



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Abdelkader OTMANI

Le : dimanche 27 septembre 2020

Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : Echangeur enterré eau/sol de forme chaotique.

Jury :

M.	Mabrouk HECINI	Pr	Université de Biskra	Président
M.	Miloud ZELLOUF	MAA	Université de Biskra	Rapporteur
M.	Chawki MAHBOUB	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciements

Je remercie **Dieu** qui m'a donné la capacité à accomplir ce modeste travail.

Je remercie mon Encadreur **Dr. ZELLOUF Miloud** qui m'a beaucoup aidé et m'a soutenu par ses conseils pour réaliser cette recherche.

Je tiens à remercier aussi **mes parant** et tous **nos enseignants** qui nous ont guidé tout au long de notre formation.

Je remercie **mes collègues** qui m'a beaucoup aidé et m'a couvert parsees immenses conseils.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	I
LIST DES TABLEAUX.....	VI
NOMENCLATURE	VII
INTRODUCTION GENERALE :	1

Chapitre I : Généralités

I.1 Introduction :	3
I.2 Historique :	3
I.3 L'Energie géothermique :	4
I.4 Importance de la géothermie :	4
I.5 Les avantages et les inconvénients de la géothermie :	4
I.5.1 Les avantages :	4
I.5.2 Les inconvénients :	5
I.6 Classification des ressources géothermiques :	5
I.7 Potentiel de l'Energie Géothermique dans l'Algérie :	6
I.8 L'utilisation de ressources géothermiques en Algérie :	6
I.9 Les eaux profondes dans l'Algérie :	6
I.10 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables :	7
I.11 Les échangeurs de type Eau/Sol :	8
I.11.1 Échangeur de chaleur horizontale :	9
I.11.2 Échangeur de chaleur verticale :	9
I.12 Principaux paramètres de dimensionnement :	10
I.12.1 La nature du sol et son taux d'humidité :	10
I.12.2 La nature des tubes.....	10
I.12.3 Le Débit de fluide Total :	10
I.12.4 Le Nombre Et Le Diamètre Des Tubes :	11
I.12.5 La Longueur Des Tubes :	11
I.13 Conclusion :	11

Chapitre II : Revue bibliographique

II.1 Introduction :	12
II.2 Synthèse bibliographique :	12

II.3 Conclusion :	19
-------------------	----

Chapitre III : Formulation mathématique, modélisation numérique et dimensionnement de l'échangeur

III.1 Introduction :	20
III.2 Ansys Fluent :	20
III.3 Définition du CFD :	20
III.4 Les méthodes numériques :	20
III.5 Schéma de logiciel ANSYS :	21
III.6 Modélisation de la température du sol :	21
III.7 Équations générales (Équations gouvernantes des problèmes étudiés) :	22
III.7.1 Équation de continuité :	22
III.7.2 Équations de la conservation de la quantité de mouvement :	22
III.7.3 Équation de conservation de l'énergie :	22
III.7.4 Modèle turbulence k-ε standard :	23
III.8 Descriptions de l'échangeur chaotique :	23
III.9 Menu principal du logiciel :	24
III.10 Les différentes étapes de simulation :	25
III.10.1 Dessin de la géométrie :	25
III.10.2 Maillage :	25
III.10.3 Configurations (Fluent) :	26
III.10.4 Les conditions initiales et aux limites :	29
III.10.5 Méthode de calcul :	29
III.11 Conclusion	30

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1 Introduction :	30
IV.2 L'effet de la Longueur Des Tubes et le débit :	30
IV.2.1 Visualisation générale comparative pour les trois Longueurs :	30
IV.2.2 Pour longueur de 60 mètres :	31
IV.2.3 Pour longueur de 100 mètres :	31
IV.2.4 Pour longueur de 150 mètres :	32
IV.3 L'effet de diamètre de tube :	33
IV.4 L'effet de matériaux de tube :	34

IV.5 L'effet de la nature du sol :	34
IV.6 L'irrigation continu et l'intermittent :.....	34
IV.7 Expérience d'échangeur de chaleur en appliquant les résultats précédents :	36
IV.8 Conclusion :.....	38
CONCLUSION GENERALE.....	39
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	40

