

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES SIENCE TECHNIQUE
GENIE MÉCANIQUE



DOMAINE : SIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MÉCANIQUE

OPTION : ENERGÉTIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de licence Académique**

Par: ZIANE Bochra

**ETUDE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR AIR-SOLUTILISE POUR LE
RAFRAICHISSEMENT D'UN BATIMENT**

Cas des étudiants de 3^{ème} année (Licence) de
l'UniversitéMohammedBoudiaf de M'Sila.

Intitulé :

Soutenu devant le jury composé de :

.....	Université de M'Sila	Président
Dr :BAKHTI FATIMA ZOHRA	Université de M'Sila	Rapporteur
.....	Université de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2022 /2023

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: Généralités sur les énergies renouvelables	3
1.1.Introduction :.....	4
1.2.Les modes de transfert :.....	4
1.2.1.La conduction :.....	5
1.2.2.La convection :.....	6
1.2.3.La Rayonnement :.....	7
1.3.Les énergies renouvelables :.....	8
1.3.1.Définition :.....	8
1.3.2.Classement et liste des énergies renouvelables :.....	9
1.3.2.1.Energie solaire :.....	9
1.3.2.2.Energie éolienne :.....	9
1.3.2.3.Energie hydraulique :.....	10
1.3.2.4.Biomasse :.....	10
1.3.2.5.Géothermie :.....	10
1.4.La Géothermie :.....	11
1.4.1.Définition :.....	11
1.4.2.Histoire de la géothermie :.....	11
1.4.3.Types de l'énergie géothermique :.....	12
1.4.3.1. La géothermie haute énergie :.....	13

1.4.3.2. La géothermie moyenne énergie :.....	13
1.4.3.3. La géothermie basse énergie :.....	13
1.4.3.4. La géothermie de très basse énergie :.....	13
1.4.4. Les avantages de l'énergie géothermique :.....	14
1.4.5. Les inconvénients de l'énergie géothermique :.....	14
1.5. Conclusion :.....	15
CHAPITRE 2 : Les échangeurs de chaleur air-sol.....	16
2.1. Introduction :.....	17
2.2. Définition :.....	17
2.3. Les différents types :.....	17
2.3.1. Systèmes ouverts :.....	18
2.3.2. Systèmes fermés :.....	18
2.4. La forme d'échangeur air/sol :.....	19
2.4.1. Echangeur de chaleur air/sol vertical :.....	19
2.4.2. Echangeur de chaleur air/sol horizontal :.....	20
2.4.3. Echangeur de chaleur air/sol serpentins :.....	21
2.5. Les puits canadiens :.....	21
2.5.1. Principe de fonctionnement :.....	22
2.5.2. Les composants du puits canadien :.....	25
2.5.3. Emplacement du puits canadien :.....	26
2.5.4. Caractéristiques des tubes (Puits canadien) :.....	27
2.5.5. Les avantages du puits canadien :.....	28
2.5.6. Les inconvénients du puits canadien :.....	29
2.6. Conclusion :.....	29

CHAPITRE 3 :dimensionnement d'un échangeur air/sol.....	30
3.1.Introduction :.....	31
3.2.Modélisation de la température du sol :.....	31
3.2.1.Discrétisation de l'quation de la chaleur :.....	33
3.3. Modélisation de la température du l'air :.....	36
3.4.Résolution numérique :.....	39
CONCLUSION GENERALE	40

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Fig 1.1 :Les modes de transfert thermique	5
Fig 1.2 :Schéma représentatif du phénomène de conduction.....	.5
Fig 1.3 : Schéma représentatif du phénomène de convection.....	7
Fig 1.4 : Schéma représentatif du phénomène de rayonnement.....	8
Fig 1.5 :Les techniques des énergies renouvelables.....	9
Fig 1.6 : Production géothermique d'électricité (gauche) et de chaleur par usage direct (droite) dans le monde en 2014.....	12
Fig 1.7 : Document représente Ressources mondiales de la géothermie....	14

CHAPITRE 2

Fig 2.1 : Schéma de la boucle ouverte EAHE (tunnel souterrain d'air)	18
Fig 2.2: Schéma de la boucle fermée EAHE (tunnel souterrain d'air).....	19
Fig 2.3 :Capture vertical	20

Fig 2.4 : Capture horizontal.....	20
Fig 2.5 :Echangeur de chaleur air/sol serpentins.....	21
Fig 2.6 :Description d'un puits canadien en hiver.....	23
Fig 2.7: Description d'un puits canadien en été.....	24
Fig 2.8 :Température de sol moyen en fonction de sol.....	24
Fig 2.9 :La prise d'entrée de l'air neuf.....	25
Fig 2. 10 :Emplacement du puits.....	27

CHAPITRE 3

Fig 3.1 :Exemple de discrétisation du sol à l'entrée de l'échangeur.....	33
Fig 3.2 :Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré.....	37

Introduction Générale

La conception des bâtiments à faible consommation d'énergie est devenue une priorité mondiale pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. L'augmentation des températures et les effets du changement climatique ont un impact direct sur le confort et la qualité de vie à l'intérieur des bâtiments, en particulier pendant les périodes de canicule.

L'utilisation généralisée de la climatisation est devenue presque indispensable dans de nombreuses régions pour faire face aux températures élevées. Cependant, la climatisation a un impact environnemental important en raison de la quantité d'énergie qu'elle consomme et des émissions associées à la production d'électricité nécessaire pour la faire fonctionner. Cela crée un cercle vicieux où l'utilisation accrue de la climatisation pour contrer les températures élevées contribue également au réchauffement climatique. C'est pourquoi la conception de bâtiments à faible consommation d'énergie et la recherche de solutions alternatives sont essentielles. Les architectes et les ingénieurs cherchent à concevoir des bâtiments qui utilisent des matériaux et des techniques de construction efficaces sur le plan énergétique, tels que l'isolation thermique, la ventilation naturelle, l'utilisation de sources d'énergies renouvelables et la gestion efficace de l'énergie.

L'intégration de systèmes passifs ou semi-passifs de rafraîchissement/chauffage dans le bâtiment est une bonne pratique pour la réduction de leur consommation en énergie tout en améliorant le confort thermique. Un de ces systèmes est l'échangeur air-sol, communément appelé "puits canadien" ou « puits provençal ». Il s'agit d'une méthode de ventilation et de climatisation passive qui utilise la température constante du sol pour préchauffer ou prérefroidir l'air ambiant avant qu'il ne soit introduit dans un bâtiment.

Le fonctionnement de l'échangeur air-sol repose sur le principe de la géothermie. A une profondeur de 2 à 3 mètres, la température du sol reste relativement stable tout au long de l'année, généralement proche de la température moyenne annuelle de la

région. Cela signifie que le sol est plus frais que l'air ambiant en été et plus chaud en hiver.

Les tubes enterrés dans le sol servent de conduit pour l'air. Lorsque l'air extérieur est aspiré dans le système, il circule à travers ces tubes enterrés, échangeant de la chaleur avec le sol. En été, l'air chaud est refroidi par le sol plus frais avant d'être introduit dans le bâtiment. En hiver, l'air froid est préchauffé par le sol plus chaud, réduisant ainsi la charge de chauffage nécessaire.

Le dimensionnement d'un puits canadien s'appuie sur un grand nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, distance entre les tubes, débit de l'air.

Le travail de ce mémoire vise principalement à étudier un échangeur air-sol (dit puits canadien) ainsi que la méthode de calcul et de dimensionnement de ce genre d'échangeur. Ce manuscrit se compose d'une introduction générale et une conclusion générale et 03 chapitres.

Le premier chapitre de ce mémoire présente quelques notions indispensables pour la compréhension d'un système échangeur air-sol comme : les trois modes de transmission de la chaleur, des généralités sur les énergies renouvelables et le concept de l'énergie géothermique.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de l'étude théorique de l'échangeur air-sol : le principe de fonctionnement, les différents types ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Le troisième chapitre est consacré aux approches mathématiques qui permettent de prédire et d'estimer convenablement la température du sol et celle de l'air durant son parcours à l'intérieur de l'échangeur air-sol.

Chapitre 01

Généralités sur les énergies renouvelables

1.1. Introduction :

Les températures dans les bâtiments sont élevées en été, il est donc difficile de s'y adapter, donc on utilise en général les climatiseurs qui peuvent aider à améliorer la température de l'air, mais ces appareils climatiseurs consomment beaucoup d'énergie, ce qui peut entraîner une augmentation des coûts d'électricité. Les échangeurs de chaleur peuvent être une solution pour réduire la consommation d'énergie et les coûts.

