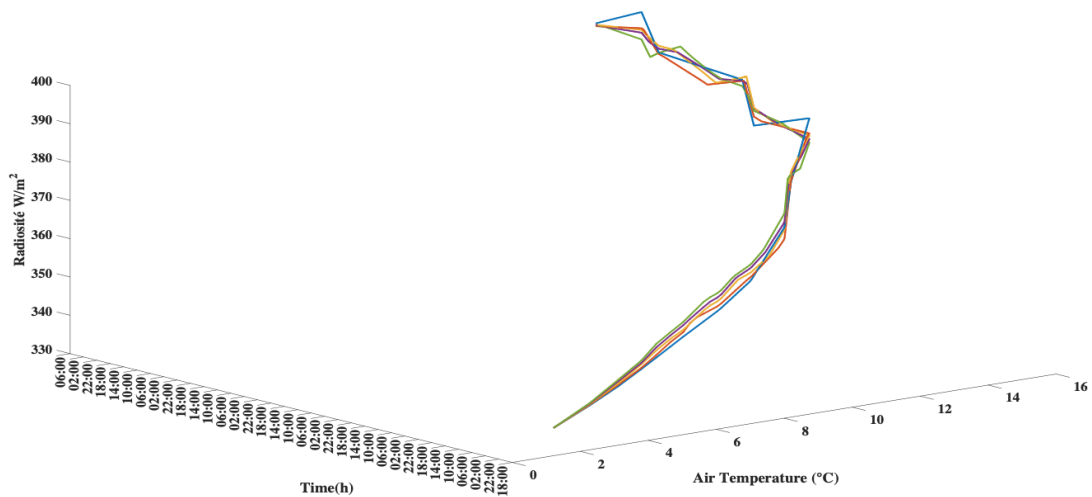


FIGURE 4.22 – Radiosité en 3D en fonction du temps et de la température de l’air.

Il n'y a pas des recherches explicites dans la littérature qui expliquent l'influence de la convection naturelle sur la radiosité surfacique en fonction du temps, surtout en données graphiques. La présente étude est donc l'une des premières à développer ce type de recherche pratique réelle à grande échelle (maison pilote), et même dans des locaux. Bien qu'il n'existe pas d'équation représentative de la radiosité surfacique en fonction du temps, nous pouvons déduire des graphiques des figures 5.6 et 5.7 que l'évolution de la radiosité suit la même tendance que celle de la convection, c'est-à-dire que la valeur du flux radiatif augmente de la même manière que la température de l'air en fonction du temps jusqu'à l'équilibre. De plus, en observant le comportement de la radiosité en fonction de la température de l'air ambiant et du temps, on peut conclure que la convection naturelle influence sur la radiosité surfacique.

Afin de bien comprendre ce phénomène de couplage entre la convection et la radiosité de surface, il est nécessaire d'analyser le comportement de la radiosité en fonction de la température de l'air et du temps. Ce phénomène est nouveau et n'a pas encore été développé ailleurs auparavant.

## 4.5 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, on a présenté la méthode de la simulation avec Comsol sous l'intégration les conditions climatique de la ville de Soudania Alger.

Les premiers Calculs été faite pour validé les résultats de la simulation avec des résultats expérimentaux, après la validation on a développé notre modele physique pour montré l'influence de la variation de la température du fluide caloporteur sur la variation de la température de l'air a l'interieur des chambres chauffées.

Après la verification et confirmation de cette derniere problematique on a continue notre simulation pour verifier la variation de la température du fluide caloporteur sur la variation de la radiosité surfacique,

cette derniere montre que la variation du fluide caloporteur influe sur la température de l'air interieur et ce dernier infu sur la radiosité surfacique, ce couplage entre la convection et la radiosité surfacique est nouveau et n'a pas été développé ailleur auparavant.



# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion Générale

Dans les sociétés modernes, une grande quantité d'énergie est consommée pour maintenir les bâtiments (résidentiels, commerciaux, industriels et institutionnels) à des températures qui assurent un niveau acceptable de confort intérieur. Par conséquent, les dernières décennies ont vu des efforts considérables visant à réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement intérieurs, ce qui a conduit à la mise au point de matériaux d'isolation améliorés et de systèmes de CVC efficaces sur le plan énergétique. Combinés à d'autres éléments de l'enveloppe du bâtiment tels que les portes et les fenêtres, les facteurs susmentionnés constituent le cœur du paradigme dit des bâtiments énergétiques. En plus de réduire les coûts de chauffage et de refroidissement, les bâtiments économes en énergie contribuent également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Avec une maison pilote installée à Alger-Ouest, une étude sur le transfert de chaleur du plancher chauffant à l'espace de chauffage a été menée en intégrant des sources d'énergie renouvelables, dont l'énergie choisie est l'énergie solaire.

