

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT  
INSTITUT DES SCIENCES & TECHNOLOGIES

Visa du Chef de Département des  
Sciences et Technologies

Signature:.....

Date:.....

**MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DU  
COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE D'UNE DALLE  
CHAUFFANTE**

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de master académique  
en «*Installations Energétiques*»

Date et Signature de L'encadreur :

.....

.....

Réalisé par :

Étudiant(e) 1: Sidna Ould Bembay

Signature: .....

Date: .....

	Nom et prénom	Université	Grade
Examineur	Mr.Zebbar Djallel	CUT	Professeur
Président	Mr.Merghache Sidi Mohammed	CUT	MAA
Encadreur	Mr.Oudrane Abdellatif	CUT	MAA

# SOMMAIRE

Introduction générale.....	12
Chapitre 1 Le chauffage d'habitat.....	15
Introduction.....	16
1.1 Historique de chauffage.....	16
1.2 Source d'énergie.....	18
1.2.1 Les énergies fossiles.....	19
1.2.1.1 Le charbon.....	19
1.2.1.2 Le pétrole.....	19
1.2.1.3 Le gaz.....	20
1.2.2 Les énergies renouvelables.....	20
1.2.2.1 L'énergie solaire.....	20
1.2.2.2 L'énergie éolienne.....	23
1.2.2.3 La biomasse.....	24
1.2.2.4 L'énergie hydraulique.....	24
1.2.2.5 L'énergie géothermique.....	25
1.3 Système de chauffage.....	25
1.3.1 Chauffage Individuel ou collectif.....	25
1.3.2 Chauffage central ou décentralisé.....	25
1.4 Structure d'un système de chauffage.....	26
1.5 Les différents modes de chauffage.....	27
1.5.1 Pompe à chaleur.....	27
1.5.2 Le chauffage au gaz naturel.....	27
1.5.3.1 La chaudière au gaz naturel.....	28
1.5.3 Le plancher chauffant à eau.....	29
1.5.4 Le plancher chauffant-rafraîchissant.....	29
1.5.5 Le plancher chauffant géothermique.....	30
1.6 Les capteurs solaires.....	30
1.6.1 Les différentes techniques de captation.....	31
1.6.1.1 Capteur solaire plan.....	31
1.6.1.1.1 Capteur solaire plan sans vitrage.....	34
1.6.1.1.2 Capteur solaire plan vitré.....	35
1.6.1.2 Capteur solaire à tube sous vide.....	35

1.6.1.3	Capteurs à concentration.....	36
1.6.1.4	Concentrateurs cylindro-paraboliques.....	37
1.6.1.5	Concentrateurs paraboliques.....	37
1.7	Les systèmes de chauffages à eau.....	37
1.7.1	Les systèmes de chauffage solaire.....	38
1.7.1.1	Le chauffage d'habitats .....	38
1.7.1.2	Les chauffe-eau solaires individuels et collectifs.....	40
1.7.1.3	Les systèmes solaires combinés pour le chauffage d'habitat.....	40
1.7.1.4	Le plancher solaire direct.....	41
	Conclusion.....	42
	Chapitre 2 Description de La dalle chauffante.....	43
	Introduction.....	44
	2.1 Historique de La dalle chauffante .....	44
	2.2 Théorie d'un plancher chauffant.....	45
	2.3 Fonctionnement.....	45
	2.4 Dimensionnement.....	46
	2.4.1 Température ambiante du local.....	46
	2.4.2 Température superficielle du plancher.....	46
	2.4.3 Le fluide caloporteur.....	46
	2.4.4 Température du fluide chauffant.....	47
	2.4.5 Inertie.....	48
	2.4.6 Pas de pose.....	48
	2.4.7 L'isolation thermique.....	48
	2.5 Les différents types de planchers chauffants.....	48
	2.5.1 Le plancher chauffant par eau basse température.....	49
	2.5.2 Le plancher rayonnant électrique.....	50
	2.5.3 Le plancher chauffant à fluide caloporteur.....	51
	2.6 Les éléments constructifs d'un plancher chauffant.....	52
	2.6.1 La dalle chauffante.....	52
	2.6.1.1 Les paramètres thermiques et géométriques.....	52
	2.6.2 Les tubes de la grille de chauffage.....	53
	2.6.3 La pompe de circulation .....	54
	2.6.4 L'isolation thermique de la dalle chauffante.....	55
	2.6.5 Revêtement de sol.....	55
	2.6.6 Positionnement des tubes dans la dalle chauffante de système.....	55

2.6.6.1 Placement en forme de méandres.....	55
2.6.6.2 Variante du placement en forme de méandres.....	55
2.6.6.3 Placement bifilaire.....	56
Conclusion.....	56
Chapitre 3 Modélisation mathématique d'une dalle chauffante.....	57
Introduction.....	58
3.1 Hypothèses simplificatrices.....	58
3.2 Les différentes modes de transfert de chaleur.....	58
3.2.1 Echange par convection.....	59
3.2.1.1 L'échange entre le fluide caloporteur et le plancher.....	59
3.2.1.2 L'échange entre le plancher et l'air.....	60
3.3 Description du système.....	61
3.4 Courbe de corrélation.....	62
3.4.1 Corrélation des Diamètres des tubes.....	62
3.5 Les paramètre de fonctionnement.....	63
3.6 La méthode numérique de résolution.....	63
3.7 Bilan thermique d'un plancher chauffant.....	64
3.7.1 Résolution de l'équation.....	65
3.7.2 Conditions aux limites et conditions initiales.....	65
3.8 Pertes de charge.....	65
3.8.1 Pertes de charge singulières.....	65
3.8.2 Pertes de charge linéaires .....	66
3.9 La quantité de chaleur utile.....	67
3.10 La quantité de chaleur perdue.....	67
3.11 Traitement informatique.....	68
3.11.1 Programme principal.....	68
3.12 Organigramme développé pour le calcul numérique.....	69

Conclusion.....	70
Chapitre 4 Résultats et discussions .....	71
Introduction.....	72
4.1 Variation temporelle de la température superficielle du plancher.....	72
4.2 La grille de chauffe.....	72
4.2.1 La longueur de tube.....	72
4.3 Variation temporelle de la température du plancher en fonction de diamètre de tube.....	74
4.4 Variation des pertes de charges linéaire en fonction de la longueur du tube.....	75
4.5 Variation des pertes de charges linéaire en fonction du diamètre de tube.....	76
4.6 Paramètres de fonctionnement du système.....	76
4.6.1 Optimisation des paramètres de fonctionnement .....	76
4.6.1.1 Choix de la surface de captation.....	76
4.6.1.2 La température de départ du fluide chauffant dans la dalle.....	77
4.6.1.3 Le débit du fluide caloporteur.....	77
4.6.2 Critère de Dimensionnement .....	77
4.7 Validation des résultats.....	78
Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	80
Bibliographie.....	83
Annexe A Les méthodes numériques de résolution.....	86
Annexe B les langages de programmation.....	90
Annexe C Article de séminaire.....	95
Résumé.....	106

L'utilisation des énergies renouvelables suscite de plus en plus un intérêt certain dans le monde. La diminution des réserves mondiales en pétrole et en gaz, les problèmes environnementaux ont amené beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables comme le bois énergie, le solaire, la géothermie, etc. sont également des sources utilisées pour le chauffage.

Dans ce but le chauffage permet de récupérer un pouvoir calorifique au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre des capteurs solaires ou autre moyen de chauffage.

Etant donné la technique de chauffage par plancher a suscité ces dernières années un regain d'intérêt du fait de la possibilité d'utilisation de sources de chauffage à basse température. Le principal avantage de cette technique est lié à l'importance des surfaces d'émission et le degré de confort thermique acquis. Comme le rendement du plancher chauffant est d'autant plus élevé si la température du fluide caloporteur est basse, l'utilisation de l'énergie solaire améliore alors considérablement les conditions de confort. Son principe est de faire circuler directement dans un réseau de tubes (généralement en PER) noyé dans le plancher un fluide chauffé par des capteurs sans utiliser de cuves de stockage intermédiaires. Le système ainsi obtenu présente de nombreux avantages par rapport aux systèmes classiques de chauffage solaire sur les plans des coûts, de l'encombrement et de la fiabilité [1].

Ce pendant, nous avons pensé à son exploitation dans l'habitat par l'utilisation de cette nouvelle technique dont le principal avantage est l'usage d'une énergie naturelle non polluante, gratuite et inépuisable. Le problème d'inconfort thermique en saison d'hiver se pose fréquemment. En effet, les configurations architecturales appliquées conduisent à des sensations de rafraîchissement. Les équipements de chauffage sont nombreux mais pas économiques. Pour pallier à ce problème et pour valoriser l'installation de plancher chauffant nous avons considéré le chauffage des ambiances par un circuit hydraulique conditionné.

L'utilisation thermique de l'énergie pour le chauffage présente des avantages telles que :

1- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions. Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. La main d'œuvre ne nécessite qu'une formation complémentaire aisément maîtrisable.

2- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.

3- Les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles.

L'énergie solaire thermique active a toutefois certaines limites :

1- Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations.

2- C'est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).

L'objectif de ce travail est la modélisation numérique de paramètres opératoire du circuit hydrodynamique de la dalle chauffante. Autant plus l'influence du diamètre et la longueur du tube sur la température superficielle de la dalle chauffante.

Le mémoire présenté est structuré en quatre chapitres, une introduction et un résumé.

✓ **Dans le premier chapitre, je présenterais :**

1. Une brève présentation sur le chauffage
2. Les sources d'énergie (Les énergies fossiles et les énergies renouvelables).
3. Les différents modes de chauffage
4. Les systèmes de chauffages à eau

✓ **Dans le second chapitre, je présenterais :**

1. Historique de la dalle chauffante
2. Description et fonctionnement de la dalle chauffante
3. Les différents types de planchers chauffants
4. Les éléments constructifs d'un plancher chauffant

✓ **Dans le troisième chapitre, je présenterais :**

1. Hypothèses simplificatrices de calcul
2. Les différentes modes de transfert de chaleur
3. Courbe de corrélation
4. La méthode numérique de résolution
5. Bilan thermique d'un plancher chauffant

✓ **Dans le quatrième chapitre, je présenterais :**

- Résultats et discussions

## Introduction

Le chauffage est l'action de transmettre de l'énergie thermique à un objet, un matériau ou à l'air ambiant. On distingue le chauffage à des fins de confort thermique (chauffage des locaux, de l'eau chaude sanitaire, etc.) et le chauffage à des fins industrielles.

Le confort thermique est assuré principalement par le chauffage des locaux et volumes de vie ainsi que par le chauffage de l'eau chaude sanitaire, voire le chauffage des eaux de piscines.

Le chauffage à des fins de confort est utilisé pour maintenir ou améliorer les conditions d'une ambiance agréable pour les êtres vivants, dans les espaces clos constituant les lieux de vie (bâtiments, habitacles de moyens de transports, piscines, etc.). L'objectif du chauffage est d'améliorer le confort thermique d'un espace à vivre. Un système de chauffage consomme de l'énergie sous une forme et la restitue sous forme de chaleur [2].

### 1.1 Historique de chauffage

La domestication du feu par Homo erectus est attestée à partir d'environ 450 000 ans, notamment dans les sites de Menez Dregan à Plouhinec en Bretagne, de Bilzingsleben en Allemagne ou de Vértesszőlős en Hongrie et plus récemment de Terra Amata près de Nice. Une équipe israélienne fait remonter les plus anciennes traces de la domestication du feu à 790 000 ans sur le site du Gesher Benot Ya'aqov au bord du Jourdain [2].

On a probablement d'abord utilisé comme combustible, le bois, les mousses et autres végétaux secs. En cas de pénurie ou de rareté du bois, les déjections d'animaux herbivores ont pu le remplacer (comme durant la Révolution française). En Chine, l'exploitation de la houille se fait depuis des temps immémoriaux [3].

En France l'usage du bois est encore assez général au XIX<sup>e</sup> siècle mais vu son prix élevé le coke et la houille entrent chaque jour pour une plus grande part dans la consommation.

La cheminée est connue des romains qui l'utilisent dans les Hypocaustes, invention grecque, premier chauffage par le sol, où le foyer se trouve en dehors du bâtiment et l'air injecté sous le plancher [3]. On l'utilise dans les thermes de Gortyne, d'Olympie, de Syracuse, dès 300 avant J-C. Pour les usages domestiques, on ne l'utilise pas souvent : il y a dans leurs ruines de Pompéi et Herculaneum, absence complète de cheminées, ce qui prouve que les Pompéiens comme beaucoup de Napolitains, encore au XIX<sup>e</sup> siècle, ont recours au brasero, quelquefois mobile, les gaz s'échappant par une tuile omise dans la couverture[3].

C'est peut-être sous des latitudes plus septentrionales, où le chauffage a plus de justifications, que la cheminée à conduit fait son apparition. Quoi qu'il en soit, il faut attendre le XI<sup>e</sup> siècle pour voir la cheminée faire partie définitivement de l'architecture [4]. Les premières cheminées n'utilisent que la chaleur rayonnante, causent un appel considérable d'air froid extérieur, ne débarrassent qu'incomplètement de la fumée et ne peuvent chauffer que les personnes placées



immédiatement près du foyer [3]. La cheminée sera progressivement améliorée mais ne sera jamais un organe de chauffe bien performant.

En 1619 paraît le premier ouvrage complet sur les poêles publié par Franz Kessler . Son curieux travail indique dès cette époque tous les principes du chauffage usités en Allemagne [3]. En 1624 paraît en France un ouvrage de Louis Savot[5]dans lequel on voit apparaître l'isolement du foyer contre le mur et l'usage des chambres de chaleur. Peu de progrès sont réalisés par la suite dans la conception des cheminées. Les efforts réalisés au XIX<sup>e</sup> siècle porteront sur isolement complet du foyer, la multiplication des surfaces de chauffe et surtout de celles de transmission, l'introduction d'air extérieur préalablement chauffé au contact de la fumée [3].

À partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'énergie dégagée par le chauffage de l'eau produit des applications motrices dans les machines à vapeur.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, un foyer ordinaire d'appartement peut déterminer par son tirage une évacuation de 800 à 1 000 m<sup>3</sup> d'air par heure et malheureusement c'est là le rôle principal des cheminées, la ventilation. En effet cette évacuation d'air à l'extérieur, et par conséquent le refroidissement des pièces, sont d'autant plus considérables que le chauffage fonctionne avec plus d'activité. Rarement les prises d'air extérieur qu'on a ajoutées dans des systèmes de tuyaux plus ou moins contournés sont suffisantes pour alimenter la combustion et pour remplacer l'air ascendant du tuyau de fumée. Ce sont toujours les portes et les fenêtres qui viennent donner le complément d'air indispensable [3].

En 1847, les combustibles employés dans les foyers des machines à vapeur, etc., sont au nombre de trois principaux : le bois, la tourbe et la houille. On compte donc trois combustibles qui, soumis à la « carbonisation » (en fait une pyrolyse), donnent naissance à trois nouveaux combustibles : le charbon de bois, le charbon de tourbe et le charbon de houille ou coke.

En 1857, l'industrie pétrolière naît en Roumanie, avec la première raffinerie à Ploiești. Le fioul est progressivement utilisé dans le chauffage, et à partir de 1960, le gaz naturel.

En 1870, les combustibles employés dans le chauffage (avec leurs valeurs calorifiques par kilo) sont la houille (8 000 calories), les briquettes de houille agglomérées (8 000 calories), le coke des usines à gaz (7000 à 7 500 calories), la tannée en motte (produit résiduel, sorte de sciure provenant de la préparation des cuirs au tannage végétal et qui sert de combustible bon-marché, 5 000 calories), le bois sec (3 500 calories) ou ordinaire (3 000 calories), le charbon de bois (6 000 calories), le gaz d'éclairage (gaz de houille) (6 000 calories par mètre cube), l'huile de pétrole (8 000 calories)[6].

Le début du XX<sup>e</sup> siècle est marqué par la maîtrise des techniques de la vapeur et les premières chaudières vapeur viennent équiper les immeubles d'habitation.

Dans les années 1910, les premiers chauffe-eaux solaires apparaissent aux États-Unis et avec eux les premiers systèmes de chauffage solaire.

Les systèmes de chauffage central (à eau chaude) remplaceront petit à petit les chauffages utilisant la vapeur [6].

Dans les années 1960, le chauffage électrique fait également son apparition. D'abord très énergivore avec les convecteurs électriques, il se développe rapidement, et les fabricants imaginent des appareils dont la technologie est de plus en plus perfectionnée. C'est le cas du chauffage électrique à inertie. Il s'inspire de la nature : dans le désert, les températures chutent considérablement la nuit. Ainsi, certains animaux, comme les serpents ou certaines espèces de lézards, qui ont besoin de chaleur, se réfugient près des roches chaudes qui ont accumulé la chaleur du soleil. Le chauffage à inertie fonctionne de la même manière : le cœur de chauffe (en céramique, en fonte...) est chauffé et accumule la chaleur. Le radiateur à inertie chauffe donc par rayonnement en diffusant la chaleur accumulée. Comme les roches qui continuent à diffuser de la chaleur dans le désert lorsqu'il fait nuit, le chauffage à inertie continue de chauffer même éteint. Contrairement au convecteur électrique, le chauffage électrique à inertie permet de chauffer de manière constante.

Le choc pétrolier, permettra aux énergies renouvelables, et notamment au solaire thermique de se développer fortement entre 1973 et 1985.

La rareté et le coût des énergies fossiles font que des systèmes de chauffage intégrant les énergies gratuites ou renouvelables comme le solaire, la géothermie, font une apparition marquée au début de notre XXI<sup>e</sup> siècle. La nécessité de réduire la consommation d'énergie émettant des polluants, et notamment du CO<sub>2</sub>, est reliée à la conservation des ressources de la planète pour les générations futures. La notion de développement durable [7] apparaît alors. La France investit aussi beaucoup dans les technologies de chauffage ; des constructeurs français investissent par exemple dans le procédé de chauffage aux granulés de bois qui se répand de plus en plus.

## **1.2 Source d'énergie**

Un système de chauffage fonctionne à partir d'une énergie primaire qui peut être d'origine fossile (on parle d'énergies fossiles comme le fioul, le charbon, le gaz naturel, GPL ou gaz de pétrole liquéfié), ou qui a servi à produire de l'électricité (provenant de centrales nucléaires, de barrages hydrauliques, voire de centrales thermiques fonctionnant aux énergies fossiles...)[8].

Les énergies renouvelables comme le bois énergie, le solaire, la géothermie, etc. sont également des sources utilisées pour le chauffage.

Les combustibles peuvent être classés par état en combustibles solide, combustibles liquides, combustibles gazeux. À chaque état correspond un certain type de stockage et de transport ainsi que des précautions incendie et sanitaires particulières et des types d'appareil de chauffage (chaudière ou chauffe-eau, brûleur, corps de chauffe, etc.) particuliers.

L'énergie consommée et comptabilisée à *la pompe* (pompe à fioul, stère de bois, compteur d'électricité, compteur de gaz) s'appelle « énergie finale » [8].

### **1.2.1 Les énergies fossiles**

Les énergies fossiles sont issues de la matière vivante, végétale ou animale. Elles comprennent le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Leur utilisation, en tant que combustible, s'est véritablement développée au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle à une époque où les besoins en énergie ont fortement augmenté avec les débuts de la "révolution industrielle"[8].

Entre 1992 et 1999, la consommation mondiale de combustibles fossiles a augmenté de 10%. La consommation énergétique par habitant reste considérablement plus élevée dans les pays développés où chaque habitant consomme en moyenne l'équivalent de 6,4 tonnes de pétrole par an, soit 10 fois plus que la consommation des pays en développement. Faciles à transporter et à stocker, les énergies fossiles présentent néanmoins quelques inconvénients: coût très fluctuant (soumis aux aléas du marché et au contexte géopolitique), émission de gaz à effet de serre (responsables du réchauffement climatique), dispersion géographique des réserves et épuisement, à terme, de celles-ci [8].

#### **1.2.1.1 Le charbon**

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon s'est formé il y a plus de 280 millions d'années à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants. Moteur essentiel du développement économique au XIX<sup>ème</sup> siècle, le charbon a marqué la première révolution industrielle. Ainsi, entre 1800 et 1900, la consommation mondiale de charbon a connu une progression annuelle moyenne de +4,3% [8].

Il existe différents types de charbon (l'anhracite, la houille, la lignite, la tourbe) qui n'ont pas tous le même pouvoir énergétique. Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, le charbon était l'énergie fossile dominante, aujourd'hui il a été supplanté par le pétrole mais reste très présent puisque le charbon représente près de 26% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde [8]

#### **1.2.1.2 Le pétrole**

Le pétrole est la première source d'énergie mondiale. Formé à partir du plancton qui s'est déposé au fond des mers, le pétrole fournit près de la moitié de la demande totale en énergie primaire. Pourtant jusqu'au début des années 1950, le pétrole n'occupait qu'une place limitée dans le paysage énergétique mondial (sauf aux Etats-Unis). Produit facile à manipuler, transporter ou

stocker, le pétrole va rapidement supplanter le charbon. Les années 60 marquent véritablement le début de l' "ère du pétrole" du fait de la croissance continue des besoins énergétiques, de la découverte d'importants gisements, notamment au Proche-Orient, et de coûts de production très faibles. Après les chocs pétroliers des années 70, la demande connaît une forte baisse, mais un contre-choc, en 1983, provoque une réduction de moitié des prix du pétrole et la demande repart à la hausse (+ 2,4% de 1986 à 1989). Aujourd'hui, le pétrole représente près de 39% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde [8].

### **1.2.1.3 Le gaz**

Le gaz s'est formé en même temps que le pétrole. Issu de la transformation naturelle durant des millions d'années de matières organiques, le gaz provient de couches géologiques du sous-sol où il se trouve soit seul, soit en association avec du pétrole. L'industrie du gaz naturel est née aux Etats-Unis au XIX<sup>ème</sup> siècle qui ont été pendant longtemps le seul pays consommateur. Ainsi, la consommation de gaz naturel n'atteignait encore, en 1960, que 13% de la consommation mondiale d'énergie primaire [8].

La découverte et l'exploitation d'importants gisements dans d'autres parties du globe (ex. Europe de l'ouest, Afrique du Nord, Russie.) ont donné progressivement une dimension mondiale à cette énergie. Avec les chocs pétroliers des années 70, la position du gaz s'est renforcée, et de 1973 à 1989, la progression du gaz dans la consommation mondiale était en moyenne de + 3,3% par an. Aujourd'hui, le gaz représente près de 23% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

## **1.2.2 Les énergies renouvelables**

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuisent jamais à l'échelle du temps humain ! Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse [8].

### **1.2.2.1 L'énergie solaire**

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement [9]. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires . Les technologies passives

consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire [9].

### ➤ **Caractères particuliers**

Trois principales caractéristiques de l'énergie solaire [9] :

- ✓ Elle est abondante, et c'est la sa principale qualité. On estime actuellement que la consommation totale d'énergie sur la terre, sous quelque forme que ce soit, est environ le dix-millième de ce que nous apporte le soleil. De plus, cette énergie est inépuisable, du moins à l'échelle humaine, ce qui n'est le cas d'aucune autre source énergétique terrestre.
- ✓ Elle est dispersée, ce qui est à la fois une qualité et un défaut pour les applications que nous recherchons. En effet si toutes les régions du globe reçoivent plus ou moins de l'énergie solaire, ce qui n'est pas le cas de la plupart des sources énergétiques traditionnelles concentrées en certaines régions, la puissance rayonnée est cependant relativement faible. Au niveau de la terre et au dessus des couches atmosphériques, la puissance solaire est de l'ordre de  $1.4 \text{ kW/m}^2$ . Du fait de la traversée des couches atmosphériques, une partie du rayonnement est absorbée (l'ultra-violet par l'ozone, et l'infra-rouge par la vapeur d'eau et le gaz carbonique).
- ✓ Elle est intermittente, en raison, d'une part de l'alternance des jours et des nuits, des saisons, et d'autre part de la présence de couches qui absorbent la majeure partie du rayonnement sur son trajet vers la terre. Ainsi, dans la plupart des cas, il faudra prévoir le stockage d'une partie de l'énergie solaire captée [9].

### ➤ **Conversion de l'énergie solaire**

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, et en électricité.

#### ✓ **L'énergie solaire thermique**

La conversion photothermique est le processus le plus simple. Il consiste en une transformation du rayonnement solaire en forme thermique (chaleur), qu'on peut utiliser [10], [11] :

En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.

En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage: centrales solaire Thermodynamiques, froid solaire.

#### ✓ **L'énergie solaire photovoltaïque**

C'est la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique avec des matériaux semi-conducteurs.

La première cellule photovoltaïque, construite en 1914, avait un rendement de 1% ; elle était utilisée pour réaliser des posemètres pour la photographie. Il a fallu attendre 1954 pour que la production d'électricité par effet photovoltaïque commence à se développer, avec la réalisation d'une première cellule en silicium monocristallin d'un rendement de 6% .Ce dernier augmenta rapidement pour atteindre, en laboratoire, 18% aujourd'hui [12].

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. Cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais restent beaucoup plus onéreux [13].



**Figure.1 - cellules photovoltaïques**

#### ✓ **L'énergie solaire thermodynamique**

La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales Héliothermoélectriques [14].

Trois principaux types de centrales sont utilisés [14] :

- ✓ Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
- ✓ Les centrales à capteurs paraboliques permettant d'obtenir des températures de 1000°C ou plus.
- ✓ Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

### 1.2.2.2 L'énergie éolienne

L'énergie du vent est une énergie mécanique que l'on peut capter de plusieurs manières. Simplement avec une voile, l'énergie du vent peut être utilisée pour propulser un voilier. Cette première utilisation remonte à l'Antiquité. À cette époque là, le vent était (avec l'énergie animale) l'une des seules sources de propulsion disponibles. C'est aussi l'énergie du vent qui faisait marcher une partie de l'industrie grâce aux moulins à vent. Les pales du moulin utilisent l'énergie du vent pour faire tourner une meule qui écrase alors tout ce qu'il est possible d'écraser : céréale, oléagineux, etc. Puis, la révolution industrielle, au 19<sup>ème</sup> siècle a remplacé le vent par d'autres sources d'énergie (charbon, pétrole, gaz)[8].

Aujourd'hui, le vent est à nouveau exploité par des moulins plus modernes : les éoliennes. On peut distinguer deux types d'éoliennes :

- Celles qui fournissent un travail, tel que pomper de l'eau, ou faire tourner une meule. Elles sont généralement de petite taille. On en trouve dans les zones arides (Afrique, Etats-Unis, Australie, etc.).
- Celles qui fournissent de l'électricité (on les appelle aussi *aérogénérateurs*). Elles ont des tailles très variables (de quelques mètres à 100 mètres de hauteur). Les plus petites sont utilisées pour l'alimentation électrique de sites isolés ou de maisons particulières. Les plus grandes sont souvent regroupées en *fermes éoliennes* pour une production de masse sur le réseau d'électricité (centrales éoliennes)[8].



**Figure.2 - L'énergie éolienne**

### 1.2.2.3 La biomasse

Le terme de biomasse désigne la masse des êtres qui vivent sur Terre. Mais l'énergie dite "de biomasse" provient en réalité d'êtres qui ont passé l'arme à gauche ! Dans le cas, contraire, on parle simplement d'énergie animale[8].

