

Université Kasdi Merbah -Ouargla
Faculté des hydrocarbures de l'énergie Renouvelable
Et sciences de la terre et l'univers



Département : Energies Renouvelables
Spécialité : Energies Renouvelables en mécanique



Mémoire
Présenté pour l'obtention d'un diplôme de
Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energies Renouvelables en mécanique

Présenté par :
Ibtihal MESROUK
Rihab TAIBI

Thème :

Etude de l'efficacité énergétique d'un échangeur
air-sol installé dans un habitat situé dans la
région de Ouargla

Devant le Jury :

Mr. Chouaib Ammari	Université KM Ouargla	Prèsident
Mr. Abdessamia HADJADJ	Université KM Ouargla	Examineur
Mr. Hichem NECIB	Université KM Ouargla	Encadreur

Année universitaire 2022-2023



*A mes chers parents
A mon frère et à mes sœurs,
Je dédie ce travail.*



Ibtihal MESROUK



Je dédie ce travail à :

Ma mère et mon père,

Mes frères et mes sœurs,

Méflah Bélkhir et Derdouri

Mohamed.



Rihab TAIBI



REMERCIEMENTS

Louange à Dieu et gratitude à Dieu qui nous a accordé la réussite, la guidance et la patience face aux difficultés que nous avons rencontrées dans l'accomplissement de ce modeste travail.

Louange à Dieu, louange abondante.

Nous exprimons notre profonde gratitude, appréciation et reconnaissance au professeur superviseur Hichem Necib, professeur à l'Université Ouargla, qui ne nous a pas ménagé ses précieux conseils et son soutien constant, ainsi que pour toutes les orientations et informations précieuses qu'il nous a fournies, ce qui nous a aidés à accomplir ce mémoire.

Nous remercions les membres honorables du jury de soutenance pour leur bienveillance lors de la discussion de ce mémoire.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers le professeur Djamel Belatrach, le professeur Zedouri, le responsable des laboratoires électroniques Rabia Khazen et Latifa Sayed Rouho, ainsi que tous les collègues présents

à-bas, pour leur accompagnement et leur soutien tout au long de la préparation.

Nous tenons également à remercier la famille du département des énergies renouvelables de l'Université Ouargla pour tout ce qu'ils ont fait pour nous tout au long de notre parcours académique.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicas	II
REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
NOMENCLATURE	X
INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I. CONFORT THERMIQUE	02
I.1. Introduction	03
I.2. C'est quoi un confort thermique ?	03
I.3. Méthodes utilisées pour avoir un confort thermique (secteur bâtiment)	03
I.3.1 Isolation thermique	03
I.3.2. Systèmes de chauffage et de climatisation	04
• La climatisation	04
• Dispositifs pour le confort d'été	04
• Le chauffage	04
• Dispositifs pour le confort d'hiver	05
I.3.3. La ventilation	05
I.3.4. L'utilisation de la végétation	06
I.4. Confort thermique et consommation d'énergie électrique	07
I.5. Conclusion	08
CHAPITRE II. LES ÉCHANGEURS AIR SOL	09
II.1. Introduction	09
II.2. Définition du l'échangeur air-sol et son fonctionnement	09
II.3. Différentes technologies existantes pour le refroidissement par échangeur air-sol	10
• EAHE couplé avec des climatiseurs	10
• EAHE couplée avec des systèmes photovoltaïques autonomes ou intégrés aux bâtiments	11
• EAHE couplé avec des cheminées solaires	12
• EAHE couplé avec des pompes à chaleur air-air	13
II.4. Revue des travaux de recherche	14
II.5 conclusions	17
CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS	18

III.1. Introduction	18
III.2. Modélisation mathématique	18
➤ Equation de continuité	18
➤ Equation de quantité de mouvement	19
➤ Equation d'énergie	19
➤ Modélisation de la turbulence	20
➤ Le modèle $K-\varepsilon$	20
III.3. Résolution numérique	21
III.3. Présentation du logiciel de simulation « ANSYS FLUENT » ANSYS FLUENT	21
III.4. Les processus de la simulation	22
III.4.1. Création de la géométrie	22
III.4.2. Maillage	23
III.4.3. Paramétrage des données des calculs	24
III.4.3.1. Les hypothèses et les conditions aux limites	24
➤ La température de l'air à l'entrée de l'échangeur enterré	25
➤ Efficacité de l'échangeur enterré	26
➤ Le rendement moyen de l'échangeur enterré	27
➤ L'effet de la longueur	27
➤ L'effet de la géométrie	34
➤ L'effet de la vitesse de l'air à l'entrée	45
III.5. Analyse des impacts environnementaux et économiques du système du refroidissement des échangeurs air-sol	48
III.5.1. Les hypothèses	48
III.5.2. Calcul des coûts d'électricités	48
✚ Le coût initial de l'énergie consommée par la climatisation (en DA/m ² par an)	48
III.5.3. Emission des gaz CO ₂ par le système EAHE	49
III.6. Conclusion	50
CONCLUSION GENERALE	51

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

52

RÉSUMÉ

54

LISTE DES FIGURES

Fig1.1. Façade Nord comportant un nombre important de climatiseurs.	04
Fig1.2. Equipements de confort d'hiver.	05
Fig1.3. Plantation complètent la conception de l'édifice.	07
Fig1.4. Consommation électrique pour l'année 2022.	08
Fig2.1. Principe de fonctionnement d'un échangeur air-sol.	09
Fig2.2. Schéma du système hybride EATHE.	10
Fig2.3. Photographie de la configuration expérimentale.	11
Fig2.4. Diagramme schématique de l'échangeur de chaleur air-sol et de la cheminée solaire.	12
Fig2.5. Diagramme schématique d'un système de pompe à chaleur air-air avec EAHE.	13
Fig2.6. Température simulée le long de la longueur du tuyau pour différentes vitesses de sortie pour (a) un tuyau en acier et (b) un tuyau en PVC.	14
Fig2.7. Les quatre configurations d'échangeurs de chaleur utilisées.	15
Fig.3.1. Ansys fluent.	21
Fig.3.2. Les longueurs choisies d'échangeur air-sol.	22
Fig.3.3. Section transversale (a) Section longitudinale (b) du maillage du tube.	24
Fig.3.4. Les variations de température de l'air à l'entrée au cours des 24 heures.	26
Fig.3.5. Contours de température pour longueur 28m en trois heures différent de la journée.	28
Fig.3.6. Contours de température pour longueur 56m en trois heures différent de la journée.	29
Fig.3.7. Contours de température pour longueur 70m en trois heures différent de la journée.	30
Fig.3.8. Contours de température pour longueur 84 m en trois heures différent de la journée.	31
Fig.3.9. Les variations des températures à l'entrée (T_{eq}) et à la sortie (T_s) pour les longueurs utilisées pendant 24h.	32
Fig3.10. La performance de l'échangeur air-sol en fonction des longueurs utilisées.	33
Fig.3.11. Les formes géométriques sélectionnées pour la longueur de 56 m.	34
Fig.3.12. Contours de température pour la géométrie 1 en trois heures différent de la journée.	35
Fig.3.13. Contours de pression pour la géométrie 1 en trois heures différent de la journée.	36

Fig.3.14. Contours de température pour la géométrie 2 en trois heures différent de la journée.	37
Fig.3.15. Contours de pression pour la géométrie 2 en trois heures différent de la journée.	38
Fig.3.16. Contours de température pour la géométrie 3 en trois heures différent de la journée.	39
Fig.3.17. Contours de pression pour la géométrie 3 en trois heures différent de la journée.	40
Fig.3.18. Contours de température pour la géométrie 4 en trois heures différent de la journée.	41
Fig.3.19. Contours de pression pour la géométrie 4 en trois heures différent de la journée.	42
Fig.3.20. Les variations de température à l'entrée T_{eq} ($^{\circ}C$) et à la sortie T_s ($^{\circ}C$) pour chaque géométrie pendant 24 heures.	43
Fig.3.21. La différence de pression d'air entre l'entrée et la sortie pendant 24 heures.	44
Fig.3.22. La performance de l'échangeur air-sol en fonction des géométries utilisées.	44
Fig.3.23. Contours de température pour les vitesses 1m/s et 2m/s en 15:00h.	45
Fig.3.24. Contours de température pour les vitesses 3m/s , 4m/s et 5m/s en 15:00h.	46
Fig.3.25. Les variations de température à l'entrée T_{eq} ($^{\circ}C$) et à la sortie T_s ($^{\circ}C$) pour chaque vitesse pendant 24 heures.	47
Fig.3.26. La performance de l'échangeur air-sol en fonction des géométries utilisées.	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau2.1 : Logiciels et outils pour modèles d'échangeurs de chaleur air-sol.	17
Tableau3.1 : Les constantes qui se trouvent dans les équations ci-dessus.	21
Tableau 3.2 : Taille de grille en fonction de chaque longueur.	23
Tableau 3.3 : Différents paramètres du système.	25
Tableau3.4 : Les différents paramètres pour simuler le tube.	34

NOMENCLATURE

Symboles	Définitions	Unités
Cp	Chaleur massique	J/KgK
Di	Diamètre intérieur	m
De	Diamètre extérieur	m
h	Coefficient d'échange de chaleur par convection	W/m ² K
L	Longueur	m
T	Température	°C
t	Temps	S
v	Vitesse	m/s
η	Rendement moyen	%
T _{éq}	Température équivalente de l'air	°C
T _{wi}	Température de surface des murs intérieurs	°C
T _{wo}	Température de surface des murs extérieures	°C
Qc	Charge de transmission de refroidissement	J/m ²
Ce	Le coût de l'électricité	DA/kWh

Indices

Indices	Définitions
e	Entrée
s	Sortie

Nombres adimensionnels

Re Nombre de Reynolds

Abréviations

EAHE	Echangeur géothermique air-sol (Earth-Air-Heat-Exchanger)
CFD	Dynamique des Fluides Numérique (Computational Fluid Dynamics)
PVC	Chlorure de polyvinyle

INTRODUCTION GENERALE

Le réchauffement climatique et d'autres problèmes sont devenus une menace majeure pour l'environnement ces dernières années en raison de la consommation mondiale croissante d'énergie électrique, qui augmente continuellement avec l'expansion de la technologie, de la croissance démographique et économique dans diverses parties du monde. En Algérie, les régions sahariennes connaissent une augmentation anormale des températures environnantes, ce qui oblige les climatiseurs traditionnels à travailler dur pour répondre aux besoins de refroidissement des bâtiments pendant l'été. Nous devons renforcer notre utilisation d'énergies renouvelables, dont l'utilisation est presque inexistante en Algérie malgré toutes les mesures prises à cet effet, surtout que la consommation d'énergie par le secteur résidentiel est en constante augmentation, atteignant environ 20%[1], en même temps que les améliorations sociales et les normes de confort thermique élevées. Malgré la promulgation du décret exécutif n 90-2000°du 24avril 2000[2]qui adopte l'utilisation d'isolants thermiques dans les bâtiments et joue un rôle important dans l'amélioration du confort thermique et la réduction de la consommation, rien n'a été mis en œuvre comme d'autres décrets.

Dans cette étude, nous avons donc examiné la technologie de l'échangeur d'air-sol, qui est largement utilisée ces dernières années en tant qu'application d'énergie thermique terrestre, comme solution pour atteindre le confort thermique de manière naturelle, réduisant la consommation électrique d'un certain pourcentage, soulageant la charge sur les climatiseurs traditionnels et économisant des coûts matériels. L'objectif essentiel de cette étude est de proposer un modèle numérique d'un habitat muni d'un échangeur air-sol, afin d'étudier les différents paramètres qui influent sur l'efficacité énergétique de ce type d'échangeur pour des conditions climatique de la région de Ouargla, dont la température des murs face au soleil dépasse facilement 50°C. On a préparé un modèle numérique pour un habitat connecté à un échangeur de chaleur air-sol.

Notre étude est divisée en trois chapitres :

On a abordé dans le premier chapitre la définition du confort thermique et les méthodes pour l'atteindre, ainsi que sa relation avec la consommation d'énergie électrique.

Dans le deuxième chapitre, on a défini l'échangeur de chaleur air-sol, son fonctionnement, puis étudié les différentes techniques existantes pour le refroidissement en utilisant un

Introduction générale

échangeur de chaleur air-sol. On a également présenté un bref aperçu sur des recherches antérieures dans ce domaine.

Dans le troisième chapitre, on a présenté une description des outils de simulation numérique utilisés dans la modélisation, ainsi que la présentation de la géométrie étudiée, des conditions aux limites et des hypothèses proposées. Ensuite, on a examiné les résultats obtenus, analysé les impacts environnementaux et économiques du refroidissement des murs, et enfin terminer cette étude par une conclusion générale.

CHAPITRE I. CONFORT THERMIQUE

I.1. Introduction :

Le confort thermique est un élément clé pour assurer une bonne qualité de vie dans les espaces intérieurs. Dans ce chapitre, nous aborderons la signification du confort thermique et les stratégies pour l'atteindre au niveau des bâtiments, ainsi que sa relation avec la consommation d'électricité.

I. 2. C'est quoi un confort thermique ?

ASHARE précise la définition du confort thermique, Objet de la présente recherche, comme suit : Thermal Comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment and is assessed by subjective evaluation (ANSI/ASHRAE Standard, 2017), c'est la définition la plus reconnue: prévoir un état de satisfaction thermique en hiver et en été. En d'autres termes, pour assurer le confort thermique, il suffit d'assurer une sensation de chaleur en hiver et préserver des surchauffes en été[3].

Cependant, ce sentiment est déterminé par plusieurs facteurs environnementaux qui peuvent influencer le niveau de confort thermique de la personne, ainsi que son bien-être, sa productivité et son efficacité, tels que la température, l'humidité, la vitesse de l'air et le rayonnement solaire, ainsi que la conception du bâtiment et les matériaux utilisés. Par conséquent, les architectes et les ingénieurs doivent adopter différentes méthodes et stratégies pour maintenir un confort thermique optimal.

I.3. Méthodes utilisées pour avoir un confort thermique (secteur bâtiment) :

Il existe plusieurs méthodes pour atteindre le confort thermique dans le secteur du bâtiment voici quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées :

I.3.1. Isolation thermique :

L'opération qui vise à corriger certains endroits exposés aux pertes de chaleurs est appelée "isolation thermique". Alors que, le processus qui consiste à appliquer des techniques et des méthodes pour freiner les déperditions thermiques définitivement, est appelé "isolation thermique". L'objectif essentiel de l'isolation thermique est de conserver à l'intérieur du bâtiment la chaleur en hiver, et la fraîcheur en été. En outre, elle consiste à diminuer la consommation énergétique liée aux différents systèmes de conditionnement d'air[3].

I. 3.2. Systèmes de chauffage et de climatisation :

➤ La climatisation :

Le système de climatisation se trouve dans les bâtiments et les bureaux quelle que soit son orientation. C'est un problème général pour résoudre le problème de l'inconfort estival par l'utilisation de climatiseurs individuels d'un temps de fonctionnement de 10h à 24h car il est principalement utilisé en Juin, Juillet, Août et Septembre mais surtout en Juillet et Août (pratiquement la longueur de la journée) et à des moments de la journée en mai et octobre et les gens ont tendance à utiliser le système de climatisation à tout moment de la journée quand ils sentent une sensation de chaleur .

➤ Dispositifs pour le confort d'été



Fig.1.1. Façade Nord comportant un nombre important de climatiseurs.

Les exigences en matière de climatisation augmentent à mesure que les températures augmentent, ce qui entraîne une augmentation de la facture d'électricité

➤ Le chauffage :

Le système de chauffage existe dans les bâtiments et les bureaux quelle que soit son orientation. C'est un problème général pour résoudre le problème de l'inconfort hivernal en utilisant des radiateurs pendant la période de fonctionnement de 5h à 12h où il est utilisé principalement et spécifiquement en décembre, janvier et février (pratiquement la durée de la journée) et à certains moments en novembre, Mars et Avril et les gens ont tendance à utiliser le système de chauffage à tout moment de la journée quand ils sentent un sentiment de fraîcheur[4].

➤ Dispositifs pour le confort d'hiver



Fig.2.2. Equipements de confort d'hiver.

Le radiateur est utilisé pour chauffer le bâtiment en hiver

I.3.3. La ventilation :

La ventilation d'un bâtiment s'effectue en prélevant de l'air extérieur neuf dans l'environnement du bâtiment et en y rejetant l'air vicié. Cette circulation d'air peut être naturelle, grâce à des ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment, ou mécanique à l'aide de ventilateurs qui assurent un débit d'air contrôlé.

La différence de température extérieure estivale entre le jour et la nuit peut alors être exploitée pour rafraîchir les bâtiments : on peut augmenter alors le débit de ventilation, soit en multipliant les entrées et sorties d'air (ouverture des fenêtres) en ventilation naturelle, soit directement par le contrôle de la ventilation mécanique (vitesse des ventilateurs). On parle alors de ventilation, ou de sur-ventilation, nocturne.

La ventilation naturelle est l'un des moyens les plus simples de contribuer au confort thermique des usagers d'un bâtiment et l'amélioration la performance des bâtiments.

La ventilation est conditionnée par les éléments suivants :

- L'orientation par rapport à la direction du vent.
- La position des ouvertures sur les façades.
- Dimensionner des ouvertures et les dispositifs qui favorisent les écoulements d'air dans les espaces intérieures.
- L'éloignement du bâti par rapport aux obstacles de l'écoulement du vent[5].

I.3.4. L'utilisation de la végétation :

La végétation d'abri est un élément important dans la conception des bâtiments modernes, où les plantes sont cultivées sur les murs et les toits pour apporter une touche naturelle et esthétique au bâtiment. La végétation a plusieurs avantages et une importance environnementale et urbaine. Voici un bref aperçu de l'importance de la végétation dans les abris :

- Quand la végétation autour de Shelter est abondante elle peut réduire chaleur et réduire aussi l'effet des vagues de chaleur.
- Les vignes installées autour la façade réduisent la consommation de l'énergie de -50 à 70% en air conditionné.
- les façades de végétation crient la fraîcheur par des différents processus. Mais les parois vertes ont quelques désavantages :
- les plantes doivent avoir une taille limitée pour éviter que l'installation des canaux soit bouchée par les restes des plantes, et ne pas empêcher la lumière d'arriver aux fenêtres.
- les parois vertes peuvent être aussi colonisées par les invertébrés[6].



Fig.2.3.Plantation complètent la conception de l'édifice[6].