L'utilisation d'un échangeur de chaleur peut réduire la consommation d'énergie en utilisant la chaleur naturelle du sol pour chauffer l'air en hiver et en utilisant la fraîcheur du sol pour refroidir l'air en été. Cela peut aider à réduire les coûts d'électricité associés à la climatisation et au chauffage. Cependant, ces systèmes peuvent être coûteux à installer et nécessitent souvent des modifications significatives à la structure du bâtiment. [1]

1.2. Les modes de transfert de chaleur :

Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection. [2]

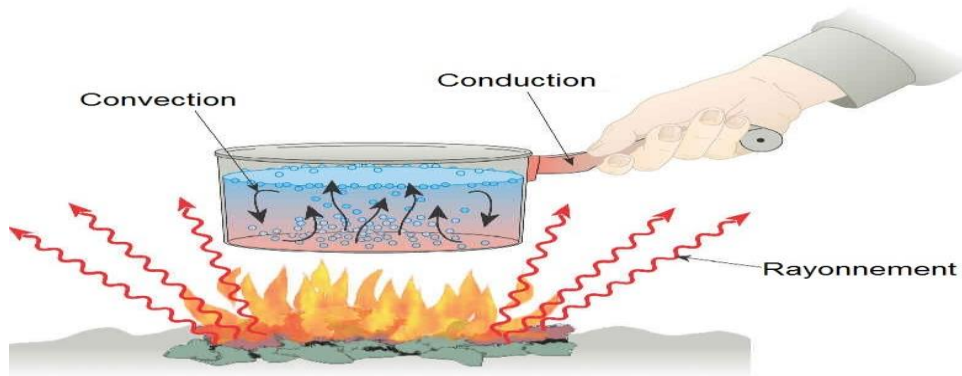


Figure.1.1. Les modes de transfert thermique

1.2. 1. La conduction :

C'est le transfert de chaleur dans la masse d'un corps solide des points les plus chauds vers les plus froids à la suite de l'interaction des particules les unes avec les autres et sans mouvement visible de la matière.

Exemple : Transmission de la chaleur à travers une paroi, dont les températures des deux faces sont différentes. La chaleur se propage de la face le plus chaud vers La face là moins chaude. [2]

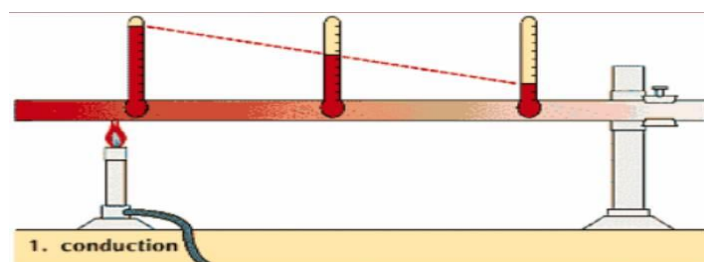


Figure. I.2. Schéma représentatif du phénomène de conduction. [2]

Pour un régime permanent, la quantité de flux de chaleur échangé entre deux points d'un corps de températures différentes est exprimée par la loi de Fourier. [2]

$$\varphi = - \lambda \cdot S \cdot \text{grad } T$$

Avec :

φ : Flux de chaleur en W.

λ : Conductivité thermique en W/(m.degré).

T : Température en degré.

S : Surface d'échange en m².

1.2. 2. La convection :

La convection thermique est un processus de transfert de chaleur qui se produit dans les fluides (liquides ou gaz) en mouvement. Elle est due aux différences de température qui créent des gradients de densité dans le fluide, provoquant un déplacement des masses d'air ou d'eau qui peut entraîner une circulation thermique.

• **La convection naturelle** est une convection dans laquelle le fluide se déplace en raison de différences de densité qui sont elles-mêmes causées par des différences de température au sein du fluide.

• **La convection forcée** se produit lorsque le fluide est forcé à circuler par une pompe ou un ventilateur. Par exemple, un radiateur électrique chauffe l'air autour de lui qui est alors soufflé dans la pièce à l'aide d'un ventilateur.

La convection thermique est un processus important dans de nombreuses applications de chauffage et de refroidissement, tels que les radiateurs, les climatiseurs, les chauffe-eau, les fours, etc. [2]

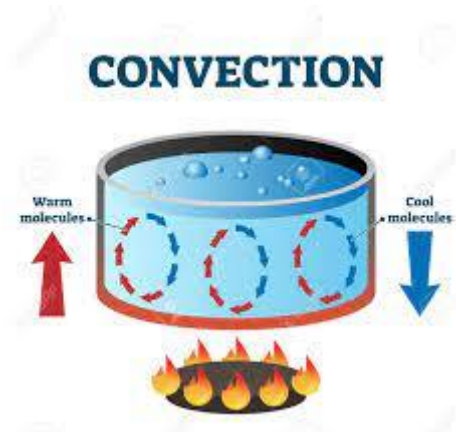


Figure. 1.3. Schéma représentatif du phénomène de convection [2]

La loi de Newton décrit la variation du flux de chaleur entre un fluide en contact avec un gradient de température. [2]

$$\varphi = h \cdot S \cdot (T_p - T_{\infty})$$

Avec

h : Coefficient d'échange de chaleur par convection, en $W/(m^2 \cdot \text{degré})$

T_p : Température de la paroi, en degré

T_{∞} : Température du fluide, en degré

S : Surface d'échange en m^2 .

1.2. 3. La rayonnement :

Transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid, les deux corps ne se touchent pas, mais ils sont séparés par un milieu transparent tel l'air, ou le vide. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique, mais limité aux longueurs d'onde du "rayonnement thermique", dont l'absorption par

certaines corps à la propriété de transformer (en tout ou en partie) “l’énergie radiante” en chaleur ou plus exactement en énergie calorifique. [2]

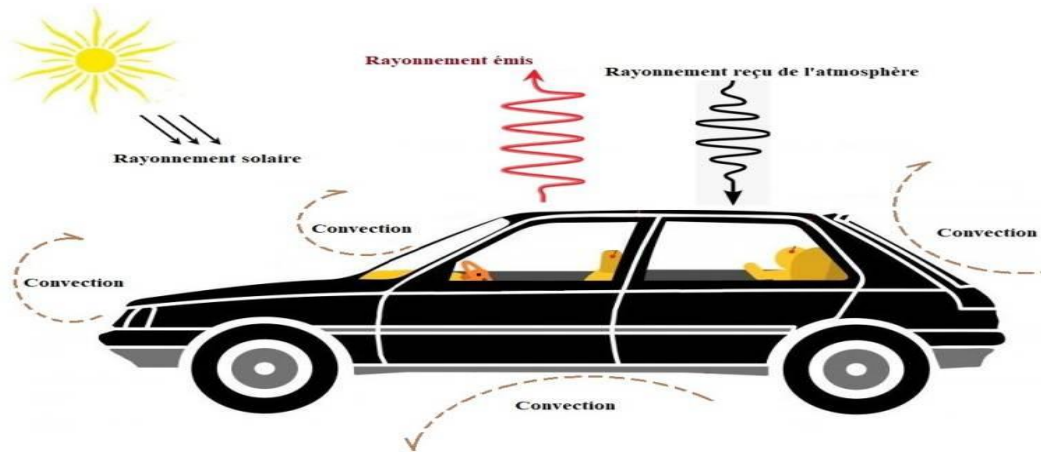


Figure. I.4. Schéma représentatif de phénomène de rayonnement [2]

En conséquence, l’énergie émise par rayonnement d’une surface S est donnée par l’équation de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi = \sigma \cdot e \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4)$$

Avec

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

e : Facteur d’émission de la surface.

T_p : Température de la paroi, en degré

T_∞ : Température du milieu ambiant, en degré

Exemple : Le soleil transmet la chaleur à la terre par rayonnement [2]

1.3. Les énergies renouvelables :

1.3.1. Définition

Les énergies renouvelables sont des sources d’énergie produites à partir de ressources naturelles telles que le soleil, le vent, l’eau, la biomasse, la géothermie et les marées, qui sont renouvelables et ne s’épuisent pas. Contrairement aux sources

d'énergie non renouvelables comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, qui sont limitées et ont un impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables ont un impact environnemental moindre et sont souvent considérées comme une alternative plus durable et respectueuse de l'environnement. [1]



Figure I.5. Les techniques des énergies renouvelables

1.3.2. Classement et liste des énergies renouvelables :

1.3.2.1. Énergie solaire :

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons solaires et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- **Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) :** l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- **Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) :** la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité. [3]

1.3.2.2. Énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour produire de l'électricité. Les éoliennes sont des structures hautes et élancées dotées de pales qui tournent avec le vent. Lorsque les pales tournent, elles entraînent un rotor qui est connecté à un générateur, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes

terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes...etc. Mais le principe reste globalement le même pour tous ces types d'énergies renouvelables. [3]

1.3.2.3. Énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est l'énergie produite à partir de la force de l'eau en mouvement. Elle peut être générée à partir de sources naturelles telles que les chutes d'eau, les marées ou les courants océaniques, ainsi que des sources artificielles telles que les barrages et les centrales hydroélectriques.

