

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
Université SAAD DAHLEB BLIDA



Faculté de technologie
Département de Mécanique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

Option : systèmes énergétiques et thermiques avancés

Thème :

**Etude paramétrique d'un plancher
solaire chauffant sur le rendement
d'un habitat**

Proposé et dirigé par :

Dr D.SEMMAR

présenté par :

BEDIAF Amina

-Septembre 2012-

Remerciements

Je tiens avec tous mes compliments et mes expressions d'honneur à remercier mon encadreur Mr D .SEMMAR pour ses conseils et ses orientations, Je lui exprime ma reconnaissance pour le soutien dont il a fait preuve tout le long de cette étude.

Son aide a été précieuse tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Son enthousiasme et son optimisme à toute épreuve m'ont permis de toujours prendre plaisir à aborder les nouveaux problèmes et son exigence scientifique a été très formatrice et enrichissante.

J'exprime aussi mes remerciements aux membres de jury , qui ont accepté de consacrer de leurs temps à examiner ce mémoire.

Enfin, je remercie tous ceux qui de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce travail

Dédicace

A mes très chers parents

*Qui m'ont soutenu durant toute ma vie et qui m'ont entouré de toute
l'estime qu'un enfant peut exiger de ses parents*

A mes frères Fakhro, Hamza, Aymen et Hamada

*avec qui je passe d'agréables moments et que je ne remercierais
jamais d'avoir toujours été là pour moi*

A mes amis de toujours pour leur dire combien je les aime

A mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines

A mes grands parents

A l'ensemble des enseignants du département Mécanique

A toute la promotion Energétique 2012

Et

A tous ceux qui me portent dans leur cœur

Amina

Nomenclature

C_p : capacité calorifique à **P**ression ^{cte} [J/Kg°C]

D_i : diamètre intérieur du PE-Xc [mm]

h : coefficient d'échange convectif [w/m².°C]

h_i : coefficient d'échange convectif superficiel intérieur [w/m².°C]

h_e : coefficient d'échange convectif superficiel extérieur [w/m².°C]

Nu : nombre de Nusselt

Pr : nombre de Prandtl

Q̇ : débit volumétrique [L/min]

Re : nombre de Reynolds

T_{moy} : température moyenne dy fluide caloporteur [°C]

V : vitesse du fluide caloporteur [m/s]

Δx : espacement entre les nœuds [m]

Symboles grecques

λ : conductivité thermique [w/m°C]

ρ : masse volumique [Kg/m³]

μ : viscosité dynamique [Pa.s]

Liste des tables

Table 2.1 : Caractéristiques thermo physiques des composants du plancher haut

Table 2.2 : Caractéristiques thermo-physiques des composants du plancher bas.

Table 2.3 : Caractéristiques thermo-physiques des composants de mur.

Table 2.4 : Comparaison de la consommation énergétique avec une habitation classique

Table 4.1 : Les propriétés thermo-physique de l'eau à $T=40^{\circ}\text{C}$

Table 4.2 : Coefficient d'échange convectif avec l'air.

Table 4.3 : Les caractéristiques des murs extérieurs (isolation intérieure) des locaux

Table 4.4 : Les caractéristiques des murs extérieurs(pierre) des locaux

Table 4.5 : Les caractéristiques des murs extérieurs(isolation extérieure) des locaux

Listes des figures

Figure. 1.1 : chauffage des piscines

Figure.1.2 Principe de chauffe eau thermosiphon

Figure 1.3 chauffe eau a circulation forcée

Figure 1.4 : capteur thermique

Figure 1.5. La répartition de la température dans une chambre chauffée par plancher solaire.

Figure. 1.6 Schéma d'une installation de chauffage solaire par le plancher et l'eau chaude sanitaire

Figure 1.7. La répartition de température dans 2 types différents de chauffage d'habitat

Figure 1.8. La différence esthétique entre deux modes de chauffage.

Figure. 2.1 Photo de la maison

Figure. 2.2 Schéma descriptif de l'installation

Figure 2.3. Stratégie de construction durable.

Figure. 2.4 La mise en place des vitres à double paroi.

Figure. 2.5 tube multicouche

Figure. 2.6. Quelques emplacements des serpentins en *PE-Xc/AL/PE-Xc*

Figure. 2.7 Distribution du serpentin dans le séjour

Figure 2.8 Emplacement du serpentin lors de la construction

Figure. 2.9 Isolation des murs

Figure. 2.10 Mur externe

Figure. 2.11. Mur interne (Un panneau de BTS)

Figure 2.12. Les locaux chauffés.

Figure 3.1 : affichage au démarrage

Figure 3.2 : pour sélectionner les dimensions d'espace

Figure 3.3 : pour ajouter une physique

Figure 3.4 : la géométrie :coupe de la maison

Figure 3.5 : Choix des matériaux

Figure 3.6 : Introduction des conditions aux limites

Figure 3.7 : Procède de maillage

Figure 3.8 : maillage des nœuds

Figure 3.9 Résolution du problème

Figure 3. 10 Résultat final

Figure 3.11. Variation du flux dans un volume de contrôle.

Figure 4.1 Coupe 1 nord sud

Figure 4.2 coupe 2 EST OUEST

Figure 4.3. Résultat pour un temps de 5h coupe1.

Figure 4.4. Résultat pour un temps de 5h coupe2.

Figure 4.5. Résultat pour un temps de 10h coupe1.

Figure 4.6. Résultat pour un temps de 10h coupe2.

Figure 4.7. Résultat pour un temps de 15h coupe 1.

Figure 4.8 Résultat pour un temps de 15h coupe 2

Figure 4.9 Résultat pour un temps de 20h coupe 1

Figure 4.10 Résultat pour un temps de 20h coupe 2

Figure 4.11 Les lignes de températures pour 20h coupe 2

Figure 4.12 Les lignes de températures pour 20h coupe 1

Figure 4.13 Les différentes sondes ponctuelles choisies pour la lecture des résultats coupe 1

Figure 4.14 Les différentes sondes ponctuelles choisies pour la lecture des résultats coupe 2

Figure 4.15 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher de la chambre 1(24h)

Figure 4.16 Evolution de la température en fonction du temps air1 de la chambre 1(24h)

Figure 4.17 Evolution de la température en fonction du temps air 2 de la chambre 1(24h)

Figure 4.18 Evolution de la température en fonction du temps air 3de la chambre 1(24h)

Figure 4.19 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher de la chambre 2(24h)

Figure 4.20 Evolution de la température en fonction du temps air1 de la chambre 2(24h)

Figure 4.21 Evolution de la température en fonction du temps air2 de la chambre 2 (24h)

Figure 4.22 Evolution de la température en fonction du temps air 3 de la chambre 2 (24h)coupe 1

Figure 4.23 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher de la chambre 1 (24h) coupe 2

Figure 4.24 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 1de la chambre 1 (24h)coupe2

Figure 4.25 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 2 de la chambre 1 (24h)
Coupe 2

Figure 4.26 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 3de la chambre 1 (24h)

Figure 4. 27 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher du séjour (24h)coupe 2

Figure 4.28 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 1 du séjour (24h)

Figure 4.29 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 2 du séjour (24h)

Coupe 2

Figure 4.30 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 3 du séjour (24h)

coupe2

Figure4.31 : évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 1
e= 15 cm (24h)

Figure4.32 : évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 2
e= 15 cm (24h)

Figure4.33 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 1
e= 15 cm (24h)

Figure4.34 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)séjour e=
15 cm (24h)

Figure4.35 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 1
e= 27 cm (24h)

Figure4.36 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 2
e= 27 cm (24h)

Figure4.37 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)Séjour
e= 27 cm (24h)

Figure4.38 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre 1
e= 15 cm (24h)

Figure4.39 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre 1
e= 15 cm (24h)

Figure4.40 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre 1
e= 15 cm (24h)coupe 2

Figure4.41 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)séjour
e= 15 cm (24h)

Figure4.42 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre2
e= 27cm (24h)

Figure4.43 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre1

e= 27cm (24h)

Figure4.44 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)séjour

e= 27cm (24h)

Figure4.45 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)chambre 1

e= 15cm (24h)

Figure4.46 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)chambre 2

e= 15cm (24h)

Figure4.47 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)chambre1

e= 15cm (24h)

Figure4.48 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Séjour

e= 15cm (24h)

Figure4.49 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Chambre 1

(24h) e=27cm

Figure4.50 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Chambre 2

(24h) e=27cm

Figure4.51 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Chambre 1

(24h) e=27cm

Figure4.52 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE) séjour

(24h) e=27cm

Résumé :

Ce travail représente une simulation numérique de la propagation de la chaleur dans l'habitat à travers un système de chauffage solaire. Après la captation et la transformation de l'énergie solaire à une énergie thermique, la distribution se fait à l'aide du serpentin qui est intégré à l'intérieur de la dalle du béton

La simulation a été faite par un logiciel développé appelé *comsolmultiphysiques* (anciennement appelé FEMlab)

L'étude paramétrique de 11 modèles pour chaque coupe nous a permis de connaître l'influence de l'épaisseur de la dalle de compression et les matériaux de construction des murs extérieurs sur le chauffage des locaux.

Abstract :

This work represents a numerical simulation of the propagation of heat in the home through a solar heating system. After uptake and transformation of solar energy to thermal energy, the distribution is done with the coil which is embedded within the concrete of the slab

The simulation was performed using proprietary software called *comsolmultiphysiques* (formerly FEMLAB)

The parametric study of 11 models for each cut has allowed us to know the influence of the slab thickness compression and construction materials on the exterior wall space heating.

ملخص

هذا العمل يمثل محاكاة العددية للنشر الحرارة في المنزل من خلال نظام التسخين الشمسي. بعد امتصاص وتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية، ويتم توزيعها من خلال انبوب حلزوني موجود بباطن الارض (داخل الطبقة الاسمنتية)

تم انجاز المحاكاة باستخدام برنامج حاسوبي متطور كومسول ملتيفيزكس

و قد سمحت الدراسة البرامترية 11 نموذج لكل مقطع من التعرف على تأثير سمك الطبقة الاسمنتية ومواد بناء الجدران الخارجية على التدفئة داخل المنزل

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Nomenclature

Liste des tables

Listes des figures

Résumé

Introduction générale

Chapitre 1

1.1	INTRODUCTION	1
1.2	Énergie solaire thermique	1
1.3	Les technologies solaires dans le secteur bâtiment	1
1.3.1	solaire passif	1
1.3.2	solaire actif	2
1.4	le capteur solaire	4
1.5	Classification des capteurs	4
1.5.a	Le fluide de travail utilisé	4
1.5.b	L'orientation des capteurs	5
1.5.c	Les types des composants	5
1.5.d	L'absorbeur	5
1.6	Principe du plancher solaire directe	6
1.7	Composition d'un système solaire combiné	7
1.8	Le stockage thermique	8
1.8.a	.Stockage par chaleur latente	8

1.8.b Stockage par chaleur sensible	8
1.9 L'appoint	9
1.10.Avantages et inconvénients du plancher chauffant	9
1.10.a Avantages	9
1.10.b Inconvénients	10
1.11 Caractéristiques du plancher chauffant	10
1.12 .Travaux récents	11
1.13Objectif du présent travail	16
1.14 Conclusion	16
<u>Chapitre 2</u>	
2.1 Introduction	17
2.2Présentation de la maison	17
2.3Description du dispositif de chauffage	17
2.3.1 Schéma général du dispositif	17
2.3.2 Principe de fonctionnement de l'installation	20
2.3.3 Caractéristique du serpentin utilisé	20
2.4. La distribution du serpentin	22
2.5. L'emplacement du serpentin dans la maison	23
2.6Caractéristiques des matériaux de construction	24
2.6.1 Le plancher haut	24
2.6.2 Le plancher bas sur terre pleine	24
2.6.3 Les murs extérieurs	25
2.6.4 Les murs internes	26

2.7 Consommation énergétique de l'habitat 26

2.8 Les locaux chauffés 27

2.9 Conclusion

Chapitre 3

3.1 Introduction 29 .

3.2 Description du logiciel 29

3.3 Procédure de simulation 29

3.4 Présentation générale du logiciel 29

3.4.1 Choix du modèle 30

3.4.2 Définition de la géométrie 31

3.4.3 Introduction des propriétés des domaines 32

3.4.4 Conditions aux limites 32

3.4.5 Maillage 33

3.4.6 Résolution du problème 34

3.4.7 Postprocessing : analyse des résultats 35

3.5 Equations de conservation 35

3.5.1 Généralités 35

3.5.2. Equation de conservation de masse 36

3.5.3. Equation de conservation de l'Energie 38

3.5.4. Equation de conservation de la quantité de mouvement 38

3.6. Equation générale 39

3.7 Conclusion 39

Chapitre 4

4.1 Introduction	40
4.2 Le problème étudié	40
4.2.1 La distance moyenne entre les nœuds	41
4.2.1.a Calcul de Δx	41
4.2.2. Calcul du coefficient d'échange convectif (h)	42
4.2.2.a Convection forcée	42
4.2.2. b Convection naturelle	43
4.3 Résolution du problème	43
4.4 Résultats	47
4.4.1 Épaisseur de dalle de compression	48
4.4.2 Matériaux de construction	57
4.4.2.a) murs extérieurs avec du brique et une isolation intérieure	57
4.4.2.b) murs extérieurs avec du brique et une isolation extérieure	61
4.4.2.c) murs extérieurs avec de la pierre	65

Conclusion Générale et perspectives

Introduction générale

L'énergie depuis le commencement des âges a été le moteur de l'activité humaine, et c'est un élément qui intervient dans tous les actes quotidiens de l'homme.

Cependant le chauffage, la climatisation, l'éclairage, le transport...etc. représentent les différentes manières du besoin en énergie. L'augmentation illimitée de l'offre d'énergie relativement à la demande, ainsi que les faibles coûts ont entraîné des gaspillages énormes et une consommation très importante de ces sources ; aussi bien dans le domaine industriel que dans le domaine domestique.

Le besoin brut du bâtiment est la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir, pendant une période de temps donnée, un climat intérieur convenable et satisfaire les prestations du bâtiment (eau chaude, cuisson, éclairage, chauffage, climatisation...). Se caractérise par les différentes formes, c'est pourquoi elle est appelée « protéiforme »

Parmi les sources d'énergie qu'utilise l'homme : le pétrole connu depuis l'aube de l'humanité tient une place particulière, à côté du charbon, et du gaz naturel.....

Les sources alternatives renouvelables d'énergie ont bercé l'enfance de la civilisation humaine ;

le soleil, le vent, l'eau ont donné à l'homme la possibilité de nouvelle conquête à savoir un meilleur confort.

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire. Il dispose en effet sur un territoire d'un gisement solaire considérable. Il est donc du plus grand intérêt pour un pays comme l'Algérie de pouvoir estimer les potentialités offertes par un tel type d'énergie et d'identifier les moyens de s'en servir et l'intégrer dans la stratégie de la politique énergétique du pays.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les bâtiments est l'une des contributions les plus importantes pour réduction de la consommation de combustibles fossiles et les émissions nocives dans l'environnement. Plus de 25% de la consommation totale d'énergie est due aux bâtiments de chauffage et de refroidissement. En 2003, la consommation finale d'énergie pour le chauffage des bâtiments et de refroidissement (UE-32) représenté environ 3600 TWh, dont 93% pour le chauffage et seulement 7% pour le refroidissement .L'énergie solaire peut également contribuer à répondre à la demande de chauffage, à la fois pour les espaces intérieurs et l'eau chaude

L'objet de ce travail est d'étudier les différents paramètres qui influent sur le confort d'une maison munie d'un système de chauffage solaire (plancher solaire) cette maison fait partie

d'un projet pilote situé à Souidania, réalisé en collaboration de deux institutions algériennes CDER (centre de développement des énergies renouvelables) et le CNERIB (centre national d'études et de recherche intégrées du bâtiments) avec une autre multinationale MED-ENEC (Mediterranean Energy Efficiency in Construction structure)

Ce travail est composé essentiellement de 4 chapitres :

Dans le 1^{er} chapitre on s'est intéressé qu'aux généralités sur le chauffage solaire, le plancher chauffants solaire et une étude bibliographiques sur les travaux récents sur ce mode de chauffage .

Le 2^{ème} chapitre a été 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 thermo-physiques, l'orientation de la maison et l'emplacement du serpentins dans la dalle de compression .

Le 3^{ème} chapitre est réservé à une présentation du logiciel utilisé est les différentes étapes suivies lors de la simulation ; avec un petit rappel sur les équations de conservation.

Au 4^{ème} chapitre on présente les résultats obtenus à partir de la simulation avec **comsol multiphysiques** en variant l'épaisseur de la dalle de compression et l'utilisation de différents matériaux de construction des murs extérieurs ;

Et on finira ce travail par une conclusion générale et perspectives.

2.1 INTRODUCTION :

L'énergie solaire dans les pays chauds est une ressource à ne pas négliger car son exploitation peut devenir un facteur important de leur développement. La plupart des pays à climat méditerranéen ou tempéré bénéficient d'une irradiation solaire appréciable au cours de l'année. L'application de l'énergie solaire aux conditions locales, jusqu'à présent, les installations solaires susceptibles de satisfaire ces usages n'ont pas été envisagées à cause de l'investissement important. L'énergie solaire est une énergie d'appoint devant être couplée avec une énergie pérenne classique même si elle peut couvrir dans certains cas la majorité des besoins .

1.2 Énergie solaire thermique

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire on le transformant en énergie thermique. Il se présente de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau et chauffage solaires, rafraîchissement solaire, cuisinières et sècheurs solaires.

La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) où indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

1.3 Les technologies solaires dans le secteur bâtiment :

Dans le solaire thermique on peut distinguer deux systèmes le solaire actif et le solaire passif

1.3.3 solaire passif : afin de profiter passivement de la chaleur et de la lumière du soleil, il faut aménager les bâtiments en fonction des apports solaires .Les techniques passives exploitent d'une part les caractéristiques architecturales des bâtiments, principalement les murs, les fenêtres, les planchers et le toit, et d'autre part les éléments du milieu environnant. Elles captent l'énergie thermique et la stockent. Le principe du chauffage solaire passif est assuré par des ouvertures vitrées adéquates orientées vers le soleil et une isolation convenable pour éviter les déperditions calorifiques, il faut aussi stocker la chaleur afin de continuer à chauffer le bâtiment quand le soleil ne brille plus et la rediriger vers les zones qui n'en bénéficient pas grâce à la thermocirculation ou des ventilateurs .En milieu tempéré, il faut s'assurer que le logement est bien exposé en plein sud .De plus, les vitrages doivent être conçues pour capter le maximum le soleil d'hiver ,sans surchauffer la maison l'été .d'ou l'obligation de mettre des occultations solaires . La chaleur est stockés dans les éléments inertes du bâti (dalles, murs,...) ou dans les dispositifs spécifiques de stockage. La climatisation passive consiste à minimiser l'énergie thermique du soleil par diverses techniques d'ombrage (stores, rideaux, toit saillant, plantation d'arbres a des endroits stratégiques, etc.) ou par circulation d'air frais à l'intérieur des bâtiments. Ces techniques se distinguent par leur simplicité, un cout relativement peu élevé et l'emploi harmonieux des caractéristiques architecturales

Un des systèmes les plus étudié dans le solaire passif est le mur TROMBE

Synthèse Bibliographique

Le principe du mur trombe se résume à constituer la façade sud d'une maison par un vitrage et un mur épais en maçonnerie lourde dont la surface extérieure est peinte en noir. Quand le rayonnement solaire traverse la vitre, il est absorbé par le mur. L'air intérieur du local est plus froid, automatiquement par thermocirculation, il est dégagé par les orifices inférieurs. Le chauffage du local est obtenu principalement par convection sur la face interne du mur qui restitue la chaleur stockée avec un certain déphasage, alors qu'un chauffage instantané est possible grâce à la thermocirculation. Des clapets sont placés devant les orifices inférieurs pour éviter une circulation inverse la nuit.

1.3.4 solaire actif : un système solaire actif est un dispositif destiné à intercepter le rayonnement solaire en vue de sa conversion thermique et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur .une vision structurelle du système mènera à une compréhension du système réel .La structure qui représente le système ne doit pas être confondu avec le système réel. Le système est séparé de son environnement, avec lequel il constitue un univers, par une frontière définie dans l'espace-temps

Exemple d'application du solaire thermique actif :

Chauffage des piscines :est l'application la plus simple de l'énergie solaire thermique active .Dans ces systèmes, la piscine elle-même forme le système de stockage. Le plus souvent l'eau de la piscine circule directement dans les collecteurs, qui sont parfois des collecteurs nus. Pour les systèmes de plus grande taille, on utilise également des collecteurs à revêtements transparent.fig (1.1)

Production de l'eau chaude sanitaire : est peut être l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. Dans ces systèmes, on peut utiliser aussi bien la circulation naturelle (thermosiphon fig. (1.2)) que la circulation forcée (pompes de circulation) (fig. (1.3))

Le chauffage des locaux : peut se faire avec des collecteurs à eau ou à air .Les systèmes peuvent être simples ou relativement complexe .On peut utiliser aussi bien le stockage intersaisonnier que le stockage à court termeLes systèmes sont pour la plupart développés pour satisfaire uniquement à une partie de la demande de chaleur .L'idéal est de coupler l'installation solaire avec une installation de distribution de la chaleur à basse température dans l'habitation.

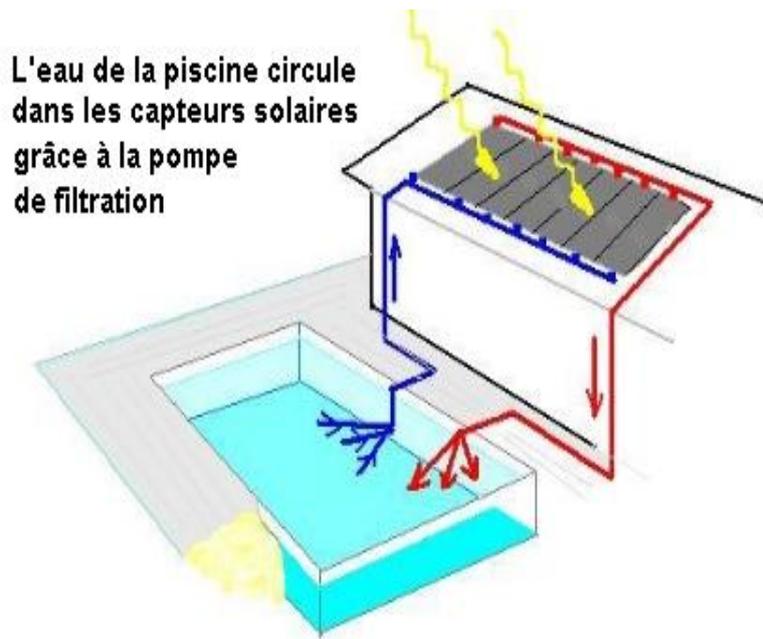


Figure. 1.1 : chauffage des piscines [12]

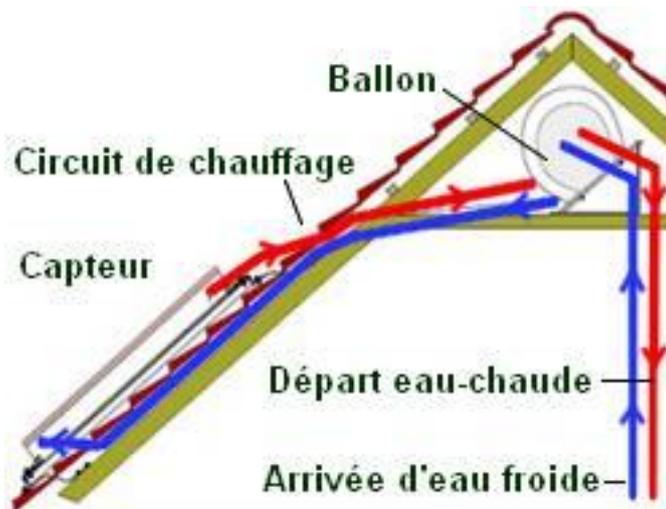


Figure.1.2 Principe de chauffe eau thermosiphon[13]

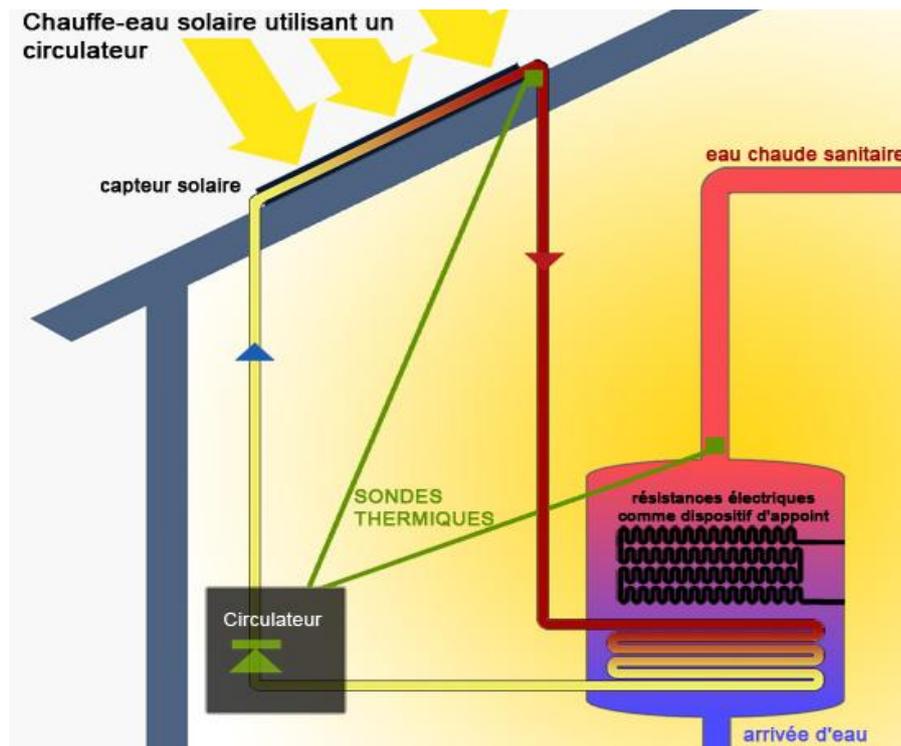


Figure 1.3 chauffe eau a circulation forcée[13]

1.4 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.