I.4. Confort thermique et consommation d'énergie électrique :

Il est bien connu que fournir le confort thermique adéquat ne nécessite pas une consommation élevée d'énergie électrique, en particulier dans les bâtiments en Algérie qui ne sont pas caractérisés par des normes énergétiques économiques. Les besoins thermiques varient selon les zones géographiques et les conditions climatiques. Après une visite à une entreprise de distribution d'électricité et de gaz dans la wilaya d'Ouargla, nous avons obtenu le graphe suivant pour la consommation d'énergie électrique.

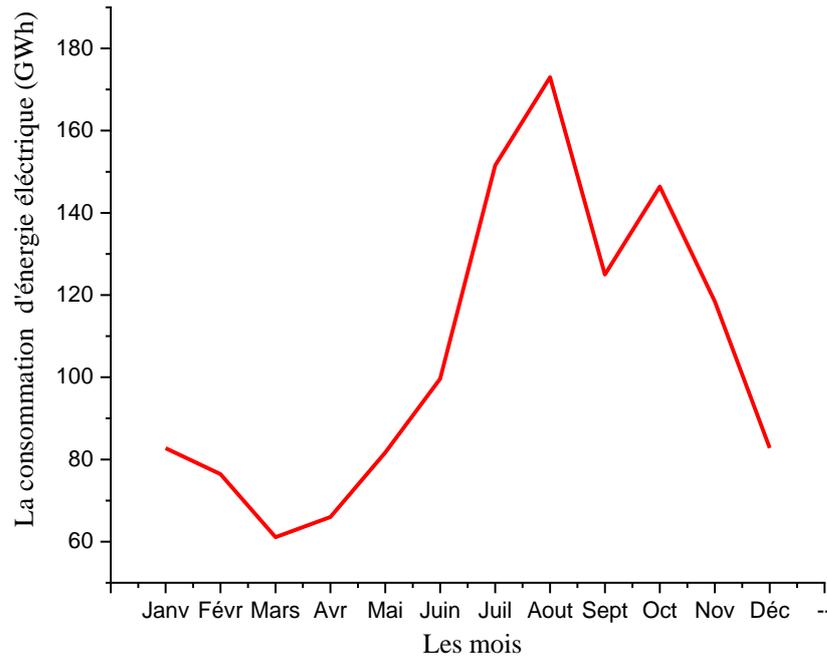


Fig.2.4. La consommation d'énergie électrique du réseau public pour l'année 2022.

La courbe représente les variations de La consommation d'énergie électrique du réseau public tout au long de l'année, montrant que la consommation augmente à la fin de l'hiver pour atteindre son pic en été. C'est la période où l'utilisation de la climatisation et des ventilateurs est la plus fréquente pour faire face aux températures élevées, ce qui pose un défi pour les réseaux électriques en raison de la pression croissante sur les sources d'énergie et les infrastructures de distribution.

I.5. Conclusion :

En conclusion, le confort thermique est un élément essentiel pour le bien-être des personnes dans les environnements intérieurs et dépend de nombreux facteurs différents. Par conséquent, il est nécessaire de se tourner vers des alternatives et d'autres technologies pour fournir des niveaux de confort thermique appropriés, tout en tenant compte des coûts énergétiques et environnementaux qui y sont associés.

CHAPITRE II. LES ÉCHANGEURS AIR SOL

II.1. Introduction :

Le système de climatisation est essentiel pour assurer le confort thermique dans les bâtiments et les espaces intérieurs. Les échanges de chaleur font partie des systèmes les plus courants qui transfèrent l'énergie thermique d'un milieu à un autre. Par conséquent, l'échangeur air-sol (earth air heat exchanger "EAHE") constitue une alternative intéressante aux systèmes de climatisation traditionnels qui consomment beaucoup d'énergie. Dans ce chapitre, nous le définirons et verrons les différentes technologies disponibles pour le refroidissement avec cet échangeur, ainsi que quelques travaux liés à celui-ci.

II.2. Définition de l'échangeur air-sol :

Un échangeur air sol est un système qui utilise le sous-sol comme une source d'énergie et l'air comme un moyen d'échange de la chaleur. La conception d'un tube enterré (échangeur air sol) implique l'utilisation d'un tube en métal ou en PVC enterré à une profondeur de 1 à 4 m[7].

L'air peut extraire l'énergie thermique du sol au cours de son trajet dans le tube enterré pour le refroidissement des espaces, locaux et bâtiments pendant l'été. Lorsque l'air entrant au local est prélevé de l'extérieur et circule dans les tubes, le système dit 'système à boucle ouverte', par contre, lorsque l'air intérieur est prélevé du local lui-même à travers des tubes, le système est connu sous le nom 'Système à boucle fermée'[8].

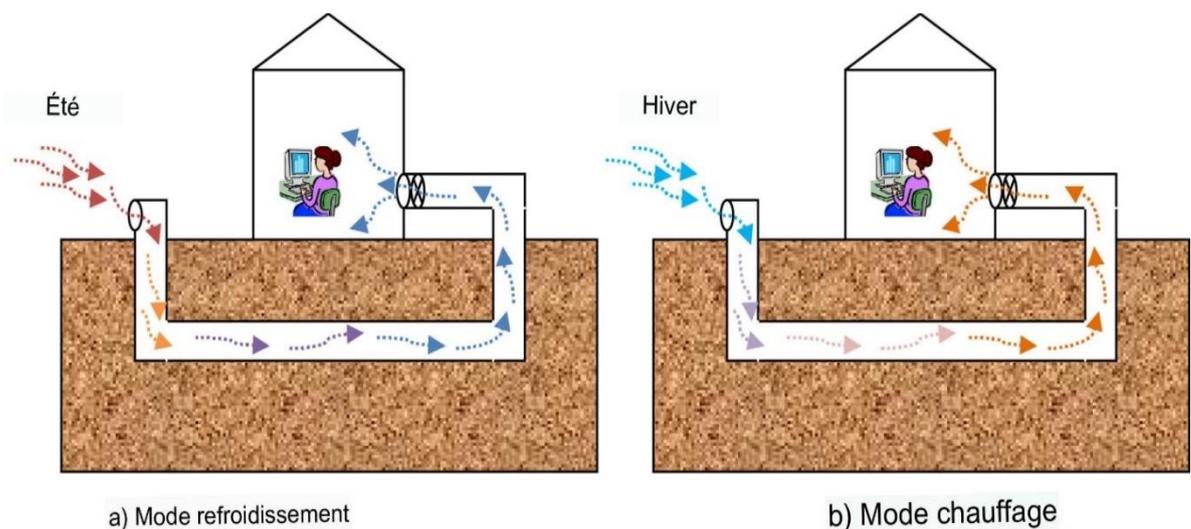


Fig.2.1.Principe de fonctionnement d'un échangeur air-sol[9].

2.3. Différentes technologies existantes pour le refroidissement par échangeur air-sol :

Le système d'échangeur air sol peut fonctionner de manière autonome ou hybride en se connectant à des systèmes actifs ou passifs tels que :

✚ EAHE couplé avec des climatiseurs :

Le système EAHE peut être couplé avec le condenseur d'un climatiseur résidentiel traditionnel (qui fonctionne selon les principes de la compression de vapeur) pour améliorer les performances de refroidissement pendant les conditions météorologiques chaudes, en réduisant la température du condenseur. La réduction de la température du condenseur augmente la capacité de refroidissement du cycle en raison de l'augmentation du contenu liquide dans l'évaporateur et réduit la pression à travers le compresseur, ce qui entraîne une réduction de la consommation d'énergie[10].

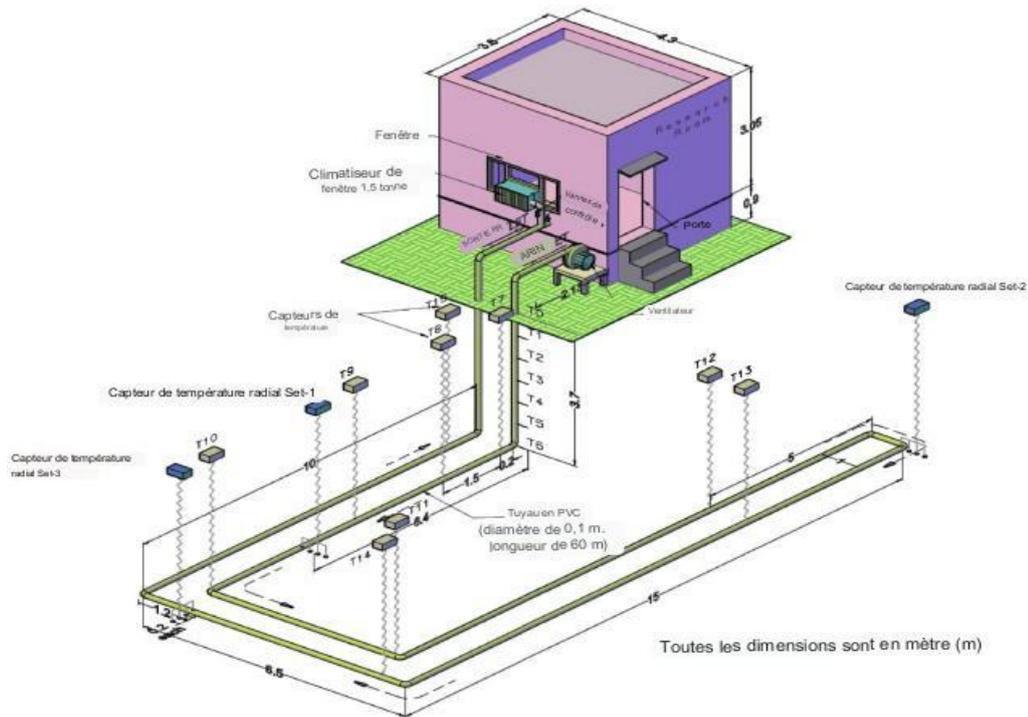


Fig.2.2. Schéma du système hybride EAHE[10].

✚ EAHE couplée avec des systèmes photovoltaïques autonomes ou intégrés aux bâtiments :

Les panneaux solaires photovoltaïques sont refroidis en faisant circuler l'air ambiant chaud (pendant la saison estivale) à travers un tube EAHE, puis en le faisant passer au-dessus de la surface arrière du panneau. Ce processus permet de réduire la température des cellules photovoltaïques, ce qui entraîne une amélioration de l'efficacité de conversion électrique et de la puissance de sortie des panneaux solaires photovoltaïques[11].



Fig.2.3. Photographie de la configuration expérimentale[11].

✚ EAHE couplé avec des cheminées solaires :

La cheminée solaire est une stratégie de ventilation et de refroidissement naturelle visant à améliorer le confort thermique dans les bâtiments. Cette stratégie utilise la charge thermique de l'air chauffé par l'énergie solaire pour renouveler l'air à l'intérieur des canaux. Le système EAHE (Échangeur d'Air Terre-Air) peut également être utilisé pour extraire l'air à travers l'aspiration à la base des cheminées, assurant ainsi une ventilation et un refroidissement efficaces de l'espace intérieur. Dans les climats chauds, les systèmes hybrides EAHE/SC peuvent être utilisés pour améliorer la ventilation et la climatisation pendant la journée. En hiver, les cheminées solaires peuvent être connectées à des tuyaux enfouis pour profiter des échanges thermiques avec le sol et chauffer l'air qui est ventilé dans le bâtiment de manière efficace[12].

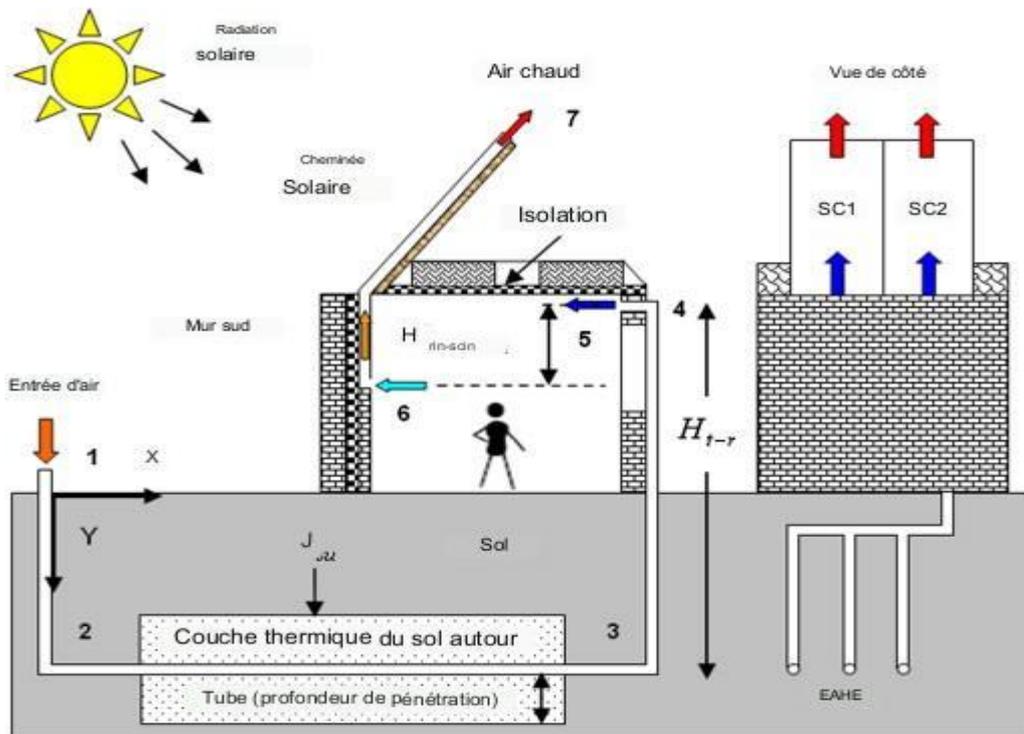


Fig.2.4. Diagramme schématisé de l'échangeur de chaleur air-sol et de la cheminée solaire[12].

✚ EAHE couplé avec des pompes à chaleur air-air :

Le système de pompe à chaleur (PAC) traditionnel utilise directement l'air de retour des espaces climatisés (c'est-à-dire les températures de la pièce), tandis que la PAC avec un système EAHE en boucle fermée utilise l'air de retour circulant introduit par le tube EAHE, cet air peut être plus frais que les températures de la pièce en été. Cette caractéristique permet aux systèmes de PAC équipés d'unités EAHE de consommer moins d'énergie du compresseur pour le refroidissement que les systèmes de PAC traditionnels, car les systèmes de PAC avec des unités EAHE utilisent de l'air pré-refroidi. Ainsi, une baisse des températures du sol peut entraîner des économies d'énergie plus importantes pour le refroidissement[13].

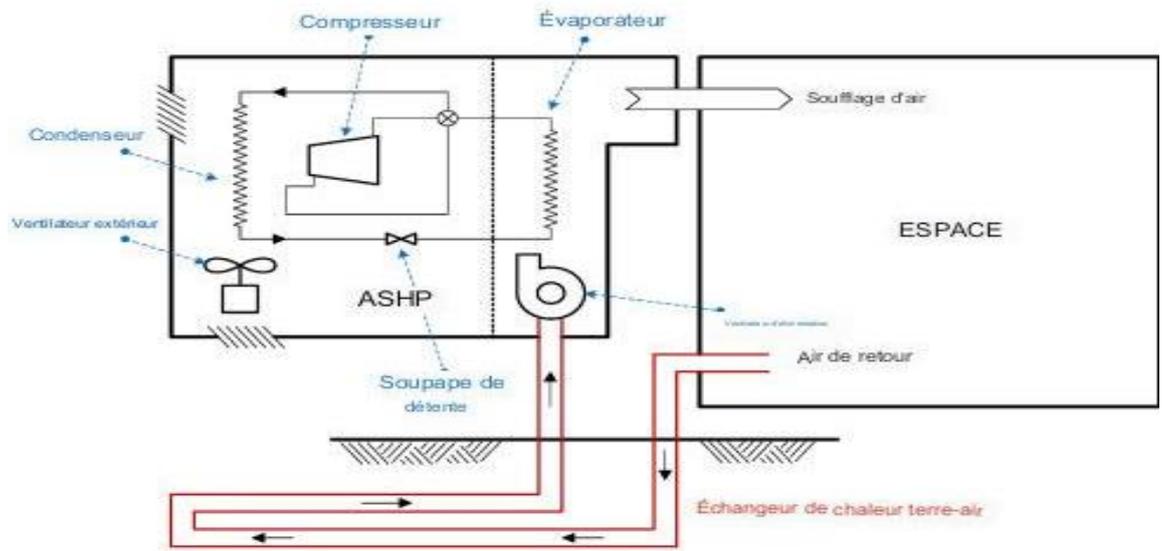


Fig.2.5. Diagramme schématique d'un système de pompe à chaleur air-air avec EAHE[13].

2.4. Revue des travaux de recherche :

Bansal et al [14] ils ont développé un modèle transitoire et implicite basé sur la dynamique numérique des fluides pour prédire la performance thermique et la capacité de chauffage des systèmes d'échange thermique dans les canaux d'air terrestres (EPAHE). Ce modèle a été créé dans le logiciel de simulation FLUENT et validé à partir d'études expérimentales menées, car les résultats de la simulation sont conformes aux données empiriques. L'impact des paramètres de fonctionnement, tels que le matériau des canalisations et la vitesse de l'air, sur les performances thermiques des systèmes d'échange thermique entre les canalisations souterraines et l'air a été étudié. Le système EPAHE étudié mesure 23,42 mètres de long et permet de chauffer de 4,1 à 4,8 degrés Celsius pour des débits de 2 à 5 mètres par seconde. Des études sur les tubes en acier et le PVC ont montré que les performances du système EPAHE ne sont pas significativement affectées par les matériaux enfouis. En outre, il a été observé que la vitesse de l'air dans le tube a un impact significatif sur les performances du système EPAHE.

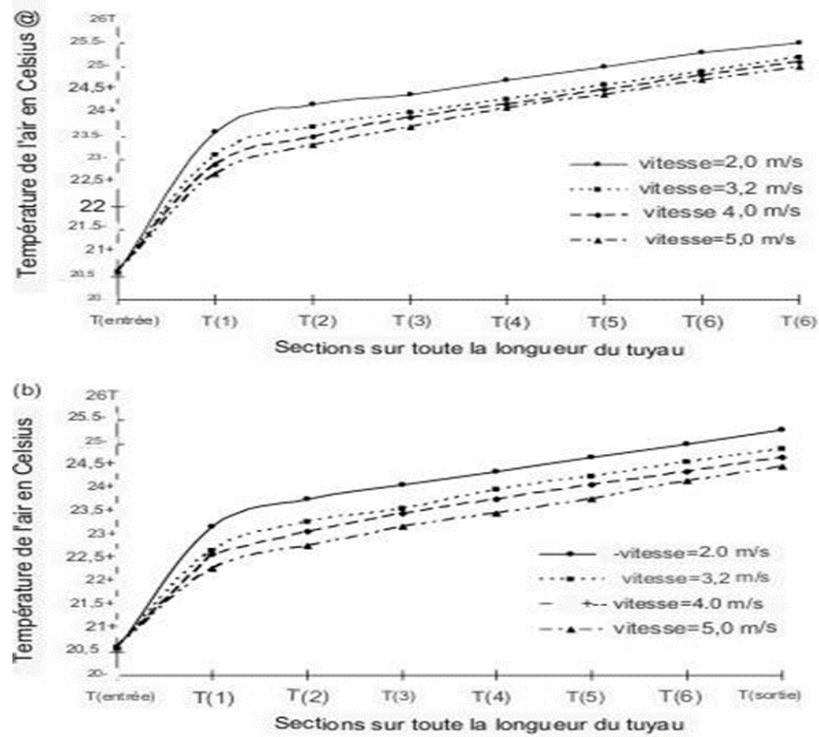


Fig.2.6. Température simulée le long de la longueur du tube pour différentes vitesses de sortie pour (a) un tube en acier et (b) un tuyau en PVC[14].