Des données expérimentales ont été recueillies au cours de deux campagnes (mars 2012 et février 2013). Elles ont montré que l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage devrait contribuer à éviter l'utilisation inutile d'énergie et à préserver des conditions climatiques intérieures confortables (Confort thermique) par rapport à la température extérieure. La température de fonctionnement des systèmes de chauffage solaire rend appropriée l'utilisation d'un plancher chauffant (PSD) pour transférer la chaleur dans les espaces conditionnés. La conception d'un bâtiment à faible consommation d'énergie nécessite des études paramétriques via des outils de simulation afin d'optimiser la conception de l'enveloppe du bâtiment et des systèmes de CVC. Ces études sont souvent complexes et longues en raison du grand nombre de paramètres à prendre en compte.

La modélisation et la simulation du comportement thermique d'un système de chauffage solaire par plancher chauffant pour les bâtiments résidentiels ont été étudiées. La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics®, qui utilise une méthode par éléments finis pour résoudre des problèmes physiques régis par des équations aux dérivées partielles. L'outil de simulation développé a été validé en utilisant les données expérimentales d'une maison pilote disponibles dans la littérature.

L'étude bidimensionnelle a facilité l'étude des différents mécanismes de transfert de chaleur

dans le système de chauffage par plancher chauffant, à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement. Les résultats les plus significatifs sont résumés ci-dessous : - Les données de simulation étaient bien en accord avec les données expérimentales, et le système de chauffage par le sol a maintenu une température moyenne de  $15,1 \pm 0,35$  °C prise à 50 cm de hauteur à l'intérieur de la pièce après stabilisation après 72h de chauffage.

- L'augmentation de la température du fluide de transfert du chauffage de 30 à 50 °C a permis d'obtenir la même température de  $15,1 \pm 0,35$  °C prise à 50 cm de hauteur à l'intérieur de la pièce. La température de l'air est restée stable avec une variation insignifiante après 72h de chauffage. Ceci est dû à l'inertie thermique du sol, et confirme la fiabilité de ce système de chauffage par le sol pour la fourniture de chauffage et d'eau chaude sanitaire.

- Pendant le processus de chauffage, la radiosité surfacique a augmenté en fonction du temps et a atteint une valeur presque constante de  $380 \pm 5$  W/m<sup>2</sup> après 72h grâce à la stabilité de la température de l'air par convection. La variation de la radiosité n'a pas influencé de manière significative l'évolution de la température de l'air à l'intérieur de la pièce, malgré l'augmentation de la température du fluide de transfert du chauffage de 30 à 50 °C ou l'effet jour-nuit.

Sur la base des résultats susmentionnés, le système de chauffage par plancher chauffant a prouvé sa fiabilité pour le chauffage interne et l'utilisation de l'eau chaude sanitaire.

# Bibliographie

- [1] Saadi Souad. Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan. *UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE*, 2(51) :3, 2010.
- [2] Aghilas Brahimi. *Etude de performances d'un capteur solaire plan a eau*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2016.
- [3] Mohammed Khennich. *Optimisation thermodynamique d'un procédé solaire utilisant un système de réfrigération à éjecto-compression pour la production du froid*. PhD thesis, Université de Sherbrooke, 2016.
- [4] Khadidja BENNESSAR and Kheira BAHI. *Etude expérimentale de poursuite solaire d'un héliostat*. PhD thesis, M. Bouaichaoui Sofiane., 2020.
- [5] Djillali Takourabt and Akli Tamadazt. *Chauffage d'une maison individuelle par géothermie à l'aide d'une pompe à chaleur*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2013.
- [6] Taki Eddine REDDAH. *Etude et dimensionnement d'un système solaire combiné Application : Logement individuel type F3 à Batna*. PhD thesis, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2014.
- [7] Richard Aynsley. Natural ventilation in passive design. *Environment Design Guide*, pages 1–16, 2014.
- [8] ID Protocol, M Botta, A Tsonas, J Horn, and F Paulus. Effects of automated closed-loop ventilation versus conventional ventilation on duration and quality of ventilation ('active')–protocol for a randomized clinical trial in intensive care unit patients. 2020.
- [9] Yacine Allab. *Evaluation expérimentale des performances des systèmes de ventilation dans le bâtiment : efficacité de ventilation et confort thermique*. PhD thesis, Paris, ENSAM, 2017.