1.5 Classification des capteurs [5]

On peut classer les capteurs selon

1.5.a Le fluide de travail utilisé :

On peut trouver :

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.

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 :

Synthèse Bibliographique

- ❖ 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.

1.5.b 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.

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.

1.5.c Les types des composants :

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivant :

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.

1.5.d L'absorbeur

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

-  Les capteurs plans.
-  Les capteurs à cavités.

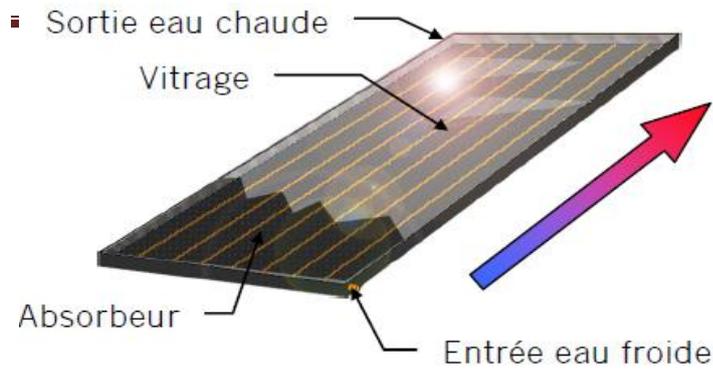


Figure 1.4 : capteur thermique[11]

1.6 Principe du plancher solaire directe : [1]

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 $\alpha \geq 45^\circ$).
- 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 chaude : le confort règne partout
- ✓ L'excellente répartition de la chaleur permet la 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 dessécher

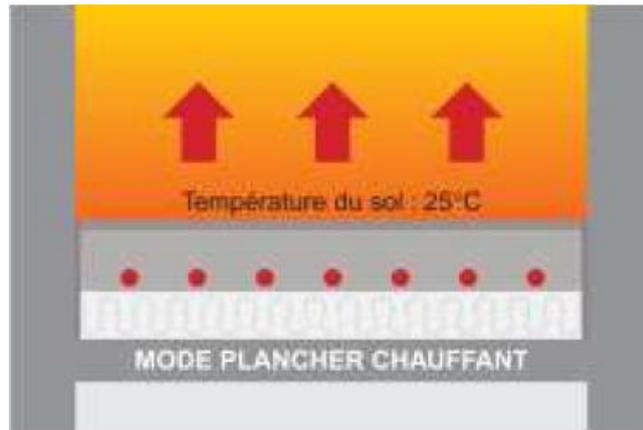


Figure 1.5. La répartition de la température dans une chambre chauffée par plancher solaire.[13]

1.7 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

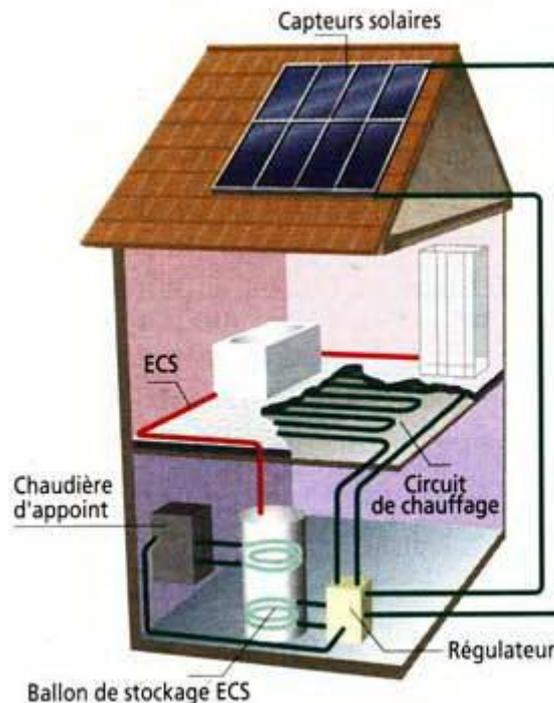


Figure. 1.6 Schéma d'une installation de chauffage solaire par le plancher et l'eau chaude sanitaire[14]

1.8 Le stockage thermique [8]

le stockage d'énergie thermique est une exigence fondamentale de pratiquement tout système solaire actif .il existe deux types de processus de stockage thermique

1.8.a .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.

1.8.b 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).

1.9 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.

1.10. Avantages et inconvénients du plancher chauffant

1.10.a 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.

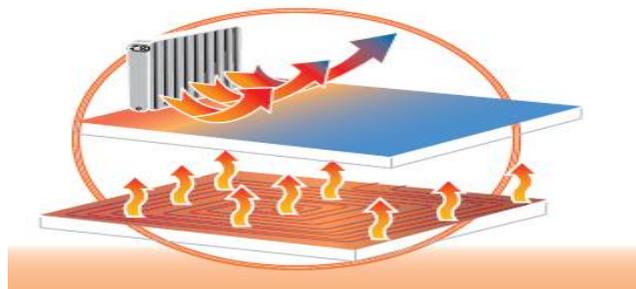


Figure 1.7. La répartition de température dans 2 types différents de chauffage d'habitat[9]

- **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 1.8. La différence esthétique entre deux modes de chauffage.[9]

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

1.10.b 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.

1.11 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

Synthèse Bibliographique

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.

- 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.

- 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 $0,85\text{ m/s}$ et qui dit débit plus important dit circulateur plus puissant.

1.12 .Travaux récents

R. Kharchi, B. Benyoucef et M. Belhamel « Système solaire combiné estimation des besoins énergétiques » Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007)

Synthèse Bibliographique

Dans cet article, les besoins énergétiques d'un tel système ont été évalués dans le cas d'une famille de cinq personnes sur un site de Bouzaréah, Alger. La surface chauffée par le plancher solaire direct est de 100 m² 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 kWh en hiver, en prenant comme température désirée, $T_c = 21$ °C pour une température extérieure d'environ 10 °C. La demande en eau chaude sanitaire d'une famille de cinq personnes peut atteindre les 400 kWh/mois, mais peut varier de ± 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

**F. MOKHTARI 2005 Thèse « Etude d'une boucle régulée capteur-plancher solaire »
Thèse de magister université de BLIDA 2005**

Ce travail porte sur la modélisation d'un système de chauffage d'un local par plancher solaire parcouru d'un serpentín 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 constitué 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 serpentín 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 confrontation des résultats de températures d'une étude expérimentale en utilisant la même stratégie de régulation.

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

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 à travers les concepts de productivité solaire horaire, d'énergie primaire économisée et de taux de couverture solaire corrigé est proposée 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).

Synthèse Bibliographique

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

Le travail présenté est l'étude d'un système de chauffage solaire pour une locale mon ozone. 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).

R.KHARCHI « Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct » Thèse de Magister Université de Blida 2002

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 utilisant la méthode des différences finies 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 ($\alpha=0.78 \text{ E-}6\text{m}^2/\text{s}$).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 100watts dans la journée du 22 février 2000.

O.Guerri. « Développement d'un code de calcul permettant l'optimisation des systèmes de chauffage de planchers ou sols à l'aide de tubes enterrées » Communiqué aux JITH 2001, El Marsa Tunis

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. Cette étude est basée sur la résolution dans le cas permanent et bi-dimensionnel 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 (ξ, η) 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

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

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 pour un contrôle optimal de 24h prenant en considération les contraintes de la capacité thermique du système de plancher chauffant est mise au point. 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.

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

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 équipée d'un PSD.

Valentin Trillat-Berdal, Bernard Souyri, Gilbert Achard « INTEGRATION ENERGETIQUE DANS LES BATIMENTS : UTILISATION COMBINEE DE L'ENERGIE SOLAIRE ET DE LA GEOTHERMIE BASSE TEMPERATURE »

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 m² 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

Synthèse Bibliographique

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 permettront de procéder à une optimisation technico-économique du système.

Habiba. KAZEoui, Abdelkader. TAHAKOURT, Abdelkrim. AIT-MOKHTAR, Rafik. BELARBI « ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TYPOLOGIE DES CONSTRUCTIONS SUR LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DES BATIMENTS DOTES DE PLANCHER SOLAIRE DIRECT »

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 tel 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.

R. Kharchi, A. Hamid et M. Belhamel, Contribution de l'Energie Solaire dans le Chauffage de l'Habitat par le Plancher :

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. Nous présenterons 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 seront présentées par des courbes qui confirment l'efficacité du PSD.

BELKHELFA Rabah BOUROUIS Amine « Intégration d'un plancher chauffant solaire dans un habitat » thèse d'ingénieur université de Blida 2011

Ce travail représente une modélisation numérique de la propagation de la chaleur dans l'habitat à travers un système de chauffage solaire. Après la captation et la transformation de l'énergie solaire à une énergie thermique, la distribution se fait à l'aide du serpentin qui est intégré à l'intérieur de la dalle du béton. Cela donne une distribution homogène de la chaleur au niveau du plancher et aussi dans l'air des locaux à chauffer. Ce qui rend ce système un meilleur moyen de chauffage existant à nos jours. La simulation numérique de la maison étudiée est réalisée par un logiciel si développé appelé **comsol multiphysics®** (anciennement appelé **FEMLab**). L'étude paramétrique du 12 modèles pour chaque coupe, a permis de connaître l'influence de la variation de la température moyenne du fluide caloporteur sur le chauffage du local et l'importance de l'emplacement du serpentin dans la dalle du béton.

Synthèse Bibliographique

Cette étude peut donner les conditions à respecter pour avoir un climat confortable dans l'habitat.

1.13 Objectif du présent travail

Notre travail a pour but d'étudier les différents paramètres qui influent sur le rendement d'un habitat muni d'un système de chauffage solaire actif, les paramètres étudiés sont l'épaisseur de la dalle ,les matériaux de construction .

1.14 Conclusion

A la fin de ce chapitre ce qu'on peut dire est que l'utilisation de l'énergie solaire améliore considérablement les conditions de confort, et comme notre pays est un des pays les plus riche en énergie solaire il est nécessaire d'exploiter cette énergie dans l'habitat par l'utilisation des différents techniques dont le principal avantage est l'usage d'une énergie naturelle non polluante, gratuite et inépuisable.

Présentation De La Maison Etudiée

2.1 Introduction :

La première bâtisse d'efficacité énergétique en Algérie, un chalet réalisé à Souidania (Alger), Le contrôle de performance qui a démarré juste après l'achèvement de la bâtisse, en 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. 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

2.2 Présentation de la maison :

La maison rurale, objet de ce projet, couvre une superficie de 80 m² et un volume total de 240 m³. Elle est située à Alger, dans l'enceinte du CNERIB



Figure. 2.1 photo de la maison

2.3 Description du dispositif de chauffage :

2.3.1 Schéma général du dispositif

Plusieurs éléments composent notre installation de chauffage ces éléments peuvent être résumés dans la figure 2.2

Présentation De La Maison Etudiée

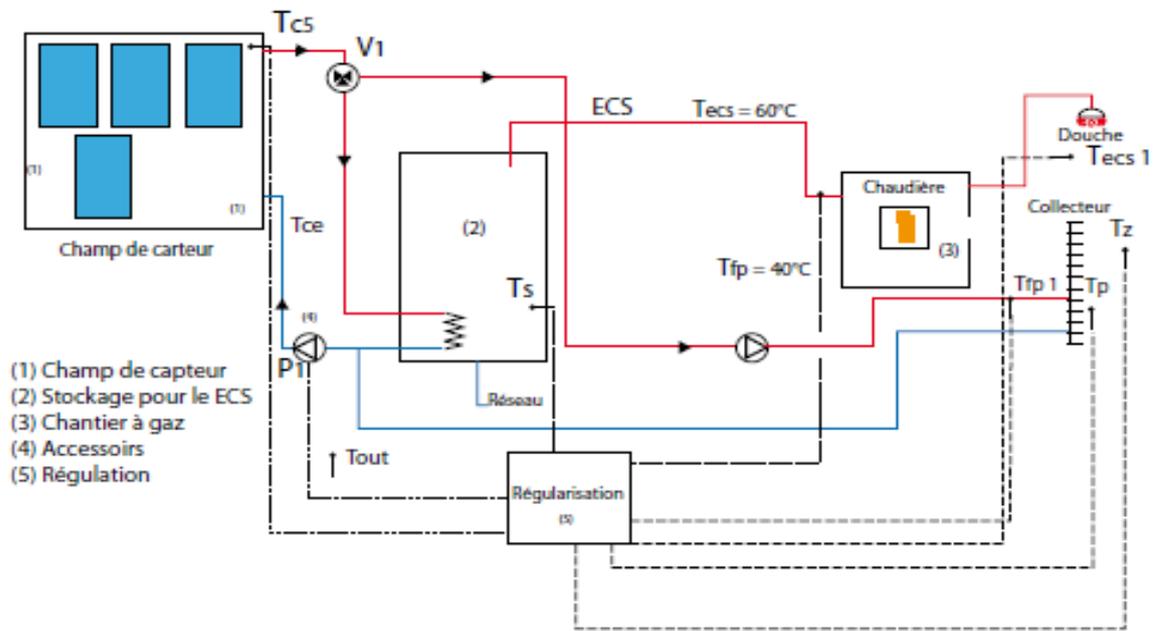


Figure. 2.2 schéma descriptif de l'installation[15]

Du point de vue écologique, ensuite, l'éco-construction 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 et 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'étéL'idéal est donc une maison dont la façade principale, la plus vitrée, regarde vers le sud.

Présentation De La Maison Etudiée

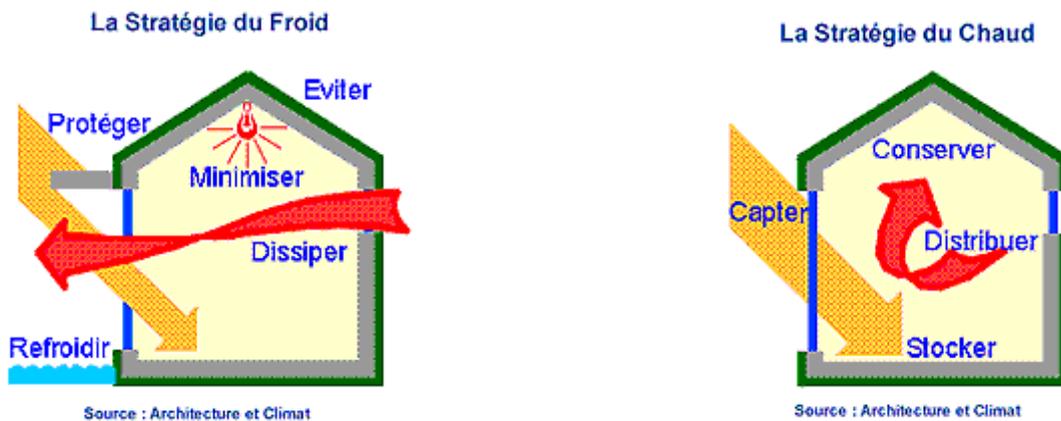


Figure 2.3. Stratégie de construction durable.[16]

- 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 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.

Présentation De La Maison Etudiée



Figure. 2.4 La mise en place des vitres à double paroi.

2.3.2 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.

2.3.3 Caractéristique du serpentin utilisé :

Dans notre cas le matériau utilisé est 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

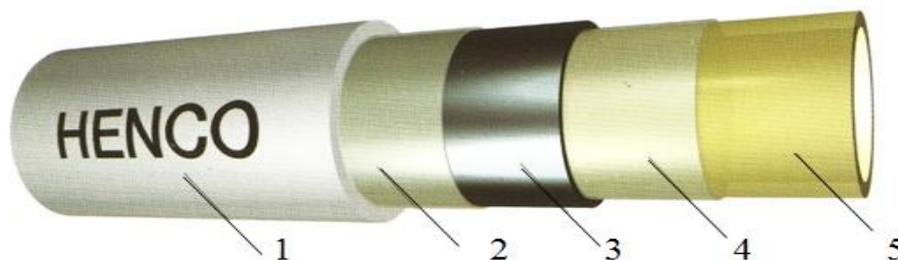


Figure. 2.5 tube multicouche [10]

Présentation De La Maison Etudiée

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.

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

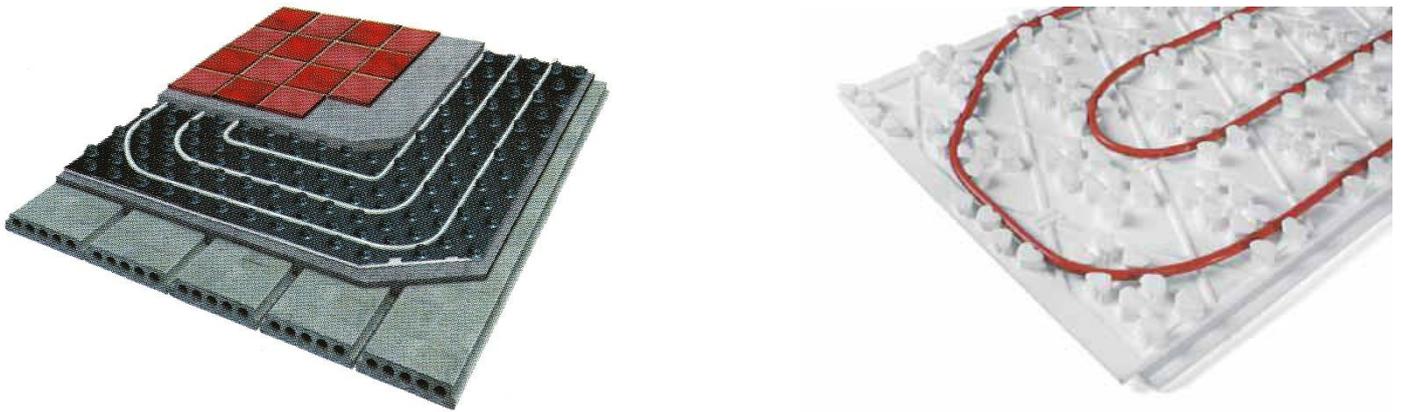


Figure. 2.6. Quelques emplacements des serpentins en *PE-Xc/AL/PE-Xc* [7]

{ 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 machinalement.

Avantage :

Supporte à la température est à l'eau $T_{\max} = 95^{\circ}\text{C}$ 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 été 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

Présentation De La Maison Etudiée

2.4. La distribution du serpentin :

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 du serpentin :

La longueur de la tuyauterie du séjour est de l'ordre de $L_s = 85 \text{ m}$.

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

Pour la chambre 2, elle est estimée de $L_{ch2} = 37 \text{ m}$ environ.

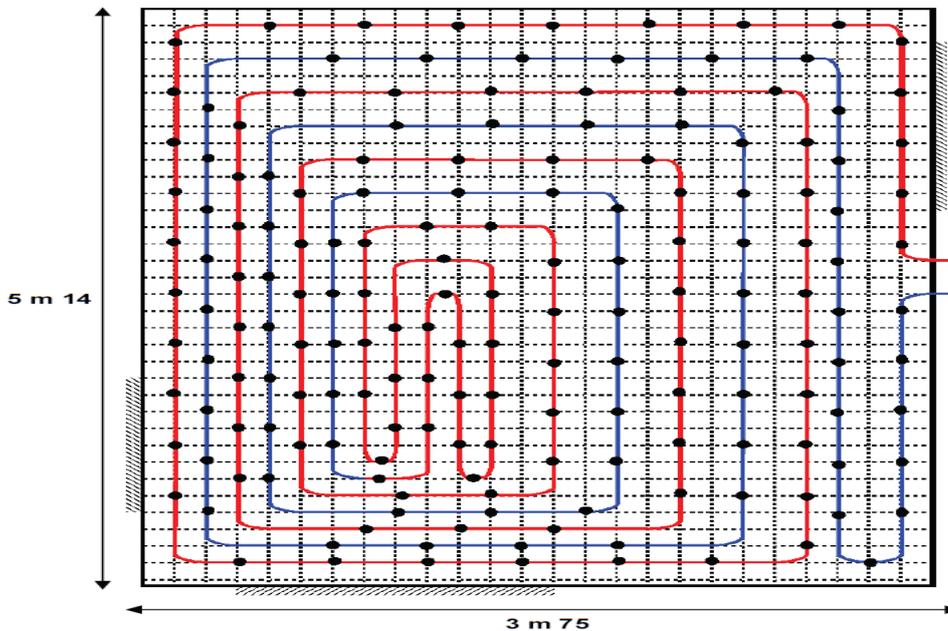


Figure . 2.7 Distribution du serpentin dans le séjour

2.5. L'emplacement du serpentín dans la maison :



Figure. 2.8 Emplacement du serpentín lors de la construction



Figure. 2.9 Isolation des murs extérieurs

Présentation De La Maison Etudiée

2.6 Caractéristiques des matériaux de construction

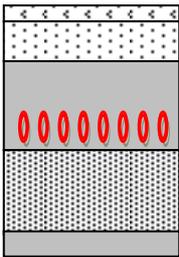
2.6.1 Le plancher haut :

Table 2.1. Caractéristiques thermo physiques des composants du plancher haut [4]

représentation	Couche	Epaisseur [m]	λ [W/m.°C]	R [m ² .°C/W]
plancher haut	1/he			0.05
	1-polystyrène expansé	0.016	0.046	3.47
	2 – béton lourd	0.2	1.75	0.11
	3 - plâtre	0.05	0.35	0.14
	1/hi			0.11
				Total= 3.88

2.6.2 Le plancher bas sur terre pleine

Table 2.2. Caractéristiques thermo-physiques des composants du plancher bas.[4]

représentation	Couche	Epaisseur [m]	λ [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

Présentation De La Maison Etudiée

	carrelage	0.02	1.7	0.01
	1/hi			Total =1.914

2.6.3 Les murs extérieurs :



Figure. 2.10. Le mur externe

Table 2. 3 Caractéristiques thermo-physiques des composants de mur.[4]

Représentation	Composant	Epaisseur [m]	λ [W/(m.k)]	$R=e/\lambda$ [$m^2.K/W$]
		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		
				Total=2.67

Présentation De La Maison Etudiée

2.6.4 Les murs internes :



Figure. 2.11. Mur interne (Un panneau de BTS)

2.7 Consommation énergétique de l'habitat :

Dans ce qui suit un tableau de comparaison entre la consommation énergétique d'une habitation classique et la maison étudiée

Tableau 2.4 Comparaison de la consommation énergétique avec une habitation classique[6]

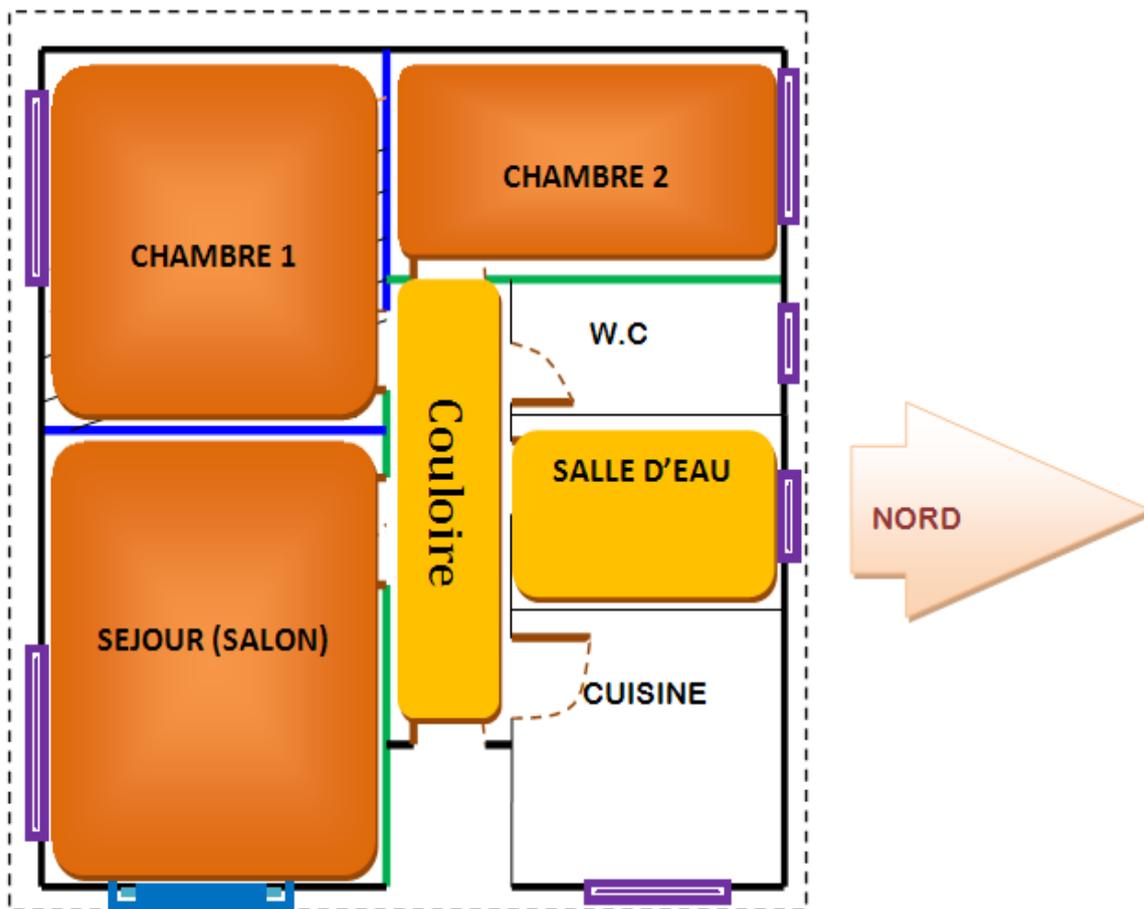
Mois	Consommation énergétique du PP (KWh)	Consommation énergétique (habitation classique) (KWh)
JANVIER	1210	2467
FEVRIER	560	2030
MARS	116	1802
AVRIL	85	1320
MAIS	96	800
JUN	98.5	695
JUILLET	101	1264
AOUT	101	1132
SEPTEMBRE	98.5	755
OCTOBRE	85	664

Présentation De La Maison Etudiée

NOVEMBRE	145	1483
DECEMBRE	783	2058
TOTAL(KWh)	3478	16470

2.8 Les locaux chauffés

les locaux chauffés sont le séjour et les chambres (*chambre1, chambre2*).