La production d'énergie hydraulique se fait en convertissant l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique. Cette conversion est généralement effectuée à l'aide de turbines, qui sont alimentées par l'eau en mouvement. Les turbines entraînent des générateurs qui produisent de l'électricité. [3]

1.3.2.4. Biomasse :

L'énergie biomasse est produite à partir de la combustion ou de la conversion d'organismes vivants ou de matières organiques récemment mortes, tels que des plantes, des cultures, des résidus forestiers, des déchets alimentaires et des déchets animaux

La biomasse est souvent utilisée pour produire de la chaleur et de l'électricité à petite échelle, mais elle peut également être convertie en biocarburants liquides tels que l'éthanol et le biodiesel

L'utilisation de l'énergie biomasse présente des avantages et des inconvénients. D'une part, elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable et peut contribuer à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. D'autre part, l'utilisation de biomasse peut avoir un impact négatif sur les sols, les écosystèmes et la biodiversité, en particulier si la biomasse est produite à partir de cultures alimentaires ou de forêts primaires.[3]

1.3.3.5. Géothermie :

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui utilise la chaleur du sous-sol pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur. Cette énergie provient de la différence de température entre le noyau terrestre et la surface de la Terre. [3]

1.4. La géothermie :

1.4.1. Définition :

Le terme "énergie géothermique" fait référence à l'énergie dérivée de la chaleur présente dans les couches superficielles de la terre et de la croûte. Les deux types d'énergie géothermique que l'on distingue généralement sont la géothermie de surface et la géothermie profonde. Le processus de récupération d'énergie géothermique de surface à partir de la couche supérieure du sol implique le stockage de chaleur pendant l'hiver et le refroidissement pendant l'été. L'objectif de la géothermie profonde est d'exploiter la chaleur stockée dans la croûte terrestre afin de générer soit de la chaleur lorsque la température est inférieure à 90 degrés, soit de l'électricité lorsque la température est comprise entre 90 et 150 degrés. [1]

1.4.2. Histoire de la géothermie :

L'utilisation de la géothermie, qui consiste à utiliser la chaleur naturelle du sous-sol pour produire de l'énergie, remonte à l'Antiquité. Les Grecs et les Romains utilisaient déjà des sources chaudes pour le chauffage des bains publics et des habitations.

Cependant, l'histoire de la géothermie moderne commence au début du XXe siècle, lorsque les ingénieurs italiens et américains ont commencé à explorer la possibilité d'utiliser la vapeur d'eau naturelle pour produire de l'électricité. En 1904, l'Italien Piero Ginori Conti a construit la première centrale géothermique du monde à Larderello, en Toscane, en utilisant la vapeur d'eau pour faire tourner une turbine.

Dans les années 1920 et 1930, les États-Unis ont commencé à développer leur propre industrie géothermique, en exploitant les sources chaudes naturelles dans l'ouest du pays. La première centrale géothermique américaine a été construite en 1922 à The Geysers, en Californie.

Après la Seconde Guerre mondiale, les progrès technologiques ont permis de développer de nouvelles techniques pour exploiter la géothermie, notamment la production d'électricité à partir de réservoirs géothermiques à haute température et de la géothermie à basse température pour le chauffage des bâtiments.

Au cours des dernières décennies, la géothermie est devenue une source d'énergie renouvelable de plus en plus importante. Aujourd'hui, les centrales géothermiques sont utilisées dans de nombreux pays du monde, notamment en Italie, aux États-Unis, en

Islande, aux Philippines et en Indonésie. La technologie de la géothermie continue de s'améliorer, avec de nouvelles techniques de forage et de production qui permettent d'exploiter les ressources géothermiques de manière plus efficace et rentable.

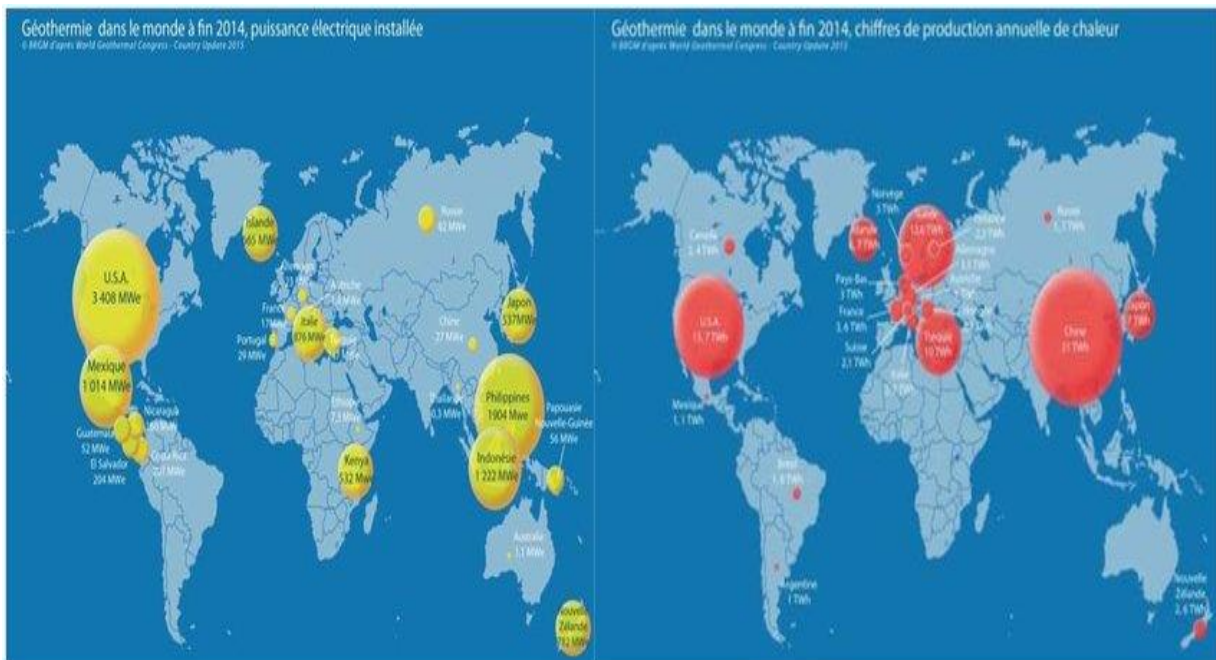


Figure.1.6. Production géothermique d'électricité (gauche) et de chaleur par usage direct (droite) dans le monde en 2014.

1.4.3. Types de l'énergie géothermique :

En géothermie, la chaleur d'un fluide sert à chauffer un bâtiment ou à produire de l'eau chaude pour un établissement de santé, par exemple, ou à produire de l'électricité. Il existe quatre catégories distinctes :

1.4.3. 1. La géothermie haute énergie : (150°C-320°C)

Elle ne peut être utilisée que dans des zones géologiques spécifiques, comme celles à convection magmatique qui réchauffe les réservoirs d'eau de surface. Elle est couramment utilisée dans les zones volcaniques telles que les Philippines, l'Indonésie, l'Amérique du Nord et la Guadeloupe. En 1995, la capacité de production mondiale

était d'environ 5 800 MW, les États-Unis représentant 46 % et les Philippines 15 %.
[4]

1.4.3. 2. La géothermie moyenne énergie : (90 °C-150°C)

Correspond à l'utilisation de la chaleur des grands fonds dans des régions géologiques à différentiel de température aléatoire. Après la recherche de nourriture, un fluide calorifique, comme le fréon ou l'ammoniac, est injecté dans le sol et pompé à la surface, où il est utilisé pour chauffer les bâtiments et produire de l'eau chaude. Le principe est le même que celui d'un réfrigérateur qui fonctionne à l'envers. [4]

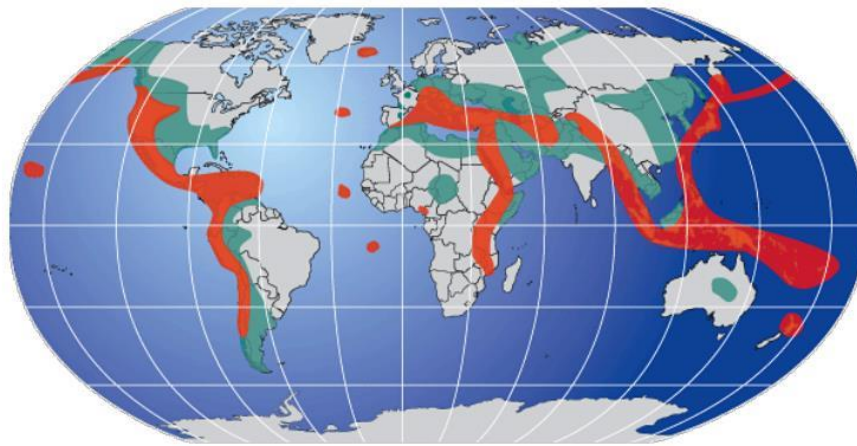
1.4.3. 3. La géométrie basse énergie : (50 °C - 90 °C)

Beaucoup plus expansive que les espèces précédentes, elles se distinguent par la profondeur beaucoup plus faible de la source géothermique (de 0 à 1000 m). En conséquence, la recherche de nourriture est plus rapide et moins chère. De plus, il n'est pas toujours nécessaire de réinjecter le fluide caloporteur, ce qui rend l'installation moins compliquée. [4]

1.4.3. 4. La géothermie de très basse énergie : (12°C -50°C)

La géothermie basse énergie se produit à faible profondeur (nappes phréatiques) ou lorsque la température est comprise entre 10 et 12 degrés Celsius. Elle est utilisée pour le refroidissement et le chauffage des bâtiments à travers les canaux canadiens. [4]

Ressources mondiales de la géothermie



- La géothermie basse énergie
- La géothermie moyenne énergie
- La géothermie haute énergie

Figure.1.7. Document représente Ressources mondiales de la géothermie. [4]

1.4.4. Avantages de l'énergie géothermique :

- ✓ La géothermie en profondeur est indépendante des circonstances atmosphériques (soleil, pluie et vent).
- ✓ C'est une source d'énergie quasi constante.
- ✓ La géothermie a une durée de vie de plusieurs décennies (30 à 80 ans en moyenne) et est disponible dans tous les sous-sols du monde.
- ✓ La géothermie est une source d'énergie renouvelable et propre (pas de déchet à stocker, très faible émission de CO₂). [5]

1.4.5. Inconvénient de l'énergie géothermique:

- ✓ Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- ✓ Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.