Le graphique montre les différences de température le long du tuyau pour différentes vitesses, avec une légère différence de température à la sortie entre le tuyau en acier et le tuyau en PVC. De plus, une baisse de température se produit à la sortie du tuyau en raison de l'augmentation de la vitesse de l'air de 2 à 5 mètres par seconde. Ainsi, la hausse de température est plus faible à une vitesse de 5 mètres par seconde. On peut observer que la hausse maximale de température se produit à une vitesse de 2 mètres par seconde, que ce soit pour un tuyau en PVC ou en acier. Par conséquent, on peut dire que les performances du système EPAHE ne sont pas affectées par les matériaux des tuyaux enterrés, ce qui permet d'utiliser des tuyaux fabriqués à partir de matériaux peu coûteux.

H.Ali et al [15] Ils ont proposé un modèle MATLAB/Simulink qui permet une prévision précise de la distribution de la température du sol et une conception efficace des échanges air-sol. Quatre modèles EAHE sont évalués dans ce modèle : une ligne, plusieurs lignes, plusieurs lignes individuelles et des lignes individuelles torsadées.

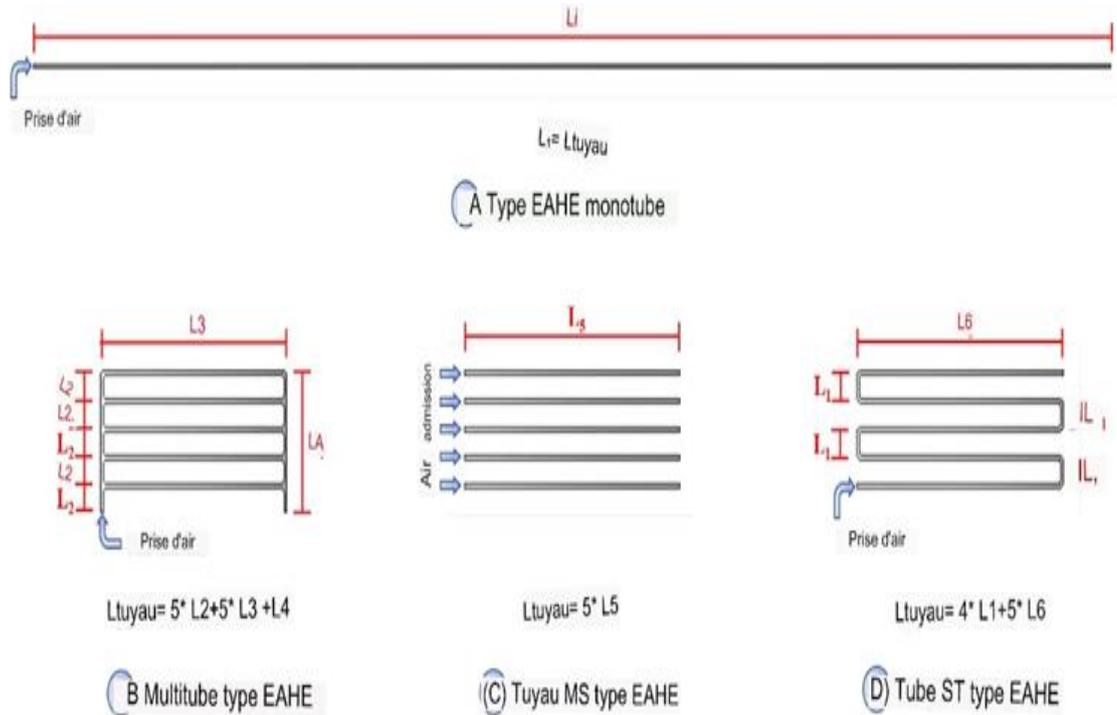


Fig.2.7. Les quatre configurations d'échangeurs de chaleur utilisées[15]

L'illustration présente les quatre configurations qui composent l'échangeur de chaleur air-sol. Tous ces types sont fabriqués à partir du même matériau de tuyau, à savoir le PVC. Leur longueur totale est de 65 mètres par type, avec un diamètre de 0,148 mètres. Le premier type est constitué d'un seul tube s'étendant horizontalement dans une seule direction ("Type A"). Le deuxième type se compose d'un ensemble de tubes (cinq branches) reliés entre eux par des tubes principaux du même diamètre pour former un échangeur de chaleur multiple de type U avec un angle de connexion de 90 degrés (voir "Type B"). Le troisième type est constitué d'une autre configuration de tuyau, où il comprend plusieurs tubes (cinq tubes), mais ils sont séparés les uns des autres, contrairement au troisième type où les tubes sont connectés les uns aux autres, et on peut les appeler "tubes multiples simples" (voir "Type C"). Le quatrième type se compose d'un seul tube, mais il diffère du premier type car il est tordu pour économiser de l'espace, tout comme les tubes multiples, et il est appelé "tube torsadé unique" (voir "Type D").

Tableau 2.1 :Logiciels et outils pour modèles d'échangeurs de chaleur air-sol[16].

Software	Usage commercial	Caractéristiques
Energy Plus	Utilisé pour le rapport complet de bilan thermique d'un bâtiment.	Il développe un algorithme pour la température du sol et la charge thermique d'un bâtiment dans un programme de simulation d'EAHE.
TRNSYS	Outil de simulation transitoire pour simulation de la température du sol.	Il prédit la performance thermique du système d'échangeur de chaleur air-sol.
L-EWTSIM	Outil de design et de simulation développé par DLR Köln.	Les résultats des orties donnent le profil de température à l'intérieur du tube, l'évolution de la température et les performances thermiques.
GAEA	Outil de conception développé par l'Université de Siegen à des fins commerciales.	Résultats de sortie : Tendances de la température, temps de fonctionnement EAHE, Performance énergétique pour l'été et l'hiver, la période de récupération.
FLUENT	Il est l'un des exemples de logiciel utilisé pour la simulation CFD de EAHE.	Le modèle de transfert de chaleur d'un système EAHE a été simulé en considérant un écoulement turbulent transitoire tridimensionnel.
WKM(Wider stands-Kapazitäten-Model)	Il s'agit d'un modèle de calcul pour la simulation du mode échangeurs de chaleur sol-air.	Ce logiciel de simulation crée une simulation annuelle du système rond avec récupération de chaleur et dérivation.
COMSOL	C'est un logiciel de simulation de l'écoulement ainsi que pour l'analyse thermique	Ce logiciel est capable de simuler les mécanismes de transfert de chaleur, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement.

II.5. Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, et en fonction de ce que nous avons présenté, on peut considérer que l'échangeur d'air géothermique est un moyen efficace et fiable pour assurer le refroidissement des bâtiments sans impact négatif sur l'environnement, tout en réduisant la consommation d'énergie et son impact environnemental. Pour tirer pleinement parti de cette technologie, il est nécessaire d'avoir une conception précise et une exécution professionnelle pour garantir le bon fonctionnement du système avec efficacité et durabilité.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous vous présenterons le programme qui nous aidera dans le calcul et la méthode de travail, Nous montrerons exposer les cas étudié et présenter le processus de simulation par Ansys Fluent.R1,2019 et de mettre l'accent sur les modèles énergétique en montrant et justifiant le choix du modèle qui a été utilisé dans notre étude. Ensuite, on va vous exposer les résultats obtenus et aussi déterminer la configuration qui nous aide à résoudre le problème.

III.2. Modélisation mathématique :

Le transfert de chaleur et les écoulements dans le présent travail sont tridimensionnels. L'écoulement du fluide supposé Newtonien et incompressible est turbulent. Le modèle physique est transformé en modèle mathématique en utilisant des équations qui traduisent le transport de la masse, la quantité de mouvement et l'énergie, présentées ci-après. Les propriétés du fluide sont supposées constantes.

➤ **Equation de continuité :**

L'équation de continuité basée sur le principe de la conservation de la masse est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (3.1)$$

Où $i = 1, 2, 3$

Donc :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho U_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\rho U_2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho U_3) = 0 \quad (3.2)$$

$$X_1 = X, \quad U_1 = U$$

$$X_2 = y, \quad U_2 = V$$

$$X_3 = z, \quad U_3 = w$$

➤ **Equation de quantité de mouvement :**

Les équations de quantité de mouvement sont le résultat de l'application de la deuxième loi de dynamique (2^{ème} loi de Newton) appliquée à une particule en mouvement pour un fluide Newtonien visqueux elles sont données par :

$$\rho \frac{\partial U_j}{\partial t} + U_i \rho \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i^2} \right) \quad (3.3)$$

j et i varient de 1 à 3

μ : Viscosité dynamique

P : pression

Après développement on aura :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (3.3.a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (3.3.b)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \quad (3.3.c)$$

➤ **Equation d'énergie :**

L'équation d'énergie traduit le premier principe de la thermodynamique. Pour un fluide Newtonien à chaleur massique constante et en négligeant la fonction de dissipation visqueuse, on peut aboutir à l'équation de l'énergie suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{K}{Cp} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \right] \quad (3.4)$$

Où

K : conductivité thermique

Cp : chaleur spécifique à pression constante

$a = \frac{1}{\rho} \frac{K}{Cp}$: représente la diffusivité thermique

Alors après développement on aura :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x_i} + V \frac{\partial T}{\partial x_i} + W \frac{\partial T}{\partial x_i} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.5)$$

➤ **Modélisation de la turbulence**

Il existe plusieurs modèles de turbulence dans le logiciel ANSYS FLUENT se distinguant par leur degré de complexité. On a choisi d'utiliser le modèle $K-\varepsilon$ à cause de sa simplicité et sa précision. Il donne de bons résultats pour des géométries complexes et en 3D. Ce modèle se caractérise par sa grande stabilité.

➤ **Le modèle $K-\varepsilon$:**

Le modèle $K-\varepsilon$ est un des modèles les plus utilisés pour la modélisation de la turbulence. L'un de ses avantages principaux est son universalité, car il a été appliqué avec succès à un grand nombre d'écoulements de différentes situations.

k est modélisé par l'équation :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_k} + \frac{\mu_t}{\sigma_{k,t}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon \quad (3.6)$$

Où G est la production de k par le mouvement moyen, elle s'exprime sous la forme :

$$G = \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.7)$$

La dissipation de k dénoté par ε est modélisé par :

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon,t}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon,1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_{\varepsilon,2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.8)$$

Tableau3.1: Les constantes qui se trouvent dans les équations ci-dessus[17]

C_μ	$C_{\varepsilon,1}$	$C_{\varepsilon,2}$	σ_k	$\sigma_{k,t}$	σ_ε	$\sigma_{\varepsilon,t}$
0.09	1.44	1.92	1	1	1	1.3

III.3. Résolution numérique :

Les trois grandes méthodes numériques utilisées dans les codes tridimensionnels sont les volumes finis, les différences finis et les éléments finis. La méthode des volumes finis, choisie par le logiciel Workbench ANSYS 19.0 est largement décrite par plusieurs chercheurs en 1980 consistent à discrétiser le domaine de l'écoulement en (une multitude de volumes de contrôle (cellules) puis d'effectuer des bilans (de masse, de quantité de mouvement ...) sur ces petits volumes. Pour cette raison, la formulation fait apparaître des intégrales triples de volume. L'avantage déterminant des volumes finis par rapport aux autres méthodes est qu'ils sont conservatifs, en bref, tout ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans un autre (Buil, 1999).

III.4. Présentation du logiciel de simulation « ANSYS FLUENT » ANSYS FLUENT :

Est un logiciel de simulation CFD qui permet de modéliser l'écoulement du fluide, le transfert de chaleur, et les réactions chimiques dans des géométries complexes. Ce programme est écrit dans le langage C de programmation et permet d'utiliser pleinement la flexibilité et la puissance offerte par cette langue. ANSYS FLUENT utilise une architecture client / serveur, ce qui lui permet d'exécuter des processus simultanés distinctes sur plusieurs postes de travail client et serveurs de calcul puissants. Cette architecture est essentielle pour une exécution efficace, un contrôle interactif, et une flexibilité totale entre les différents types de machines ou de systèmes d'exploitation[18].



Fig.3.1. Ansys fluent.

III.5. Les processus de la simulation :

L'objectif principal de cette étude est de proposer un modèle numérique pour un habitat associé à un échangeur air-sol. En se basant sur les conditions climatiques de la région de Ouargla. Comme vous le savez, les performances de l'échangeur de chaleur air-sol est régi par une série de variables interconnectées telles que le matériau, la longueur, le diamètre et la configuration des tubes ; la profondeur des tubes sous le niveau du sol ; les conditions du sol en surface et en profondeur ; la température de l'air ambiant et le rayonnement solaire en surface ; le débit d'air, les vitesses, les caractéristiques des ventilateurs et les horaires de fonctionnement. Toutes ces variables nécessitent plus de temps et d'efforts pour obtenir des résultats précis. C'est pourquoi nous avons choisi de simuler trois paramètres fondamentaux qui influent sur la surface d'échange disponible et contribuent à améliorer les performances : la longueur, la conception des tubes et la vitesse de l'air pour choisir le modèle approprié.

III.5.1. Création de la géométrie :

Étant donné que la longueur est l'un des facteurs importants dans la conception et l'efficacité de l'échangeur de chaleur, nous avons choisi quatre longueurs, à savoir 28 m, 56 m, 70 m et 84 m, à des fins de test. Des modèles en trois dimensions seront créés pour représenter la géométrie de l'échangeur, à la fois pour les domaines solides et fluides, à l'aide de l'outil de modélisation de conception d'unité le module de création géométrique (Design Modeler).

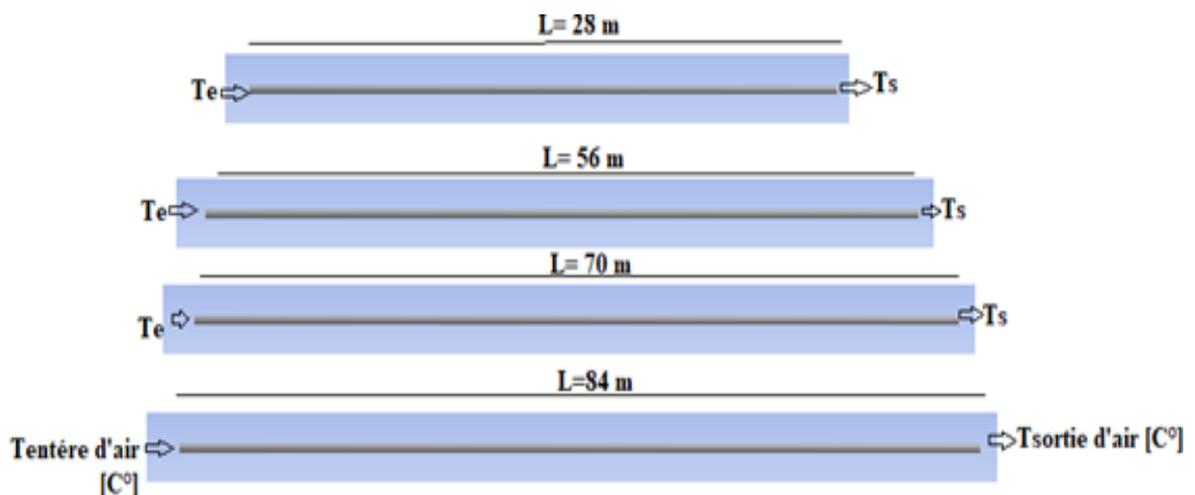


Fig.3.2. Les longueurs choisies de l'échangeur air-sol.

III.5.2. Maillage :

Après avoir achevé la géométrie, le domaine de simulation a été divisé en une grille tridimensionnelle. Des cellules structurées ont été utilisées pour capturer les détails des écoulements de fluide et des réactions thermiques. Comme on a un fluide qui circule, on doit choisir CFD comme physique de préférence.

Tableau3.2 : Taille de grille en fonction de chaque longueur et temps de simulation

La longueur	Taille de grille	Nodes	Elément	Temps de simulation.
28 L=	0.01	609016	478862	10
56 L=	0.01	963994	7243323	13
70 L=	0.01	1186820	889954	16
84 L=	0.01	1387694	1043620	20

La différence dans le temps de simulation est principalement due à l'augmentation de la longueur, ce qui à son tour augmente les caractéristiques (les nodes et les éléments) de la grille.

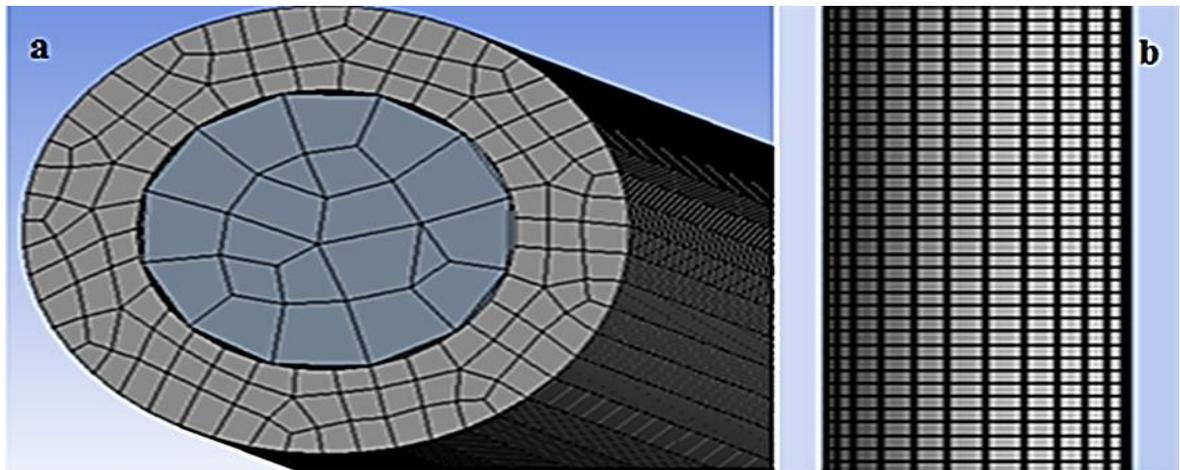


Fig.3.3. Section transversale (a) Section longitudinale (b) du maillage du tube.