- Mur extérieur.
- Mur intérieur.
- Fenêtre.
- Porte fenêtre.
- Porte.

Présentation De La Maison Etudiée

Figure 2.12. Les locaux chauffés.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différents matériaux utilisés dans la construction dans ce model, ce dernier peut être un model référentiel dans le développement architecturale vue sa consommation énergétique.

3.1 Introduction

Nombres de problématiques industrielles exigent des techniques de simulation innovantes. Depuis les années 70, la simulation numérique est un des moteurs de l'innovation scientifique et industrielle. Une meilleure appréhension des phénomènes physiques et leur prise en compte en amont du processus de définition des produits ont abouti à l'amélioration des performances de la durée de vie et des coûts de possession.

Depuis 1998, COMSOL répond à ces attentes en apportant une solution innovante et pluridisciplinaire. Elle combine puissance et souplesse pour simuler des applications impliquant une ou plusieurs phénomènes physiques.

3.2 Description du logiciel

COMSOL Multi Physique (ex : FEMLAB) est un logiciel d'analyse et solveur par éléments finis, qui a diverses applications en physique et en génie, en particulier les phénomènes couplés, ou multiphasiques. COMSOL Multi Physique offre aussi une vaste et bonne gérance d'interface MATLAB et ses boîtes à outils pour une grande variété de programmation et de post procédures possible. Une interface similaire est offerte par COMSOL Script
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

3.3 Procédure de simulation

Les étapes essentielles de conception d'un modèle en utilisant COMSOL Multi Physiques 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

3.4 Présentation générale du logiciel

Lancez le logiciel en double-cliquant sur l'icône *COMSOL Multiphysics*.



Figure 3.5 : affichage au démarrage

3.4.1 Choix du modèle :

Nous allons commencer par l'étude du champ de température . Lancez donc le module transfert de chaleur dans le navigateur de modèle. Nous allons ici nous limiter à une étude à 2 dimensions.

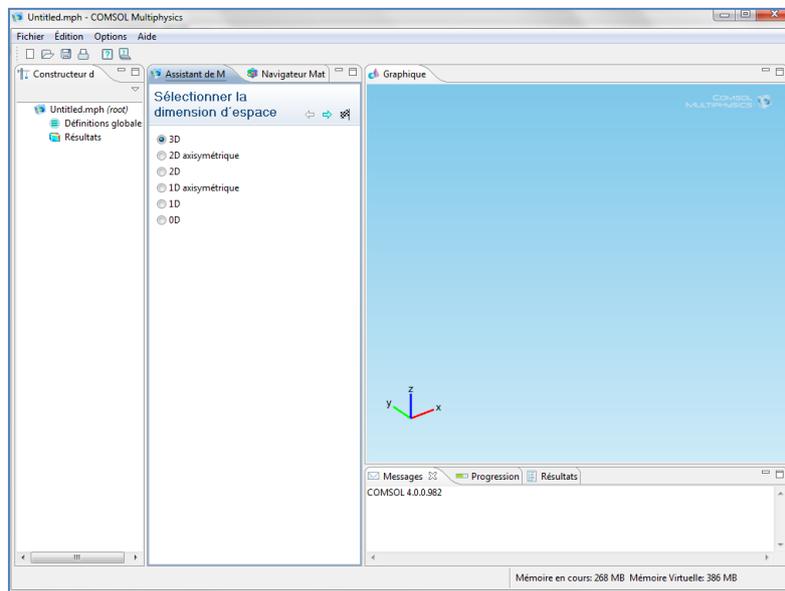


Figure 3.6 : pour sélectionner les dimensions d'espace

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

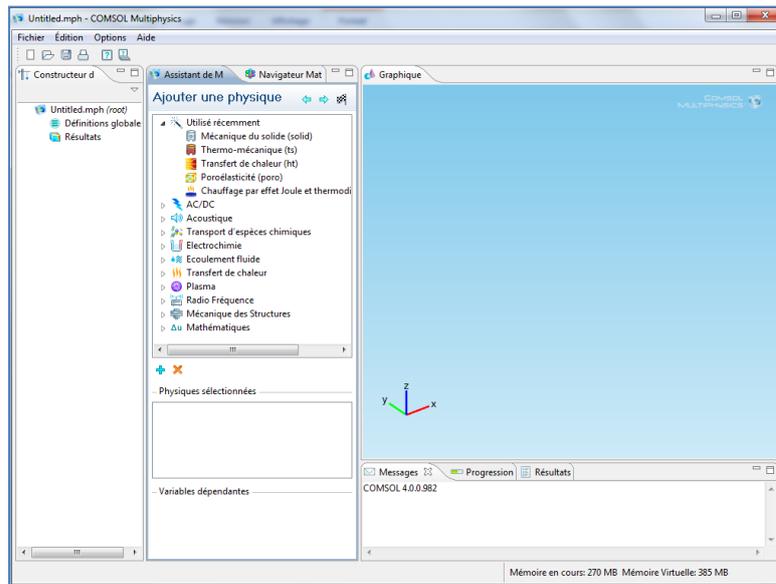


Figure 3-7 : pour ajouter une physique

3.4.2 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.

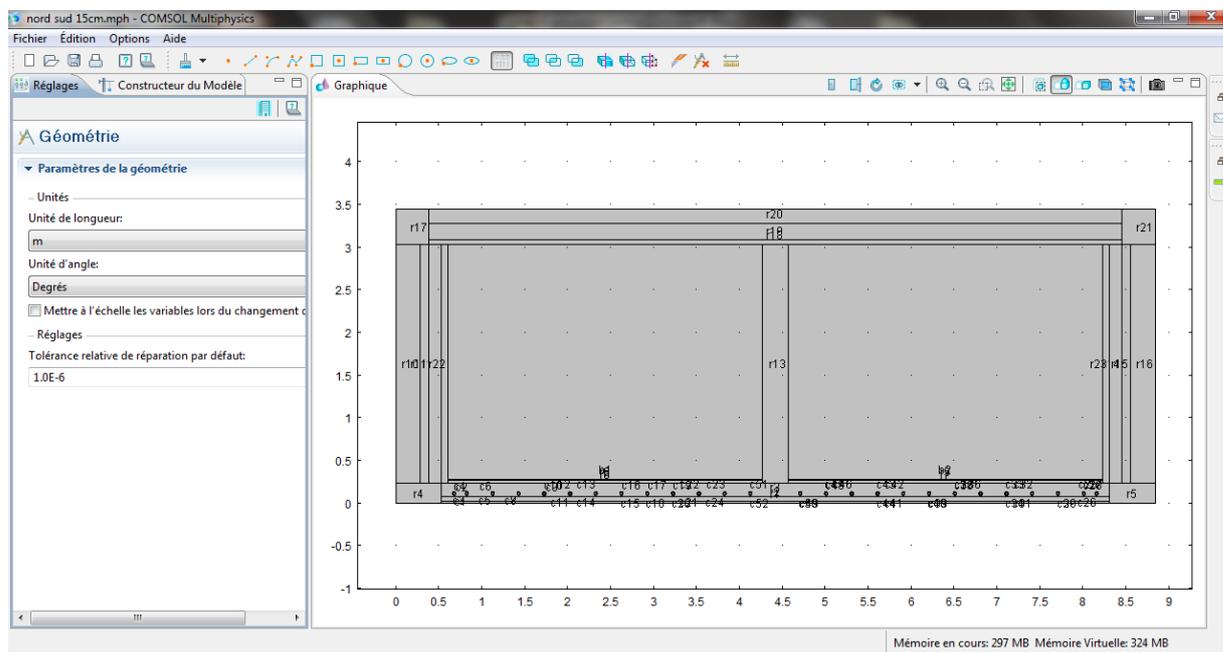


Figure 3.8 : la géométrie :coupe de la maison

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.

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

3.4.3 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

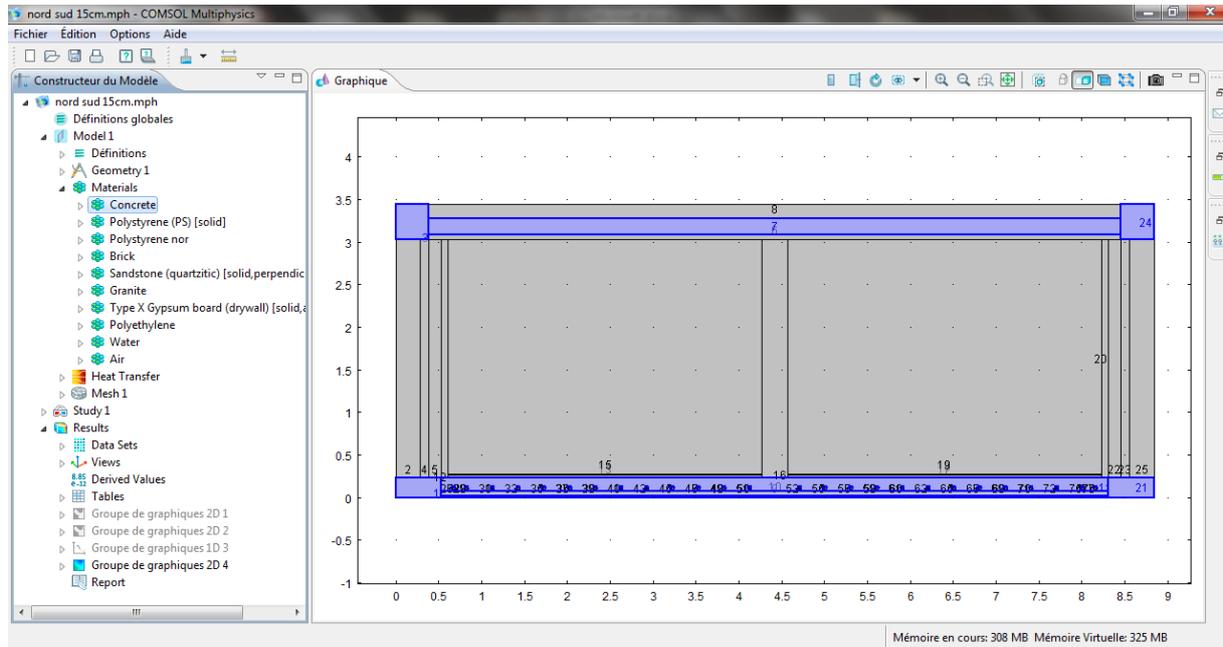


Figure 3-5 : Choix des matériaux

3.4.4 Conditions aux limites

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes. A chaque frontière 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 frontière intérieure au système.

Choisissez de manière pertinente les différentes conditions aux limites. Vous pourrez les changer plus tard, de manière à voir leur influence.

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

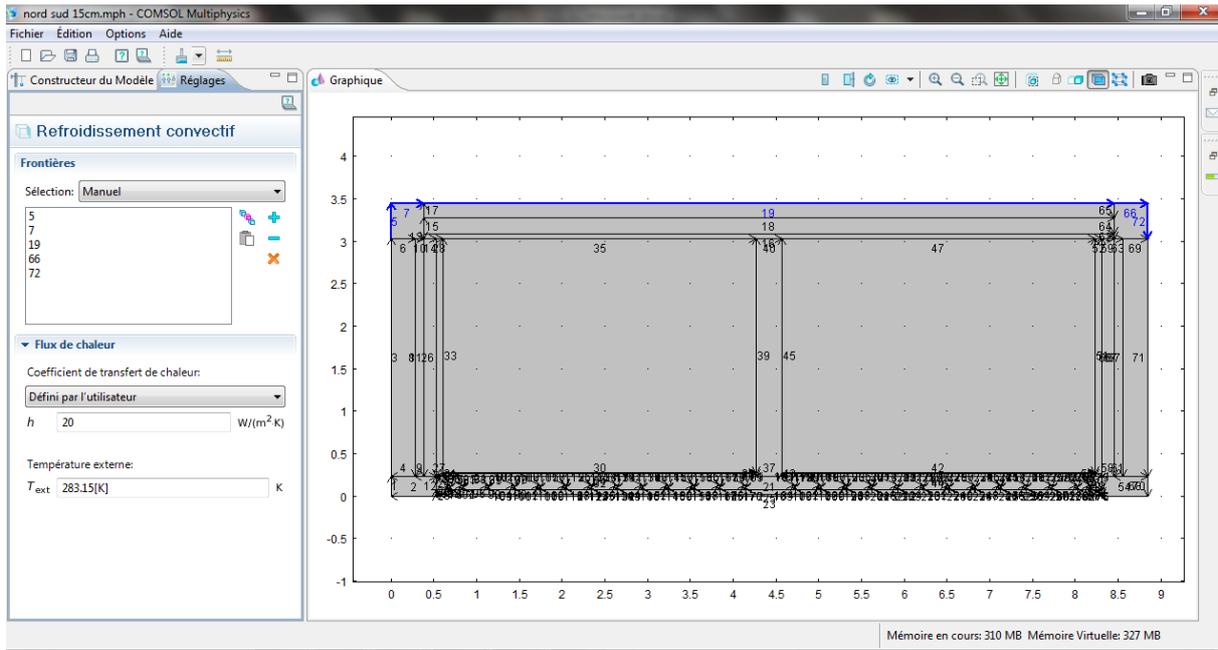


Figure 3.6 : Introduction des conditions aux limites

3.4.5 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

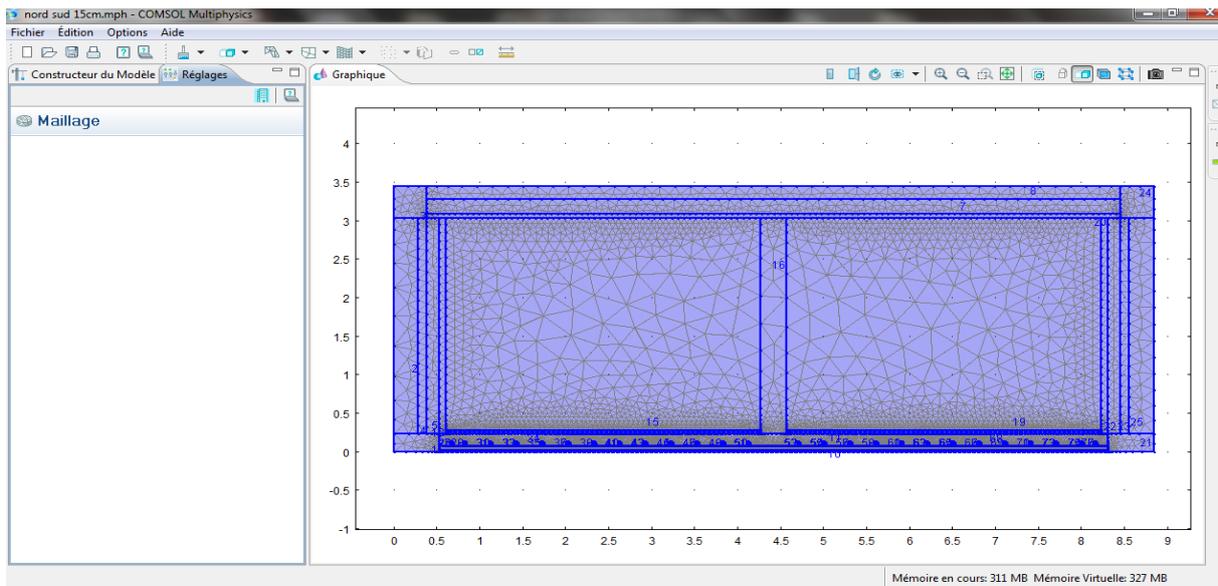


Figure 3-7 : Procède de maillage

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

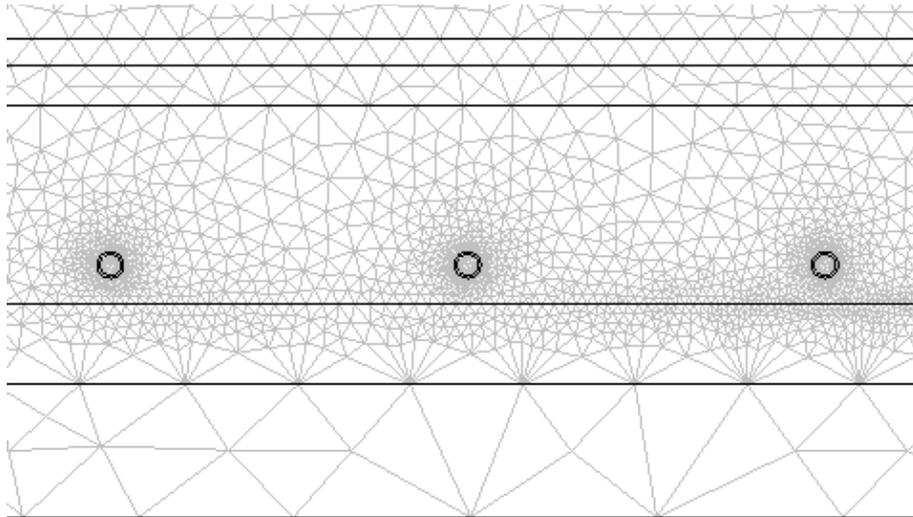


Figure 3.8 : maillage des nœuds

3.4.6 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, ...).

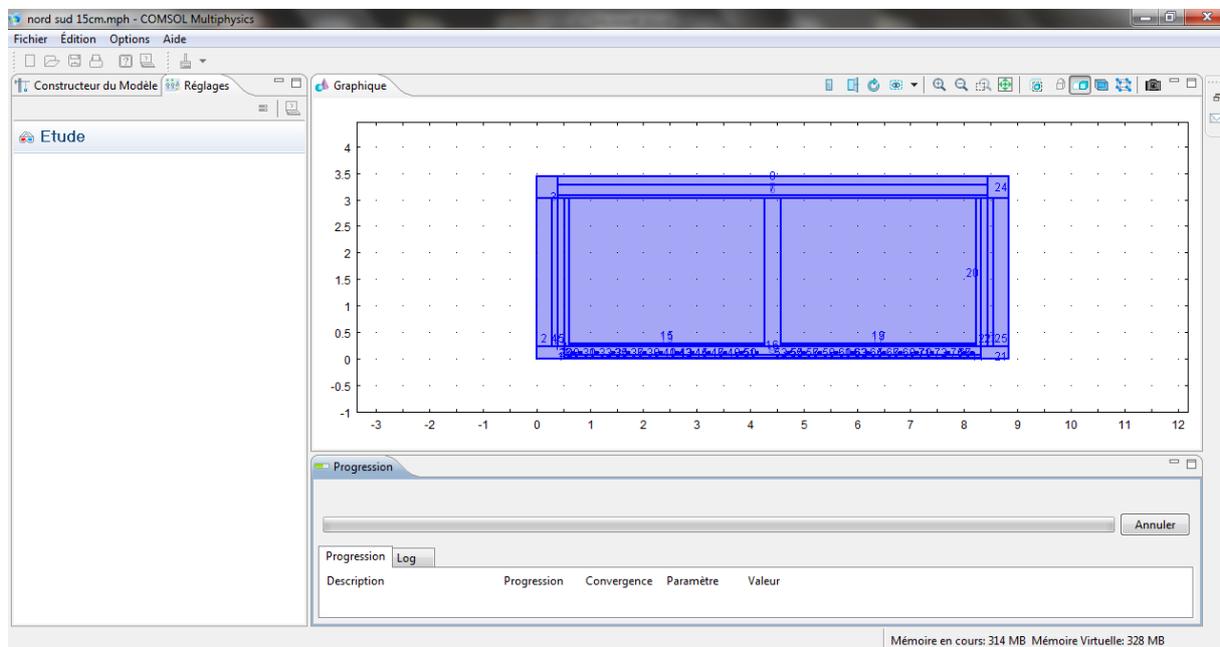


Figure 3.9 Résolution du problème

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

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

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.

3.4.7 Postprocessing : 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.

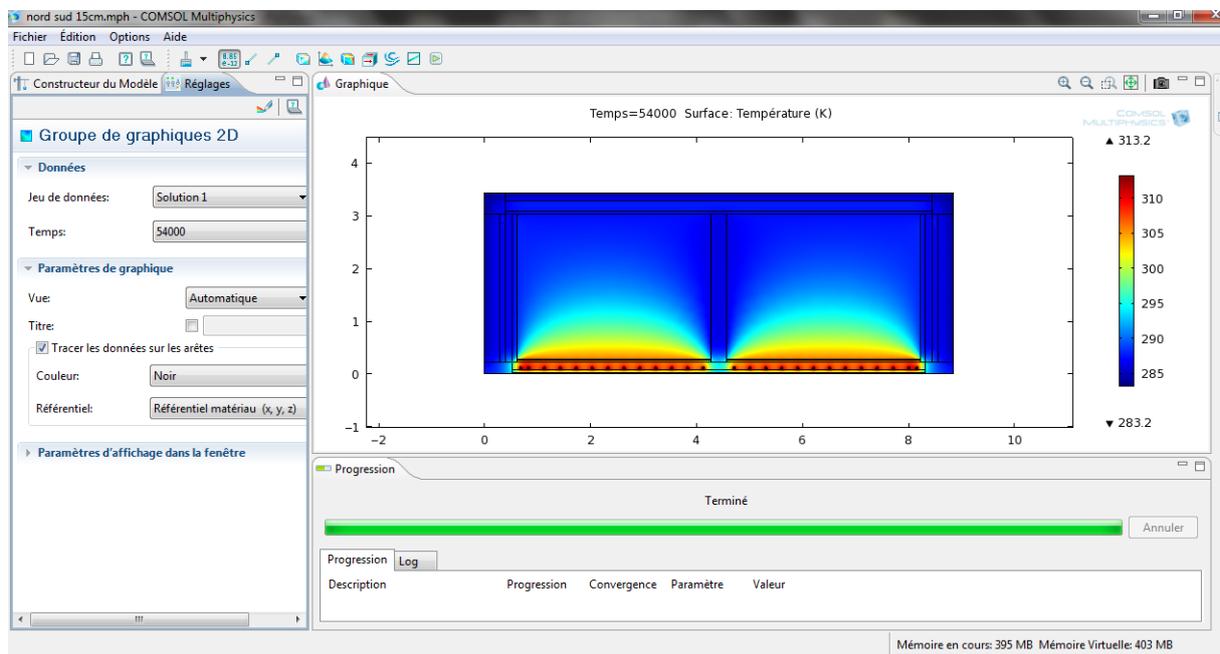


Figure 3. 10 Résultat final

3.5 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 (2^{ème} loi de Newton) et de l'énergie (1^{er} principe de la thermodynamique).