- 
- [10] Olivier Auban. *Approche expérimentale de la ventilation par déplacement*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2000.
- [11] A Bertier, E Fresnel, A Kerfourn, F Portier, A Portmann, A Cuvelier, and M Patout. Conséquences de l'ajout d'un système d'humidification chez les patients traités par ventilation non invasive au long cours : un essai contrôlé randomisé. *Revue des Maladies Respiratoires Actualités*, 12(1) :70, 2020.
- [12] Mohammed Hichem Benzaama. *Etude du confort thermique dans l'habitat par des procédés géo-héliothermiques*. PhD thesis, Reims, 2017.
- [13] Karima Benhalilou. Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment. cas du climat semi-aride. 2008.
- [14] Bjarne W Olesen et al. Radiant floor heating in theory and practice. *ASHRAE journal*, 44(7) :19–26, 2002.
- [15] Andreas K Athienitis. Investigation of thermal performance of a passive solar building with floor radiant heating. *Solar energy*, 61(5) :337–345, 1997.
- [16] Roberto Zecchin. Comparison between a radiant floor and two radiant walls on heating and cooling energy demand. *ASHRAE Transactions*, 115 :563, 2009.
- [17] S Sattari and B Farhanieh. A parametric study on radiant floor heating system performance. *Renewable Energy*, 31(10) :1617–1626, 2006.
- [18] Santé Environnement. Grenelle de l'environnement. 2010.
- [19] Joe R Zhao, Yizhou Sang, Jiaojiao Sun, Bin Chen, Xueyan Zhang, and RJ Kerekes. Approximate equations to estimate heat flow from floors to attain desired room temperatures in a simple house. *Energy and Buildings*, 133 :541–546, 2016.
- [20] Javier Mazo, Monica Delgado, Jose Maria Marin, and Belen Zalba. Modeling a radiant floor system with phase change material (pcm) integrated into a building simulation tool : Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump. *Energy and Buildings*, 47 :458–466, 2012.
- [21] Weiliang Wang, Zhe Tian, and Yan Ding. Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall. *Energy and Buildings*, 64 :218–223, 2013.

- [22] James A Mathias and Duane M Mathias. Energy efficient, cost effective, passive solar house. *ASHRAE Transactions*, 115(1) :419–426, 2009.
- [23] Zhi Zhuang, Yuguo Li, Bin Chen, and Jiye Guo. Chinese kang as a domestic heating system in rural northern china—a review. *Energy and Buildings*, 41(1) :111–119, 2009.
- [24] Joe R. Zhao, Yizhou Sang, Jiaojiao Sun, Bin Chen, Xueyan Zhang, and R.J. Kerekes. Approximate equations to estimate heat flow from floors to attain desired room temperatures in a simple house. *Energy and Buildings*, 133 :541–546, 2016.
- [25] H Benouali, A Brara, M Mahdad, and F Mokhtari. Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimée. 2011.
- [26] Lun Zhang, Xiaohua Liu, Kang Zhao, and Yi Jiang. Entransy analysis and application of a novel indoor cooling system in a large space building. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85 :228–238, 2015.
- [27] Yi Jiang, Xiaohua Liu, Lun Zhang, and Tao Zhang. High temperature cooling and low temperature heating in buildings of ebc annex 59. *Energy Procedia*, 78 :2433–2438, 2015.
- [28] Xiaohua Liu, Tao Zhang, Haida Tang, and Yi Jiang. Iea ebc annex 59 : High temperature cooling and low temperature heating in buildings. *Energy and Buildings*, 145 :267–275, 2017.
- [29] Ongun B Kazanci and Bjarne W Olesen. Bæredygtige energi-plus huse sustainable plus-energy houses.
- [30] Ongun B Kazanci, Martynas Skrupskelis, Pavel Sevela, Georgi K Pavlov, and Bjarne W Olesen. Sustainable heating, cooling and ventilation of a plus-energy house via photovoltaic/thermal panels. *Energy and Buildings*, 83 :122–129, 2014.
- [31] Sabah Kikah, Sonia Boulatrous, Soumaya Bourourou, and Hocine Encadreur Tebbouche. *L'intégration des paramètres de durabilité dans le bâtiment en Algérie*. PhD thesis, Université de Jijel, 2017.
- [32] Jean Louis Durand, G Lemaire, Ghislain Gosse, and M Chartier. Analyse de la conversion de l'énergie solaire en matière sèche par un peuplement de luzerne (*medicago sativa* l.) soumis à un déficit hydrique. *Agronomie*, 9(6) :599–607, 1989.

