

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB –BLIDA- 1-
FACULTE DE TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté au DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES

Par : Laitouti Samy

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN ENERGIE RENOUVELABLES

OPTION : CONVERSION THARMIQUE

**THEME : CHAUFFAGE DES BUNGALOWS DE HAMMAM CHELLALA PAR
ENERGIE GEOTHERMIQUE**

Soutenu le : 20-06-2017

Devant le jury composé :

M. M. Merzouk	Professeur à l'USDB	Président
M. K.Nehal	Docteur à l'USDB	Examineur
M. H. ABDI	Maitre-Assistant à l'USDB	Examineur
M. D. Semmar	Docteur à l'USDB	promoteur

2016-2017

REMERCIEMENTS

*Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en énergie renouvelables, **CONVERSION THERMIQUE** au Département des énergies renouvelables de l'université Saad Dahlab de Blida 1, sous la direction du Dr .**SEMMAR D.** que je remercie vivement pour toute l'aide qu'il m'a apportée durant toute la durée de préparation du présent mémoire.*

Mes plus vifs remerciements vont au (à) Pr. M. Merzouk pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

Je remercie vivement Mr. K. Nehal et Mr. H. Abdi pour l'honneur qu'il m'a fait en participer au jury en qualité d'examineur.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des enseignants personnes qui ont largement contribué à son aboutissement.

Chapitre I : Recherches bibliographiques

**Chapitre II : dimensionnement système de
chauffage des bungalows de Hammam
Chellala**

**Chapitre III : Simulation du plancher
chauffant dans les bungalows de Hammam
Chellala.**

Résumé

Le présent projet a pour objectif la conception d'un système de chauffage des bungalows du complexe de Hammam Chellala (Guelma). Après avoir vue des généralités sur la géothermie et l'utilisation de la géothermie dans le chauffage. Nous avant fait une étude congestionnelle d'un système de chauffage des bungalows de Hammam Chellala par plancher chauffant. Cette dernière étude nous a permet de faire une simulation numérique du chauffage des bungalows par plancher chauffant.

Eu égards à toutes ces considérations, le choix du site de Hammam Chellala, répond à la plupart de nos préoccupations techniques et organisationnelles.

Abstract – The aim of this project is to design a heating system for the bungalows in the Hammam Chellala complex (Guelma). After seeing generalities on geothermal and the use of geothermal heating. We before done a congestional study of a heating system of Hammam Chellala bungalows by heating floor. This last study allowed us to do a digital simulation of the heating of the bungalows by heating floor.

Considering all these considerations, the choice of the Hammam Chellala site meets most of our technical and organizational concerns.

ملخص - هذا المشروع ت يهدف إلى تصميم نظام للتدفئة خاص بحمام الشلالة (قالمة). بعد رؤية عموميات على الطاقة الحرارية الأرضية، واستخدام الطاقة الحرارية الأرضية في التدفئة. قبل أن نقدم دراسة خاصة لنظام التدفئة للمركب السياحي حمام الشلالة عن طريق الطاقة الأرضية. هذه الدراسة الأخيرة تسمح لنا للقيام بالمحاكاة العددية للتدفئة. وفيما يتعلق بهذه الاعتبارات، والاختيار موقع حمام الشلالة، يجمع معظم متطلباتنا الفنية والتنظيمية.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à
Mes très chers parents, pour leur
sacrifice*

Mes très chères soeurs

Mes très chers frères

Toute ma famille

Tous mes amis

Sommaire

Introduction général.	1
<u>Chapitre I : Recherches bibliographiques.</u>	
I.1. Introduction.	2
I.2. Principe de la géothermie.	2
I.3. L'utilisation de l'énergie géothermique.	2
a. Production d'électricité.	2
b. Application directe.	3
I.4. La capacité de production géothermique.	4
I.5. Coûts et prix de revient d'une installation géothermique.	6
I.6. Impacts sur l'environnement.	7
I.7. Les possibilités d'utilisation de la géothermie.	8
I.7.1 Diagramme de Lindal.	8
I.8. Potentielle géothermique de l'Algérie	8
I.9. Utilisation de la géothermie dans le chauffage.	10
I.10. Généralité sur les plancher chauffant.	11
I.10.1 Comparaison entre plancher chauffant et radiateurs.	11
a. Les avantages du plancher chauffant par apport aux radiateurs.	11
b. inconvénients du plancher chauffant par apport aux radiateurs.	11
I.10.2 Principe de fonctionnement du plancher chauffant.	12
I.10.3 Pourquoi les planchers chauffants doivent fonctionner basse température ?	13
I.11. Géothermie basse température en Algérie.	13
I.12. Réalisations et projets en cours.	14

Chapitre II : dimensionnement système de chauffage des bungalows de Hammam Chellala.

II.1. Introduction.	15
II.2. Système proposé pour le chauffage des bungalows.	15
II.3. Les étape à suivre pour l'étude.	16
II.4. Hypothèses.	16
II.5. Présentation de la région d'étude.	16
II.5.1 Cadre géographique.	16
II.5.2 Les sources chaudes de Hammam CHELLALA.	17
II.5.3 Données climatiques.	17
II.5.5 Données expérimentales établies par le C.S.T.B	18
II.5.5 Caractéristiques climatiques moyennes suivant la zone B	18
II.6. Etude architecturale.	19
II.6.1 Plan du lot des bungalows de Hammam Chellala.	19
II.6.2 Composition des parois.	20
II.7. Calcul des coefficients de transmission surfacique.	21
II.8. Détermination de la température ambiante moyenne du local.	22
II.9. Choix de la surface d'installation du plancher chauffant.	22
II.9.1 Calcul des déperditions surfaciques chambre et séjour du bungalow N°1	23
a. Déperditions surfaciques :	23
b. Déperditions par renouvellement d'air total du lot :	24
c. Déperditions à travers les liaisons :	25
d. Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage :	25
II.9.2 Interprétation des résultats de la solution A	26
II.9.3 Calcul des déperditions total de chaque bungalow	26
II.9.4 Interprétation des résultats de la solution B	33
II.10. Température du fluide chauffant.	33

II.11. Calcule de la température de dépare.	34
II.12. Le débit de circulation du fluide.	34
II.13. La vitesse de circulation.	35
II.14. Perte de charge et dimensionnement plancher chauffant.	36
II.15. La cuve de stockage du fluide plancher chauffant.	36
II.16. Les pertes de charge dans les conduites.	37
II.17. Les problèmes possibles de cette installation.	37
II.18. Solutions proposé.	38
II.19. Conclusion.	38

Chapitre III : Simulation du plancher chauffant dans les bungalow de Hammam Chellala.

III.1. Introduction.	39
III.2. Description du logiciel.	39
III.3. Hypothèses.	39
III.4. Procédure de simulation.	40
III.6. Définition de la géométrie.	41
III.7. Introduction des propriétés des matériaux des domaines.	41
III.8. Les conditions sur les domaines.	42
III.9. Maillage.	45
III.10. Résolution du problème.	46
III.11. Résultats.	46
a. Effet de conduction	46
b. Effet de rayonnement	48
c. Effet de convection a l'intérieur des pièces	48
d. Vision final de la distribution de température	49
e. Effet de l'épaisseur du plancher sur la température	50
III.12. Interprétation des résultats.	51
III.13. Conclusion.	51
Conclusion générale	52

INTRODUCTIO GENERALE

INTRODUCTIO GENERALE :

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie chose obligatoire et donc le passage à l'utilisation et le développement des énergies renouvelables est imminents.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire) mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse, et aussi la géothermie qui représente le but de cette étude.

A toute époque, les manifestations naturelles de la chaleur de la Terre, telles les sources thermales, les geysers et les volcans, ont été des centres d'attraction de l'humanité. Les sources chaudes ont été utilisées depuis la haute Antiquité. Les Romains étaient les premiers à utiliser les bains thermaux et aussi les premiers à mettre au point le chauffage par le sol dans certains de leurs édifices, une technique qui s'est ensuite perdue jusqu'au 20^e siècle. De nombreuses villes ont été fondées autour de sources thermales.

Le manuscrit est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié aux généralités sur la géothermie et l'utilisation de la géothermie dans le chauffage. Dans le second chapitre nous feront une étude congestionnelle d'un système de chauffage des bungalows de Hammam Chellala. Au troisième chapitre exposant une simulation numérique du chauffage des bungalows par plancher chauffant.

Listes des Figure

Chapitre I : Recherches bibliographiques.

Figure I.1 : Part de la géométrie dans la production mondiale d'électricité en 2013.	4
Figure I.2 : Part de la géométrie dans la production mondiale d'électricité d'origine renouvelable en 2013.	4
Figure I.3 : Capacité de production mondiale de géothermie en mégawatt.	5
Figure I.4 : les ressources mondiales de la géothermie.	6
Figure I.5 : Diagramme de Lindal.	8
Figure I.6 : La carte géothermique schématique de l'Algérie.	9
Figure I.7 : les deux principales installations de captage dans le chauffage géothermique.	10

Chapitre II : dimensionnement système de chauffage des bungalows de Hammam Chellala.

Figure II.1 : système proposé pour le chauffage du bungalow de hammam chellala.	15
Figure II.2 : Plan d'un lot de Hammam Chellala.	19
Figure II.3 : Collecteur équipé de vannes de réglages de débit, de débitmètre de contrôle avant raccordement a la chaufferie.	35
Figure II.4 : Le schéma du ballon tampon utilisé.	36

Chapitre III : Simulation du plancher chauffant dans les bungalow de Hammam Chellala.

Figure III.1 : Interface du logiciel COMSOL Multyphysics.	40
Figure III.2 : la plan coupe (x,y) du lot de bungalow.	41
Figure III.3 : Une géométrie qui représente le lot des bungalows étudier.	41
Figure III.4 : Définitions des parois et choix des matériaux plancher haut.	42
Figure III.5 : Définitions des parois et choix des matériaux (air).	42

Figure III.6: La sélection des domaines qui sont opaque.	43
Figure III.7: Condition aux limites extérieures des murs.	43
Figure III.8 : Les surfaces diffusives du rayonnement.	44
Figure III.9 : Maillage de la géométrie.	45
Figure III.10 : Vision thermique du lot des bungalows.	46
Figure III.11: Coupe sur l'axe x,z qui représente la distribution de température par conduction.	46
Figure III.12 : Distribution de température dans le bungalow 1 (50 minutes).	47
Figure III.13 : Distribution de température dans le bungalow 1 (1 heure 25 minutes).	47
Figure III.14 : Distribution de température dans le bungalow 1 (2 heures).	47
Figure III.15 : Effet de rayonnement sur le séjour du bungalow 6.	48
Figure III.16 : coupes comparatif qui montrent l'effet de la convection à l'intérieur dans la chambre du bungalow n°1.	48
Figure III.17 : Vue 3D sur l'isosurface de la température a l'intérieur des bungalows en K.	49
Figure III.18 : Coupe sur l'axe x,y à mi-hauteur de la distribution de la température sur les bungalows.	49
Figure III.19 : Coupe sur l'axe x,z qui représente la distribution de température par un plancher d'épaisseur de 0.1m.	50
Figure III.20 : Coupe sur l'axe x,z qui représente la distribution de température par un plancher d'épaisseur de 0.05m.	50

Liste des Tableaux

Chapitre I : Recherches bibliographiques.

Tableau I.1 : tableau qui rassemble les données pour l'examen de 1990 dans 14 pays dont la capacité est au-dessus de 100 MWt	06
Tableau I.2 : Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.	09

Chapitre II : dimensionnement système de chauffage des bungalows de Hammam Chellala.

Tableau II.1 : les caractéristiques géographiques des localités de Hammam Chellala	16
Tableau II.2 : Valeurs des différentes températures dans les zones étudiées pour le mois le plus chaud et le mois le plus froid	17
Tableau II.3 : Caractéristiques du mois le plus froid	18
Tableau II.4 : la composition des parois des bungalows	20
Tableau II.5: Déprédations séjour bungalow 1	23
Tableau II.6: Déprédations chambre bungalow 1	23
Tableau II.7: déperditions surfaciques du bungalow 1	26
Tableau II.8: déperditions surfaciques du bungalow 2	27
Tableau II.9: déperditions surfaciques du bungalow 3	28
Tableau II.10: déperditions surfaciques du bungalow 4	29
Tableau II.11: déperditions surfaciques du bungalow 5	30
Tableau II.12: déperditions surfaciques du bungalow 6	31
Tableau II.13: déperditions surfaciques du bungalow 7	32
Tableau II.14 : Les débits nécessaires pour chaque bungalow	35

Chapitre III : Simulation du plancher chauffant dans les bungalow de Hammam Chellala.

Tableau III.1 : Valeurs et statistiques du maillage	45
-----------------------------------------------------	----

CONCLUSION GENERALE

La production d'énergie utilisant les ressources de basse énergie présente sur plusieurs sites dans le monde (comme Hammam Chellala), est la principale voie de développement de la géothermie.

En Algérie en manque de ces types de projet qui permette le développement de l'énergie renouvelable dans le pays.

Les installations géothermiques décrites dans ce mémoire se prêtent à une exploitation décentralisée. Elles peuvent donc être placées à l'intérieur ou à proximité de zones urbaines, ce qui rend le chauffage par cette technique très favorable dans ces zones.

INTRODUCTIO GENERAL :

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie dans l'obligation et donc le passage à l'utilisation et le développement des énergies renouvelables sont imminents.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire) mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse, et aussi la géothermie qui représente le but de cette étude.

A toute époque, les manifestations naturelles de la chaleur de la Terre, telles les sources thermales, les geysers et les volcans, ont été des centres d'attraction de l'humanité. Les sources chaudes ont été utilisées depuis la haute Antiquité. Les Romains étaient les premiers à utiliser les bains thermaux et aussi les premiers à mettre au point le chauffage par le sol dans certains de leurs édifices, une technique qui s'est ensuite perdue jusqu'au 20^e siècle. De nombreuses villes ont été fondées autour de sources thermales.

Le manuscrit est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié aux généralités sur la géothermie et l'utilisation de la géothermie dans le chauffage. Dans le second chapitre nous ferons une étude congestionnelle d'un système de chauffage des bungalows de Hammam Chellala. Au troisième chapitre exposant une simulation numérique du chauffage des bungalows par plancher chauffant.

I.1. Introduction

Plus de 99% de la masse de la terre est à une température de plus de 1000° C. Seul le 0,1% de la masse de la terre (c'est-à-dire les trois premiers kilomètres) est plus froid que 100° C.

A la surface de la Terre, la chaleur rayonne avec un flux moyen de 0,065 Watt/m². Cette chaleur dégagée n'a pas pour origine principale le refroidissement du globe terrestre, mais provient à 90% de la désintégration des éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) contenus dans les minéraux de la croûte [1].

L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée la géothermie, quelle que soit la température de la ressource, la profondeur à laquelle on l'exploite et l'usage que l'on en fait.

I.2. Principe de la géothermie

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.[2]

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

I.3. L'utilisation de l'énergie géothermique

On distingue trois types de géothermie [3] :

- la géothermie peu profonde à très basse température (inférieure à 50°C)
- la géothermie profonde (jusqu'à 2000 m) à basse énergie (50 à 100°C), moyenne (100 à 150°C) ou haute énergie (contexte volcanique, supérieure à 150°C)
- la géothermie très profonde (de 5000 à 10000 m) à très haute température (jusqu'à 300°C)

L'utilisation géothermique est couramment divisée en deux catégories :

a. Production d'électricité.