3.5.1 Généralité :

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

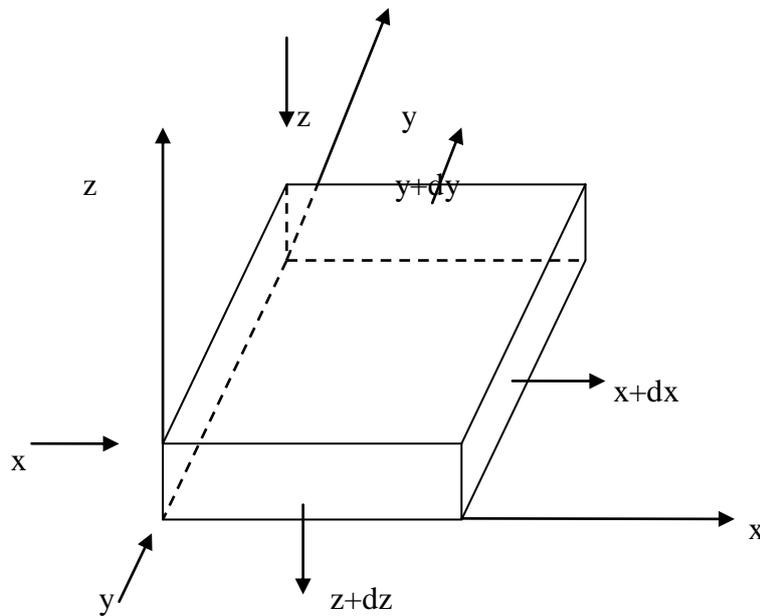


Figure 3.11. Variation du flux dans un volume de contrôle.

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 :

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

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

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

Le flux net par diffusion est alors :

$$J_{\text{sortie}} - J_{\text{entrée}} = \left(\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right) dx \, dy \, dz = (\text{div } \vec{J}) \, dv \quad (3-1)$$

3.5.2. Equation de conservation de masse :

Soit m_l 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 :

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

$(\rho U_x m_l dy dz)$	suivant x
$(\rho U_y m_l dx dz)$	suivant y
$(\rho U_z m_l dx dy)$	suivant z

- Les flux sortants par convection sont :

$(\rho U_x m_l) dy dz + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x m_l) dx dy dz$	suivant x
$(\rho U_y m_l) dx dz + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y m_l) dx dy dz$	suivant y
$(\rho U_z m_l) dx dy + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z m_l) dx dy dz$	suivant z

Si R_l est la production par unité de volume et $\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_l) dx dy dz$ 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 :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_l) = R_l - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x m_l) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y m_l) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z m_l) \right] - \left[\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right] \quad (3-2)$$

Ainsi :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_l) = R_l - \text{div}(\rho \vec{U} m_l) - \text{div}(\vec{J}) \quad (3-3)$$

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* ;

$$\vec{J} = -\tau \overrightarrow{\text{grad}} m_l \quad (3-4)$$

Où τ : coefficient de diffusion

L'équation (3-3) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_l) + \text{div}(\rho \vec{U} m_l) = R_l + \text{div}(\tau \overrightarrow{\text{grad}} m_l) \quad (3-5)$$

Cette dernière équation traduit la conservation de masse.

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

3.5.3. Equation de conservation de l'Energie :

Soit h l'enthalpie massique et R la production d'énergie par unité de temps et de volume. En se référant à l'équation (3-3), l'équation de l'énergie s'écrit comme :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) = R - \text{div}(\vec{j}) - \text{div}(\rho \vec{U} h) \quad (3-6)$$

Ou encore :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \text{div}(\rho \vec{U} h) = R - \text{div}(\vec{j}) \quad (3-7)$$

Où $h = c_p T$

D'après la loi de **FOURIER**, la densité de flux J est donné par :

$$\vec{j} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$$

L'équation (3-7) devient alors :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \text{div}(\rho \vec{U} c_p T) = R + \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \quad (3-8)$$

L'équation (3-8) traduit la conservation de l'énergie.

3.5.4. Equation 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 :

- $(\rho U_x) U_x dy dz$ suivant x
- $(\rho U_x) U_y dx dz$ suivant y
- $(\rho U_x) U_z dx dy$ suivant z

✓ Les flux sortants sont :

- $(\rho U_x) U_x dy dz + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_x) dx dy dz$ suivant x
- $(\rho U_x) U_y dx dz + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_x U_y) dx dy dz$ suivant y
- $(\rho U_x) U_z dx dy + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_x U_z) dx dy dz$ suivant z

En s'aidant des équations (3-3) et (3-7), la conservation de quantité de mouvement suivant x s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_x) + \text{div}(\rho U_x \vec{U}) = -\text{div}(\vec{j}) + S \quad (3-9)$$

Où S est le terme source

Et $\vec{j} = -\mu \overrightarrow{\text{grad}} \rho U_x$

pour un fluide Newtonien.

Présentation Du Logiciel et Les Equations De Conservation

L'équation (3-8) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Ux) + \text{div} (\rho Ux \vec{U}) = S + \text{div} (\mu \overrightarrow{\text{grad}} \rho Ux) \quad (3-10)$$

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

3.6. Equation générale :

Les équations (3-5), (3-8) et (3-10) 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 Φ est une quantité physique quelconque, alors l'équation de conservation de Φ s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Phi) + \text{div} (\rho \vec{U} \Phi) = \text{div} (\tau \overrightarrow{\text{grad}} \Phi) + S \quad (3-11)$$

Où Φ 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 (3-11) devient :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho \vec{U}) = 0 \quad \text{qui représente l'équation de la continuité.}$$

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différentes étapes suivies lors d'une simulation d'une maison solaire avec le logiciel *Comsol Multiphysics*®, et un petit rappel sur les équations de conservation qui forment la règle de base qui régit les phénomènes physiques

Etude paramétrique

4.1 Introduction

Dans ce chapitre on a choisit deux paramètres pour étudier leur influence sur le comportement d'une maison munie d'un système de chauffage solaire et essayer de connaitre les meilleurs conditions qui donnent un confort à l'intérieur de la maison ,les paramètres étudiés sont :

- Epaisseur de la dalle de compression : on va varier l'épaisseur de dalle de 15 cm jusqu'au 27 cm avec un pas de 3 cm et une température du fluide caloporteur fixe et qui vaut $T=40^{\circ}\text{C}$
- Matériaux de constructions des murs

4.2 Le problème étudié

Pour simplifier le problème on a fait une étude en bidimensionnelle pour cela on a fait deux coupes suivants différents axes :

- ✚ Axe nord sud qui regroupe les deux chambres
- ✚ Axe est ouest qui regroupe le séjour et la chambre 1

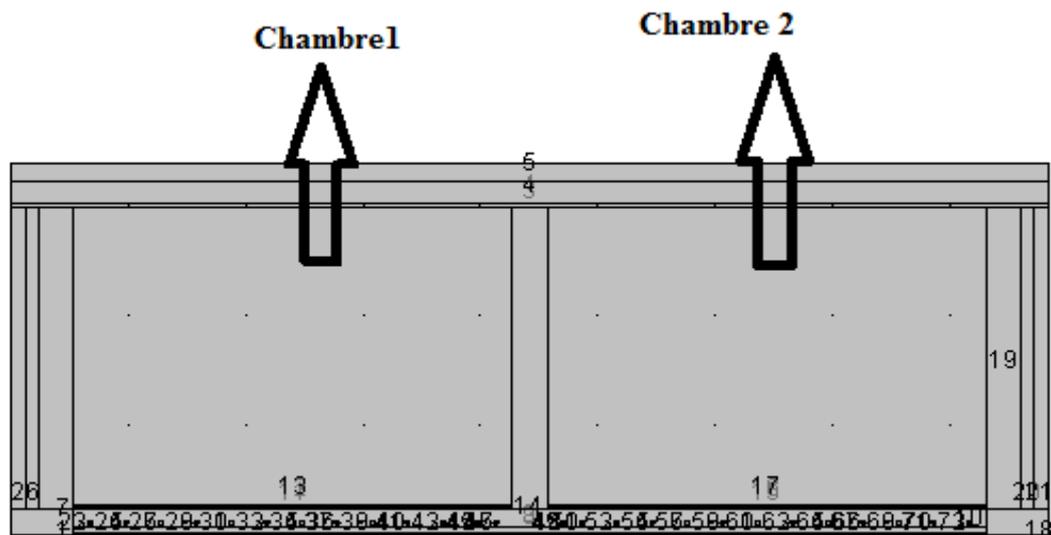


Figure 4.1 Coupe 1 nord sud

Etude paramétrique

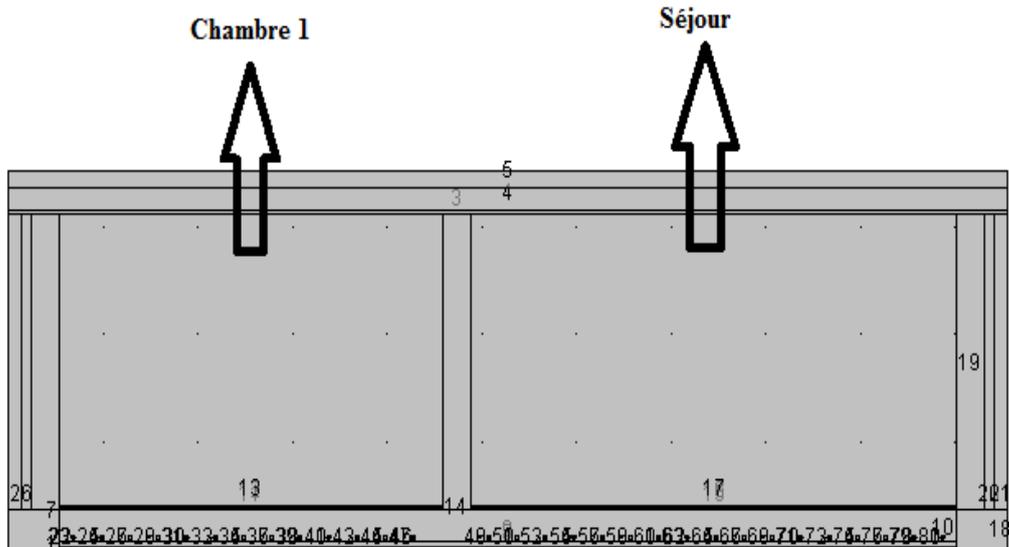


Figure 4 .2 Coupe 2 est ouest

4.2.1 La distance moyenne entre les nœuds

La distance moyenne entre les nœuds est calculée par la façon suivante :

$$\Delta x = \frac{X}{N} . \quad (4-1)$$

X : la longueur de la chambre.

N : nombre de tubes traversés par la coupe (*les nœuds*).

$\frac{\Delta x}{2}$: La distance entre les nœuds extrêmes avec l'extrémité de plancher.

4.2.1.a Calcul de Δx :

Coupe Nord sud :

Chambre 1 :

$$X_1 = 3.74 \text{ m}, \quad N_1 = 14 \text{ nœuds.} \quad \Delta x = 26.71 \text{ cm} \quad , \quad \frac{\Delta x}{2} = 13.37 \text{ cm.}$$

Chambre 2 :

$$X_2 = 3.74 \text{ m}, \quad N_2 = 13 \text{ nœuds} \quad \Delta x = 31.08 \text{ cm} \quad , \quad \frac{\Delta x}{2} = 15.54 \text{ cm.}$$

Etude paramétrique

Coupe Est-Ouest:

Chambre 1 :

$$X_3 = 4.05 \text{ m}, N_3 = 13 \text{ nœuds.} \quad \Delta x = 31.15 \text{ cm}, \quad \frac{\Delta x}{2} = 15.57 \text{ cm.}$$

Séjour :

$$X_4 = 5.14 \text{ m}, N_4 = 17 \text{ nœuds.} \text{ Donc :} \quad \Delta x = 34.26 \text{ cm}, \quad \frac{\Delta x}{2} = 15.33 \text{ cm.}$$

4.2.2. Calcul du coefficient d'échange convectif (h) :

4.2.2.a Convection forcée

On a de la convection forcée dans la tuyautée (*la circulation de l'eau*) ;

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$$P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

$R_e > 2300$ Donc le régime est turbulent.

$$Nu = 0.023 R_e^{0.8} \times P_r^{0.33}$$

$$Nu = \frac{h \times D_i}{\lambda}. \quad \text{Donc : } h = \frac{Nu \times \lambda}{D_i}.$$

La température du fluide caloporteur est posée constante dans tous les nœuds, et vaut $T=40^\circ\text{C}$

Le débit de l'eau est donné expérimentalement $\dot{Q} = 2.5 \text{ l/min}$.

Table 4.1 : Les propriétés thermo-physique de l'eau à $T=40^\circ\text{C}$

Les paramètres /la température	40°C
ρ (kg/m ³)	992
C_p (J/kg.k)	4178
λ (W/m.k)	0.627
$\mu \cdot 10^{-3}$ (Pa.s)	0.653
v (m/s)	0.207
R_e	5031.39
P_r	4.35
Nu	34.18
h (W/m ² .k)	1339.42

Etude paramétrique

4.2.2. b Convection naturelle:

Le coefficient d'échange au niveau des murs est donné par le tableau suivant:

Table 4.2 : Coefficient d'échange convectif avec l'air.

$\frac{1}{h}$ en $m^2.k/W$	<i>Paroi en contact avec :</i> <i>-l'extérieur</i> <i>-un passage ouvert</i> <i>-un local ouvert.</i>			<i>Paroi en contact avec :</i> <i>-un autre local, chauffé ou non</i> <i>chauffé</i> <i>-un comble.</i> <i>-un vide sanitaire.</i>		
	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
<i>Latéral</i> <i>(mur) $\alpha > 60^\circ$</i>	<i>0.11</i>	<i>0.06</i>	<i>0.17</i>	<i>0.11</i>	<i>0.11</i>	<i>0.22</i>
<i>Ascendant</i> <i>(toiture)</i> <i>$\alpha \leq 60^\circ$</i>	<i>0.09</i>	<i>0.05</i>	<i>0.14</i>	<i>0.09</i>	<i>0.09</i>	<i>0.18</i>
<i>Descendant</i> <i>(plancher)</i> <i>$\alpha \leq 60^\circ$</i>	<i>0.17</i>	<i>0.05</i>	<i>0.22</i>	<i>0.17</i>	<i>0.17</i>	<i>0.34</i>

Pour les parois extérieures des murs externes on prend :

$$1/h_e = 0,06 \text{ m}^2.k/W \text{ Donc } h_e = 16,66 \text{ W/ m}^2.k.$$

Pour les parois intérieures des murs :

$$1/h_i = 0,11 \text{ Donc } h_i = 9,09 \text{ W/ m}^2.k.$$

Pour le plancher :

$$1/h_e = 0,17 \text{ Donc } h_e = 5,88 \text{ W/ m}^2.k.$$

Pour la toiture :

$$1/h_e = 0,05 \text{ Donc } h_e = 20 \text{ W/ m}^2.k.$$

On prend la température ambiante à l'extérieur est de $10^\circ C$ et la température initial à l'intérieur et dans tous les matériaux est de $T_{in} = 15^\circ C$.

4.3 Résolution du problème :

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus pour une épaisseur de dalle de compression de 15 cm pendant 20 h avec un pas de temps de 5h

Etude paramétrique

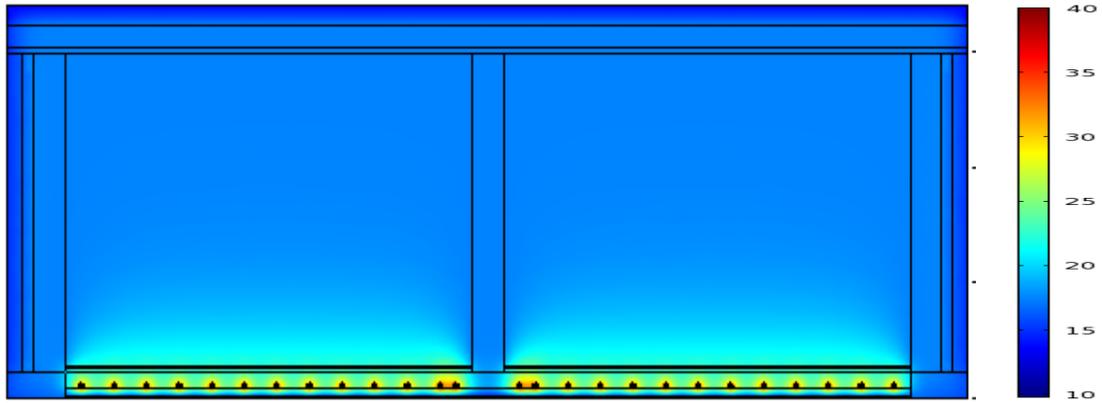


Figure 4.3. Résultat pour un temps de 5h coupe1.

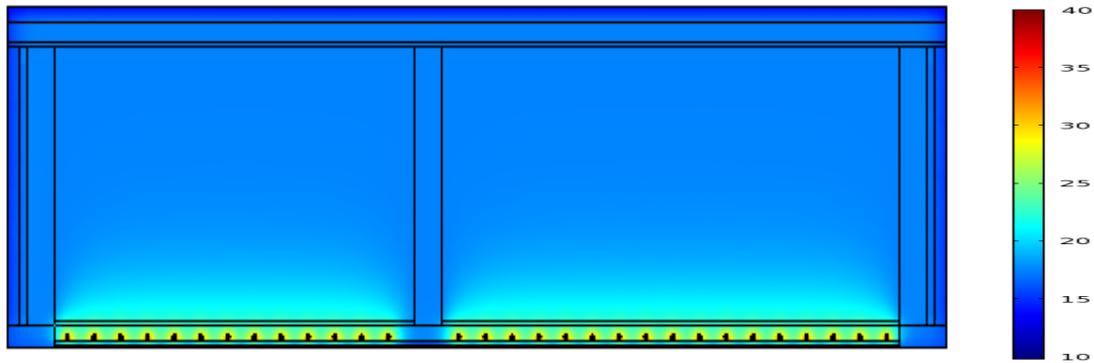


Figure 4.4. Résultat pour un temps de 5h coupe2.

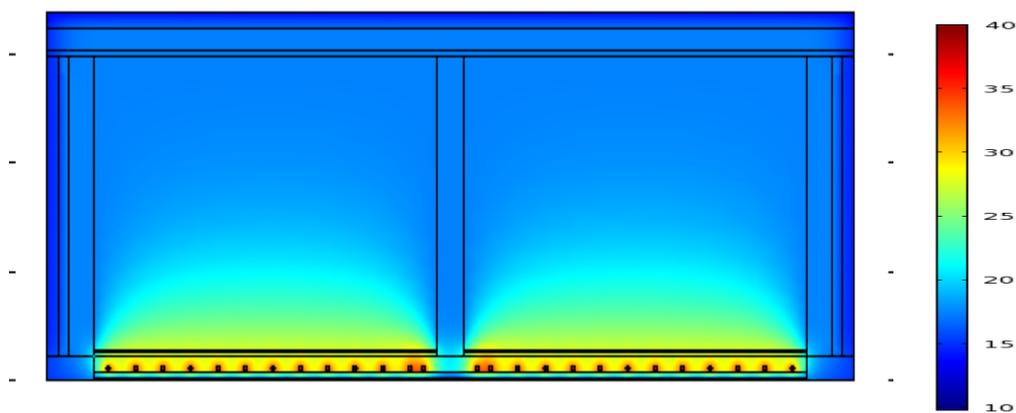


Figure 4.5. Résultat pour un temps de 10h coupe1.

Etude paramétrique

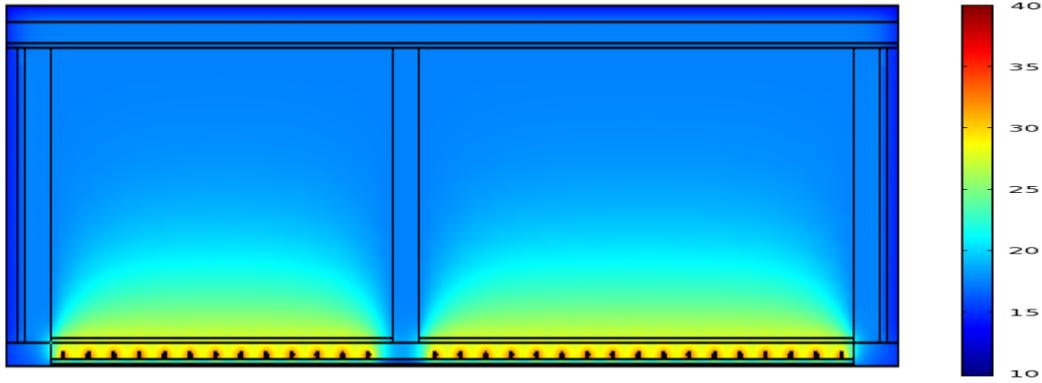


Figure 4.6. Résultat pour un temps de 10h coupe2.

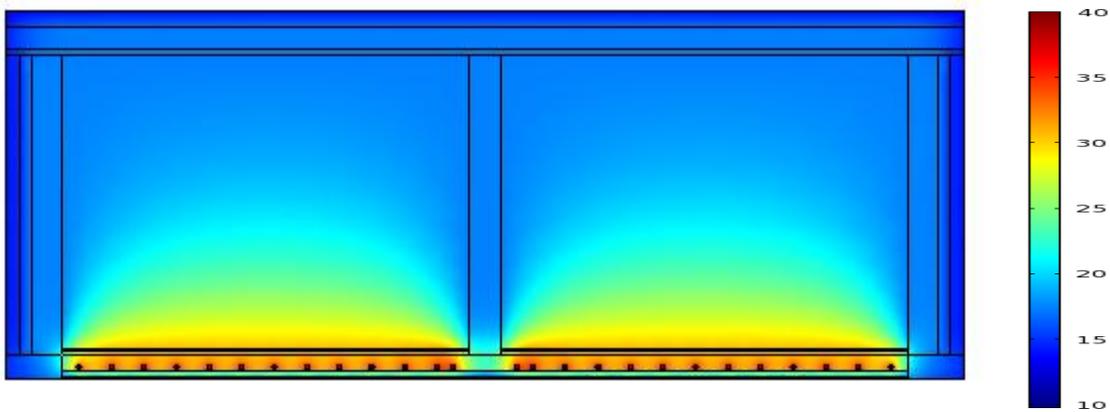


Figure 4.7. Résultat pour un temps de 15h coupe1.