List des figures

Figure I.1: William Thomson, 1st Baron Kelvin (1824-1907).	4
Figure I.2: Classification des ressources géothermiques [6].....	6
Figure I.3: Types d'énergies utilisées en Algérie et leur taux de consommation	8
Figure I.4: Exemple d'un échangeur de chaleur enterré.....	8
Figure I.5: exemple d'un échangeur vertical et horizontal	9
Figure II.1: Vu de l'échangeur.....	12
Figure II.2 : Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour $T_e = 35$	12
Figure II.3 : Température de l'air pendant l'année.....	13
Figure II.4 : Température de sortie de l'air en mode continu et intermittent.....	14
Figure II.5 : (b) Température de sortie de l'air en mode continu et intermittent	15
Figure II.6 : Modèle de GHE à tubes en U et multitubes.	16
Figure II.7 : Contour de température de l'opération de refroidissement (multitube).	16
Figure II.8 : Contour de température de l'opération de chauffage (tube en U).....	17
Figure II.9 : EWHE outlet temperature vs mass flow rate (pipe ϕ 25 mm, Length= 90 m, Pipe material= HDPE).	17
Figure II.10 : EWHE outlet temperature vs pipe length (pipe ϕ 25 mm, flow rate = 0.02 kg/s, Pipe material= HDPE).	18
Figure II.11 : Effet de la vitesse du fluide sur la température de sortie de l'eau.	18
Figure II.12 : Effet de la conductivité thermique du sol sur la température de sortie de l'eau	19
Figure III.1 : Vu de l'échangeur sous forme chaotique.....	24
Figure III.2 : La fenêtre principale du logiciel ANSYS Workbench.	24
Figure III.3 : la géométrie échangeur eau/sol.	25
Figure III.4 : Maillage de la géométrie.....	25
Figure III.5 : Maillage de la zone d'entrée.	26
Figure III.6 : les détails de maillages.	26
Figure III.7 : choix de gravité et le régime transitoire.....	27
Figure III.8 : activation les équations de l'énergie et la turbulence.	27
Figure III.9 : choix des matériaux.	28
Figure III.10 : activation l'option de couplage des parois.	28
Figure III.11 : choix la méthode de calcul.....	29
Figure III.12: L'algorithme SIMPLE.	30
Figure IV.1 : vue 3d de les échangeurs (a= 60 m, b=100 m et c= 150 m) après la simulation.....	30
Figure IV.2 : la température d'eau dans la sortie pour échangeur de 60 m en fonction des débits. .	31

Figure IV.3 : la température d'eau dans la sortie pour échangeur de 100 m en fonction des débits.	31
Figure IV.4 : la température d'eau dans la sortie pour échangeur de 150 m en fonction des débits.	32
Figure IV.5 : Courbe représentant une comparaison de longueur.....	32
Figure IV.6 : la température d'eau dans la sortie pour des diamètre différents.....	33
Figure IV.7 : arrosage continu pendant 30 heures.	35
Figure IV.8 : arrosage intermittent pendant 30 heures.	35
Figure IV.9 : Température de sortie 'd'eau en mode continu et intermittent.	36
Figure IV.10 : Un échangeur de chaleur de 750 mètres divisé en 5 parties.....	37
Figure IV.11 : l'évaluation de température dans les cinq échangeurs.	38

List des tableaux

Tableau I.1: Classification des ressources géothermiques.....	5
Tableau I.2: Consistance du programme de développement des énergies renouvelables	7
Tableau I.3: Caractéristiques des sols.....	10
Tableau I.4: Caractéristiques thermiques des matériaux des tubes	10
Tableau III.1 : Les compositions de l'échangeur chaotique longueur de 100m	23
Tableau III.2 : Les conditions aux limites.....	29
Tableau IV.1 : Les résultats comparatifs de calcul.....	32
Tableau IV.2 : Les températures d'eau dans la sortie de l'échangeur ont fonction des matériaux ...	34
Tableau IV.3 : Les températures d'eau dans la sortie de l'échangeur ont fonction des natures du sol.....	34
Tableau IV.4 : Les températures d'entrée et de sortie dans chaque échangeur	37

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité
T	Température	[°C]
T_{sol}	La température du sol	[°C]
t	Temps	[s]
x, y, z	Coordonnées cartésiennes	[m]
λ	Conductivité thermique	[W/m.k]
λ_{sol}	Conductivité thermique du sol	[W/m.k]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
ρ_{sol}	Masse volumique du sol	[kg/m ³]
C_p	Capacité calorifique	[kj/kg.k]
$C_{p_{sol}}$	Capacité calorifique du sol	[kj/kg.k]
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\mu}$	Constantes de la turbulence (modèle k-ε)	[-]
μ_t	Viscosité turbulente	[m ² /s]
μ	Viscosité dynamique	[m ² /s]
$\sigma_k, \sigma_{\epsilon}$	Nombres de Prandtl turbulent associés à k et ε Respectivement	[-]
Pr_t	Nombre turbulent de Prandtl pour l'énergie	[-]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
P	Pression	[Pa]

Introduction générale :

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie, à travers l'échangeur de chaleur que transférer la chaleur lorsqu'il existe une différence de température entre deux points sont mises en contact. Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans les processus de refroidissement et de chauffage. En effet, le transfert de chaleur est nécessaire pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, ... etc.