La géothermie haute énergie ou « géothermie profonde », est une source d'énergie contenue dans des réservoirs localisés généralement à plus de 1 500 mètres de profondeur et dont la température est supérieure à 150 °C. Grâce aux températures élevées, il est possible de produire de l'électricité et de faire de la cogénération (production conjointe d'électricité grâce à des turbines à vapeur et de chaleur avec la récupération des condensats de la vapeur).

C'est au début du xxe siècle qu'une centrale géothermique de production d'électricité a été pour la première fois réalisée à Larderello (Italie). La géothermie haute température connaît actuellement un renouveau important, notamment parce que la protection contre la corrosion et les techniques de forage se sont fortement améliorées [4].

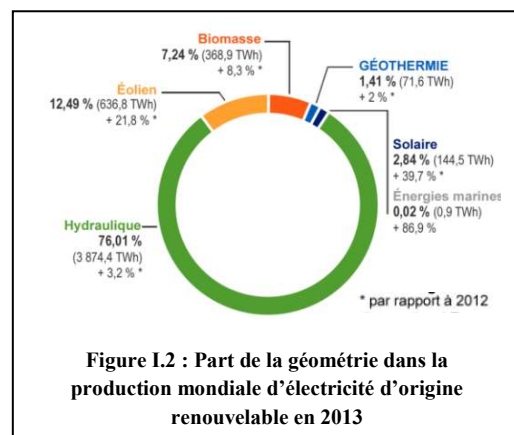
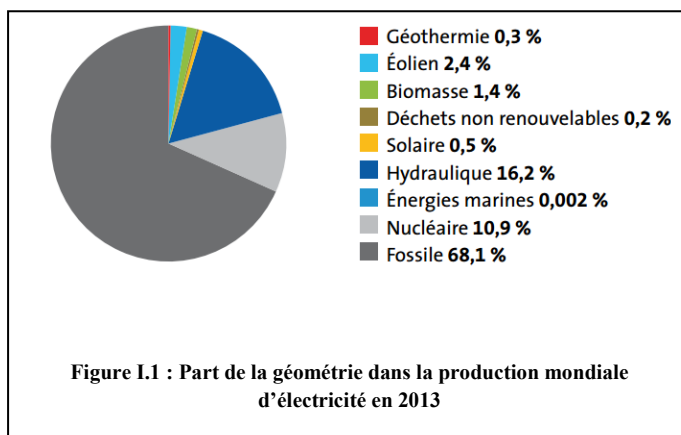
En moyenne énergie, la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire : on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre, que l'on chauffe avec l'eau géothermale. Ce fluide se charge en énergie thermique, entre en ébullition et se vaporise, faisant tourner une turbine dont le mouvement, transmis à l'alternateur, produit de l'électricité. Une centrale géothermique est donc une centrale thermique.

La production électrique d'origine géothermique dans le monde s'élève à 70,4 TWh en 2012.

Producteurs majeurs en 2012 :

- les États-Unis avec une production de 20 TWh, soit 27,9% de la production mondiale ;
- les Philippines avec 10 TWh (14,6%) ;
- l'Indonésie avec 8 TWh (11,2%).
-

1,5% : proportion d'électricité d'origine géothermique dans la production d'électricité renouvelable mondiale en 2012 [5].



b. Application directe.

La géothermie de basse et très basse énergie est utilisée pour alimenter les réseaux de chaleur (chauffage urbain).

En basse et très basse énergie, l'énergie est soutirée du sous-sol moyennant de sondes géothermiques en utilisant une pompe à chaleur. Une pompe à chaleur peut revaloriser la chaleur ambiante à relativement basse température (12°C) pour des applications à une température plus élevée (40°C) comme le chauffage des habitations ou l'eau sanitaire [6].

La pompe extrait l'énergie thermique (chaleur) d'un support (source de chaleur) à une température relativement basse et libère cette énergie thermique à une température plus élevée dans un autre support (système d'émission de chaleur). Le transport de la chaleur est assuré par un liquide (fluide caloporteur). La quantité d'énergie dont l'appareil a besoin pour ce faire est faible par rapport au rendement. 60 à 80% de l'énergie fournie par la pompe à chaleur provient de l'environnement [7].

I.4. La capacité de production géothermique

En (1990) le conseil de recherche géothermique, lors de son examen a estimé les puissances thermiques existantes dans différents pays pour l'utilisation directe à 11.385 MWt, avec une production d'énergie thermique totale de 36.000 GWht, pour un débit d'environ 80.000 kg/s et un facteur de charge moyen de 36%.

Le tableau ci dessous rassemble les données pour l'examen de 1990 dans 14 pays, dont la capacité est au-dessus de 100 MWt.

Tableau I.1 : tableau qui rassemble les données pour l'examen de 1990 dans 14 pays, dont la capacité est au-dessus de 100 MWt

Pays	Débit (kg/s)	Puissance (MWt)	Energie (GWht)	Charge(%)
Bulgarie	2647	293	770	30
Chine	9534	2143	5527	29
Tchécoslovaquie	728	105	276	30
France	2971	337	886	30
Hongrie	12155	1276	3354	30
Island	4595	774	4290	63
Italie	1520	329	1365	36
Japon	31311	3321	8730	33
Nouvelle Zealand	252	258	1763	78
Roumanie	1380	251	987	45
Ex-URSS	7722	1133	1978	30
Turquie	2012	246	625	29
U.S.A.	3355	463	1420	35
Yougoslavie	806	113	602	61
Autres	2393	343	1761	58
Total	83.381	11.385	35.906	36

Concernant les autres pays, dont les capacités vont de 1 à 93 MWt, on cite :

- Algérie (13),
- Australie (11),
- Autriche (4),
- Belgique (93),
- Canada (2),
- Colombie (12),
- Danemark (1),
- Ethiopie (38),
- Allemagne (8),
- Grèce (18),
- Guatemala (10),
- Pologne (9),
- Suisse (23),
- Tunisie (90),
- Taiwan (11).

L'augmentation de la capacité de production électrique géothermique atteint 315 MW en 2015, ce qui porte le total mondial à 13,2 GW. Il est estimé que la production d'électricité géothermique a été de 75 térawatts-heure (TWh) en 2015.

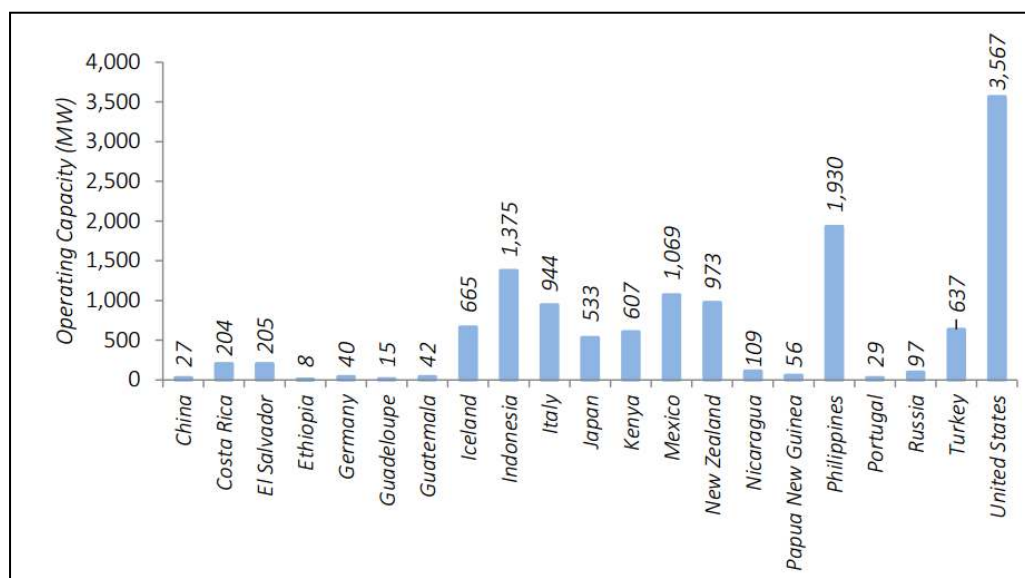


Figure I.3 : Capacité de production mondiale de géothermie en mégawatt.

NOTE : L'estimation de l'investissement mondial dans la géothermie en 2015 est de 2 milliards de dollars.

Le prix relativement bas des combustibles fossiles couplé avec le niveau élevé du risque de développement de projets, crée des conditions défavorables à l'électricité géothermique. La Turquie s'est imposée sur le marché en commissionnant près de la moitié des nouveaux ajouts mondiaux de capacités. L'utilisation directe de la géothermie (la géothermie à basse énergie) s'est élevée à 272 pétajoules (PJ) (75 TWh) d'énergie thermique en 2015 selon les estimations.

En 2015, la capacité de production croît de 1,2 gigawatt « thermique » (GWth), ce qui porte la capacité géothermique totale à 21,7 GWth. Le taux de croissance annualisé moyen de la consommation directe de chauffage géothermique a été légèrement supérieur à 3 % ces dernières années.

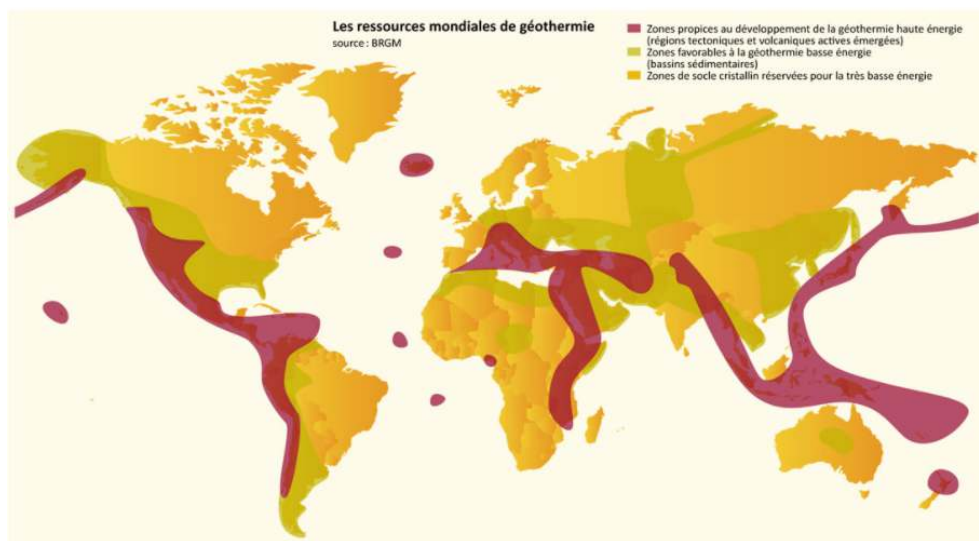


Figure I.4 : les ressources mondiales de géothermie

I.5. Coûts et prix de revient d'une installation géothermique

Le prix de revient est très difficile à estimer à l'heure actuelle puisqu'aucun projet n'a été réalisé à ce jour. On peut cependant supposer que le coût de revient potentiel se situerait aux alentours du tarif prévu par la RPC, soit 45 centimes par kWh. La rentabilité peut être améliorée par la vente de la chaleur produite, si les coûts de transport de la chaleur sont également amortis. Le prix de la chaleur provenant d'une source d'énergie renouvelable doit aujourd'hui être déterminé par rapport au prix de la chaleur «fossile».

En Suisse, les coûts de forage pour un seul puits s'élèvent à environ 20 millions de francs.

Le forage d'exploration de Triemli par exemple a coûté un montant de cet ordre de grandeur.

Les coûts pour une exploitation efficace de la géothermie s'avèrent nettement supérieurs car deux puits sont nécessaires. Pour son projet hydrothermal d'une puissance électrique prévue de 4,5 MW, la ville de Saint-Gall a demandé un prêt de 165 millions de Dollar. Cela correspond à un investissement de 37 000 Dollar par kWel avec le réseau de chaleur à distance, 17 300 Dollar par kWel hors réseau de chaleur à distance, c'est-à-dire uniquement pour les forages et la centrale géothermique.

Les perspectives énergétiques actuelles de l'OFEN chiffrent les coûts d'investissement à 7200 francs par kWel pour 2010, avec une diminution à 4700 Dollar par kWel d'ici 2050.15

Le secteur de l'énergie considère néanmoins ces estimations irréalistes, ce que confirment les chiffres du projet de Saint-Gall, cités plus haut. D'autres sources de l'OFEN tablent aujourd'hui sur un investissement de près de 23 400 francs par kWel, ce qui correspond à un prix de revient d'environ 40 centimes par kWh. Avec l'expérience et les progrès technologiques correspondants, le prix de revient pourrait chuter à long terme à 15 centimes par kWh.

I.6. Impacts sur l'environnement

Par rapport aux autres sources d'énergies utilisées, l'énergie géothermique est classée moins nocive, les changements les plus importants dus à l'utilisation de cette énergie sont : [Armannsson et Kristmannsdottir, 1992]

- Déformation de la surface terrestre,
- Baisse du niveau de la terre dû au passage du fluide dans le réservoir,
- Le bruit,
- Effets thermiques,
- Emission des gaz chimiques.

Les centrales électriques géothermiques sont considérées comme rejetant peu de CO₂. Sur l'ensemble de leur durée de vie, elles émettent en moyenne dans le monde quelque 120 grammes d'équivalent CO₂ par kWh. La géothermie est donc une technologie «propre et sûre».

En comparant avec les autres sources d'énergie, les effets sur l'environnement sont plus contrôlables, en utilisant la science et l'industrie.

I.7. Les possibilités d'utilisation de la géothermie

Si la géothermie en Algérie est de type 'moyenne température', il n'en demeure pas moins que les possibilités de son utilisation sont vastes et variées (Fig.7). Les différentes possibilités d'application peuvent aller de l'utilisation balnéothérapique, au chauffage des serres et des locaux, au séchage des produits agricoles à la pisciculture ou encore à la production électrique utilisant le procédé ORC (Organic Rankine Cycle) ou cycle binaire. Ce dernier procédé permet l'utilisation d'eau et vapeurs à des températures voisines de 140-150°C pour la production d'électricité à travers un circuit secondaire contenant un fluide organique. Les centrales géothermiques de ce type peuvent avoir des capacités de production de quelques MWe à quelques dizaines de MWe. La réalisation de ce type de centrale est possible sur certains sites du NE algérien. [8]

I.7.1 Diagramme de Lindal

LINDAL (1973) introduit un diagramme, qui est repris par Gudmundsson et al (1985) appelé DIAGRAMME DE LINDAL, qui illustre les rangs de températures, l'état du fluide et son utilisation. [9]

Température(°C)	Domaines d'utilisation	
200 et plus		Production d'électricité par méthode conventionnelle
190	Réfrigération par absorption	
180	Préparation de pâte à papier	
170	Fabrication d'eau lourde	
160	Séchage de poisson, séchage de bois	
150	Fabrication d'alumine	Production d'électricité par cycle binaire
140	Séchage de produits agricoles	
130	Évaporation	
120	Production d'eau douce par distillation	
110	Séchage de parpaings de ciment	
100	Séchage de légumes	
90	Déshydratation	
80	Chauffage urbain - chauffage de serres	
70	Réfrigération	
60	Élevage d'animaux	
50	Balnéothérapie	
40	Chauffage de sols	
30	Piscine, fermentation	
20	Pisciculture	

Figure I.5 : Diagramme de Lindal

I.8. Potentielle géothermique de l'Algérie

En Algérie, mis à part les utilisations balnéothérapies pratiquées d'ailleurs depuis les temps anciens, peu d'applications ont vu le jour.