En effet, l'énergie, on l'a vu en introduction de ce dossier, est utilisée par les tous les êtres vivants. C'est d'ailleurs ce qui les distingue du monde minéral inerte. Chaque être vivant échange avec son extérieur de la matière (pour constituer ses organes) et de l'énergie (pour pouvoir agir, c'est-à-dire *vivre*)[8].

L'énergie nécessaire à un être vivant peut-être thermique (pour maintenir sa température interne) ou chimique (pour tout ce qui est plus compliqué : faire fonctionner les organes et se construire). On vérifie ici que l'énergie chimique est plus noble que l'énergie thermique[8].



**Figure. 3 - La biomasse**

### 1.2.2.4 L'énergie hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité [8].





**Figure. 4 - L'énergie hydraulique**

#### **1.2.2.5 L'énergie géothermique**

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique.

Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple [8].

**L'énergie géothermique** est une énergie calorifique contenue dans le sol et pouvant être utilisée pour le chauffage des habitations [8].

### **1.3 Système de chauffage**

Le chauffage d'ambiance est destiné à assurer une température déterminée et/ou le confort dans un lieu clos ou ouvert. Plusieurs systèmes de chauffage existent :

#### **1.3.1 Chauffage Individuel ou collectif**

- ✓ Chauffage individuel : installation individuelle pour une maison, un appartement Ou un immeuble.
- ✓ Chauffage collectif : installation collective couvrant les besoins de plusieurs maisons, appartements ou immeubles.

#### **1.3.2 Chauffage central ou décentralisé**

- ✓ Chauffage central : on parle de chauffage central lorsque l'on chauffe plusieurs pièces d'un immeuble ou d'une maison à partir d'un seul point de cet immeuble grâce à un générateur de chaleur, la chaudière.

- ✓ Chauffage décentralisé ou chauffage local : contrairement au chauffage central, un système ou les fonctions de génération et d'émission sont assurées conjointement au sein de chaque appareil. Il n'y a pas de fluide caloporteur, pas de réseau permettant d'acheminer ce fluide et donc pas de fonction de distribution [6].

#### 1.4 Structure d'un système de chauffage

Un système de chauffage comprend nécessairement :

- une source de chaleur : la source de chaleur se trouve nécessairement à une température supérieure à la température de l'objet, du matériau ou l'espace à chauffer, sauf dans le cas des pompes à chaleur ;
- un émetteur de chaleur : l'émetteur de chaleur permet l'échange de l'énergie thermique entre la source de chaleur et l'objet, le matériau ou l'espace à chauffer. Cet émetteur peut être statique comme un radiateur, un convecteur, un plancher chauffant ou dynamique comme un ventilo-convecteur, une centrale de traitement d'air, un aérotherme.

Dans le premier cas, l'émetteur transmet sa chaleur par convection et/ou rayonnement. Dans le deuxième cas, c'est un ventilateur qui pulse l'air au travers d'une batterie chaude et qui transmet la chaleur au milieu ambiant par recyclage et mouvement d'air.

Ces deux éléments peuvent éventuellement être confondus (par exemple, une flamme est source de chaleur ; elle émet aussi directement cette chaleur sous forme de rayonnement. Autre exemple, un convecteur électrique produit et transmet sa chaleur [6].

Un système de chauffage peut aussi comprendre :

- un système de stockage de la chaleur ;

un ou plusieurs systèmes de transport de la chaleur : le transport de la chaleur est réalisé le plus souvent au moyen d'un fluide présentant une capacité calorifique élevée, appelé fluide caloporteur[5].

##### ➤ **Fluide caloporteur**

Le fluide caloporteur peut être :

- l'eau chaude : l'eau réchauffée (l'installation comporte un générateur de chaleur (chaudière ou bouilleur) [11], une distribution d'eau et des émetteurs de chaleur) ;
- l'air pulsé : l'air ambiant réchauffé (l'installation comporte un générateur d'air chaud et le plus souvent une distribution de cet air chaud) ;
- un fluide caloporteur : en général une huile (réservé aux très grosses installations et en général au transport de la chaleur entre la production centralisée et des sous-stations qui sont des interfaces entre un réseau de production dit « primaire » et un réseau de distribution jusqu'aux émetteurs de chaleur dit « secondaire »).

## 1.5 Les différents modes de chauffage [36]

### 1.5.1 Pompe à chaleur

La pompe à chaleur (PAC) est un dispositif de transfert de chaleur à l'aide d'un **fluide frigorigène** dont la propriété principale est, à basse pression (à l'état gazeux), de capter la chaleur du milieu où il se trouve, puis de restituer cette chaleur dès qu'on le comprime. Une pompe à chaleur fonctionne schématiquement de la façon suivante :

- Le compresseur comprime le fluide (gaz R407C) qui, sous, l'effet de l'augmentation de la pression, s'échauffe en arrivant dans le **condenseur**.
- La haute pression liquéfie le gaz qui cède les calories qu'il contient.
- Le gaz liquéfié quitte le condenseur puis traverse un détendeur qui abaisse sa pression.
- La basse pression gazéifie le fluide qui refroidit.
- Le fluide traverse l'**évaporateur** où il absorbe les calories de l'air ambiant puis rejoint le compresseur et le cycle recommence.

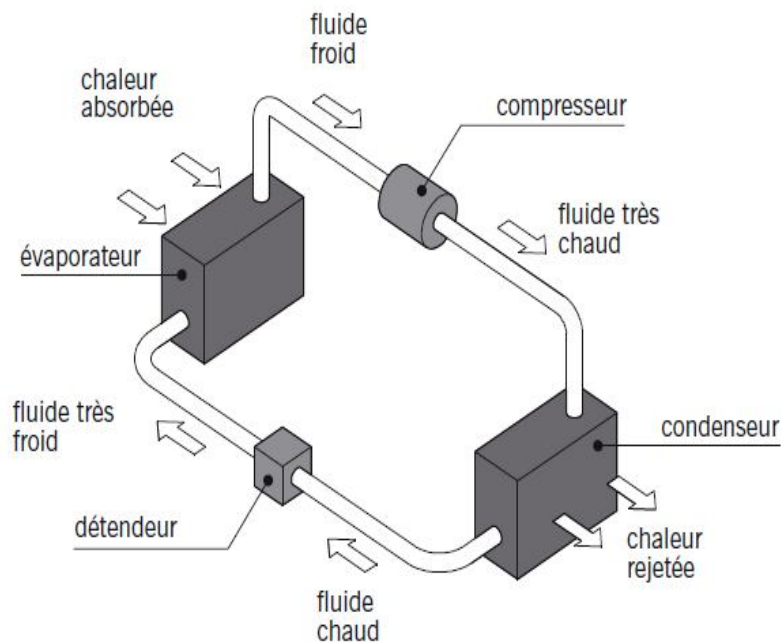


Figure. 5- schéma de principe de la pompe à chaleur

### 1.5.2 Le chauffage au gaz naturel

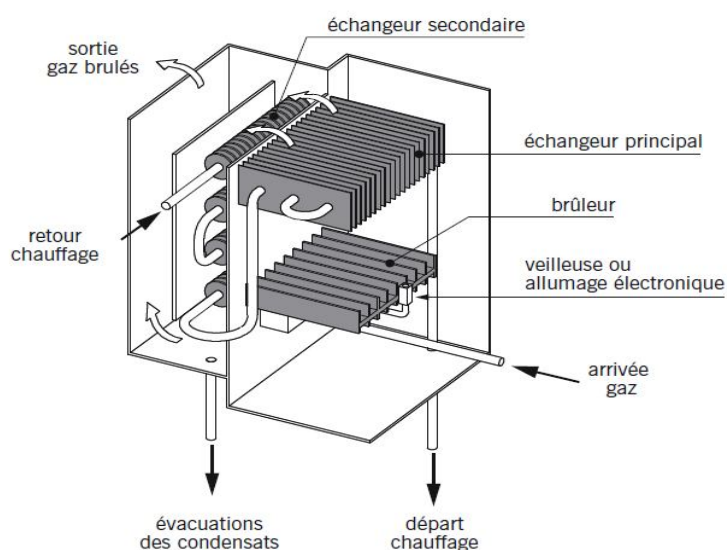
Le chauffage au gaz naturel est un chauffage central dont la chaudière fonctionnant au gaz naturel alimente en eau chaude des radiateurs ou un plancher chauffant [36].

### I.5.2.1 La chaudière au gaz naturel

La chaudière au gaz naturel est un appareil constitué principalement d'un foyer où s'effectue la combustion du gaz naturel et d'un **échangeur** qui transfère la chaleur produite à l'eau destinée à alimenter les émetteurs de chaleur.

Le principe de fonctionnement est le suivant : une veilleuse ou un dispositif électronique d'allumage enflamme le mélange air-gaz délivré par le **brûleur**. La chaleur dégagée, dans la chambre de combustion, chauffe l'eau qui circule au-dessus dans l'échangeur. Cette eau chaude alimente, par un réseau de tuyauteries, les différents appareils de chauffage, puis, refroidie, retourne à la chaudière pour être chauffée à nouveau. Une pompe appelée **calculateur** accélère le déplacement de l'eau dans les tuyauteries. Un récipient métallique, le **vase d'expansion**, permet à l'eau de se dilater librement (tout liquide chauffé augmente de volume) sans risque de surpression pour l'installation. On distingue plusieurs types de chaudières [36] :

- ✓ La chaudière gaz classique.
- ✓ La chaudière gaz à haut rendement : chaudière dont le rendement (rapport entre l'énergie produite et l'énergie fournie) est supérieur à celui d'une chaudière classique. Elle bénéficie de nombreux équipements qui améliorent son fonctionnement : allumage électronique, isolation renforcée de la chambre de combustion, perfectionnement des brûleurs et échangeurs...
- ✓ La chaudière gaz à condensation : La chaudière gaz à condensation est une chaudière à très haut rendement qui récupère la chaleur de la vapeur d'eau issue de la combustion du gaz. Dans une chaudière classique cette vapeur s'échappe à l'extérieur par le conduit d'évacuation des gaz brûlés. Dans une chaudière à condensation, la vapeur circule autour d'un second échangeur, alimenté en eau par le retour du circuit de chauffage [36].



**Figure. 6 - composants principaux d'une chaudière à condensation**

### 1.5.3 Le plancher chauffant à eau

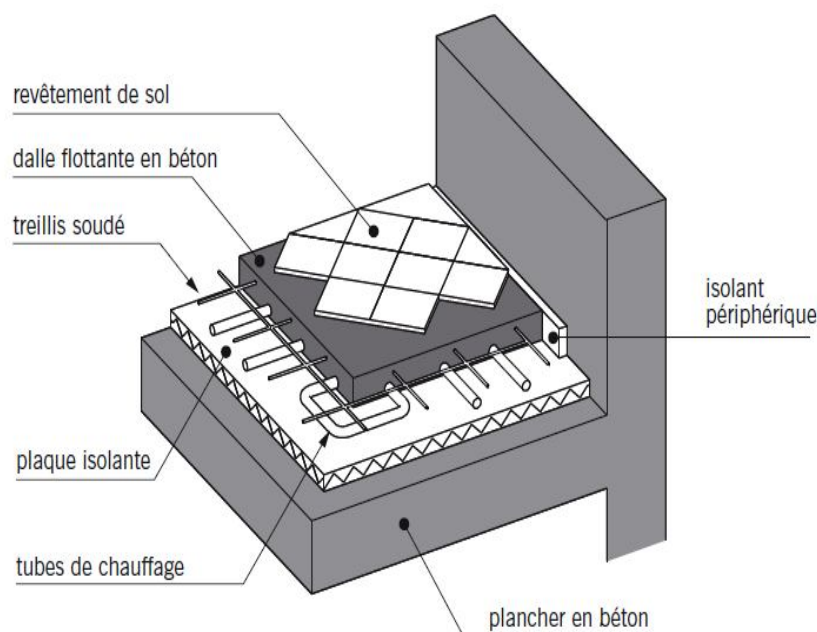
Le système de chauffage par le sol constitué de tubes incorporés dans une dalle en béton et dans lesquels circule de l'eau chaude à basse température (inférieure à 50 °C) pour obtenir une température de surface, au niveau du sol, comprise entre 21 et 28 °C. Les éléments constitutifs du plancher chauffant sont, les suivants :

Un isolant thermique en polystyrène incompressible ou en mousse de polyuréthane posé sur un plancher en béton ou sur un dallage.

Des tubes, en cuivre ou en PER, disposés sur l'isolant et formant une boucle dans chaque pièce à chauffer suivant une forme en spirale (dite « en escargot ») ou en serpent.

Un système de fixation des tubes assuré soit par des dalles isolantes spéciales munies de plots, soit par des attaches (cavaliers, rails en plastique...).

Une dalle d'enrobage des tubes, en béton, désolidarisée des murs par une bande isolante périphérique. Cette dalle, d'une épaisseur moyenne de 6 à 8 cm, comporte un treillis soudé qui limite les risques de fissurations [36].



**Figure. 7 - plancher chauffant à eau chaude**

### 1.5.4 Le plancher chauffant-rafraîchissant ou plancher « réversible »

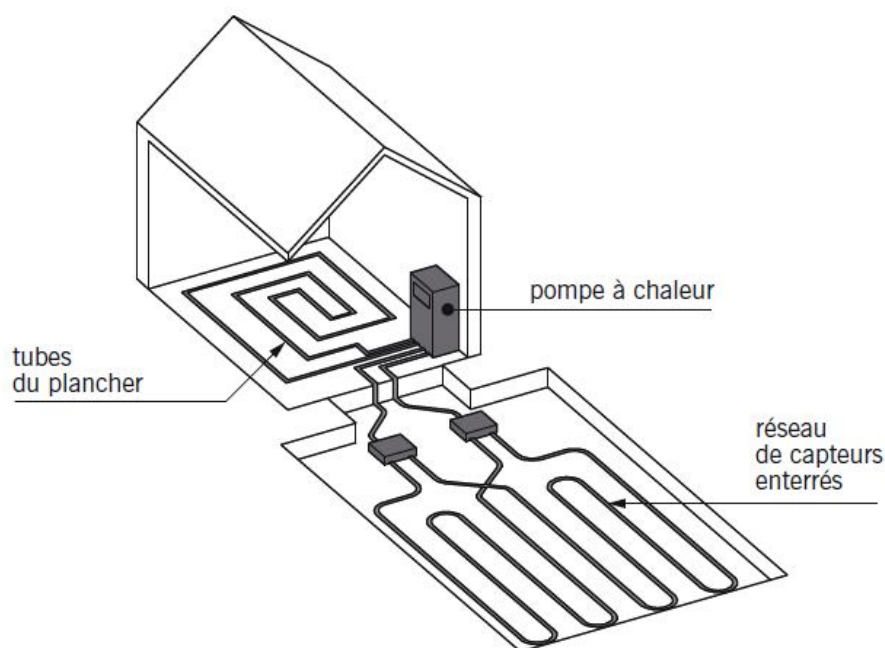
Le plancher chauffant-rafraîchissant ou plancher « réversible » est un système de chauffage par le sol à circulation d'eau chaude l'hiver et d'eau froide l'été. En période froide, le fonctionnement est identique à celui d'un plancher chauffant traditionnel. En période chaude, l'eau circule dans les tubes à une température inférieure à la température ambiante. Le plancher se

comporte alors comme un absorbeur de chaleur et la température de la pièce baisse de 3 à 6 °C environ. Le rafraîchissement ne peut pas être trop important, car si la température de l'eau contenue dans les tubes est trop basse, des phénomènes de condensation peuvent apparaître sur le plancher. Aussi, ce système qui nécessite un groupe de production d'eau froide installé en parallèle avec la chaudière ou une pompe à chaleur réversible est encore peu mis en œuvre dans les maisons individuelles [36].

### 1.5.5 Le plancher chauffant géothermique

Le plancher chauffant géothermique est un système de chauffage par le sol à basse température comprenant :

- ✓ Un réseau de tubes en polyéthylène à circulation d'eau incorporés dans la dalle du plancher.
- ✓ Un réseau de canalisations en polyéthylène, les **capteurs**, enterrées à l'extérieur de l'habitation (à 1 mètre de profondeur environ) et dans lesquelles circule un mélange d'eau et d'antigel.
- ✓ Une pompe à chaleur qui, reliée aux deux réseaux, récupère les calories véhiculées par les capteurs et les transfère à l'eau du plancher [36].



**Figure. 8 - plancher chauffant géothermique**

### 1.6 Les capteurs solaires

#### ✓ Principe

Les capteurs thermosolaires ont pour fonction de transformer, avec le meilleur rendement possible, l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie thermique, à un niveau de température convenable pour l'utilisateur, et à transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Dans ce but, l'énergie solaire est absorbée par un corps, l'absorbeur, dans lequel circule le fluide caloporteur.

Autour de l'absorbeur, divers dispositifs sont placés pour diminuer les pertes de chaleur qui ne seraient pas transmises au fluide et pour augmenter le niveau de température.

On peut distinguer plusieurs grandes catégories de capteurs solaires :

- Selon le fluide caloporteur : les capteurs à eau, à air, à huile, à ébullition.
- Suivant la géométrie du capteur : les capteurs plans ou à concentration. Les premiers permettent d'atteindre des températures moyennes mais captent la totalité du flux solaire, alors que les seconds conduisent à de hautes températures mais ne captent que le rayonnement solaire direct [15].

La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [16] :

- 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.

Le procédé de captage est simple. Il consiste à utiliser des surfaces réceptrices capables d'absorber la majeure partie du rayonnement incident (coefficient d'absorption élevé, voisin de 1) et d'en réfléchir le moins possible.

Les surfaces sont généralement mates de couleur foncée (noires de préférence), et sont capables d'absorber plus de 90% du rayonnement incident. L'énergie étant ainsi captée, il faut la transporter jusqu'à l'utilisation, au moyen d'un fluide caloporteur qui est en général de l'eau (ou antigel) ou de l'air [18].

### **1.6.1 Les différentes techniques de captation**

On peut capter directement le rayonnement solaire au moyen de panneaux solaires plans réceptifs, convenablement équipés et dénommés isolateurs, ou au moyen de miroirs ou de lentilles, qui modifient la direction des rayons solaires et généralement les concentrent avant la conversion en énergie utilisable, (captation indirecte).

Les appareils de captation sont fixes (comme le sont généralement les isolateurs plans), ou orientables (comme c'est le cas des miroirs ou des lentilles solaires), l'orientation étant généralement assurée par un dispositif automatique. On peut aussi utiliser des appareils semi fixes, qu'on oriente de façon discontinue selon la direction du rayonnement incident [10].

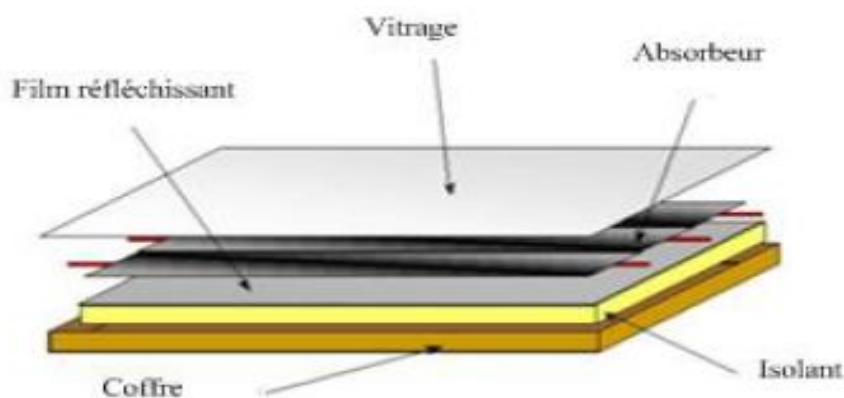
#### **1.6.1.1 Capteur solaire plan**

Il existe différents types de capteurs solaires plans pour chauffer les liquides. Leur choix dépend généralement de la température désirée, et des conditions climatiques pendant la période

d'utilisation du système. Les technologies les plus courantes sont : les capteurs à liquide plans sans vitrage et les capteurs à liquide plans vitrés.

### ➤ Constituants d'un capteur solaire plan

Ce type de capteur se présente sous forme de caisson de différentes dimensions ou sous forme d'éléments séparés à intégrer directement dans l'architecture des bâtiments. Il est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre (figure. 9).



**Figure. 9 - Capteur solaire plan[1]**

### ✓ L'absorbeur

Il a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes. En général, l'absorbeur n'est qu'une plaque plane en métal dont la couche superficielle donnant sur le soleil, doit avoir un coefficient d'absorption le plus élevé possible (de l'ordre de 0,95). Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir.

Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infrarouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de sélectif. La surface sélective a pour rôle justement, une fois le rayonnement solaire absorbé de transformer la bande du visible en infrarouge [17]. Il importe que la plaque soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur.

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm. Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre



une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas [14].

✓ **Le fluide caloporteur**

Le fluide caloporteur a pour mission de transporter la chaleur de la source à l'utilisation.

✓ **La couverture transparente**

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur. On ne peut utiliser que des matériaux transparents. L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70°C qu'on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement. Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre en simple ou double vitrage, trempé ou non, armé ou non, mais on peut trouver aussi des produits plastiques de synthèse ayant la propriété de réaliser l'effet de serre tel que le polycarbonate, le polyméthacrylate ou bien le polyester armé. Le tableau 1.1 fournit quelques indications sur ces matériaux [37].

**Tableau 1 - Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge [37]**

Matériau	Facteur de Transmission Solaire(%)	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/Kg.k)	Conductivité Thermique (W/m.K)	Dilatation Thermique (K <sup>-1</sup> )
Verre	85-92	2700	840	0.93	0.9.10 <sup>-5</sup>
Polycarbonate	82-89	1200	1260	0.2	6.6.10 <sup>-5</sup>
Polyméthacrylate	89-92	1200	1460	0.2	7.10 <sup>-5</sup>
Polyester armé	77-90	1400	1050	0.21	3.5.10 <sup>-5</sup>
Polythéréphalate éthylène	84	1.38	1170	0.25	7.10 <sup>-5</sup>
Polyfluoroéthylène opoyléne	97	2.15	1170	0.25	10 <sup>-4</sup>
Polyflurure vinyle	93	1.50	1380	0.12	4. 10 <sup>-5</sup>

Soit un capteur exposé au rayonnement solaire, sa couverture est transparente au rayonnement visible mais opaque aux rayonnements U.V et I.R. A la surface de la terre, le rayonnement solaire est composé de 42% de rayonnement visible qui va être transmis à l'absorbeur lequel en chauffant va réémettre du rayonnement I.R pour lequel la transmissivité de la vitre est faible, ne pouvant ainsi s'échapper et qui sera en partie absorbé par la vitre qui s'échauffe et en partie réfléchi vers la plaque qui elle-même s'échauffe [13],[19].

#### ✓ **L'isolant thermique**

Limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Pour minimiser ces pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois. Vers l'avant c'est le plus souvent une lame d'air qui fait office d'isolant, son épaisseur ne doit pas être trop importante pour limiter les transferts par convection. On choisira une distance comprise entre 2 et 3 cm.

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale. On place une ou plusieurs couches d'isolant du type, laine de verre, polystyrène, mousse de polyuréthane, etc.

#### ✓ **Le coffre**

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

##### **1.6.1.1.1 Capteur solaire plan sans vitrage**

Généralement ils sont constitués de plastique polymère, aucun revêtement sélectif, pas de cadre ni d'isolation en arrière. Ils sont posés sur un toit ou sur un support en bois. Ces capteurs de faible coût présentent néanmoins des pertes thermiques vers l'environnement qui augmentent rapidement avec la température de l'eau, (particulièrement dans les endroits venteux). Les capteurs sans vitrage sont couramment utilisés pour des applications demandant une fourniture d'énergie à basse température (piscines, eau d'appoint en pisciculture, chaleur industrielle, etc.); dans les climats froids, ils sont habituellement utilisés exclusivement durant l'été à cause de leurs pertes thermiques élevées (figure .10) [18].

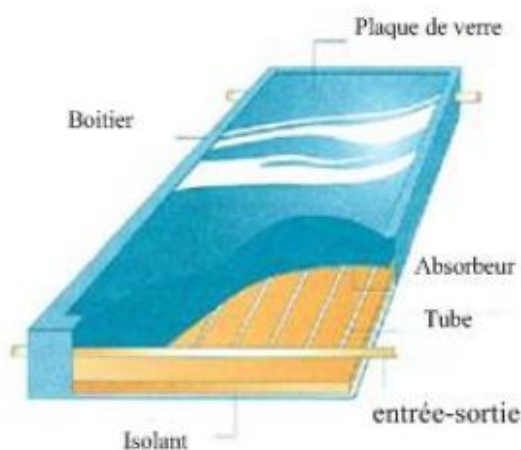


**Figure. 10 - Capteur solaire plan sans vitrage [37]**

#### 1.6.1.1.2 Capteur solaire plan vitré

Les capteurs à liquide avec vitrage comprennent une plaque absorbante noire munie d'un revêtement sélectif fixée dans un cadre entre un vitrage simple ou double et un panneau isolant arrière (figure .11). L'énergie solaire est ainsi emprisonnée dans le capteur (effet de serre).

Ces capteurs sont couramment utilisés pour des applications à températures modérées (chauffage de l'eau sanitaire, chauffage de locaux, chauffage de piscines intérieures ouvertes toute l'année et chauffage pour procédés industriels) [18].



**Figure. 11 - Capteur solaire plan vitré [37]**

#### 1.6.1.1.2 Capteur solaire à tube sous vide

Un capteur solaire "sous vide" (figure .12) est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur, celui-ci reçoit un

traitement sélectif pour empêcher le rayonnement. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique ou un coffre de protection. La fabrication des tubes et l'assemblage des capteurs sont simplifiés, car il n'y a pas de soudures verre-métal. Par contre, les tubes thermos sont particulièrement fragiles au point de liaison avec le collecteur, où les parties extérieure et intérieure de chaque tube se rejoignent. En général, la pression dans l'espace vide est inférieure à 1Pa. Ainsi, les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur sont quasiment éliminées. Ces capteurs peuvent atteindre des températures élevées et les tubes sont inclinables, ce qui permet une utilisation en façade ou sur une toiture insuffisamment inclinée pour utiliser des capteurs plans. On note d'autres avantages par rapport aux capteurs plans notamment [20] :

- Des températures de fonctionnement plus élevées.
- Des déperditions réduites grâce à une excellente isolation thermique.



**Figure. 12 - Capteur solaire à tubes sous vide [37]**

### **1.6.1.3 Capteurs à concentration**

Les capteurs plans ne permettent pas, en général, de dépasser 130°C au niveau de la surface absorbante. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes qui les utilisent. Il faut une surface de 50 m<sup>2</sup> par KW, et ces capteurs ne sont donc pas adaptés à la production de forte puissance. Pour augmenter le rendement, il faut élever la température de la source chaude et, par conséquent, concentrer le rayonnement solaire en acceptant de perdre le bénéfice du rayonnement diffus non concentrable parce que n'ayant pas de direction privilégiée [21].