La région de Biskra est considérée comme une zone riche en eau souterraine, qui peut être utilisée pour l'irrigation, car il y a un réservoir d'eau naturel sous cette zone qui atteint une profondeur de 2000 mètres et s'appelle nappe albiennne.

En effet, le problème de la température de l'eau de source chaude sur la nappe de l'albien qui atteint 60°C est d'une grande importance et a un impact social et économique sur la culture du palmier dattier et d'autres arbres et plantes dans la région.

D'autre part, Par conséquent, ce problème qui provoque de grandes pertes doit être résolu, et l'une de ces solutions est de refroidir cette eau, il existe de nombreuses méthodes traditionnelles de refroidissement de l'eau qui étaient utilisées dans le passé et sont encore utilisées aujourd'hui.

L'une des méthodes modernes de refroidissement est l'utilisation d'échangeurs de chaleur donc on peut profiter de la différence entre la température de la terre et celle de l'eau nous permettons d'utiliser un échangeur de chaleur dans lequel une eau s'écoule, et cet échangeur de chaleur est enterré dans le sol à une profondeur mesurée, ce qui permet le transfert de chaleur du l'eau jusqu'au sol, de cette manière, la terre peut être exploitée et considérée comme une énergie renouvelable, gratuite et non polluante pour refroidir les eaux souterraines .

En examinant les opinions des agriculteurs et des experts, et en étudiant certaines des références spécialisées dans la science de l'agriculture, nous avons constaté que l'eau souterraine de l'Algérie est la meilleure option pour arroser les palmiers et les cultures, mais le problème de la température élevée empêche cela.

Pour cette raison, nous avons commencé par une étude théorique approfondie sur ce sujet, puis nous avons proposé les solutions nécessaires et modernes pour que ces solutions relèvent des énergies renouvelables non polluées, puis avons fait une simulation de ces solutions pour vérifier leur efficacité avant de proposer leur application dans le monde réel.

À cet égard, nous créerons ce travail, qui est divisé en chapitres, dans le premier chapitre qui contient des concepts de base et complets sur le thème de l'énergie géothermique, et l'énergies thermiques, l'échangeurs de chaleur et les eaux souterraines ... etc.

Le deuxième chapitre contient des recherches bibliographiques sur des expériences similaires antérieures dans ce domaine (refroidissement / chauffage) de l'eau ou l'air pour d'avoir des idées sur ce problème.

Le troisième chapitre, nous exposons les équations mathématiques qui gouvernent le phénomène physique à étudier, La formulation différentielle, la discrétisation l'additionnement et la

résolution du système d'équations algébriques. Ensuite on donne une brève présentation sur la méthode numérique choisie pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS Fluent V19.3), et expliquer toutes les étapes nécessaires pour simuler ce problème.

Le dernier chapitre interprète la description du problème et la procédure de résolution par le logiciel commerciale « ANSYS fluent V19.3 » et présentons nos résultats numériques et leurs discussions, ensuite l'étude est achevée par une conclusion générale, qui résume les différentes étapes de l'étude, ainsi, que les résultats obtenus. Aussi, nous proposons quelques perspectives sur la continuité de la recherche sur le sujet.

CHAPITRE I

Généralités

I.1 Introduction :

« Géothermie » vient des mots grecs géo (Terre) et thermie (chaleur). Ainsi, la géothermie signifie la chaleur de la Terre. La géothermie peut être définie comme l'étude de la distribution des températures dans la Terre et des phénomènes qui influencent cette distribution [1].

L'objectif principal de ce travail est étant de libérer le maximum d'énergie thermique avec un coût financier faible et expertiser la performance thermique de l'échangeur de chaleur enterré.

Donc dans ce chapitre notre objectif est donné une vue générale sur le thème par fait une étude théorique dans ce domaine et pour clarifier les définitions de la géothermie et son énergie et comment l'exploiter.