Les calcaires jurassiques du nord algérien qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnent naissance à plus de 200 sources thermales localisées principalement dans les régions du Nord-Est et Nord-West du pays. Ces sources se trouvent à des températures souvent supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine (96°C).

Ces émergences naturelles qui sont généralement des fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m³/s d'eau chaude. Plus au sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de km². Ce réservoir, appelé communément 'nappe albiennaise' est exploité à travers des forages à plus de 4 m³/s. L'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57°C. Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albiennaise au débit total des sources thermales, cela représenterait en termes de puissance plus de 700 MWt. [8]

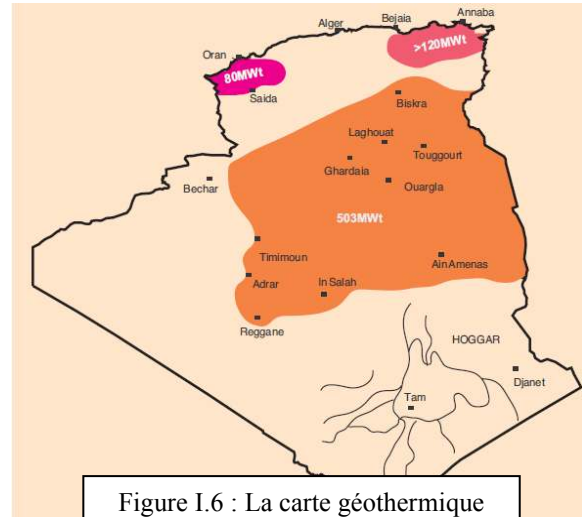


Figure I.6 : La carte géothermique schématique de l'Algérie

Tableau I.2 : Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus Secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H. Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	96	100
H. Bou Hadjar	AinTimouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	-
H. Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	-
H. Boutaleb	Setif	Chloruré sodique	3416	52	-
H. Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H. Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H. Sidi Bou Abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H. Delaa	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H. Rabi	Saida	Chloruré sodique	1524	47	-
H. Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H. Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

I.9. Utilisation de la géothermie dans le chauffage

Pour l'appliquer aux maisons individuelles, la géothermie est donc, dans la majorité des cas, assistée d'une pompe à chaleur qui va aider à fournir une température suffisante pour le chauffage. L'installation peut se faire de trois façons :

- Le captage horizontal consiste à enterrer des tubes entre 0,60 et 1,20 mètre de profondeur. Le fluide caloporteur circule dans ces tubes et capte la chaleur du sol à faible profondeur. Pour ce type d'installation, vous devez posséder un terrain dont la surface représente au moins 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer de votre logement.
- Le captage vertical est la solution privilégiée dans le cadre d'une rénovation car elle évite d'abimer une grande partie du terrain et elle est incontournable si votre terrain est petit. Grâce à un forage, les capteurs sont installés à une profondeur allant de 80 à 100 mètres. Plus coûteux, ce système est également plus efficace, notamment en période hivernale puisque la terre va beaucoup moins se refroidir en profondeur.
- Le captage sur eau de nappe consiste à placer des capteurs dans un ou plusieurs puits forés à moins de 100m de profondeur afin d'utiliser la chaleur contenu dans l'eau de nappes. Il est possible de réaliser un ou deux forages. Dans le premier cas, l'eau qui est puisée est rejetée dans un cours d'eau ou un réseau d'eaux de pluie. Dans le deuxième cas, on fore un deuxième trou pour y rejeter l'eau utilisée par la pompe à chaleur. Ce deuxième système est plus écologique et préserve la nappe.

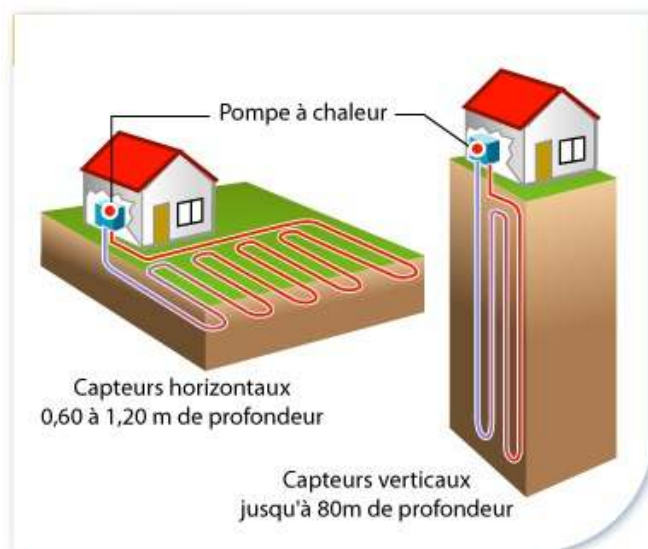


Figure I.7 : les deux principales installations de captage dans le chauffage géothermique

Dans le cas des sources thermal chaude, l'utilisation de ces procédé n'est pas nécessaire car l'eau chaude sorte des profondeurs naturellement il se fait de placer les capteurs est utilisé cette chaleur.

La chaleur de la Terre capté par ces procédé est ensuite diffusée dans le logement par les émetteurs de chaleur (**plancher chauffant ou radiateurs**) grâce à un circuit de chauffage ou d'eau chaude.

I.10. Généralité sur les plancher chauffant

I.10.1 Comparaison entre plancher chauffant et radiateurs

a. Les avantages du plancher chauffant par apport aux radiateurs

Avec une diffusion de chaleur par rayonnement, le plancher chauffant offre un grand confort thermique. La température est constante, bien répartie et uniforme dans toute la pièce. Le mode d'émission de chaleur des radiateurs par rayonnement et convection, peut entraîner un ressenti moins agréable.

Le plancher chauffant à eau chaude offre le choix de l'énergie : chaudière, pompe à chaleur ou capteurs solaires.

Un autre avantage de taille du plancher chauffant est sa totale invisibilité. Il libère les sols et les murs. Sans radiateurs, vous gagnez de la place et vous pouvez aménager plus facilement votre habitation.

Le plancher chauffant permet également de réaliser d'intéressantes économies d'énergie. Il est en effet moins coûteux de chauffer de l'eau à 45°C qu'à une température supérieure à 65°C pour des radiateurs traditionnels qui ne sont pas basse température, se que avantage les énergies renouvelable.

D'autre part, pour une même sensation de confort, vous pouvez baisser la température ambiante d'environ 2°C par rapport à un système de chauffage conventionnel, car la diffusion de chaleur par rayonnement chauffe davantage les objets que l'air.

Enfin, le plancher chauffant hydraulique permet de faire du rafraîchissement en été s'il est utilisé avec une pompe à chaleur réversible par exemple.

b. Les inconvénients du plancher chauffant par apport aux radiateurs

Toutefois, le plancher chauffant présente quelques inconvénients :

le coût de l'installation est élevé, entre 40 et 50 €/m² pour un système électrique et entre 70 et 100 €/m² pour un plancher à eau chaude. On considère en moyenne une différence

de coût de 50 €/m² entre plancher chauffant et radiateurs. Un investissement à considérer en regard des économies d'énergie possibles.

Avec la grande inertie du plancher chauffant, il faut au minimum 3 heures pour augmenter la température intérieure de quelques degrés. Cela peut créer de l'inconfort surtout en demi-saison. Les radiateurs sont plus souples et réactifs.

Le plancher chauffant demande des travaux conséquents en rénovation. Il faut réaliser une nouvelle dalle et surélever le sol de quelques centimètres, donc adapter l'ouverture des portes. Le plafond chauffant ou les plinthes chauffantes sont plus simples à mettre en œuvre et moins chers.

Certains revêtements de sol ne sont pas compatibles (plancher de bois épais ou moquette épaisse).

Enfin, dans une petite pièce comme une salle de bains, il est nécessaire d'ajouter un radiateur (sèche-serviettes par exemple).

1.10.2 Principe de fonctionnement du plancher chauffant

Le principe du plancher chauffant est novateur dans sa recherche du confort de ses utilisateurs. Le principe est simple : des tuyaux de chauffage sont posés sur un isolant lui-même posé sur une dalle en béton. Ensuite une chape vient recouvrir les tubes de chauffage. La chape aura le rôle de diffuseur d'une chaleur douce et homogène dans toute l'habitation. Cette chape sera recouverte de carrelage, de parquet ou du revêtement de votre choix. Les tubes de chauffage sont soit en matière synthétique (PE), soit en multicouche et on trouve même du cuivre recuit.

Quelle est la différence entre une dalle et une chape ?

Une dalle a pour rôle de supporter la maison, elle est constituée de ciment, de sable, de gravier et d'eau bien sûr.

Une chape vient se couler sur la dalle pour lisser celle-ci et permettre d'avoir une surface de sol totalement plane pour permettre la pose d'un revêtement de sol type carrelage par exemple.

Le plancher chauffant est compatible avec tous les générateurs de chaleur fonctionnant avec un réseau de chauffage central. Cependant les générateurs qui se combinent parfaitement avec ce type d'émetteur sont la chaudière à condensation et les pompes à chaleur air-eau et géothermique. Elles sont largement recommandées en association avec un plancher chauffant car ces générateurs fonctionnent en basse température.

I.10.3 Pourquoi les planchers chauffants doivent fonctionner en basse température ?

Les constructeurs et les pouvoirs publics ont su tirer les leçons du passé. Les planchers chauffants doivent être soumis à des normes strictes de fonctionnement et de régulation. Il n'est plus question de mettre en danger les utilisateurs de ces produits plus économes en énergie.

La norme française (NF) DTU 65.14 stipule que la température du fluide circulant dans le plancher chauffant doit être limitée à 50°C et la surface au sol en contact avec les habitants doit être inférieure à 28°C maximum. C'est pour cette raison que le plancher chauffant fonctionne en basse température. Il est important aussi de souligner que plus la surface d'échange de l'émetteur sera grande et plus la température du fluide pourra être faible.

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.

I.11. Géothermie basse température en Algérie

Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980)

En 1984 La première serre géothermique expérimentale a été installée à Hammam Meskhoutine. Le système de chauffage est constitué de deux circuits pour éviter tout entartrage dans les conduites de chauffage.

Plus tard, deux autres projets ont été réalisés respectivement à Ouargla et Touggourt : il s'agit de 18 serres agricoles couvrant une surface chauffée de près de 7200 m² utilisant l'eau de la nappe albienne.

Les résultats ont été satisfaisants tant dans la précocité que dans le rendement de la production agricole (tomates et melons).

Les projets en cours de réalisation concernent l'établissement d'un catalogue des sources thermales et d'un atlas des ressources géothermiques du Nord algérien.

L'objectif de ces deux projets est de mettre à la disposition des chercheurs et étudiants une base de données concernant les principales sources thermales et les possibilités géothermiques de l'Algérie. Ils serviront aussi de documents de base pour les touristes ou pour les investisseurs dans le choix de sites.

I.12. Réalisations et projets en cours

En Algérie:

- **M. Abouriche et al [1988] menées des études en géothermie principalement sur le Nord algérien, 'Carte Géothermique Préliminaire du Nord de l'Algérie', au 1/100 000**

Ils établissent une carte de flux de chaleur qui nous a permis d'estimer de la chaleur en place dans chaque point du territoire saharien.

- **S. Rezig, [1991, 1992] DEA, Université des Sciences et des Techniques du Languedoc, Montpellier.**

Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales.

- **S. Ouali, A. Khellaf et K. Baddari [2006] Etude géothermique du Sud de l'Algérie.**

Ils mènent des recherches sur la situation géothermique du sud algérien en se base sur les différents résultats et carte géologique précédent. Il conclue que le domaine du chauffage des serres serait très recommandé dans cette région.

- **Hakim MOHELLEBI [2014] Travaille sur le Chauffage et Climatisation par Géothermie en Kabylie.**

Des calculs ont été menés pour différentes profondeurs (3 ; 6 et 9m) pour une maison individuelle dont les déperditions thermiques hivernales et la charge frigorifique ont été évalués. Il réalise une conception qui permet l'utilisation de la chaleur géothermique dans le chauffage

- **D. Semmar, D. Lafri, A. Hamid, R. Kharchi et S. Sami [2002] Chauffage des Bungalows de Hammam Chellala par Energies Géothermiques.**

Ils ont réalisé une conception qui utilise la chaleur des sources de Hammam Meskhoutine pour le chauffage du bungalow hammam chellala.

II.1. Introduction

Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

Le présent chapitre a pour objectif de proposer une solution pour le système de chauffage et d'établir le bilan thermique des bungalows du complexe de Hammam Chellala.

II.2. Système proposé pour le chauffage des bungalows

Pour le transfert de la chaleur d'eau chaude des sources jusqu'au plancher En propose un système avec 3 surcuit :

- Le 1^{er} circuit : une pompe qui sert a la récupération d'eau des sources chaudes dans un bassin.
- Le 2^{ème} circuit : circulation d'eau chaude du bassin jusque cuve de stockage
- Le 3^{ème} circuit : sert au chauffage du plancher.

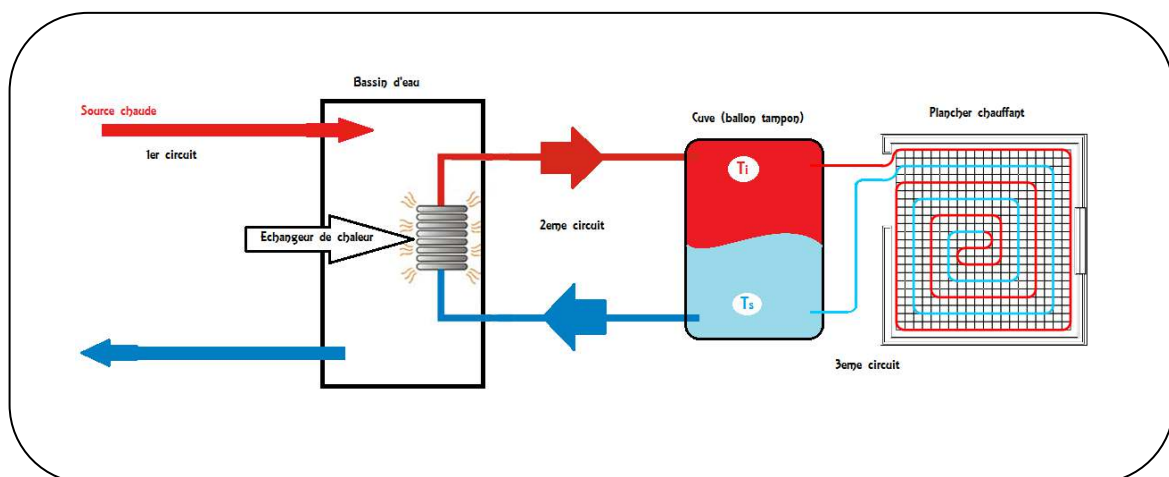


Figure II.1 : système proposé pour le chauffage du bungalow de hammam chellala.

L'objectif est de déterminer la température de départ d'eau pour le chauffage T_i (entrée plancher chauffant) qui nous permet d'obtenir une température de chauffage satisfaisante.

II.3. Les étape à suivre pour l'étude

- Choix des surfaces nécessaires pour l'installation du plancher chauffant, pour cela il faut :
 - a. Calculer les coefficients de transmission surfaciques des bungalows,
 - b. Calculer les déperditions thermiques des bungalows.
 - c. Calculer les puissances nécessaires pour chaque bungalow.
- Détermination de la température de départ d'eau.
- Détermination des débits nécessaires pour assurer le chauffage.
- Faire une liste des problèmes possible de cette installation et proposer des solutions.