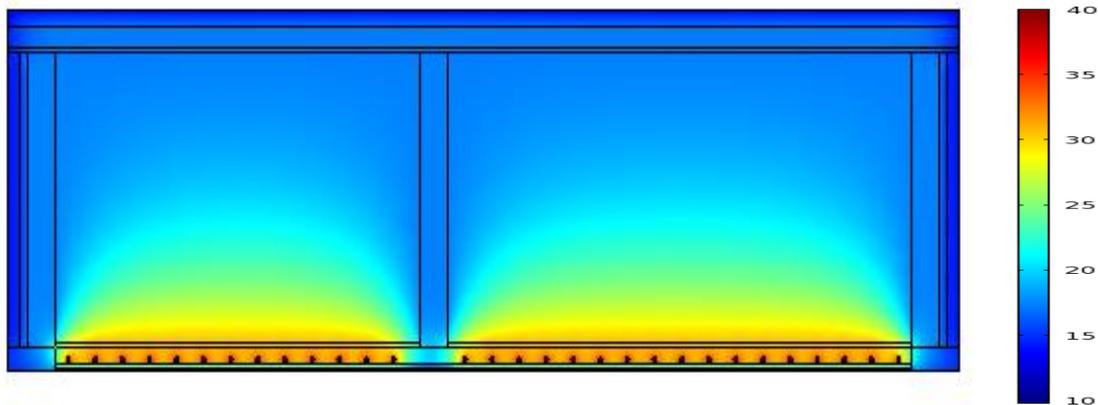


Figure 4.8 Résultat pour un temps de 15h coupe 2

Etude paramétrique

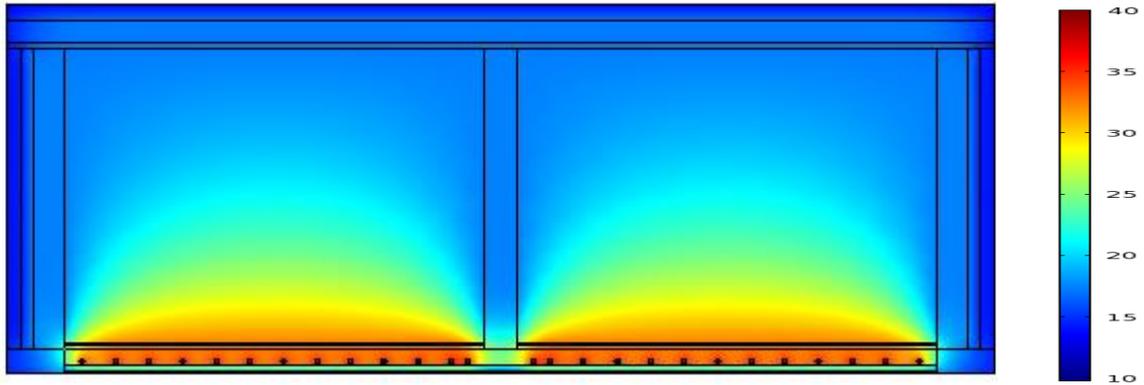


Figure 4.9 Résultat pour un temps de 20h coupe 1

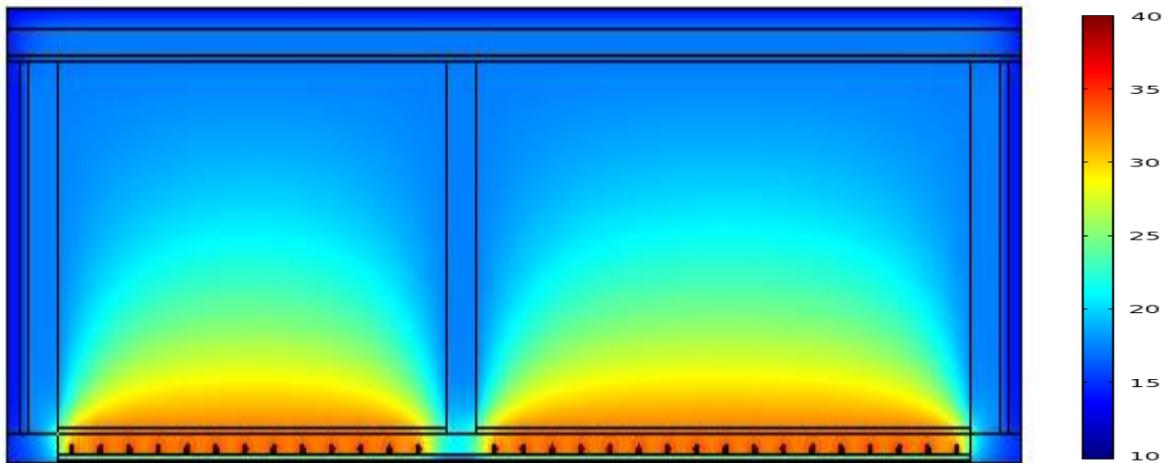


Figure 4.10 Résultat pour un temps de 20h coupe 2

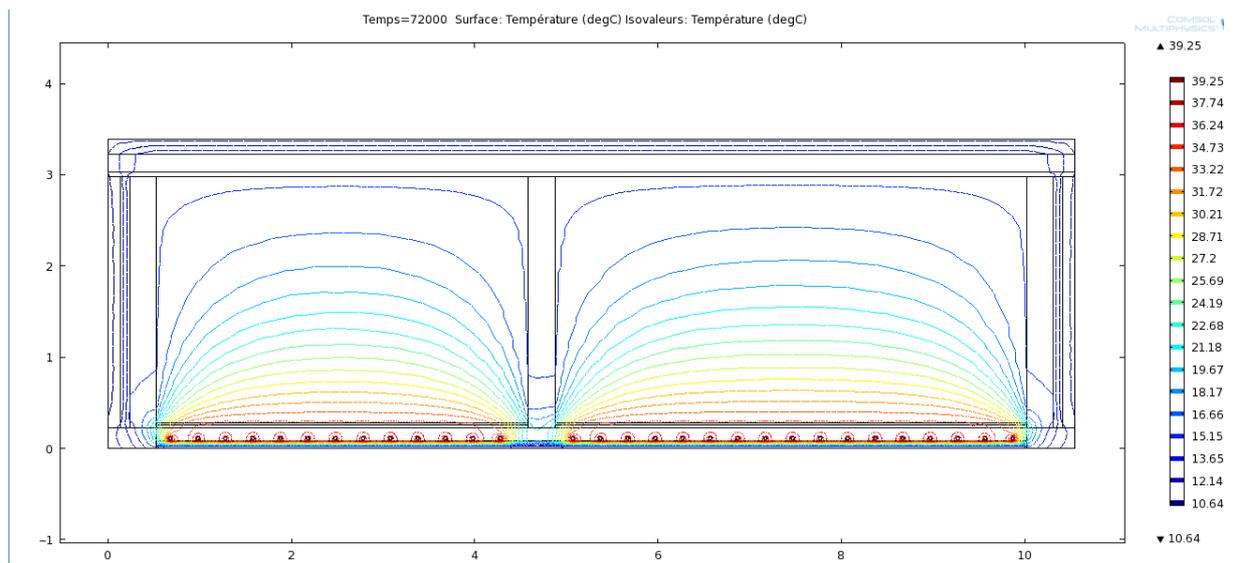


Figure 4.11 Les lignes de températures pour 20h coupe 2

Etude paramétrique

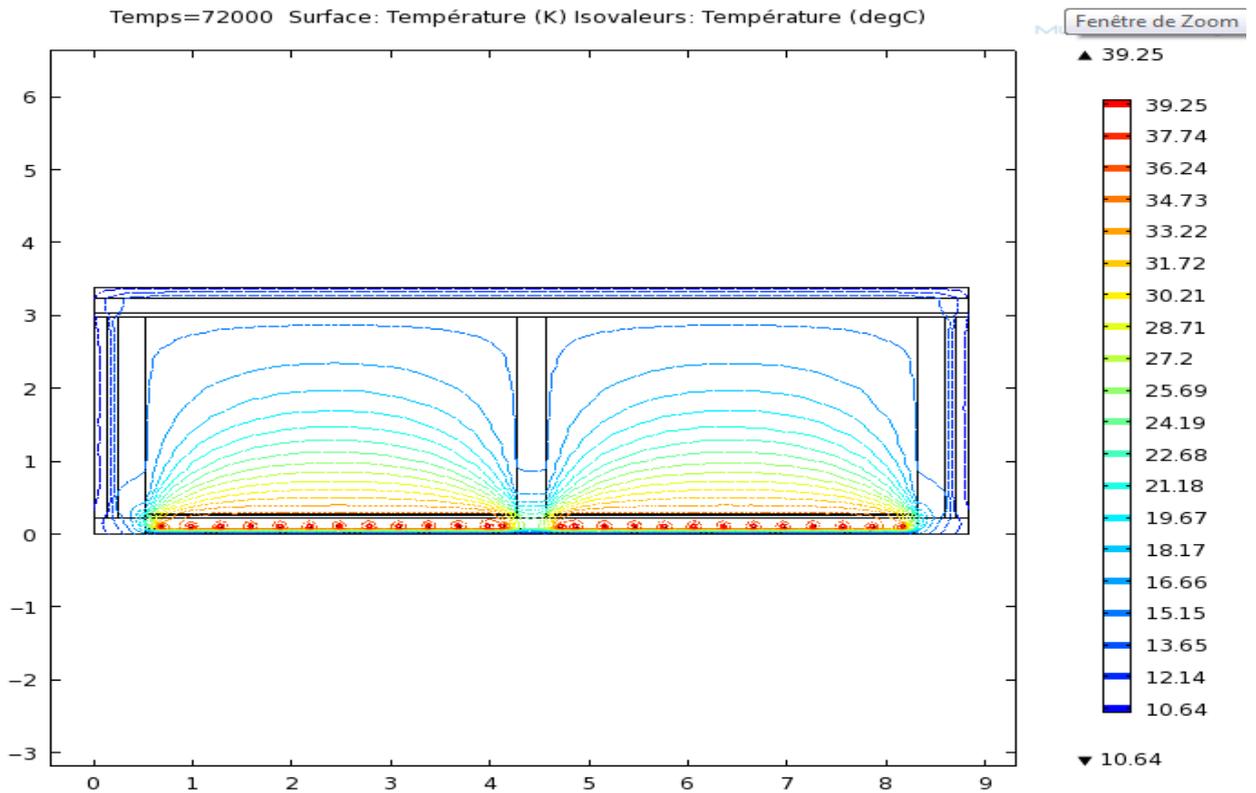


Figure 4.12 Les lignes de températures pour 20h coupe 1

4.4 Résultats

Dans le but de faire une bonne lecture des résultats obtenus on a mis des points de mesure dans différentes positions pour estimer la variation de la température à l'intérieur des locaux chauffés.

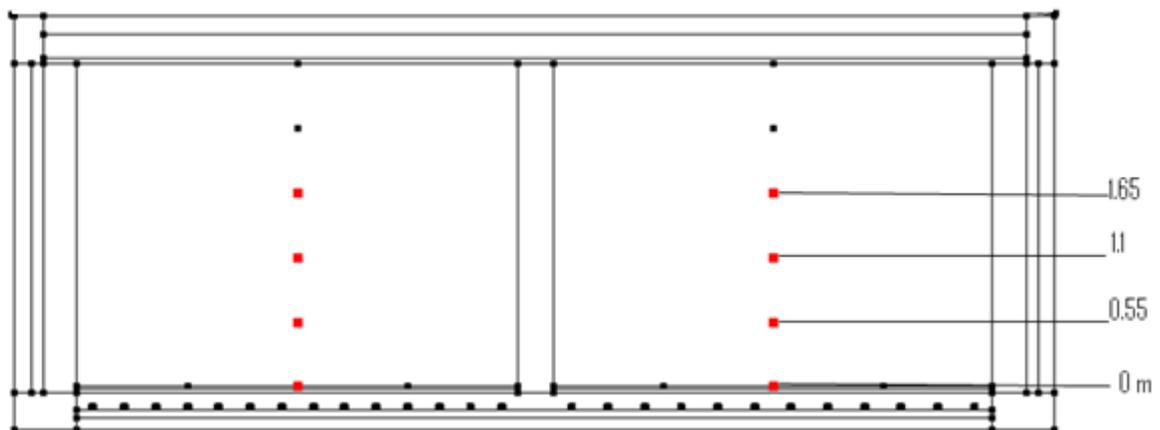


Figure 4.13 Les différentes sondes ponctuelles choisies pour la lecture des résultats coupe 1

Etude paramétrique

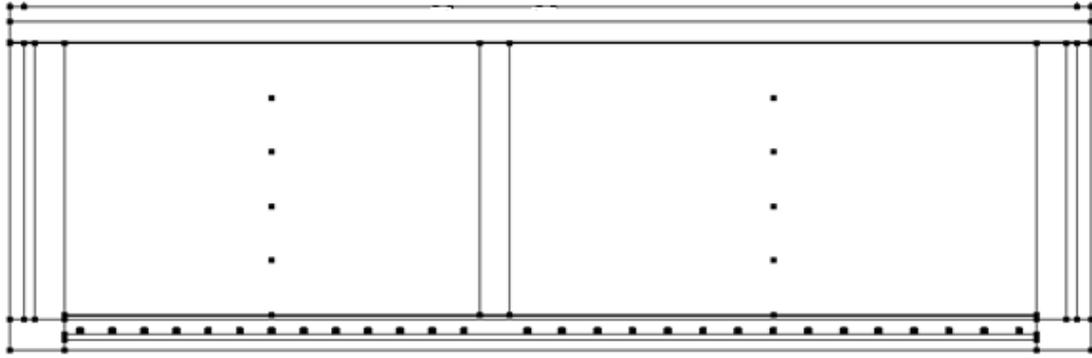


Figure 4.14 Les différentes sondes ponctuelles choisies pour la lecture des résultats coupe 2

4.4.1 Épaisseur de dalle de compression

Coupe 1

CHAMBRE 1

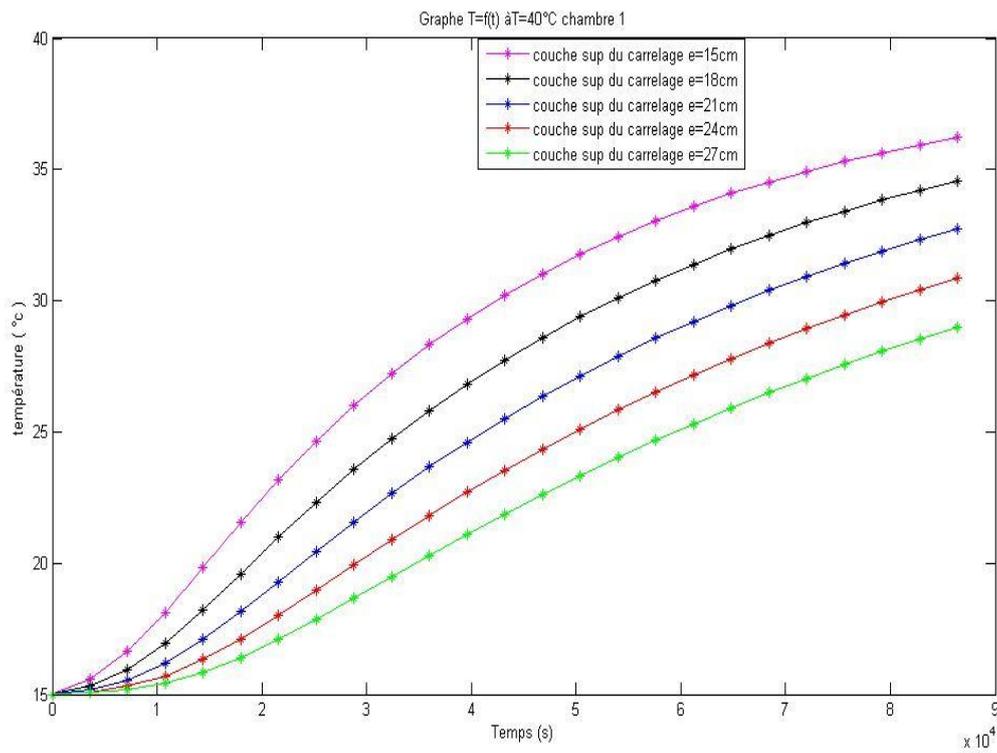


Figure 4.15 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher de la chambre 1(24h)

Etude paramétrique

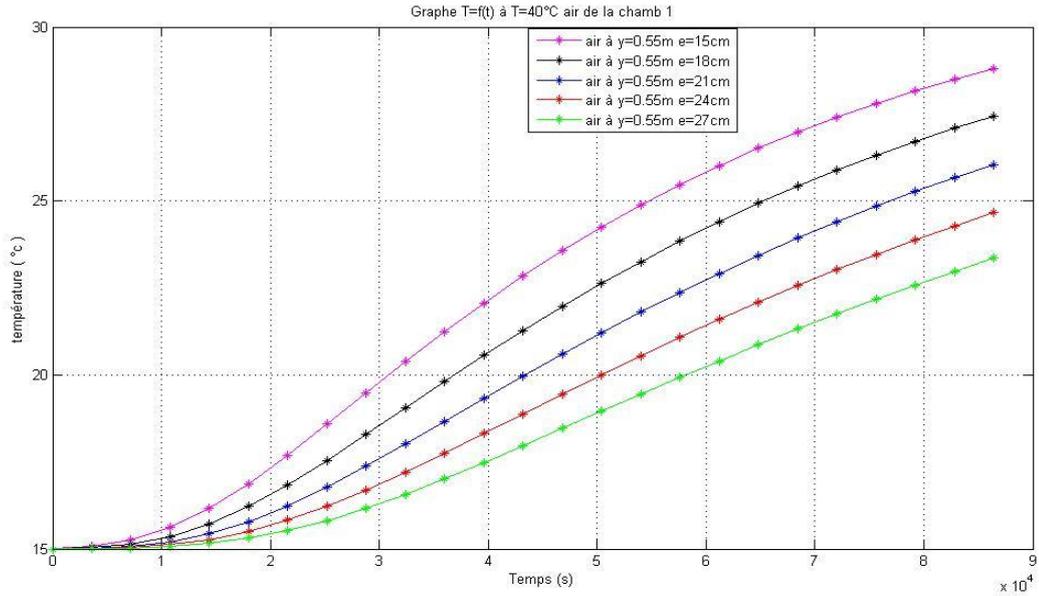


Figure 4.16 Evolution de la température en fonction du temps air 1 de la chambre 1(24h)

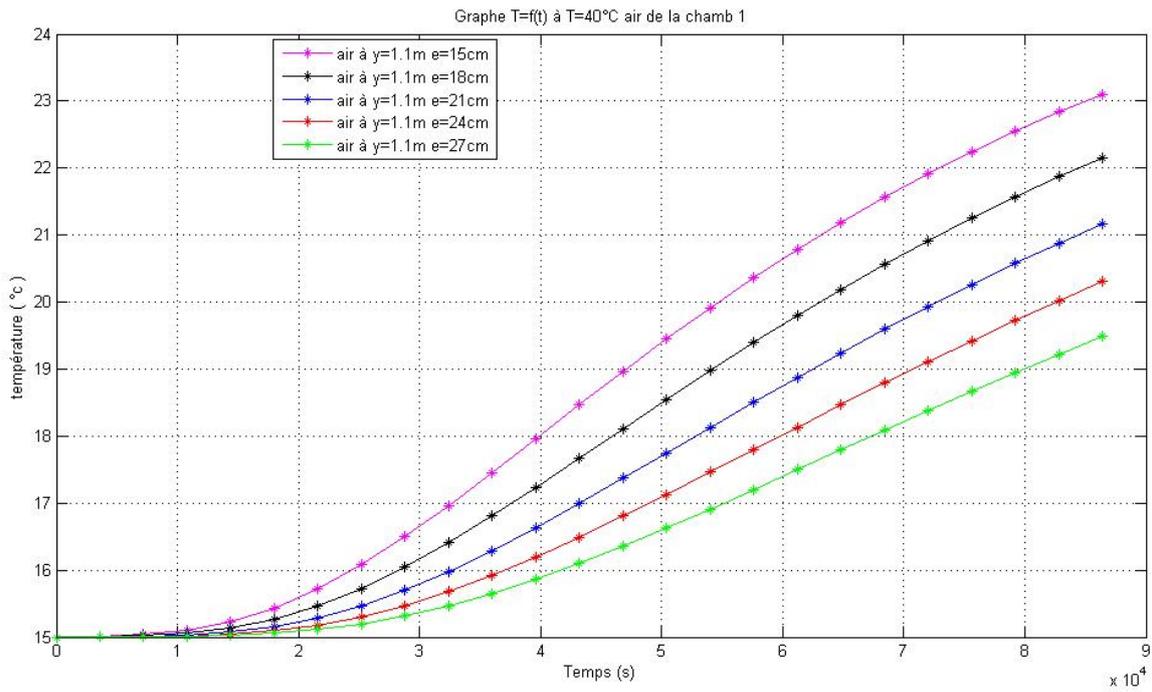


Figure 4.17 Evolution de la température en fonction du temps air 2 de la chambre 1(24h)

Etude paramétrique

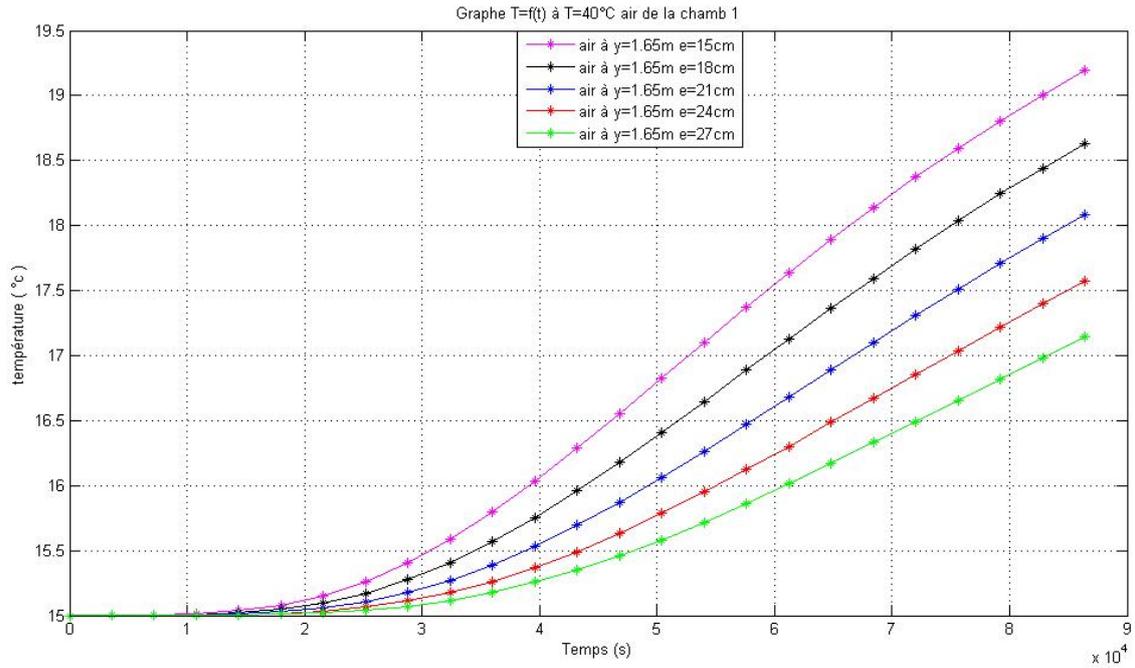


Figure 4.18 Evolution de la température en fonction du temps air 3de la chambre 1(24h)

CHAMBRE 2

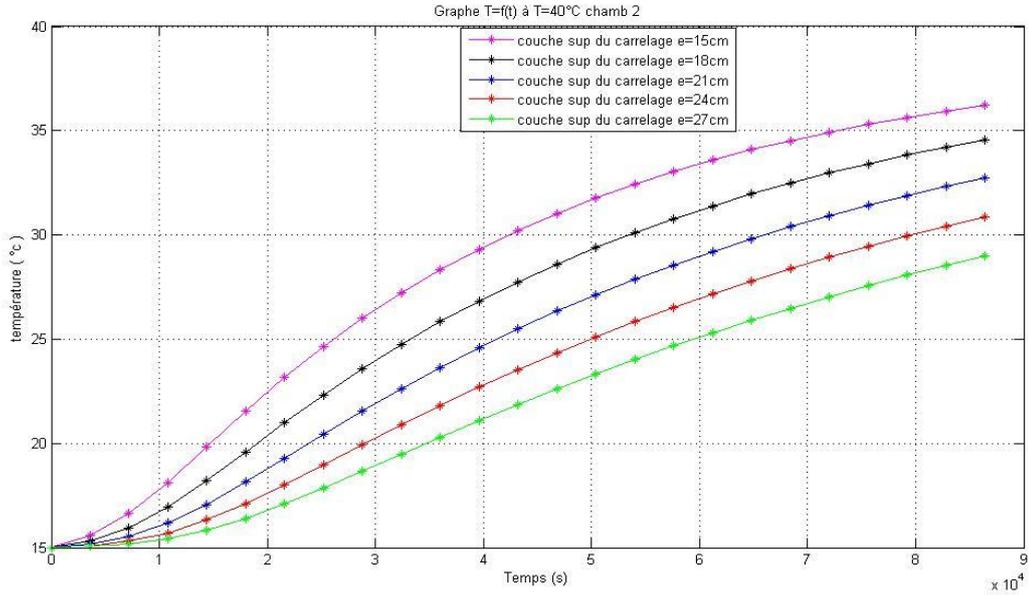


Figure 4.19 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher de la chambre 2(24h)