III.5.3. Paramétrage des données des calculs :

III.5.3.1. Les hypothèses et les conditions aux limites :

- ❖ Le sol est considéré comme un milieu homogène.
- ❖ Les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique sol, la masse volumique et la capacité calorifique massique) du sol sont invariables.
- ❖ La température du tube est égale à la température du sol $T_{sol} = T_{tube}$.
- ❖ L'échange thermique se fait en régime instationnaire.
- ❖ Système est à boucle ouvert.
- ❖ La position de l'échangeur d'air- sol sera du côté est de l'habitat.

Tableau3.3 : Différents paramètres du système.

Propriétés	Valeurs
Diamètre du tube intérieur (m)[19]	0.16
Profondeur du tube (m)[19]	2.5
Vitesse d'air (m/s)[20]	2
Température de sol en été (°C)[19]	23°C
Conductivité thermique d'air (W/m. °C)	0.0242
La chaleur spécifique d'air (J/kg. °C)	1006.43
Densité d'air (kg/m ³)	1.225
Viscosité dynamique de l'air (kg/m.s)	1.7894.10 ⁻⁵
Conductivité thermique du PVC (W/m.°C)[21]	0.16
Chaleur spécifique du PVC (J/kg. °C)[21]	900
Densité du PVC (kg/m ³) [21]	1380

Le modèle de turbulence k-epsilon a été choisi pour calculer les effets des écoulements turbulents après avoir calculé le nombre de Reynolds comme suit :

$$R = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1.225 \cdot 2 \cdot 0.16}{1.7894 \cdot 10^{-5}} = 21906 > 4000 \quad (3.1)$$

La méthode SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) a été utilisée pour résoudre les équations de pression, de vitesse et d'énergie. Cette méthode est

largement utilisée pour les simulations numériques en mécanique des fluides. Elle se base sur une approche itérative pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Dans cette étude, un schéma de convergence de deuxième ordre a été appliqué à toutes les étapes de la simulation. Cela signifie que les calculs ont été effectués en utilisant des valeurs de variables mises à jour à chaque itération, afin de garantir une meilleure précision et une convergence plus rapide.

Étant donné que l'écoulement est transitoire, des intervalles de temps de 3600 secondes ont été choisis pour une durée totale de simulation de 24 heures. Pendant chaque intervalle de temps, le système d'équations a été résolu à l'aide de la méthode SIMPLE. Un maximum de 1000 itérations a été défini pour chaque intervalle de temps, ce qui permet d'obtenir une solution précise et stable.

Le critère de convergence pour toutes les variables a été fixé à 10^{-3} , sauf pour l'énergie qui a été fixée à 10^{-6} .

➤ **La température de l'air à l'entrée de l'échangeur enterré :**

Le calcul de la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur d'air-sol dépendra des modes de transfert de chaleur environnants et dans l'habitat, selon les équations suivantes :

Flux de chaleur à la surface intérieure du mur multicouche (W/m^2) :

$$q_i = h_i(T_{wi} - T_i) \quad (3.2)$$

Flux de chaleur à la surface extérieure du mur multicouche (W/m^2) :

$$q_o = h_o(T_e(t) - T_{wo}) \quad (3.3)$$

T_{wi} et T_{wo} représentent respectivement la température de surface des murs intérieurs et extérieurs, T_i représente la température de l'air intérieur et $T_e(t)$ est la température de l'air auprès des parois ensoleillées, donnée par :

$$T_e(t) = T_o(t) + \frac{\alpha IT(t)}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (3.4)$$

Où $T_o(t)$ est la température de l'air extérieur en fonction du temps, α est l'absorptivité solaire égale à 0,8, $IT(t)$ est le rayonnement solaire total en fonction du temps et $\varepsilon \Delta R$ est le facteur de correction, allant de 0 °C pour les murs verticaux à 4 °C pour les murs horizontaux (Manuel 2009).

Dans cette étude, la température et le rayonnement solaire d'une journée type (21 Juillet) sont utilisés comme conditions à la limite extérieure [22].

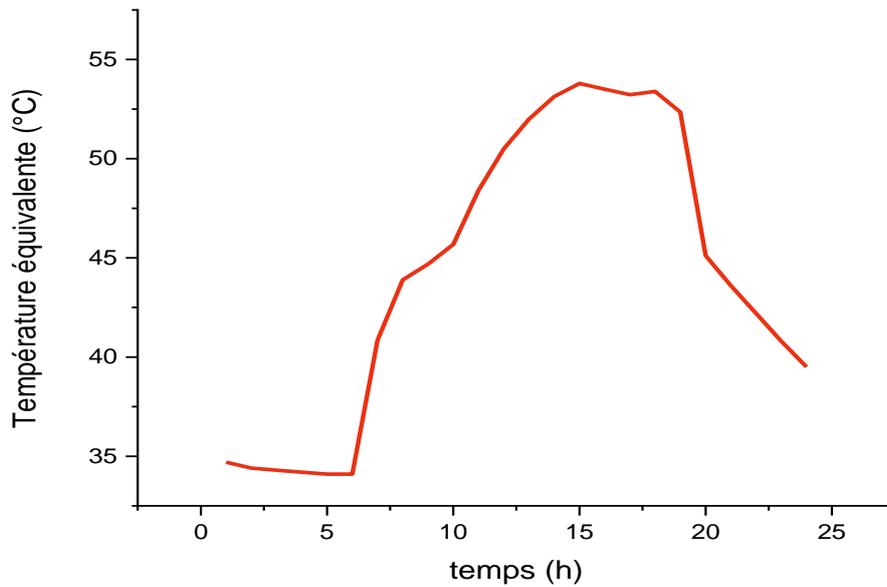


Fig.3.4. Les variations de température équivalente de l'air à l'entrée au cours des 24 heures.

➤ **Efficacité de l'échangeur enterré :**

L'efficacité décrit le rendement de l'échangeur enterré d'une longueur bien définie, dépend de la température de l'air à l'entrée de l'échangeur à une certaine distance parcourue depuis son introduction et de la température du sol, son expression est désignée par le rapport suivant[23] :

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{air sortie}} - T_{\text{air entrée}}}{T_{\text{sol}} - T_{\text{air entrée}}} \quad (3.5)$$

➤ **Le rendement moyen de l'échangeur enterré :**

$$\eta = \frac{100 \times \sum_{1}^{24} \varepsilon}{24} \quad (3.6)$$

➤ **L'effet de la longueur :**

Les figures 3.5 jusqu'à 3.9 représentent les isothermes de l'échangeur air-sol pour différentes longueurs. On voit clairement que l'air qui entre à l'échangeur avec une température élevée, se refroidit à la sortie de l'échangeur.

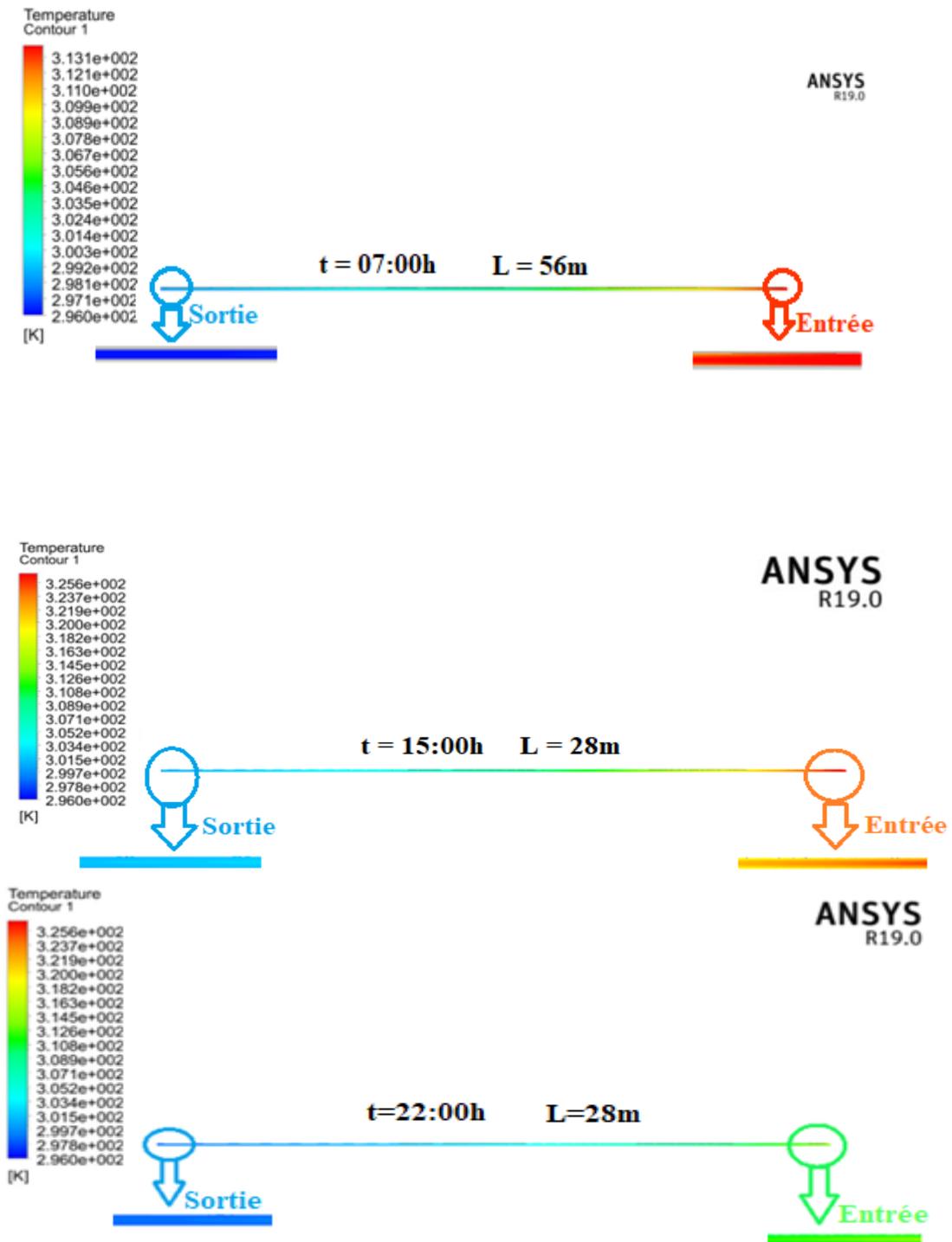


Fig.3.5. Contours de température pour une longueur de 28m en trois heures différent durant la journée.

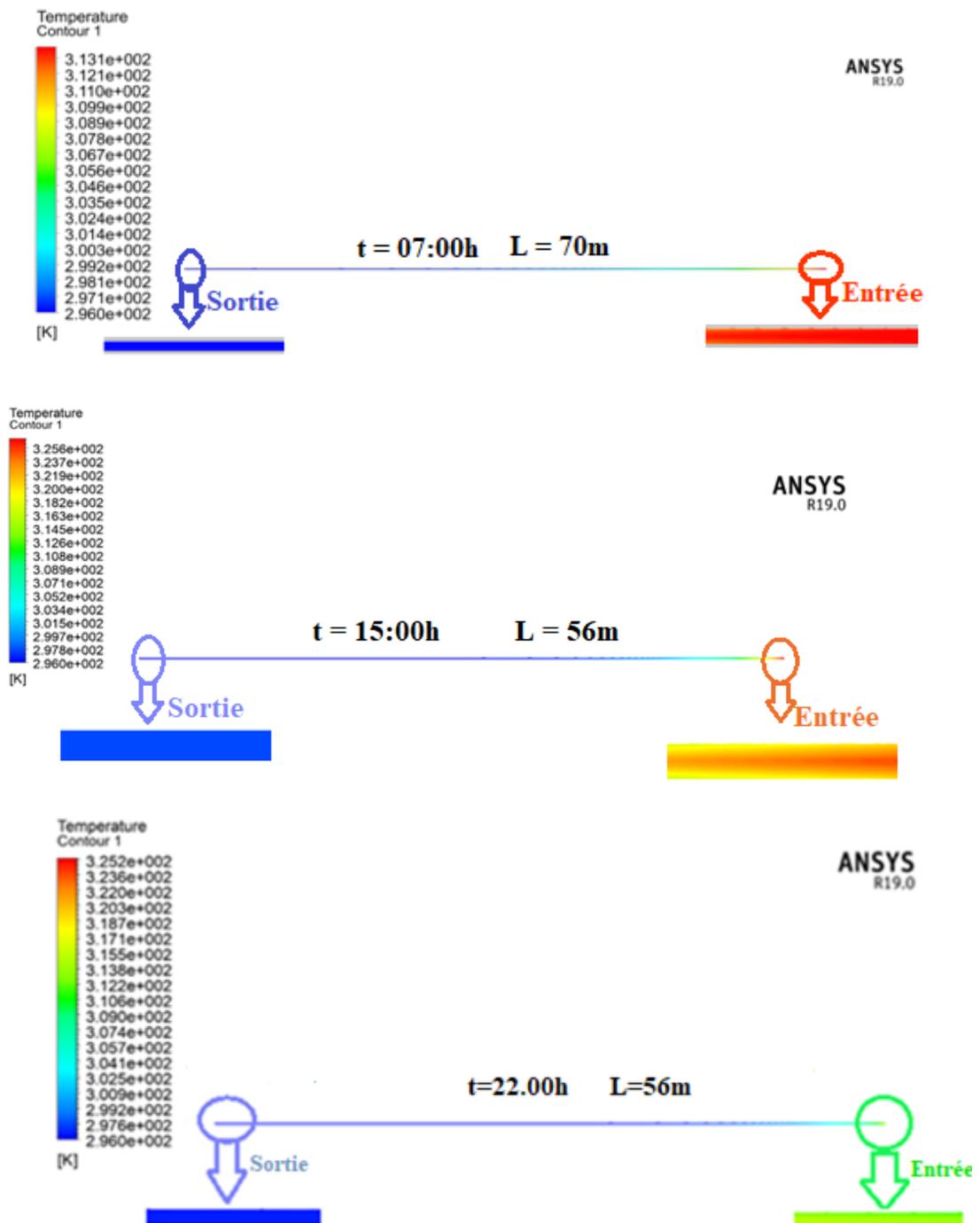


Fig.3.6. Contours de température pour une longueur de 56m en trois heures différent durant la journée.

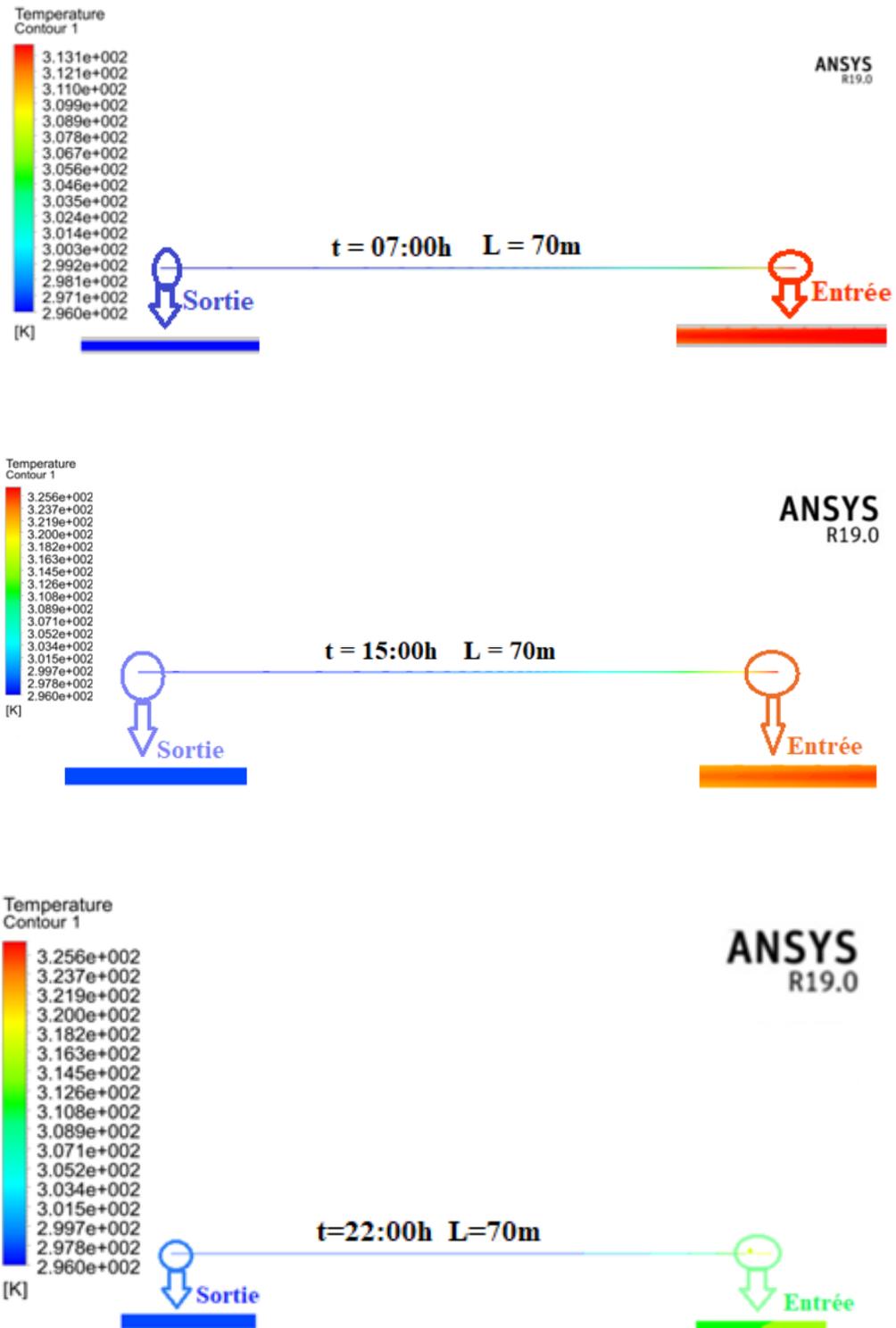


Fig.3.7. Contours de température pour une longueur de 70m en trois heures différent durant la journée.