I.2 Historique :

Les historiens ont découvert que depuis l'époque paléolithique, les humains ont utilisé des sources chaudes pour se baigner et à d'autres fins. C'est une forme d'utilisation du système géothermique. Les Romains ont été les premiers à utiliser l'énergie géothermique qui a émergé comme sources d'eau chaude pour chauffer les pièces et les bains publics. Ils ont également été les premiers à commercialiser la géothermie. Après avoir conquis Aquae Sulis (situé dans le Royaume-Uni moderne), ils ont canalisé l'eau chaude vers les bains publics. En Islande, un bain à remous de plus de mille ans construit par des autochtones d'origine a été découvert récemment.

La première pompe à chaleur a été inventée en 1852 par Lord Kelvin. Cependant, c'est Heinrich Zoelly en 1912 qui a fait son utilisation pour attirer la chaleur de l'intérieur de la Terre.

En 1940, Robert C. Webber a utilisé pour la première fois sa pompe géothermique de 2,2 kW comme système d'échange direct. Le premier système de chauffage géothermique commercial a été conçu par J. Donald Kroeker en 1946. Il a chauffé le bâtiment du Commonwealth situé à Portland, le professeur Carl Nielsen de l'Ohio State Université a inventé la première version résidentielle en boucle ouverte du système géothermique. Il l'a inventé chez lui. En raison de la crise pétrolière de 1973.

De nos jours, il existe des millions de foyers, d'usines et de bureaux équipés d'un système géothermique dans le monde. Selon un rapport, aux États-Unis, environ quatre-vingt mille unités sont installées chaque année, alors qu'en Suède, elles sont vingt-sept mille [2], [3].

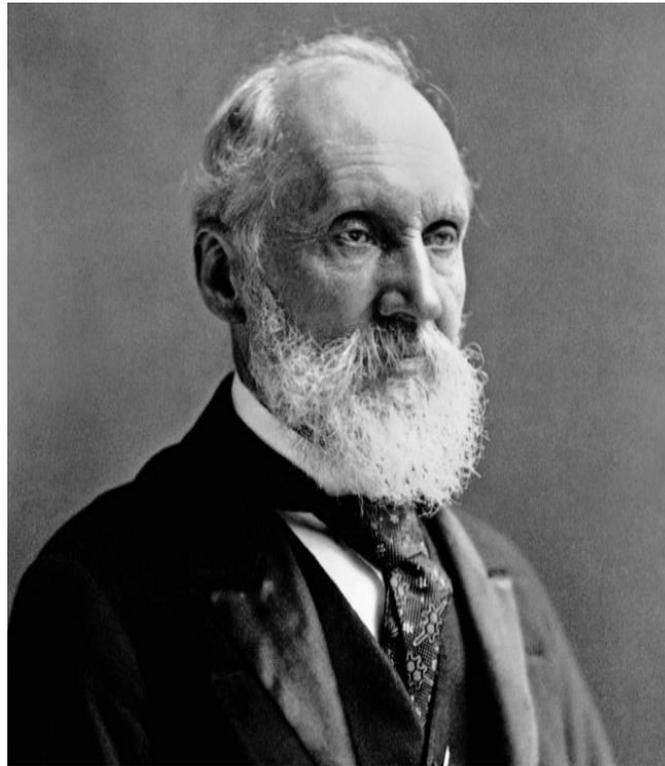


Figure I.1: William Thomson, 1st Baron Kelvin (1824-1907) [5].

I.3 L'Energie géothermique :

L'énergie géothermique est l'énergie contenue sous forme de chaleur à l'intérieur de la Terre. L'origine de cette chaleur est liée à la structure interne de notre planète. Malgré le fait que cette chaleur soit présente en quantités énormes, pratiquement inépuisables dans la croûte terrestre, sans parler des parties les plus profondes de notre planète, elle est inégalement répartie, rarement concentrée et souvent à des profondeurs trop grandes pour être exploitées industriellement [1].

Quand on creuse profondément sous terre, par exemple une mine ou un forage, on s'aperçoit que la température augmente peu à peu, en moyenne de 3°C par 100 mètres. C'est ce qu'on appelle le gradient géothermique.