II.4. Hypothèses

Pour bien étudier le problème on admet les hypothèses suivantes :

- La température est homogène dans toutes les pièces chauffées.
- La température des sources chaudes est constante.
- Le régime d'étude est stationnaire.

II.5. Présentation de la région d'étude

II.5.1 Cadre géographique

La région d'étude se situent dans le secteur nord Est Algérien (Zone climatique B), qui comprend les vallées entre les chaînes côtières et l'Atlas tellien.

Les caractéristiques géographiques des localités de Hammam CHELLALA sont données sur le tableau ci-dessous :

Tableau II.1 : les caractéristiques géographiques des localités de Hammam Chellala

Localité	Longitude	Latitude	Altitude	Température de base pour le chauffage
Guelma	7°26' E	36°28'	270 m	1
Souk Ahras	7°58' W	36°17'	655 m	-1,5
Constantine	6°37' E	36°22'	660 m	0

C'est une zone où prédomine un climat méditerranéen caractérisé par des vents humides et des pluies.

II.5.2 Les sources chaudes de Hammam CHELLALA

La plupart des sources chaudes prennent naissance sur la rive droite de l'oued BOU HAMDANE à quelques Km en amont du confluent de celui-ci avec l'oued SEYBOUSSE face à l'imposant dôme calcaire du Dj. DEBAR, allongé de l'est à l'ouest. Les sources sont réparties en deux groupes :

Le groupe inférieur, dit groupe de la cascade et du plateau des cones à des altitudes variant de 290 à 310m

Le groupe supérieur, ou groupe des ruines romaines, à des altitudes variant de 335 à 370m..

II.5.3 Données climatiques

Températures :

La température de l'air est douce, sur le littoral, les moyennes des semestres froid (Nov-Avr) et chaud (Mai à oct) sont respectivement 14° et 23°. A mesure qu'on s'éloigne du littoral, l'écart de température entre le jour et la nuit devient plus sensible, surtout par suite de l'abaissement des minima des semestres froids et du relèvement des maxima des semestres chauds.

Le tableau suivant donne ces valeurs pour les différentes zones envisagées dans l'étude précédente et pour le mois le plus chaud et le mois le plus froid.

Tableau II.2 : Valeurs des différentes températures dans les zones étudiées pour le mois le plus chaud et le mois le plus froid

Mois le plus chaud (Juillet ou Aout) Températures						Mois le plus froid (Janvier) Températures				
Poids d'eau (g/kg) air sec	ti	t	(t+T)/2	T	Ts	Ti	t	(t+T)/2	T	Ts
12,6	15	19	26,5	34	41,5	1	5	10	15	20

- T moyenne de tous les maxima du mois
- t moyenne de tous les minima du mois
- Ts moyenne des maxima mensuels extrêmes
- ti moyenne des minima mensuels extrêmes.

II.5.5 Données expérimentales établies par le C.S.T.B :

Une série d'enregistrements de température a été réalisée pendant les années 59-60-61 à l'intérieur de locaux occupés ou vides dans des bâtiments de conceptions variées situés en Algérie, dans des régions très différentes par leur climat.

Hiver

A l'intérieur de locaux non chauffés, orientés au Nord, à l'Est ou à l'Ouest et dont les baies vitrés restent fermées, la température varie peu pendant la journée (moins de 1°).

Pendant un hiver normal, elle a pour valeur minimale la température θ_{int} à la quelle elle est égale à $\pm 1^\circ$ pendant au moins vingt jours.

$$\theta_{int} = (t+T)/2 - (t-t_i)/2$$

t_i : moyenne des minima mensuels extrême du mois le plus froid.

$(t+T)/2$ est la température moyenne du mois

A l'intérieur de locaux non chauffés dont les baies vitrées de taille normale sont exposées au sud et bien ensoleillées, nous avons constaté que la température intérieure était à peu près de 2° supérieur à θ_{int} avec une légère pointe aux environs de midi.

II.5.5 Caractéristiques climatiques moyennes suivant la zone B

Tableau II.3 : Caractéristiques du mois le plus froid

Température minimale Quotidienne	Température moyenne Quotidienne	Ecart diurne	Variabilité	Température extérieur De basse
5	10	10	4	2

Température intérieur de base :

Exposition Est, Ouest et Nord : 8°C
Exposition Sud : 8°C

L'étude climatique nous a permet de déterminer :

- Température de base extérieur ($T_{bext} = 2^\circ\text{C}$)
- Température de base intérieur ($T_{bint} = 8^\circ\text{C}$)

II.6. Etude architecturale :

L'étude architecturale nous a orientés sur la position des bungalows et la composition des parois.

II.6.1 Plan du lot des bungalows de Hammam Chellala

Le plan de Hammam Chellala qui était réalisé en 1963, est constitué 4 lots identiques et chaque lot contient 7 bungalows.

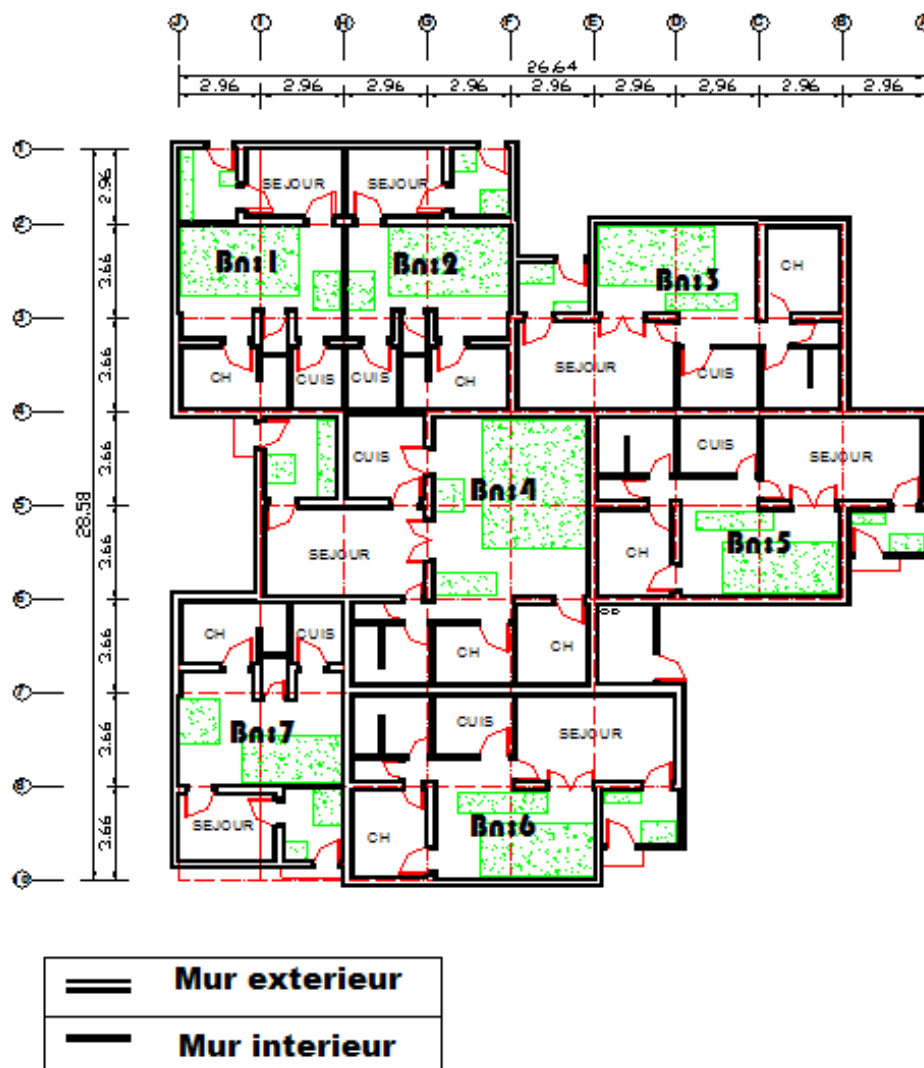
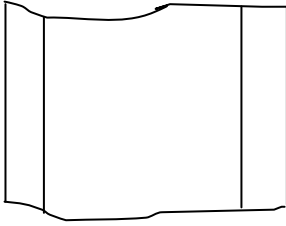
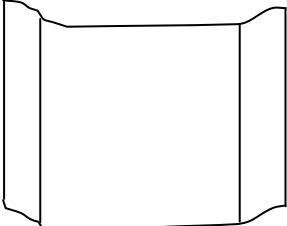
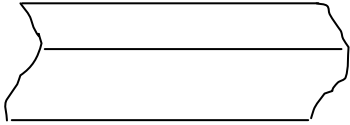
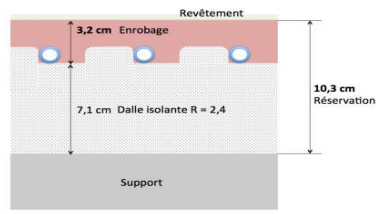


Figure II.2 : Plan d'un lot de Hammam Chellala

II.6.2 Composition des parois

La composition des parois se résume dans ce tableau :

Tableau II.4 : la composition des parois des bungalows

Désignation et représentation	Résistance	Code	Epaiss [m]	λ [w/m ² K]	R [m ² K /w]
<p>Mur extérieur</p>  <p>1 2 3</p>	<p>Super. Int</p> <p>1- Enduit de plâtre</p> <p>2- Béton plein</p> <p>3- Enduit extérieur</p> <p>Super. Ext</p>	<p>1/hi</p> <p>Plat</p> <p>BPLE</p> <p>ENDU</p> <p>1/he</p>	<p>-</p> <p>0,01</p> <p>0,3</p> <p>0,02</p> <p>-</p>	<p>-</p> <p>0,35</p> <p>1,75</p> <p>1,15</p> <p>-</p>	<p>0,110</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>0,060</p>
<p>Mur Intérieur</p>  <p>1 2 3</p>	<p>Super. Int</p> <p>1- Enduit de plâtre</p> <p>2- Béton plein</p> <p>3- Enduit plâtre</p> <p>Super. Ext</p>	<p>1/hi</p> <p>Plat</p> <p>BPLE</p> <p>Plat</p> <p>1/he</p>	<p>-</p> <p>0,01</p> <p>0,17</p> <p>0,01</p> <p>-</p>	<p>-</p> <p>0,35</p> <p>1,75</p> <p>1,35</p> <p>-</p>	<p>0,110</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>0,060</p>
<p>Plancher haut</p>  <p>2</p> <p>1</p>	<p>Super. Int</p> <p>1- Béton plein</p> <p>2- Etanchée</p> <p>Super. Ext</p>	<p>1/hi</p> <p>BPLE</p> <p>ET</p> <p>1/he</p>	<p>-</p> <p>0,2</p> <p>0,01</p> <p>-</p>	<p>-</p> <p>1,75</p> <p>0,23</p> <p>-</p>	<p>0,09</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>0,05</p>
<p>Plancher bas</p>  <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>	<p>- Carrelage</p> <p>- enrobage</p> <p>- Dalle isolante (polystyrène)</p> <p>- béton</p>	<p>CAR</p> <p>MOR</p> <p>SAB</p> <p>BET</p>	<p>0,02</p> <p>0,032</p> <p>0,071</p> <p>0,2</p>	<p>1,05</p> <p>1,15</p> <p>0,3</p> <p>1,75</p>	

II.7. Calcul des coefficients de transmission surfacique :

On calcul k pour chaque paroi, on a la formule générale :

$$k = \frac{1}{R_T} \text{-----(II.1)}$$

et

$$R_T = \Sigma(e_i / \lambda_i) \text{-----(II.2)}$$

Mur extérieur :

$$R = 0,11 + 0,01/0,35 + 0,3/1,75 + 0,02/1,15 + 0,06$$

$$R = 0,387 \text{ m}^2\text{k/w} \Rightarrow \mathbf{K = 2,583 \text{ w/m}^2\text{k}}$$

Mur intérieur :

$$R = 0,11 + 0,01/0,35 + 0,17/1,75 + 0,01/0,35 + 0,06$$

$$R = 0,324 \text{ m}^2\text{k/w} \Rightarrow \mathbf{K = 3,08 \text{ w/m}^2\text{k}}$$

Les planches :

On calcul le coefficient de transmission thermique pour le planché Bas (PB) et le planché haut (PH).

Plancher Haut :

$$R = 0,09 + 0,2/1,75 + 0,01/0,23 + 0,05 = 0,29$$

$$\mathbf{K = 3,44 \text{ m}^2\text{k/w}}$$

Plancher Bas :

$$R = 0,02/1,05 + 0,032/1,15 + 0,071/0,3 + 0,2/1,75 = 0,397$$

$$\mathbf{K = 2.51 \text{ (m}^2\text{k/w)}}$$

Le coefficient surfacique d'échange h_i du plancher chauffant est en moyenne :

$$\mathbf{h_i = 11.6 \text{ (W/m}^2\text{.K)} \quad [12]}$$

II.8. Détermination de la température ambiante moyenne du local

Le plancher chauffant se comporte comme un grand radiateur au sol. La chaleur, diffusée par rayonnement, est homogène dans toute la surface de la pièce.

Ce mode de chauffage permet d'obtenir la même sensation de bien-être à 18°C qu'avec un autre type de chauffage à 20°C (sécurité thermique). Un abaissement d'un degré de la température ambiante générant 7% d'économie d'énergie (source Adème).

Pour assurer la température de local chauffé souhaité il faut assurer une puissance (en watt/m²) nécessaire pour couvrir tout les déperditions du local à cette température toute en respectant la température limite de la surface du plancher qui est de 28°C maximum (on peut monter jusqu'à 30°C). [10]

On obtient la température de surface de sol de la manière suivante :

$$T_{\text{surf}} = T_i + P_w / 11,6 \text{ ----- (II.3)}$$

T_{surf} = Température de surface de sol

T_i = Température intérieure du local

P_w = Puissance en Watt par m²

On essaiera dans notre travaille d'atteindre une température de local de 18°C dans toute les pièces.

$$\text{Donc } \Delta T_{\text{ext}} = 18 - 2 \implies \Delta T_{\text{ext}} = 16$$

$$\Delta T_{\text{int}} = 18 - 8 \implies \Delta T_{\text{int}} = 10$$

À noter : Si la température s'avère trop basse dans telle ou telle pièce, le concepteur peut l'améliorer de différentes façons : densifier localement le réseau de tubes, adapter la conductivité thermique du recouvrement...

II.9. Choix de la surface d'installation du plancher chauffant

Solution A

On propose en premier, une installation qui utilise les deux surface des chambres et séjours comme des surfaces diffusif pour chaque bungalow.

Pour la 1ère solution en calcule les déperditions des deux pièces dans le bungalow n°1 pour déterminer la puissance nécessaire. [13]

II.9.1 Calcul des déperditions surfaciques chambre et séjour du bungalow N°1

a. Déperditions surfaciques :

La formule générale :

$$\phi_s = K.S.\Delta T \quad (W) \text{-----} (II.4)$$

◆ Séjour

Tableau II.5: Déprédations séjour bungalow 1.