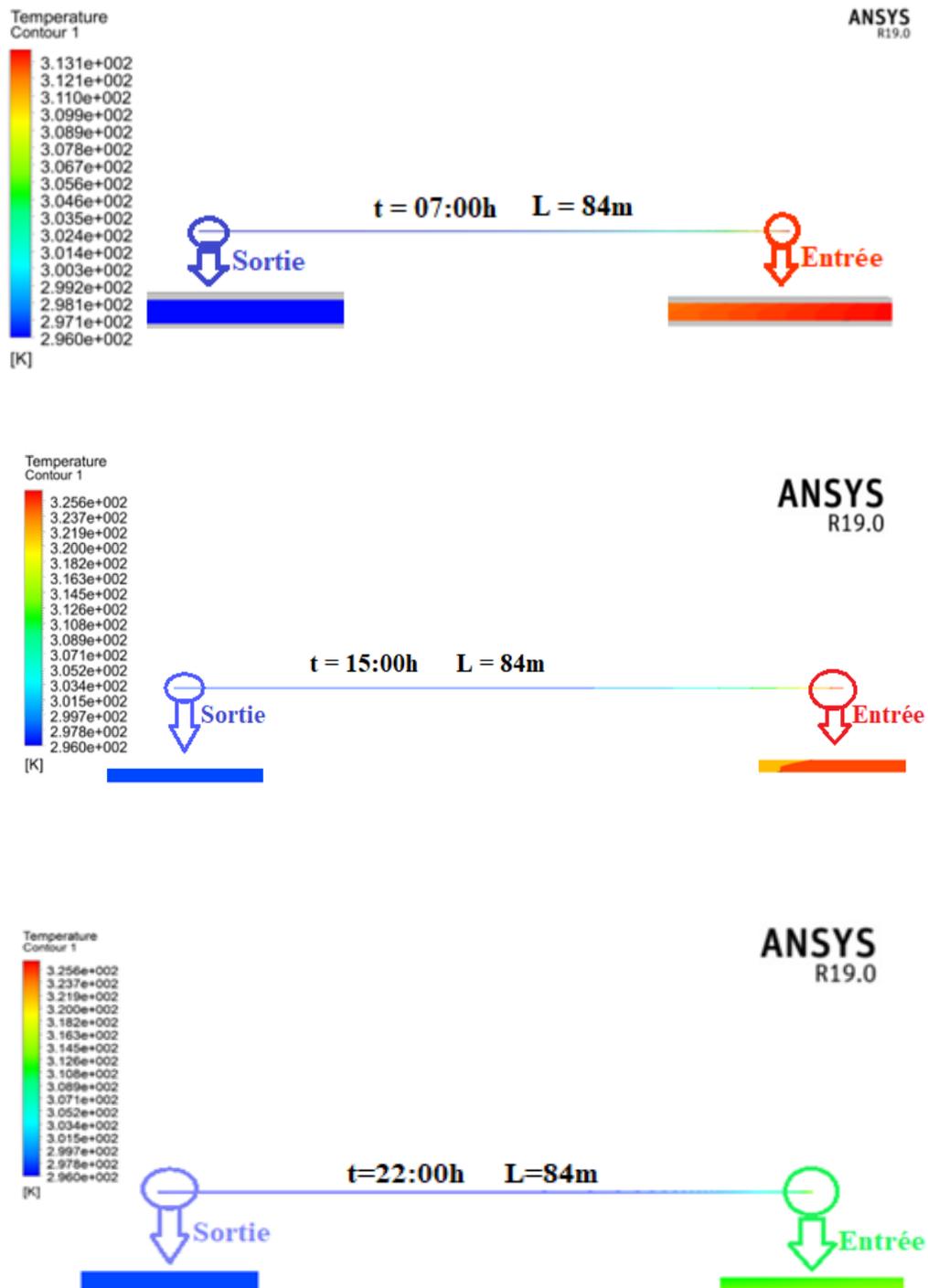


Fig.3.8. Contours de température pour une longueur de 84 m en trois heures différent durant la journée.

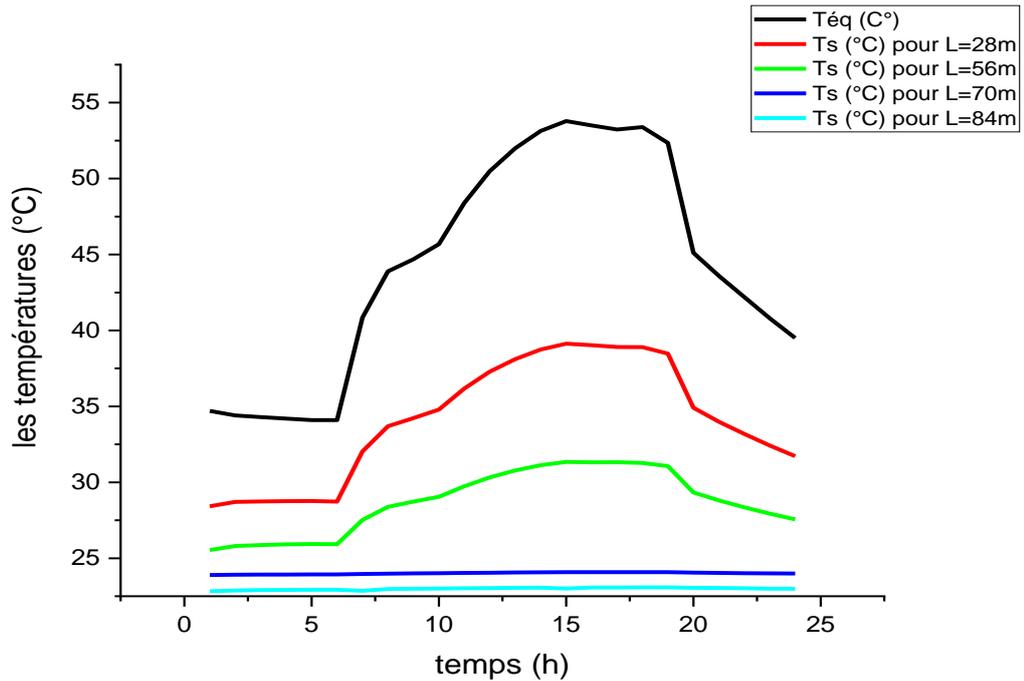


Fig.3.9. Les variations des températures à l'entrée (T_{éq}) et à la sortie (T_s) pour les longueurs utilisées pendant 24h.

La courbe représente les variations de température à l'entrée et à la sortie pour les longueurs utilisées au cours de 24 heures. À environ 07 :00h du matin, on observe que la température de l'air à l'entrée était de 40,85 degrés Celsius, tandis que les températures de l'air à la sortie pour chaque longueur (28m, 56m, 70m, 84m) ont diminué pour atteindre respectivement 32°C, 27°C, 23°C et 22 °C.

Après 8 heures, soit vers 15 :00h, la température de l'air à l'entrée a atteint son maximum à 53,79 degrés Celsius, ce qui a entraîné une augmentation des températures de l'air à la sortie pour chaque longueur 39°C, 31°C, 24°C, 23°C.

Après 7 heures supplémentaires, soit vers 22:00h, la température de l'air était de 40,8 degrés Celsius à l'entrée, tandis que les températures de l'air à la sortie pour chaque longueur étaient respectivement de 23°C, 24°C, 27°C et 32°C.

Nous pouvons donc conclure que plus la longueur du tuyau est grande, plus la différence de température entre l'entrée et la sortie est grande, ce qui permet un échange de chaleur significatif entre l'air et le sol. Le contraire se produit lorsque la longueur du tuyau est petite.

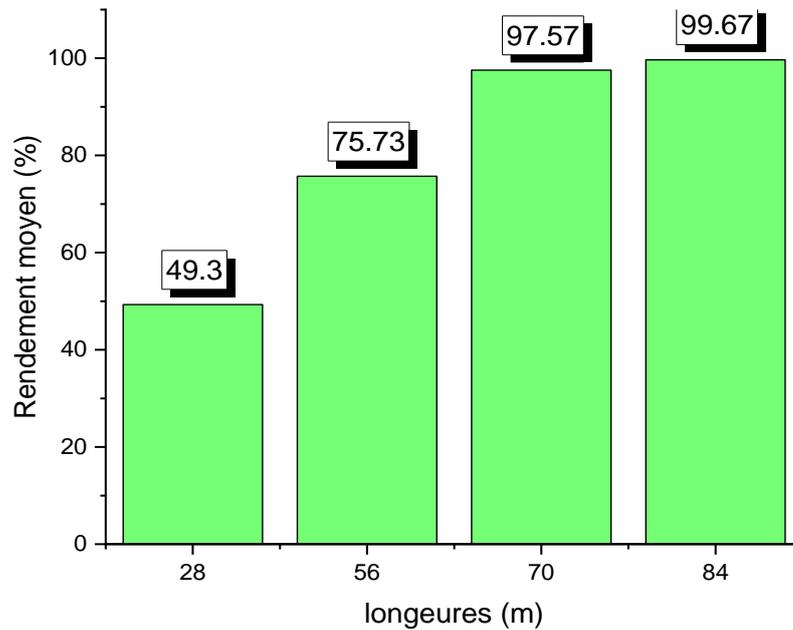


Fig3.10. La performance de l'échangeur air-sol en fonction des longueurs utilisées.

Les colonnes représentent les variations de le rendement moyenne du système pour les longueurs de tube sélectionnées (28 m, 56 m, 70 m, 84 m). On remarque que le rendement la plus élevée a été obtenue lors de l'utilisation d'un tube de 84 m, où le rendement était de 99,67 %. En revanche, le tube de 28 m était moins efficace de 49,3 %. Par conséquent, cela indique que les tubes plus longs contribuent à accroître l'échange de chaleur entre l'air et le sol, améliorant ainsi la capacité de refroidissement du système. Ainsi, nous pouvons déterminer une longueur optimale de tuyau entre 56 et 84 mètres. Il est également important de noter que la relation entre la température d'entrée et la température de sortie dépend de plusieurs facteurs, tels que la conception de l'échangeur de chaleur, les caractéristiques du liquide utilisé, la vitesse de l'air et d'autres critères du système.

On a choisi le tube de 56 m pour notre étude en raison de son efficacité, de son coût et de sa facilité d'entretien.

➤ L'effet de la géométrie :

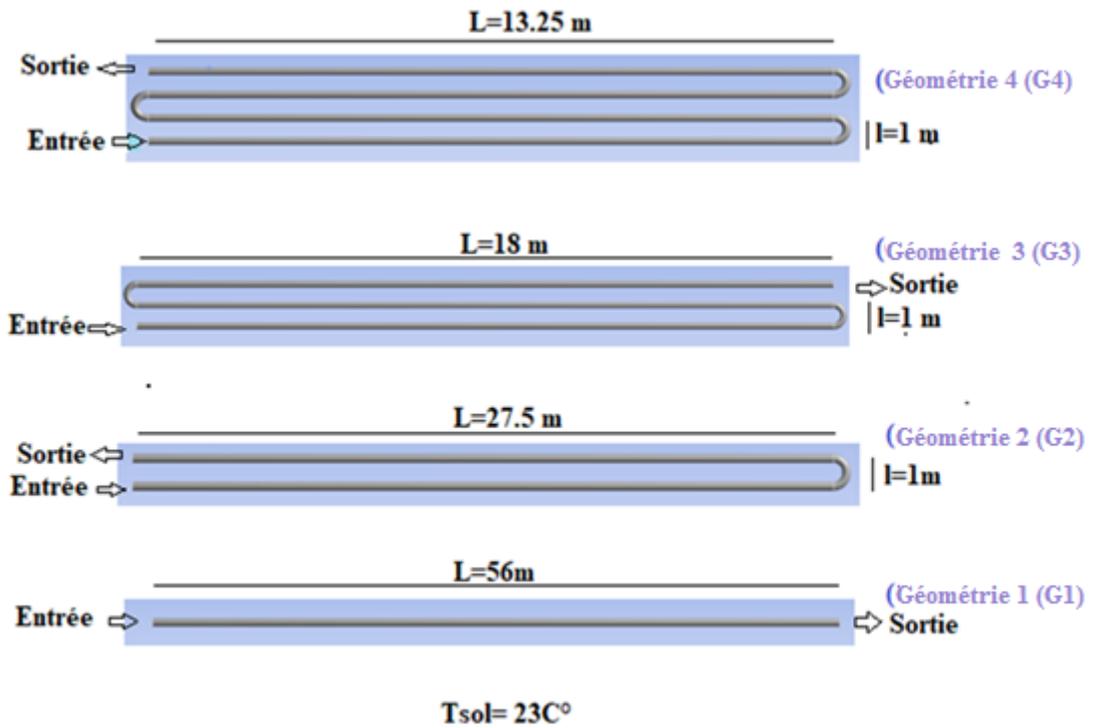


Fig.3.11. Les formes géométriques sélectionnées pour la longueur de 56 m.

Tableau3.3 : Les différents paramètres pour simuler le tube.

Type de EAHE	Monotube	Tube torsadé (deux fois)	Tube torsadé (trois fois)	Tube torsadé (quatre fois)
Longueur du tube	56	56	56	56
Diamètre externe (m)	0.16	0.16	0.16	0.16
Diamètre interne (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
Profondeur du tube (m)	3	3	3	3
Vitesse d'air V (m/s)	2	2	2	2
Nombre des courbures	0	1	2	3
Type de configuration	Tube à sens unique Fig.3.11(G1)	Tubes parallèles torsadés et raccordés Fig.3.11(G2)	Tubes parallèles torsadés et raccordés Fig.3.11(G3)	Tubes parallèles torsadés et raccordés Fig.3.11(G4)

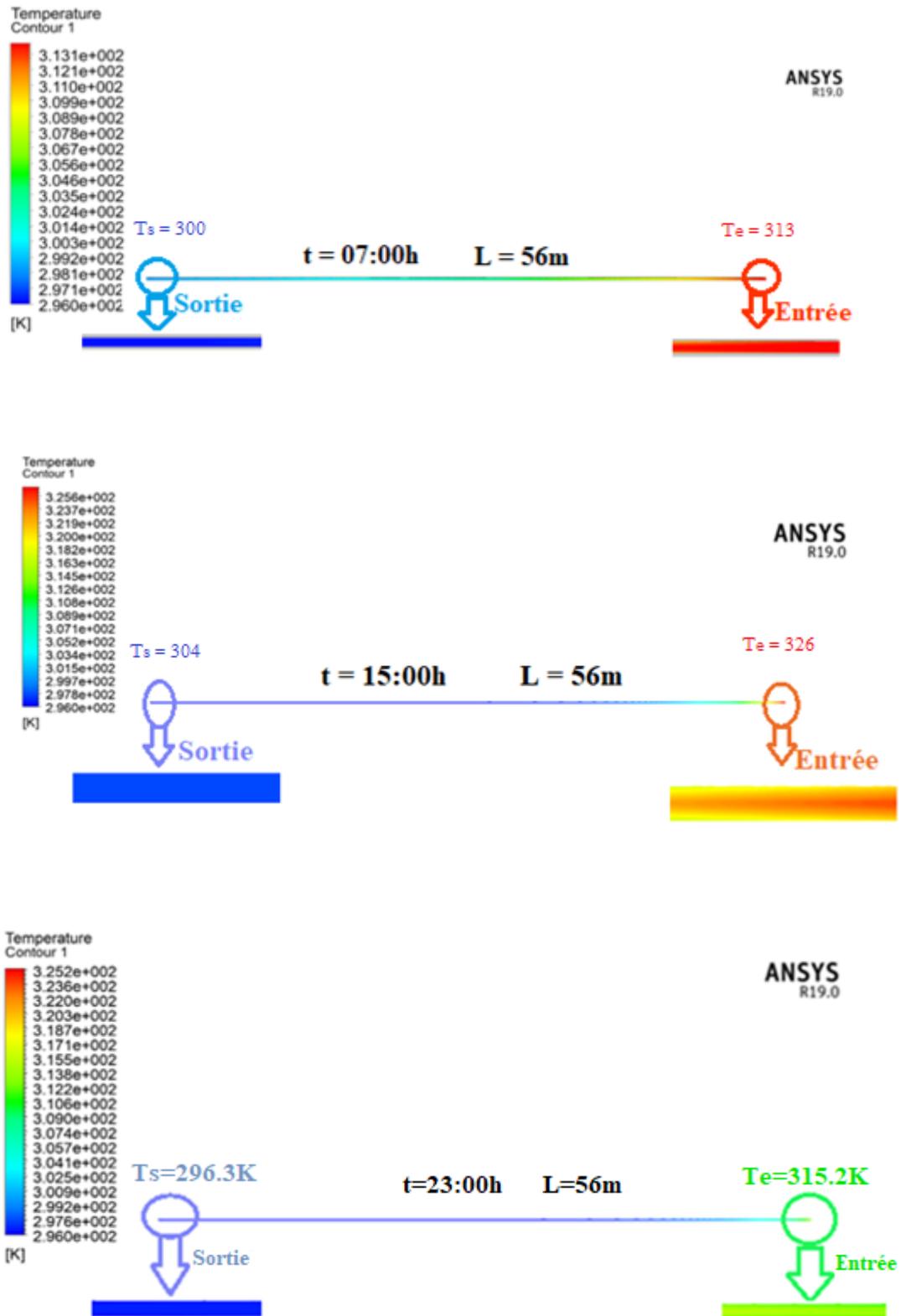


Fig.3.12. Contours de température pour la géométrie 1 en trois heures différentes de la journée.