Etude paramétrique

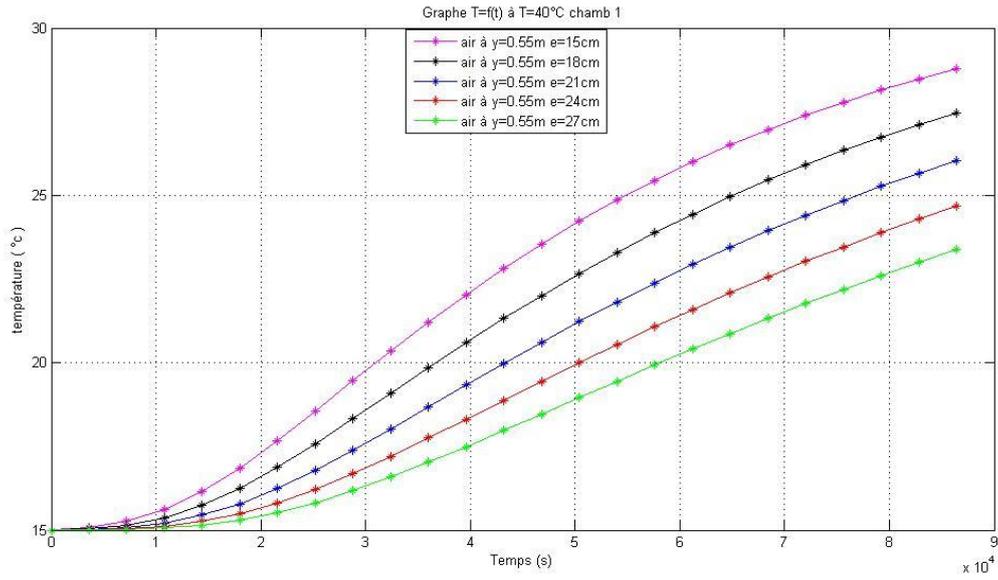


Figure 4.20 Evolution de la température en fonction du temps air1 de la chambre 2(24h)

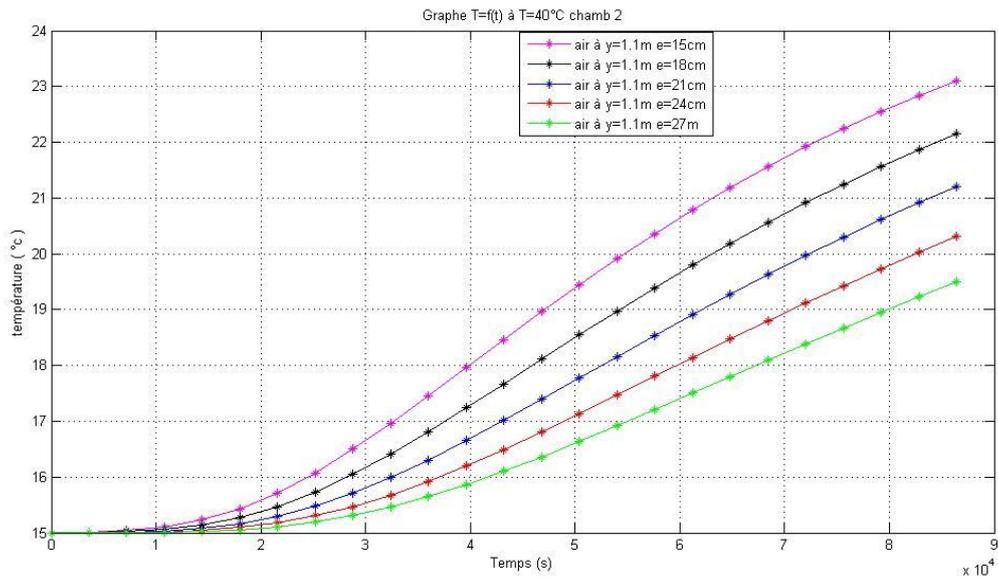


Figure 4.21 Evolution de la température en fonction du temps air2 de la chambre 2 (24h)

Etude paramétrique

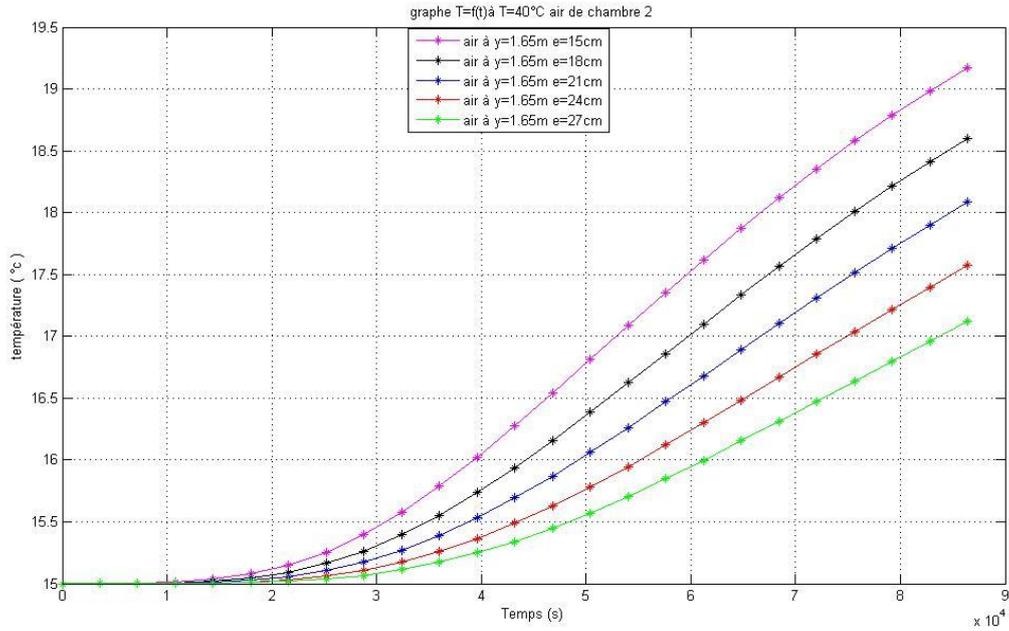


Figure 4.22 Evolution de la température en fonction du temps air 3 de la chambre 2 (24h) coupe 1

Coupe 2

Chambre 1

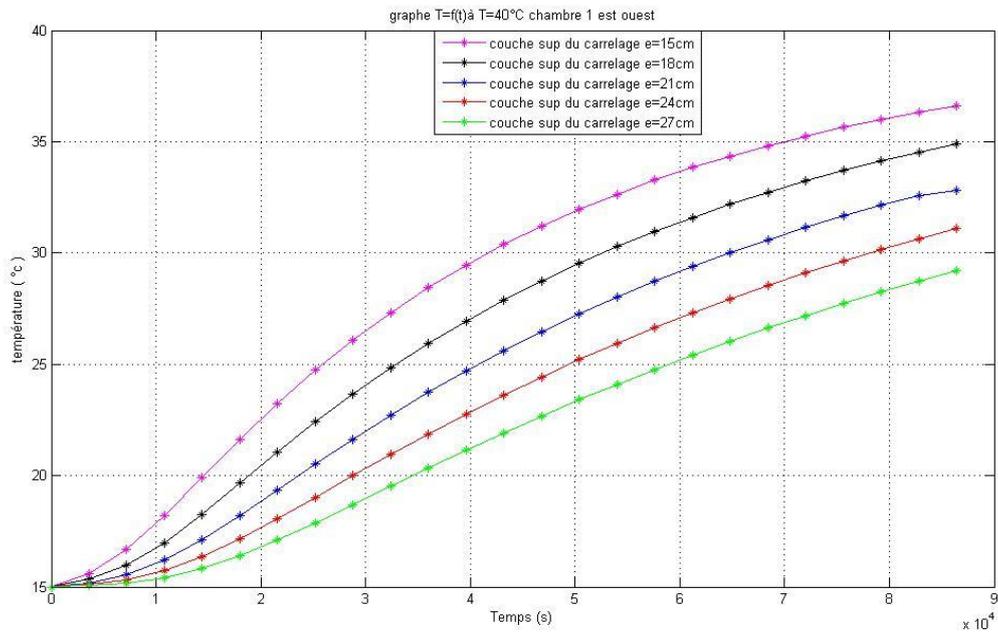


Figure 4.23 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher de la chambre 1 (24h) coupe 2

Etude paramétrique

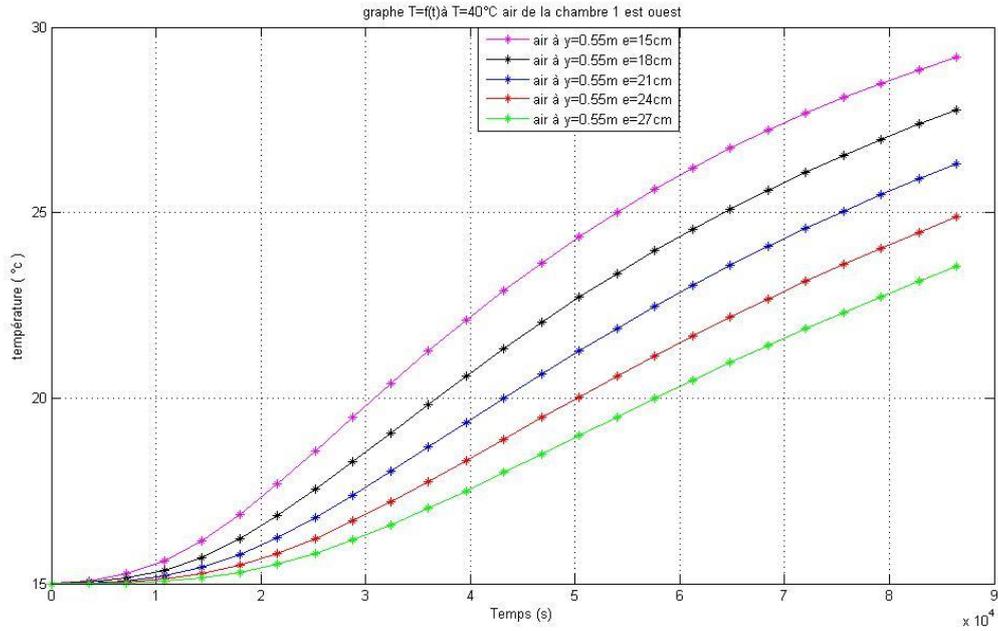


Figure 4.24 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 1 de la chambre 1 (24h) coupe 2

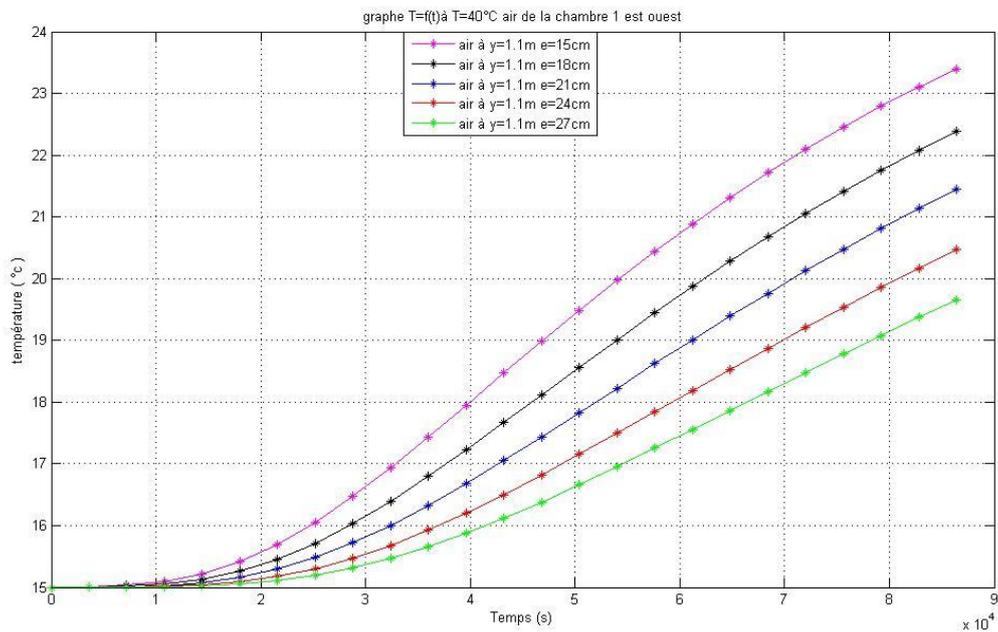


Figure 4.25 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 2 de la chambre 1 (24h) Coupe 2

Etude paramétrique

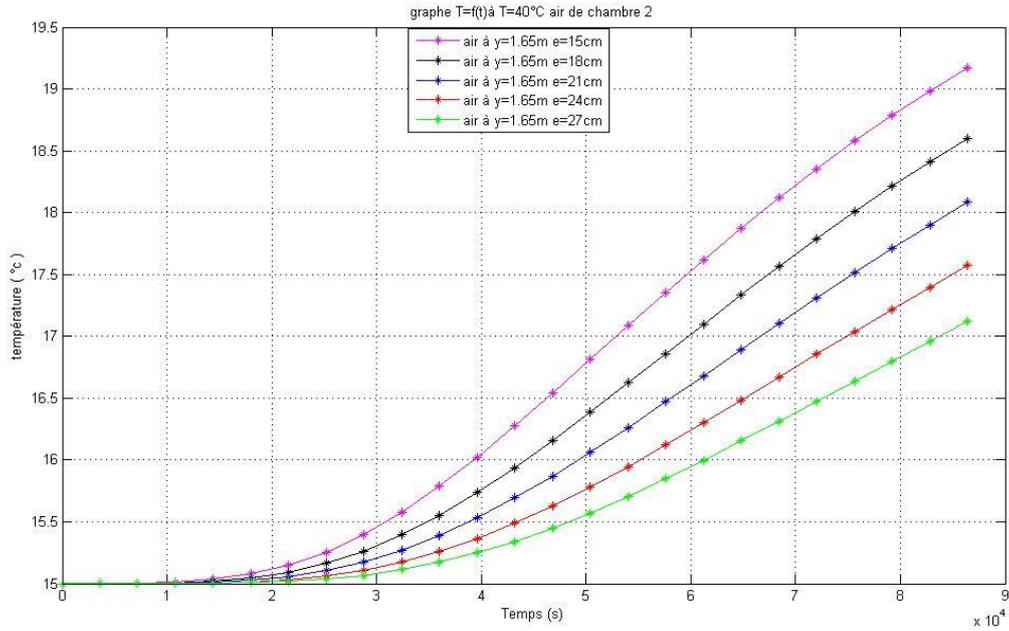


Figure 4.26 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 3de la chambre 1 (24h)

Coupe 2

Séjour

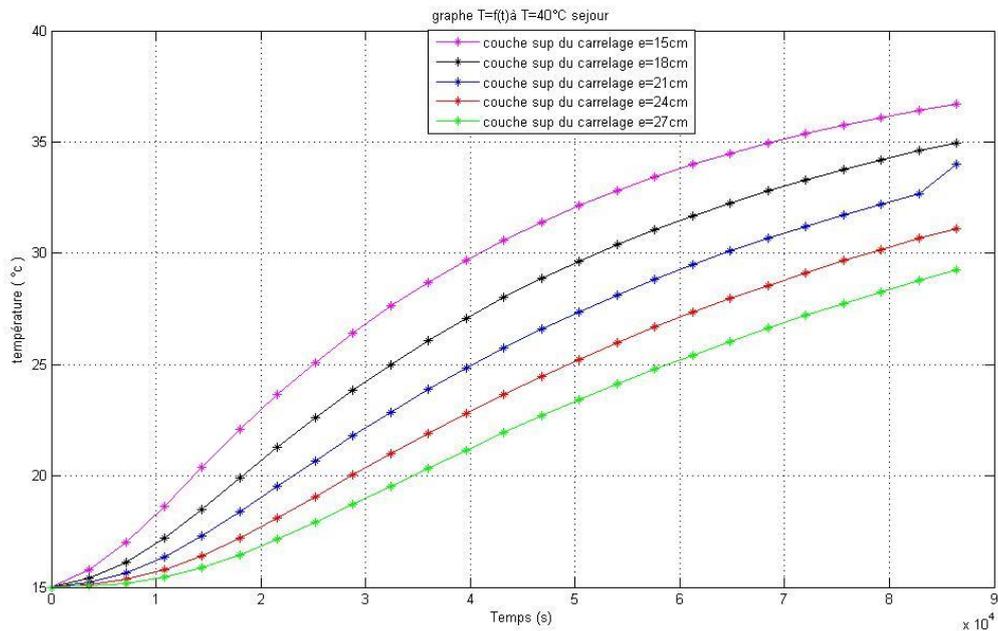


Figure 4. 27 Evolution de la température en fonction du temps au niveau du plancher du séjour (24h)coupe 2

Etude paramétrique

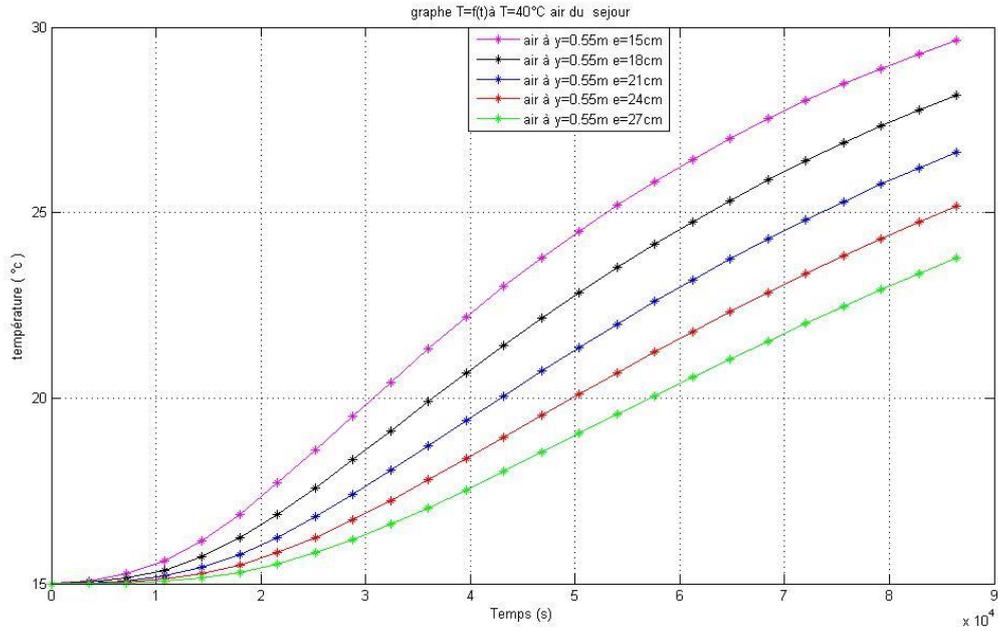


Figure 4.28 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 1 du séjour (24h)

Coupe 2

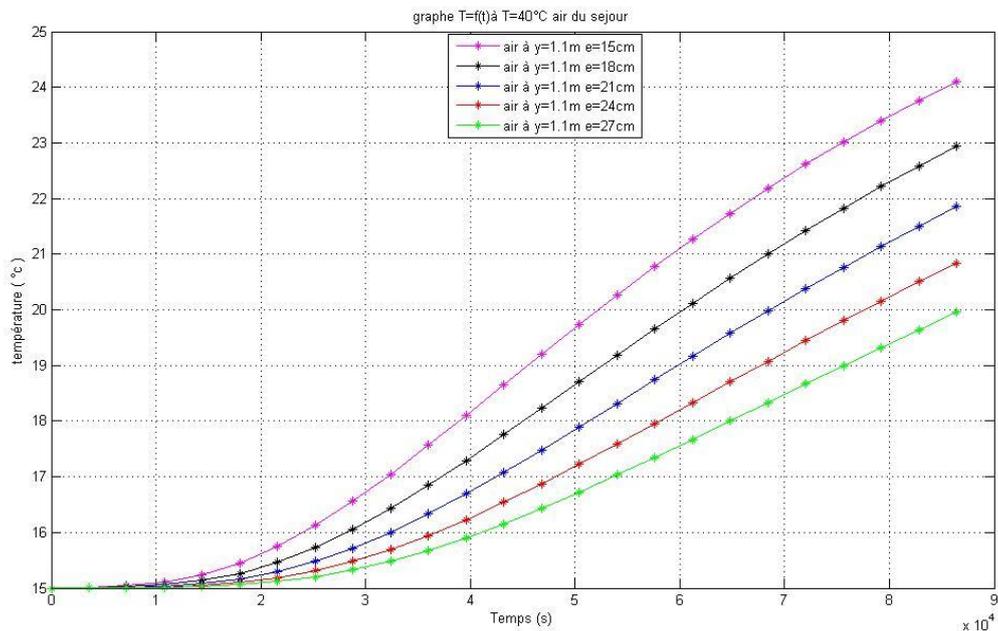


Figure 4.29 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 2 du séjour (24h)

Coupe 2

Etude paramétrique

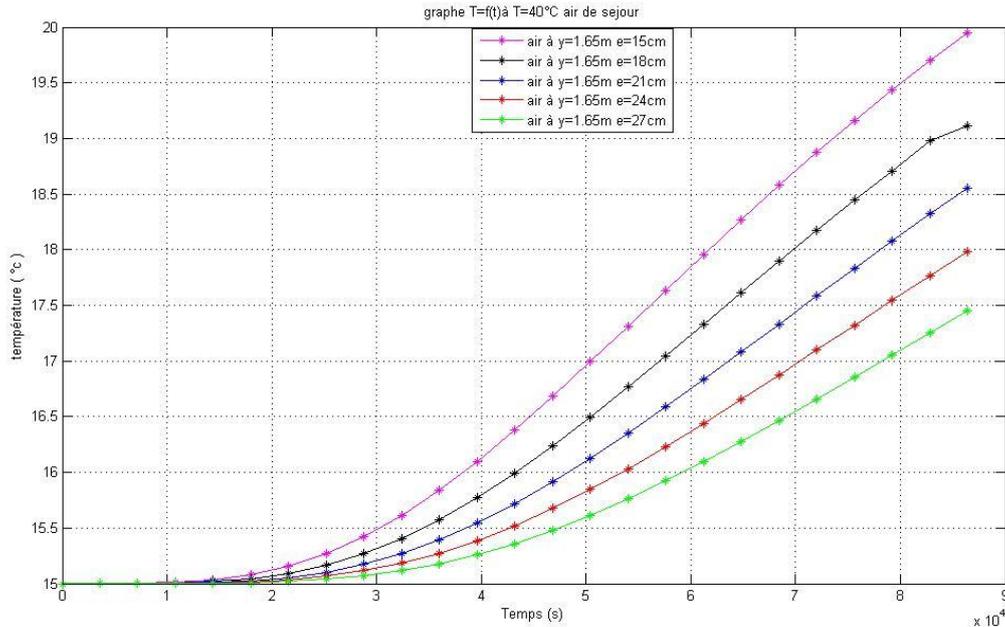


Figure 4.30 Evolution de la température en fonction du temps de l'air 3 du séjour (24h) coupe2

D'après les graphes présentés on remarque que la valeur maximale de la température obtenue au niveau de la couche supérieure du carrelage est de l'ordre de 36°C , la valeur minimale est de l'ordre de 29°C après 24h et avec une température du fluide caloporteur (eau) qui est fixe est qui est égale à 40°C

Pour l'air des locaux on l'a divisé en trois parties $y=0.55\text{m}$, $y=1.1\text{m}$ et $y=1.65\text{m}$

Ce qu'on remarque à $y=0.55\text{m}$ les températures varient entre 29°C et 24°C selon l'épaisseur de la dalle

Pour $y=1.1\text{m}$ les températures sont limitées entre 24°C et 19°C aussi tout dépend l'épaisseur de la dalle

$Y=1.65\text{m}$ les températures prennent valeur entre 19°C et 17°C

Ce qu'on peut dire sur ces résultats que les températures varient inversement avec la l'épaisseur de dalle

L'utilisation d'une épaisseur importante n'est donc pas nécessaire, une dalle de 18 cm (dans notre cas) d'épaisseur pourra être un compromis tout à fait intéressant. Mais aussi la réduction de l'épaisseur de la dalle est déconseillée car la réduction de l'épaisseur de la dalle chauffante