Désignation		Dimension		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	L(m)	H(m)	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	3,47	2,8	9,716	X	9,716	2,583	16	401.54
Mur Int	Est	2,77	2,8	7,756	X	7,756	3,08	10	238.88
Mur Ext	Ouest	2,77	2,8	7,756	1,8	5,956	2,583	10	153.84
Mur Ext	Sud	3,47	2,8	9,716	1,8	7,916	2,583	10	204.47
Port Ext	Ouest	0,9	2	1,8	X	1,8	3	10	54
Port fenêtre S ext	Sud	0,9	2	1,8	X	1,8	3,2	10	57.6
PH	Nord	3,47	2,77	9,612	X	9,612	3,44	16	529.04
							Ds _s = 1639 W		

◆ Chambre

Tableau II.6: Déprédations chambre bungalow 1.

Désignation		Dimension		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	L(m)	H(m)	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	2,77	2,8	7,756	- 1,8	5,956	2,583	10	153.84
Mur Int	Est	2,51	2,8	7,028	X	7,028	3,08	10	216.46
Mur Ext	Ouest	2,51	2,8	7,028	X	7,028	2,583	10	181.53
Mur Ext	Sud	2,77	2,8	7,756	+ 2,52	10,276	2,583	16	424.49
Port fenêtre S ext	Nord	0,9	2	1,8	X	1,8	3,2	10	57.6
PH		2,77	2,51	7	+ 1,8	8,8	3,44	16	484.35
							Ds _c = 1518 W		

b. Déperditions par renouvellement d'air total du lot :

La formule générale :

$$DR = 0,34 q_R (T_{ai} - T_e) \text{ (W)} \text{----- (II.5)}$$

$$q_R = q_v + q_{inf} \quad \text{tel que :} \quad q_v=0 \text{ (Ventilation) ----- (II.6)}$$

Donc :

$$DR = 0,34 \Sigma q_{inf} (T_{ai} - T_e) \text{----- (II.7)}$$

$$q_{inf} = \Sigma m \Sigma A e_m \text{----- (II.8)}$$

Dans notre cas on utilise :

Hauteur (o – 6m) $\Rightarrow e_m = 8,9$ pour (exposition au vent et tirage thermique)

Type	M	k	Code
Porte simple	6	3	P
Porte fenêtre simple	4,2	3 ,2	PFS
Porte fenêtre double	4,2	4,2	PFD

Séjour :

$$\text{Porte : } q_{inf} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$$

$$\text{Porte fenêtre simple : } q_{inf} = 4,2(0,9 * 2) * 8,9 = 67,284$$

$$D_R = 0,34 (96,12+67,284) * 16 = 888$$

$$D_{RS} = 888 \text{ W}$$

Chambre :

$$\text{Porte fenêtre simple : } q_{inf} = 4,2(0,9 * 2) * 8,9 = 67,28$$

$$D_R = 0,34 (67,28) * 16 = 366$$

$$D_{RC} = 366 \text{ W}$$

c. Déperditions à travers les liaisons

$$D_{L\text{Total}} = 0,12 * D_s \text{ total} \text{-----} \text{ (II.9)}$$

Séjour

$$D_{L\text{Total}} = 0,12 * 1639.37 = 196 \text{ W}$$

Chambre

$$D_{L\text{Total}} = 0,12 * 1518.27 = 182 \text{ W}$$

Déperditions total

$$D_{\text{totalSéjour}} = 1639 + 888 + 196 = 2725 \text{ W}$$

$$D_{\text{totalchambre}} = 1518 + 411 + 182 = 2112 \text{ W}$$

d. Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$$P_w = \text{déperditions total} / \text{surface du plancher chauffant} \text{-----} \text{ (II.10)}$$

$$\text{Séjour : } P_w = 2725 / 8.8 = 310 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Chambre : } P_w = 2112 / 8.8 = 240 \text{ W/m}^2$$

II.9.2 Interprétation des résultats de la solution A

Si on installe le plancher chauffant dans les deux pièces seulement on ne peut pas couvrir les déperditions pour la température voulue car la puissance nécessaire est très grande et donne une température de surface de plancher supérieure à la norme utilisée.

Dans ce cas on va étudier la possibilité de l'installation sur toutes les surfaces possibles des bungalows, pour augmenter la surface de diffusion par rapport à la surface de perte.

Solution B

II.9.3 Calcul des déperditions total de chaque bungalow

Bungalows N°1:

Tableau II.7: déperditions surfaciques du bungalow 1

Désignation		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	14.61	1.8	12.81	2,583	16	529.41
Mur Int	Est	26.82	X	26.82	3,08	0	0
Mur Ext	Ouest	26.82	X	26.82	2,583	16	1108.42
Mur Ext	Sud	7.75	X	7.75	2,583	16	320.29
Port Ext	Nord	1,8	X	1,8	3	16	86.4
PH	-	57.04	X	57.04	3,44	16	3139.48

$D_{s,s} = 5184 \text{ W}$

Surface utilisé pour le chauffage = 50 m²

Déperdition par ventilation

Porte : $q_{inf} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$

$D_R = 0,34 (96.12) * 16 = 523$

$D_{RC} = 523 \text{ W}$

Déperditions à travers les liaisons

$D_L \text{ Total} = 0,12 * 5184 = 622 \text{ W}$

Déperditions total

$D_{total} = 5184 + 523 + 622 = 6330 \text{ W}$

Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$P_w = 6330 / 50 = 126 \text{ W/m}^2$

Bungalows N°2:

Tableau II.8: déperditions surfaciques du bungalow 2

Désignation		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	14.61	1.8	12.81	2,583	18	657.8
Mur Ext	Est	7.75	X	7.75	2.583	18	360.33
Mur Int	Ouest	26.82	X	26.82	3.08	0	0
Mur Ext	Sud	14.61	X	14.61	2,583	0	0
Port Ext	Nord	1,8	X	1,8	3	18	97.2
PH	-	57.04	X	57.04	3,44	18	3139.48

$$D_{S_s} = 4255 \text{ W}$$

Surface utilisé pour le chauffage = 50 m²

Déperdition par ventilation

$$\text{Porte : } q_{\text{inf}} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$$

$$D_R = 0,34 (96.12) * 16 = 523$$

$$D_{RC} = 523 \text{ W}$$

Déperditions à travers les liaisons

$$D_L \text{ Total} = 0,12 * 4255 = 510 \text{ W}$$

Déperditions total

$$D_{\text{total}} = 4255 + 523 + 510 = 5305 \text{ W}$$

Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$$P_w = 5305 / 50 = 105 \text{ W/m}^2$$

Bungalows N°3 :

Tableau II.9: déperditions surfaciques du bungalow 3

Désignation		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	31.19	1.8	29.49	2,583	16	1214.62
Mur Ext	Est	19.54	X	19.54	2,583	16	807.55
Mur Ext	Ouest	18.6	X	18.6	2,583	0	0
Mur Ext	Ouest	4.2	X	4.2	2,583	16	173.57
Mur Ext	Sud	31.2	X	31.2	2,583	0	0
Port Ext	Nord	1,8	X	1,8	3	16	86.4
PH	-	74.15	X	74.15	3,44	16	4081.22

$D_{S_s} = 6363 \text{ W}$

Surface utilisé pour le chauffage = 70 m²

Déperdition par ventilation

Porte : $q_{inf} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$

$D_R = 0,34 (96.12) * 18 = 523$

$D_{RC} = 523 \text{ W}$

Déperditions à travers les liaisons

$D_{L\text{Total}} = 0,12 * 6363 = 763 \text{ W}$

Déperditions total

$D_{\text{total}} = 6363 + 523 + 763 = 7649 \text{ W}$

Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$P_w = 7649 / 70 = 109 \text{ W/m}^2$

Bungalows N°4 :

Tableau II.10: déperditions surfaciques du bungalow 4

Désignation		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	31.19	X	31.19	2,583	16	1412.28
Mur Int	Est	9.716	X	9.716	2.583	16	443.51
Mur Ext	Ouest	19.54	1.8	17.74	2,583	16	733.16
Mur Ext	Sud	31.19	X	14.61	2,583	0	0
Port Ext	Ouest	1,8	X	1,8	3	16	86.4
PH	-	109.81	X	109.81	3,44	16	6043.94

$D_{S_s} = 8719 \text{ W}$

Surface utilisé pour le chauffage = 100 m²

Déperdition par ventilation

Porte : $q_{inf} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$

$D_R = 0,34 (96.12) * 16 = 523$

$D_{RC} = 523 \text{ W}$

Déperditions à travers les liaisons

$D_{L\text{Total}} = 0,12 * 8719 = 1046 \text{ W}$

Déperditions total

$D_{\text{total}} = 8719 + 523 + 1046 = 10288 \text{ W}$

Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$P_w = 10288 / 100 = 103 \text{ W/m}^2$

Bungalows N°5:

Tableau II.11: déperditions surfaciques du bungalow 5

Désignation		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	9.716	X	9.716	2,583	16	401.54
Mur Ext	Est	12.54	X	12.54	2.583	16	518.25
Mur Int	Est	5.6	X	5.6	3.08	16	275.97
Mur Ext	Ouest	19.54	X	19.54	2,583	0	0
Mur Ext	Sud	31.19	X	31.19	2,583	16	1289.02
Mur Int	Sud	8.12	1.8	6.32	3.08	16	311.45
Port Ext	Nord	1,8	X	1,8	3	18	86.4
PH	–	74.15	X	74.15	3,44	18	4081.22

$D_{S_s} = 6963 \text{ W}$

Surface utilisé pour le chauffage = 70 m²

Déperdition par ventilation

Porte : $q_{inf} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$

$D_R = 0,34 (96.12) * 18 = 523$

$D_{RC} = 523 \text{ W}$

Déperditions à travers les liaisons

$D_{L\text{Total}} = 0,12 * 4211 = 835 \text{ W}$

Déperditions total

$D_{total} = 6963 + 523 + 835 = 8322 \text{ W}$

Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$P_w = 8322 / 70 = 118 \text{ W/m}^2$

Bungalows N°6:

Tableau II.12: déperditions surfaciques du bungalow 6

Désignation		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	9.716	X	9.716	2,583	16	401.54
Mur Ext	Est	12.54	X	12.54	2.583	16	518.25
Mur Int	Est	5.6	X	5.6	3.08	16	275.97
Mur Ext	Ouest	19.54	X	19.54	2,583	0	0
Mur Ext	Sud	31.19	X	31.19	2,583	16	1289.02
Mur Int	Sud	8.12	1.8	6.32	3.08	16	311.45
Port Ext	Nord	1,8	X	1,8	3	18	86.4
PH	–	74.15	X	74.15	3,44	18	4081.22

DS_s = 6963 W

Surface utilisé pour le chauffage = 70 m²

Déperdition par ventilation

Porte : $q_{inf} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$

$D_R = 0,34 (96.12) * 18 = 523$

$D_{RC} = 523 \text{ W}$

Déperditions à travers les liaisons

$D_{L\text{Total}} = 0,12 * 4211 = 835 \text{ W}$

Déperditions total

$D_{total} = 6963 + 523 + 835 = 8322 \text{ W}$

Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$P_w = 8322 / 70 = 118 \text{ W/m}^2$

Bungalows N°7:

Tableau II.13: déperditions surfaciques du bungalow 7

Désignation		Surface (m ²)			K	ΔT	DEP
Parois	Orientation	Total	Ouvrant	Nette	/	/	/
Mur Ext	Nord	7.75	X	7.75	2,583	16	320.29
Mur Int	Est	26.31	X	26.31	3,08	0	0
Mur Ext	Ouest	26.31	X	26.31	2,583	16	1087.34
Mur Ext	Sud	14.61	X	14.61	2,583	16	603.8
Port Ext	Nord	1,8	X	1,8	3	16	86.4
PH	-	57.04	X	57.04	3,44	16	3139.48

$$D_{s_s} = 52377 \text{ W}$$

Surface utilisé pour le chauffage = 50 m²

Déperdition par ventilation

$$\text{Porte : } q_{\text{inf}} = 6(0,9 * 2) * 8,9 = 96,12$$

$$D_R = 0,34 (96.12) * 16 = 523$$

$$D_{RC} = 523 \text{ W}$$

Déperditions à travers les liaisons

$$D_L \text{ Total} = 0,12 * 52377 = 628 \text{ W}$$

Déperditions total

$$D_{\text{total}} = 52377 + 523 + 628 = 6388 \text{ W}$$

Puissance du plancher nécessaire pour le chauffage

$$P_w = 6388 / 50 = 127 \text{ W/m}^2$$

II.9.4 Interprétation des résultats de la solution B

La puissance maximum calculée est de 127 W/m^2 dans le bungalow n°7

La puissance minimum calculée est de 103 W/m^2 dans le bungalow n°4

La puissance moyenne de tous les bungalows est de 115 W/m^2

Cette puissance (115) nous permet d'avoir une température moyenne du local de 18°C avec une température de surface de 27.9°C ce qu'est dans les normes du plancher chauffant (DTU 65.8)

$$T_{\text{surf}} = (P_w / h_i) + T_L \text{-----(II.11)}$$

$$T_{\text{surf}} = (115.72 / 11.6) + 18 = 27.9$$

Puissance choisie pour le plancher : 115 W/m^2

II.10. Température du fluide chauffant

Le choix de la température de départ du fluide n'est pas aussi facile qu'il y paraît. La température de départ va influencer la température superficielle du sol et les émissions thermiques hautes du plancher chauffant, donc, la longueur de la boucle et par conséquent le pas. Dans tous les cas, la température maximale du fluide ne devra pas excéder 50°C (DTU 65.8) [10]

La chute la plus utilisée : 8°C .

La chute de température détermine en quelque sorte la capacité d'émission de la surface chauffante. Elle se mesure aux collecteurs aller et retour du réseau.

Pour chaque pièce, la capacité d'émission surfacique dépend de l'écart entre la température moyenne du fluide (T_m) et la température d'ambiance désirée :

- ✓ plus la chute est faible, plus grand est l'écart moyen entre ces deux données,
- ✓ plus grand est l'écart, plus le débit et la perte de charge sont importants.

Le bon compromis : couvrir les déperditions thermiques du local sans aller au-delà de la perte de pression disponible aux collecteurs (sinon baisse de rendement et surconsommation énergétique pour le rétablir).

II.11. Calcule de la température de départ

$$P_w = k * (T_L - T_m) \text{-----(II.12)}$$

$$T_m = T_i - (\text{chute}/2) \text{-----(II.13)}$$

$$\text{Donc } (\text{chute}/2) = 8/2 = 4$$

$R=1/k$: La résistance thermique du revêtement de sol, située au-dessus du tube (16 mm), ne doit pas dépasser $0,15 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.

$$R = (0.02/1.05) + (0.0304/1.15) + (1/11.6) = 0.13 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$$

$$k = 1/0.13 = 7.69 \text{ W}/\text{K}.\text{m}^2$$

$$T_L - T_m = 115/7.69 = 15 \quad T_m = 18 + 15 = 33^\circ\text{C}$$

$$T_i = T_m + (\text{chute}/2) = 33+4 = 37^\circ\text{C}$$

II.12. Le débit de circulation du fluide

Le débit (q) est la quantité de flux passant dans le tuyau en un temps donné, Pour le transfert thermique, les professionnels privilégient le litre/heure ou litre/minute.

Si l'on n'a pas le débit nécessaire au transfert thermique, impossible d'équilibrer un réseau de chauffage !

Formule usuelle pour le calcul du débit :

$$q [\text{litre}/\text{minute}] = (\text{Surface} [\text{m}^2] * P_w [\text{W}/\text{m}^2] * 60) / (C_{p_{\text{eau}}} [\text{Joul}/\text{litre}.\text{K}] * \Delta T) \text{---- (II.14)}$$

q : Débit d'eau à circuler (litre/minute).