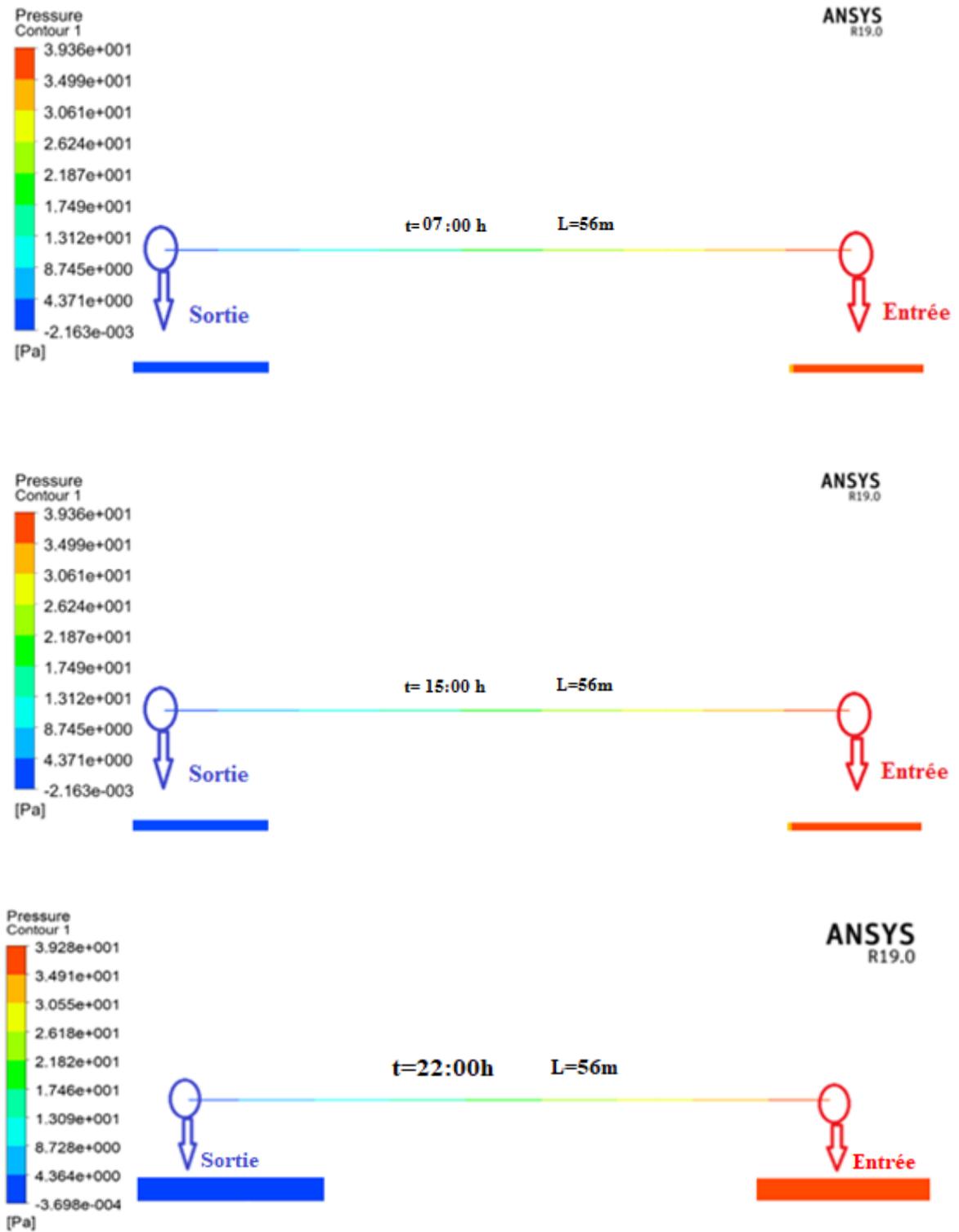


Fig.3.13. Contours de pression pour la géométrie 1 en trois heures différent de la journée.

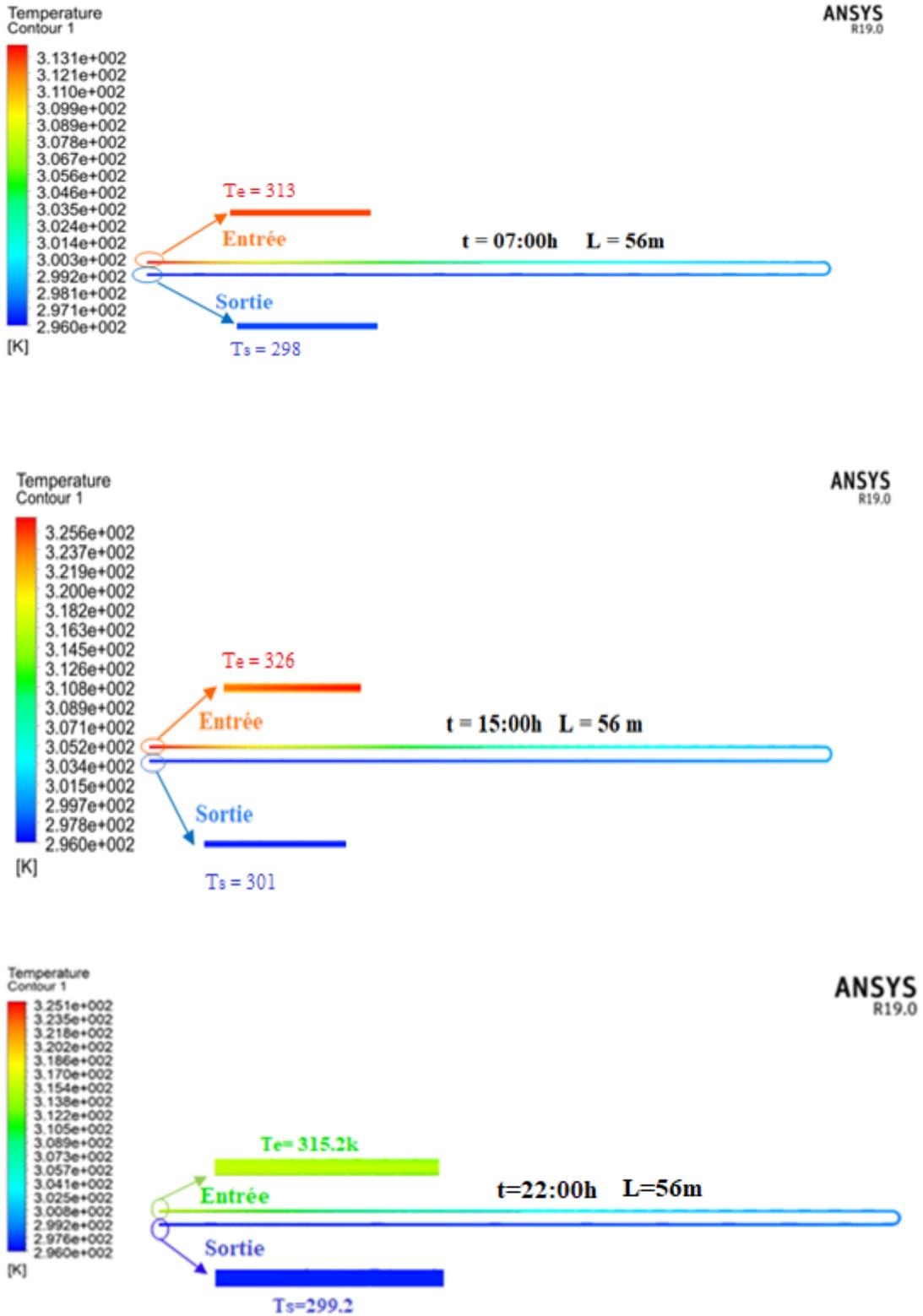


Fig.3.14. Contours de température pour la géométrie 2 en trois heures différent de la journée.

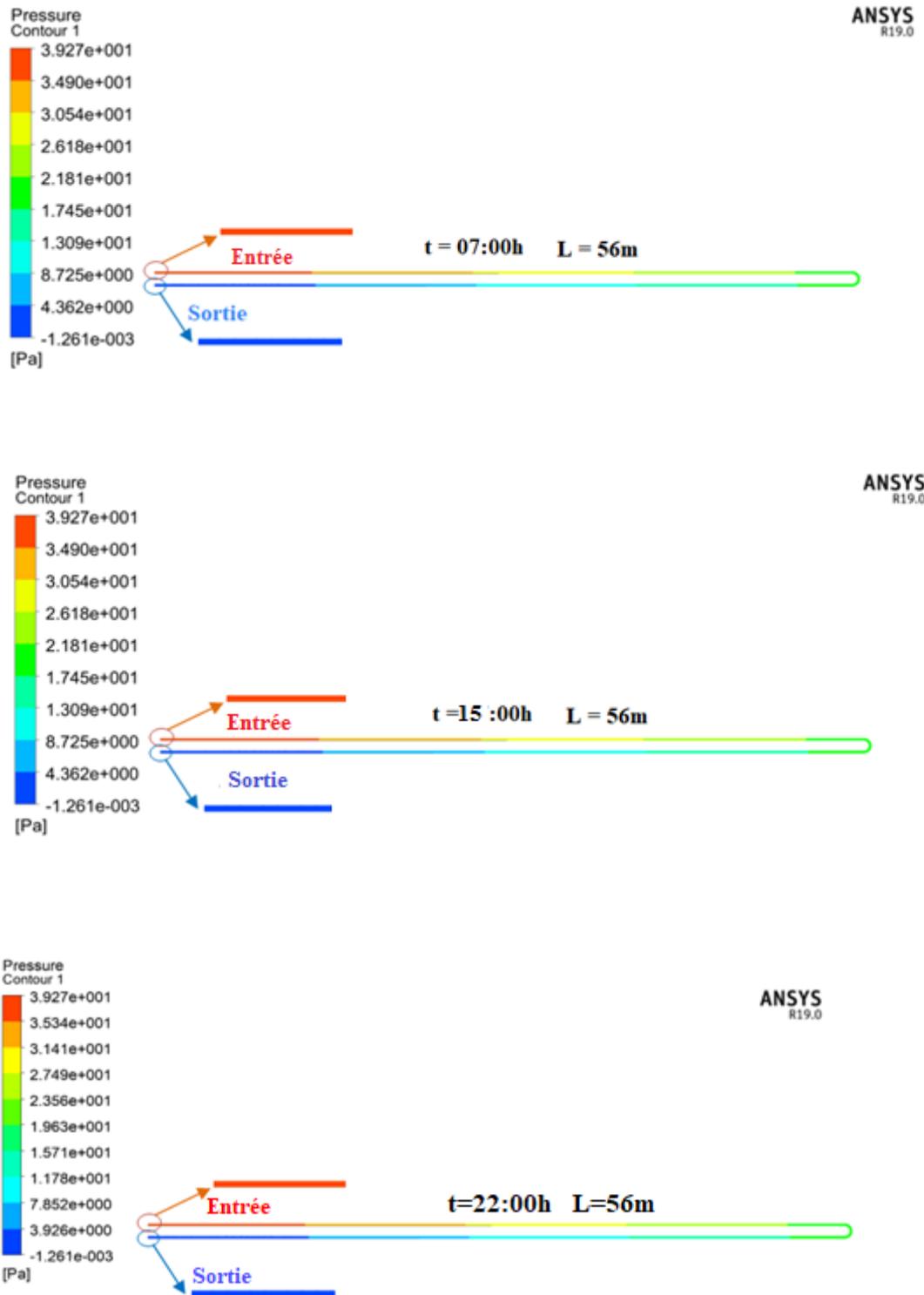


Fig.3.15. Contours de pression pour la géométrie 2 en trois heures différent de la journée.

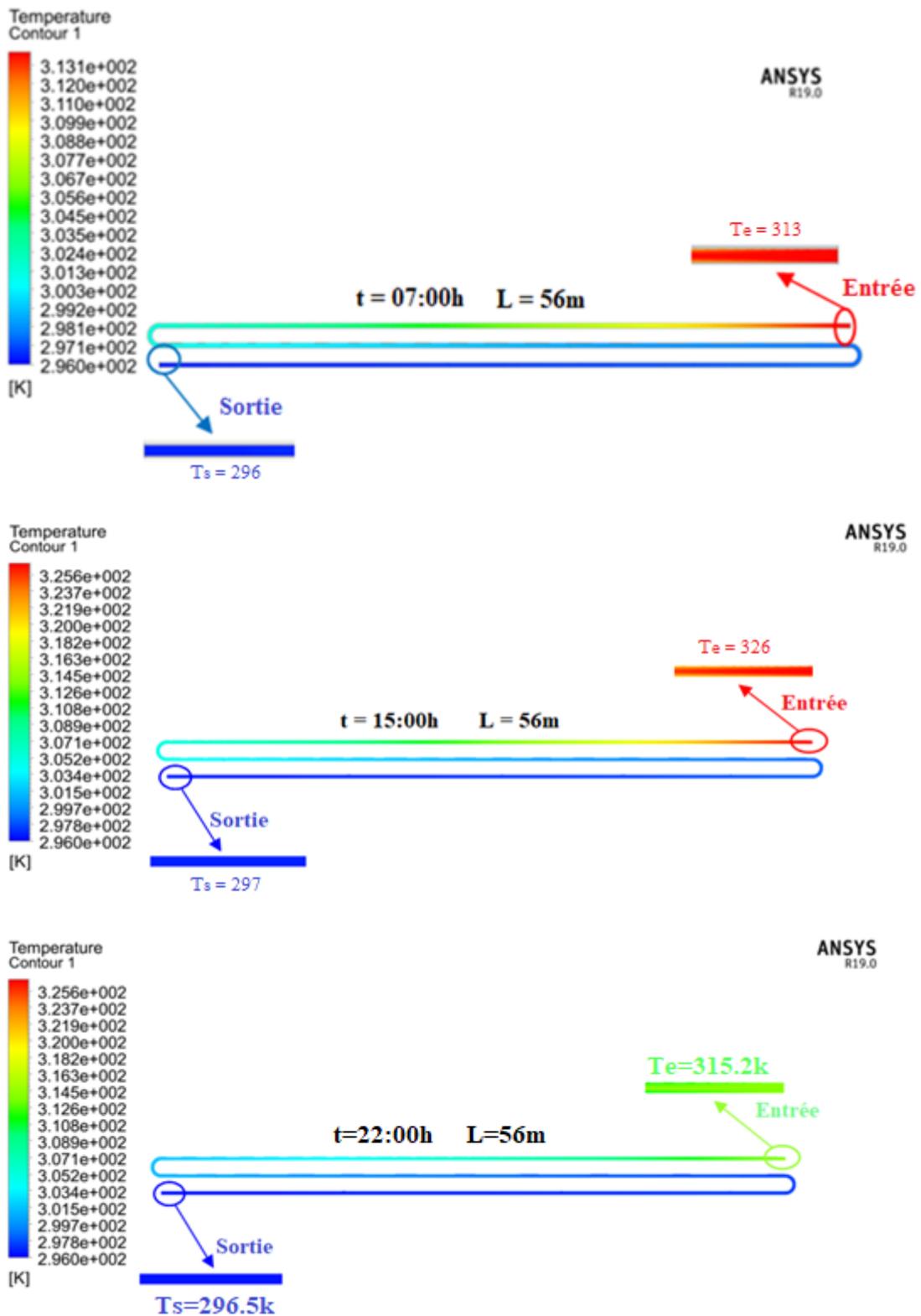


Fig.3.16. Contours de température pour la géométrie 3 en trois heures différent de la journée.

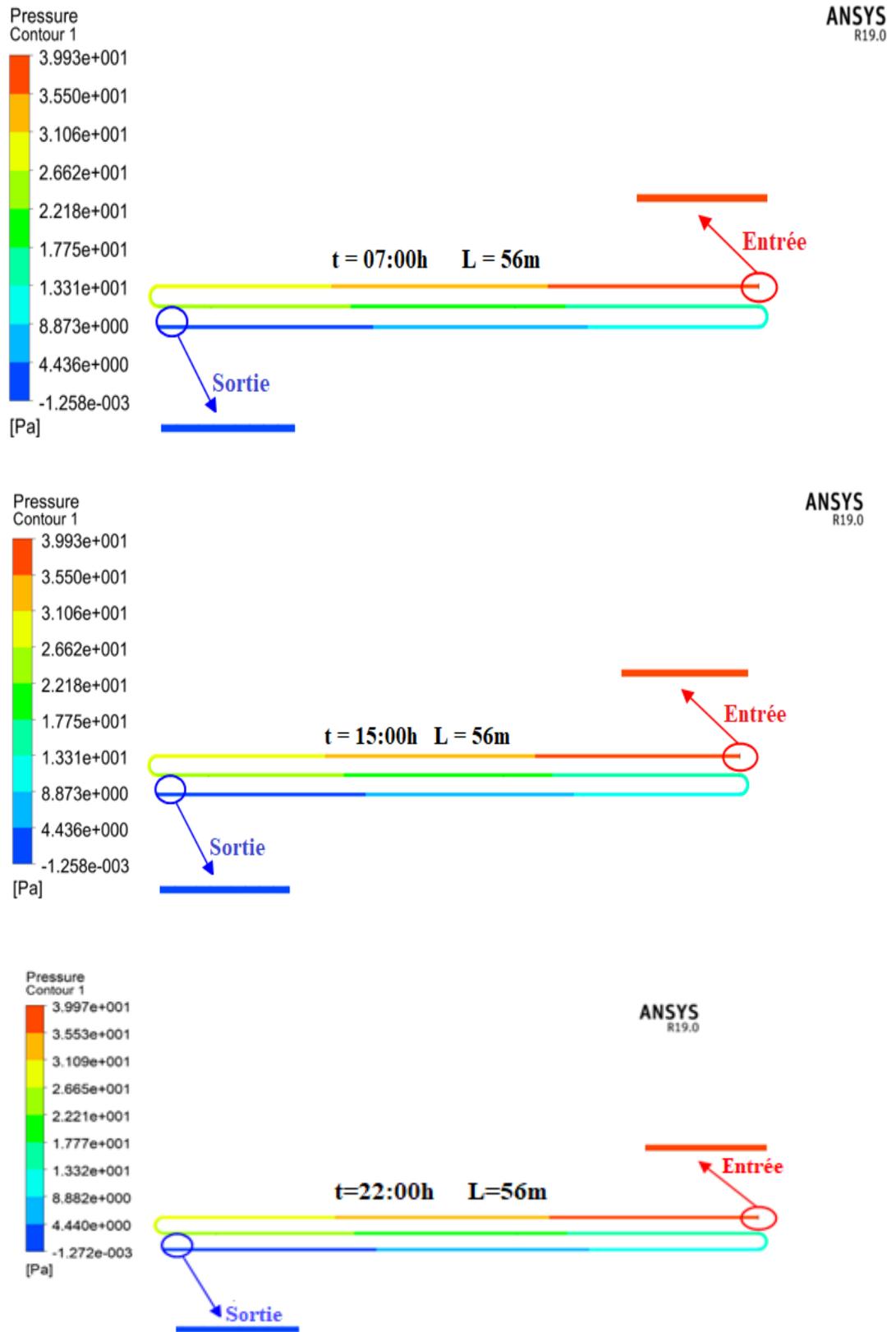


Fig.3.17. Contours de Pression pour la géométrie 3 en trois heures différent de la journée.