Etude paramétrique

s'accompagne d'une réduction de performances énergétiques en chauffage du système solaire est dû au fait que, pour une épaisseur est réduite, le stockage est réduit

4.4.2 Matériaux de construction

Dans cette partie on varie les matériaux de constructions des murs on va étudier 3 cas différents. Et chaque cas avec deux épaisseurs de dalle (15cm et 27)

4.4.2.a) murs extérieurs avec du brique et une isolation intérieure

Tableau 4.3 Les caractéristiques des murs extérieurs(isol int) des locaux

Composants	Epaisseur [m]	λ [W/m.°C]	R [m ² .°C/W]
1/he			0.06
Brique	0.1	0.48	0.208
Polystyrène	0.08	0.04	1.6
Enduit platre	0.02	0.35	0.057
1/hi			0.11
TOTAL			2.035

Coupe 1

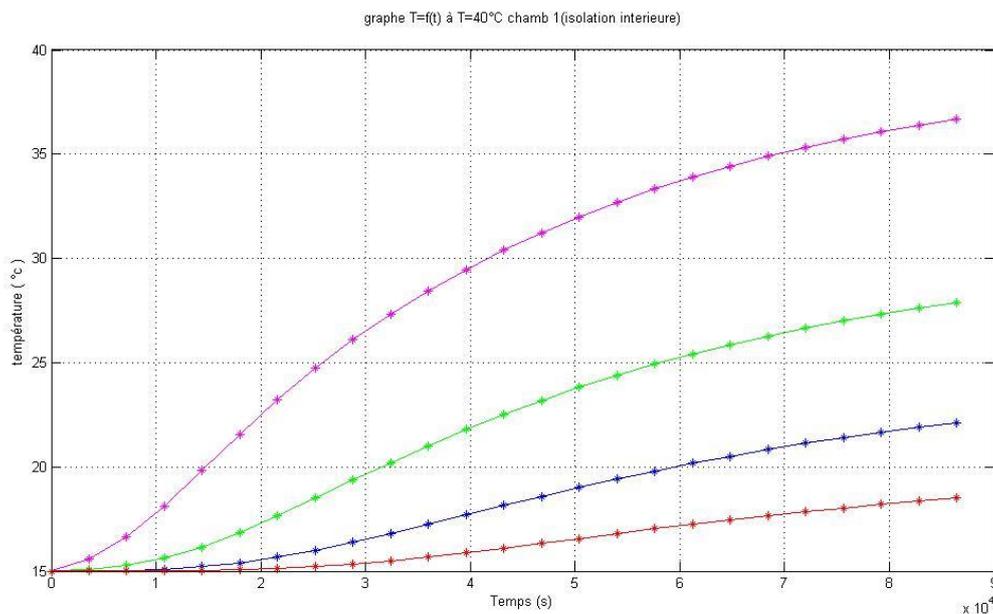


Figure 4.31 : évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 1 e= 15 cm (24h)

Etude paramétrique

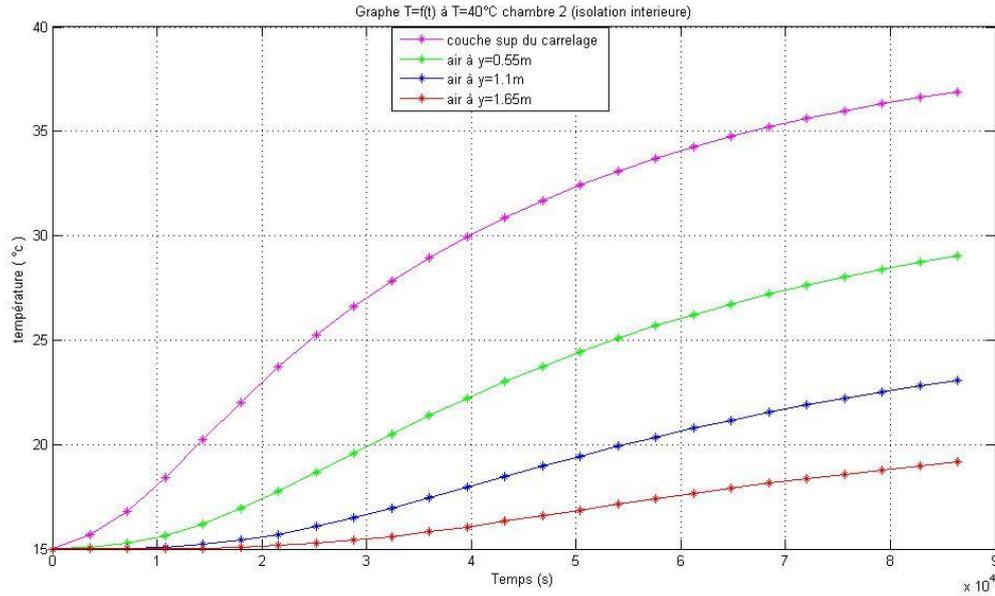


Figure4.31 : évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 2
e= 15 cm (24h)

Coupe2

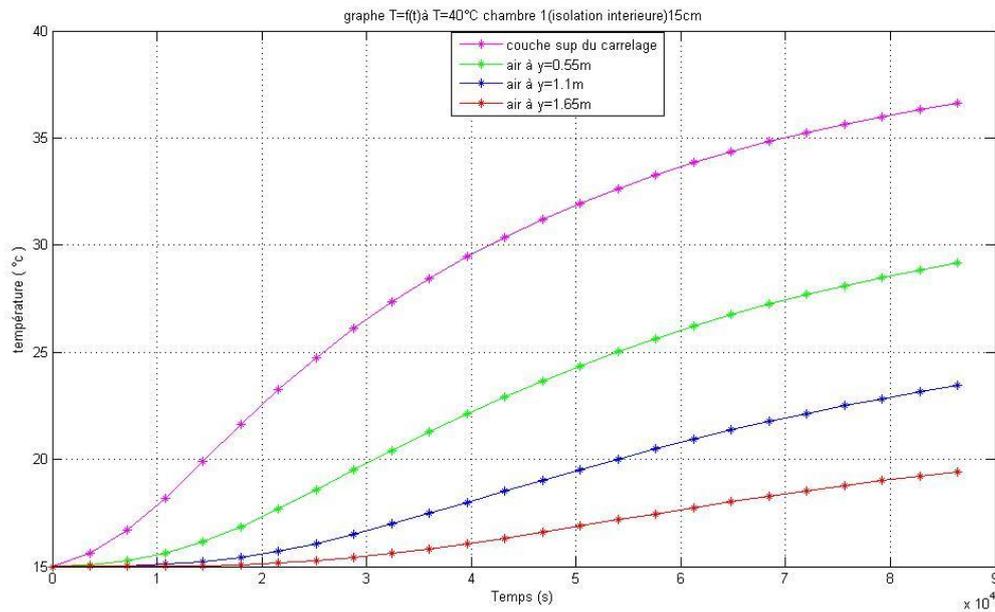


Figure4.32 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 1
e= 15 cm (24h)

Etude paramétrique

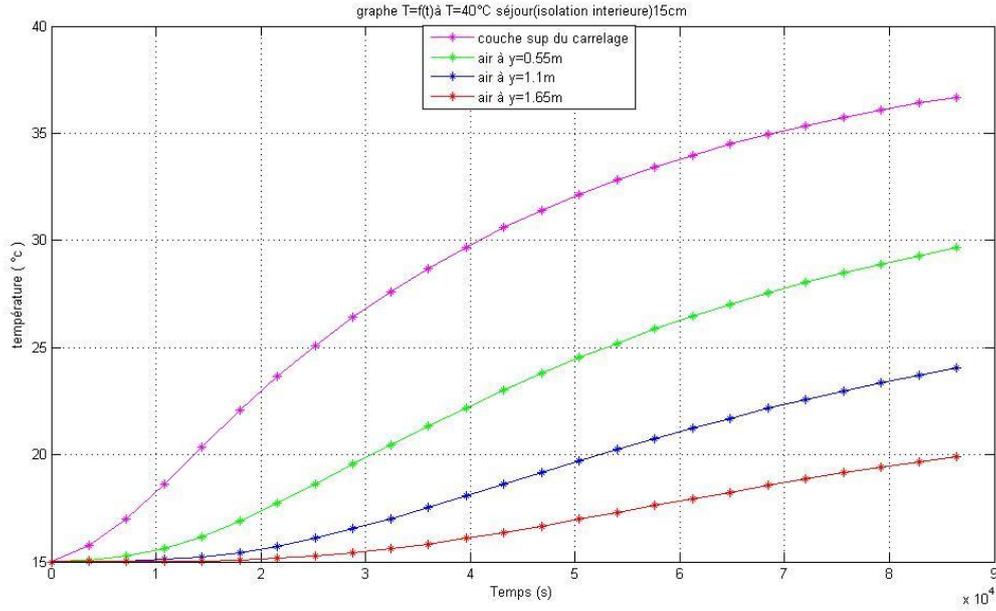


Figure4.32 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)séjour
e= 15 cm (24h)

Coupe 1

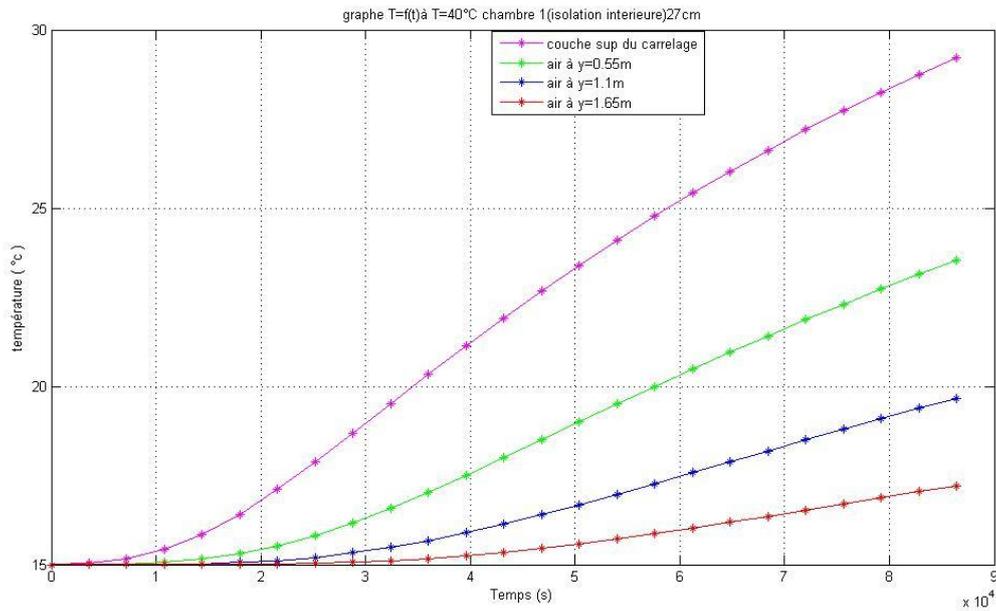


Figure4.33 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 1
e= 27 cm (24h)

Etude paramétrique

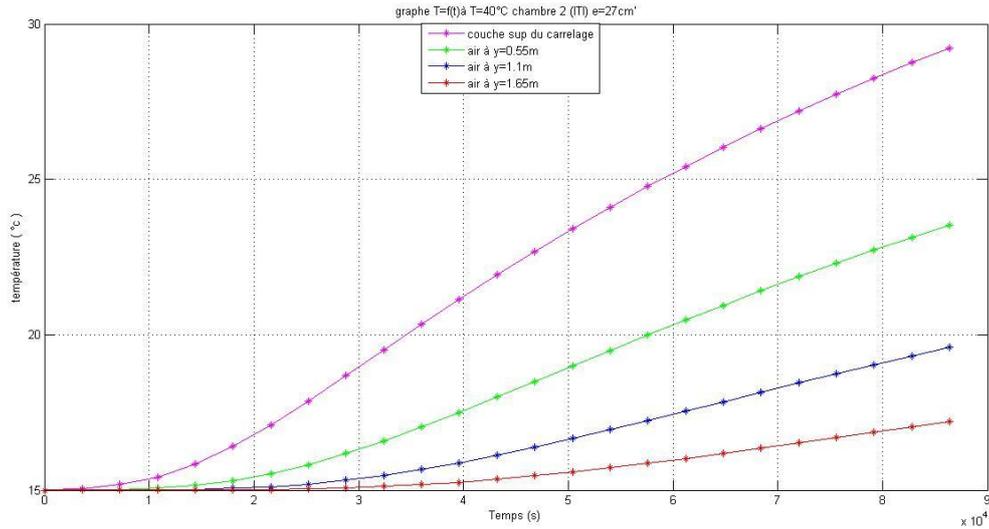


Figure4.34 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)chambre 2
e= 27 cm (24h)

Coupe 2

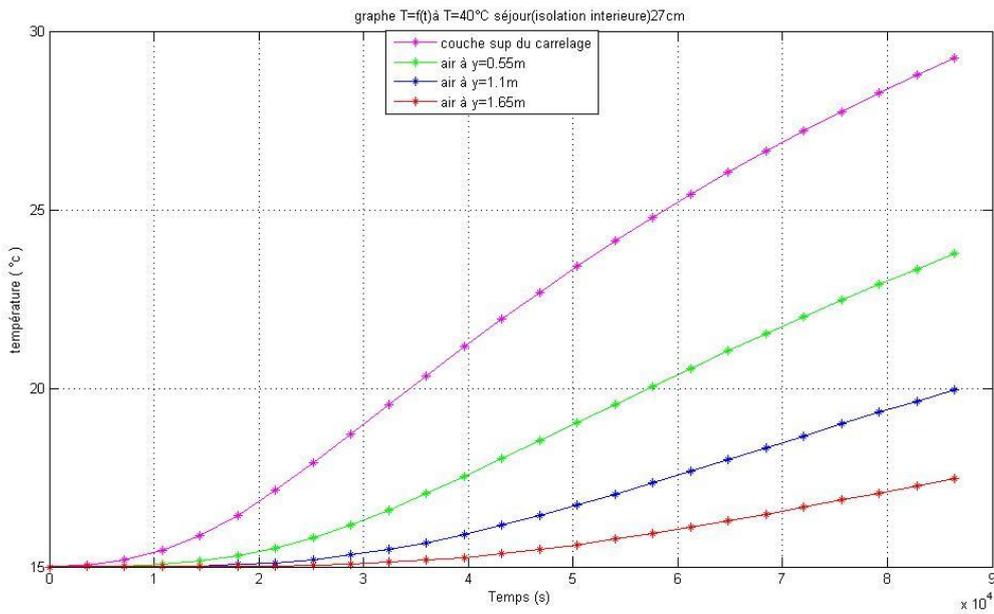


Figure4.34 évolution de la température en fonction du temps (isolation intérieure)Séjour
e= 27 cm (24h)

Etude paramétrique

4.4.2.b) murs extérieurs avec du brique et une isolation extérieure

Tableau 4.5 Les caractéristiques des murs extérieurs (isol ext) des locaux

Composants	Epaisseur [m]	λ [W/m.°C]	R [m ² .°C/W]
1/he			0.06
Polystyrène	0.08	0.05	1.6
Brique	0.1	0.48	0.208
Enduit platre	0.02	0.35	0.057
1/hi			0.11
TOTAL			2.035

Coupe 1

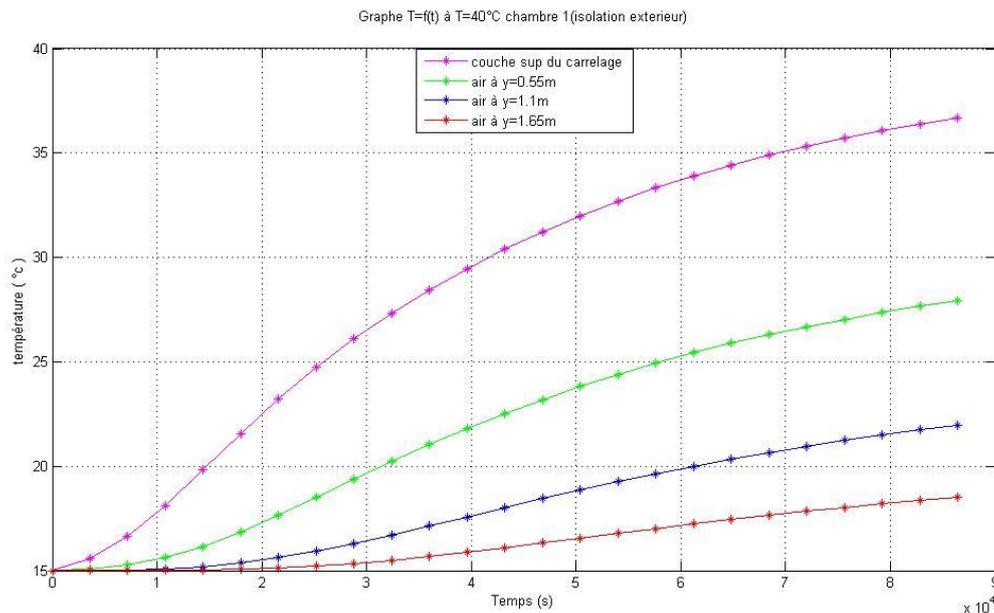


Figure 4.35 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure) chambre 1

e= 15 cm (24h)

Etude paramétrique

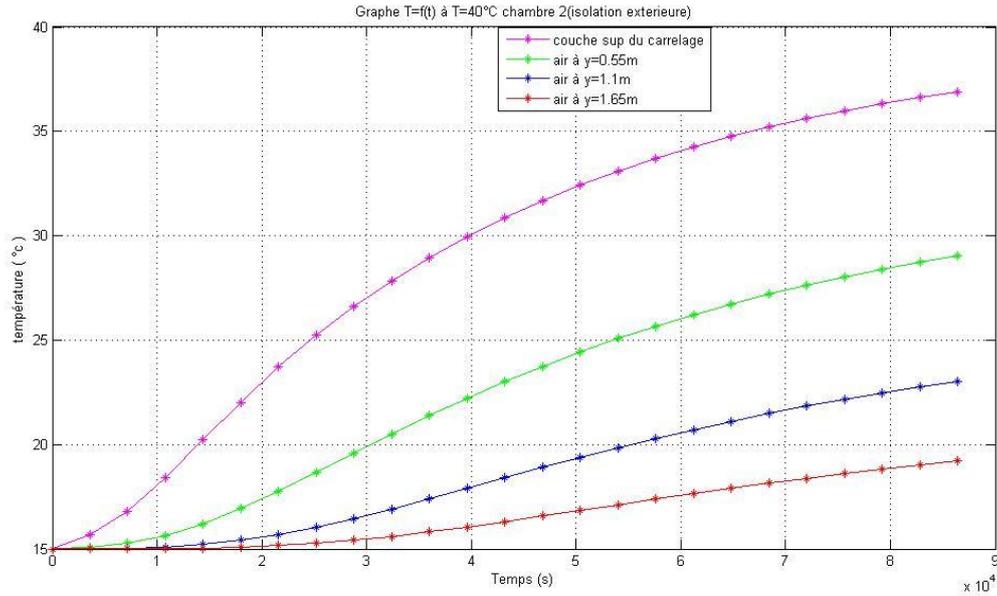


Figure4.36 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre 1

e= 15 cm (24h)

Coupe 2

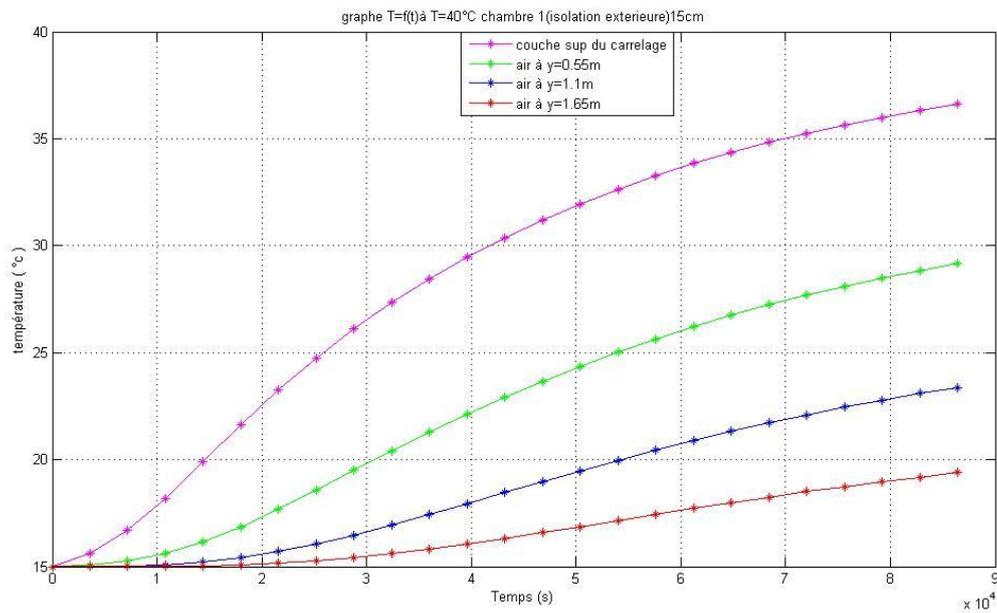


Figure4.37 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre 1

e= 15 cm (24h)coupe 2

Etude paramétrique

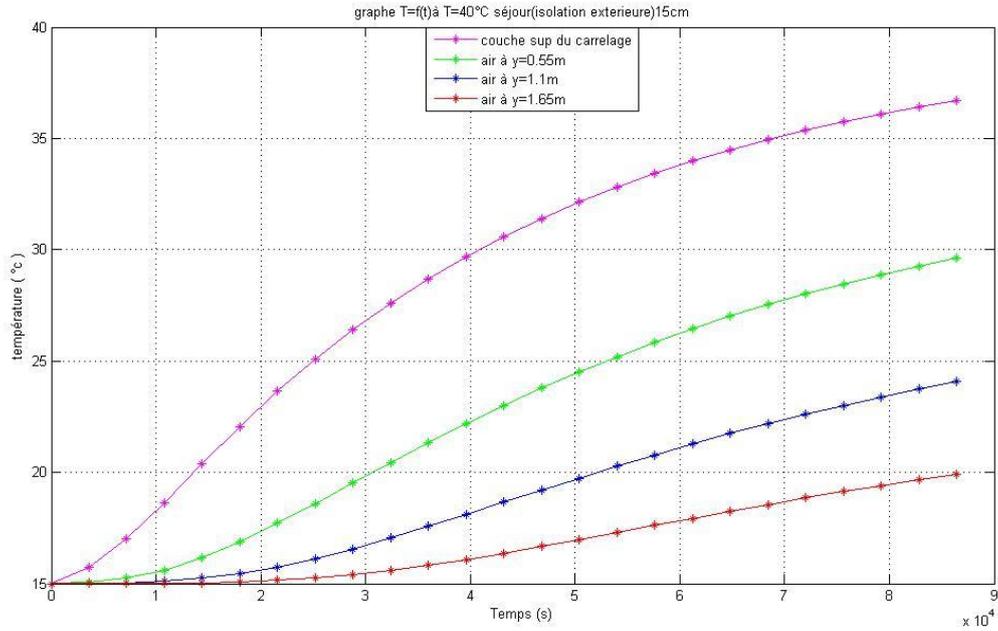


Figure4.38 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)séjour
e= 15 cm (24h)

Coupe 1

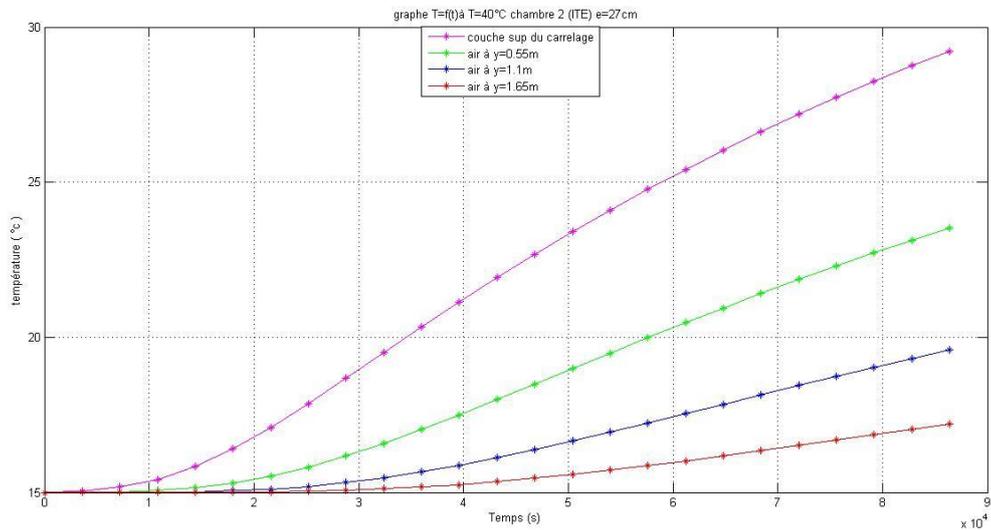


Figure4.39 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre2
e= 27cm (24h)