- 
- [33] Razika Kharchi, N Aït Messaoudène, M Belhamel, and A Hamid. Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct. *Revue des Energies Renouvelables : Journées de Thermique*, pages 115–119, 2001.
- [34] Nassima KADRI and Abderrahmane MOKHTARI. La réhabilitation thermique. une opportunité pour le développement durable en algérie, 2012.
- [35] Hui Liu. *Stockage inter-saisonnier d'énergie solaire pour l'habitat par absorption*. PhD thesis, Chambéry, 2010.
- [36] A Benmeddour. Etude et simulations numériques des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque, mémoire de magister, 2010.
- [37] Widad Berrah, Amira Mesbahi, and Samia Rebouh. Les strategies d'énergie solaire dans l'habitat bioclimatique. 2015.
- [38] Nor EL SAHOULI and Yasser BENDJELLOUL. *Impact d'une démarche Lean Six Sigma pour la résolution de problèmes en entreprise Cas d'étude : Entreprise CHIALI Tubes*. PhD thesis.
- [39] Talal Salem. Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie. *Thèse INSA de Lyon*, 2007.
- [40] Najla El Gharbi, Halima Derbal, Sofiane Bouaichaoui, and Noureddine Said. A comparative study between parabolic trough collector and linear fresnel reflector technologies. *Energy Procedia*, 6 :565–572, 2011.
- [41] Amy Allen, Gregor Henze, Kyri Baker, and Gregory Pavlak. Evaluation of low-exergy heating and cooling systems and topology optimization for deep energy savings at the urban district level. *Energy Conversion and Management*, 222 :113106, 2020.
- [42] Arif Hepbasli. Low exergy (lowex) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1) :73–104, 2012.
- [43] Forrest Meggers, Volker Ritter, Philippe Goffin, Marc Baetschmann, and Hansjürg Leibundgut. Low exergy building systems implementation. *Energy*, 41(1) :48–55, 2012.
- [44] Ongun Berk Kazanci. Low temperature heating and high temperature cooling in buildings. *Technical University of Denmark*, 2016.

- 
- [45] Zeng-Yuan Guo, Hong-Ye Zhu, and Xin-Gang Liang. Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(13-14) :2545–2556, 2007.
- [46] ZY Guo, XB Liu, WQ Tao, and RK Shah. Effectiveness–thermal resistance method for heat exchanger design and analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13-14) :2877–2884, 2010.
- [47] B Wetal Olesen, OLESEN BW, et al. Thermal comfort in a room heated by different methods. 1980.
- [48] Takehito Imanari, Toshiaki Omori, and Kazuaki Bogaki. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. : Comparison with the conventional all-air system. *Energy and buildings*, 30(2) :167–175, 1999.
- [49] Nick Triana and Rui Zhu. The influence on surface coverings on the performance of radiant floors for both heating and cooling. *ASHRAE Transactions*, 120 :1HH, 2014.
- [50] Ongun Berk Kazanci, Masanori Shukuya, and Bjarne W Olesen. Energy and exergy analyses of the benefits and limitations of air-to-air heat recovery. In *9th International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation In Buildings, Songdo, Republic of Korea*, 2016.
- [51] CEN Standard EN. 1264, part 3 : Water based surface embedded heating and cooling systems. *Floor heating : Prove methods for the determination of the thermal output using calculation and test methods*, 2009.
- [52] Guruprakash Sastry. Vav vs. radiant : side-by-side comparison. *ASHRAE Journal*, 56(5) :16, 2014.
- [53] Ongun B Kazanci, Masanori Shukuya, and Bjarne W Olesen. Exergy performance of different space heating systems : A theoretical study. *Building and Environment*, 99 :119–129, 2016.
- [54] Ongun B Kazanci, Masanori Shukuya, and Bjarne W Olesen. Theoretical analysis of the performance of different cooling strategies with the concept of cool exergy. *Building and Environment*, 100 :102–113, 2016.
- [55] Lun Zhang, Xiaohua Liu, and Yi Jiang. Application of entransy in the analysis of hvac systems in buildings. *Energy*, 53 :332–342, 2013.



- 
- [56] Bjarne W Olesen and Ongun Berk Kazanci. State of the art of hvac technology in europe and america. In *Proceedings of the World Engineering Conference and Convention (WECC2015)*, 2015.
- [57] ASHRAE Handbook ASHRAE. Hvac systems and equipment. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta*, 2000.
- [58] Yang Chen and Andreas K Athienitis. A three-dimensional numerical investigation of the effect of cover materials on heat transfer in floor heating systems. *Ashrae Transactions*, 104 :1350, 1998.
- [59] Ongun Berk Kazanci, Masanori Shukuya, and Bjarne W Olesen. Effects of floor covering resistance of a radiant floor on system energy and exergy performances. *12th REHVA World Congr. CLIMA*, 2016.
- [60] Ghiles Kaci and Juba Kaci. *La rénovation des installations de chauffage de l'hôtel AM-RAOUA*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.
- [61] A Ferrante and MT Cascella. Zero energy balance and zero on-site co2 emission housing development in the mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 43(8) :2002–2010, 2011.
- [62] XQ Zhai, JR Yang, and RZ Wang. Design and performance of the solar-powered floor heating system in a green building. *Renewable Energy*, 34(7) :1700–1708, 2009.
- [63] Elisa Bruni, Luca Sarto, et al. An italian pilot project for zero energy buildings : Towards a quality-driven approach. *Renewable energy*, 50 :840–846, 2013.
- [64] Bjarne W Olesen. Possibilities and limitations of radiant floor cooling. Technical report, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers . . . , 1997.
- [65] R Kharchi, B Benyoucef, and M Belhamel. Système solaire combiné estimation des besoins énergétiques. *Revue des énergies renouvelables*, pages 109–114, 2007.
- [66] Doosam Song, Taeyeon Kim, Suwon Song, Suckho Hwang, and Seung-Bok Leigh. Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation. *Applied Thermal Engineering*, 28(11-12) :1299–1311, 2008.
- [67] Jae-Han Lim, Jae-Hun Jo, Yong-Yee Kim, Myoung-Souk Yeo, and Kwang-Woo Kim. Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings. *Building and Environment*, 41(1) :60–73, 2006.