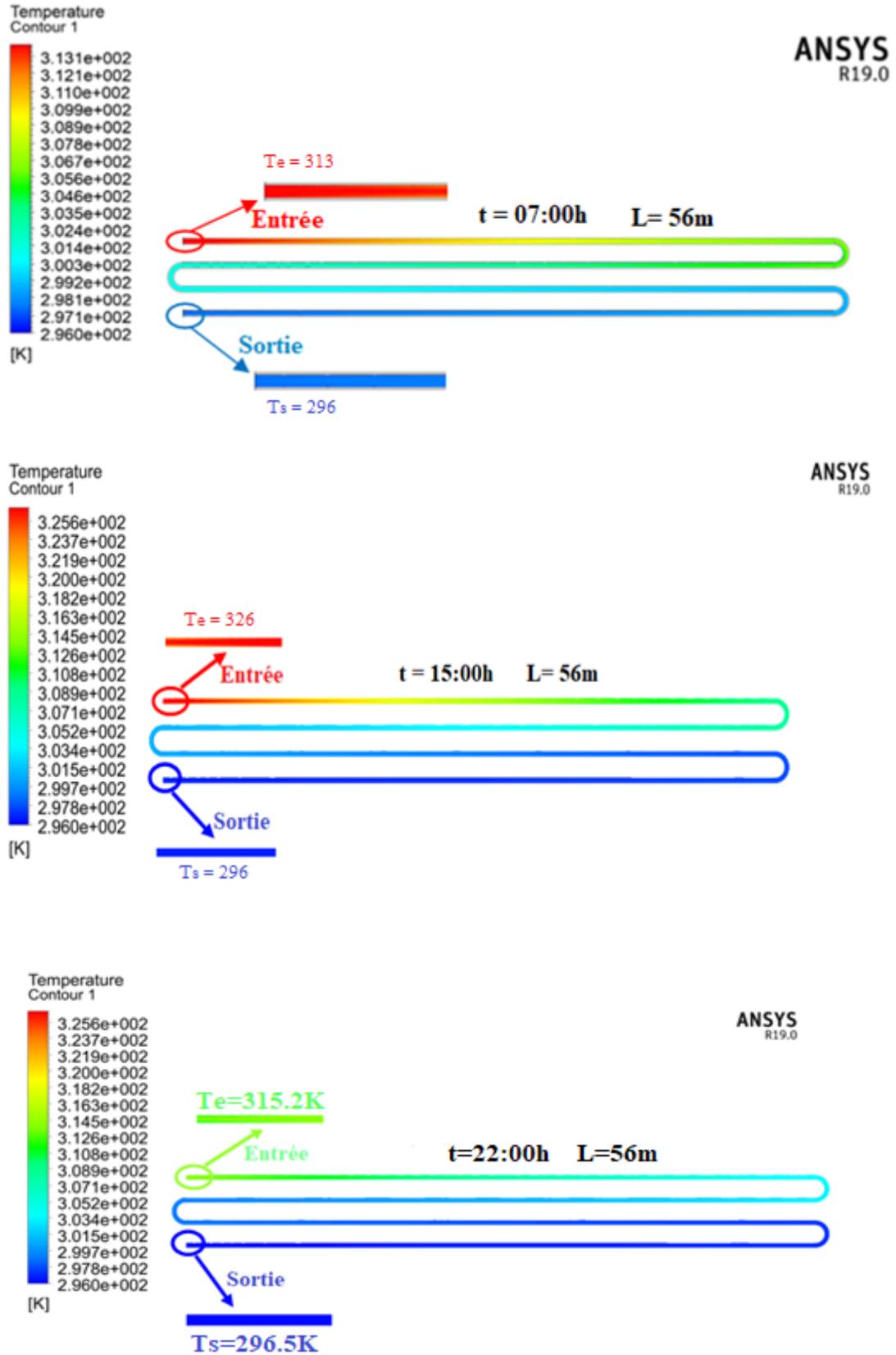


Fig.3.18. Contours de température pour la géométrie 4 en trois heures différent de la journée.

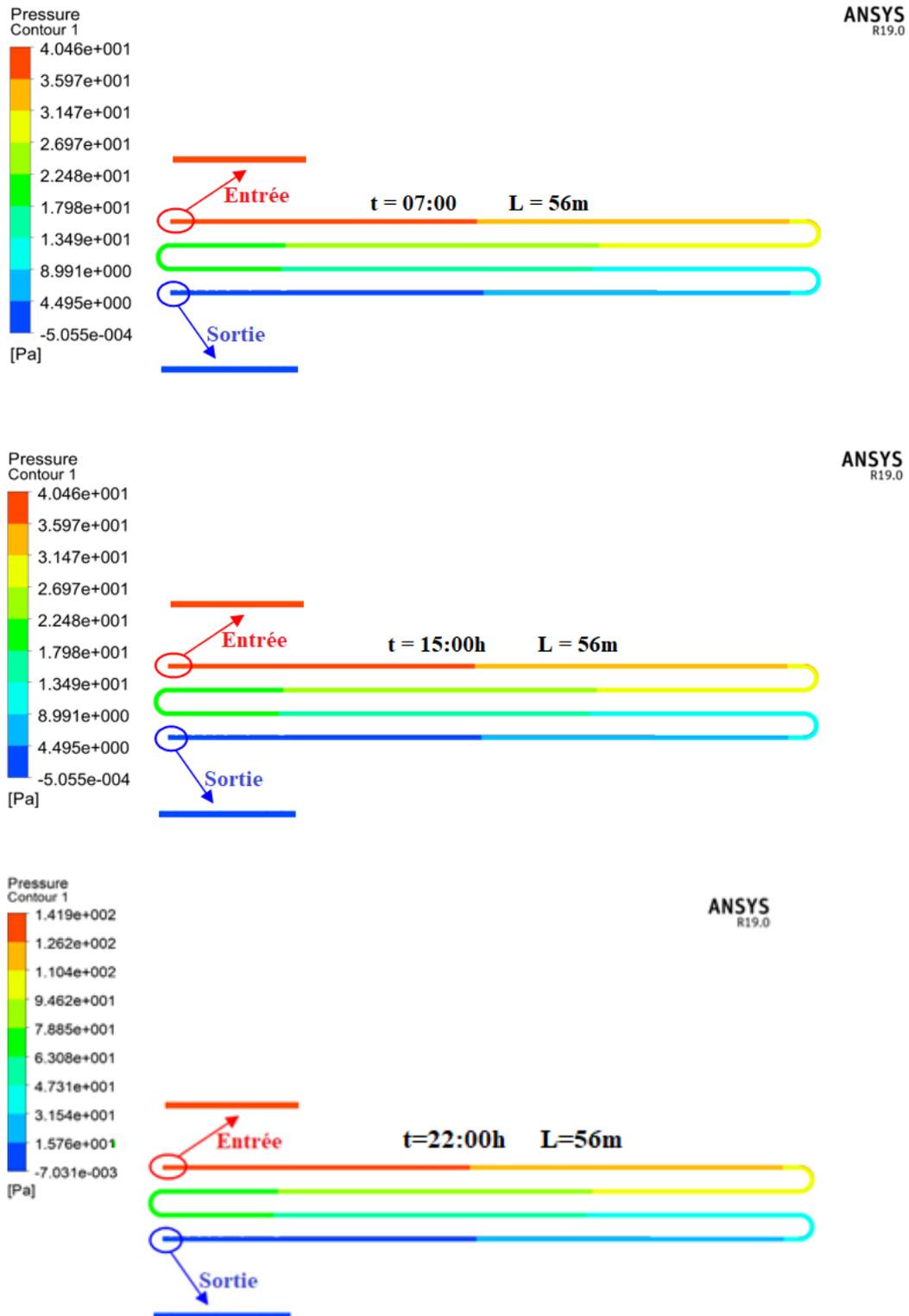


Fig.3.19. Contours de pression pour la géométrie 4 en trois heures différent de la journée.

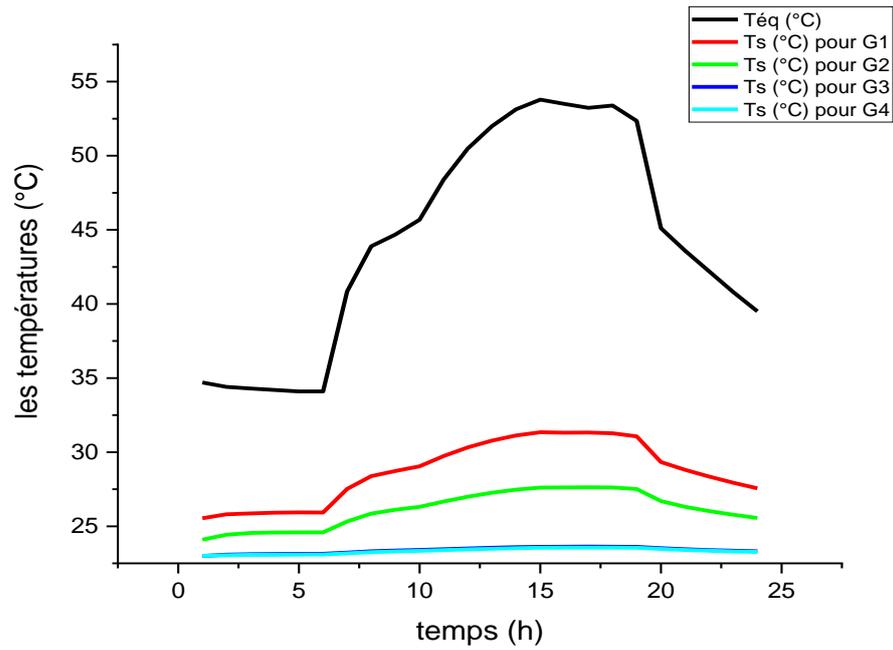


Fig.3.20. Les variations de température à l'entrée Tég (°C) et à la sortie Ts (°C) pour chaque géométrie pendant 24 heures.

La courbe représente les variations de température à l'entrée Tég (°C) et à la sortie T (°C) en fonction du temps, où l'on remarque que la température de l'air à la sortie est plus élevée dans la géométrie1 (G1), suivie des géométriesG2, G3 et G4. Cela indique que les courbes dans les géométries permettent à l'air de maximiser les échanges thermiques avec le sol, ce qui réduit les températures de l'air à la sortie.

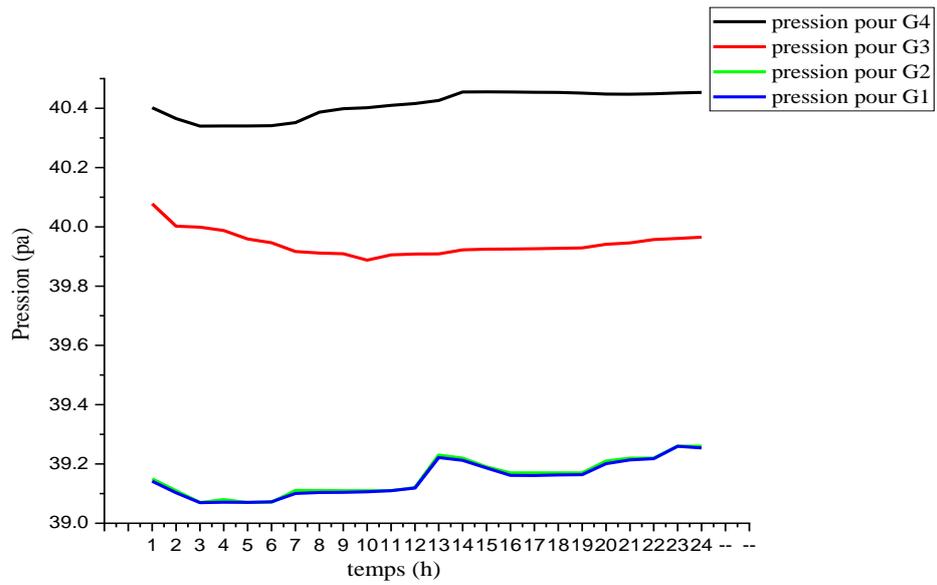


Fig.3.21. La différence de pression d'air entre l'entrée et la sortie pendant 24 heures.

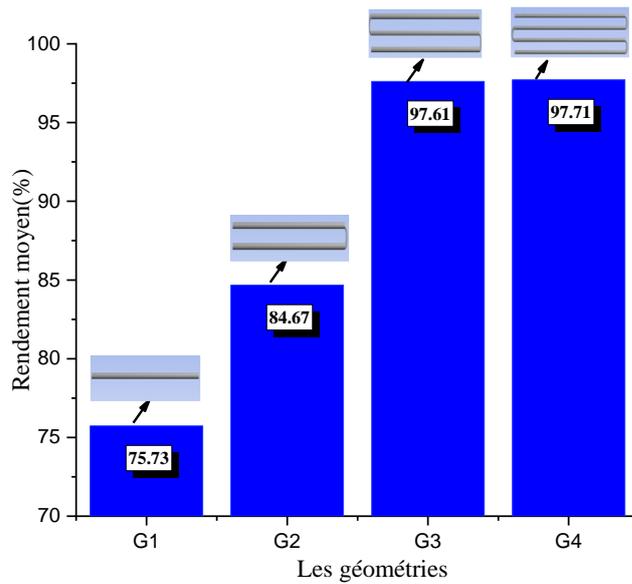


Fig.3.22. La performance de l'échangeur air-sol en fonction des géométries utilisées.

Les colonnes représentent les variations de l'efficacité du système en fonction des différentes formes géométriques, où l'on observe que la forme géométrique 4 enregistre la plus haute efficacité, atteignant 97,71%, comparée à la forme géométrique 1 qui atteint un taux de 75,73%. Ensuite, viennent respectivement les formes géométriques 3 et 2. Cela est dû à la conception de la géométrie, car les courbes entravent le mouvement de l'air lors des échanges thermiques de l'air vers le sol, le rendant plus frais. Cependant, cela entraîne

également une augmentation de la pression (voir Fig.3.21), ce qui peut provoquer une dispersion de la distribution de l'air à l'intérieur du tuyau, pouvant nécessiter des pompes ou des ventilateurs plus puissants pour déplacer l'air à travers les tuyaux, entraînant ainsi une augmentation de la consommation d'énergie. Par conséquent, la forme géométrique 3 est la plus appropriée en termes d'efficacité et de pression.

➤ L'effet de la vitesse de l'air à l'entrée :

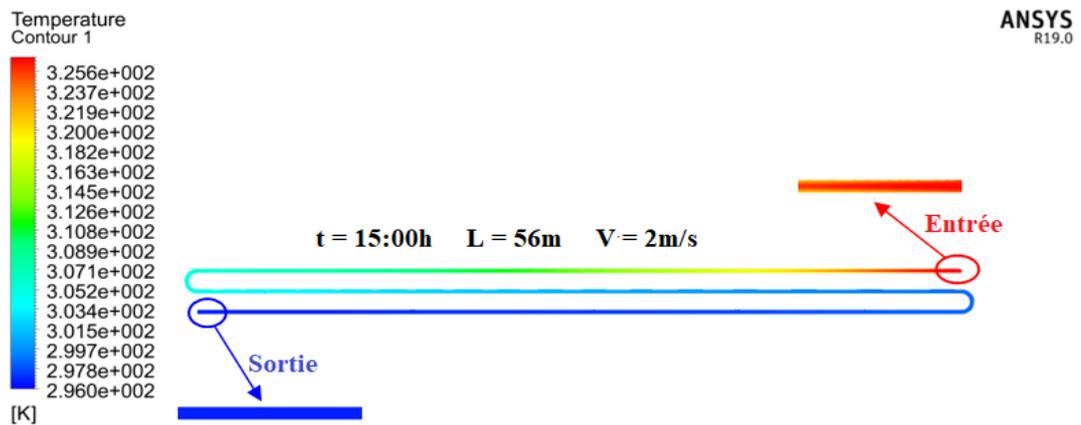
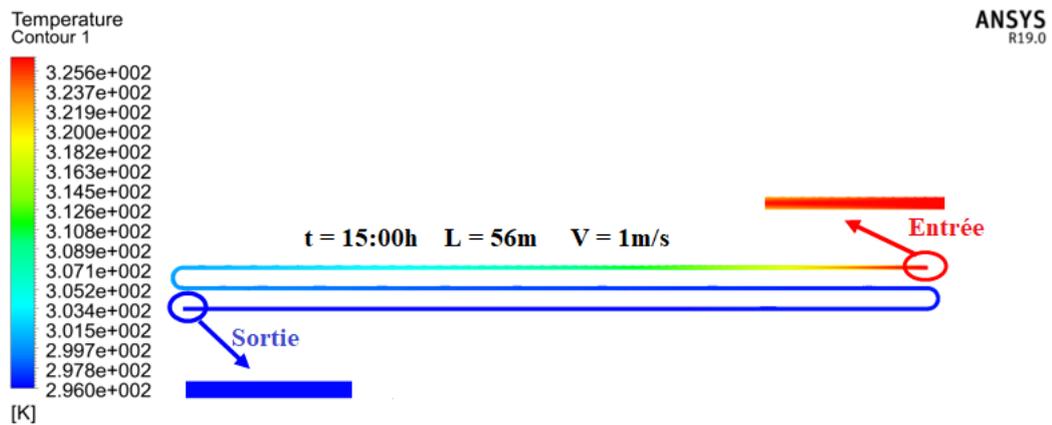


Fig.3.23. Contours de température pour les vitesses 1m/s et 2m/s en 15:00h.

Chapitre III. Résultats et discussions

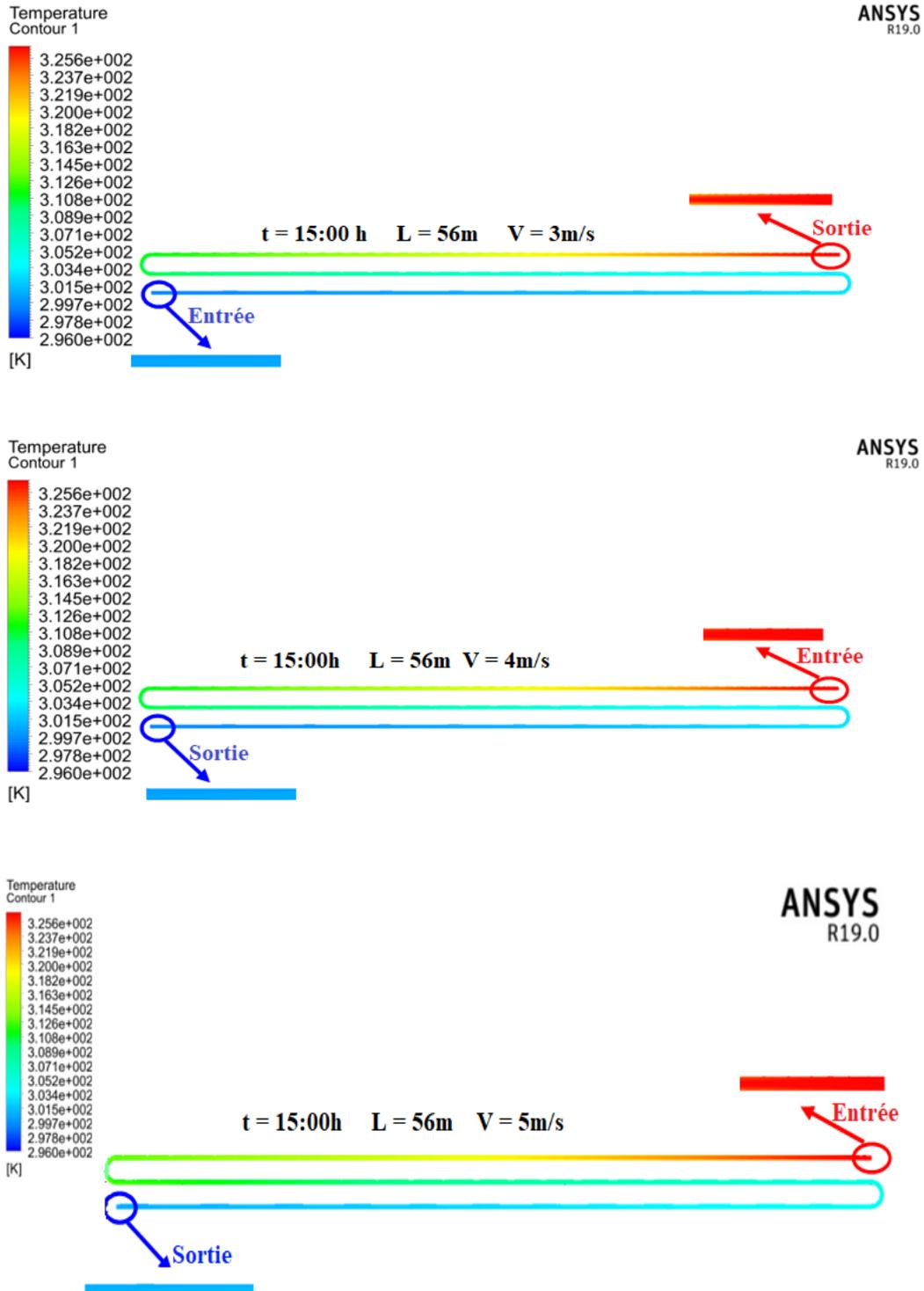


Fig.3.24. Contours de température pour les vitesses 3m/s , 4m/s et 5m/s en 15:00h.