I.4 Importance de la géothermie :

Son importance est issue de l'augmentation des prix de l'énergie et le besoin d'émettre moins de gaz à effet de serre. Tout Ceci la rend plus attrayante, une énergie d'avenir, renouvelable, constante et non-polluante. [1]

I.5 Les avantages et les inconvénients de la géothermie [4] :

I.5.1 Les avantages :

- 1- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent),
- 2- C'est une source d'énergie quasi-continue,

- 3- C'est une source d'énergie assez discrète, d'autant plus que les installations comme les forages géothermiques n'entraînent pas de grands changements visuels de leur entourage immédiat. En effet, la tête du puits de ces forages se trouve enterrée dans le sol, et n'est pas visible de l'extérieur. La géothermie à basse énergie peut servir au chauffage des foyers,
- 4- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne) et disponible dans tous les sous-sols de la planète,
- 5- La géothermie est une énergie renouvelable et propre (pas de déchets à stocker, très peu d'émissions de CO₂).

I.5.2 Les inconvénients :

- 1- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer),
- 2- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques. Risque de réchauffement du site de forage,
- 3- La réintroduction de l'eau utilisée pour la production de l'énergie dans le sous-sol nécessite des interventions de manière à ce que cette eau usagée soit réintroduite à une certaine distance du puits. Cela augmentera la température de l'eau et évitera ainsi d'éventuels refroidissements du sous-sol aux proximités du puits d'extraction,
- 4- Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques,
- 5- Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental.

I.6 Classification des ressources géothermiques [5] :

Tableau I.1: Classification des ressources géothermiques [6].

Les types de ressources	Haute énergie	Base énergie	Très base énergie
La profondeur	Plus de 1500m	1500-2500m	Centaines mètres.
La température	80-300°C	30-100°C	10-30°C
L'objectif	Production d'électricité et de chaleur à la fois.	Le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur et certaines applications industrielles.	La climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal et le chauffage et la climatisation.
La moyen	Une turbine à vapeur pour l'électricité et de récupération des condensats de vapeur pour la chaleur.	Pompe à chaleur sur une nappe phréatique, afin de prélever et transférer de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer ou à climatiser.	Pompe à chaleur géothermique prélevant la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique.

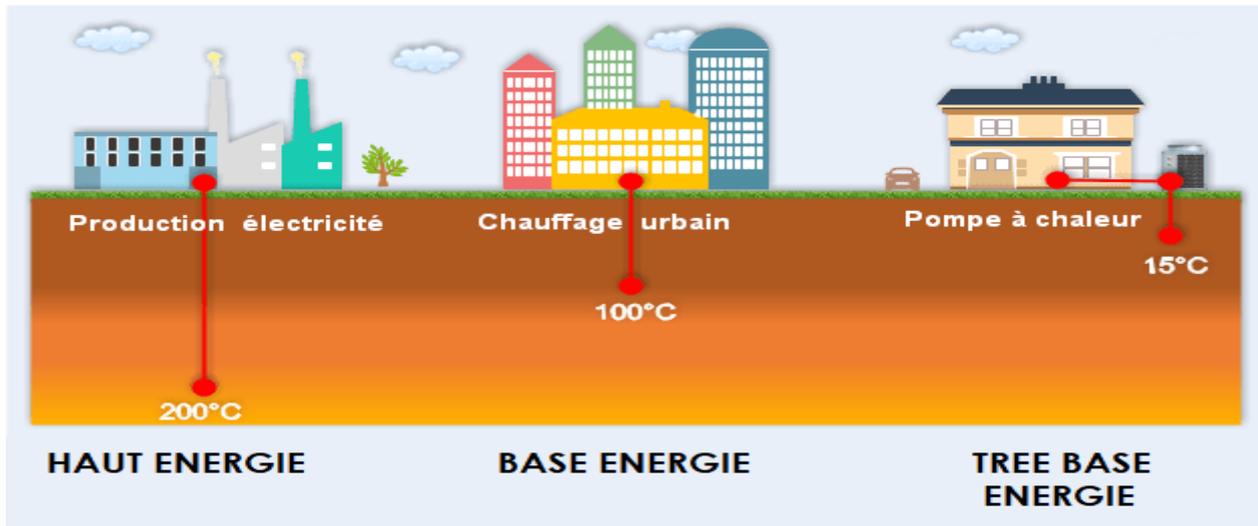


Figure I.2: Classification des ressources géothermiques [6].

I.7 Potentiel de l'Energie Géothermique dans l'Algérie [6] :

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cent (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m

- Zone de Relizane et Mascara,
- Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa,
- Zone de Guelma et Djebel El Onk.