- ✓ Risque de réchauffement du site de forage.
- ✓ Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- ✓ Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental. [5]

1.5. Conclusion :

En conclusion, nous avons discuté des différents types de transfert de chaleur, y compris la conduction, la convection et le rayonnement. Nous avons également exploré les différentes sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie géothermique. En particulier, nous avons examiné les différentes formes d'énergie géothermique, y compris les sources d'eau chaude, les champs géothermiques et les réservoirs de magma. L'énergie géothermique est une source d'énergie prometteuse et renouvelable qui peut être utilisée pour produire de l'électricité et chauffer des bâtiments. Enfin, il est important de continuer à explorer les différentes formes d'énergie renouvelable afin de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et de protéger l'environnement pour les générations futures.

Chapitre 02

Chapitre 02

Les échangeurs de chaleur air-sol

2.1. Introduction :

L'intégration de systèmes passifs de rafraîchissement/chauffage dans le bâtiment est une bonne pratique pour la réduction de leur consommation en énergie tout en améliorant le confort thermique. Un de ces systèmes est l'échangeur air-sol, communément appelé "*puits canadien*". Il est constitué de tubes enfouis à une profondeur de 2 à 3 m dans lesquels est poussé l'air ambiant afin d'être rafraîchi/chauffé au contact avec le sol dont la température est quasi-constante durant toute l'année et égale à la température moyenne annuelle. Le principe du rafraîchissement à l'aide de l'échangeur air-sol est bien établi, mais le comportement d'un tel système dépend des conditions climatiques et de la nature du sol, qui influence énormément le choix des paramètres de dimensionnement de ce système.

Dans ce chapitre, nous présentons une revue bibliographique sur les échangeurs air-sol appliqués au conditionnement de l'air dans le bâtiment.

2.2. Définition :

L'échangeur air-sol est un système géothermique qui réchauffe l'air pour assurer la ventilation des bâtiments. Il suffit d'introduire un ou plusieurs tubes selon un trajet suffisamment long et de faire circuler l'air. L'air extérieur est forcé de se déplacer via ce réseau d'évents, provoquant une convection, avant d'être fouetté dans le bâtiment, se réchauffe en hiver ou se refroidit en été. L'idée derrière un échangeur air-sol est de forcer l'air frais à circuler dans un tuyau fermé à l'aide d'un ventilateur avant de l'insuffler dans la structure. En hiver, l'air se réchauffe le long de son parcours souterrain, ce qui réduit les besoins de chauffage liés au renouvellement de l'air dans les pièces et permet de garantir que le bâtiment restera hors sol. C'est pourquoi la pipe est connue comme une pipe canadienne. L'air extérieur en été profitant de l'effet rafraîchissant du soleil pour abaisser sa température et pénétrer dans le bâtiment tout au long de la journée, la conduite est dite provençale. [5]

2.3. Les différents types :

Il existe deux systèmes d'échangeurs de chaleur air/sol, l'un ouvert et l'autre fermé. Dans le système ouvert, la terre peut être utilisée directement pour chauffer ou refroidir une zone environnante qui peut également être utilisée à des fins de chauffage ou de refroidissement d'espace. Comme autre alternative, la terre peut être utilisée

directement comme échangeur de chaleur qui distribue la chaleur dans un système fermé. [5]

2.3. 1. Systèmes ouverts :

Dans les systèmes ouverts, l'air ambiant traverse des tubes enterrés dans le sol pour le préchauffage ou le rafraîchissement. [5]

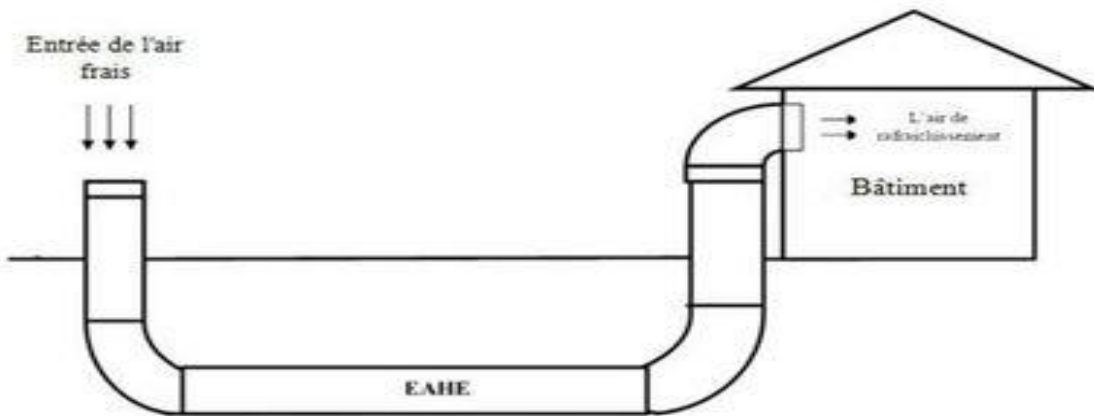


Figure 2.1. Schéma de la boucle ouverte EAHE (tunnel souterrain d'air) [5]

2.3. 2. Systèmes fermés :

Dans les systèmes fermés (figure 2.2), Le développement d'une bulle qui émerge du sous-sol et revient au bâtiment est avantageux d'un point de vue thermique. Même dans un climat humide, ces systèmes continuent de bien fonctionner. Cependant, ils ne contribuent pas au renouvellement de l'air intérieur, ce qui nécessite un deuxième circuit d'air pour le logement. [5]

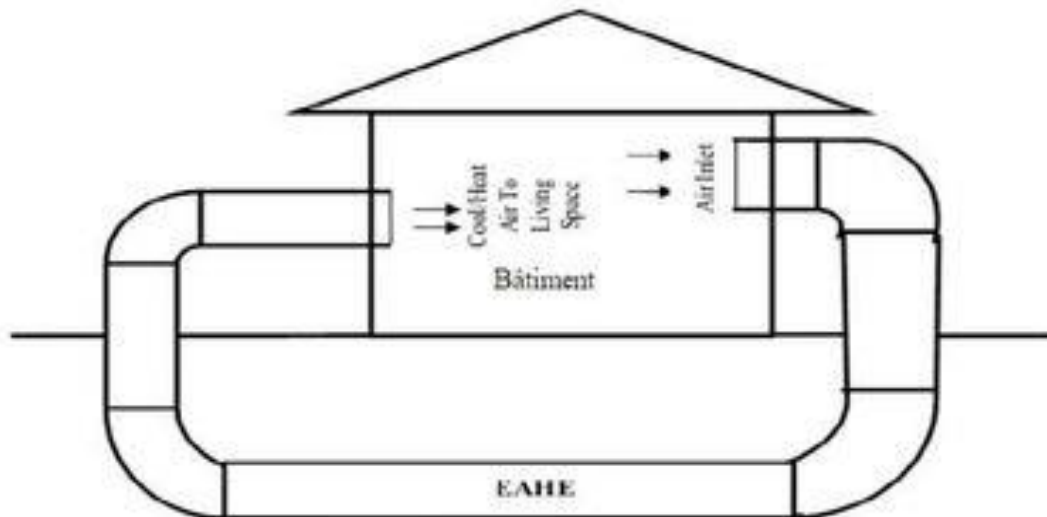


Figure 2.2. Schéma de la boucle fermée EAHE (tunnel souterrain d'air) [5]

2.4. La forme d'échangeur air/ sol :

2.4.1. Echangeur de chaleur air/sol vertical :

Un capteur vertical est constitué d'une ou plusieurs sondes thermiques constituées de quatre tubes en polyéthylène disposés en "U" et descendus à une profondeur de 50 à 100 mètres. Ces sondes sont remplies d'un mélange de mono-propylène glycol et d'eau non toxique pour l'environnement. Ce système est l'un des plus efficaces car la température du sol à 100 mètres sous la surface est plus élevée qu'en surface. Cette solution est parfaite pour tout projet de rénovation ou de construction neuve. [6]