P_w : Puissance thermique à véhiculer (Watt/m^2).

$C_{p_{\text{eau}}}$: Chaleur spécifique de l'eau ($4180 \text{ Joul}/\text{litre}.\text{K}$).

ΔT : Chute de température (8°C).

Exemple :

$$\text{Bungalow 1 chambre} \quad Q = 115 * 9 * 60 / 4180 * 8 = 1.85 \text{ (litre/minute)}$$

$$\text{Bungalow 3 séjour} \quad Q = 115 * 19 * 60 / 4180 * 8 = 3.91 \text{ (litre/minute)}$$

Dans le bungalow 1 en compte 2 boucle de 10 m^2 , 2 de 5 m^2 et une de 20 m^2 le débit totale du bungalow 1 sera $10.6 \text{ litre}/\text{minute}$.

Tableau II.14 : Les débits nécessaires pour chaque bungalow

Local	Débit nécessaire (litre/minute)
Bungalow 1	10.6
Bungalow 2	10.6
Bungalow 3	14.4
Bungalow 4	20.6
Bungalow 5	14.4
Bungalow 6	14.4
Bungalow 7	10.6
Total bungalows	95.6

Un débit qui sera diffusé sur toutes les boucles (1 boucle par pièce) par le bien d'un collecteur qui régleme les débits calculé qui convient a chaque boucle (pièce).



Figure II.3 : Collecteur équipé de vannes de réglages de débit, de débitmètre de contrôle avant raccordement a la chaufferie

II.13. La vitesse de circulation

La vitesse de circulation préconisée : 0,80 à 0,85 m/s

La puissance du circulateur est augmentée (consommation accrue) et, à une certaine vitesse, le réseau émet des bruits gênants : valeur minimale : 0,75 m/s, valeur maximale admissible : 1 m/s.

II.14. Perte de charge et dimensionnement plancher chauffant

La perte de charge est une baisse de pression subie par le fluide à chaque mètre parcouru, ainsi qu'aux points singuliers (turbulences...).

Pour maintenir le débit nécessaire à l'installation, il faut au préalable définir la perte de charge de référence (circuit le moins favorisé).

Deux niveaux de calcul :

- la perte de charge linéique (J)
- la perte de charge singulière (Z)

Les mesures se pratiquent pour chaque surface (ou boucle) de plancher chauffant ainsi qu'aux éventuels radiateurs. En les additionnant, on obtient la valeur de base permettant d'équilibrer l'installation.

Formule : Pertes J + Z = perte de charge de base (en mmCE ou mmH₂O).

II.15. La cuve de stockage du fluide plancher chauffant

Le ballon tampon permet de stocker l'eau chaude issue de la production en surplus de chaleur de la chaudière dans le but d'avoir un débit constant et aussi de limiter les démarrages trop fréquents de la pompe

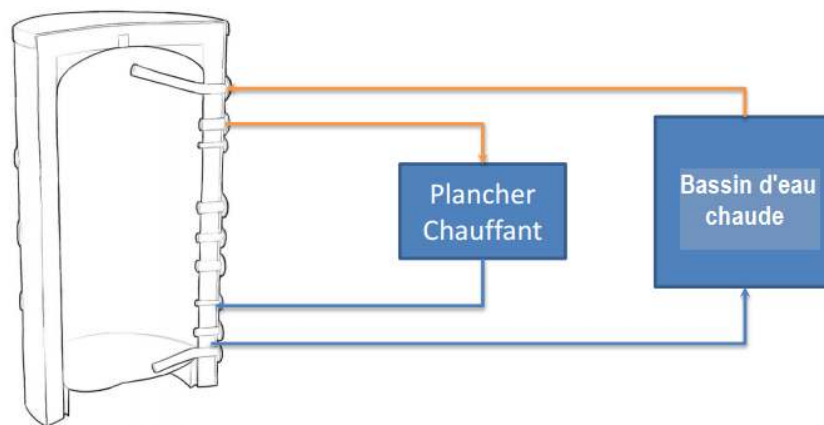


Figure II.4 : Le schéma du ballon tampon utilisé

- Un circuit d'eau entre le bassin et le tampon
- Un circuit d'eau entre le tampon et le chauffage

II.16. Les pertes de charge dans les conduites

Il est important de connaître les pertes de charge due au transfert d'eau du bassin jusqu'au ballon tampon, cela nous aide de déterminer la température d'eau à la sortie de l'échangeur qui nous permet de faire le choix de la pompe à installer ainsi que l'échangeur utilise.

L'émission de chaleur linéique des tubes isolés est donnée par l'expression suivante [11] :

$$p = k * (T - Ta) \text{ (W/m)} \text{----- (II.15)}$$

T : température du tube (égale à celle du fluide) °C

Ta : température dans les locaux traversés °C

Dte : diamètre extérieur du tube m

k est le coefficient de transmission linéique (exprimé en W/m/°C) qui vaut :

$$1 / k = (R' / 2\pi) + (1 / (\pi \cdot De \cdot h)) \text{ et } R' = \sum_i R_{ki} \text{----- (II.16)}$$

Rki est la résistance thermique de la couche i. Elle vaut

$$R_{ki} = (\ln(De/Di)) / \lambda \text{ (m}^{\circ}\text{C/W)} \text{----- (II.17)}$$

Où λ est la conductivité thermique du matériau (en W/m/°C), De et Di étant respectivement les diamètres extérieur et intérieur de l'isolant exprimés en m.

En général il n'y a qu'une seule couche d'isolant, et on néglige la résistance du tube si bien que R' se calcule facilement à partir des valeurs De et Di **de l'isolant**.

Enfin, le coefficient h est le coefficient d'échange superficiel. Il s'exprime en W/m²/°C et vaut :

- tubes verticaux

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 2,21 \cdot (T - Ta)^{0,25} \text{ (W/m}^2\text{/}^{\circ}\text{C)} \text{----- (II.18)}$$

- tubes horizontaux

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 1,32 \cdot ((T - Ta) / De)^{0,25} \text{ (W/m}^2\text{/}^{\circ}\text{C)} \text{----- (II.19)}$$

II.17. Les problèmes possibles de cette installation

- L'accumulation du calcaire autour de l'échangeur sur le bassin, ce qui provoque le mal fonctionnement de l'échangeur.
- Les pertes de charge élevées des conduites du au vent froid.
- La température très élevée de l'eau dans le bassin.

II.18. Solutions proposé

- Pour le calcaire la solution la plus connue est le traitement d'eau dans le bassin. Mais le choix de l'échangeur jouera un rôle aussi.
- Pour les pertes de charge dans les conduites nécessite une bonne isolation.
- Pour la température d'eau du bassin on peut utiliser un système de refroidissement basé sur la convection avec l'air extérieur.

II.19. Conclusion

Dans ce chapitre on a établi des calculs qui nous permettent d'espérer une réussite de cette installation dans les conditions réelles.

La possibilité d'installer un plancher chauffant comme système de chauffage dans les bungalows de Hammam Chellala permettra à l'Algérie de croire plus à la géothermie vu la réputation de ces bungalows en Algérie. Ce qui augmente l'investissement dans cette technologie.

III.1. Introduction

Pour une vision plus réaliste des résultats du chapitre précédent, il est intéressant de faire une simulation numérique en utilisant les données du chapitre précédent.

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.

Nombreuses de problématiques industrielles exigent des techniques de simulation innovantes, comme pour le procédé de chauffage.

COMSOL Multiphysics combine puissance et souplesse pour simuler des applications impliquant une ou plusieurs physiques. Avec des possibilités de couplage illimitées. Dans l'optique d'aider les organismes industriels et de recherche innovants, COMSOL a développé une ligne de produit complète, à la fois conviviale pour le débutant et extensible pour les experts.

III.2. Description du logiciel

COMSOL Multiphysics 4.3a, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, ainsi que multiples phénomènes physiques modélisées en PDE. Développé initialement comme une toolbox de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin de géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

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

III.3. Hypothèses

- Les phénomènes physiques qui influent sur les bungalows sont :
 - La conduction comme mode de transfert à travers tous les solides (murs, port ...),
 - La convection naturelle sur les faces des murs,
 - Le rayonnement entre les faces intérieures des murs,
 - Une source de chaleur de 115 W/m².K sur la face inférieure du plancher bas.

- L'étude s'effectuera en régime temporel pour nous permettre de connaître le temps de réponse.

III.4. 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

III.5. Le choix du modèle d'étude

A l'ouverture de ce logiciel on découvre l'interface figure qui nous permet de choisir la dimension de l'espace à étudier ainsi que le modèle d'étude (la physique d'étude) et pour finir le type d'étude (stationnaire ou temporel).

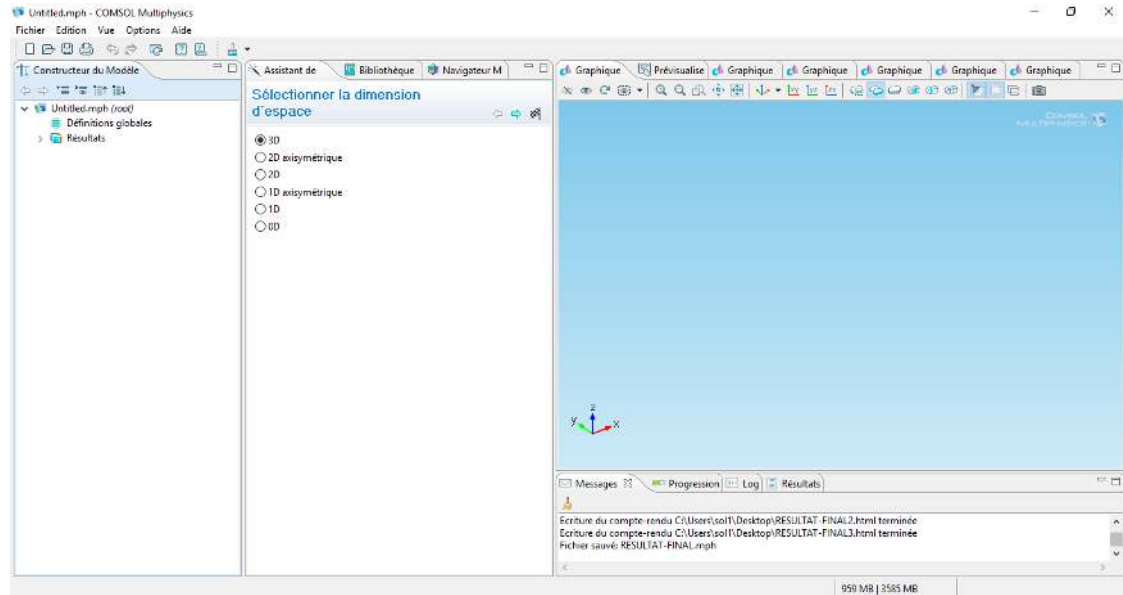


Figure III.1 : Interface du logiciel COMSOL Multiphysics

Choix de modèle

- Dimension : 3D
- Physique : Transfert de chaleur avec rayonnement de surface a surface
- Régime : temporel

III.6. Définition de la géométrie

Une fois le mode choisi, l'interface graphique s'ouvre. On doit déterminer le plan géométrique du problème.

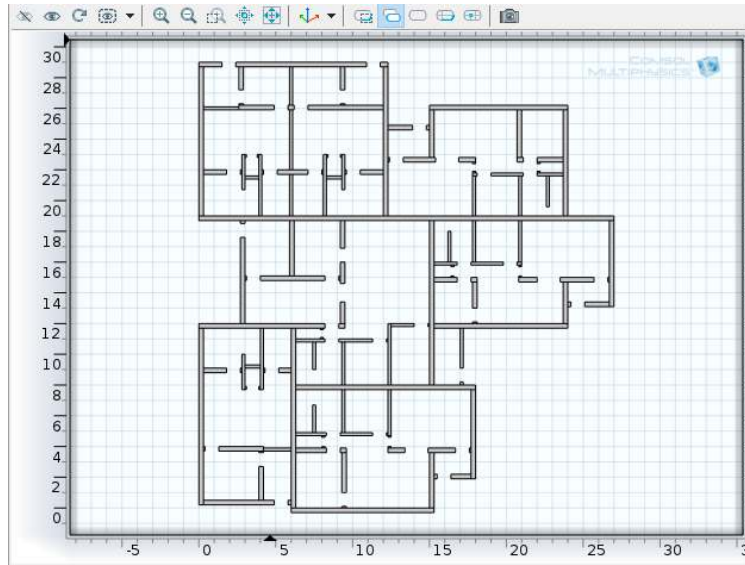


Figure III.2 : la plan coupe (x,y) du lot de bungalow.

La géométrie définit concrètement l'espace où sont résolues les équations. Les équations et les conditions initiales sont définies sur les sous domaines de la géométrie, de même pour les conditions aux limites.

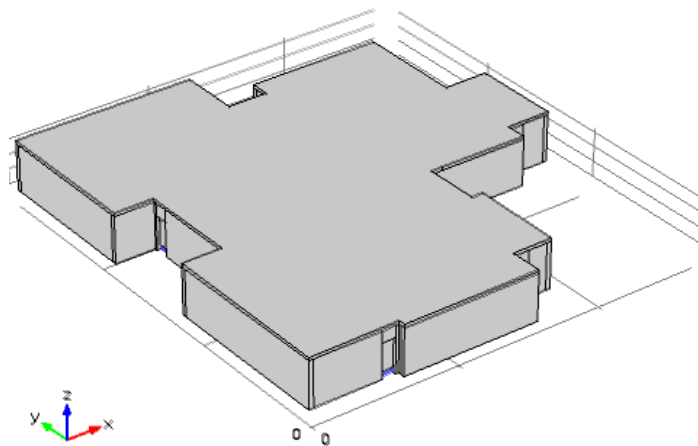


Figure III.3 : Une géométrie qui représente le lot des bungalows étudié

III.7. Introduction des propriétés des matériaux 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.

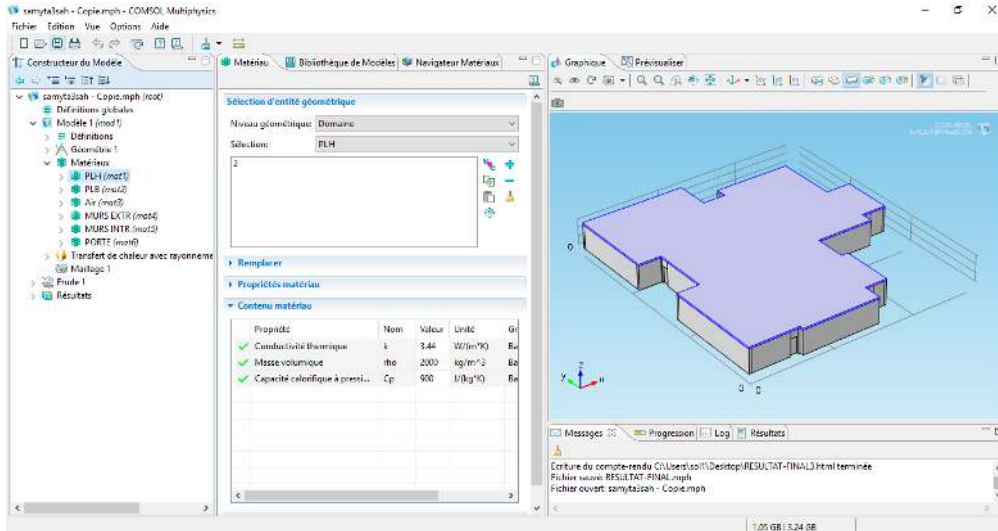


Figure III.4 : Définitions des parois et choix des matériaux (plancher haut).