Etude paramétrique

Coupe 2

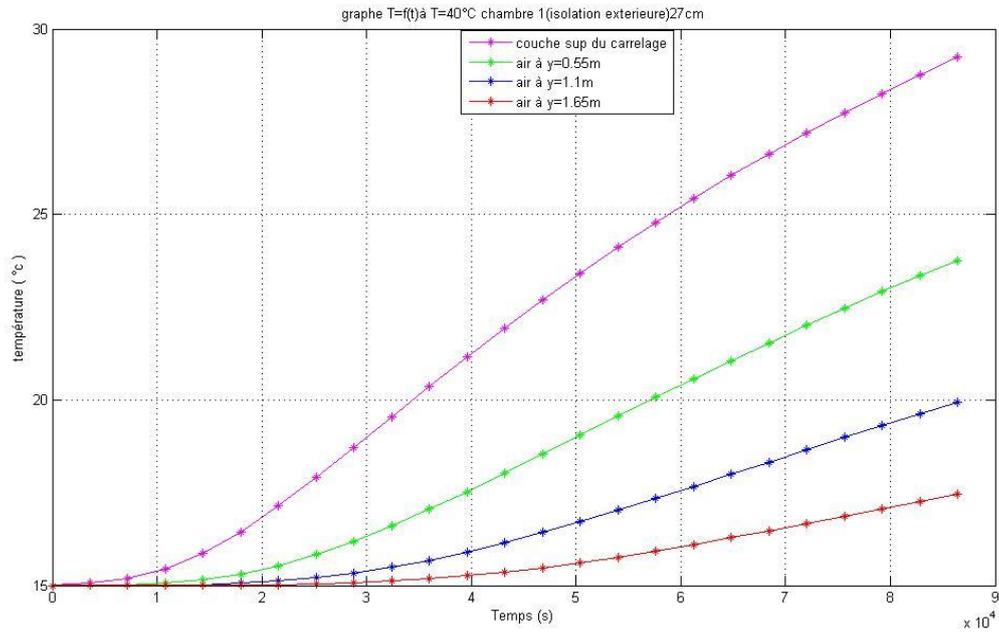


Figure4.40 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)chambre1
e= 27cm (24h)

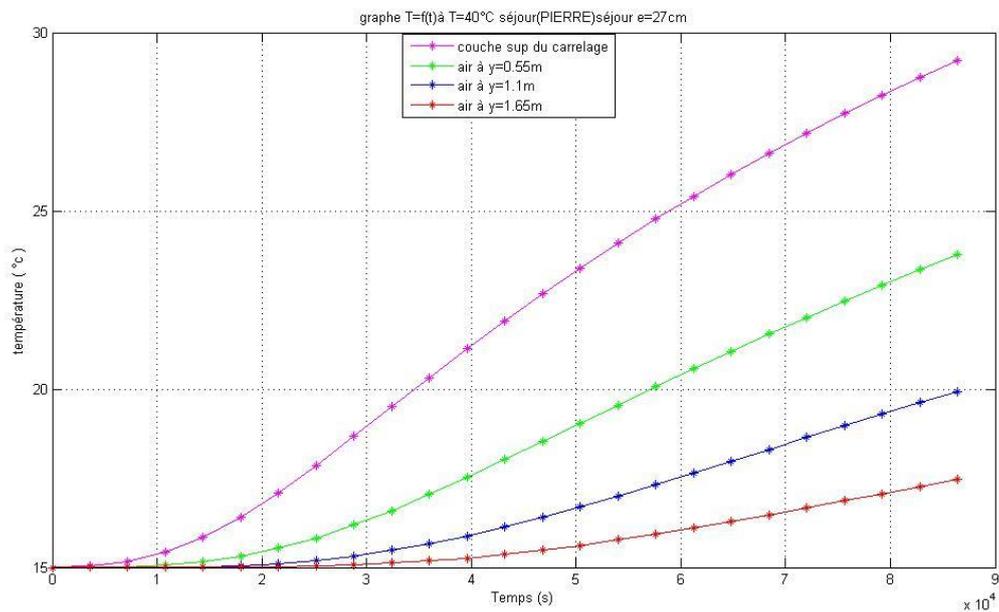
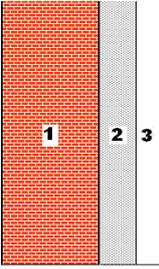


Figure4.41 évolution de la température en fonction du temps (isolation extérieure)séjour
e= 27cm (24h)

Etude paramétrique

4.4.2.c) murs extérieurs avec de la pierre

Tableau 4.4 Les caractéristiques des murs extérieurs (pierre) des locaux

Désignation et représentation	Couche	Epaisseur [m]	λ [W/m.°C]	R [m².°C/W]
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Mur extérieur</p> <p>1/he</p> <p>1 - Pierre</p> <p>2 - Polystyrène</p> <p>3 - Enduit plâtre</p> <p>1/hi</p> </div> </div>				0,06
		0,40	1,70	0,235
		0,08	0,05	1.6
		0,013	0,350	0,037
				0,110
				<u>R = 2,042</u>

COUPE1

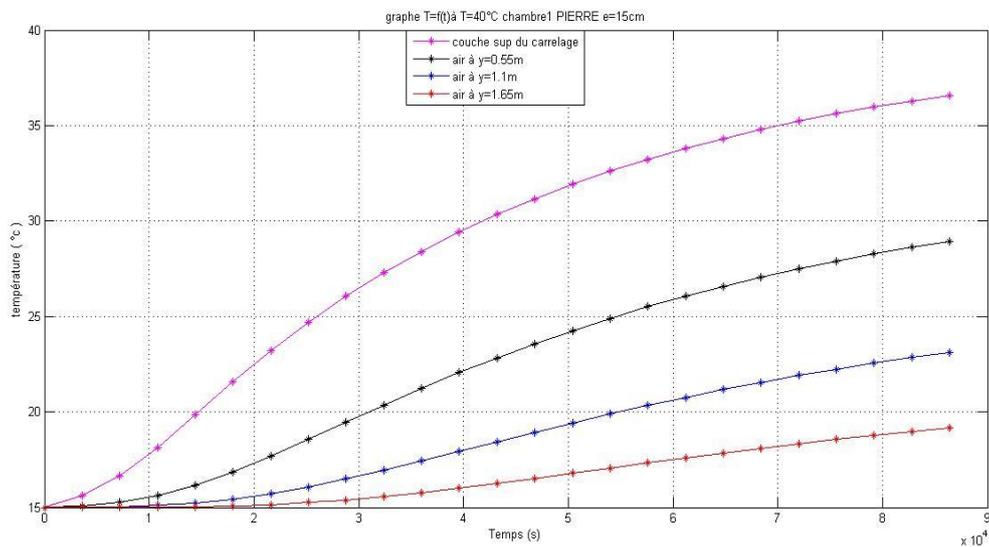


Figure 4.42 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE) chambre 1

e= 15cm (24h)

Etude paramétrique

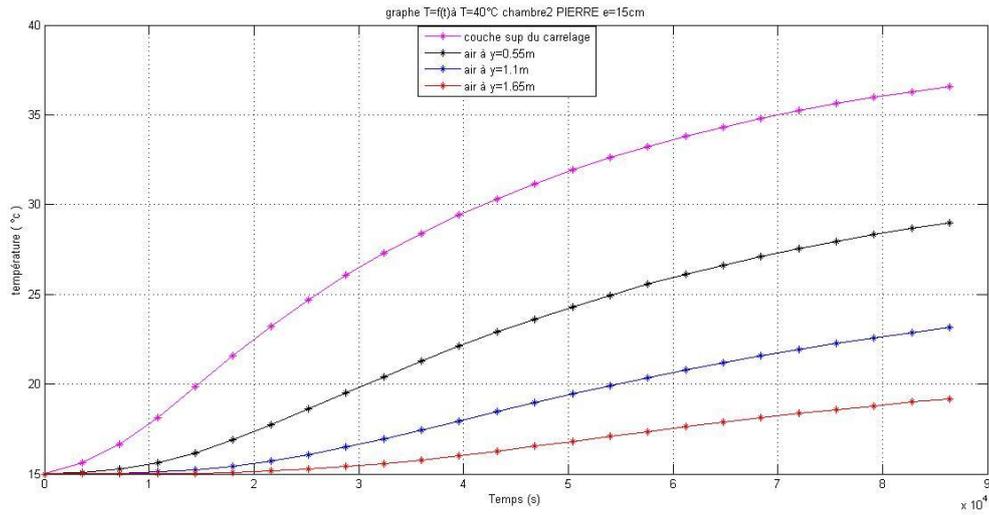


Figure4.43 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)chambre 2

e= 15cm (24h)

COUPE 2

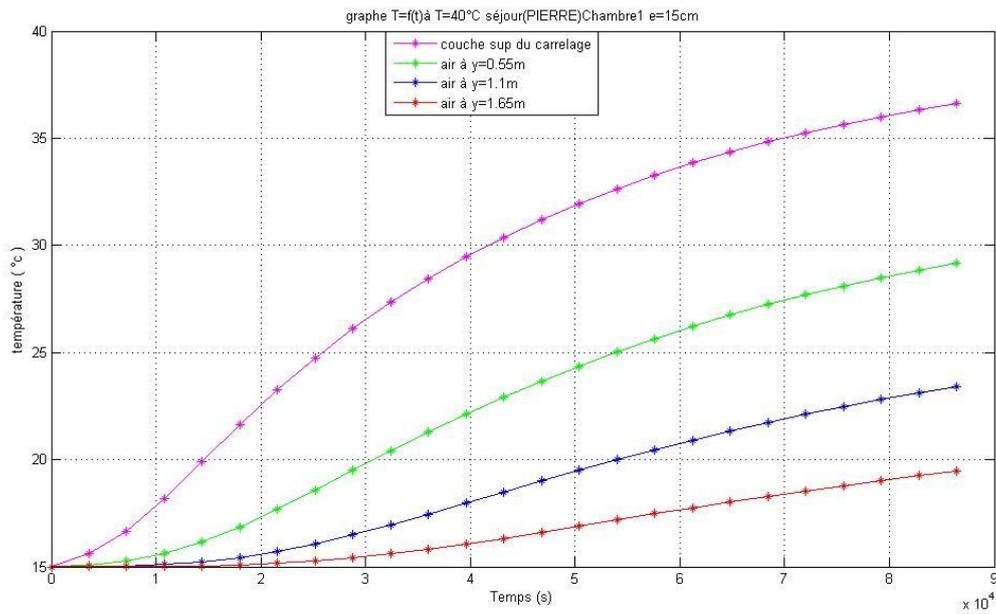


Figure4.44 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)chambre1

e= 15cm (24h)

Etude paramétrique

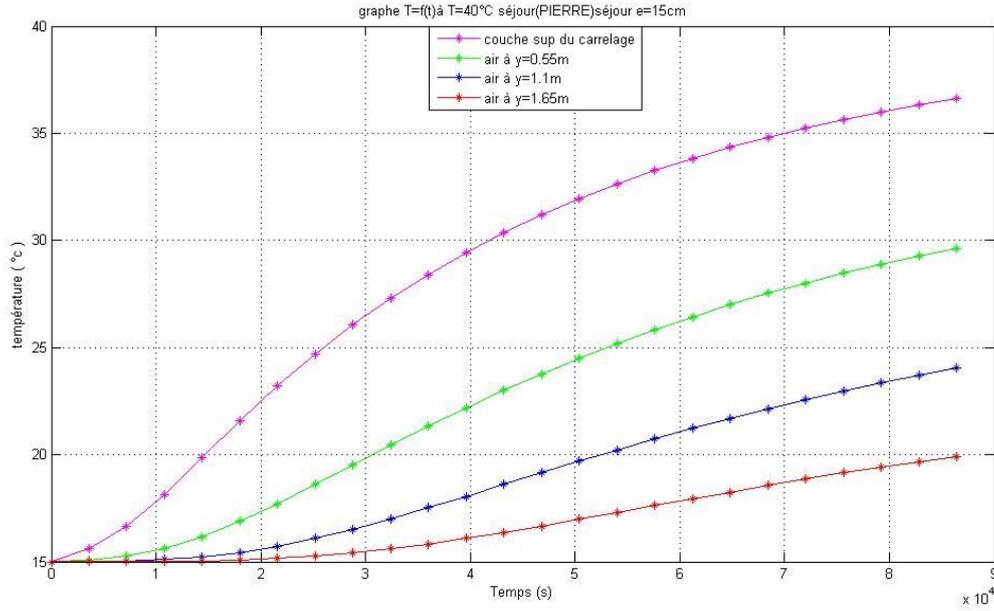


Figure4.45 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Séjour
e= 15cm (24h)

coupe 1

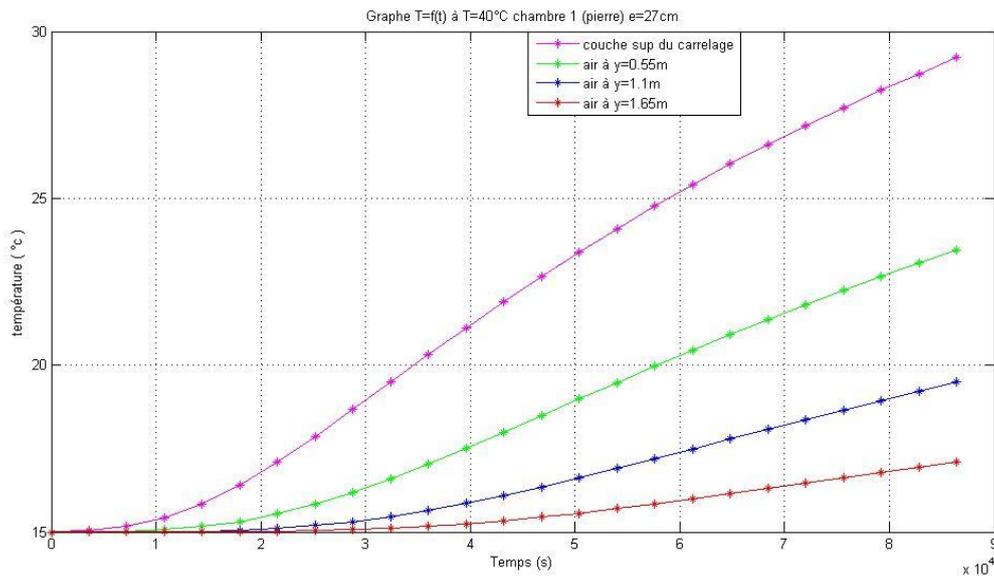


Figure4.46 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Chambre 1
(24h) e=27cm

Etude paramétrique

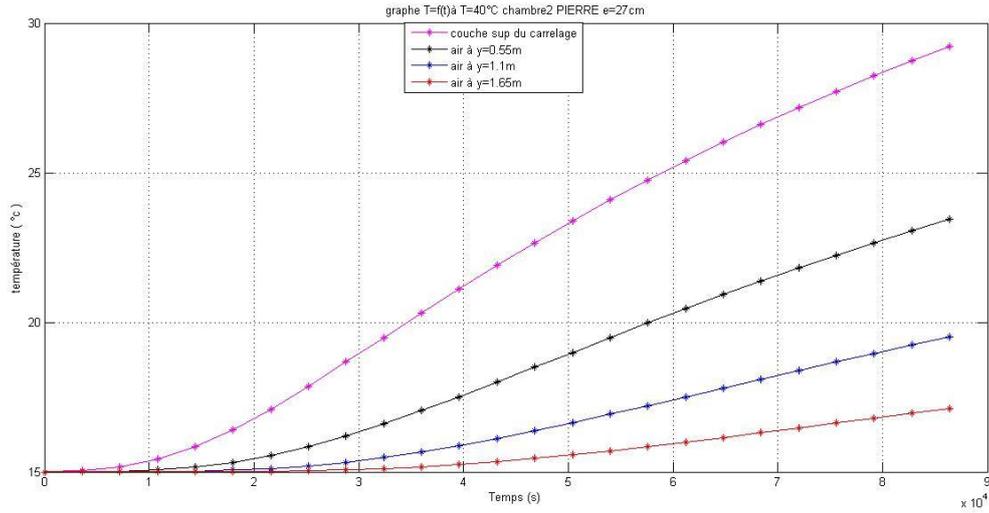


Figure4.47 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Chambre 2

(24h) e=27cm

Coupe 2

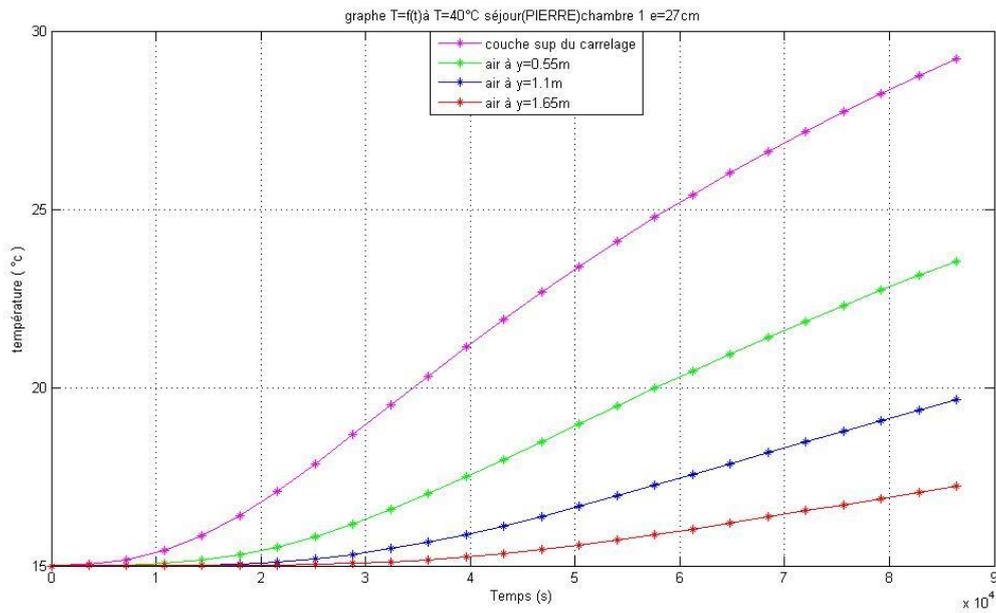


Figure4.48 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE)Chambre 1

(24h) e=27cm

Etude paramétrique

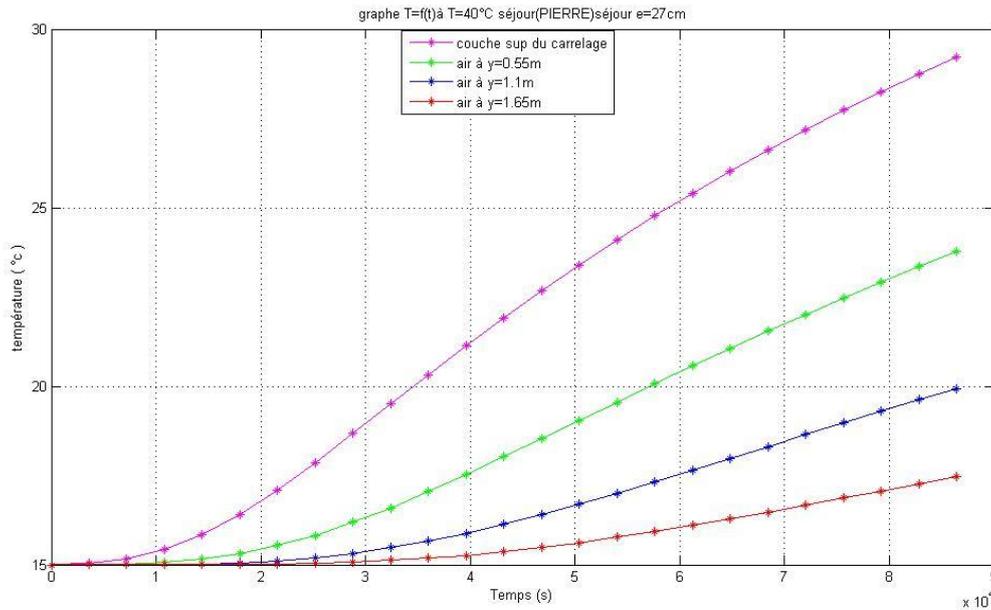


Figure 4.49 évolution de la température en fonction du temps (PIERRE) séjour
(24h) $e=27\text{cm}$

Ce qu'on remarque d'après les figures (4.32) et (4.38) que pour l'isolation intérieure et l'isolation extérieure, on a obtenue presque le même résultat et cela est dû que parmi nos hypothèses on a pas pris en considération les fenêtres (double vitrage).

La température moyenne de l'air à l'intérieur des locaux chauffée est de l'ordre de $T_{\text{moy}}=24.54^{\circ}\text{C}$ pour une épaisseur de dalle de 15cm et $T_{\text{moy}}=18^{\circ}\text{C}$ pour une épaisseur de dalle de 27cm.

Pour la pierre avec une isolation intérieure, la température moyenne de l'air à l'intérieur des locaux est de l'ordre de 23°C pour une dalle de compression de 15cm et $T_{\text{moy}}=17^{\circ}\text{C}$ pour une épaisseur de 27cm.

Si on compare les résultats des deux types d'isolation avec ceux des murs extérieurs en pierre ; on peut dire que la 2^{ème} configuration a un taux de confort meilleur est cela est dû à sa résistance thermique qui est plus élevée que celle de la 1^{ère} configuration.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE :

Cette étude a porté sur le chauffage d'un local par l'intermédiaire d'un plancher solaire, parcouru par un serpentin dont l'apport d'énergie du fluide caloporteur (eau), est assuré par les capteurs solaires plan à eau.

La simulation numérique a été faite à l'aide du logiciel comsol multiphysiques. La méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution des problèmes physiques, gouvernés par les équations différentielles aux dérivés partielles.

Ce travail nous a permis d'examiner deux paramètres (épaisseur de dalle et matériaux de construction des murs extérieurs), et déterminer leur influence sur le transfert de chaleur à l'intérieur des locaux.

En perspectives ; il serait intéressant d'enrichir ce travail par :

- Etude de l'influence de diamètre des tubes du serpentin
- Etude sur l'écart entre les tubes du serpentin
- Faire varier la température du fluide caloporteur
- Faire une étude en 3D en prenant en considération les portes et les fenêtres.
- Utilisation de différents types d'isolant
- Procéder à un calcul continu pendant 3 jours jusqu'à 6 jours pour voir le comportement thermique du plancher et surtout l'inertie thermique de la dalle

- Variation du débit du fluide dans le serpentin.
- L'influence de la température de l'ambiance extérieure.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- [1] R.KHARCHI « Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct » Thèse de Magister Université de Blida 2002
- [2] F .MOKHTARI 2005 Thèse « Etude d'une boucle régulée capteur-plancher solaire » Thèse de magister université de BLIDA 2005
- [3] Rapport du CNERIB 2010
- [4] D.T.R C3.2 document réglementaire technique « Réglementation thermique des bâtiments d'habitation » CNERIB 2007
- [5]SAADI SOUAD « effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan »
- [6] Bulletin des énergies renouvelables
- [7] BELKHELFA Rabah BOUROUIS Amine « Intégration d'un plancher chauffant solaire dans un habitat » thèse d'ingénieur université de Blida 2011
- [8]LUI HUI « Stockage Inter-saisonnier d'énergie solaire pour l'habitat par absorption »these de doctorat université de GRENOBLE 2010
- [9]BENMEDDOUR AMOR « étude et simulation numérique des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque » thèse de doctorat Constantine 2010
- [10]HENCO (fabricant des tuyaux multicouche pour le chauffage) Manuel technique Belgique 2006
- [11]S.TALAL « intégration des composants solaires thermiques actif dans la structure bâtie » these de doctorat lyon 2007
- [12] WWW .leguieduchauffage.com
- [13]WWW.outilssolaires.COM
- [14]WWW.energies-eco-renouvelables.fr
- [15]Bulletin trimestriel de l'Aprue avril 2009
- [16]Guidelines, éléments de conception des installations chauffage/climatisation solaire de petite et moyenne puissance ,intelligence energy europe 12 octobre 2009