Les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire sont :

#### 1.6.1.4 Concentrateurs cylindro-paraboliques

Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de « U » (figure .13). Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur [9]. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur. Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C.



**Figure. 13 - Concentrateur cylindro-parabolique**

#### 1.6.1.5 Concentrateurs paraboliques

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeur). Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500°C) sur le récepteur [17].



**Figure. 14 - Concentrateur parabolique [17]**

### 1.7 Les systèmes de chauffages à eau

Le chauffe-eau est un équipement domestique ou industriel servant à faire chauffer de l'eau à l'aide d'une source d'énergie, qui peut être de l'électricité, du gaz, du fioul, la thermodynamique, une pompe à chaleur, ou l'énergie solaire, qui est de plus en plus utilisée.

On distingue deux grandes familles de chauffe-eau :

- ceux qui ont une réserve d'eau chaude importante, on les appelle aussi **ballons d'eau chaude**. S'ils sont électriques, ils présentent l'avantage de pouvoir chauffer l'eau la nuit, lorsque l'électricité coûte moins cher (dans certains pays, et en fonction de l'abonnement). Les chaudières de chauffage central peuvent aussi chauffer l'eau domestique.
- ceux qui chauffent l'eau uniquement à la demande, au moment du soutirage (chauffe-eau instantané).

### 1.7.1 Les systèmes de chauffage solaire

#### ✓ Applications thermiques de l'énergie solaire

Bien que l'exploitation de l'énergie solaire s'intensifie depuis quelques années et que les technologies évoluent sans cesse, les principes et les phénomènes mis en cause sont très bien connus et font aujourd'hui l'objet de large consensus. Le rayonnement solaire a été le sujet de nombreuses études, recherches et discussions, on peut trouver des applications à basse température (chauffage de l'eau, climatisation des habitations, dessalement de l'eau, réfrigération solaire etc.) et des applications à température relativement plus élevée (cuisseurs et fours solaires) nécessitant par conséquent une concentration du rayonnement [21]. Sans être exhaustif on peut citer :

#### ➤ Chauffage des piscines

C'est l'application la plus simple de l'énergie solaire thermique active. En fait, toute piscine ouverte est un capteur solaire. On peut aussi chauffer la piscine au moyen des capteurs solaires actifs fonctionnent à très basse température, qui parfois sont des capteurs nus. La piscine elle-même joue le rôle de l'accumulateur [22].

#### ➤ L'eau chaude sanitaire

La production d'eau chaude sanitaire est actuellement l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. L'installation classique comprend essentiellement un groupe de capteurs plans, une capacité de stockage et généralement un dispositif de régulation et une source d'appoint. La température de l'eau chaude sanitaire est en effet relativement réduite et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude [13], [22].

#### 1.7.1.1 Le chauffage d'habitats

Le chauffage solaire du bâtiment fait appel à des capteurs à air ou à eau, mais avec des surfaces par logement plus grandes. La chaleur peut être distribuée par des radiateurs à eau chaude ou des planchers ou plafonds chauffants. L'utilisation de la chaleur solaire pour le chauffage du bâtiment demande le recours à une forme de stockage.

Il est possible de stocker de l'énergie sous forme d'eau chaude dans des réservoirs de plusieurs mètres cubes, ce système permet de s'affranchir en partie du caractère intermittent de l'énergie solaire [30].

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

Pour chauffer de l'air, on peut le faire circuler derrière des panneaux métalliques noirs, placés dans des châssis vitrés installés sur le toit ou la terrasse d'un bâtiment, puis on peut faire du chauffage par air pulsé en faisant circuler l'air chaud dans des canalisations [23].

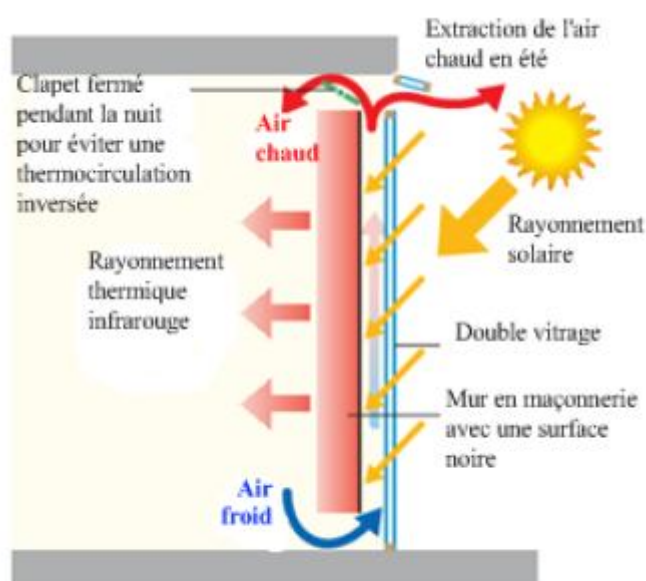
Plusieurs études aussi bien expérimentales que numériques ont été réalisées pour améliorer ce type de chauffage solaire d'habitat, on trouve principalement :

#### ✓ **Le procédé du professeur Trombe**

En France, les études du professeur Félix Trombe ont abouti à la mise au point d'un procédé de chauffage des maisons par air chaud, le chauffage de nuit étant assuré par récupération de la chaleur accumulée pendant la journée dans les murs constituant une masse thermique [23].

Ce système passif est probablement celui qui est actuellement le plus utilisé. Le principe de fonctionnement très simple, consiste en un flux solaire traversant la (ou les) vitres, est absorbé par une paroi verticale qui peut faire partie des éléments de structure du bâtiment. L'échauffement de l'air en contact avec cette paroi déclenche une circulation naturelle. L'air du bas de l'espace est alors admis par des ouvertures dans la partie inférieure du mur et revient à la salle par des ouvertures dans la partie haute, (figure .15), [14].

Ce système de chauffage peut continuer à fonctionner après la coucher du soleil, grâce au stockage partiel de la chaleur reçue par le mur [23].



**Figure. 15 - Principe du mur trombe [23].**

## ✓ Systèmes de chauffage solaire par circulation d'eau chaude

Il existe essentiellement deux dispositifs courant de chauffage solaire par circulation d'eau chaude, les chauffe-eau solaires individuels (CESI) auxquels on peut raccrocher les chauffe-eau solaires collectifs et les systèmes solaires combinés (SSC) pour le chauffage des locaux [23].

### 1.7.1.2 Les chauffe-eau solaires individuels et collectifs

On trouve principalement, le système à thermosiphon (ou direct)

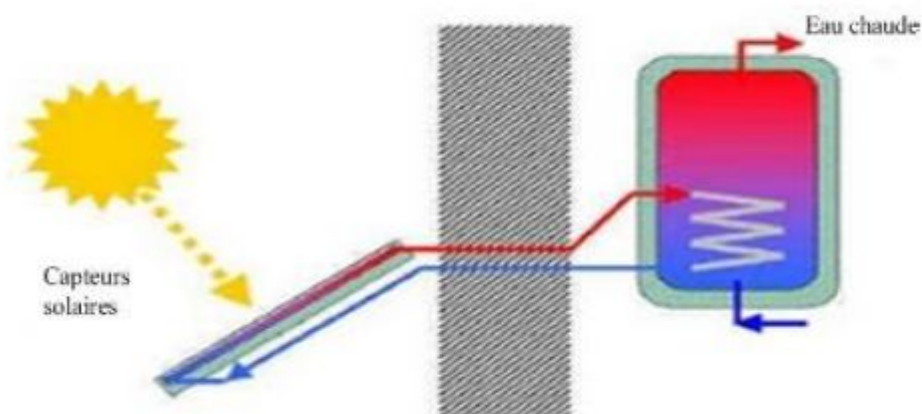
#### ❖ Système direct

Dans ce système, c'est l'eau chaude sanitaire qui circule elle-même dans le capteur, cette circulation s'effectue par thermosiphon. L'eau en passant dans le capteur s'échauffe, crée une dépression qui aspire l'eau la plus dense qui entre dans le capteur. Il faut veiller cependant à ce que la perte de charge du circuit ne soit pas trop importante (fig.16).

Ce système impose d'installer le ballon de stockage plus haut que le capteur. Celui-ci étant souvent placé en toiture, le ballon de stockage devient le point le plus haut de l'habitation ce qui n'est pas nécessairement recherché. Cette contrainte peut en effet être inacceptable pour des raisons esthétiques.

Pour éviter les pertes thermiques en ligne, il faut veiller à réduire les distances séparant les différents organes. Une bonne isolation thermique des canalisations est recommandée.

Par ailleurs, il est nécessaire de prévoir un vase d'expansion pour encaisser les variations de volume de l'eau du circuit avec la température [13].



**Figure. 16 - Système à thermosiphon**

### 1.7.1.3 Les systèmes solaires combinés pour le chauffage d'habitat

Les installations solaires qui fournissent à la fois de l'eau chaude sanitaire et une partie du chauffage sont généralement appelées des 'combi-systèmes' ou SSC (systèmes solaires combinés).



Ce type de chauffage est le plus souvent associé au plancher chauffant basse température. L'installation peut fournir l'ensemble des besoins en eau chaude sanitaire en période estivale et permet le préchauffage de l'eau en hiver, ce qui réduit la consommation d'énergie. Le complément de chaleur est apporté par un système d'appoint, suivant les saisons [37].



**Figure. 17 - Schéma de fonctionnement d'un SSC**

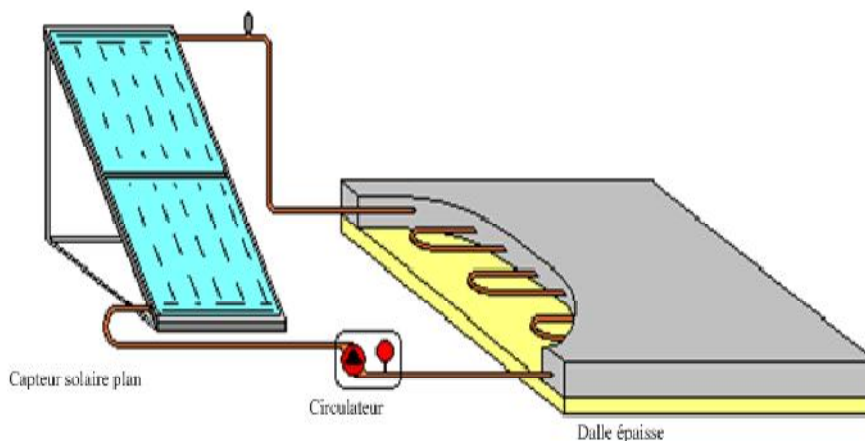
#### 1.7.1.4 Le plancher solaire direct

Le Plancher Solaire Direct (PSD), désigne le type de système solaire combiné le plus répandu à ce jour.

En effet, le fluide caloporteur, (constitué la plupart du temps, d'un mélange d'eau et antigel), chauffé par les capteurs solaires circule directement dans un plancher sans passer par un réservoir de stockage. La masse de béton de sol assure les fonctions de stockage de l'énergie et de déphasage de sa restitution dans le volume chauffé. Un circuit de dérivation permet de produire l'eau chaude sanitaire (fig. 18).

Le PSD, dans son principe, offre des atouts décisifs que nous rappelons brièvement [31] :

- Stockage thermique de l'énergie solaire dans le plancher en béton, intérieur au volume habitable.
- Inertie thermique importante.
- Régulation simplifiée, généralement réduite à un thermostat différentiel contrôlant un calculateur unique.
- Confort basse température, uniformité de température et de l'air ambiant (avantages des planchers chauffants).
- Economie d'investissement importante.
- Gain d'espace et suppression possible des radiateurs muraux.



**Figure. 18 - Schéma de fonctionnement d'un PSD**

## Conclusion

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Un choix centralisateur nous amène souvent à privilégier plusieurs sources énergétiques, sans véritablement analyser le bien-fondé de cette attitude.

L'utilisation des sources d'énergie renouvelable pour le chauffage présentent certains avantages qui apparaissent aujourd'hui de plus en plus déterminants, en particulier le caractère inépuisable de ces sources et leur faible impact sur l'environnement par rapport aux autres sources d'énergie.

## Introduction

Le chauffage par les planchers est un procédé ancien qui utilisait majoritairement en tube acier sous forme de grilles chauffantes noyées dans l'épaisseur de la dalle pleine. En effet dans ce chapitre nous décrivons bien détaillé le système plancher solaire direct.

### 2.1 Historique de la dalle chauffante

Sur le plan historique, trois périodes ont véritablement marqué l'histoire du plancher chauffant, à savoir l'époque de l'Empire romain, les années 1960-1980 et l'après-1980.

Quoique le plancher chauffant moderne fasse son apparition au début des années 1980, le principe de chauffage par le sol est connu depuis plus de 2000 ans (III-II siècles av. J.-C.).

En Europe, les Romains étaient ainsi les premiers à utiliser notamment, dans des hypocaustes, un système de chauffage par le sol à l'aide de l'air chaud circulant dans des canalisations. A peu près en même temps, en Asie, les premiers ondols coréens apparaissent. Ces systèmes Représentent un premier exemple non seulement de l'utilisation d'un intermédiaire pour Chauffer un local, mais également de la mise en place d'un chauffage central.

La deuxième période qui s'étale entre 1960 et 1980, se caractérise par la redécouverte d'un plancher chauffant qui, à ce moment-là, prend forme d'un réseau de tubes métalliques noyés dans la dalle pleine à l'intérieur de laquelle circule l'eau chaude chauffant le sol à plus de 35°C. Ce système s'avère donc cher, peu efficace, (importante consommation en énergie, problèmes de pose et d'entretien) et impossible à réguler [30].

La promulgation de l'Arrêté du 23 juin 1978, ouvre une nouvelle étape avec l'apparition d'un plancher chauffant basse température. Ce procédé permet d'obtenir un niveau requis de confort et de ne pas dépasser les 28°C de température au sol. Il met fin aux problèmes liés à la pose d'un tube métallique en préconisant l'utilisation de tubes en matériaux de synthèse et offre les premières possibilités de régulation. Toutes ces améliorations provoquent une prise de conscience considérable dans le contexte difficile qui suivit les premiers chocs pétroliers. Le plancher chauffant commence à gagner des parts de marché. Les années 1990 apportent une nouvelle amélioration du fait que, le plancher chauffant hydraulique devient un plancher chauffant réversible (fonctionne dans les deux sens, à savoir le chauffage en période froide et le refroidissement en été). La fonctionnalité du plancher chauffant s'élargit, son domaine d'application aussi. Depuis le début des années 2000, le progrès s'accélère davantage dans le domaine du plancher chauffant, de nouveaux systèmes, ne nécessitant pas d'enrobage de béton, font leur apparition sur le marché. La régulation passe, par ailleurs, à un stade supérieur avec la mise en place des thermostats sans fil [29]

## 2.2 Théorie de plancher chauffant

Au sein du chauffage hydraulique, le plancher chauffant occupe une place particulière sur le plan technologique. Il procure une distribution optimale de chaleur verticalement et horizontalement et dispose de la fonction de réversibilité. Parfaitement compatible avec les sources d'énergie renouvelable, il fait partie des systèmes basse température dont l'utilisation permet de réduire la consommation énergétique, et convient bien dans le cas d'une installation desservie par une Pompe à chaleur ou par un système solaire [29], [28]. L'installation de chauffage par plancher, est conçue pour apporter à l'intérieur des locaux, la puissance calorifique nécessaire pour compenser les déperditions de chaleur et maintenir une température désirée par l'intermédiaire d'une ou plusieurs grilles par local en tube de cuivre ou circule l'eau. Dans le chauffage traditionnel, les radiateurs font l'objet d'une fabrication industrielle standardisée conforme aux normes, qui se traduisent à travers des catalogues de sélection en fonction de la puissance requise. Dans le cas d'un plancher on doit concevoir et dimensionner les grilles chauffantes en fonction des caractéristiques des locaux, des différentes données thermiques et hydrauliques de l'installation projetée en respectant la réglementation de ne pas dépasser la température superficielle maximale en tout point du plancher qui est de 28°C, dans le cas contraire l'expérience a montré que la plante des pieds ne pouvait plus évacuer une quantité de chaleur physiologiquement nécessaire au bon équilibre de l'organisme [27].

## 2.3 Fonctionnement

Un plancher chauffant est un procédé d'émission de chaleur destiné à chauffer un habitat ou un local en utilisant la surface du sol pour chauffer l'air intérieur. Usuellement le plancher chauffant est un système à basse température, utilisant un fluide caloporteur (plancher chauffant hydraulique).

Le principe est de faire circuler directement dans un plancher un fluide chauffé par des capteurs solaires (voir Fig. 19) ou par autre source d'énergie sans utiliser de cuves de stockage intermédiaires.

La masse de béton de sol assure les fonctions de stockage de l'énergie et de déphasage de sa restitution dans le volume chauffé [31].

Dans ce système de chauffage, le tube transportant le fluide caloporteur est fixé sur une dalle en matériau isolant (polystyrène, polyuréthane), dalle flottante. Afin de réduire les déperditions de chaleurs, une bande d'isolation thermique est posée tout le long des éléments verticaux en contact avec la dalle [29], [26].

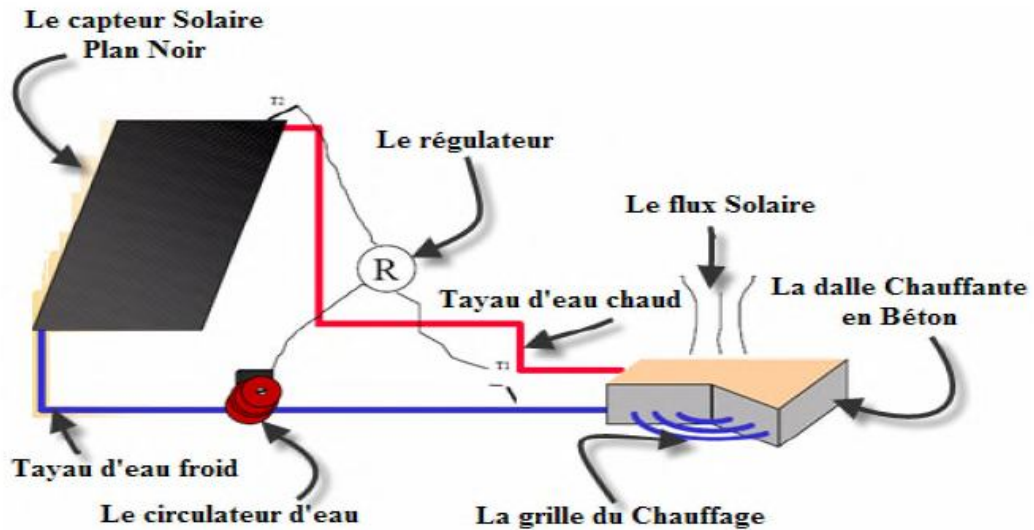


Fig. 19- Description du système étudié [1]

## 2.4 Dimensionnement

### 2.4.1 Température ambiante du local

Le plancher chauffant se comporte comme un grand radiateur au sol. La chaleur, diffusée par rayonnement, est homogène dans toute la pièce. Avec la suppression des zones froides, 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) [26].

### 2.4.2 Température superficielle du plancher

La température superficielle maximale du sol est fixée par décret à 28°C en tout point du local pour une température intérieure de 19°C (DTU 65.8).

La norme européenne donne des valeurs un peu plus importantes, 29°C et même 35°C Pour les zones de bordure pour une température intérieure de 20°C [30].

### 2.4.3 Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur a pour mission de transporter la chaleur de la source à l'utilisation. Le fluide idéal devrait avoir les propriétés suivantes

- Etre assez fluide pour diminuer les pertes de charge ;
- Avoir une grande capacité thermique par unité de volume, pour transporter la chaleur avec le plus petit débit possible ;
- Ne pas être corrosif pour les différentes parties du circuit ;
- Ne pas porter atteinte à l'environnement en cas de fuites ;
- Etre disponible à un prix abordable.

Le fluide le plus utilisé dans les installations de chauffage est l'eau. Ce fluide, à une grande capacité thermique, est à bon marché et ne nuit pas à l'environnement.

Néanmoins, l'eau peut être corrosive pour certains matériaux (fer, aluminium, par exemple), gèle à 0°C et bout à 100°C à la pression d'un bar et à 140°C à 4 bars. On est ainsi amené à y ajouter de l'éthylène-glycol (ou du propylène-glycol moins toxique) pour abaisser le point de congélation et augmenter le point d'ébullition. Cette addition augmente la viscosité, diminue la capacité thermique, augmente la toxicité et nécessite l'adjonction de passivateur pour diminuer l'agressivité corrosive.

Les passivateurs sont sensibles à la température et peuvent se décomposer. Il convient donc d'analyser périodiquement le fluide pour vérifier sa teneur en agents passivant, surtout si la température d'utilisation est élevée, et de compléter au besoin [32].

Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants [33] :

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.

#### 2.4.4 Température du fluide chauffant

Le choix de la température de départ du fluide est relativement délicat. La température de départ va influencer :

- ✓ La température superficielle du sol.
- ✓ 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) Si la température superficielle du sol dépasse 28°C il y a lieu de prendre une température de départ du fluide inférieure ou d'augmenter la chute de température du fluide [37].

**Tableau 2 - Caractéristiques thermo-physiques d'eau et de l'air [38]**

matériau	Température (°C)	Conductivité	Chaleur	Masse	Viscosité	viscosité
		Thermique (W/m.°C)	Massique (J/Kg.K)	Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Cinématique ( m <sup>2</sup> /s)	Dynamique (Pa.s)
<b>eau</b>	30	0.639	4160.49	995.71	1.002. 10 <sup>-3</sup>	1.007. 10 <sup>-6</sup>
<b>air</b>	19	0.0257	1006	1.3	1.51.10 <sup>-5</sup>	1.82. 10 <sup>-5</sup>

### 2.4.5 Inertie

La chaleur emmagasinée dans la dalle béton pendant la journée continuera à être diffusée durant la nuit.

La masse du béton supplémentaire sert alors à stocker l'énergie et à provoquer un déphasage suffisant entre le maximum d'ensoleillement et le maximum de restitution.

### 2.4.6 Pas de pose

Le "pas", est l'écartement en centimètre entre deux tubes du panneau, il est généralement compris entre 10 cm et 30 cm. mais peut éventuellement varier à l'intérieur d'une même grille, dans le cas où toutes les zones du local ne nécessitent pas la même quantité de chaleur [37].

### 2.4.7 L'isolation thermique

Les isolants utilisés ordinairement dans ce système de plancher sont, soit le polystyrène expansé, soit le polystyrène extrudé ou de la mousse de polyuréthane (4cm généralement sur terre-plein ou cave)(voir .

Sous une dalle épaisse sur terre-plein, l'isolation thermique correspond à une résistance thermique dépourvue d'inertie de  $1 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ . Elle correspond à 4 cm de polystyrène expansé ( $\lambda=0.040 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ )[35].

**Tableau 3 - Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux isolants [37]**

	Conductivité Thermique (w/m.K)	Chaleur Massique (J/Kg.K)	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Diffusivité (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)
Métal				
Mousse de polyuréthane	0.029	1600	30	6
Laine de verre	0.036	840	40	10.6
Polystyrène expansé	0.040	1500	20	13.3
Laine de roche	0.040	840	40	11.9

## 2.5 Les différents types de planchers chauffants

Sorte de grand radiateur qui recouvrirait tout le sol, le plancher chauffant connaît un nouvel engouement en France, dû aux nombreux progrès techniques octroyant confort et sécurité à un système longtemps décrié [7].

Il existe trois types de planchers chauffants :

### 2.5.1 Le plancher chauffant par eau basse température (PCBT)

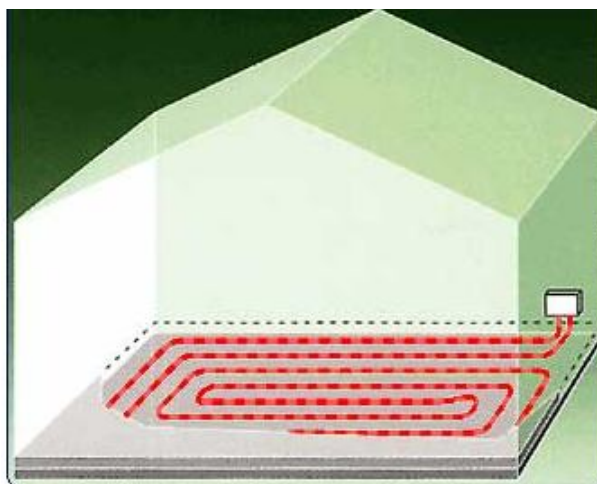
L'eau constitue le vecteur d'émission de la chaleur ou du rafraîchissement. Elle circule dans un réseau de tubes, en matériaux de synthèse, installés sur des panneaux isolants et recouverts d'une chape. Cette installation de chauffage est ensuite alimentée par un système de production d'énergie au choix, car elle est compatible en chauffage avec toutes les énergies (gaz naturel, électricité, propane, fioul, pompes à chaleur, solaire, énergies douces.....)[7].

En été, la technique du rafraîchissement consiste à faire véhiculer dans les tubes de l'eau à une température inférieure à la température ambiante. La chaleur de la pièce est ainsi absorbée par le sol. La production d'eau froide pourra être installée dès l'origine ou ultérieurement. Le plancher chauffant/rafraîchissant convient à tous les types de constructions neuves et de rénovation lourde. Il assure un confort thermique absolu dans l'habitat collectif ou individuel, les bâtiments de grand volume, le secteur tertiaire ou les collectivités (crèches, écoles, gymnases...)[7].

Le système, intégré dans une dalle flottante, est constitué :

- d'un isolant thermo-acoustique (guide tubes),
- de tubes en matériaux de synthèse,
- de collecteurs/organes de réglage pour la régulation et le confort,

d'une dalle flottante en béton (béton ou chape d'enrobage) ou d'une chape en mortier de ciment ou à base d'anhydrite (chape anhydrite)[7].





### Fig. 20 - Principe du plancher chauffant

Il est également possible de mettre en place une distribution centralisée ou technique de l'hydrocâblé pour le chauffage et le sanitaire. A partir d'un collecteur de répartition et d'équilibrage de l'installation, des canalisations en matériaux de synthèse sous fourreaux alimentent individuellement les appareils sanitaires en eau chaude ou froide ou les radiateurs. Une mise en œuvre par système hydrocâblé est un moyen de réaliser une installation de qualité, propre et sans tuyaux apparents tout en diminuant les longueurs de distribution. Cette technique consiste à alimenter les émetteurs de chauffage ou les appareils sanitaires par des canalisations en matériaux de synthèse. Encastré dans les sols ou dans les cloisons lors de la construction, ce système de distribution des fluides domestiques est très discret et même invisible. L'individualisation des points de puisage permet de supprimer l'effet "douche froide" et d'avoir rapidement de l'eau chaude quand plusieurs robinets fonctionnent simultanément [7].