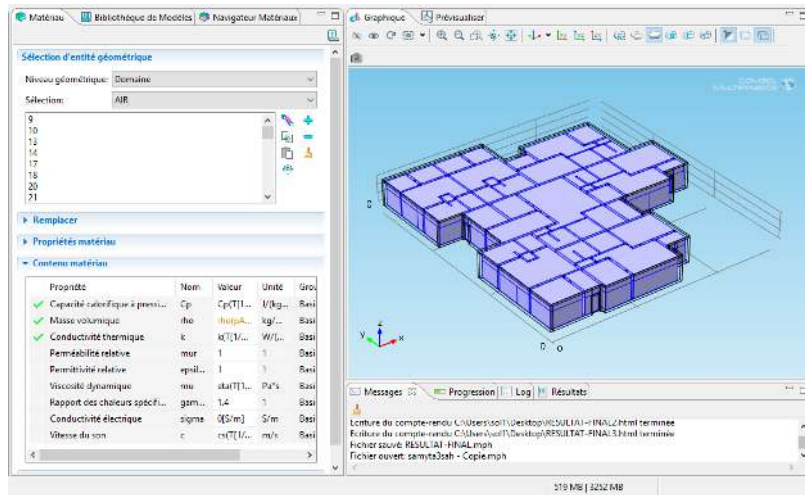


Figure III.5 : Définitions des parois et choix des matériaux (air).

Les valeurs introduites pour chaque domaine :

Domaine	épaisseur (m)	k (W/m ² .K)	Masse volumique (Kg/m ³)	Cp (J/Kg.K)
Plancher haut	0.21	3.44	2000	900
Plancher bas	0.05	7.69	2300	900
Murs extérieur	0.33	2.583	2300	850
Murs intérieur	0.19	3.08	2300	850
Portes	0.05	3	500	1000

III.8. Les conditions sur les domaines

Il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions et de donner des valeurs de condition aux limites pour chaque domaine sélectionné.

Transfert de chaleur dans les solides :

En sélectionne tout les domaines pour cette option, ca nous permet d'étudier le transfert de chaleur par conduction a travers les murs.

Equations

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad \text{---(III.1)}$$

Opacité des domaines :

Tous les domaines sont opaque sauf le groupe des domaines AIR qui représente l'air qui circule a l'intérieure des bungalows.

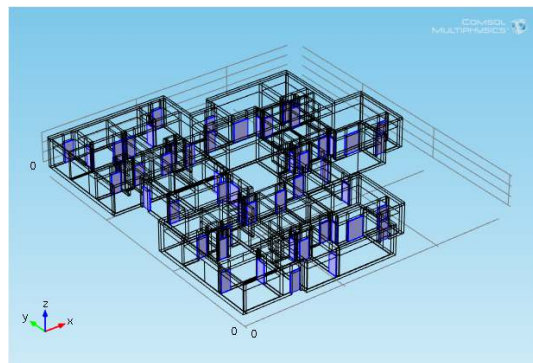


Figure III.6: La sélection des domaines qui sont opaque

Convection ente les murs et l'extérieur :

L'option Refroidissement convectif nous permet d'introduire les surface qui sont en contact avec l'air extérieur ainsi que les coefficients de convection h_{ext} .

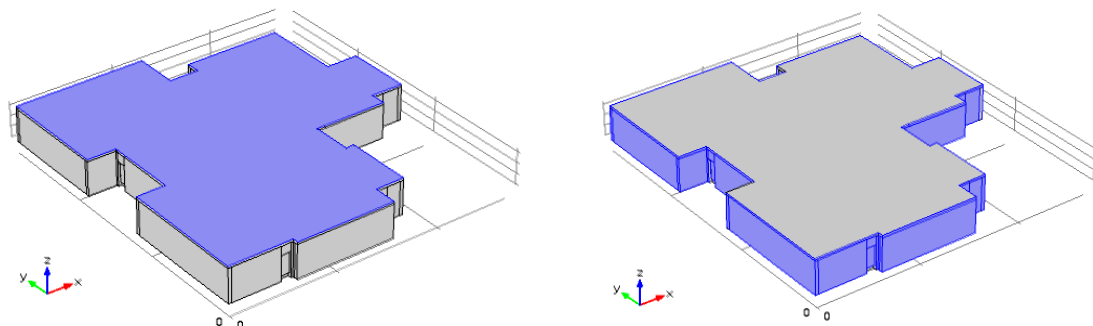


Figure III.7: Condition aux limites extérieures des murs.

Equations :

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = h \cdot (T_{\text{ext}} - T) \quad \text{--- (III.2)}$$

Valeurs entré :

Coefficient de transfert de chaleur 16 [W/m2.K] (murs) et 20 [W/m2.K] (plancher haut)
 Température extérieur 275.15 [K]

Rayonnement de surface à surface :

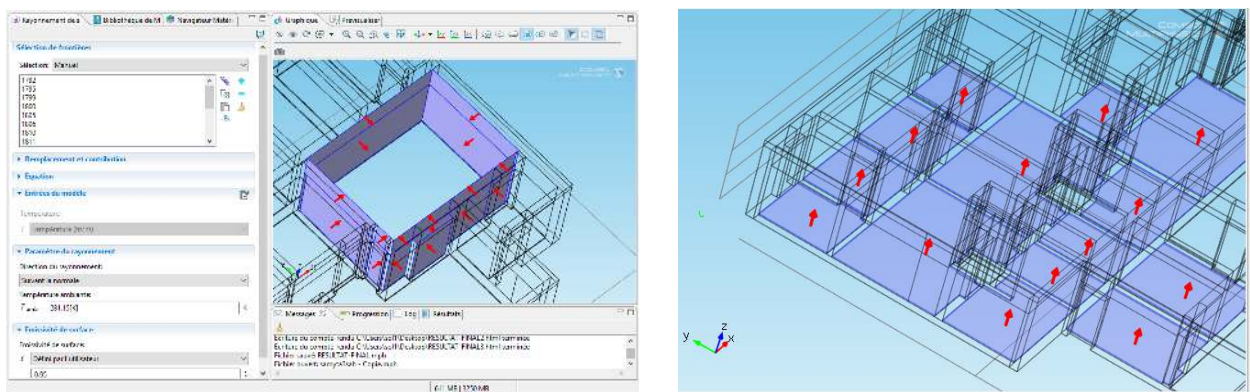


Figure III.8 : Les surfaces diffusives du rayonnement.

Equations :

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = \epsilon (G - \sigma T^4) \quad \text{--- (III.3)}$$

$$G = G_{m(j)} + F_{\text{amb}} \sigma T_{\text{amb}}^4 + G_{\text{ext}} \quad \text{--- (III.4)}$$

$$(1 - \epsilon) G = j - \epsilon \sigma T^4 \quad \text{--- (III.5)}$$

Valeurs enregistré :

Température ambiante	281.15 [K]
Emissivité de surface	0.95
Indice de réfraction du milieu transparent	1
Méthode de rayonnement de surface-à surface	Hémicube
Niveau de discrétisation	Linéaire
Dépendance de l'émissivité à la longueur d'onde	Constant

III.9. Maillage

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.

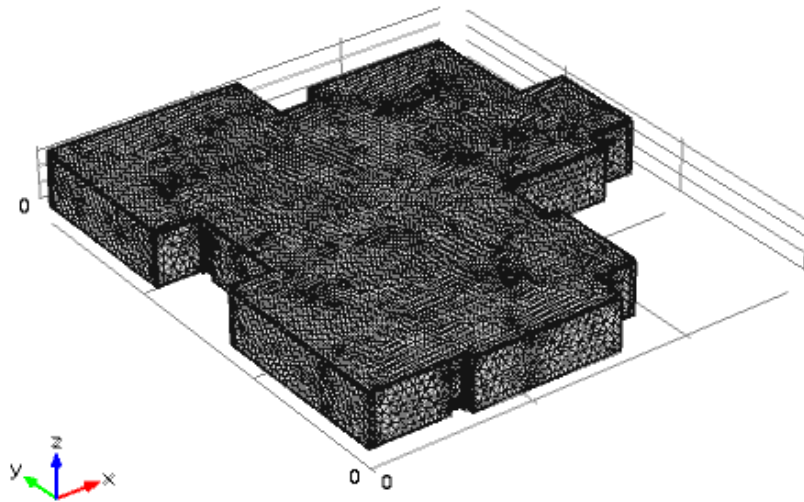


Figure III.9 : Maillage de la géométrie.

Tableau III.1 : Valeurs et statistiques du maillage

Réglages	
Nom	Valeur
Taille d'élément maximale	2.93
Taille d'élément minimale	0.527
Résolution de la courbure	0.6
Résolution des régions étroites	0.5
Taux de croissance d'élément maximum	1.5
Statistiques de maillage	
Propriété	Valeur
Qualité minimale des éléments	3.249E-4
Qualité moyenne des éléments	0.6087
Éléments tétraèdres	244562
Éléments triangles	89124
Éléments d'arêtes	15818
Éléments ponctuels	2493

III.10. Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est nécessaire de savoir que :

- La résolution se fait en régime temporel.
- 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

III.11. Résultats

a. Effet de conduction :

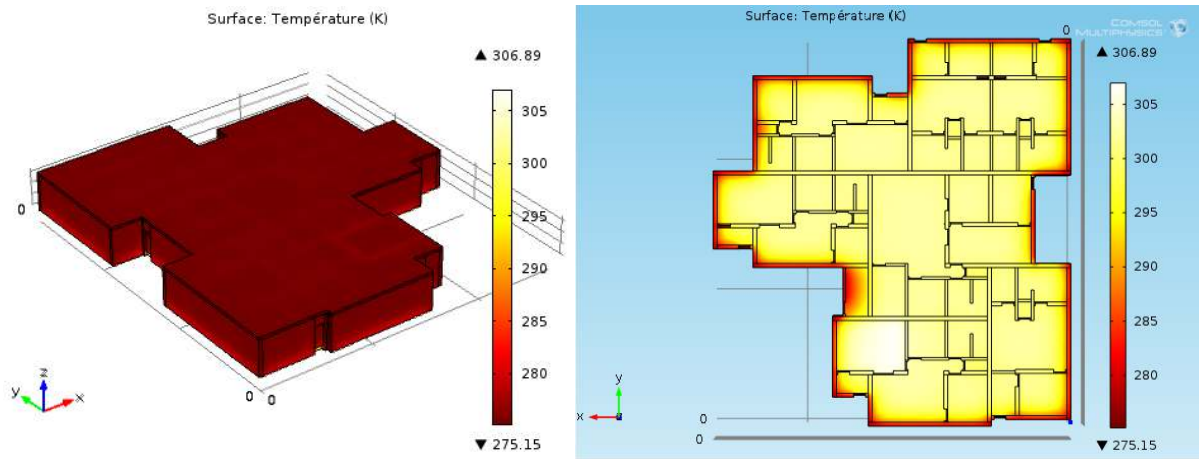


Figure III.10 : Vision thermique du lot des bungalows.

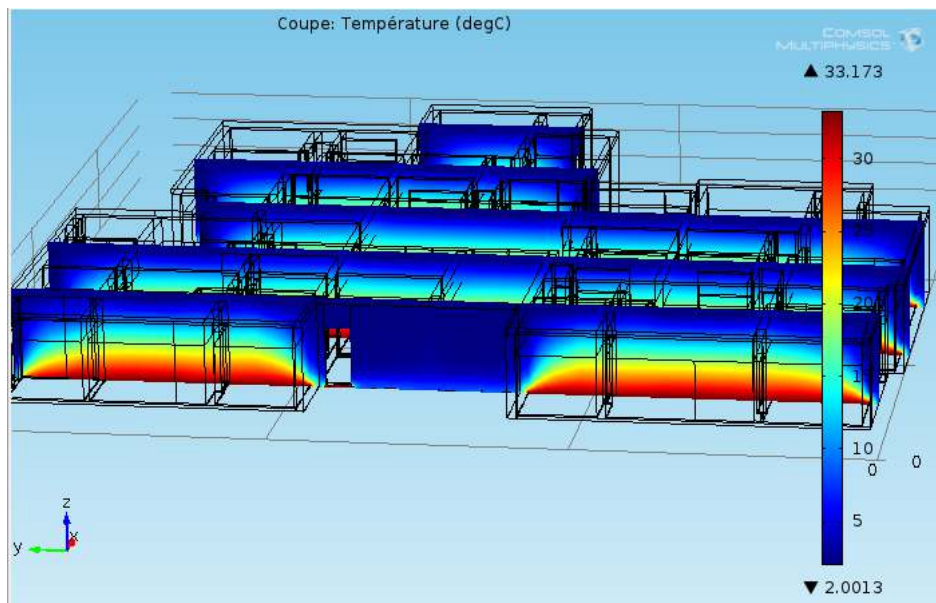


Figure III.11: Coupe sur l'axe x,z qui représente la distribution de température par conduction.

Discussion :

La température varie entre 33°C et 4°C dans tout le lot de bungalows, mais dans le domaine Air elle varie entre 28°C au plancher bas jusqu'à 8°C au plafond.

Evolution temporel de la température par conduction :

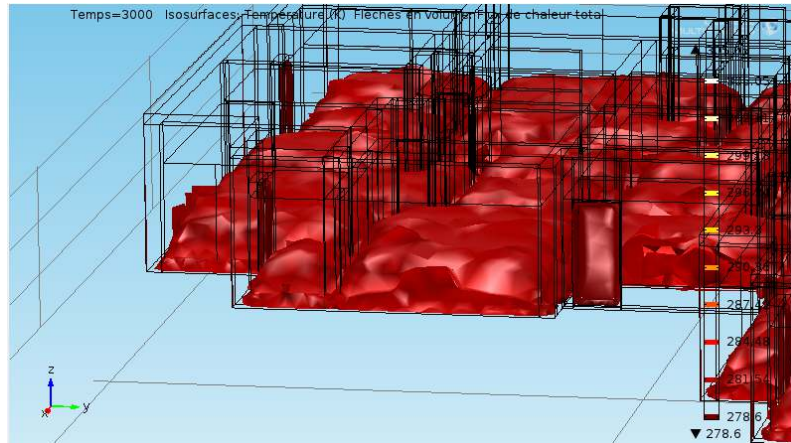


Figure III.12 : Distribution de température dans le bungalow 1 (50 minutes).

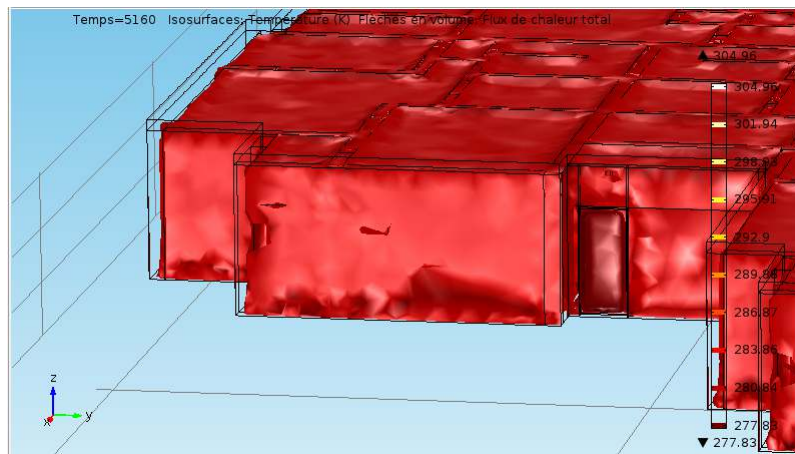


Figure III.13 : Distribution de température dans le bungalow 1 (1 heure 25 minutes).