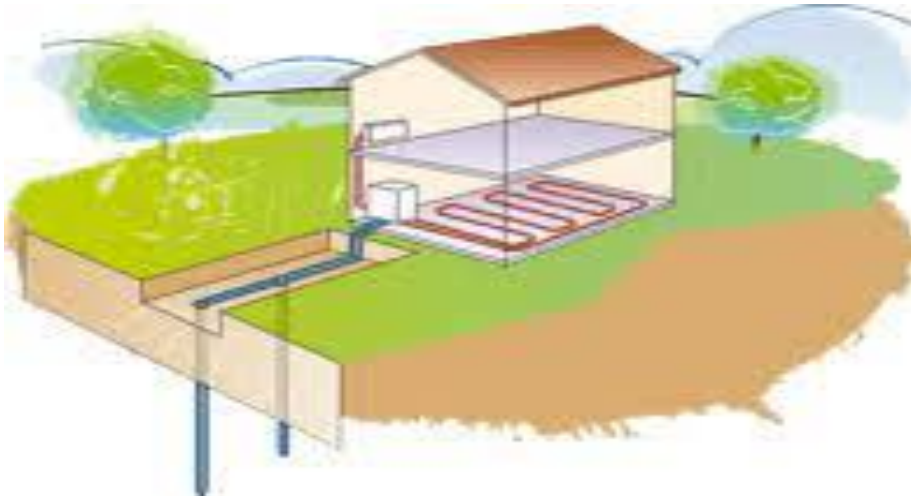


Figure 2.3 : Capture vertical. [6]

2.4.2. Echangeur de chaleur air/sol horizontal :

Capteur horizontal est constitué d'un réseau de tubes en polyéthylène enterré entre 80 et 100 centimètres de profondeur, rempli d'un mélange d'eau et de mono propylène glycol non toxique pour l'environnement. L'énergie exploitée provient principalement du rayonnement solaire. Les infiltrations d'eau de pluie et du vent constituent le complément. Il est nécessaire de disposer d'une surface de terrain équivalente de 1 à 2 fois la surface chauffée. Cette solution de captage est idéale pour tous les projets de construction neuve. [6]



Figure 2.4 : Capteur horizontal. [6]

2.4.3. Echangeur de chaleur air/sol Serpentins :

Les nappes de tubes (serpentins) sont enterrées sur un plan horizontal jusqu'à une profondeur maximale de 3 m dans le sol et en soutirent ou ajoutent de la chaleur. Comme les nappes de tubes ne sont normalement disposées qu'à une profondeur de 0,5 à 3 m. Le climat joue un rôle pour ce genre d'exploitation de la chaleur. Dans ce cas précis, le sol sert d'accumulateur d'énergie solaire, l'énergie géothermique proprement dite ne revêt alors qu'un rôle secondaire Selon l'altitude topographique. [5]



Figure 2.5: échangeur de chaleur air/sol Serpentins. [5]

2.5. Les puits canadiens

Le puits canadien et l'échangeur air-sol sont deux technologies de ventilation et de climatisation qui permettent de préchauffer ou de pré-refroidir l'air entrant dans un bâtiment à l'aide de l'énergie géothermique du sol.

Le puits canadien est un système de ventilation qui utilise un tuyau enterré dans le sol pour préchauffer ou pré-refroidir l'air extérieur avant qu'il ne soit introduit dans le bâtiment. L'air est aspiré par un ventilateur et circule à travers le tuyau enterré dans le sol, où il échange de la chaleur avec le sol avant d'être acheminé vers le bâtiment. Le puits canadien peut fonctionner de manière passive ou active, en fonction des besoins de chauffage ou de refroidissement du bâtiment.

L'échangeur air-sol est un système de ventilation qui utilise des tuyaux enterrés dans le sol pour préchauffer ou pré-refroidir l'air entrant dans le bâtiment. Contrairement au puits canadien, l'échangeur air-sol utilise deux tuyaux enterrés dans

le sol pour l'échange de chaleur. L'un des tuyaux est utilisé pour aspirer l'air extérieur et l'autre pour expulser l'air vicié. L'air frais et l'air vicié circulent dans des tuyaux enterrés en parallèle, ce qui permet un échange de chaleur entre les deux flux d'air. L'échangeur air-sol est souvent utilisé en combinaison avec un système de ventilation mécanique contrôlée (VMC) pour améliorer la qualité de l'air intérieur. [7]

2.5.1 Principe de fonctionnement :

Le puits canadien consiste à faire passer avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf par des tuyaux enterrés, Il peut être réalisé de plusieurs façons :

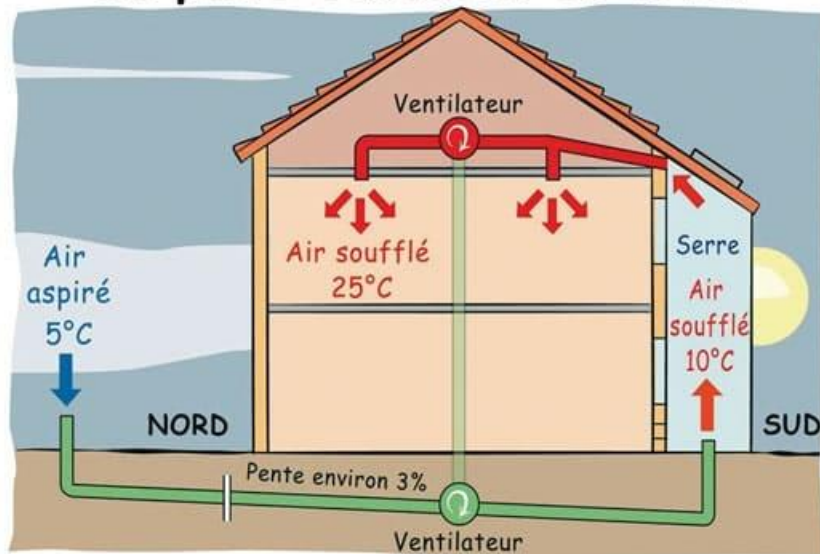
-Soit en utilisant le vide sanitaire de la maison, que l'on aurait rempli de galets de grosses tailles et permettant la circulation de l'air.

-Soit en réalisant un réseau de tuyaux enterrés dans le sol, de 25 à 30 m de long, à une profondeur de l'ordre de 1 à 2 mètres.

Généralement, à une profondeur située de deux à trois mètres la température du sol est pratiquement constante tout au long de l'année, elle varie entre 10 et 18°C selon les saisons, alors que l'air extérieur peut varier de -5°C à + 45°C dans la plupart des climats, l'exemple de l'Algérie. Un puits canadien semble une solution évidente pour exploiter cette température constante : l'air, au lieu d'être amené directement de l'extérieur, va circuler dans un collecteur enterré qui se trouve en contact avec le sol pour échanger ses calories. L'objectif étant que l'air à la sortie du collecteur soit très proche à la température du sol.

-En hiver, le sol à cette profondeur est donc plus chaud que la température extérieure, l'air étant froid se trouve donc préchauffé lors de son passage à travers la tuyauterie de l'échangeur enterré, est aspiré par la pompe à chaleur, n'est pas prélevé directement de l'extérieur d'où une économie de chauffage. [6]

Principe de fonctionnement du puits canadien en hiver



© Dominique Klecka

Figure 2.6. Description d'un puits canadien en Hiver.

-En été, la température du sol est d'environ 15°C à une profondeur de deux mètres, dans le cas de la température extérieure $+ 32^{\circ}\text{C}$, de l'air frais sera introduit dans le bâtiment à $+ 20^{\circ}\text{C}$ qui permet de refroidir le milieu environnant sans avoir recours à la climatisation. [7]

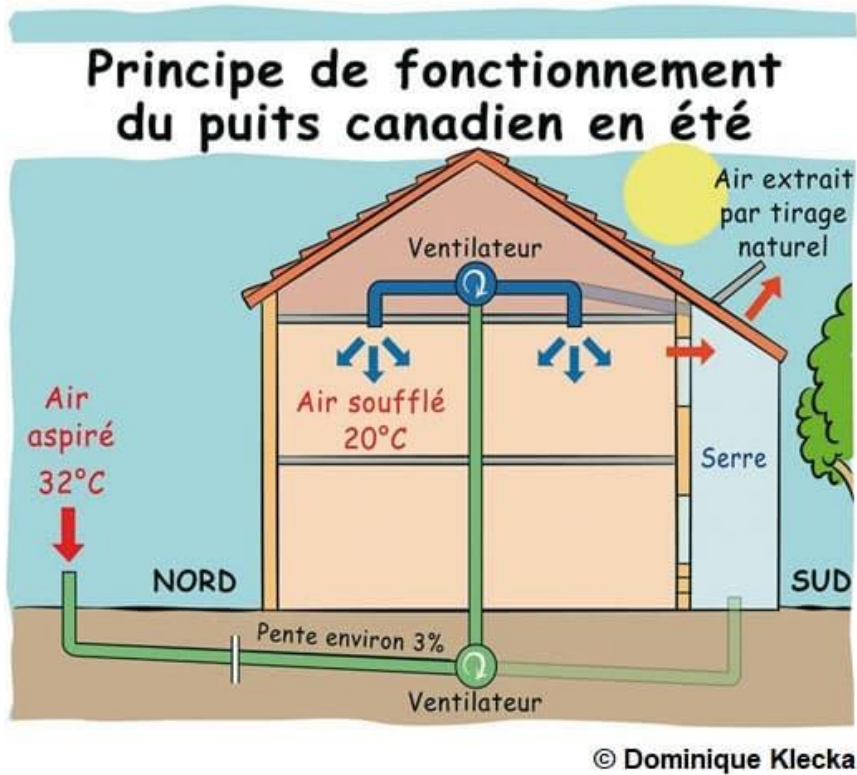


Figure 2. 7. Description d'un puits canadien en été.