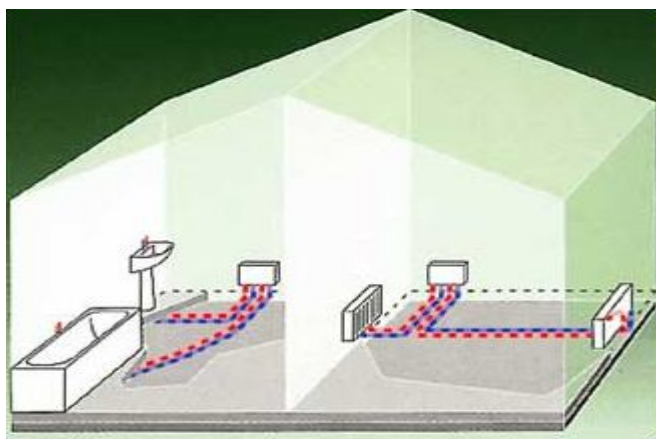


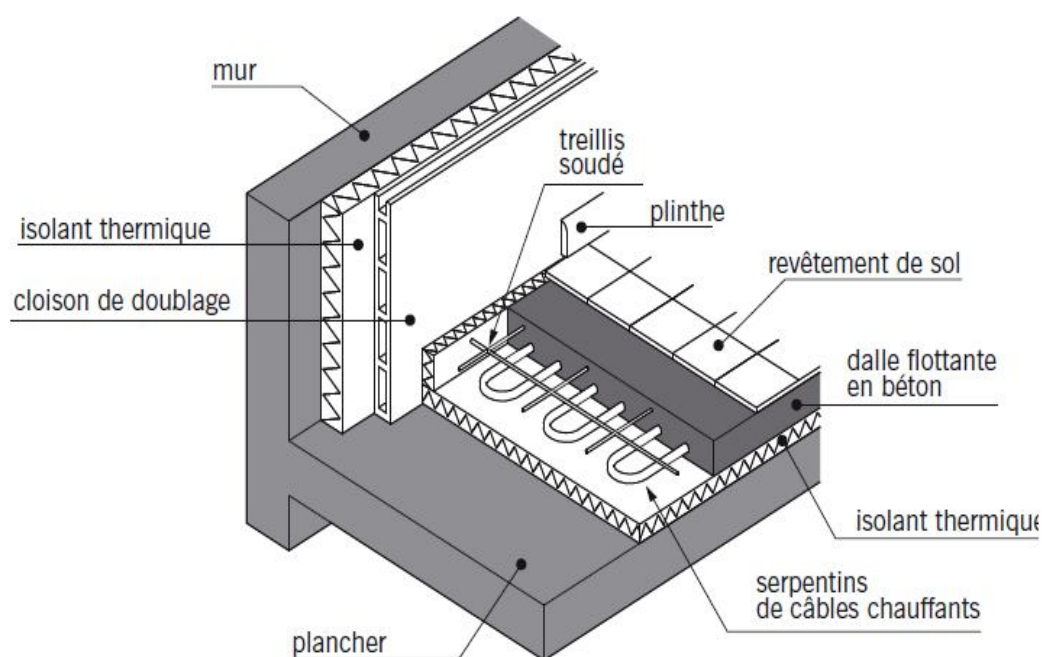
Figure. 21 - Principe de l'hydrocâblé

#### 2.5.2 Le plancher rayonnant électrique (PRE)

Le PRE est un système de chauffage au sol électrique régulé pièce par pièce (voir fig.22). Historiquement, en France, c'est la technique de chauffage par rayonnement la plus répandue puisqu'elle représente à ce jour, cinq fois plus de m<sup>2</sup> installés que pour les plafonds rayonnants, à l'inverse des scandinaves par exemple. Le PRE se compose d'un élément chauffant (câble électrique conditionné industriellement en trames préformées) incorporé dans une chape flottante armée ou posé sur celle-ci, d'une épaisseur comprise entre 4 et 5 cm, désolidarisée thermiquement et mécaniquement du bâti et reposant sur un isolant thermique servant à orienter le flux de chaleur vers le local à chauffer. Il ne restera plus qu'à recouvrir cette chape de son revêtement décoratif final [7].

Le coût d'installation d'un PRE est sensiblement inférieur, d'environ 30%, à celui du plafond rayonnant soit de 51 à 71 euros HT le m<sup>2</sup> hors revêtement de sol. Il est généralement installé dans

le cadre de construction neuve ou de rénovation lourde qui implique une démolition et réfection du sol. Sinon, dans le cadre d'une rénovation légère, le coût de cette réfection du sol peut vite s'avérer prohibitif. Sa part de rayonnement est également moindre du fait du positionnement de l'émetteur au sol par rapport à un plafond. De plus, les meubles et autres tapis font obstacle à la chaleur et impliquent l'usage d'une puissance plus forte. De fait il est conseillé d'utiliser plutôt des meubles pourvus de pieds que reposant directement sur le sol, un écart entre le mobilier et le sol inférieur à 3 cm nuisant à l'émission de chaleur. En revanche, le sol garde la chaleur plus longtemps. Ainsi, si le sol est plus long à se réchauffer qu'un plafond, il est également plus lent à se refroidir. Autre avantage, et non des moindres, avec un PRE le sol est constamment tempéré, quelque soit le revêtement. Fini les carreaux froids sous les pieds dans la cuisine en se levant le matin en janvier, d'autant que cette chaleur est répartie uniformément sur l'ensemble du sol. Puisqu'il s'agit d'un chauffage électrique, il peut être ajusté dans toutes les pièces en fonction des besoins et des usages des habitants et peut donc également se programmer très facilement (hors gel en cas d'absence par exemple) comme un chauffage électrique habituel [7].



**Fig. 22 - Le plancher rayonnant électrique (PRE)**

### 2.5.3 Le plancher chauffant à fluide caloporteur

Couplé avec un système de pompe à chaleur, les planchers chauffants peuvent être alimentés par des fluides caloporteurs. S'il présente de nombreux avantages économiques avec un prix d'achat relativement bas et une consommation d'énergie assez faible, ce système de chauffage est loin d'être aussi écologique qu'on pourrait le croire. Une fois relâchés dans l'atmosphère, ces fluides caloporteurs produisent de violents gaz à effet de serre, particulièrement nocifs pour la couche

d'ozone. Ces fluides circulant en circuit fermé, ils ne seront libérés qu'au moment du changement des circuits, qui ont une durée de vie d'environ 25 ans [7].

## 2.6 Les éléments constructifs d'un plancher chauffant

### 2.6.1 La dalle chauffante

La dalle du plancher est considérée comme un solide homogène. Son épaisseur sur terre-plein (voir fig.23), contient des tubes formant une chaîne tubulaire variant sur un intervalle bien défini. Ces derniers reposent sur une couche de 4cm d'isolant thermique (polystyrène), [39].

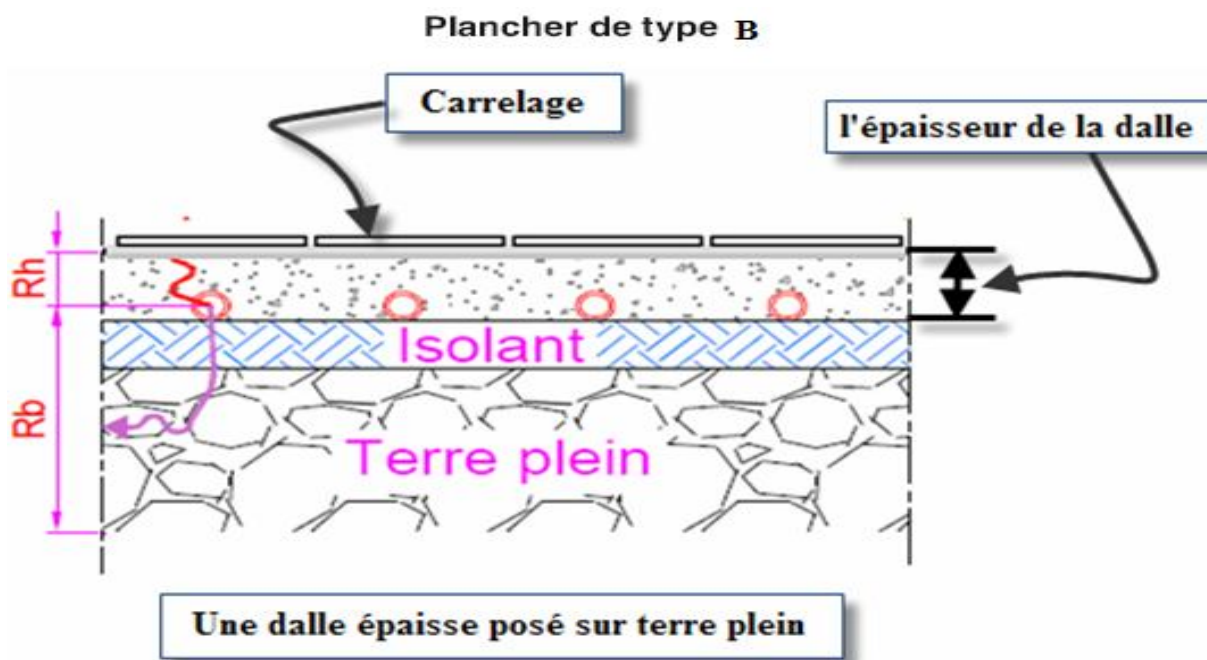


Figure. 23 - Dalle de plancher chauffant sans pré-dalle

#### 2.6.1.1 Les paramètres thermiques et géométriques

Notre travail consiste, d'une part, à étudier l'influence des divers paramètres constitutifs du plancher chauffant sur la température superficielle du plancher afin de déterminer les paramètres géométriques et thermiques optimaux de l'installation du plancher chauffant.

En effet, les paramètres étudiés représentés dans le tableau suivant :

**Tableau 4 - Les paramètres de référence de l'installation du plancher chauffant [1]**

Les paramètres géométriques	Les paramètres thermiques
Diamètre du tube: $D_{\text{tube}} = 20\text{mm}$	Conductivité thermique du béton: $\lambda_{\text{béton}} = 1.75\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
Ratio de captation: $R_0 = 0.3$	
Surface de la dalle: $S_{\text{pl}} = 3.24\text{ m}^2$	Résistance thermique de revêtement du sol $R_{\text{th\_rev}} = 0.005\text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$
écartement des tubes : $p_{\text{tube}} = 20\text{cm}$	Résistance thermique d'isolation: $R_{\text{th\_is}} = 1\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$

#### ❖ Caractéristiques de la dalle [41]

- Conductivité thermique du béton :  $\lambda_{\text{béton}} = 1.75\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
- Masse volumique du béton :  $\rho_{\text{pl}} = 2300\text{ Kg}/\text{m}^3$
- Capacité calorifique du béton :  $C_{\text{ppl}} = 0.23\text{ Wh}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

#### 2.6.2 Les tubes de la grille de chauffage

Les tubes utilisés sont en cuivre recuit, en raison de sa résistance à la température et la pression, pour sa faible dilatation thermique (coefficient de dilatation de 1.7 mm / m pour 100°C), sa maniabilité relativement facile et son niveau bas de susceptibilité à la corrosion.

De plus le coefficient de dilatation thermique du cuivre est voisin de celui du béton, ce qui est un atout dans le domaine du plancher chauffant.

On utilise pratiquement des tubes en matière plastique dont les qualités ont subies, ces dernières années, des améliorations pour qu'ils satisfassent parfaitement aux exigences souhaitées, à savoir la bonne tenue vis-à-vis de la température, de la pression, de la durée de vie. Tous les types de plancher chauffant peuvent être réalisés à partir de tubes en matière plastique. Les principales matières plastiques utilisées pour la fabrication des tubes sont : le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE) et le polyéthylène réticulé (PER), le polybutène (PB).

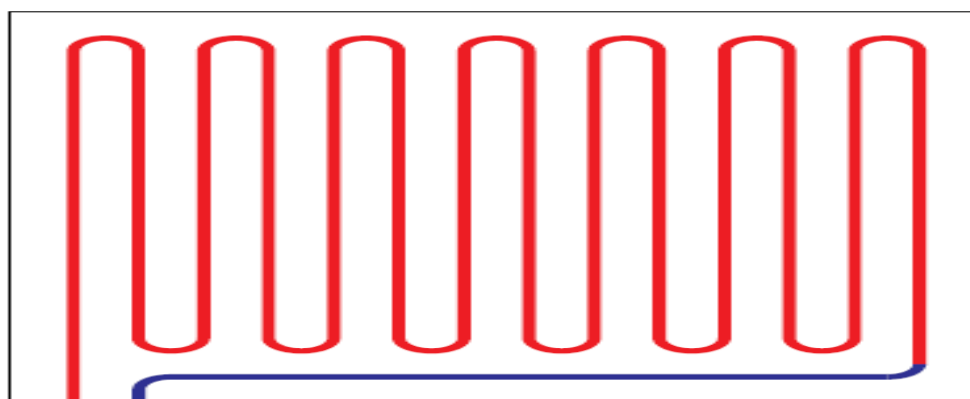
Il faut noter que le tracé de tubes peut avoir différentes formes. Dans le cas général, on dispose de tubes placés horizontalement sur les armatures de la dalle, sous forme de double spirale concentrique ; ce système présente l'avantage de répartir la chaleur de manière uniforme surtout au niveau de la surface du plancher. D'autres systèmes de pose sont possibles, comme le système en serpentin et de forme escargot. Mais la solution la plus courante est la forme serpentin [27]

**Tableau 5 - Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux métalliques [37]**

	Conductivité Thermique (W/m.K)	Chaleur Massique (J/Kg.K)	Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Diffusivité (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
Métal				
cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
Aluminium	204	879	2700	86

Cependant les tubes de la grille de chauffage conviennent idéalement au chauffage par le sol ils doivent vérifier les conditions suivantes :

- ✓ Bonne résistance à la température, même à long terme;
- ✓ Souplesse du tube pendant l'installation;
- ✓ Une absence totale de micro-déchirures (corrosion par tension);
- ✓ Excellentes caractéristiques chimiques et mécaniques [40].

**Fig. 24 – Une grille de chauffage en forme de serpent**

### 2.6.3 La pompe de circulation

La pompe fait circuler le fluide caloporteur entre les capteurs et le ballon solaire ; elle est activée automatiquement par la régulation lorsque la température du fluide à la sortie des capteurs est supérieure à la température de l'eau sanitaire dans le ballon solaire [1].

On a deux circulateur l'un à "**débit constant**" et l'autre à "**débit variable**" (Fig. 25).

✓ Le circulateur à **débit constant** comprend trois vitesses permettant d'ajuster (manuellement) au mieux le débit de circulation du fluide caloporteur.

✓ Le circulateur à **débit variable** utilisé avec les capteurs à faible débit, ce qui permet d'obtenir des températures plus élevées [1].



**Fig. 25 - Les types de circulateur utilisés dans l'installation d'une dalle chauffante**

#### **2.6.4 L'isolation thermique de la dalle chauffante**

Les isolants thermiques à base de matières naturels alvéolaires sont seuls utilisables (polystyrène expansé, polystyrène extrudé, chanvre, fibres de bois, liège ou autres, mousse de polyuréthane).

#### **2.6.5 Revêtement de sol**

La pierre et le carrelage sont les revêtements les plus fréquents pour un plancher chauffant à condition qu'ils ne soient pas trop épais pour ne pas ralentir le rayonnement de la chaleur. Cependant la plupart des revêtements peuvent recouvrir le sol équipé d'un plancher chauffant : Carrelage, grès, marbre, moquette, PVC, .....etc[39].

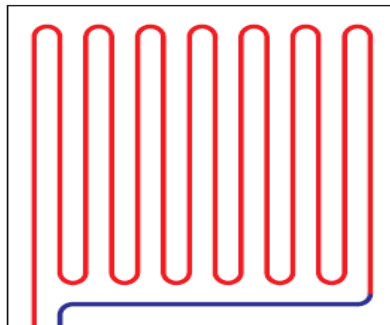
#### **2.6.6 Positionnement des tubes dans la dalle chauffante de système**

Pour le placement des tubes de chauffage par le sol, on a le choix entre différentes méthodes. Les différentes méthodes donnent pratiquement la même émission calorifique sur l'ensemble de la surface. C'est la distance entre les tubes qui est déterminante pour l'émission calorifique. Le choix d'une méthode peut être déterminé par le système de chauffage, la disposition du bâtiment ou la pose plus pratique.

Dans les figures ci-dessous, le placement en forme de méandres est caractérisé par des courbes de 180°. En revanche, le bifilaire se caractérise, lui, par des courbes de 90°; celui-ci sera donc plus facile à réaliser [39].

##### **2.6.6.1 Placement en forme de méandres**

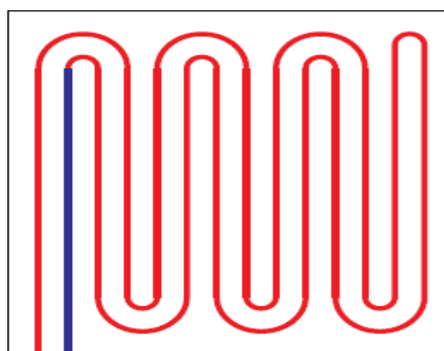
Par cette méthode de placement, on obtient au fur et à mesure de la progression du tuyau, une diminution de la température du sol. Le début de circuit permet la plus grande transmission de chaleur; c'est pourquoi on le prévoit le long des parois froides (fenêtre)[39].



**Fig. 26 - positionnement format de méandres.**

### 2.6.6.2 Variante du placement en forme de méandres

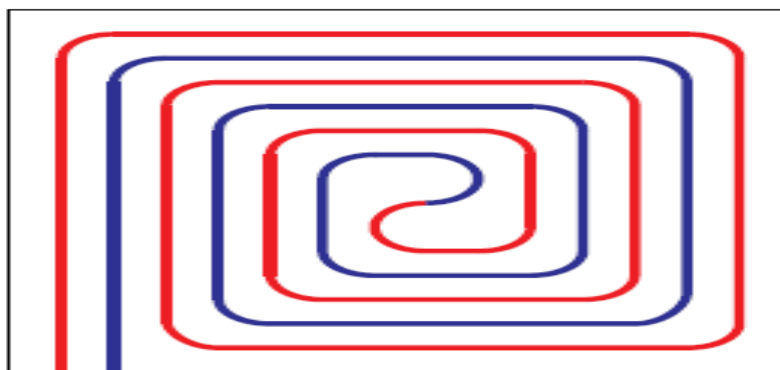
Cette variante permet de placer l'un à côté de l'autre un départ et un retour et donne ainsi une température de sol uniforme (Fig. 27).



**Fig. 27 - positionnement cote à cote des tubes**

### 2.6.6.3 Placement bifilaire

Par cette méthode, on place l'un à côté de l'autre un départ et un retour et cela donne une température de sol extrêmement uniforme. Dans ce cas, on doit simplement cintrer les tuyaux à 90°, (Fig. 28)[39].



**Fig. 28 - positionnement bifilaire**

## **Conclusion**

La technique de chauffage par plancher solaire direct (PSD), procure une distribution de chaleur optimale, La masse de béton de sol assure les fonctions de stockage de l'énergie et de déphasage de sa restitution dans le volume chauffé.

Le chauffage par plancher chauffant présentent certains avantages tel que :

- Confort basse température, uniformité de température et de l'air ambiant
- Economie d'investissement importante.

Cette technique de chauffage est parfaitement compatible avec l'utilisation des énergies renouvelables.



## Introduction

Dans cette partie nous avons abordé la modélisation mathématique de la dalle chauffante comme un élément de modélisation de notre système.

En effet, le bilan thermique du plancher a été élaboré, pour cela des hypothèses simplificatrices ont été adoptées.

### 3.1 Hypothèses simplificatrices :

- La température de départ fluide est supposée constante égale à 30°C.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Les flux de chaleur sont unidimensionnels.
- Le fluide caloporteur utilisé est l'eau pure.
- La température d'entrée du plancher chauffant égal à la température du fluide.
- Nous nous limitons seulement à étudier les échanges de chaleur de la partie supérieure du Serpentin.
  
- On considère que le régime est transitoire.
- Le fluide caloporteur circule à vitesse constante  $V$  dans le tube.
- La température ambiante égale à 19°C.
- Le coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide et le béton est Supposé constante et égale à  $6.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Nous supposons que la température sortie du capteur est toujours fixe et égal à 30°C.

### 3.2 Les différentes modes de transfert de chaleur

Une surface chauffante ou un corps de chauffe, transmet à l'air ambiant des pièces à chauffer, par convection, la chaleur fournie par le fluide caloporteur.

Lorsque le plancher est parfaitement isolé du côté sol, nous nous limitons seulement à étudier les échanges de chaleur de la partie supérieure du serpent [25], [24].



**Figure. 29 - Les différents échanges thermiques dans un plancher[37]**

### 3.2.1 Echange par convection

Les échanges par convection existent principalement entre :

- Le plancher et le fluide caloporteur (eau). (Apport de chaleur pour le plancher).
- Le plancher et le milieu ambiant. (Pertes de chaleur pour le plancher).

Les équations s'écrivent alors comme suit :

#### 3.2.1.1 L'échange entre le fluide caloporteur et le plancher

$$\varphi_{vplf} = h_{vplf} \cdot S_{plf} (T_f - T_{pl}) \quad (3.1)$$

Avec :

$\varphi_{vplf}$  : Flux de chaleur d'échange convectif entre le fluide et la surface du plancher.

$h_{vplf}$  : Coefficient de transfert de chaleur convectif entre le fluide et le plancher.

$S_{plf}$  : Surface d'échange entre le fluide et le plancher.

$T_{pl}, T_f$  : Températures respectives du plancher et du fluide caloporteur (l'eau).

$$S_{plf} = \pi \cdot D \cdot L_{tube} \quad (3.2)$$

Où ;

$L_{tube}$  : est la longueur du tube.

D : diamètre du tube.

### 3.2.1.2 L'échange entre le plancher et l'air

On utilise la relation :

$$\varphi_{\text{vpla}} = h_{\text{vpla}} \cdot S_{\text{pl}} \cdot (T_{\text{pl}} - T_{\text{air}}) \quad (3.3)$$

Avec :

$\varphi_{\text{vpla}}$  : Flux de chaleur échangé par convection entre la surface du plancher et l'air.

$h_{\text{vpla}}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le plancher et l'air.

$S_{\text{pl}}$  : Surface du plancher.

$T_{\text{pl}}$  : Température du plancher.

$T_{\text{air}}$  : Température de l'air.

Le coefficient de convection naturelle entre le béton et l'air  $h_{\text{vpla}}$  évalué d'après la corrélation [13], [14], reste valable pour une plaque horizontale chauffée par le bas :

$$N_u = 0.54 \cdot Ra^{1/4} \quad (3.4)$$

$$N_u = \frac{h_{\text{vpla}} \cdot W}{\lambda_{\text{air}}} \quad (3.5)$$

$$Ra = \frac{C_{p_{\text{air}}} \times \beta \times \Delta T \times g \times \rho_{\text{air}}^2 \times L^3}{\lambda_{\text{air}} \times \mu_{\text{air}}} \quad (3.6)$$

Où :

$N_u$  : Nombre de Nusselt

$W$  : Rapport entre la surface et le périmètre de la dalle.

$\lambda_{\text{air}}$  : Conductivité thermique de l'air.

$Ra$  : Nombre de Rayleigh.

$C_{p_{\text{air}}}$  : Capacité thermique de l'air

$\beta$  : Le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne du fluide ( $\beta = 1/T$  pour un fluide parfait).

$\Delta T$  : Écart de températures

$g$  : gravité

$\rho_{air}$  : Masse volumique de l'air

L : Longueur caractéristique

$L=D_h$  (diamètre hydraulique).

$\mu_{air}$  : Viscosité dynamique de l'air

### ✓ **Diamètre hydraulique**

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (3.7)$$

Où :

A est l'aire de la section de passage du tube et P le périmètre mouillé de cette section.

Par exemple, pour un tube de section circulaire de diamètre D on trouve :

$$D_h = \frac{4 \cdot \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D \quad (3.8)$$

### 3.3 Description du système

Un plancher chauffant est un procédé d'émission de chaleur destiné à chauffer un habitat ou un local en utilisant la surface du sol pour chauffer l'air intérieur. Usuellement le plancher chauffant est un système à basse température, utilisant un fluide caloporteur (plancher chauffant hydraulique). Un plancher chauffant constitué essentiellement de trois éléments :

- sources d'énergie
  - Pour un fonctionnement optimal du plancher chauffant hydraulique, vous pouvez choisir entre plusieurs sources d'énergie :
  - ✓ **chaudière** : peut être alimentée par divers types d'énergies (bois et dérivés du bois, gaz propane ou naturel, fioul domestique...);
  - ✓ **pompe à chaleur** : modèles aérothermiques (air/air, air/eau) ou modèles à chaleur géothermique ;
  - ✓ **capteurs solaires** : ils peuvent donner l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de votre installation.
- Une dalle dans laquelle circule le fluide caloporteur chauffé par les capteurs (par exemple). Elle 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 du Plancher [23].

### 3.4 Courbe de corrélation

#### 3.4.1 Corrélation des Diamètres des tubes (valeur standard 20mm)

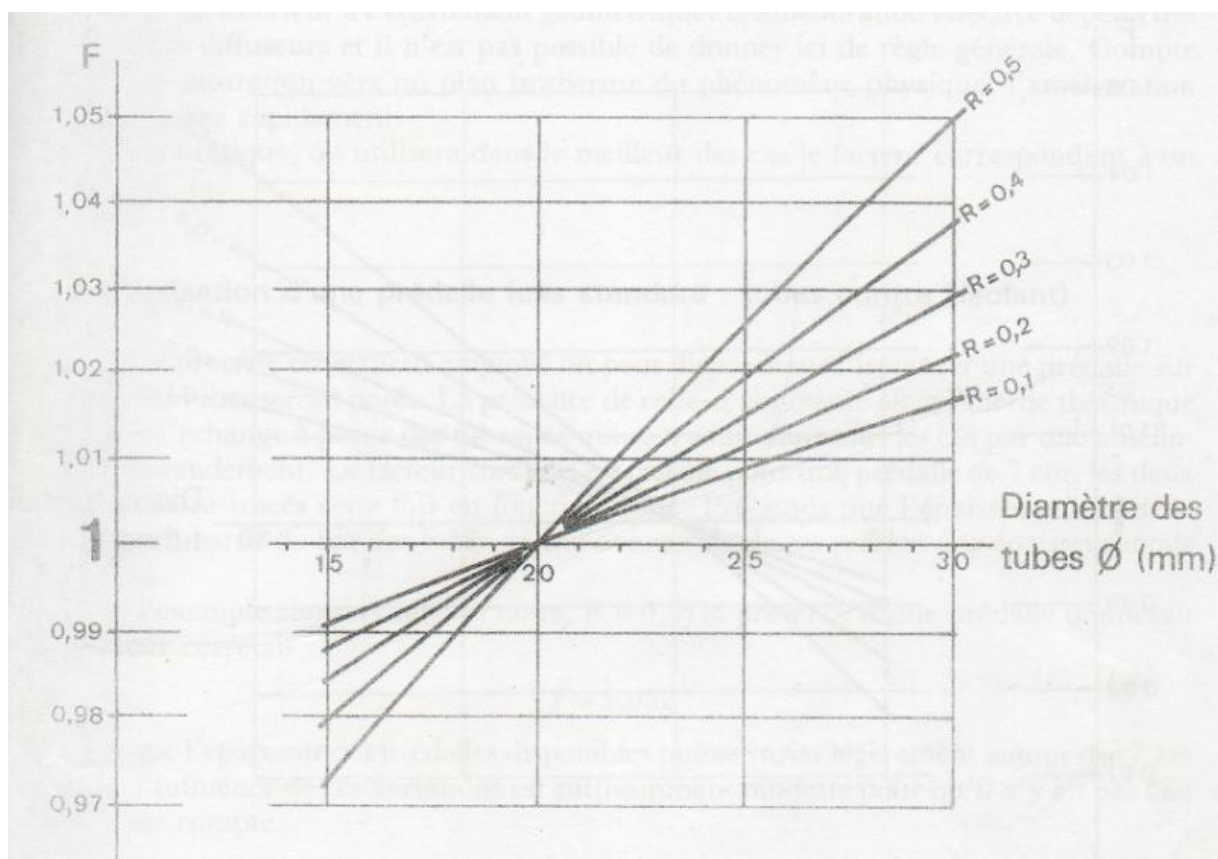
Le diamètre des tubes peut varier légèrement en fonction du matériau retenu et des diamètres disponibles. Pour des tubes métallique (cuivre, acier), on tiendra compte du diamètre extérieur, alors que pour les tubes en polymères organiques, c'est le diamètre intérieur qu'il faut utiliser.