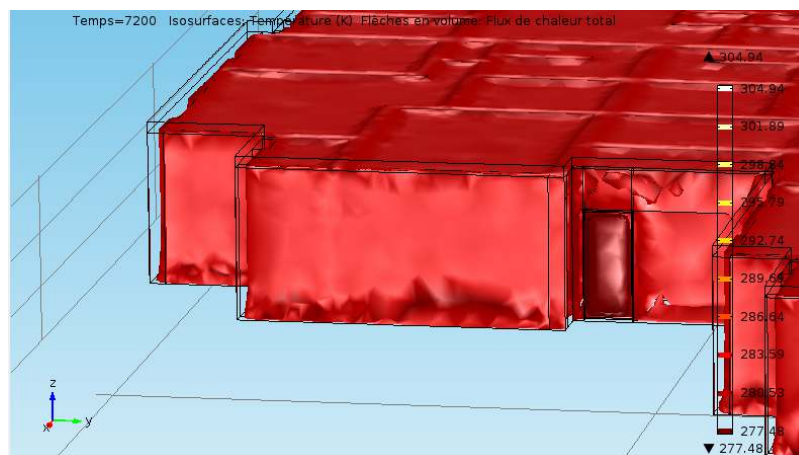


Figure III.14 : Distribution de température dans le bungalow 1 (2 heures).

Discussion :

Pendant les première 50 minute la température est encore en phase d'évolution, du plancher chauffant vers le haut jusque'a la minute 86 (1 heure 25 minute) ou elle semble commencer a se stabiliser.

b. Effet de rayonnement :

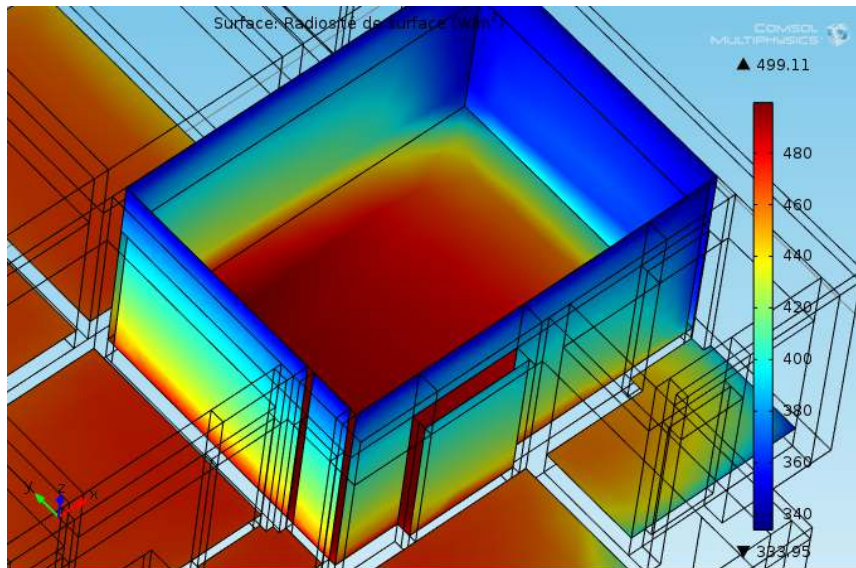


Figure III.15 : Effet de rayonnement sur le séjour du bungalow 6.

Discussion :

En vois clairement qu'il y a un transfert de chaleur du plancher qui émie au mure se qui a augmenter la température des murs.

c. Effet de convection a l'intérieur des pièces :

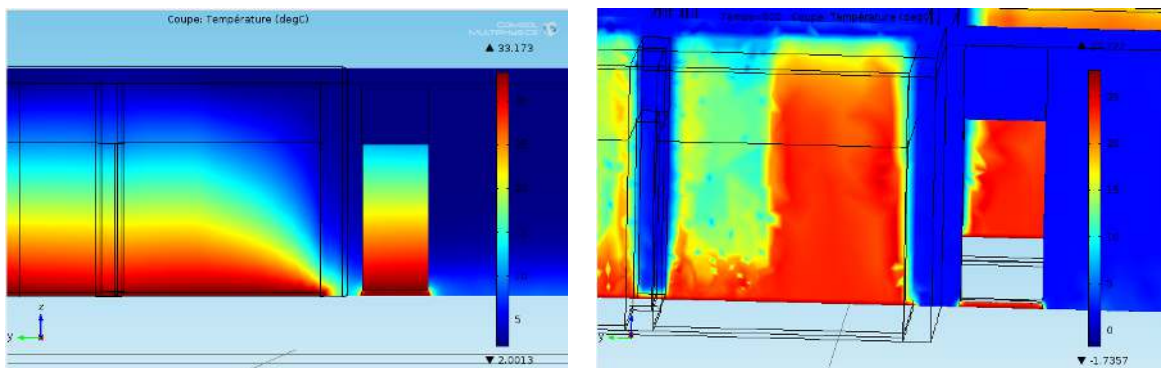


Figure III.16 : coupes comparatif qui montrent l'effet de la convection à l'intérieur dans la chambre du bungalow n°1

Discussion

La différence de température de l'air entre le haut et le bas fait que l'air circule vers le haut (principe de la thermodynamique). Ce qui nous donne une température intérieure plus uniforme.

d. Vision final de la distribution de température :

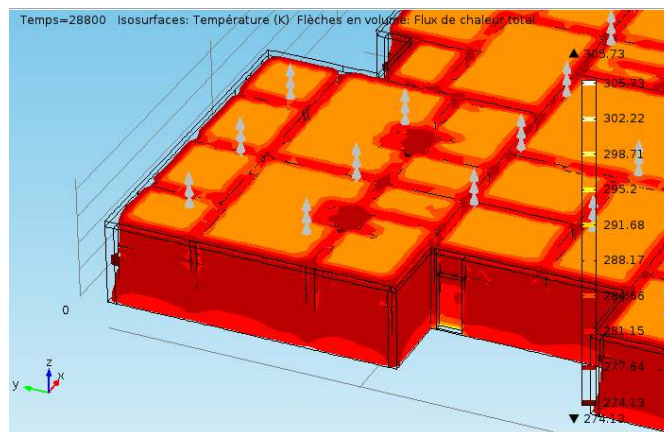


Figure III.17 : Vue 3D sur l'isosurface de la température a l'intérieur des bungalows en K.

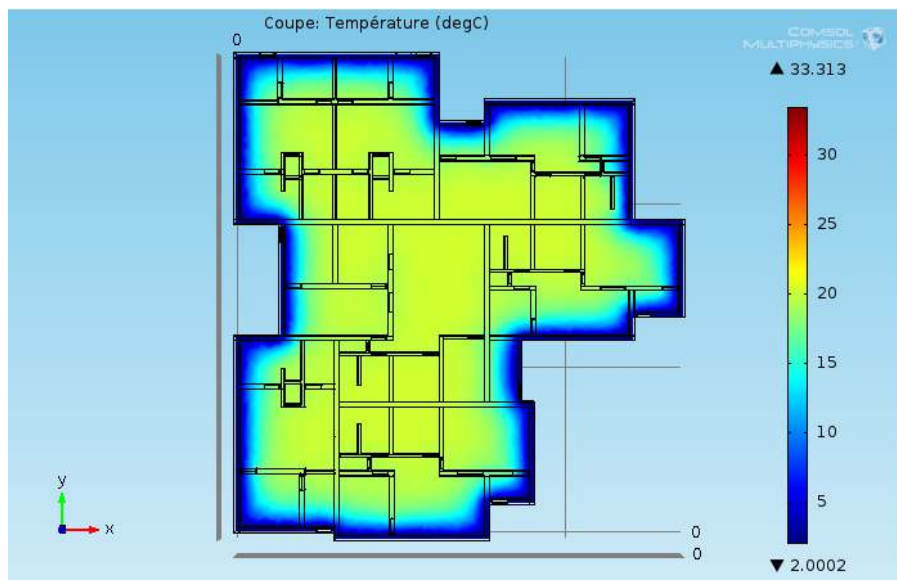


Figure III.18 : Coupe sur l'axe x,y à mi-hauteur (1.5m) de la distribution de la température sur les bungalows

Discussion

Les Figure III.17 et III.18 sont pris a un temps ou l'évolution de la distribution de la température est devenue stable (au-delà de 1 heure 25 minutes), En vois que la température attienne les 15°C au plafond et elle est moins importante près des murs.

e. Effet de l'épaisseur du plancher sur la température :

On a refait la simulation avec un changement unique de l'épaisseur du plancher chauffant.

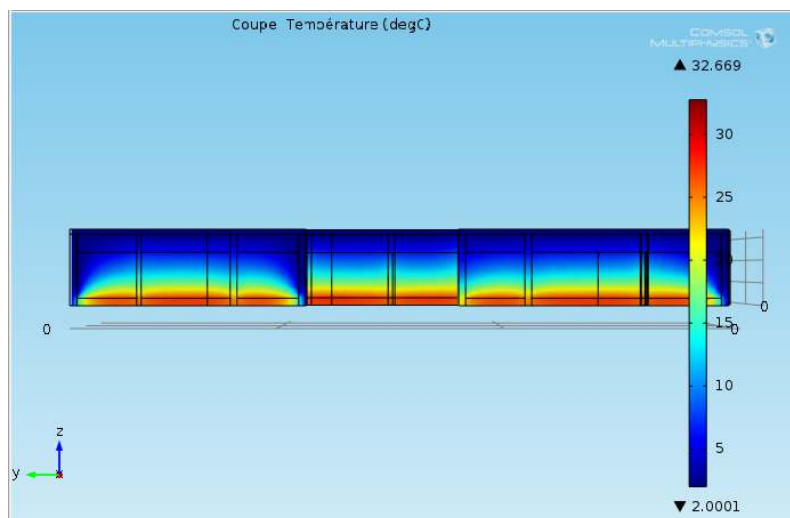


Figure III.19 : Coupe sur l'axe x,z qui représente la distribution de température par un plancher d'épaisseur de 0.1m

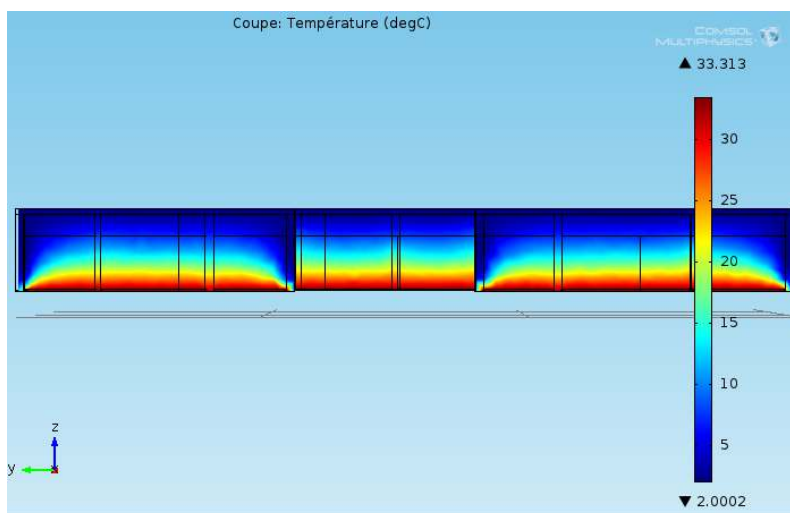


Figure III.20 : Coupe sur l'axe x,z qui représente la distribution de température par un plancher d'épaisseur de 0.05m

Discussion

La température émise par le plancher de 0.5m d'épaisseur est plus grande. Le plancher de 0.1m absorbe plus de chaleur et émet moins.

III.12. Interprétation des résultats

Première chose à remarquer est l'effet de la convection naturelle sur la face extérieure des murs externes qui refroidit les murs et les mène vers une température très proche de la température d'extérieur 2°C (Figure).

Dans la figure III.11 on observe que la distribution verticale de la température diminue, hors elle atteint sa valeur maximum dans la face inférieure du plancher bas 33°C cette chaleur se transfère vers le haut par conduction pour atteindre les 28°C.

Les Figures III.12 – III.13 – III.15 montrent que le temps nécessaire à la stabilisation de la température est de 1 heure 25 minutes.

Les Figures III.17 et III.18 montrent que la température moyenne des bungalows tourne autour de 18°C à 20°C maximum.

Les lois de transfert de la chaleur ne suffisent pas à nous donner la vision réelle de la distribution de la chaleur à cause de la négligence du mouvement de l'air dans les pièces des bungalows.

III.13. Conclusion

La simulation par COMSOL nous permet de confirmer des résultats obtenus lors du chapitre précédent et nous donne un aperçu meilleur sur le transfert de chaleur dans les bungalows.

Les paramètres qui influent sur la température moyenne des locaux sont : l'épaisseur et l'émissivité du plancher, la vitesse d'écoulement d'air due à la convection entre plancher et plafond, et la convection entre les murs et l'air extérieure.

La température moyenne des locaux trouvée avec cette simulation est de 19°C ce qui indique que la simulation exécutée et les calculs faits au 2^{ème} chapitre sont très proches de la réalité.

Références

- [1]**Bertani R.**: World geothermal generation 2001_2005:state of the art. Proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24_29 April 2005
- [2] **Centrale géothermique de Nesjavellir** en Islande
- [3]**Dickson M. H. & Fanelli M. (eds.)**: Geothermal energy:utilization and technology. UNESCO Publ., Paris, 205 pp, 2003
- [4] Point sur les travaux dans les domaines scientifique et technique [archive] Sur le site sultz.net.
- [5] BP Statistical Review of World Energy, Juin 2014
- [6]**Haering M.**: Deep Heat Mining: development of a cogeneration power plant from an enhanced geothermal system in Basel, Switzerland. IGA News_letter, 58: 4_6, 2004
- [7]**Lemale J. & Jaudin F.**: La géothermie, une énergie d'avenir. Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies Ile_de_France (ARENE),1998
- [8]**FEKRAOUI A.** (CDER Bouzareah) Chargé de Recherche, Chef de Division Géothermie Bulletin des Energies Renouvelables - N°4 Décembre 2003
- [9] **B. Lindal**, "Review of Industrial Applications of Geothermal Energy and Future Considerations", Geothermics 21, No. 5/6, (1992) 591
- [10] Extrait du CD-reef version 126 (Edition 2001.4), exporté par hervé Document NF P 52-303-1 (DTU 65.8) : Exécution de planchers chauffants à eau chaude utilisant des tubes en matériau de synthèse noyés dans le béton - Cahier des clauses techniques (12/2001)
- [11]**Roger Cadiergues** EMISSION DE CHALEUR DES TUYAUX. Formules proposées
- [12]**ThermalExcel - 2003-2004**
- [13] **D. Couillard et R. Bouige**, " Traité du Batiment, Chauffage, Ventilation, Climatisation", 5ème éditions, 1984
- [14] **R. Casari**, " Chauffage, Calculs des Déperditions et Charges Thermiques d'Hiver", PYC édition, 1989