I.8 L'utilisation de ressources géothermiques en Algérie :

Les ressources géothermiques en Algérie sont principalement utilisées pour la balnéologie et le chauffage des locaux et des serres. Récemment, de nouveaux projets ont été mis en place pour la pisciculture et l'agriculture, où le gouvernement algérien apporte un soutien financier de 80% à ces projets. Un projet de pompe à chaleur a été installé dans une école primaire (école primaire Sidi Ben Saleh) à Saida (nord-ouest de l'Algérie) à des fins de chauffage et de refroidissement. Une eau thermale de 46°C avec un débit de 25 m³ / h a été utilisée pour ce projet. Un projet similaire est prévu à Khenchla (NE Algérie) et une centrale géothermique à cycle binaire est également prévue à Guelma (NE Algérie). Récemment, certains projets de pisciculture de Tilapia ont démarré en Algérie (préfectures de Ghardaïa et Ouargla). Ces projets utilisent les eaux chaudes de l'aquifère Albien du sud de l'Algérie [7], [3].

I.9 Les eaux profondes dans l'Algérie :

L'aquifère Albien appelé aussi nappe du continental intercalaire (CI) est de loin le réservoir le plus important dans la région puisqu'il couvre la majeure partie du territoire saharien septentrional.

Le bassin ayant approximativement une superficie de 600.000 Km² avec une capacité en eau de l'ordre de 50.000 Milliards de mètres cube.

Ce réservoir est appelé improprement nappe albienne alors que géologiquement l'aquifère comprend :

- A la base, les grès rouges avec des intercalations argileuses du Barrémien,
- Suivi des couches aptiennes d'une épaisseur de 50 à 60 m. La partie inférieure est entièrement continentale alors que la partie supérieure comprend des argiles, des marnes, des anhydrites, des calcaires et des dolomies,
- Au sommet, l'Albien, avec une puissance de 250 m, et qui renferme principalement des grès rouges avec des intercalations argileuses L'ensemble à une épaisseur de l'ordre de 500 m.

Les eaux homogènes et fossiles du CI, ont été rechargées lors des périodes humides et plus froides du Pléistocène inférieur. Un fonctionnement hydraulique actuel se manifeste, caractérisé par un très faible taux de remplissage sinon négligeable, un écoulement vers le sud Est et des exutoires représentés par les forages profonds captant cette nappe [8].

I.10 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables :

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme suit :

Tableau I.2: Consistance du programme de développement des énergies renouvelables [7].

Unité : MW	1ère phase 2015-2020	2ème phase 2021-2030	TOTAL
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4 525	17 475	22 000

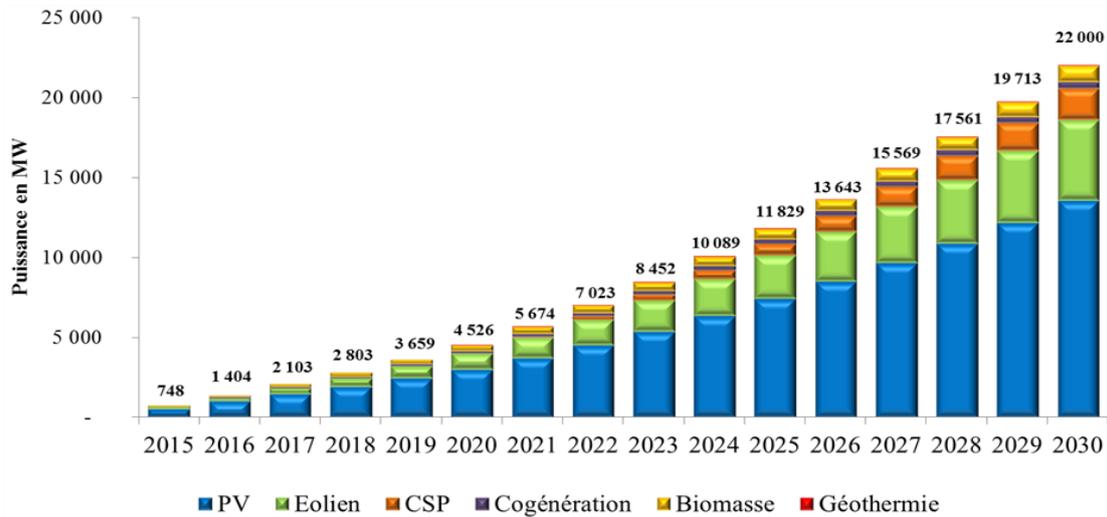


Figure I.3: Types d'énergies utilisées en Algérie et leur taux de consommation [7].