- [68] Gook-Sup Song. Buttock responses to contact with finishing materials over the ondol floor heating system in korea. *Energy and Buildings*, 37(1) :65–75, 2005.
- [69] F Mokhtari. Etude d’une boucle régulée capteur-plancher solaire’, 2005.
- [70] F De Monte. Transient heat conduction in one-dimensional composite slab. a ‘natural’ analytic approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19) :3607–3619, 2000.
- [71] X Lu and P Tervola. Transient heat conduction in the composite slab-analytical method. *Journal of Physics A : Mathematical and General*, 38(1) :81, 2004.
- [72] James V Beck, A Haji-Sheikh, Donald E Amos, and David Yen. Verification solution for partial heating of rectangular solids. *International journal of heat and mass transfer*, 47(19-20) :4243–4255, 2004.
- [73] Abdelaziz Laouadi. Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software. *Building and Environment*, 39(4) :421–431, 2004.
- [74] Tim Weber and Gudni Jóhannesson. An optimized rc-network for thermally activated building components. *Building and Environment*, 40(1) :1–14, 2005.
- [75] Riikka Holopainen, Pekka Tuomaala, and Jouko Piippo. Uneven gridding of thermal nodal networks in floor heating simulations. *Energy and Buildings*, 39(10) :1107–1114, 2007.
- [76] Xing Jin, Xiaosong Zhang, and Yajun Luo. A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system. *Energy and Buildings*, 42(10) :1753–1758, 2010.
- [77] Thierry De Larochelambert. Plancher solaire direct mixte à double réseau en habitat bioclimatique-conception et bilan thermique réel. double direct solar floor heating in bioclimatic habitation-design and real energetical balance. *Revue générale de thermique*, 34(408) :769–786, 1995.
- [78] K Imessad, L Derradji, N Ait Messaoudene, F Mokhtari, A Chenak, and R Kharchi. Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in a mediterranean climate. *Renewable energy*, 71 :589–597, 2014.
- [79] F Mokhtari, N Ait Messaoudène, A Hamid, M Belhamel, et al. Etude du comportement thermique d’une maison munie d’un système de chauffage solaire. *Revue des énergies renouvelables*, 9(4) :363–370, 2006.

- 
- [80] Fatiha Mokhtari, Larbi Loukarfi, Mourad Chikhi, Khaled Imessad, and Noureddine Ait Messaoudene. A passive wall design to minimize building temperature swings for algerian saharan climate. *Science and Technology for the Built Environment*, 23(7) :1142–1150, 2017.
- [81] O Guerri, A Harhad, and K Bouhadeb. Développement d’un code de calcul permettant l’optimisation des systèmes de chauffage de planchers ou sols à l’aide de tubes enterrés.
- [82] M Zaheer-Uddin, GR Zheng, and Sung-Hwan Cho. Optimal operation of an embedded-piping floor heating system with control input constraints. *Energy Conversion and Management*, 38(7) :713–725, 1997.
- [83] PJ Martinez, A Velázquez, and A Viedma. Performance analysis of a solar energy driven heating system. *Energy and Buildings*, 37(10) :1028–1034, 2005.
- [84] Ran Gao, Angui Li, Ou Zhang, and Hua Zhang. Comparison of indoor air temperatures of different under-floor heating pipe layouts. *Energy Conversion and Management*, 52(2) :1295–1304, 2011.
- [85] Dongliang Zhang, Ning Cai, and Zijie Wang. Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system. *Energy and buildings*, 61 :260–266, 2013.
- [86] Oğuz Bozkır and Suat Canbazoğlu. Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow. *Energy and Buildings*, 36(6) :579–586, 2004.
- [87] A Mokhtari, H Kazeoui, Y Boukezzi, and G Achard. Utilisation d’un circuit hydraulique dans un plancher pour le chauffage et le rafraîchissement des locaux. *Revue des Energies renouvelables*, 1 :17–27, 1998.
- [88] Valentin Trillat-Berdal, Bernard Souyri, and Gilbert Achard. Intégration énergétique dans les bâtiments par l’utilisation combinée de l’énergie solaire et de la géothermie basse température. *These de doctorat, Université de Savoie*, 2006.
- [89] bediaf. Etude de l’influence de la typologie des constructions sur la performance énergétique des batiments dotes de plancher solaire direct ,habiba. kazeoui, abdelkader. tahakourt, abdelkrim. ait-mokhtar, rafik. belarbi. Master’s thesis, université Blida 1.