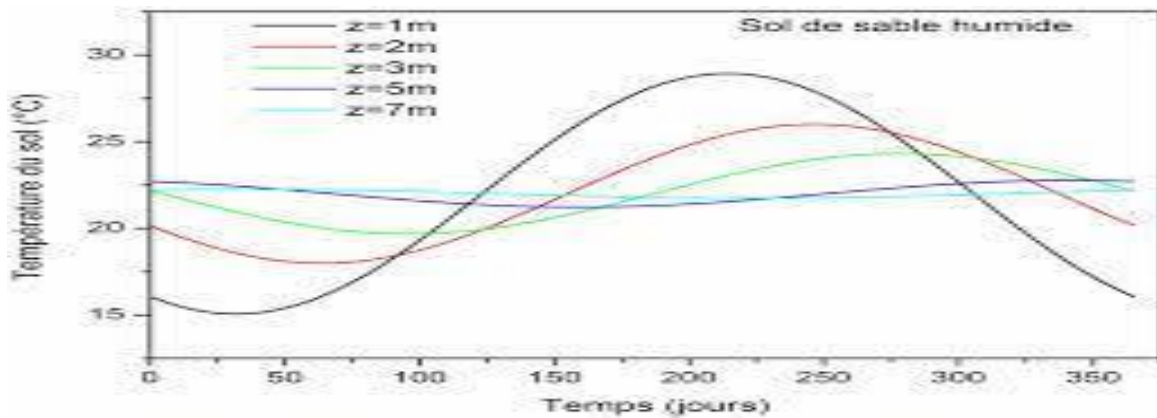


Figure 2.8. La température de sol moyen en fonction de sol [1]

2.5.2. Les composants du puits canadien :

Le système se compose d'une entrée d'air équipée de filtres pour empêcher les rongeurs de pénétrer dans les canalisations, d'une canalisation lisse et pentue de 30 à 50 mètres de long pour l'évacuation des eaux de condensation, et soit d'un siphon, soit d'une pompe. Envisager leur récupération et l'utilisation d'un ventilateur pour l'inhalation dans une ou plusieurs pièces. Par conséquent, les quatre composants principaux sont les suivants :

- Entrée d'air neuf.
- Conduit.
- Système d'évacuation des condensats.
- Ventilateur système de régulation du puits. [1]



Figure.2.9. La prise d'entrée de l'air neuf .[1]

2.5.3. Emplacement du puits canadien :

Trois manières d'installation de l'échangeur air-sol sont possibles :

- 1- Sous le bâtiment
- 2- Dans les fouilles du bâtiment
- 3- Dans le terrain

Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement, aucun terrassement supplémentaire n'étant à réaliser. Lors de la mise en place des tuyaux, il faut éviter au maximum les coudes et angles créant des pertes de charge. De plus un écart entre les tuyaux parallèles d'au moins 0,8m doit être conservé. [4]

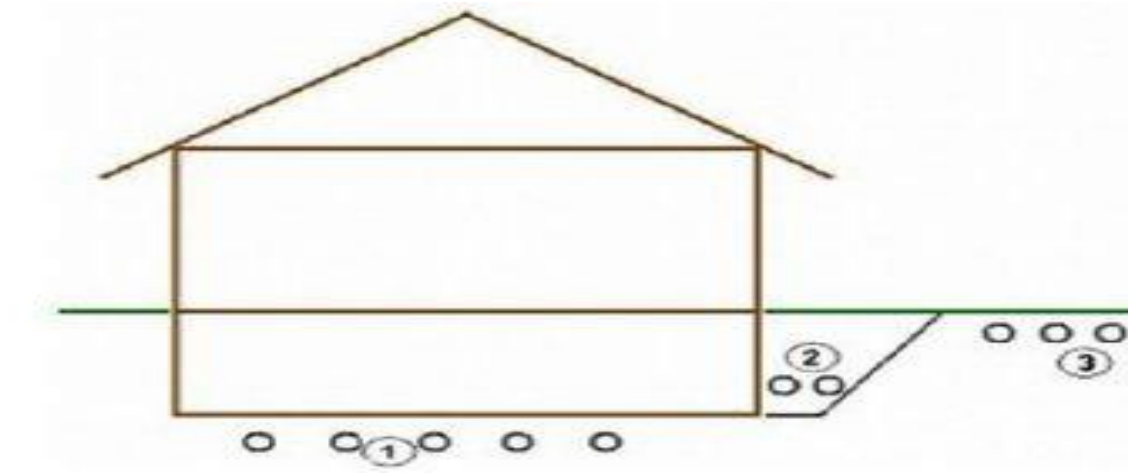


Figure 2. 10. Emplacement du puits. [4]

2.5.4. Caractéristiques des tubes (Puits canadien) :

-Nombre de tubes :

Le conduit pour les tuyaux peut consister en un seul tube installé en cercle ou en anneau autour du bâtiment, ou il peut être configuré comme un réseau de tubes parallèles installés entre les collecteurs pour augmenter la quantité d'air circulant dans les tuyaux. [5]

-Longueur de chaque tube :

Elle mesure souvent entre 30 et 50 mètres pour minimiser les pertes de charge. La longueur de l'ensemble du conduit est calculée en fonction du débit Souhaité, air souhaité, des caractéristiques du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation choisi. [5]

-Diamètre des tubes :

La vitesse de l'air à l'intérieur des canalisations doit être comprise entre 1 et 3 m/s pour maximiser les transferts thermiques air-sol. Le diamètre du conduit des pompes est alors calculé pour respecter ces exigences de vitesse d'air en fonction des débits d'air requis. [5]

-Profondeur d'enfouissement des tubes :

La profondeur prévue est souvent comprise entre 1,5 et 3 mètres. A ces profondeurs, la température du sol varie entre l'été et l'hiver beaucoup moins que l'air extérieur (7 à 12 degrés Celsius en moyenne). Il est néanmoins possible de remplir plus profondément les tubes d'air, mais cela augmente les contraintes de terrassement et de position des conducteurs. [5]

-Matériau constitutif des tubes :

Le choix du matériau est important car il impacte directement sur les échanges thermiques sol/puits. L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits. Les matériaux utilisés doivent également avoir une bonne tenue à l'enfouissement (une classe de rigidité minimale de 8 kN/m² est conseillée). Les tubes

entrant dans la composition des puits canadiens/provençaux actuellement en fonctionnement sont généralement en PVC, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide. Certains tubes sont constitués de matières plastiques (PVC structurés ou gaines type TPC) emprisonnant des bulles d'air, ce qui diminue l'échange thermique sol/conduit. Le recours à ce type de tube est donc déconseillé. [5]

2.5.5 Les avantages du puits canadien :

1. Apporte de l'air frais en été.
2. Apporte de l'air tempéré en hiver.
3. Consomme peu d'énergie.
4. Coût du matériel très faible.
5. Apporte de l'air pur.
6. Évite la climatisation. [4]

2.5.6. Les inconvénients du puits canadien:

1. Peut apporter des micro-organismes ou du radon dans la maison.
2. Technique de pose relativement délicate.
3. Coût de terrassement important.
4. Entretien délicat. [4]

2.6. Conclusion :

L'échangeur air-sol, également connu sous le nom de puits canadien, est un système de refroidissement de bâtiment qui consomme très peu d'énergie en exploitant l'inertie thermique du sol. Les puits canadiens sont de plus en plus courants et l'expérience a montré qu'ils apportent une contribution énergétique réelle aux logements. Toutefois, il convient de considérer le puits canadien comme un complément à un système de chauffage ou de refroidissement. Un échangeur de chaleur sur l'air de ventilation permet de récupérer l'énergie perdue lors de la ventilation. Cependant, la qualité de l'air pendant la période estivale nécessite certaines

précautions. En outre, dans les zones urbaines, les contraintes spatiales rendent généralement l'installation d'un puits canadien difficile. À cet effet, l'utilisation de puits canadiens verticaux est recommandée, car ils offrent de meilleures performances à moindre coût.