Le facteur correctif est donné en fonction du diamètre et du ratio de captation. On constate qu'il est possible de choisir des tubes de diamètre compris entre 15 et 30 mm, pour un facteur correctif restant dans l'intervalle  $- 2 \%$  à  $+ 5 \%$ .

Dans notre exemple (capteurs noirs = 0,3), si l'on choisissait des tubes de 16 mm, le facteur correctif serait :

$$F = 0.99$$

On notera la faible influence thermique, mais on ne perdra pas de vue que la perte de charge de la grille sera que doublée [35].



**Fig. 30 - Courbe de corrélation des Diamètres des tubes [35]**

En appelant  $\varnothing$  le diamètre des tubes installés et  $\varnothing_0$  celui des tubes pris pour le cas standard, on a :

$$F = \left(\frac{\varnothing}{\varnothing_0}\right)^{0,030 + 0,23 R^{1,5}} \quad (3.9)$$

Où ;

R : ratio du captation solaire

F : facteur correctif

### 3.5 Les paramètres de fonctionnement

Les paramètres de fonctionnement son :

- ✓ Le débit du fluide caloporteur.
- ✓ Le mode de pose du panneau chauffant, et la limitation du pas.
- ✓ La conductivité thermique du béton.
- ✓ La limite de température superficielle da la dalle.
- ✓ La température ambiante.
- ✓ La température du fluide chauffant.

### 3.6 La méthode numérique de résolution

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

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

#### 1. Méthode des différences finies

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

La méthode des différences finies présente des avantages à savoir, une grande simplicité d'écriture, et un faible coût de calcul, et quelques inconvénients tels que une limitation de la géométrie des domaines de calcul, des difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue ainsi que l'absence de résultats de majorations d'erreurs[37].

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

Différence divisée progressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{h} \quad (3.10)$$

Différence divisée progressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{-u_{i+2} + 4 \times u_{i+1} - 3 \times u_i}{2 \times h} \quad (3.11)$$

Différence divisée régressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_i - u_{i-1}}{h} \quad (3.12)$$

Différence divisée régressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{3 \times u_i - 3 \times u_{i-1} + u_{i-2}}{2 \times h} \quad (3.13)$$

Différence divisée centrée

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{h} \quad (3.14)$$

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

Différences divisées progressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta y} \quad (3.16)$$

Différences divisées régressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (3.18)$$

Différences divisées centrées

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2 \times \Delta x} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2 \times \Delta y} \quad (3.20)$$

### 3.7 Bilan thermique d'un plancher chauffant

En effectuant le bilan thermique au niveau de chaque nœud, on obtient l'équation suivante décrivant le comportement du plancher [37].

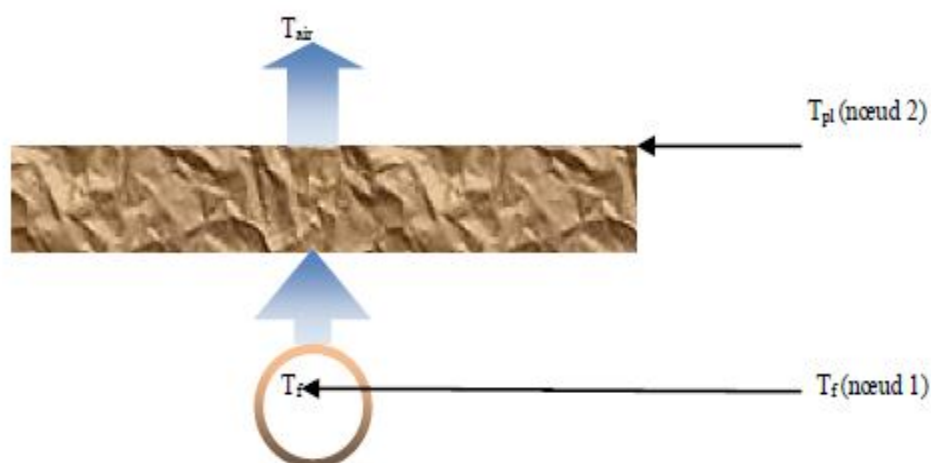


Fig. 31 - Nœuds considérés dans le plancher

$$\frac{dT_{pl}}{dt} = \frac{h_{vplf} S_{plf}}{\rho_{pl} C_{ppl}} (T_f - T_{pl}) - \frac{S_{pl}}{\rho_{pl} C_{ppl}} (\varphi_{vpla}) \quad (3.21)$$

Où :

$\varphi_{vpla}$  : Flux de chaleur échangé par convection entre la surface du plancher et l'air.

$\rho_{pl}$  : Masse volumique du béton

$C_{ppl}$  : Chaleur massique du béton

### 3.7.1 Résolution de l'équation

Après la formulation mathématique du système, on discrétise l'équation par la méthode des différences finies en adoptant descendant pour le terme convectif du fluide et un schéma explicite pour le terme transitoire [31].

On obtient :

$$T_{pl}^{t+1} = T_{pl}^t \left[ 1 - \frac{h_{vplf} S_{plf} \Delta t}{\rho_{pl} C_{ppl}} \right] + \left( \frac{h_{vplf} S_{plf} \Delta t}{\rho_{pl} C_{ppl}} \right) T_f^t - \left( \frac{S_{pl} \Delta t}{\rho_{pl} C_{ppl}} \right) (\varphi_{vpla}) \quad (3.22)$$

### 3.7.2 Conditions aux limites et conditions initiales

Après la discrétisation on pose les conditions aux limites pour le fluide et le plancher :

Au premier nœud, la température du plancher est égale à la température du fluide qui est supposée constante dans notre système.

$$T_f^t = T_{pl}^t$$

$T_{pl}^t$  = Température du plancher au premier nœud.

## 3.8 Pertes de charge

### 3.8.1 Pertes de charge singulières

Quand la conduite subit de brusque variation de section ou de direction, il se produit des pertes de charges dites singulières, elles sont généralement mesurable et font partie des caractéristiques de l'installation [34].

On les exprime par :

$$J_s = -K_s \cdot \frac{V^2}{2} \quad (3.23)$$

Où s : indice de l'accident de forme de la conduite.

$K_s$  : Coefficient (sans unité) de pertes de charge. Il dépend de la nature et de la géométrie de l'accident de forme.

Les valeurs de  $s K_s$  sont données par les constructeurs dans leurs catalogues.

V : Vitesse du fluide



### 3.8.2 Pertes de charges linéaires

Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites. En chaque point d'un écoulement permanent, les caractéristiques de l'écoulement sont bien définies et ne dépendent pas du temps.

La représentation graphique de l'écoulement prend l'allure ci-dessous.

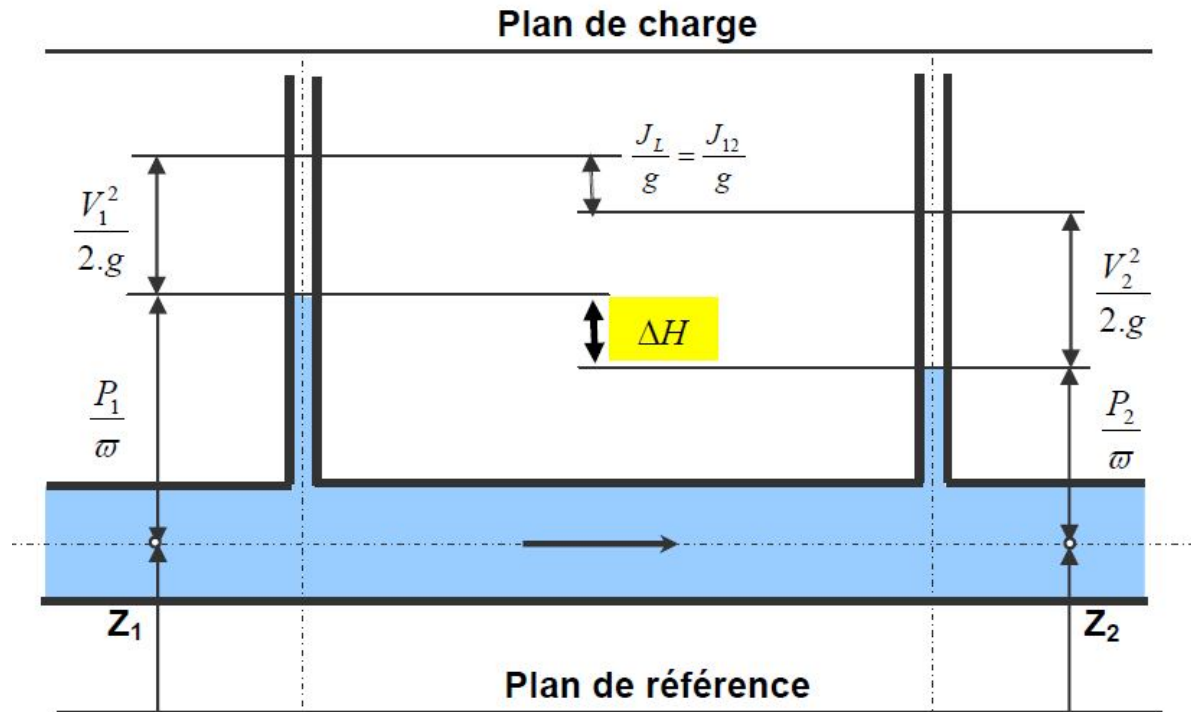


Fig. 32 - La représentation graphique de Pertes de charges linéaires[34]

La vitesse étant constante, la ligne piézométrique et la ligne de charge sont parallèles. La variation de hauteur piézométrique, évaluée en hauteur de liquide est égale à la perte de charge linéaire entre les deux points de mesure.

Les pertes de charge linéaires sont proportionnelles à la longueur  $L$  de la conduite, inversement proportionnelles à son diamètre  $d$ , proportionnelle au carré de la vitesse débitante  $V$  du fluide [34].

$$J_L = -\lambda \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \left( \frac{L_{tube}}{D} \right) \quad (3.24)$$

Où ;

$V$  : vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite (m/s)

$L_{tube}$  : Longueur de tube (m)

$D$  : diamètre de la conduite (mm)

$\lambda$  : coefficient de perte de charge linéaire. Il dépend du régime d'écoulement et notamment du nombre de Reynolds  $R_e$  .

Dans un régime d'écoulement laminaire :  $R_e < 2000$

$$\lambda = \frac{64}{Re} \text{ (Formule de Poiseuille)}$$

Dans un régime d'écoulement turbulent lisse :  $2000 < Re < 10^5$

$$\lambda = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \text{ (Formule de Blasius)}$$

Dans un régime d'écoulement turbulent rugueux :  $Re > 10^5$

$$\lambda = 0,79 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{d}} \text{ (Formule de Blench)}$$

avec :

-  $\varepsilon$  : rugosité de la surface interne de la conduite (mm)

-  $d$  : diamètre intérieur de la conduite (mm)

Unité J/kg.

### 3.9 La quantité de chaleur utile

La quantité de chaleur utile est donnée par l'équation suivante :

$$\varphi_u = (\dot{m}c_p)_f \cdot (T_{pl(1)} - T_{pl(fin)}) \quad (3.25)$$

Où:

$\varphi_u$  = La quantité de chaleur utile en watt

$\dot{m}_f$  = la débit massique du fluide en (kg/s)

$Cp_f$  = capacité calorifique du fluide

$T_{pl(1)}$  = Température du plancher au premier nœud

$T_{pl(fin)}$  = Température du plancher au dernier nœud.

### 3.10 La quantité de chaleur perdue

La quantité de chaleur perdue est donnée par l'équation suivante :

$$\varphi_{out} = h_{vplf} \cdot S_{pl} \cdot (T_f - T_{air}) \quad (3.26)$$

Où:

$\varphi_{out}$  : La quantité de chaleur perdue.

$h_{vplf}$  : Coefficient de transfert de chaleur convectif entre le fluide et le plancher.

$S_{pl}$  : Surface du plancher.

$T_f$  : Température du fluide

$T_{air}$  : Température de l'air.

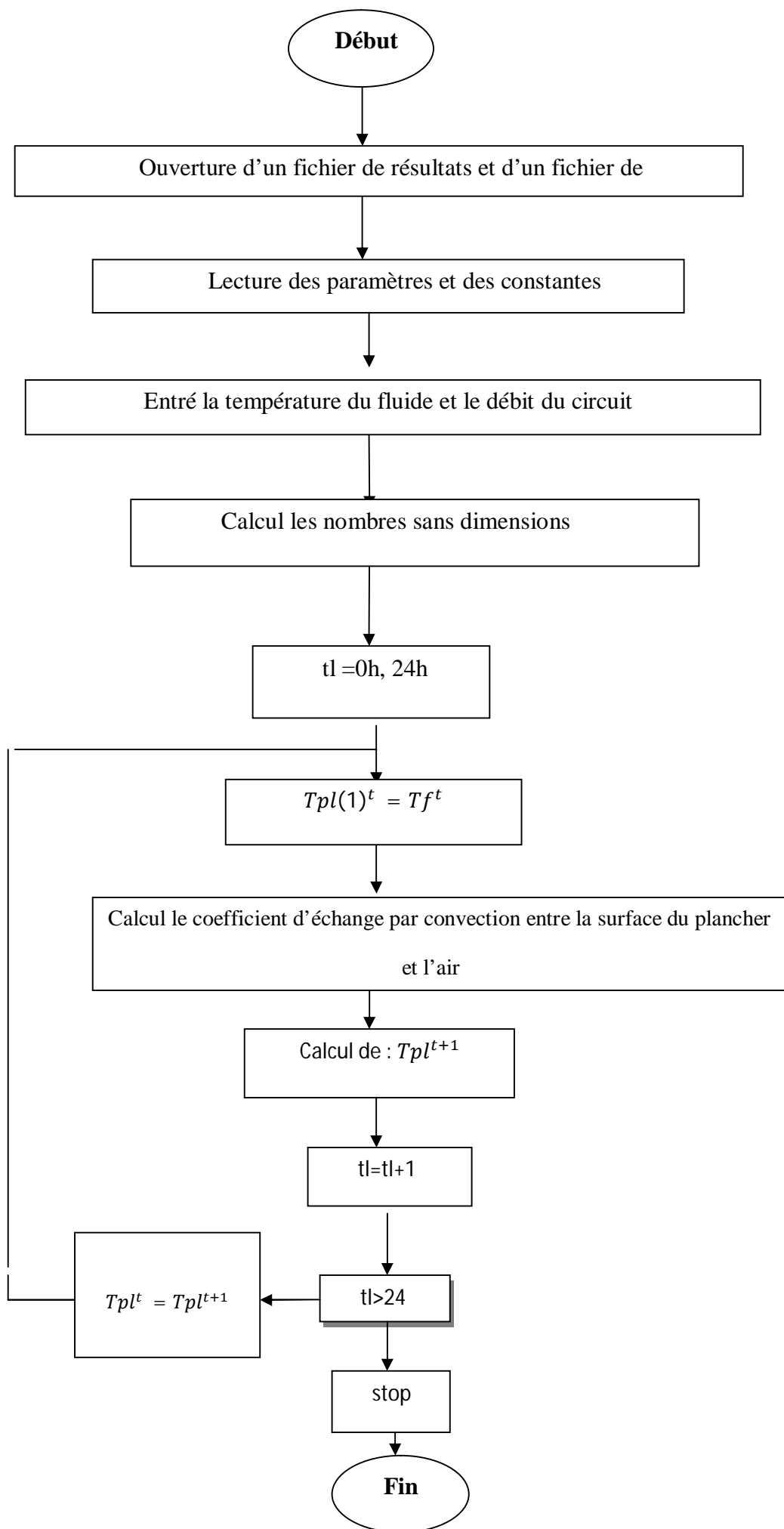
### **3.11 Traitement informatique**

#### **3.11.1 Programme principal**

Le programme informatique élaboré est écrit en MATLAB. Il suit les démarches suivantes :

1. Entrée des données et des constantes.
2. Nous supposons au départ que la température du plancher est égale à la température du fluide.
3. Entrée de la température du fluide et du débit de circuit.
4. Entrée Les propriétés thermo-physique de l'eau et du béton :
  - La masse volumique du béton, et de fluide
  - La conductivité thermique de l'air
  - La capacité thermique du béton et de l'air
5. Calcul de coefficient d'échange thermique par convection entre la surface du plancher et l'air ambiant.
6. Calcule la température superficielle du plancher

### 3.12 Organigramme développé pour le calcul numérique



## **Conclusion**

En analyse numérique, la méthode des différences finies est une technique courante de recherche de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres.

En apparence, cette méthode apparaît comme étant la plus simple à mettre en œuvre car elle procède en deux étapes : d'une part la discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation/différentiation, d'autre part la convergence du schéma numérique ainsi obtenu lorsque la distance entre les points diminue.

Cette méthode présente des avantages à savoir, une grande simplicité d'écriture, et un faible coût de calcul.

## Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de la modélisation et la simulation numérique de la dalle chauffante, ainsi que leurs interprétations.

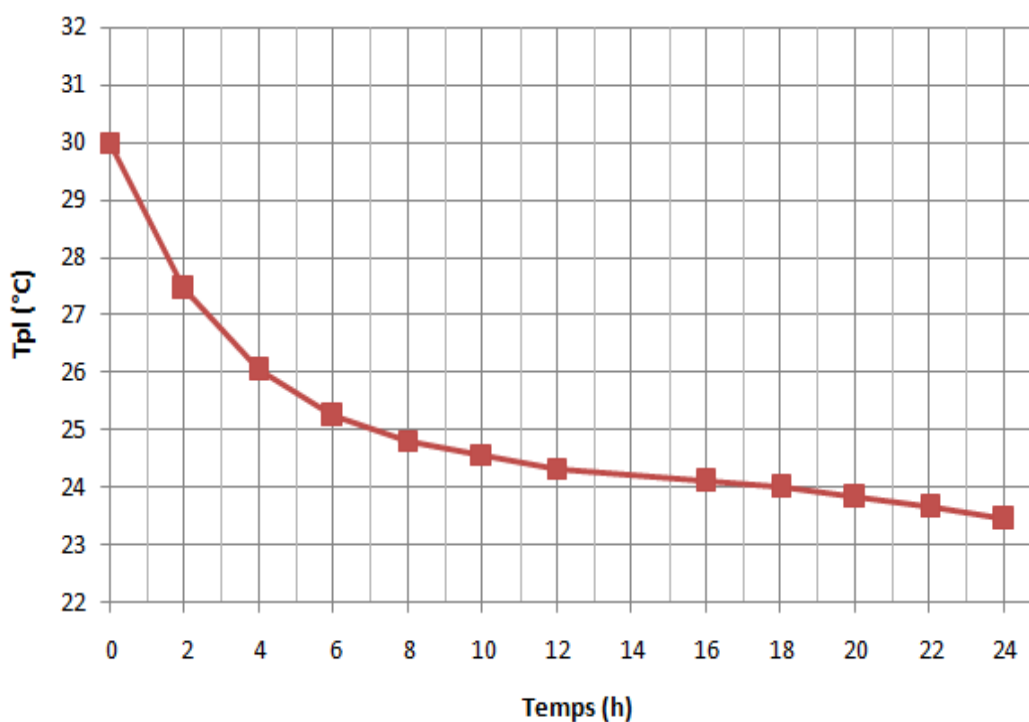
Un programme de calcul a été développé en code MATLAB afin de simuler le fonctionnement hygrothermique de la circuit hydraulique de la dalle chauffante.

De plus des graphes de l'évolution de la température superficielle du sol en fonction du temps et paramètres géothermiques ont été discutés et interprétés.

### 4.1 Variation temporelle de la température superficielle du plancher

Il apparaît nettement sur la figure 33 que la température du plancher, diminue graduellement avec le temps et atteint sa valeur minimum à 23.6°C.

Par ailleurs, la température maximale de l'eau à l'entrée de la dalle est de l'ordre de 30°C, afin que la température du plancher ne dépasse en aucun cas 28°C (DTU 65.8).



**Fig. 33 - Variation temporelle de la température superficielle du plancher**

### 4.2 La grille de chauffe

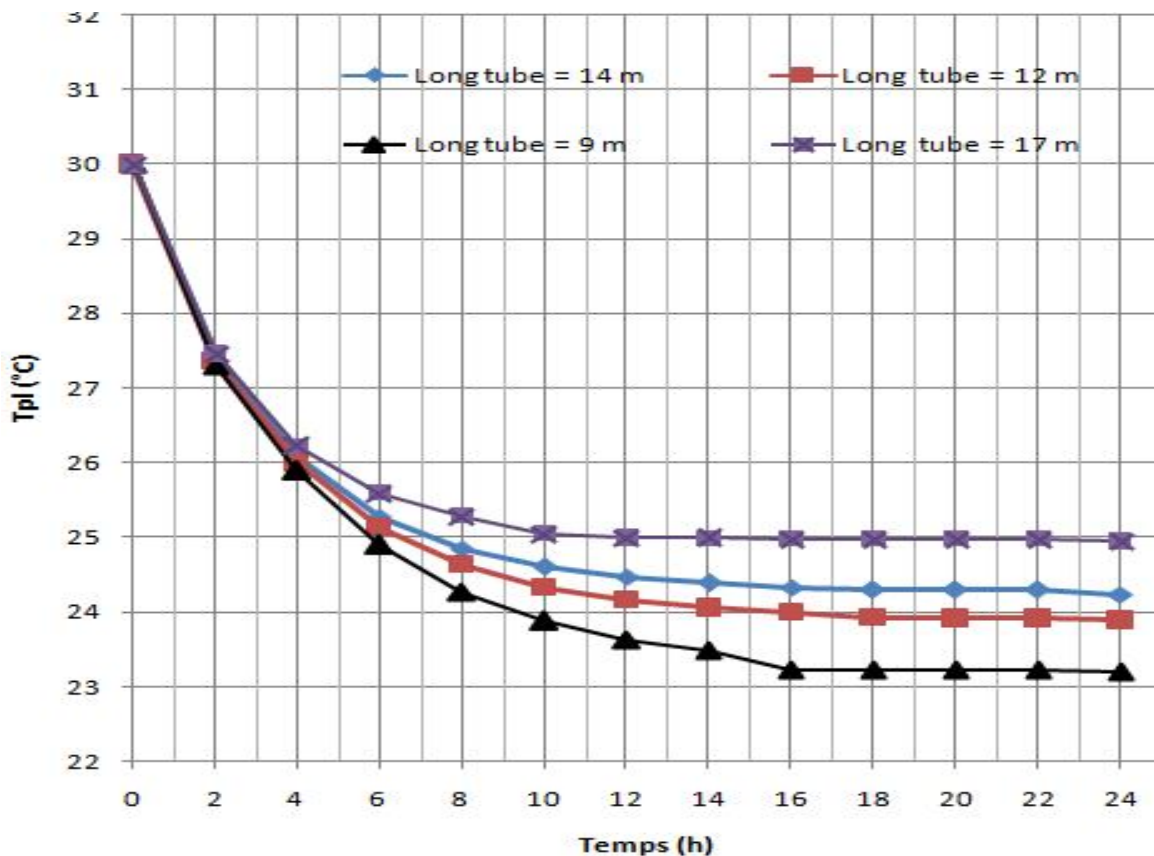
L'utilisation d'un circuit hydraulique dans un plancher chauffant destiné au chauffage à basse température, nécessite de définir deux paramètres importantes, le pas de pose et par conséquent la longueur de tube [37].

#### 4.2.1 La longueur de tube

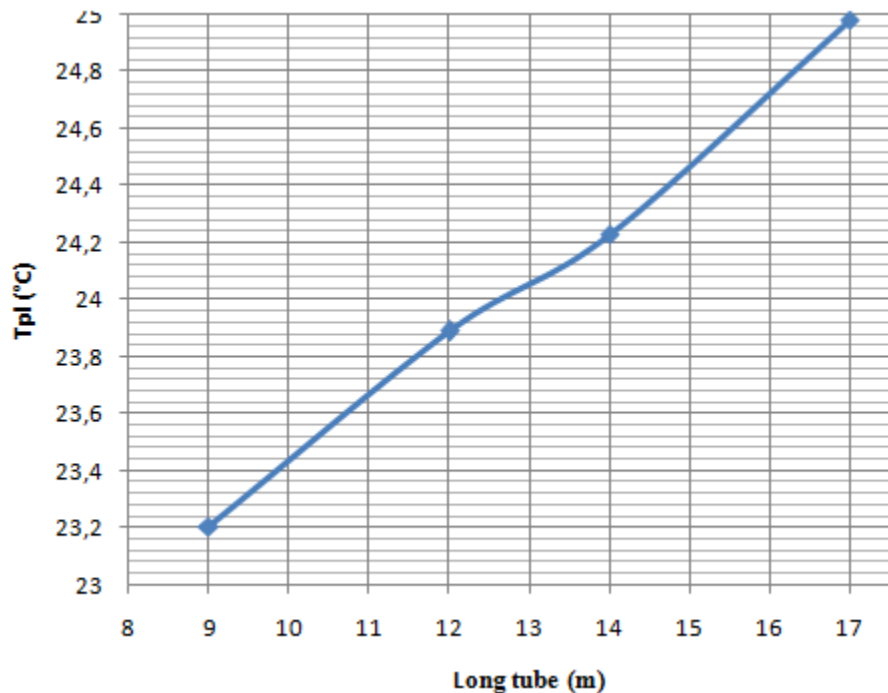
La température du plancher liée à la longueur de la grille de chauffe ce qui est présenter dans le fulgure 34. Ainsi que nous pouvons remarquer sur la figure 34.a qu'une augmentation de la longueur de tube conduit à un accroissement de la température du plancher.ce qui parait logique,

puisque une grille de chauffe constituée par un tube de longueur importante, dont le pas de pose est minimal, peut conduire à une émission de chaleur supérieure et une chute de température d'eau importante, ce qui provoque l'augmentation de la température superficielle de la dalle (fig. 34.b).