I.11 Les échangeurs de type Eau/Sol : [9]

Le sol est considéré comme un potentiel thermique très important qui peut être exploité dans la climatisation. La récupération de l'énergie thermique du sol se fait essentiellement à travers un réseau d'échangeurs de chaleur enterrés de type Eau/Sol est un système pour circuler l'eau dans les tuyau entrée sous-sol à une certaine profondeur. La température du sous-sol est moins variable que celle de l'air extérieur, cela permet refroidir ou chauffer l'eau en fonction de la différence entre les températures du sol et de l'eau. Où la chaleur est transférée de l'eau au sol dans le cas du refroidissement au contraire dans le cas du chauffage de l'eau, et ceci selon la première loi de la thermodynamique.



Figure I.4: Exemple d'un échangeur de chaleur enterré [5].

I.11.1 Échangeur de chaleur horizontale :

Les installations horizontales sont généralement les plus rentables pour les petites installations, en particulier pour les nouvelles constructions où une superficie suffisante est disponible. Ces installations consistent à enfouir des tuyaux dans des tranchées normalement une profondeur de 1 à 2 m. Jusqu'à six tuyaux, généralement dans des connexions parallèles, sont enterrés dans chaque tranchée, avec des séparations minimales d'un 30cm entre les tuyaux et de 3m à 4.5m entre les tranchées.

Les échangeurs de chaleur horizontaux nécessitent environ 232 m² de surface, mais sont faciles à installer et sont moins coûteux.

I.11.2 Échangeur de chaleur verticale :

Les installations verticales sont préférées dans de nombreuses situations. Par exemple, la plupart des grands bâtiments commerciaux et des écoles utilisent des Echangeur de chaleur verticale car la superficie de terrain requise pour les Echangeurs de chaleur horizontale serait prohibitive. Les Echangeurs de chaleur verticale sont également utilisées lorsque le sol est trop peu profond pour creuser des tranchées. Ce type de système nécessite 23–27 m² de surface. Le coût d'installation, en fonction de la profondeur du tube et de la géologie de l'emplacement, est plus qu'horizontal.

Les avantages de la boucle verticale sont ; moins d'espace requis, moins de variations dues à la température et aux propriétés thermiques du sol et une plus grande efficacité.

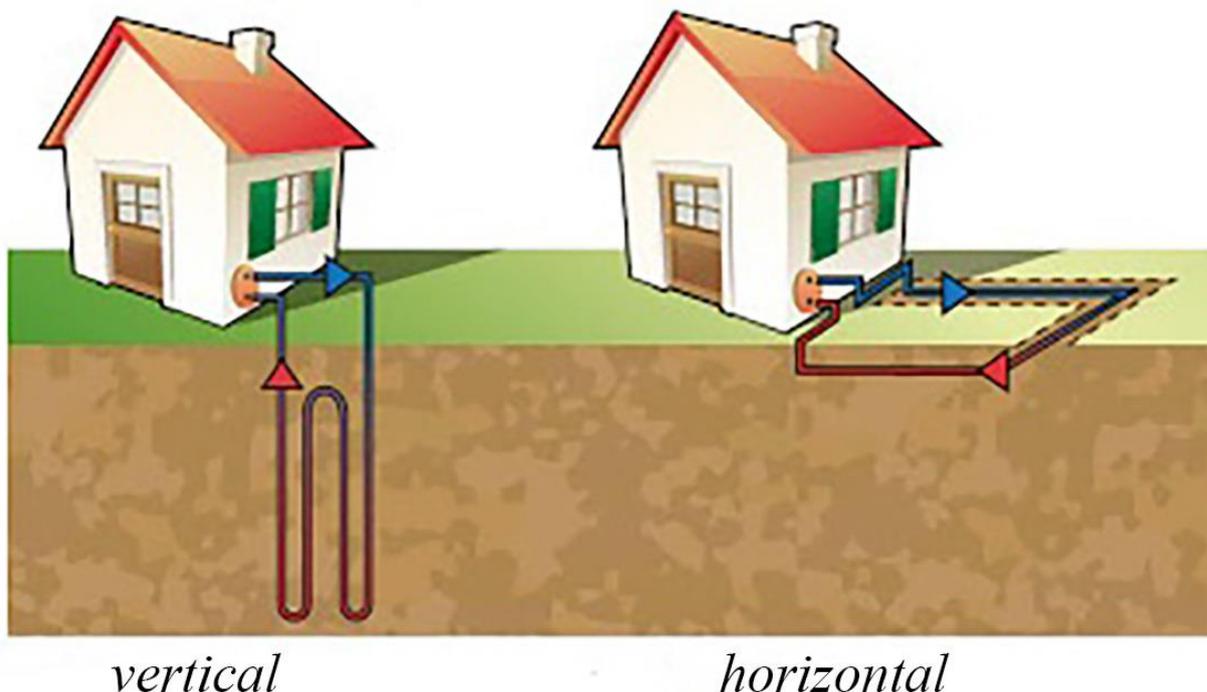


Figure I.5: exemple d'un échangeur vertical et horizontal [5].