Chapitre 03

Chapitre 03

Dimensionnement d'un échangeur air/sol

3.1. Introduction :

L'échangeur air-sol met en contact thermique deux sources de différence de température, comme les autres échangeurs thermiques. Pendant la phase de refroidissement, l'air agit comme une source d'air chaud tandis que le sol agit comme une source d'air froid[16]. De plus, la planification, la conceptualisation et la mise en œuvre minutieuses de ces échangeurs sont essentielles à l'efficacité d'un système air/sol. Il est donc évident que disposer d'un échangeur géothermique air/solaire adapté et bien dimensionné permet d'obtenir de bonnes performances et de réaliser des gains énergétiques.

Ce chapitre traite du dimensionnement d'un échangeur de type air/sol. L'équation de la différence entre les températures de l'air et du sol a été résolue en utilisant la méthode des différences et un schéma implicite.[9]

3.2 Modélisation de la température du sol :

L'évaluation des fluctuations de température dans le sol entourant le tube est essentielle pour déterminer l'épaisseur du sol perturbé en fonction du temps. Cette mémoire considère cette épaisseur comme variable lors du calcul de la résistance thermique du sol en fonction de la temps de fonctionnement de l'échangeur air/sol.[9]

En utilisant l'équation de transmission de chaleur à travers le sol, qui se lit (dans notre cas, nous supposons que le transfert de chaleur se fait le long de l'axe de (x)), il est possible de calculer la variation radiale de la température du sol.

Les hypothèses suivantes ont été prises en considération lors de la mise en place du modèle mathématique pour aider à la simplification de l'analyse.[9]

- **Hypothèses :**

- Les propriétés thermo-physiques du sol sont isotropes avec une conductivité thermique homogène dans toutes les couches du sol.

- L'air est incompressible et ses propriétés thermiques sont constantes.

- L'air est bien mélangé dans le tube, et le flux d'air est uniforme sur toute la longueur des tubes.

-Dans le calcul numérique, la température de l'air d'entrée est considéré constante.

- **Variation de la température dans le sol :**

Il est crucial d'estimer le changement de température dans le sol entourant le tube. L'équation du transfert de chaleur à travers le sol peut être utilisée pour calculer la variation radiale de la température du sol comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Sachant que la diffusivité thermique est aussi donnée par :

$$\alpha = \frac{\gamma}{\rho C_p} \quad (2)$$

Le calcul de la variation de la température du sol a été fait en se basant sur les conditions initiales et aux limites suivantes :

- ✓ **Condition initiale :**

Il faut fournir au modèle numérique de la condition initiale qui représente l'état du sol à l'instant où commence la simulation. Toutefois, ces conditions initiales ne constituent qu'une base de démarrage.

$$T(x, 0) = T_{sol} \quad (3)$$

- ✓ **Conditions aux limites :**

$$T(0,t) = T_{air} \quad (4)$$

$$T(\infty,t) = T_{sol} \quad (5)$$

- **Méthode des différences finies :**

L'approximation approchée des dérivées de fonctions sur un ensemble de points discrets à l'aide du produit de deux différences est le fondement de la méthode des différences finies. Ces approximations, qui sont introduites dans des équations différentielles, permettent le développement de schémas numériques itératifs qui fournissent une représentation approchée de la solution.[9]

3.2.1 Discrétisation de l'équation de la chaleur 1D :

En utilisant des nœuds uniformes dans la coordonnée axiale, la géométrie de l'échangeur air/sol a été discrétisée dans le domaine du calcul (voir image ci dessous). L'intervalle des nœuds dans les coordonnées des axes de (x) restreints à la sphère solaire est $\Delta t = 0,01h$ et un intervalle ultérieur de 0,01 cm. La Figure III.3 décrit la discrétisation de ce champ. Les nœuds sont étiquetés de $i=1$ à N , où $i = 1$ représente la surface extérieure du tube et $i = N = 100$ représente le nœud ultime loin du tube dans la discrétisation du champ de sol.[9]

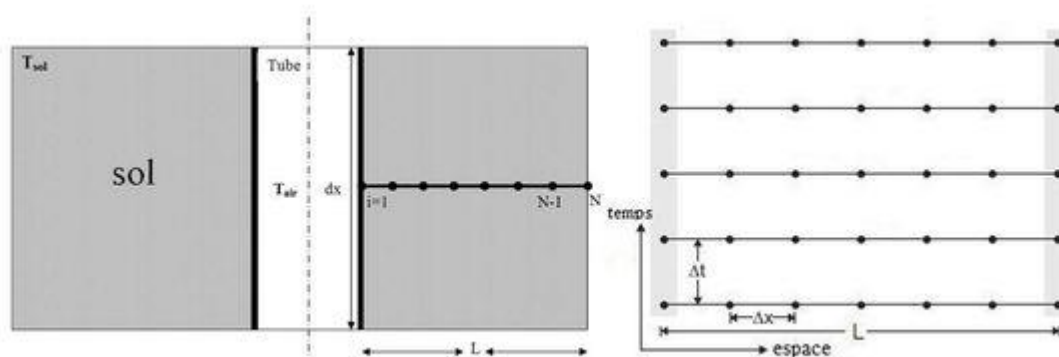


Figure 3.1. Exemple de discrétisation du sol à l'entrée de l'échangeur.[9]

L'équation différentielle (équation (1)) est discrétisée en utilisant la méthode des différences finies avec schéma implicite.

En utilisant une étape temporelle Δt , et une étape spatiale Δx et en appliquant le schéma de différence central, l'équation (1) devient :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)^{n+1} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)^{n+1} \quad (6)$$

Nous utilisons un schéma avant d'ordre 1 pour évaluer la dérivée temporelle et un schéma centré d'ordre 2 pour la dérivée seconde en espace

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)^{n+1} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)^{n+1} = \frac{T_i^{n+1} - 2T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (8)$$

En posant $\lambda = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ La température à l'itération $n + 1$ est donnée par :

$$T_i^n = (1 + 2\lambda)T_i^{n+1} - \lambda(T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}) \quad (9)$$

On constate que les inconnues à l'itération $n+1$ sont reliées entre elles par une relation implicite (d'où le nom de la méthode).

En appliquant les conditions initiales :

$$T_i^1 = (1 + 2\lambda)T_i^2 - \lambda(T_{i+1}^2 + T_{i-1}^2) = T_{so} = 21.5^\circ\text{C} \quad (10)$$

Fixer le temps

Pour $n = 1$ et i varie de 1 à $N-1$

$$i = 2 \quad T_2^1 = (1 + 2\lambda)T_2^2 - \lambda(T_3^2 + T_1^2) \quad (11)$$

$$i = 3 \quad T_3^1 = (1+2\lambda) T_3^2 - \lambda(T_4^2 + T_2^2) \quad (12)$$

.

.

$$i = 49 \quad T_{49}^1 = (1 + 2\lambda)T_{49}^2 - \lambda(T_{50}^2 - T_{48}^2)$$

pour $n=2$ et varie de 1 à $N-1$

$$i = 2 \quad T_2^2 = (1 + 2\lambda)T_3^3 - \lambda(T_3^3 + T_1^3)$$

$$i = 3 \quad T_4^2 = (1 + 2\lambda)T_3^3 - \lambda(T_4^3 + T_2^3)$$

.

.

$$I=49 \quad T_{49}^3 = (1 + 2\lambda)T_{49}^3 - \lambda(T_{50}^3 + T_{48}^3)$$

Le résultat final est sous la forme d'un système linéaire $Ax=b$

$$\begin{bmatrix} 1+2\lambda & -\lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\lambda & 1+2\lambda & -\lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -\lambda & 1+2\lambda & -\lambda \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda & 1+2\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{N-2} \\ T_{N-1} \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} T_{sol} + \lambda T_{air} \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{N-2} \\ T_{sol} + \lambda T_{sol} \end{bmatrix}^n$$

3.3 Modélisation de la température de l'air :

L'échangeur horizontal est placé à une profondeur d suffisamment profonde pour que la température du sol reste invariante.

- **Hypothèses :**

- Le sol loin de l'échangeur garde une température constante pendant les échanges thermiques .
- Le coefficient d'échange convectif entre l'air et le tube est constant le long de l'échangeur air sol .
- L'écoulement de l'air est unidirectionnel avec vitesse supposée constante .
- La conduction longitudinale et le taux d'humidité sont négligeables.

- **Modélisation transitoire de la température de l'air le long du tube :**

Reprenons le bilan énergétique mentionné dans l'équation, qui est valable aussi bien pour les cycles de fonctionnement que pour le tronçon de l'échangeur air-air.