Aussi, sur la base des grandeurs définies précédemment, l'utilisation d'une grille de chauffe en cuivre recuit de diamètre extérieur égale à 20 mm, de longueur de 13m et un pas de pose de 20 cm permet de limiter la température du plancher à la valeur désirée.



**Fig. 34.a - Variation temporelle de la température du plancher en fonction de la longueur de tube**

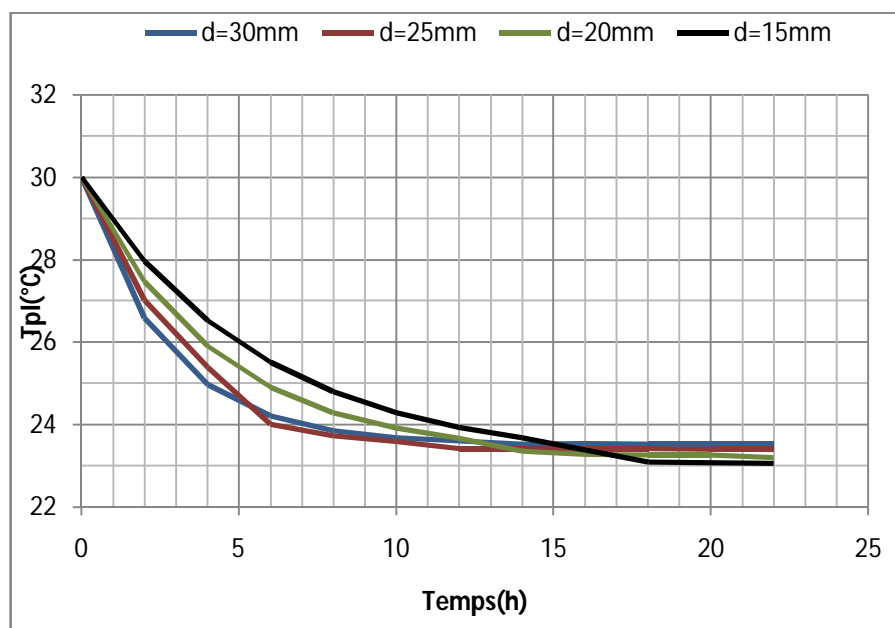


**Fig. 34.b - Evolution de la température du plancher en fonction de la longueur de tube.**

**Fig. 34 - Effet de la longueur de tube sur la température du plancher**

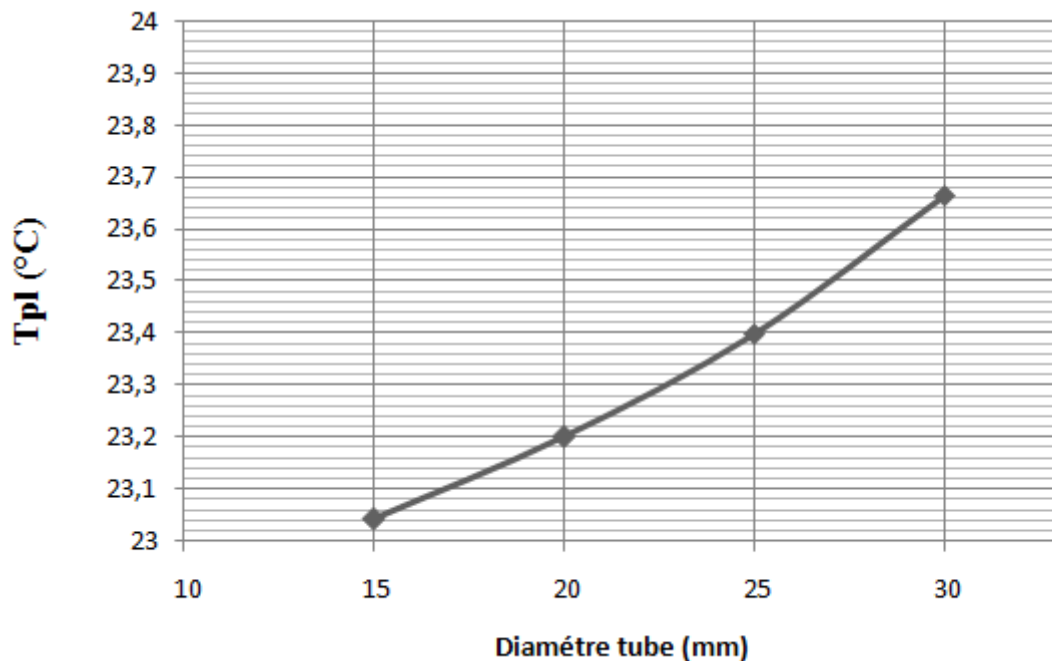
#### 4.3 Variation temporelle de la température superficielle du plancher en fonction de diamètre de tube

A partir la figure 35 on remarque que l'augmentation du diamètre de tube conduit à un accroissement de la température du plancher (Fig. 35).



**Fig. 35a - Variation temporelle de la température du plancher en fonction de diamètre de tube**



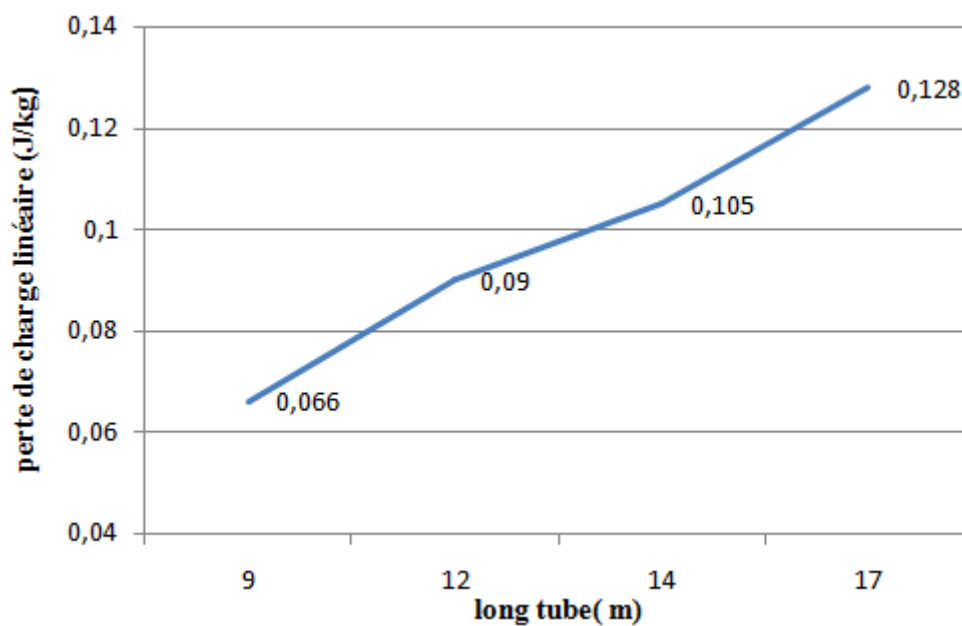


**Fig. 35.b - Evolution de la température du plancher en fonction de la longueur de tube.**

**Fig.35- Effet du diamètre de tube sur la température du plancher**

#### 4.4 Variation des pertes de charges linéaire en fonction de la longueur du tube

D'après la figure 36 on n'a constaté que la croissance de la longueur du tube conduit à une augmentation de la perte de charge linéaire. ce qui paraît normal, puisque une grille de constituée une longueur important donc l'augmentation de la longueur du tube conduit à une augmentation des codes dans le tube ce qui provoque la croissance de la perte de charge linéaire.



**Fig.36- Variation des pertes de charges linéaire en fonction de la longueur du tube**

#### 4.5 Variation des pertes de charges linéaire en fonction du diamètre de tube

A partir de la figure 37 nous avons remarqué une décroissance remarquable de la perte de charge linéaire si on augmente le diamètre de tube.

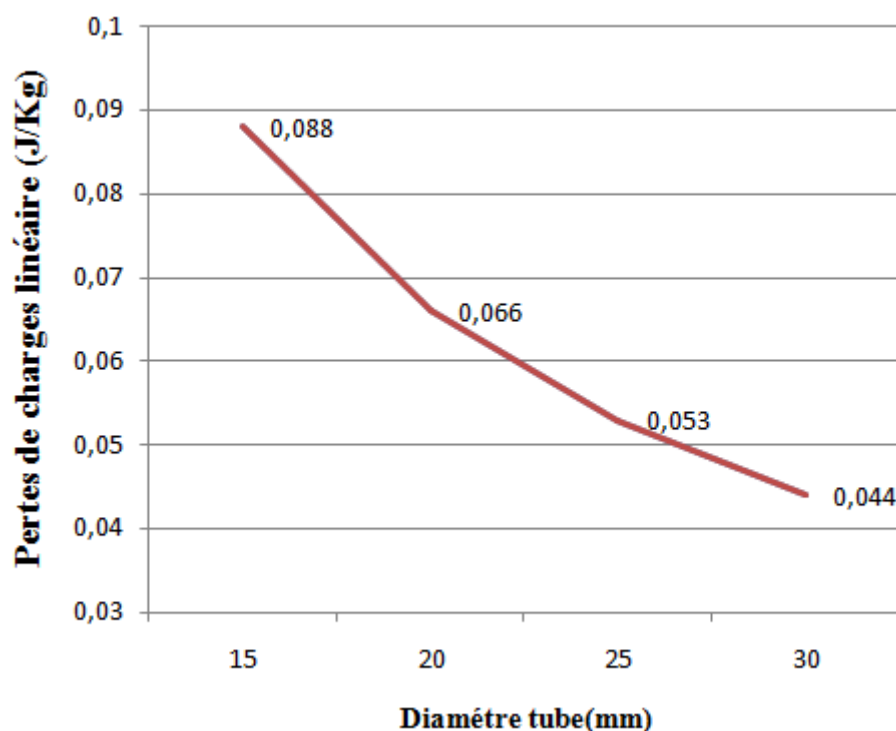


Fig.37- Variation des pertes de charges linéaire en fonction du diamètre de tube

#### 4.6 Paramètres de fonctionnement du système

L'influence de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement du système (Plancher-Capteur) fonctionnent en régime transitoire à été examiné.

##### 4.6.1 Optimisation des paramètres de fonctionnement

Dimensionner un plancher chauffant n'est pas aisé, car une multitude de facteurs entrent en ligne de compte selon différents paramètres de base tels que, la température du fluide chauffant (sortie capteur-entrée dalle), la chute de température dans la boucle, le pas de pose et la longueur de tube de la grille de chauffe, l'inertie de la dalle, etc.

##### 4.6.1.1 Choix de la surface de captation (ratio de captation)

Le souci le plus important dans la conception des systèmes de chauffage solaire est la surface de captation. Cette dernière représente financièrement la plus grande partie de l'investissement d'une installation de chauffage solaire. C'est pour cela qu'il faudrait l'optimiser.

Dans ce travail on va choisir ratio de captation  $R=0.3$ .

#### 4.6.1.2 La température de départ du fluide chauffant dans la dalle

Pour les planchers chauffants à basse température, la température maximale de l'eau à l'entrée de la grille chauffante ne doit pas dépasser 50°C (DTU 65.8).

Pour que le chauffage soit suffisant, la température de l'air doit être maintenue à 20°C par un flux de chaleur constamment dirigé du plancher vers l'air et non l'inverse.

En outre, la température du plancher ne doit en aucun cas dépasser 28°C, pour que les conditions de confort soient réalisées.

Dans ce travail on prend la température maximale de départ doit être fixée à 30°C.

#### 4.6.1.3 Le débit du fluide caloporteur

Le choix du débit obéit à plusieurs contraintes, à savoir :

- ✓ Assurer l'émission calorifique souhaitée. De la valeur de ce débit dépend la chute de température dans la grille et par conséquent la température du plancher.
- ✓ Limiter la vitesse maximale de l'eau à une valeur compatible avec l'absence de bruit d'écoulement.
- ✓ Assurer une vitesse suffisante de l'eau pour que l'écoulement puisse être considéré comme turbulent, pour cela la norme précise un débit minimal de 48Kg/h.

Nous avons pris un débit de l'ordre de 0.019 Kg/s (70 L/h), ce qui conduit par conséquence à une température superficielle du plancher de 24°C au maximum.

#### 4.6.2 Critère de dimensionnement

Pour des raisons de confort, le plancher solaire direct doit être exploité de telle façon que :

- Un moyen ratio de captation pour que le chauffage soit suffisant sans craindre le risque de surchauffe.
- La température maximale du plancher ne dépasse pas 28°C.
- Le ratio de captation ou bien la surface de captation.
- L'épaisseur optimale de la couche de béton.
- La température minimale de l'eau pour que le chauffage soit suffisant.

A présent, et sur le plan des dimensions du système, on peut conclure que notre dalle optimale aura les caractéristiques dimensionnelles suivantes :

##### a. La dalle chauffant

- Une couche de polystyrène de 5 cm d'épaisseur.
- Une couche de béton de 5 cm d'épaisseur, appelée prédelle.
- Une grille(en forme de serpent), formée de tubes en cuivre recuit de 20 mm de diamètre extérieur, de 13 m de longueur, avec un pas d'écartement de 20 cm.
- Une couche de béton de 30 cm d'épaisseur, coulée au-dessus de la grille.
- La dalle est isolée latéralement par une couche de polystyrène de 5 cm d'épaisseur.
- Une surface horizontale de 3.24 m<sup>2</sup>.

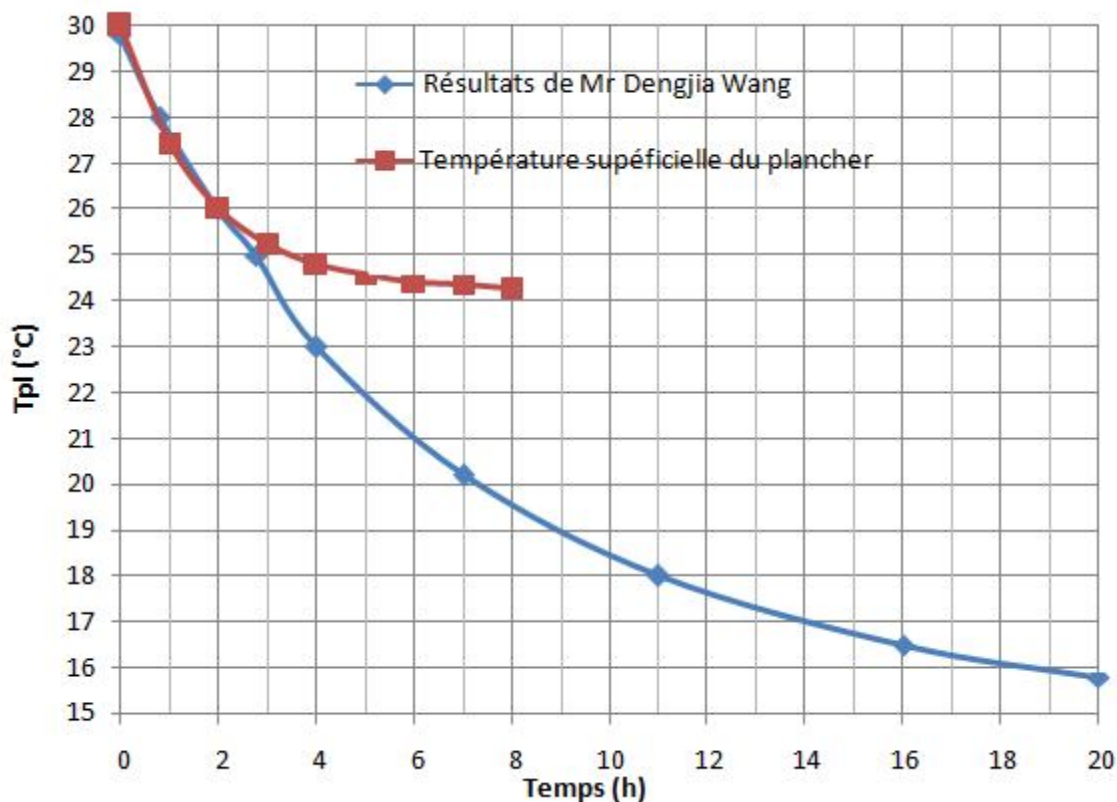
## b. Le capteur solaire à eau

Avec un ratio de captation  $R=0.3$ , donc une surface égale à  $0.972 \text{ m}^2$ .

### 4.7 Validation des résultats

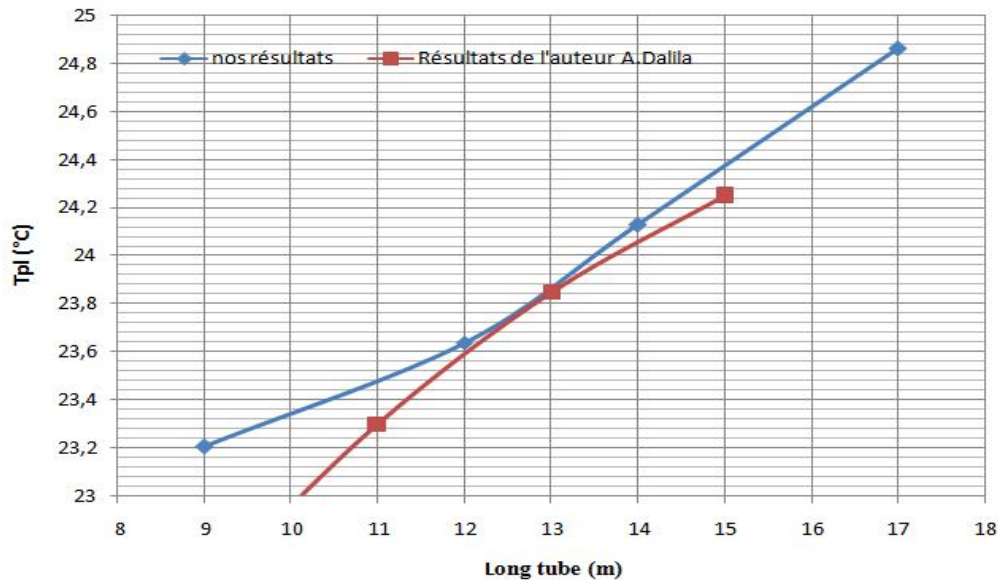
Les résultats de notre travail ont été minutieusement examinés afin de juger la validité du modèle. Pour cela, nous avons confronté nos résultats à ceux obtenus numériquement et expérimentalement par le résultat de Mr.Dengjia Wang (Numerical and experimental analysis of floor heat storage and release during an intermittent in-slab floor heating process ; revue thermo-energie -62(2214)398-406),et aussi nous avons comparé notre résultats avec l'auteur A.Dalila (thèse de magister, Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct (PSD) ; université Constantine 1(2013)).

L'analyse des courbes des figures 38, et 39 représentant respectivement l'évolution temporelle des températures superficielles du plancher (résultat de Mr.Dengjia Wang) et Evolution de la température du plancher en fonction de la longueur de tube (résultat de A.Dalila), permet de noter une bonne concordance entre les type de résultats.



**Fig. 38 - Evolution temporelle de la température du plancher**

A partir de la figure 38 et après la comparaison de ceux deux résultats on remarque la température superficielle du plancher est diminuée graduellement avec le temps.



**Fig.39- Effet de la longueur de tube sur la température du plancher**

A partir de la figure 39 et par comparaison avec le résultat de l'auteur A. Dalila on constate que la température du plancher augmente lorsque la longueur du tube augmente.

### Conclusion

Après les résultats qui a été présenté et discuté préalablement dans l'objectif de la modélisation et la simulation numérique du circuit hydraulique par la méthode de différence finie de l'élément de la dalle en béton, nous avons conclut que la température superficielle du sol est diminue graduellement avec le temps, et atteint sa valeur minimum de 23.6°C après 24 heure. De plus, on a remarqué aussi une influence crucial de la variation de diamètre du tube en fonction de la température superficielle de la dalle : C'est-à-dire : lorsque le diamètre de tube accroître la température du sol va aussi parallèlement accroître, et d'autre part, nous avons constaté que l'augmentation la longueur du tube de la grille de chauffage conduit à une accroissance remarquable de la température de la dalle environ de 24.8°C après 18 heure du temps.

Enfinement, et pour valoriser notre travail nous avons fait une comparaison graphique (voir figure 38) entre les résultats obtenue de la variation de la température superficielle en fonction du temps et celle de l'auteur Mr.Dengjia Wang et nous avons trouvé une concordance jusqu'aux 4 heures du temps, et une décroissance de la température de sol dans les deux graphes. Ceci indique le temps suffisant pour le déstockage total de la chaleur accumulé de la masse béton.

Et encore on a fait une comparaison des résultats de la variation de la température superficielle du plancher en fonction de la longueur du tube avec celui de l'auteur A.Dalila et nous avons découvert une concordance jusqu'aux 3 heures du temps et une augmentation de la température du sol dans les deux graphes ce qui explique que la grille de chauffe constituées un tube de longueur important, dont le pas est minimal, peut conduire une émission de chaleur supérieur ,ce provoque une augmentation de la température superficiel du plancher.

Les systèmes du chauffage nous proposent de multiples façons de produire de confort thermique. Un choix centralisateur nous amène souvent à privilégier plusieurs sources énergétiques exploitées dans ces systèmes, sans véritablement analyser le bien-fondé de cette attitude.

Dans ce mémoire, nous avons étudié le comportement hydrodynamique et thermique de la dalle chauffante comme un système de chauffage simple et très efficace. Cette technique de chauffage a des avantages planétaires, qu'on peut citer à titre d'exemple:

- ❖ Le coût de son implantation est moins cher.
- ❖ Les sources d'énergies exploitées peuvent être renouvelables.
- ❖ Faible impact sur l'environnement.

Cette étude montre qu'il est possible d'exploiter le chauffage par la dalle chauffante dans des plusieurs applications notamment dans les battements, le chauffage de la maison et de l'eau. C'est pourquoi nous nous sommes plutôt focalisés sur les dispositifs des chauffages dont le but de posséder la nouvelle technologie de le chauffage par la dalle chauffante, par exemple "le plancher solaire direct: PSD". Pour cela, il faudrait connaître avec précision l'influence des différents paramètres géométriques, thermiques et hydrodynamiques sur le bilan thermique de cette installation du chauffage avant de passer à l'étape de sa construction. Pour atteindre cet objectif, nous avons fixé la température de sortie du capteur solaire, Sachant que ce dernier est considéré comme une source de production de la chaleur. Ce choix est justifié par le fait que on peut utiliser d'autres sources d'énergies, comme : Pompe à chaleur, chaudière, la géothermie et le gaz naturelle.

En faisant une analyse de l'influence des différents paramètres géométriques, thermiques et hydrauliques sur l'efficacité thermique le long de la saison de chauffage qui a été choisi à cause de l'état de besoins, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- ❖ Pour les pertes des charges linéaires et singulières, il est conseillé de minimiser le maximum possible dans la longueur des tubes et les codes de l'installation hydraulique. Celle-ci permet de réduire les pertes et augmenter la dissipation de la chaleur durant toute la saison du chauffage.
- ❖ Pour l'effet de la longueur des tubes du circuit hydraulique du plancher, nous avons constaté que l'augmentation de ce paramètre conduit à un accroissement de la température superficielle de la dalle chauffante qu'est atteint 24.8°C après 18heure du temps.
- ❖ Pour l'effet du diamètre des tubes sur le circuit hydraulique de la dalle, nous avons remarqué que l'augmentation du diamètre du tube provoque un léger croissant de la température du sol.

- ❖ Pour l'influence du temps sur le déstockage et la dissipation de la chaleur restituée par la dalle en béton, nous avons conclu que la température superficielle de plancher diminue graduellement avec le temps et atteint sa valeur minimale de 23.6°C. Ceci explique le temps suffisant pour le déstockage total de la chaleur accumulée dans la masse béton.

**ملخص:**

نقدم نتائج تأثير المعايير الهندسية والحرارية نظام التدفئة الشمسي عن طريق الأرضية.

الهدف من هذه التقنية هو تسخين البلاط عن طريق لاقط شمسي مباشر. مبدأ هذه التقنية هو تعميم مباشرة في دارة مائية أنابيب يسري بداخلها سائل ساخن بفعل ملقط شمسي دون تجمعه في خزان وسيط.

هذا النظام يقدم العديد من الإيجابيات مقارنة بأنظمة التدفئة التقليدية من حيث التكلفة، ويمكن الاستفادة منه على مدار السنة.

نستخدم دراسة رقمية بواسطة برنامج MATLAB لتحسين نوعية ومردودية نظام البلاطة.

**الكلمات المفتاحية :** نظام التدفئة الشمسي، الدارة المائية،

تسخين

**Résumé**

Notre travail consiste à étudier l'effet majeur des paramètres géométriques et thermiques opératoire sur le circuit hydrodynamique de la dalle chauffante d'un plancher solaire direct. La technique du plancher solaire direct a été utilisée pour but de chauffer une maison individuel ou collectif. 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 chauffer des ambiances en hiver, ceci sans investir dans un système de échauffement de l'air. Il s'agit surtout de valoriser l'installation de plancher chauffant.

Pour obtenu une installation PSD optimale nous avons fait une optimisation des paramètres géométriques tel que : l'écartement des tubes de la grille de chauffage, le diamètre de tube, la longueur du tube et les paramètres thermique tel que : capacité calorifique et Conductivité thermique, un code MATLAB qui nous permet d'évaluer et calculer notre bilan avant faire construire l'installation PSD.

L'objet de mon mémoire est de travailler sur des questions relatives aux énergies propres et aux énergies décentralisées utilisant des ressources locales d'énergie.



**Mots clés :** P.S.D, Thermique , hydrodynamique , stockage, plancher, propres.

### **Abstract**

Our work consists in studying the major outcome of the geometrical and thermal parameters operational on the hydrodynamic circuit of the heating flagstone of a direct solar floor. The technique of the direct solar floor was used for aim to heat a house or collective. The principle is to make circulate directly in a floor a fluid heated by solar collectors without using intermediate tanks of storage. The system thus obtained present of many advantages compared to the conventional systems of solar heating on the plan of the costs, the overall dimension and reliability. With the aim of ensure a climatic conditioning during all the year, we thought of exploiting the heating floor, like conditioned hydraulic system, to heat it environments in winter, this without investing in a system of heating of the air. It is especially a question of developing the installation of heating floor.

For obtained an optimal installation DSF we made an optimization of geometrical parameters such as: spacing of the tubes of the grid of heating and the diameter of tube and the length of the tube and the parameters thermics such as: heat-storage capacity and thermal Conductivity, a code MATLAB which enables us to evaluate and calculate our front balance-sheet to make build installation DSF.

The purpose of my report is to work on relative questions with clean energies and decentralized energies using of the local resources of energy.

Key words: D.S.F, Thermic, hydrodynamics, storage, floor, clean.

## Introduction

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

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

### A.1 La méthode des différences finies

En mathématiques, et plus précisément en analyse, une **différence finie** est une expression de la forme  $f(x + b) - f(x + a)$ . (où  $f$  est une fonction numérique) ; la même expression divisée par  $b - a$  s'appelle un taux d'accroissement (ou taux de variation), et il est possible, plus généralement, de définir de même des différences divisées. L'approximation des dérivées par des différences finies joue un rôle central dans les méthodes des différences finies utilisées pour la résolution numérique des équations différentielles, tout particulièrement pour les problèmes de conditions aux limites.