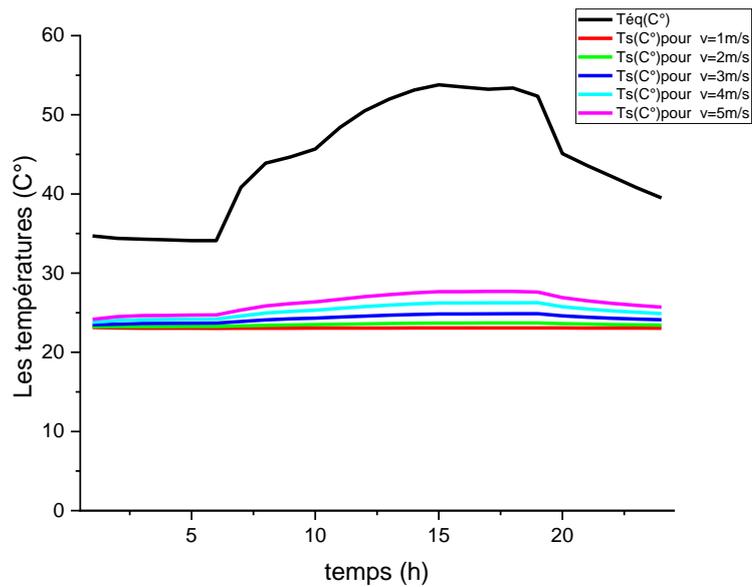


Fig.3.25. Les variations de température à l'entrée Téq (°C) et à la sortie Ts (°C) pour chaque vitesse pendant 24 heures.

Le graphique représente les variations de température à l'entrée Téq (°C) et à la sortie pour chaque vitesse, où l'on observe que la température de l'air à la sortie est la plus élevée à une vitesse de 5m/s, suivie respectivement des vitesses de 4m/s, 3m/s, 2m/s et 1m/s. Cela indique que les vitesses élevées ne donnent pas suffisamment de temps à l'air pour effectuer les échanges thermiques avec le sol, contrairement aux vitesses plus faibles où l'air est plus frais à la sortie.

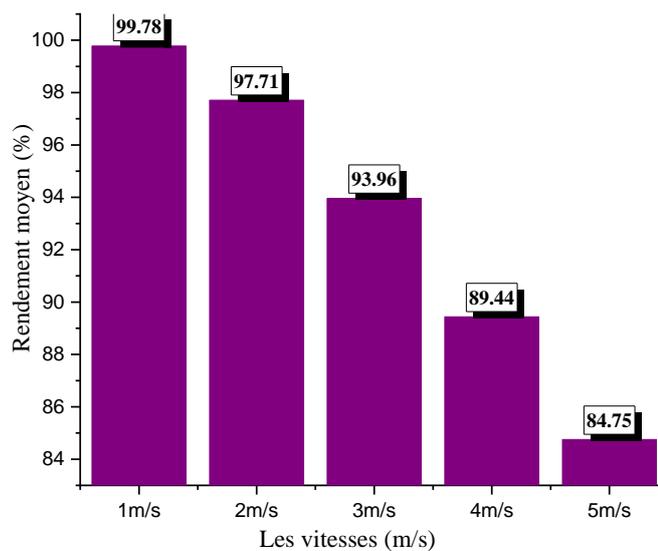


Fig.3.26. La performance de l'échangeur air-sol en fonction des géométries utilisées.

Les colonnes montrent les variations de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction des vitesses suivantes : 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s et 5 m/s. L'efficacité la plus élevée a été enregistrée à une vitesse de 1 m/s, avec un taux de 96 %. Cette vitesse peut être considérée comme une vitesse optimale en raison de son efficacité élevée. Cela signifie que lorsque l'air circule à une vitesse de 1 m/s à travers l'échangeur de chaleur, le transfert de chaleur entre l'air et le sol est maximal, ce qui permet une performance optimale du système. Cependant, à mesure que la vitesse de l'air augmente, les taux de transfert de chaleur diminuent, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité du système.

Les vitesses d'air élevées, telles que 2m/s, 3m/s, 4m/s et 5m/s, montrent respectivement des taux d'efficacité inférieurs. Cela est dû au fait que des vitesses d'air plus élevées réduisent le temps de contact entre l'air et les surfaces de l'échangeur de chaleur, limitant ainsi le transfert de chaleur. Par conséquent, l'efficacité globale du système diminue à mesure que la vitesse de l'air augmente.

3.5. Analyse des impacts environnementaux et économiques du système du refroidissement des échangeurs air-sol :

3.5.1. Les hypothèses :

- ✚ Taux exprimés en dollars D'accord le 06/05/2023 (1\$=136.762DA).
- ✚ Le cout d'installation d'EAHE est 238.75\$[24].
- ✚ Coûts économiques calculés sur six mois.
- ✚ Durée de vie climatiseur classique est 30ans, Durée de vie d'échangeur est 30 ans.
- ✚ Le calcul de la capacité de refroidissement est basé sur un logement de 120m².

3.5.2.Calcul des coûts d'électricités:

Nous allons calculer les coûts en présence du refroidissement par échangeur d'air au sol et en l'absence de celui-ci (refroidissement par climatiseur électrique).

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad (3.7)$$

$$\text{Donc} \quad W = \frac{Q_c}{COP} \quad (3.8)$$

- ✚ Le coût initial de l'énergie consommée par la climatisation (en DA/m² par an):

$$Cc = \frac{Q_c.Ce}{COP.3.6.10^6} \quad (3.9)$$

Le coût de l'électricité subventionnée (en Da/kWh) : ce = 4.8.

Charge de transmission de refroidissement Q_c (J/m^2) [22].

La climatisation électrique se distingue par une consommation électrique élevée, atteignant 11548,924 DA. De plus, elle entraîne un coût total de 346467,736 DA sur 30 ans.

Cependant, la climatisation électrique est facile et rapide à installer.

En ce qui concerne l'échangeur air sol, sa consommation électrique est moindre, atteignant 2669,987 DA et le coût d'installation initial est de 38720,525 DA. Sur une période de 30 ans, le coût total de l'échangeur s'élève à 112679,459 DA.

Sur la base de cette comparaison, on peut considérer l'échangeur de chaleur enterré comme une option plus efficace en termes de consommation d'électricité à long terme, en raison de sa capacité à réduire les coûts d'électricité de 76,88% et à répondre aux exigences de refroidissement nécessaires.

III.5.3. Emission des gaz CO₂ par le système EAHE(ECO₂) :

Les émissions de CO₂ pour le système de refroidissement avec l'échangeur air-sol (EAHE) sont le produit de l'émission de CO₂ de 1 kWh multiplié par la consommation électrique annuelle. En Algérie, on considère qu'1 kWh d'électricité émet 548 g de CO₂ [25]

Ainsi, pour le système de refroidissement sans EAHE (climatiseur électrique), avec une consommation de 450191 kWh sur 6 mois, les émissions de CO₂ s'élèvent à 246.705 kg.

En revanche, pour le système de refroidissement avec EAHE, la consommation est de 104.079 kWh sur 6 mois, entraînant des émissions de CO₂ de 57.035 kg.

Sur la base de ce qui précède, nous pouvons considérer que l'échangeur de chaleur enterré est l'alternative optimale du point de vue économique et environnemental. Il offre des coûts de fonctionnement plus bas et réduit l'empreinte environnementale, ce qui en fait un choix durable et bénéfique pour l'environnement.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons préparé le modèle correspondant à notre étude et évalué sa performance en fonction des résultats obtenus lors de la simulation. Il s'est avéré que la longueur de 56 m est la plus appropriée avec la troisième configuration et une vitesse de 1 m/s est celle qui a enregistré la température la plus basse à la sortie. Sur cette base, les coûts d'installation et d'électricité ont été calculés et comparés aux coûts de la climatisation électrique, y compris les émissions de CO₂ limitées aux deux systèmes.

CONCLUSION GENERALE

L'aspect le plus important que nous pouvons attendre de l'utilisation de la technologie de l'échangeur air-sol est la fourniture d'un confort thermique adapté aux conditions climatiques de la région de Ouargla, en particulier lorsque les températures atteignent leur pic en été. Ce qui pourrait réduire les coûts énergétiques associés à l'utilisation des climatiseurs traditionnels, de manière sûre et durable.

Cette étude est réalisée pour évaluer l'efficacité énergétique de l'échangeur air-sol associé à un habitat dans la région de Ouargla. On a modélisé à l'aide du logiciel commercial Ansys Fluent, en tenant compte de trois paramètres de conception : la longueur du tube, la géométrie de l'installation et la vitesse d'entrée de l'air. En proposant plusieurs options pour chaque paramètre, on a obtenu la conception appropriée et optimale avec une importante efficacité. À partir des résultats obtenus, on a conclu que l'efficacité énergétique de l'échangeur Air-Sol dépend des facteurs suivants :

- La température de l'air à la sortie de l'échangeur, se rapproche de la température du sol pour une longueur de 56m.
- La conception de l'échangeur de chaleur en forme de serpentin adonné une meilleure efficacité thermique mais augmente les pertes de charge.
- La vitesse de l'air de 1m/s a donné une température de sortie très proche de la température du sol.

Il est également apparu que la capacité de refroidissement par l'échangeur Air-Sol est meilleure par rapport à la climatisation traditionnelle en termes de coûts énergétiques et d'émissions de dioxyde de carbone.

Par conséquent, cela peut être considéré comme une solution aux problèmes auxquels sont confrontés les habitants de la région de Ouargla (températures et coûts énergétiques élevés). Cependant, en raison des conditions actuelles caractérisées par le coût de l'électricité soutenu par l'état, les citoyens ne sont pas encouragés de passer à des sources d'énergie renouvelables (installation de systèmes de climatisation à partir de sources renouvelables). C'est pour cela qu'on recommande aux responsables de ce pays de faciliter les prêts sans intérêt et de donner des subventions aux citoyens afin d'installer ces échangeurs de chaleur.

RÉFÈRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Afafia, M., et al., *An energy consumption model for the Algerian residential building's stock, based on a triangular approach: Geographic Information System (GIS), regression analysis and hierarchical cluster analysis*. Sustainable Cities and Society, 2021. **74**: p. 103191.
2. سرיתי, الواجهات المعمارية ودورها في ضمان الراحة الحرارية والفعالية الطاقوية حالة المباني الإدارية في الجزائر بين التشريع والواقع. 2017.
3. BESBAS, Y., *CARACTERISATION DU CONFORT THERMIQUE ESTIVAL DANS LES CHAMBRES DES MALADES. CAS DES HOPITAUX DE BISKRA*, 2019, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
4. Kesraoui, N., *Intégration du concept bioclimatique et utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment tertiaire en climat méditerranéen. Cas de L'Algérie*, 2010, Université de Tizi Ouzou-Mouloud Mammeri.
5. RAHMOUNI, S., *Evaluation et Amélioration Energétiques de Bâtiments dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique*, 2020, Université de Batna 2.
6. Bouattour, M. and F. Alain, *La végétalisation des bâtiments*. Paris: DREIF (Direction régionale de l'Equipeement Ile de France, 2009.
7. Moumami, N., et al., *Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra*. Journal of Renewable Energies, 2010. **13**(3): p. 399–406-399–406.
8. Trombe, A. and L. Serres, *Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation*. Energy and Buildings, 1994. **21**(2): p. 155-162.
9. Singh, R., et al., *Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **82**: p. 2162-2185.
10. Misra, R., et al., *Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger*. Energy and Buildings, 2012. **49**: p. 531-535.
11. Elminshawy, N.A.S., et al., *Performance of PV panel coupled with geothermal air cooling system subjected to hot climatic*. Applied Thermal Engineering, 2019. **148**: p. 1-9.
12. Maerefat, M. and A.P. Haghighi, *Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney*. Renewable Energy, 2010. **35**(10): p. 2316-2324.
13. Do, S.L., J.-C. Baltazar, and J. Haberl, *Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates*. Energy and Buildings, 2015. **103**: p. 206-215.
14. Bansal, V., et al., *Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating*. Energy and Buildings, 2009. **41**(11): p. 1151-1154.
15. H.Ali, M., Z. Kurjak, and J. Beke, *Investigation of earth air heat exchangers functioning in arid locations using Matlab/Simulink*. Renewable Energy, 2023. **209**: p. 632-643.
16. HAMDI, O., *Contribution à l'étude de l'efficacité d'un système géothermique (air-sol) placé dans une zone aride «cas de la région de Biskra»*, 2020, Université Mohamed Khider–Biskra.
17. Necib, H. and Z. Nemouchi, *Extension d'un algorithme de calcul à l'étude d'écoulements complexes*. 2017.
18. SEDIRA, H.E., *Rafraichissement de l'air d'un local par la géothermie: échangeur enterré air/sol forme circulaire*.

Références bibliographiques

19. Babasaci, A., I. Bouguenara, and A. Chaouche, *Etude de la performance d'un échangeur de chaleur air-sol couplé avec la cheminée solaire pour des applications de chauffage et de refroidissement dans les régions arides.*
20. *UTILISATION DES ECHANGEURS AIR-SOL POUR LE CHAUFFAGE ET LE RAFRAICHISSEMENT DES BATIMENTS: ETUDE DE MODELISATION-SIMULATION.*
21. GOUNNI, A., M.H. KHALED, and M.S. KOUIDRI, *3D simulation of earth to air heat exchanger in Ouargla region*, 2021.
22. Necib, H. and B. Necib, *Improve the calculation accuracy of the optimal insulation thickness in building walls as determined by a dynamic heat transfer model.* Asian Journal of Civil Engineering, 2020. **21**: p. 903-913.
23. Thiers, S. and B. Peuportier. *Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiment.* in *Journée thématique SFT-IBPSA: froid solaire et confort d'été.* 2007.
24. Agrawal, K.K., R. Misra, and G.D. Agrawal, *CFD simulation study to evaluate the economic feasibility of backfilling materials for ground-air heat exchanger system.* Geothermics, 2021. **90**: p. 102002.
25. BENFATAH, H., *Etude et analyse des procédés solaire de production de froid par sorption en vue d'une réalisation d'un premier prototype à Biskra*, 2020, Université Mohamed Khider–Biskra.

RÉSUMÉ :

L'objectif de cette étude porte sur l'étude de l'efficacité énergétique d'un échangeur air sol installé dans un habitat dans la région de Ouargla. L'efficacité de ce système de refroidissement a été estimée sur une période de six mois de l'année (de mai à octobre) en se basant sur trois paramètres clés de conception : la longueur du tuyau, la géométrie du tuyau et la vitesse de l'air. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel Ansys Fluent ont montré que la longueur de 56 mètres, la géométrie spécifique et une vitesse de 1 m/s atteignent une efficacité optimale du système. En utilisant l'échangeur d'air souterrain, des économies d'énergie de 76,88% ont été réalisées, ainsi qu'une réduction des émissions de dioxyde de carbone, ce qui en fait la meilleure alternative pour résoudre les problèmes actuels dans la région.

Mots clés : échangeur air sol, efficacité énergétique, confort thermique, simulation Ansys Fluent

ABSTRACT:

The objective of this study is to investigate the energy efficiency of a ground-air heat exchanger installed in a dwelling in the Ouargla region. The efficiency of this cooling system was assessed over a six-month period (from May to October) based on three key design parameters: pipe length, pipe geometry, and air velocity. Results obtained using the Ansys Fluent software showed that a pipe length of 56 meters, specific geometry, and an air velocity of 1 m/s achieved optimal system efficiency. By using the ground-air heat exchanger, energy savings of %76.88 were achieved, along with a reduction in carbon dioxide emissions, making it the best alternative for addressing current issues in the region.

Keywords: Earth-air heat exchanger, energy efficiency, thermal comfort, Ansys Fluent simulation.

الملخص :

الهدف من هذا العمل يدور حول دراسة الكفاءة الطاقوية للمبادل الهوائي الارضي المرتبط بمونل بمنطقة ورقلة فتم تقدير كفاءة هذا النظام لغرض التبريد خلال ستة اشهر من السنة (من مايو إلى اكتوبر) من حيث ثلاث معلمات اساسية لتصميم طول الانبوب, هندسة الانبوب وسرعة الهواء باستخدام برنامج الانسيس فلونت اظهرت النتائج ان الطول 56م والهندسة الثالثة والسرعة 1م/ث يحققون الكفاءة المثلى لنظام كما بلغت نسبة الوفرات في الطاقة الكهربائية و تقليل انبعاث ثاني اكسيد الكربون باستخدام المبادل الهوائي الارضي 76.88 % مما يجعله البديل الامثل لحل المشاكل الراهنة بالمنطقة.

الكلمات المفتاحية: مبادل هوائي أرضي، الكفاءة الطاقوية، الراحة الحرارية، محاكاة Ansys Fluent