Ritotale change proportionnellement à la durée de fonctionnement de l'échangeur.

$$\rho S C p_{air} \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) \lambda S \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{(T_{sol} - T_a)}{\frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi} \ln \left(\frac{r_3(t)}{r_2} \right) + \frac{1}{\lambda_{tub} \cdot 2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{h_{cv} \cdot 2\pi r}} \quad (13)$$

La profondeur de pénétration de la chaleur dans le sol est représentée par $r_3(t)$, soit le rayonnement de la couche de sol perturbée à proximité de l'échangeur [15]. La température de la terre commence à se stabiliser à cette distance ($r_3(t)$). [9]

$$r_3(t) = \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \quad (14)$$

Après application des hypothèses simplificatrices proposées à l'équation 1, on obtient:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -u \frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{(T_{SOL} - T_a)}{\gamma} \quad (15)$$

Avec $\gamma = \rho \pi r_1^2 c p_{air} R_{itotale}(t)$

Les conditions aux limites et la condition initiale suivantes sont choisies pour résoudre l'équation (7)

$T_a(x = 0) = T_{ae}$ qu'est la température mesurée à l'entrée de l'échangeur

$T_a(x = t) = T_{s0}$

-Résolution numérique du problème par la méthode de différences finies :

Afin de créer un système de N équations pour N inconnues reliées à un domaine discret appelé maillage, la méthode des différences vise à transformer une équation valide continue. [9]

✓ Discrétisation de l'équation du bilan énergétique :

Le schéma implicite dans la discrétisation de l'équation du problème (équation 15) est préférable en raison de la stabilité de la méthode. La configuration et la zone désignée pour l'échangeur d'air sont illustrées dans la figure ci-dessous sol.[9]

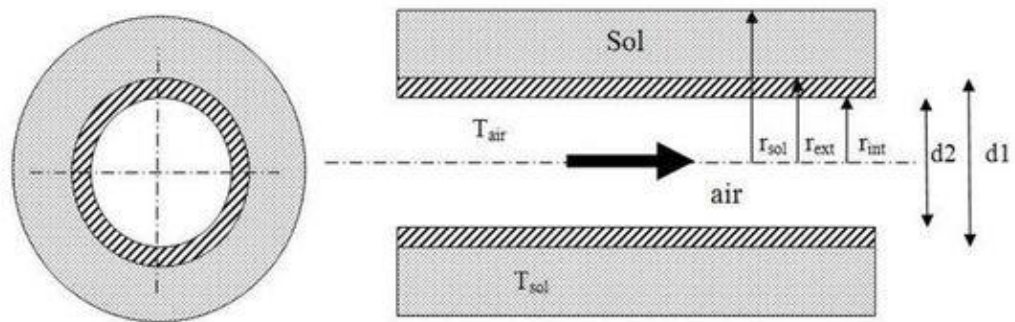


Figure 3.2. 2.Géométrie de la conduite formant l'échangeur enterré.[9]

Rappelons l'équation du bilan énergétique simplifiée en régime transitoire éq (16).

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -u \frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{(T_{sol} - T_a)}{\gamma} \quad (16)$$

Après la discrétisation de l'équation 3, on utilise les différences à gauche du 2e ordre jusqu'au nœud N-1 et les différences à droite du 1er ordre pour le nœud final N. Plus précisément, si l'indice I représente la variable x et l'indice n représente la variable t , alors en écrivant le second membre de l'équation 4 au temps t = k+1 où la solution est inconnue, on peut obtenir une équation implicite[28], qui donne [9]

$$\frac{1}{\Delta t} (T_i^{n+1} - T_i^n) = \frac{u}{2\Delta x} (T_{i+i}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}) - \frac{1}{\gamma} T_i^{n+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (17)$$

$$-\frac{1}{\Delta t} T_i^k = \frac{u}{2\Delta x} T_{i-1}^{k+1} - \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\Delta x} \right) T_{i+1}^{k+1} - \frac{u}{2\Delta x} T_{i+1}^{k+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (18)$$

Par séparation des variables, le membre gauche est réservé aux variables connues par contre le membre droit est réservé aux variables inconnues, comme suit :

$$T_i^k + \frac{u}{\gamma} T_{sol} = -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} T_{i-1}^{k+1} + \left(\frac{\Delta t}{\gamma} + 1 \right) T_i^{k+1} + \frac{u\Delta t}{2\Delta x} T_{i+1}^{k+1} \quad (19)$$

La forme finale discrétisée (éq.6) est conçue pour un maillage allant du premier nœud jusqu'au nœud N-1.

Pour le nœud final N (température de sortie), nous avons utilisé les différences à gauche du 1^{er} ordre à l'équation comme suit :[9]

$$\frac{1}{\Delta t} (T_n^{k+1} - T_n^k) = -\frac{u}{2\Delta x} (T_n^{k+1} - T_{n-1}^{k+1}) - \frac{1}{\gamma} T_n^{k+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (20)$$

$$-\frac{1}{\Delta t} T_i^k = -\left(\frac{1}{\gamma} + \frac{u}{\Delta x}\right) T_n^{k+1} + \frac{u}{2\Delta x} T_n^{k+1} + \frac{T_{sol}}{\gamma} \quad (21)$$

$$T_i^k + \left(\frac{\Delta t}{\gamma}\right) T_{sol} = -\frac{u\Delta t}{\Delta x} T_{n-1}^{k+1} + \left(\frac{u\Delta t}{\Delta x} + \frac{\Delta t}{\gamma} + 1\right) T_n^{k+1} \quad (22)$$

Les équations 20 et 23 représentent la forme finale discrétisée de l'équation du bilan énergétique simplifié (éq. 16) où leurs système matriciel s'écrit comme suit : [9]

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{\gamma} + 1 & \frac{u\Delta t}{2\Delta x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} & \frac{\Delta t}{\gamma} + 1 & \frac{u\Delta t}{2\Delta x} & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} & \frac{\Delta t}{\gamma} + 1 & \frac{u\Delta t}{2\Delta x} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{u\Delta t}{2\Delta x} & \left(\frac{u\Delta t}{2\Delta x} + \frac{\Delta t}{\gamma} + 1\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_2 \\ T_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{n-1} \\ T_n \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} T_2 + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} + \frac{u\Delta t}{2\Delta x} T_{ae} \\ T_3 + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} \\ \cdot \\ T_{n-1} + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} \\ T_n + \frac{\Delta t}{\gamma} T_{sol} \end{bmatrix}$$

3.4 Résolution numérique :

La méthode Crout, qui est basée sur la décomposition LU de la matrice A, est généralement utilisée pour résoudre numériquement les systèmes linéaires du sol et de l'air, ce qui a fait passer le système à $LUx=B$. Lorsque $Ux=Y$ est supposé, le système $LY=B$ est résolu en utilisant la méthode de la descente du triangle pour localiser le vecteur Y. Enfin, la méthode de remontée triangulée est utilisée pour résoudre le système $Ux=Y$. [9]

Conclusion générale

En conclusion, la conception de bâtiments à faible consommation d'énergie est cruciale pour atténuer les effets du changement climatique et réduire notre dépendance aux énergies non renouvelables. Les échangeurs air-sol, tels que les puits canadiens, offrent une solution prometteuse pour préconditionner l'air ambiant en utilisant la température du sol. Cependant, il est essentiel de continuer à développer des connaissances et des techniques dans ce domaine afin d'améliorer constamment leur efficacité et leur performance.

La recherche, l'innovation et la sensibilisation à l'importance de la conception de bâtiments durables et écoénergétiques doivent être encouragées tant au niveau professionnel qu'au niveau des politiques publiques. Seule une approche collective et concertée pourra permettre une transition vers un environnement bâti plus durable, résilient et respectueux de notre planète.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Houssam Eddine SEDIRA « Rafraichissement de l'air d'un local par la géothermie : échangeur enterré air/sol forme circulaire », Université Mohamed Khider de Biskra Faculté de science et technologie Génie Mécanique.
- [2] Belloufi Yousef « Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraichissement des locaux », Université Mohamed Khider Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique.
- [3] DOUH Abd elouahab SERRAOUI Khaled « Dimensionnement d'un échangeur air/sol Enterré destiné au rafraichissement de l'air », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Mécanique.
- [4] Ayoub MANSOUL « Rafrâichissement de l'air d'un local par la géothermie échangeur enterré air /sol, de forme zig zag », Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique.
- [6] Youcef TARCHA « Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : Echangeur enterré eau/sol de forme spirale », Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique.
- [7] BELACHI mouhi eddine BOUGOFFA chaffai « Etude paramétrique des performances de l'échangeur de chaleur air-sol pour les applications de refroidissement. », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Faculté des Sciences Appliquées Département de génie Mécanique.
- [8] SLIMANI Lilia KECILI Idir «, Etude paramétrique d'un échangeur vertical air-sol. », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU Faculté des Sciences Appliquées Département de génie mécanique.
- [9] Mahdi CHENINE Abdelhak BELHADJ « Etude numérique d'un échangeur géothermique air/sol », UNIVERCITE KASDI MERBAH OUARGLA Faculté des sciences des hydrocarbures de l'énergie Renouvelable Et des sciences de la terre et de l'univers Département d'énergie renouvelable.