En analyse numérique, une importante application des différences finies est la résolution numérique des équations différentielles et des équations aux dérivées partielles : l'idée est de remplacer les dérivées apparaissant dans l'équation par des différences finies qui les approximent. Les diverses méthodes qui en résultent sont appelées **méthodes des différences finies**.

De nombreuses applications de ces méthodes se rencontrent en théorie du calcul numérique, ainsi que dans des disciplines scientifiques très variées, telles que la mécanique des fluides, et ses applications à la météorologie ou à l'aérodynamique.

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

#### A.1.1 Opérateurs de différence finie

On considère en général uniquement les différences « *en avant* », « *en arrière* » et « *centrées* ».

L'opérateur de différence avant,  $\Delta_h$  est défini par :

$\Delta_h[f](x) = f(x+h) - f(x)$ , où  $h$  est le plus souvent une constante, qu'on appelle le **pas**.

De même, l'opérateur de différence arrière,  $\Delta_h$ , est défini par

$$\nabla_h[f](x) = f(x) - f(x-h)$$

Enfin, l'opérateur de différence centrée,  $\delta_h$  est défini par

$$\delta_h[f](x) = f(x + \frac{1}{2}h) - f(x - \frac{1}{2}h)$$

### A.1.2 Différences d'ordre supérieur

De manière analogue, on peut obtenir des approximations de dérivées d'ordre supérieur. Ainsi, appliquant la formule de différence centrale précédente à la dérivée de  $f'$  en  $x$ , et utilisant les différences centrales pour  $f'(x + h/2)$  et  $f'(x - h/2)$ , on obtient une approximation (par différences centrales) de la dérivée seconde de  $f$ :

$$f''(x) \approx \frac{\delta_h^2[f](x)}{h^2} = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2}$$

### A.1.3 Différences finies à plusieurs variables

Il est possible de calculer des différences finies dans le cas de fonctions à plusieurs variables ; elles sont l'analogie discret des dérivées partielles. On obtient ainsi les approximations suivantes :

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = f_x(x, y) \approx \frac{f(x+h, y) - f(x-h, y)}{2h}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} f(x, y) = f_y(x, y) \approx \frac{f(x, y+k) - f(x, y-k)}{2k}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y) = f_{xx}(x, y) \approx \frac{f(x+h, y) - 2f(x, y) + f(x-h, y)}{h^2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x, y) = f_{yy}(x, y) \approx \frac{f(x, y+k) - 2f(x, y) + f(x, y-k)}{k^2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f(x, y) = f_{xy}(x, y) \approx \frac{f(x+h, y+k) - f(x+h, y-k) - f(x-h, y+k) + f(x-h, y-k)}{4hk}$$

## A.2 La Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MÉF) est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un

domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème.

### **A.3 La Méthode des volumes finis**

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

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

## Introduction

En informatique, un langage de programmation est une notation conventionnelle destinée à formuler des algorithmes et produire des programmes informatiques qui les appliquent. D'une manière similaire à une langue naturelle.

Un langage de programmation est mis en œuvre par un traducteur automatique: compilateur ou interpréteur. Un compilateur est un programme informatique qui transforme dans un premier temps un code source écrit dans un langage de programmation donné en un code cible qui pourra être directement exécuté par un ordinateur, à savoir un programme en langage machine ou en code intermédiaire, tandis que l'interpréteur réalise cette traduction .

### B.1. Petite Introduction Au Langage Fortran

Le fortran (**FORMULA TRANSLATION**) est le premier langage informatique de haut niveau. Né à la fin des années 1950 sous l'impulsion de John Backus 1, il a été standardisé en 1972 sous la forme du fortran 66 et son efficacité dans le calcul scientifique en a fait le langage le plus utilisé dans les applications non commerciales. La mise à jour du standard à la fin des années 1970 le fortran 77.

Il est très efficace dans le domaine du calcul numérique, et offre de nombreuses bibliothèques de programmes d'analyse numérique.

### B.2.MATLAB

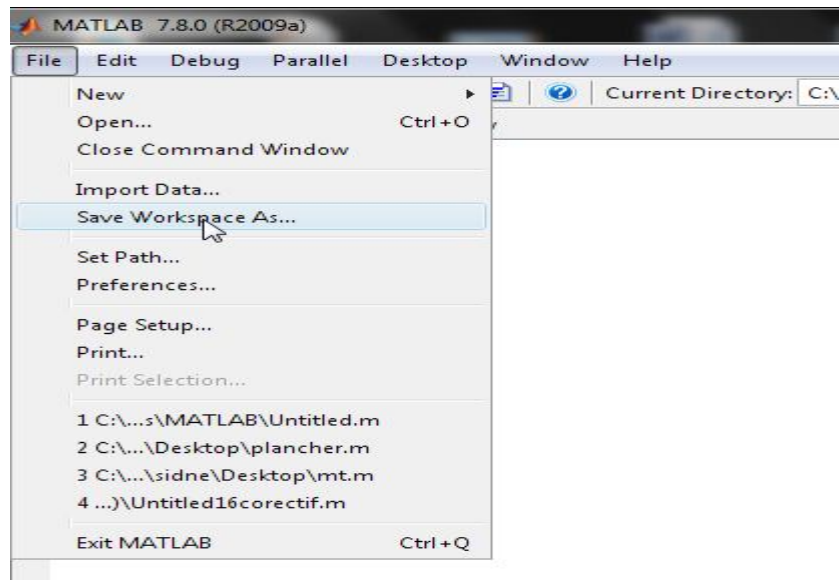
Le MATLAB est un logiciel commercial de calcul interactif. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires, etc

#### B.2.1 Quelques étapes pour l'utilisation de Matlab

##### B.2.1.1Sauvegarde

Le Matlab ne permet pas de sauvegarder l'historique des commandes exécutées spontanément. La solution pour sauvegarder votre travail est.

- On sauvegarde la session en cours dans un fichier **.mat**, comme suite : dans la fenêtre principale, **File** → **Save Workspace As**, et vous choisissez **l'emplacement** et **le nom** de votre fichier.



### B.2.1.2 Fonction

**Une fonction** est **un m-file** particulier : on lui passe **des arguments** et il **retourne une valeur**.

Il faut simplement commencer **le m-file** par le mot **fonction**, lui préciser les **valeurs de retour** et les arguments comme dans l'exemple ci-dessous.

Cet exemple prend comme paramètre un entier **n** et affiche les valeurs **d'une matrice de taille  $n \times n$** .

**Il renvoie ensuite la valeur moyenne la valeur moyenne des éléments du tableau.**

```

function m = moyenne(n)

A=rand(n) ;

Imagesc(A) ;

Axis equal off ;

m = mean(mean(A));

```

### B.2.1.3 Graphiste

#### ➤ Courbe dans le plan

Étant donné deux vecteurs de même taille, **x** et **y**; la fonction **plot(x,y)** trace le graphe de **y** en fonction de **x**. En fait le Matlab relie les points de coordonnées **(x(k), y(k))** pour que **1 ≤ k ≤**

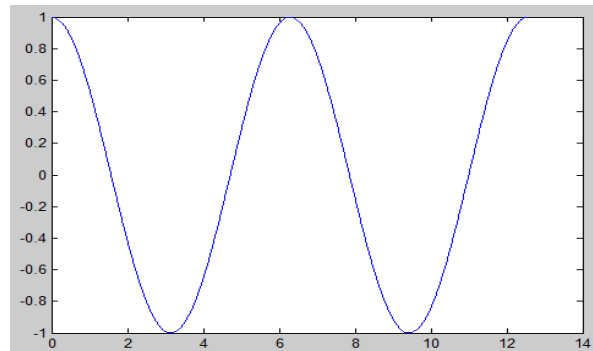
**$length(x)$** . En prenant un grand nombre de points dans **le vecteur  $x$**  et en définissant ensuite  **$y=f(x)$**  pour une certaine fonction  $f$ , la fonction `plot(x,y)` nous donnera le graphe de la fonction  $f$ .

Exemple :

```
>> x=[0:0.01:4*pi];
```

```
>> y=cos(x);
```

```
>> plot(x,y)
```



### B.3. Le programme informatique élaboré dans ce travail

```
disp('fichier de données et de resultats')
l_b=input('l_b=');
r_b=input('r_b=');
cp_b=input('cp_b=');
e_sup=input('e_sup=');
d=input('d=');
l_f=input('l_f=');
r_f=input('r_f=');
cp_f=input('cp_f=');
m_f=input('m_f=');
c_f=input('c_f=');
l=input('l=');
l_r=input('l_r=');
cp_air=input('cp_air=');
r_air=input('r_air=');
m_air=input('m_air=');
c_air=input('c_air=');
l_air=input('l_air=');
b=input('b=');
dth=input('dth=');
dy=input('dy=');
n=input('n=');
s_plf=input('s_plf=');
tf=30;
g=9.81;
qv=70/(3600*1000);
f=0.061;

b=3.42*10^-3;
n=0.44;
s_plf=pi*d*l_tub;
```

```

disp('calcul de les coefficients d'echange ')
h_cplf=l_b/e_sup;
h_vplf
h_vplf=6.7;
h_vplf
s_pl=3.24;
p_rim=(l+l_r)*2,w=s_pl/p_rim
disp('calcul les nombre sans dimensions ')
r_e=f*d*r_f/m_f
r_a=cp_air*b*g*dth*r_air*d^3/(l_air*m_air)
n_u=0.54*r_a^0.25
disp('calcul de les coefficients de transfer de chaleur par convection enter le
plancher et l'air ')
h_vpla=n_u*l_air/w;

tpl(1)=30;

tpl(i+1)=(tpl(i)*(1(h_vplf*s_plf*dt/(r_b*cp_b)))+(h_vplf*s_pl/(r_b*cp_b)*tf(i)-
(s_pl*dt/(r_b*cp_b))*(h_vpla*s_pl*(tpl(i)-tair))));

end

plot(t,tpl)

```



# Numerical investigation of the negotiable instrument of the thermal conductivity of the concrete of the heating flagstone of the D.S.F

## *Investigation numérique de l'effet de la conductivité thermique du béton de la dalle chauffante du PSD*

Sidna OULED BEMBAY<sup>1</sup>, Abdellatif OUDRANE<sup>1</sup>, Aour BENOUMER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre Universitaire de Tissemsilt, [sidnebilal1990@gmail.com](mailto:sidnebilal1990@gmail.com), [abdellatif.habadat@gmail.com](mailto:abdellatif.habadat@gmail.com), Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Biomécanique Appliquée et Biomatériaux, Département de Mécanique, ENP d'Oran, BP1523 El'Mnaour 31000, [ben\\_aour@hotmail.com](mailto:ben_aour@hotmail.com), Algérie

The present paper was presented at the First Conference on Mechanical, Energy and Material Engineering, CMEME 2015, December 8-9, 2015 - Biskra, Algeria

### Keywords

D.S.F;  
Radiation;  
Concrete;  
Storage of energy;  
Temperature.

**Abstract:** In this modest work, we brought ourselves a simple methodology of numerical optimization of the geometrical parameters and thermals of the transfer of heat, in the heating system per heating floor (the flagstone) by using the method of calculating of the direct solar floors which is called **E.S.I.M.** A study of the influence of the thermal conductivity of the concrete on the distribution of the temperature in the floor heating and on the consumption of energy was developed. A partial layer out of polystyrene at summer considered as heat insulator above the concrete of storage. Found numerical calculations are almost valid with the area of establishment of this heating installation while being based on climatic data radiations total, average temperature outside... etc) experimental of the literatures. It was noted that the monthly output of the **D.S.F** increases with the increase in the thermal conductivity of the concrete and vice versa. The same tendency was noticed for the surface temperature of the floor, i.e. the latter is proportional to the conductivity of the concrete. Moreover, we noticed that the quantity of energy stored in the thermal mass of the floor designed to reduce the calorific consumption of energy significantly, did not lead to energy saving higher while varying the thickness of thermal mass from 12 to 40cm. The numerical results obtained, enabled us to optimize the thermal conductivity of the concrete of the heating flagstone of system.

© 2015 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

**Résumé :** Dans ce modeste travail, nous nous avons apporté une simple méthodologie d'optimisation numérique des paramètres géométriques et thermiques du transfert de chaleur, dans le système de chauffage par plancher chauffant (la dalle) en utilisant la méthode de calcul des planchers solaires directs qui s'appelle **E.S.I.M.** Une étude de l'influence de la conductivité thermique du béton sur la distribution de la température dans le plancher chauffant et sur la consommation d'énergie a été mise au point. Une couche partielle en polystyrène a été considérée comme isolant thermique au-dessus du béton de stockage. Les calculs numériques trouvés sont presque valables à la région d'implantation de cette installation de chauffage en se basant sur des données climatiques (rayonnements globale, température moyenne extérieur...etc.) expérimentales de les littératures. Il a été constaté que le rendement mensuel du **P.S.D** accroît avec l'augmentation de la conductivité thermique du béton et vice-versa. La même tendance a été remarquée pour la température superficielle du plancher, c'est-à-dire que cette dernière est proportionnelle à la conductivité du béton. De plus, nous avons remarqué que la quantité d'énergie stockée dans la masse thermique du plancher prévu pour réduire la consommation d'énergie calorifique de manière significative, n'a pas mené à des économies d'énergie plus élevées en faisant varier l'épaisseur de masse thermique de 12 à 40 cm. Les résultats numériques obtenus, nous ont permis d'optimiser la conductivité thermique du béton de la dalle chauffante de système.

Mots clés : P.S.D; Rayonnement; Béton; stockage d'énergie; Isolation thermique; Température.

## 1. Introduction

Le chauffage par les planchers est un procédé ancien qui utilisait majoritairement un tube acier sous forme de grilles chauffantes noyées dans l'épaisseur de la dalle pleine [1]. Sur le plan historique, trois périodes ont véritablement marqué l'histoire du plancher chauffant, à savoir l'époque de l'Empire romain, les années 1960-1980 et l'après-1980.

Quoique le plancher chauffant moderne fasse son apparition au début des années 1980, le principe de chauffage par le sol est connu depuis plus de 2000 ans (III-II siècles av. J.-C.). En Europe, les Romains étaient ainsi les premiers à utiliser notamment, dans des hypocaustes, un système de chauffage par le sol à l'aide de l'air chaud circulant dans des canalisations. A peu près en même temps, en Asie, les premiers ondules coréens apparaissent.

Ces systèmes représentent un premier exemple non seulement de l'utilisation d'un intermédiaire pour chauffer un local, mais également de la mise en place d'un chauffage central. Le principe du **P.S.D** consiste à intégrer au toit, les capteurs solaires. La surface des capteurs à installer doit être d'un dixième de la surface de la dalle à chauffer. ILS seront raccordés à votre plancher auquel ils transmettront l'énergie solaire. Cette énergie s'accumulera dans la dalle de votre plancher qui restituera la chaleur dans

✉ Corresponding author. Tel.: (+213) 662 83 04 59; fax: (+213) 41 58 20 66

E-mail address: [abdellatif.habadat@gmail.com](mailto:abdellatif.habadat@gmail.com)

URL: <http://www.dz>

vosre maison de façon douce [2]. Le fluide, réchauffé dans les capteurs solaires, circulera directement dans votre plancher chauffant.

Il est primordial de noter qu'Adrar est une ville très riche en énergie solaire, vu son taux d'ensoleillement moyen qu'il ait atteint  $9963Wh/m^2.j$ . Pour cette raison, nous avons pensé à son exploitation dans l'habitat par l'utilisation de cette nouvelle technique du **P.S.D** dont le principal avantage est l'usage d'une énergie naturelle non polluante, gratuite et inépuisable. Le problème posé est le choix de l'écartement des tubes de la grille de la dalle chauffante, qui nous permettrons d'obtenir un bon rendement mensuel et une température confortable du sol. En effet, les configurations architecturales appliquées conduisent à des sensations de surchauffes et de gaspillage économique si on utilise un écartement des tubes aléatoire [3]. Pour pallier à ce problème et pour valoriser l'installation solaire **P.S.D** nous avons varié l'écartement des tubes dans un intervalle des valeurs selon la tolérance de la corrélation de l'écartement des tubes, afin d'obtenir la valeur optimale qui s'adapte bien avec la région d'Adrar.

## 1.1. Structure du système

### 1.1.1. Description du système

La suppression de la cuve de stockage et de ses sujétions par le couplage direct des capteurs solaires sur la dalle chauffante ne peut être obtenu qu'en donnant à celle-ci une épaisseur sensiblement supérieure à la pratique courante. La masse de béton supplémentaire sert alors à stocker l'énergie et à provoquer un déphasage suffisant entre le maximum d'ensoleillement et le maximum de restitution [1]. Ceci mis à part, la grille de chauffe noyée dans le plancher est réalisée selon des techniques identiques à celles des planchers chauffants habituels [1].

Du point de vue technique, la base du système étudié est une dalle en béton est considérée comme un solide homogène dans lequel on peut applique l'équation classique de la diffusion de la chaleur, reliée directement d'un capteur solaire plan noir à eau. Son épaisseur sur terre-plein, contient des tubes formant une grille du chauffage. Cette dernière repose sur une couche de 4cm d'isolation thermique (polystyrène). La circulation de l'eau dans la grille est assurée par une pompe comme l'indique le schéma [4] (voir Fig. 1).

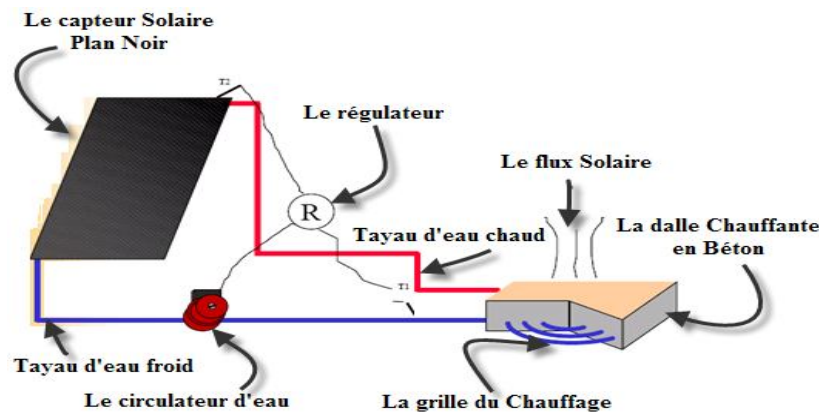


Fig. 1. Description du système étudié (Couplage direct).

### 1.1.2. Descriptive de la dalle chauffante

La conduction de la chaleur tendrait à faire préconiser l'utilisation d'épaisseurs du béton plus épaisse au-dessus des tubes enrobés, afin d'avoir un agréable stockage du chaleur dans l'émetteur, ce qui coïncide à des poids de structure importants [4]. Pour cette raison, nous définissons la dalle de notre système de plancher solaire direct, la « dalle épaisse ou la dalle chauffante » qui est essentiellement utilisée sur terre-plein et constituée comme illustre la figure 2.

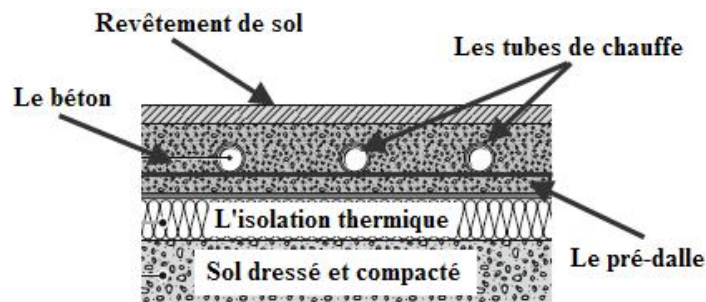


Fig. 2. Description de la dalle épaisse [5].

- Sol convenablement dressé et compacté, muni d'un film étanche contre les remontées d'eau;
- Isolation thermique rigide résistante à la compression, de 4cm d'épaisseur minimale ;
- Pose des tubes de chauffe sur une première épaisseur de béton d'environ 5cm à 8cm, coulée directement sur l'isolant et formant une pré-dalle avec treillis carré d'armature;
- Un revêtement du sol.
  
- **Hypothèses** : Pour mettre en évidence l'influence de la conductivité thermique du béton de la dalle chauffante sur le fonctionnement optimal de ce système, nous avons fixé entièrement les paramètres géométriques et thermiques opératoires de l'installation **P.S.D** selon des valeurs de référence expérimentaux (une installation de référence), alors que pour ce paramètre, nous avons testé les trois valeurs de la conductivité thermique suivantes:

$$\lambda_{\text{béton}} = \{1.4, 1.75, 2\} \text{ en } (W / m^2 \cdot ^\circ C)$$

**Table 1.** présente les différents paramètres expérimentaux de référence, dans le quel on peut varier le paramètre que nous volons optimisé [1].

Les paramètres géométriques		Les paramètres thermiques	
Epaisseur de la dalle:	$e_{\text{Dalle}} = 30\text{cm}$	Résistance thermique d'isolation:	$R_{\text{th\_is}} = 1\text{m}^2 \cdot ^\circ C / W$
Diamètre du tube:	$D_{\text{tubes}} = 20\text{mm}$	Résistance du revêtement du sol:	$R_{\text{th\_rev}} = 0.15\text{m}^2 \cdot ^\circ C / W$
Ratio de captation:	$R_0 = 0.1$	Conductivité thermique du béton:	$\lambda_{\text{béton}} = 1.75\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ C$
Surface de la dalle:	$S_{\text{plan}} = 150\text{m}^2$	Coefficient d'échange superficielle:	$h_i = 11.6\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ C$

**Tableau 2.** Les propriétés thermiques du capteur solaire plan de référence[1].

Le rendement optique du capteur	$\nu = 0.8$
Le coefficient de perte thermique du capteur	$K = 8.2\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ C$
La surface unitaire du capteur	$S_{\text{Capteur}} = 1.25\text{m}^2$

### 1.1.3. Description de la méthode du calcul "E.S.I.M"

Afin de calculer le rendement thermique optimal d'un plancher relié directement à un capteur solaire plan et la température superficielle du confort, nous avons utilisé la méthode **E.S.I.M** du calcul des planchers solaires directs pour des raisons d'efficacité et de simplicité [1]. Cette technique permet de calculer les performances énergétiques du plancher en fonction des paramètres suivants [1] :

- L'énergie moyenne reçue par mètre carré de capteur et par jour pour le mois considéré.
- L'écart de températures moyennes intérieure et extérieure du mois considéré.
- La surface du capteur rapporté à la surface du plancher équipé (ratio de captation).

## 2. Formulation du problème

### 2.2.2. Calcul analytique du rendement mensuel du plancher

Le rendement du **P.S.D** peut être calculé à partir de la relation suivante [4] :

$$\eta_p = \eta_{p0} - \frac{a}{(E_R)^n} \quad (1)$$

Pour les dalles épaisses équipées d'un capteur solaire noir plan à eau, nous nous appliquons les relations ce qui suit:

$$\eta_{p0} = 0.574 + 0.0025.\Delta T - 0.44.R_0 \quad (2)$$

$$a = (0.0398.\Delta T + 0.0273).(0.6 - R_0)^{0.25} \quad (3)$$

$$n = 0.6$$

Où ( $\eta_{p0}$ ) et ( $a$ ) sont des fonctions du rapport capteurs/dalle ( $R_0$ ), et de l'écart moyen de température ( $\Delta T$ ). Ces expressions varient en fonction du type de système concerné, de même que l'exposant ( $n$ ) [4].

### 2.2.3. Calcul d'énergie journalière reçue par le capteur

L'ensoleillement moyen reçu ( $E_R$ ), pour un mois par mètre carré de capteur, peut être calculée comme suit :

$$E_R = E_{Max} \cdot (0.25 + 0.75.\sigma) \text{ en (KWh/m}^2\text{.j)} \quad (4)$$

### 2.2.4. Calcul des températures superficielles du plancher

Pour un mois donné, on connaît, pour la configuration réelle, l'énergie solaire moyenne reçue ( $E_R$ ), et le rendement corrigé, le produit de ces deux valeurs représente l'énergie solaire réellement fournie par jour et par mètre carré de capteur qui se trouve distribuée par une surface de plancher ( $E_R$ ), égale à ( $1/R_0$ ) en dalle épaisse [4]. La quantité d'énergie émise par jour pour  $1\text{m}^2$  de plancher est donc :

$$E_u = E_R \times \eta_p \times F_t \times R_0 \text{ en KWh/m}^2\text{.j} \quad (5)$$

En supposant les pertes thermiques entre le capteur et la dalle sont négligeables, alors la chaleur cédée à la dalle est égale à l'énergie captée par le capteur (la puissance utile), on peut donc noter :

$$\Delta T = P_{pla} - T_{in} = \frac{\eta_p \times F_t \times E_R \times R_0}{24 \times h_i} \quad (6)$$

Pour connaître les températures maximales du plancher en conditions normales, on ajoute à la température moyenne ci-dessus, l'amplitude relative ( $a$ ) comme suit [4]:

$$\Delta T_a = (1 \pm a) \cdot \frac{\eta_p \times F_t \times E_R \times R_0}{24 \times h_i} \quad (7)$$

Par suite:

$$T_{Max} = T_{in} + (1 + a) \cdot \frac{\eta_p \times F_t \times E_R \times R_0}{24 \times h_i} \text{ en } (^{\circ}\text{C}) \quad (8)$$

### 2.2.5. Corrélation de la conductivité du béton

Il est rare que ce facteur soit connu avec précision par le concepteur, car il dépend des constituants du béton et de leur proportion. Compte tenu de cette incertitude, nous suggérons de s'en tenir à la valeur standard, sauf pour les cas où la conductivité serait nettement différente et connue à l'avance.

Le facteur correctif de la conductivité du béton aussi indépendant du ratio ( $R_0$ ) et ( $n$ ) est donné qu'en fonction de  $\lambda_{\text{béton}}$ . En désignant  $\lambda_{\text{béton}}$  la conductivité réelle du béton et  $\lambda_{\text{béton}_0}$  celui du béton pris pour le cas standard, alors [4]:

$$F_{\lambda_{\text{béton}}} = \left( \frac{\lambda_{\text{béton}}}{\lambda_{\text{béton}_0}} \right)^{0.22} \quad (9)$$

La multiplication des facteurs correctifs des paramètres constructifs de l'installation solaire **P.S.D**, formant un produit, s'appelle **le facteur correctif global**, qui est influé ouvertement sur bilan énergétique du **P.S.D**. L'expression du calcul de ce facteur correctif globale est:

$$F_t = F_D \times F_P \times F_{\text{Pré-dalle}} \times F_{\text{épaisseur}} \times F_{\lambda_{\text{béton}}} \times F_{R_{\text{th-is}}} \times F_{R_{\text{th-rev}}} \quad (10)$$

Avec:

- $F_t$  : Le facteur correctif globale de l'installation solaire PSD.
- $F_D$  : Le facteur correctif de diamètre des tubes du chauffage.
- $F_P$  : Le facteur correctif d'écartement des tubes du chauffage.
- $F_{\text{pré-dalle}}$  : Le facteur correctif de le pré-dalle du plancher chauffante.
- $F_{\text{épaisseur}}$  : Le facteur correctif de l'épaisseur de la dalle chauffante.
- $F_{\lambda_{\text{béton}}}$  : Le facteur correctif de conductivité thermique du béton.
- $F_{R_{\text{th-is}}}$  : Le facteur correctif de résistance thermique de l'isolation.
- $F_{R_{\text{th-rev}}}$  : Le facteur correctif du revêtement du sol.