- [90] R Kharchi, A Hamid, and M Belhamel. Contribution de l'énergie solaire dans le chauffage de l'habitat par le plancher. In *National Workshop on Renewable Energies Valorisation*, 1999.
- [91] S Sami, D Semmar, A Hamid, R Mecheri, and M Yaiche. Viability of integrating solar water heating systems into high energy performance housing in algeria. *Energy*, 149 :354–363, 2018.
- [92] S Bensalem, K Imessad, A Hamidat, and M Missoum. Active solar heating system for residential building in algeria an energetic economic and environmental investigation. *Revue des Energies Renouvelables*, 19(4) :533–541, 2016.
- [93] *Règlementation thermique des bâtiments d'habitation, règles des déperditions calorifiques, fascicule 1*. 2019.

# **ANNEXE**

## Fichier météo

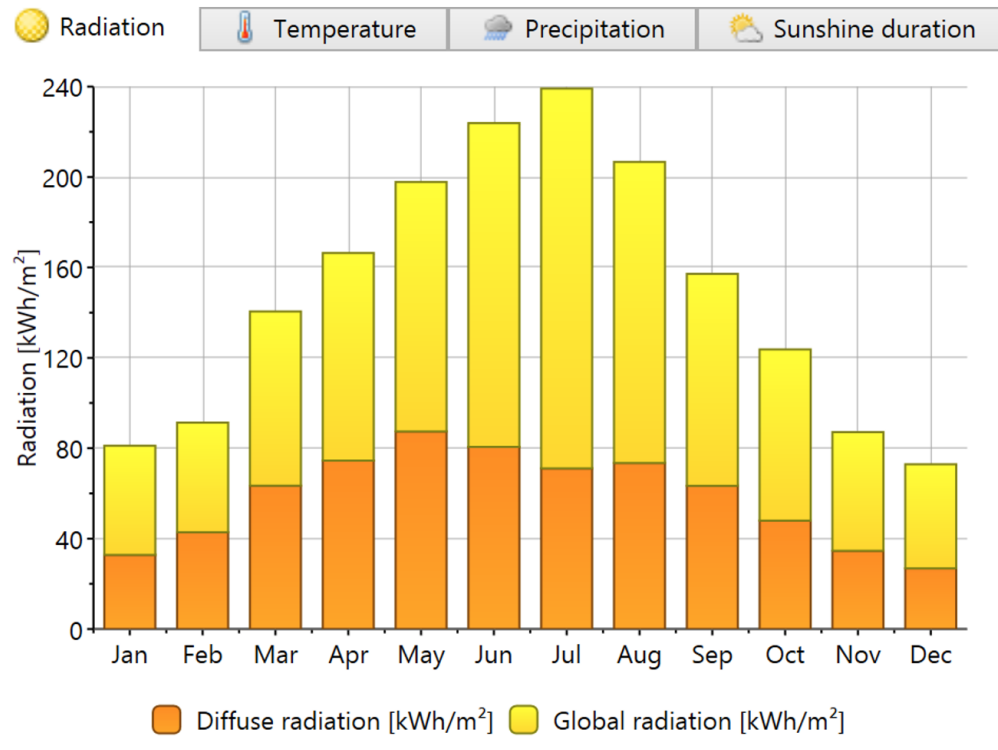


FIGURE 4.23 – Radiation

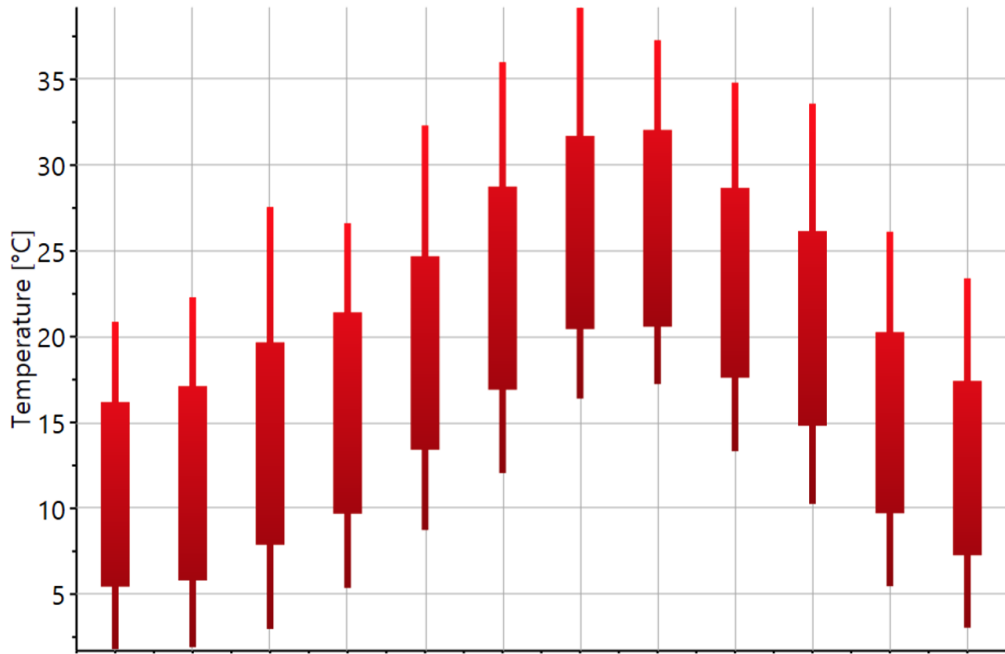


FIGURE 4.24 – Température



FIGURE 4.25 – Precipitation

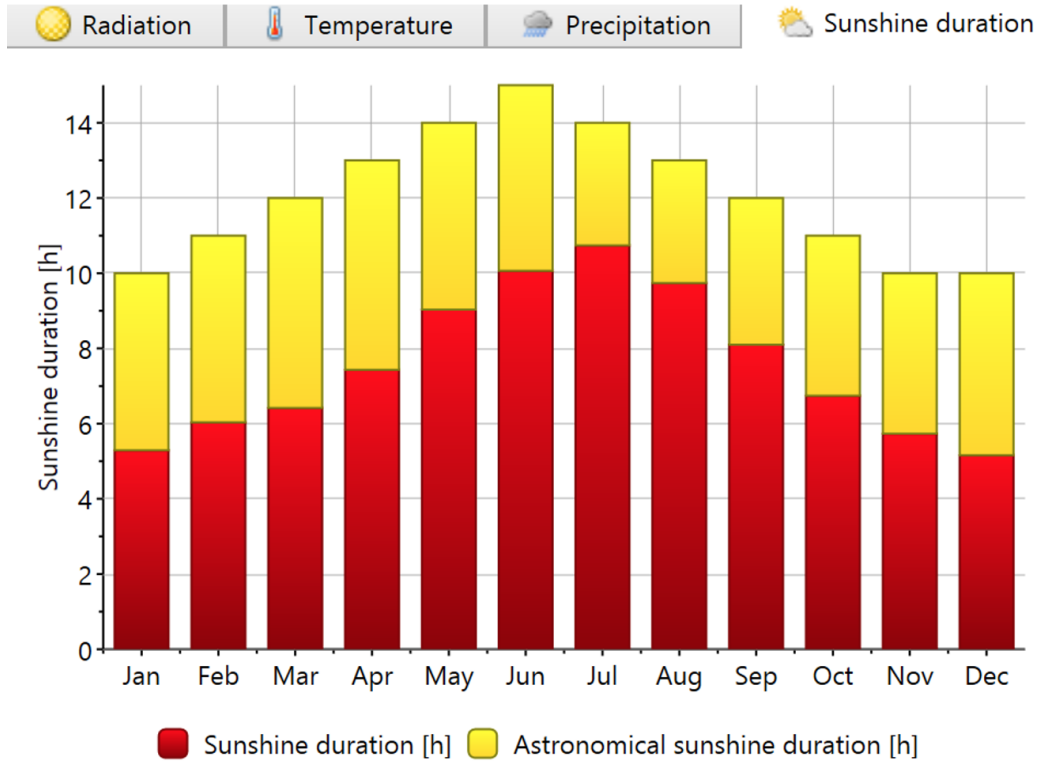


FIGURE 4.26 – Durée d’enseillement

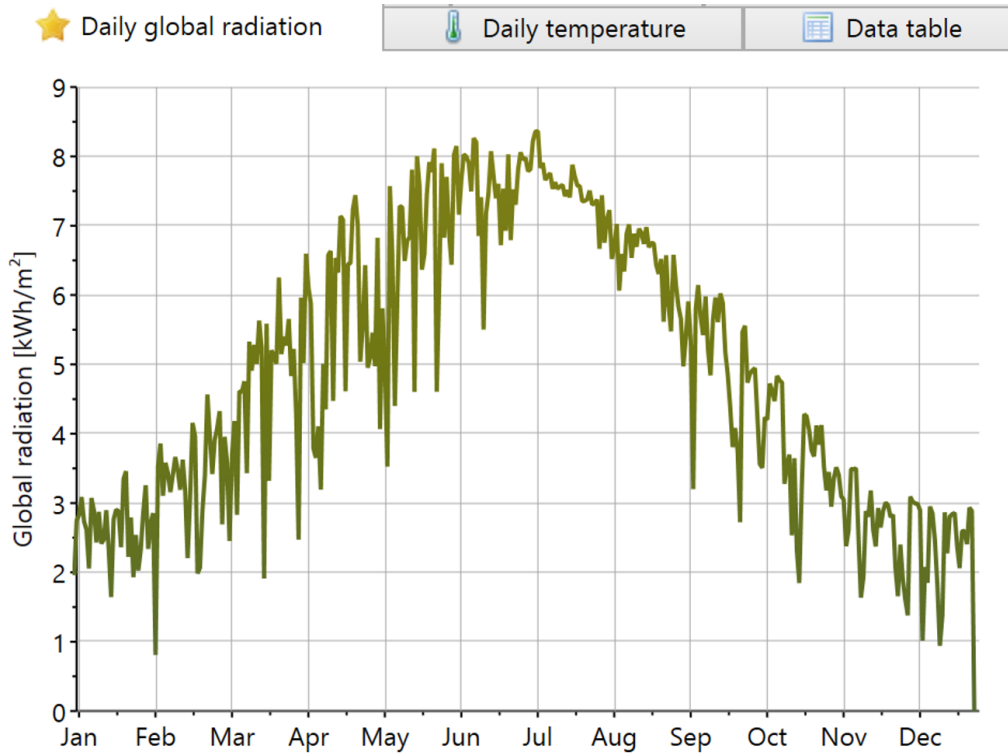


FIGURE 4.27 – Irradiation Globale



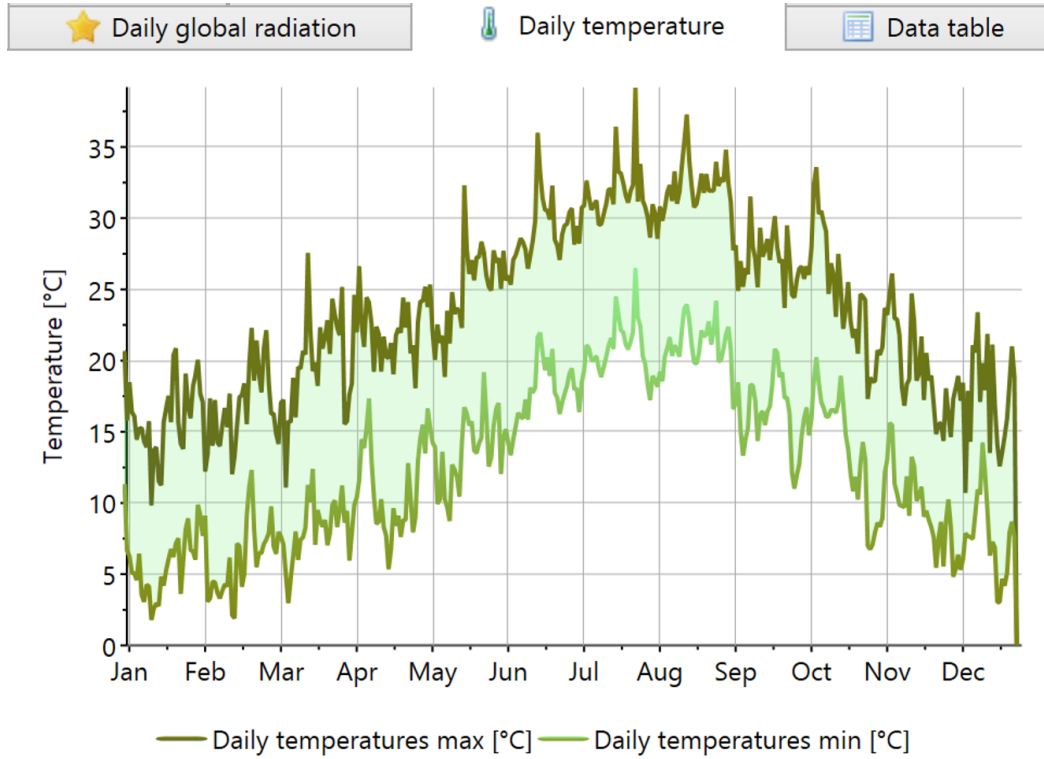


FIGURE 4.28 – Les Températures Max et Min dans la Journée

★ Daily global radiation
🌡 Daily temperature
📄 Data table

	Gh kWh/m <sup>2</sup>	Dh kWh/m <sup>2</sup>	Bn kWh/m <sup>2</sup>	Ta °C	Td °C	FF m/s	
January	81	33	115	10.2	6.6	2.4	
February	91	43	100	11	6.7	2.5	
March	141	63	132	13.5	8.9	2.7	
April	166	75	142	15.6	10.7	3	
May	198	87	163	19.1	13.7	3	
June	224	81	204	23.2	16.3	3.1	
July	239	71	236	25.9	19.1	3.1	
August	207	73	192	26.3	19.5	2.9	
September	157	63	152	23.3	17.4	2.8	
October	124	48	144	20.2	15	2.3	
November	87	35	119	14.7	10.1	2.5	
December	73	27	120	11.8	7.7	2.6	
Year	1784	699	1817	17.9	12.6	2.7	

FIGURE 4.29 – La variation des différents paramètres

# ARTICLE