### 3. Modélisation numérique du système

On ce qui concerne la simulation du système, nous avons élaboré un simple code de dimensionnement des installations des planchers solaires directs en se basant sur l'analyse de l'influence des paramètres géométriques et thermiques de note élément de modélisation. Ce code est écrit en langage **FORTRAN** avec une interface graphique en **DELPHI** pour faciliter l'introduction des données à optimiser. Les paramètres à introduire sont (voir Figs.3 et 4) :

- Le coefficient d'échange superficiel global;
- La résistance thermique de revêtement ;
- Le diamètre des tubes du plancher;
- L'écartement des tubes du plancher;
- La température de départ de fluide;
- La résistance de l'isolation thermique;
- La surface du plancher;
- L'épaisseur du béton ;
- Le diamètre extérieure des tubes de la grille du chauffage;
- Le coefficient d'échange globale;
- La conductivité thermique du béton;
- Le rendement optique du capteur solaire;
- Le ratio de captation des rayonnements solaire;

- o Le type de capteur solaire : standard/sélectif.....etc.

Calcul PSD : Les paramètres de Plancher

Le type de dalle : Dalle épaisse (1)    Le pré-dalle : Non (0)

Les Paramètres Géométriques de la dalle

La surface du plancher S (Plancher) (m<sup>2</sup>) : 100

L'épaisseur de la dalle e(dalle) (cm) : 20

L'écartement des tubes de plancher P(tubes) (cm) : 25

Le diamètre des tubes de plancher D(tubes) (mm) : 30

Les Paramètres thermiques de la dalle

Le coefficient d'échange convectif h<sub>j</sub> (W/m<sup>2</sup> . °C) : 11.6

La résistance thermique d'isolation de la dalle R<sub>th\_is</sub> (m<sup>2</sup> . °C/W) : 1

La résis. thermi. de revêt. du sol R<sub>th\_rev</sub> (m<sup>2</sup> . °C/W) : 0.06

La conductivité thermique du béton Lambda (W/m<sup>2</sup> . °C) : 1.75

Buttons: Quittez, Annulez, Suivant

o

Fig. 3. Une fenêtre d'entrée des paramètres géométriques et thermiques de la dalle chauffante.

Calcul PSD : Les Paramètres de Capteur solaire Plan

Le type de capteur solaire plan : Les capteurs solaire sélectifs (2)

Les Capteurs solaires plans noirs standards

**Les caractéristiques thermiques de capteur :**

Le rendement optique de capteur V

Le coefficient de perte thermique de capteur K (W . m<sup>2</sup> . °C)

Le ratio de capteur R0

Les capteurs solaire sélectifs

Type de capteur sélectif

Capteur solaire TUBES SOUS VIDE     Capteur solaire ST2000

**Capteur solaire TUBES SOUS VIDE :**

Le rendement optique de capteur V : 0.74

Le coefficient de perte thermique de capteur K (W . m<sup>2</sup> . °C) : 2.46

Le ratio de capteur R0 : 0.2

**Capteur solaire ST2000 (2.10 m<sup>2</sup> - 24 °C) :**

Le rendement optique de capteur V

Le coefficient de perte thermique de capteur K (W . m<sup>2</sup> . °C)

Le ratio de capteur R0

Buttons: Quittez, Annulez, Suivant

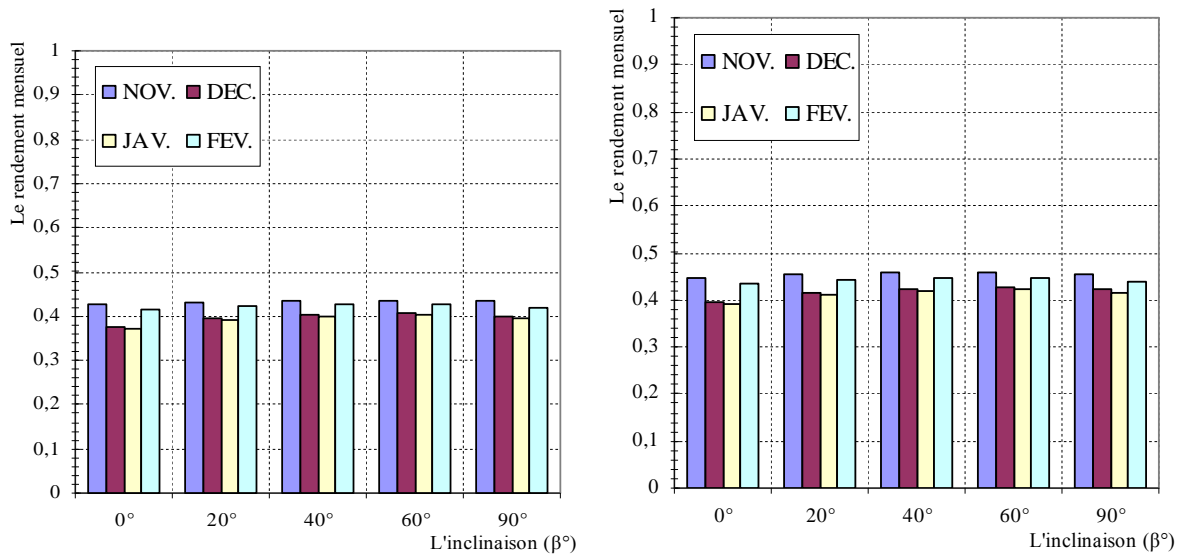
Fig. 4. Une fenêtre d'entrée des propriétés thermiques des capteurs solaires.

## 4. Résultats et discussions

### 4.1.1. Evaluation des rendements mensuels du P.S.D

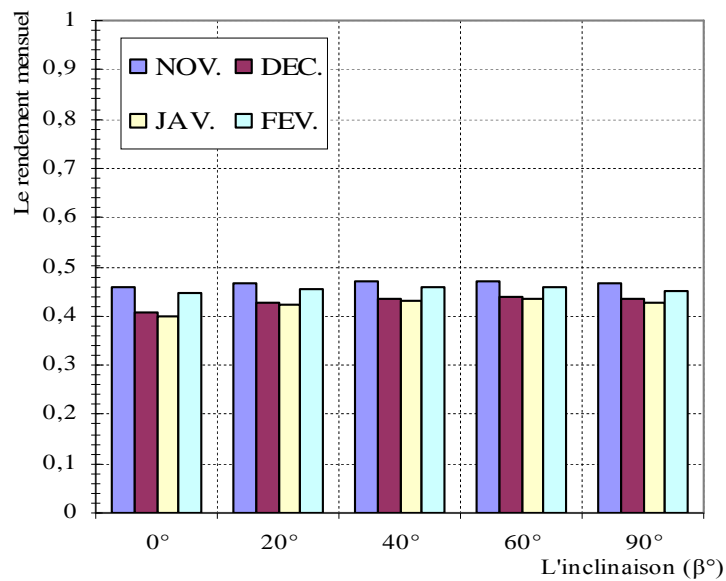
Au point de l'évolution du rendement mensuel de l'installation *P.S.D* en fonction des inclinaisons du capteur solaire plan pour  $\lambda_{\text{béton}} = 1.4, 1.75, \text{ et } 2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Nous avons remarqué que le rendement mensuel optimal, pour les quatre mois pris en considération (saison d'hiver), est obtenu avec une inclinaison de  $60^\circ$  et une conductivité thermique du béton de  $2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (voir Fig. 5.c). Cette valeur optimale du rendement (47%) a été enregistrée au mois de novembre. Par contre la plus faible (37%) valeur a été remarquée au mois de janvier avec une inclinaison de  $0^\circ$  et une conductivité thermique du béton de  $1.4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (voir Fig. 5.a).



(a)

(b)

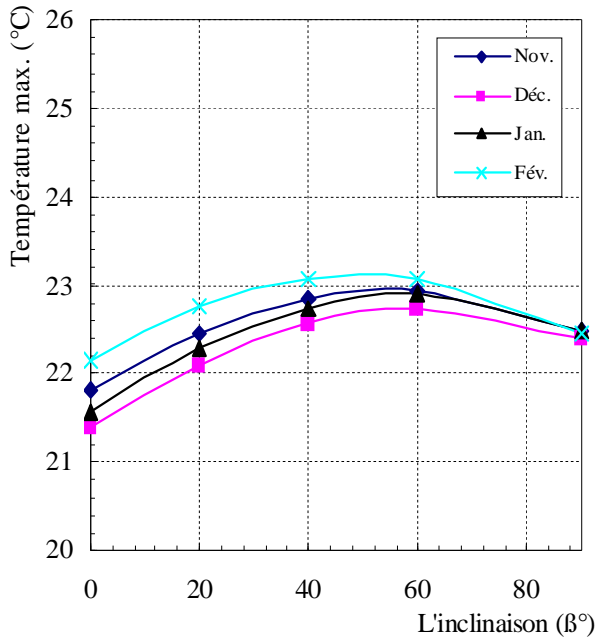


(c)

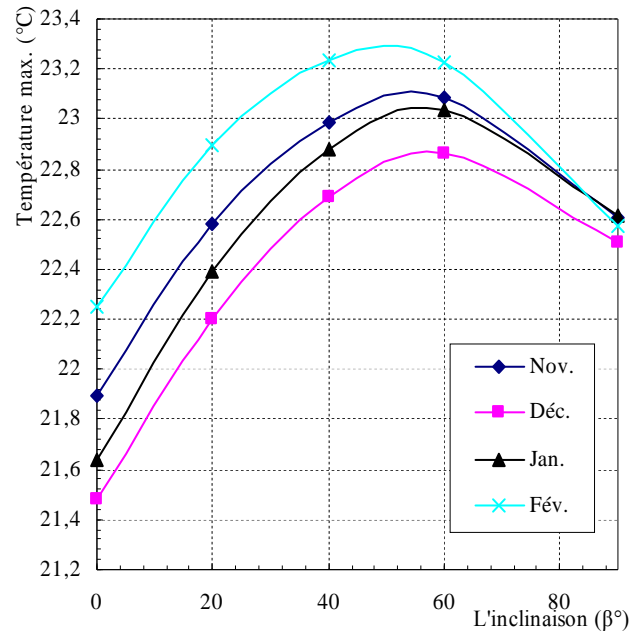
**Fig. 5. Evolution du rendement mensuel de l'installation PSD en fonction des inclinaisons du capteur solaire plan pour  $\lambda_{\text{béton}} =$ (a) 1.4, (b) 1.75, et (c) 2 W/ m<sup>2</sup>. °C.**

#### 4.1.2. Evolution de la température superficielle du plancher

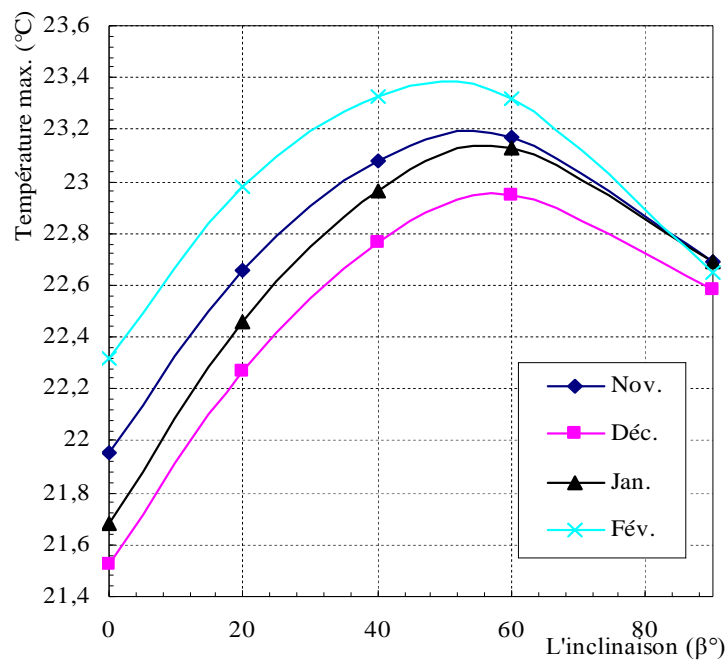
Au point de l'évolution de la température superficielle maximale du plancher en fonction de l'inclinaison du capteur solaire pour différentes valeurs de la conductivité thermique du béton :  $\lambda_{\text{béton}} = \{1.4, 1.75 \text{ et } 2 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{°C}\}$  est illustrée par la figure 6.



(a)



(b)



(c)



**Fig. 6. Evolution de la température superficielle maximale du plancher en fonction des inclinaisons du capteur solaire plan  $\lambda_{\text{béton}}$  = (a) 1.4, (b) 1.75, et (c) 2 W/ m<sup>2</sup>. °C.**

On a constaté que la valeur cruel de la température superficielle maximale du sol est de 23.33°C. Cette valeur a été obtenue au mois de février avec une inclinaison de 40° et une conductivité thermique du béton de 2 W/ m<sup>2</sup>. °C (fig. 6.c). Ceci signifie que l'installation PSD a reçu une quantité importante d'énergie solaire par le capteur plan au mois de février avec cette inclinaison de 40°, en tenant compte de la proportionnalité existante entre l'énergie reçue quotidiennement par un mètre carré du capteur et la température superficielle du plancher. Notant que, la valeur minimale de la température superficielle maximale est de 23.08°C. Cette valeur a été obtenue au mois de février avec une inclinaison de 40° et une conductivité thermique du béton de 1.4 W/ m<sup>2</sup>. °C (fig.6.a). Alors que, la valeur la plus faible pour toute inclinaison du capteur solaire plan est de 21,40°C. Cette valeur est obtenue au mois de décembre avec une inclinaison de 0° et une conductivité du béton de 1.4 W/ m<sup>2</sup>. °C (fig.6.a). Notant, en plus, que cette valeur maximale de la température ne dépasse pas les normes de confort (28°C).

## 5. Conclusion

D'après les résultats présentés préalablement concernant l'influence de la conductivité thermique du béton sur l'efficacité thermique de la plancher chauffant et sur la température superficielle de la dalle chauffante de l'installation solaire **P.S.D** en tenant compte que ce dernier a une lien direct avec la capacité du stockage et la restitution de la chaleur accumuler dans la masse du béton. On peut conclure que la variation de cette conductivité thermique a une influence cruel sur le rendement mensuel et la température du sol.

D'une autre sorte, on a trouvé, que plus la conductivité thermique du béton augmente plus le rendement mensuel de système **P.S.D** augmente et vice-versa. La même tendance a été enregistrée pour l'effet de la température du plancher.

Il est important de noter que, pour procurer un chauffage incontestable tout au long de la période d'hiver, avec un rendement et une température superficielle du plancher optimal, il faut utiliser une conductivité thermique du béton plus élevé, avec une inclinaison du capteur solaire plan noir comprise entre 40° et 60° et une orientation vers le sud.

## Références

- P. Fridmann (2003). Le plancher chauffant et rafraichissant, réglementation, dimensionnement, mise en œuvre, réglage. Edition Parisienne. [www.maison-climatisation-chauffage.com](http://www.maison-climatisation-chauffage.com). Chauffage solaire : le plancher solaire direct (PSD).
- A. Mokhtari, H. Kazeoui, Y. Boukezzi et G. Achard (1998) "Utilisation d'un Circuit Hydraulique dans un Plancher pour le Chauffage et le Rafraichissement des Locaux" Rev. Energ. Ren. Vol.1 (1998) 17-27.
- D. Roux, D. Mandineau et M. Chateauminois (1983), 'Calcul des Planchers Solaires Directs', Tech-Doc., Lavoisier.
- Jean Yves, Dimensionnement du chauffage par le sol, MESSE – THERMEXCEL 50, rue d'Erevan (Bât. 35 le Capricorne) 92130 ISSY LES MOULINEAUX – France.
- Michel capderou (1985) ATLAS SOLAIRE DE L'ALGERIE/TOM2; Aspect énergétique; 5 juin1985.

## Bibliographie

- [1] OUDRANE.A (2011), Modélisation et caractérisation du système solaire destiné pour le production du chauffage locaux, Université [ENST-ORAN]
- [2] Jean-Luc Goudet, (2008), Futura-Sciences.
- [3] Ch .Joly .V, (1869), Traité pratique de chauffage, de la ventilation et de la distribution des eaux dans les habitations particulières à l'usage des architectes, des entrepreneurs et des propriétaires. Baudry.
- [4] Adam Jean-Pierre, (2011). La construction romaine. Grands manuels Picards.
- [5] Louis Savot, al Jean Gesselin (1642).sur l'Architecture des bâtiments particuliers.
- [6] Arthur Jules Morin, (1870),Manuel pratique du chauffage et de la ventilation.
- [7][www.ClimaMaison.fr](http://www.ClimaMaison.fr) ,dernière mis à jour décembre 2007.
- [8] [Thiers.stephane.free.fr](http://Thiers.stephane.free.fr) ,dernière mise à jour le 04/09/2011
- [9] Chassagne .G, Dupuy .C, Levy .M, (1977).Energie solaire conversion et applications. Edition C.N.R.S, Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse .
- [10] Vaillant. J. R (1976).Utilisation et promesses de l'énergie solaire. Edition Eyrolle.
- [11] Bonal .J, Rossetti .P,(2007). Les énergies alternatives. Omniscience.
- [12] Ngo .Ch, (2008). L'énergie, ressources, technologies et environnement. 3éme édition, Dunod, Paris.
- [13] Bernard .J(2004). Energie solaire calculs et optimisation. Ellipse Edition Marketing
- [14] Sfeir .A, Guarracino .G(1981). Ingénierie des systèmes solaires. Technique et Documentation, Paris.
- [15] Roulet. A. C, (1987). Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment. Edité par Presses Polytechniques Romandes.
- [16] Kedwards .D, Marlot. L, (1979). Capteurs Solaires. Edition S C M, Paris.
- [17] Neyer .P, (2003).Energie solaire thermique. Guide des Energies Renouvelables.
- [18] Sabonnadière .J. C, (2006), Nouvelles technologies de l'énergie, tome1 : Les énergies Renouvelables. Lavoisier
- [19] Khedim .A. H, (2003).Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque,Centre de Publication Universitaire.
- [20] Peuser .F. A., Remmers .K. H., Schnauss .M , (2005).Installation solaires thermiques, Conception et mise en oeuvre. Edité par Systèmes Solaires, Solar Praxis et le Moniteur.
- [21] Bernard .R , menguy .G, Schwartz. M, (1979). Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications. Technique et Documentation
- [22]- Chaker .A, (2003).Promesses et Perspectives du Photothermique. Revue des Energies Renouvelables: ICPWE

- [23] Kharchi. R, (2002), Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct. Thèse de magister Université Blida.
- [24] Mokhtari. F, (2005). Etude d'une boucle régulée capteur-plancher solaire. Thèse de magister Université Blida.
- [25] Zaheer-Uddin. M, Zheng G. R and Cho.Sung-Hwan, (1997). Optimal operation of an embedded-piping floor heating system with control input constraints. Energy convers, Mgmtvol 38, N°7
- [26] J. Yves Messe. Therm Excel. Copyright 2004-2007.
- [27] Bourefis. H(2000). Modélisation d'un plancher chauffant. Cas de la région de Hassi Messaoud, Thèse de magistère, Université Mentouri Constantine.
- [28] Recknagel(1986). Manuel pratique du génie climatique.
- [29] Lochoshvili. M, (2009). Les technologies nouvelles ont-elles un rôle à jouer sur un marché très concurrentiel de la Russie postsoviétiques, le marché du chauffage (période étudiée 1991-2008). Thèse de doctorat, Université Paris-Sorbonne.
- [30] Fridmann. P,(2003). Le plancher chauffant et rafraichissant, réglementation, dimensionnement, mise en oeuvre, réglage. Edition Parisienne.
- [31] Kharchi. R, Ait Messaoudene. N, Belhamel. M, (2001) Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct. Revue des Energies Renouvelables, Journées Internationales de Thermique, N° 115-119.
- [32] Roulet. C. A (1987). Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment. Edité par Presses Polytechniques Romandes
- [33] De Brichambaut. Ch. P, Vauge Ch(1981).. Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique. Edit Technique et Documentation, Paris.
- [34] BEN HAMOUDA. R (2008), Notions de mécanique des fluides. Cours et exercices corrigés, Centre de Publication Universitaire, Tunis.
- [35] Daniel Raux., Daniel.M ANDINEAU., Michel CHATEAU MINOIS (1983) ,calcul des plancher solaire direct, édition la cadre, 13090-en provence
- [36] [www.buildinginfrance.com](http://www.buildinginfrance.com)
- [37] Dalila. A(2013), Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct (PSD), Thèse de magister UNIVERSITE CONSTANTINE 1.
- [38] Yves Jannot (2002) PDF Transfert thermique
- [39] Kontichsesteenweg 53-55 B-2630 Antwerpen-Aartsellaar, Info @ begetube. Com [www.begetube. Com](http://www.begetube.Com)
- [40] MEJDOUB AMINE KHODJA ,(2004) Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire Thèse de magister en génie climatique, Constantine

## Liste des figures

Fig.1 - Cellules photovoltaïques.....	22
Fig.2 - L'énergie éolienne.....	23
Fig. 3 - La biomasse.....	24
Fig. 4 - L'énergie hydraulique.....	25
Fig. 5 - L'énergie hydraulique.....	27
Fig. 6 - composants principaux d'une chaudière à condensation.....	28
Fig. 7 - Plancher chauffant à eau chaude.....	29
Fig. 8 - Plancher chauffant géothermique.....	30
Fig. 9 - Capteur solaire plan.....	32
Fig.10 - Capteur solaire plan sans vitrage.....	35
Fig. 11 - Capteur solaire plan vitré.....	35
Fig. 12 - Capteur solaire à tubes sous vide.....	36
Fig. 13 - Concentrateur cylindro-parabolique.....	37
Fig. 14 - Concentrateur parabolique.....	37
Fig. 15 - Principe du mur trombe.....	39
Fig. 16 - Système à thermosiphon.....	40
Fig. 17 - Schéma de fonctionnement d'un SSC.....	41
Fig. 18 - Schéma de fonctionnement d'un PSD.....	42
Fig. 19- Description du système étudié.....	46
Fig. 20 - Principe du plancher chauffant.....	49
Fig. 21 - Principe de l'hydrocâblé.....	50
Fig. 22 - Le plancher rayonnant électrique (PRE).....	51
Fig. 23 - Dalle de plancher chauffant sans pré-dalle.....	52
Fig. 24 – Une grille de chauffage en forme de serpentín.....	54
Fig. 25 - Les types de circulateurs utilisés dans l'installation d'une dalle chauffante.....	54

Fig. 26 - Positionnement format de méandres.....	55
Fig. 27 - Positionnement cote à cote des tubes.....	56
Fig. 28 - Positionnement bifilaire.....	56
Fig. 29 - Les différents échanges thermiques dans un plancher.....	59
Fig. 30 - Courbe de corrélation des diamètres des tubes.....	62
Fig. 31 - Nœuds considérés dans le plancher.....	64
Fig. 32 - La représentation graphique de Pertes de charges linéaires.....	66
Fig. 33 - Variation temporelle de la température superficielle du plancher.....	72
Fig. 34.a - Variation temporelle de la température du plancher en fonction de la longueur de tube.....	73
Fig. 34.b - Evolution de la température du plancher en fonction de la longueur de tube.....	74
Fig. 35a - Variation temporelle de la température du plancher en fonction de diamètre de tube.....	74
Fig.36- Variation des pertes de charges linéaire en fonction de la longueur du tube.....	75
Fig.37- Variation des pertes de charges linéaire en fonction du diamètre de tube.....	76
Fig. 38 - Evolution temporelle de la température plancher.....	78
Fig.39- Effet de la longueur de tube sur la température du plancher.....	79

### **Liste des tableaux**

Tableau 1- Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge.....	33
Tableau 2- Caractéristiques thermo-physiques d'eau et de l'air.....	47
Tableau 3- Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux isolants.....	48
Tableau 4- - Les paramètres de référence de l'installation du plancher chauffant.....	52
Tableau 5- Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux métalliques.....	53

### **Nomenclature**

A	L'aire de la section de passage du tube ( $m^2$ )
$C_{p_{air}}$	Capacité thermique de l'air [ $J Kg^{-1} °C^{-1}$ ]
$C_{p_f}$	Capacité calorifique du fluide [ $J Kg^{-1} °C^{-1}$ ]
$C_{p_{pl}}$	Chaleur massique du béton [ $Wh Kg^{-1} °C^{-1}$ ]

D	Diamètre du tube [mm].
$D_h$	Diamètre hydraulique [mm]
DTU	Document Technique Unifié
F	Facteur correctif
g	Gravité [ $m\ s^{-2}$ ]
$h_{vpla}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le plancher et l'air [ $W\ m^2\ ^\circ C^{-1}$ ]
$h_{vplf}$	Coefficient de transfert de chaleur convectif entre le fluide et le plancher [ $W\ m^2\ ^\circ C^{-1}$ ]
$J_L$	Pertes de charges linéaires [ $J\ Kg^{-1}$ ]
$J_s$	Pertes de charge singulières [ $J\ Kg^{-1}$ ]
$K_s$	Coefficient (sans unité) de pertes de charge
L	Longueur caractéristique [mm]
$L_{tube}$	La longueur du tube[m]
Nu	Nombre de Nusselt
P	le périmètre mouillé de la section[m]
P A C	Pompe à chaleur
PCBT	Plancher chauffant par eau basse température
PRE	Plancher rayonnant électrique
PER	Polyéthylène réticulé
$p_{tube}$	Ecartement des tubes [cm]
PSD	Plancher solaire direct
R	Ratio du captation
Ra	Nombre de Rayleigh.
$R_{th\_is}$	Résistance thermique d'isolation en [ $^\circ C\ W^{-1}$ ]
$S_{pl}$	Surface du plancher [ $m^2$ ]
$S_{plf}$	Surface d'échange entre le fluide et le plancher [ $m^2$ ]

SSC	Système solaire combinés
$T_{\text{air}}$	Température de l'air [°C]
$T_f$	Température du fluide caloporteur [°C]
$T_{\text{pl}(1)}$	Température du plancher au premier nœud [[°C]
$T_{\text{pl}}$	Température du plancher [°C]
$T_{\text{pl}(\text{fin})}$	Température du plancher au dernier nœud.
V	Vitesse du fluide
W	Rapport entre le surface et le périmètre de la dalle.

### Notation grecque

$\rho$	Masse volumique [ $\text{Kg m}^{-3}$ ]
$\varphi$	Flux de chaleur [W]
$\beta$	Coefficient de dilatation thermique rapporté à la température du fluide [ $\text{K}^{-1}$ ]
$\lambda$	Conductivité thermique [ $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ]
$\mu$	Viscosité dynamique [pa.s]

### Indices

air	Air
f	Fluide
Fig	Figure
out	Perdue
u	Utile
Pl	Plancher
$v_{plf}$	Échange convectif entre le fluide et la surface du plancher
$v_{pla}$	Échange par convection entre la surface du plancher et l'air