I.12 Principaux paramètres de dimensionnement [5] :

I.12.1 La nature du sol et son taux d'humidité :

La capacité calorifique et la conductivité du sol ont une influence importante sur l'efficacité du système. Elles dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau en son sein. La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau. L'eau possède une capacité et une conductivité thermiques supérieures à celles des autres constituants du sol. Ainsi, un sol humide emmagasine mieux la chaleur qu'un sol sec et la transmet plus facilement à l'air dans les canalisations de l'échangeur. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air-sol en humidifiant le sol par arrosage.

Tableau I.3:caractéristiques des sols [6].

	P (kg/m³)	Cp (j/k.kg)	Λ(w/k.m)
Minéraux	2650	800	2.9
Sable et Gravier	220-1700	910-1180	2
Argile et Limon	1200-1880	1670-2500	1.5
Matière organique	1300	1900	0.25

I.12.2 La nature des tubes

La chaleur massique et la conductivité thermique du matériau constitutif des tubes sont généralement négligées dans les modèles consultés. En effet, la faible épaisseur des canalisations réduit fortement la capacité et la résistance thermique globale des tubes, qui influent alors très peu sur le comportement thermique de l'échangeur [5].

Tableau I.4:caractéristiques thermiques des matériaux des tubes [5].

	Density (kg/m³)	Cp (capacité calorifique) (j/kg.k)	Conductivité thermique (w/m.k)
Polyvinyl chloride (PVC)	1300	900	0.17
Polyéthylène haute densité (PE-HD)	1900	950	0.5
Cuivre	8978	381	387.6
Aluminium	2719	871	202.4

I.12.3 Le débit de fluide total :

Le débit total de fluide circulant dans l'échangeur doit assurer l'ensemble des besoins de renouvellement le fluide des pièces à ventiler. Le régime de ventilation peut varier selon le mode de fonctionnement (réduit en préchauffage, plus élevé en rafraîchissement). La détermination du débit de fluide total maximal constitue le premier paramètre de dimensionnement de l'échangeur.

I.12.4 Le nombre et le diamètre des tubes :

Le nombre et le diamètre des tubes définissent la section totale de tubes par laquelle va circuler l'air. Ils influent à la fois sur la vitesse d'écoulement de l'air et sur la surface de contact entre l'air et le sol. Ces paramètres sont ajustés en fonction du débit nominal de ventilation. En pratique, pour les installations domestiques, le diamètre utilisé se situe entre 16 cm et 20 cm, mais il peut être bien supérieur sur des installations de grande taille. Le nombre de tubes est conditionné par l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur.

I.12.5 La longueur des tubes :

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique de l'échange thermique L , qui peut être obtenue en confrontant le surcoût économique de l'échangeur (constant avec la longueur) à l'économie d'énergie apportée par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un ou deux tubes beaucoup plus longs.

I.13 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions qui nous ont rencontrés dans cette étude comme la géothermie et son énergie, les échangeurs de chaleur entrée et ses types, La place de cette énergie en Algérie entre les autres énergies renouvelables, ainsi que la richesse hydrique interne et ses propriétés.

Chapitre II

Revue bibliographique

II.1 Introduction :

Après avoir essayé dans le chapitre précédent donné une vue générale sur le thème, il nous semble qu'il est indispensable de présenter dans ce chapitre une revue bibliographique. Qui résume certains des travaux précédents pour déduire et construire des comparaisons.

II.2 Synthèse bibliographique :

Naili et al. (2010) [10], ont proposé une étude analytique qui consiste à évaluer les performances thermiques et à optimiser les paramètres de fonctionnement de l'échangeur de chaleur eau/sol utilisé dans la récupération de l'énergie thermique du sol précité. L'objectif de cette l'étude analytique est de chercher à obtenir une puissance d'échange donnée avec la plus faible surface d'échange et le meilleur débit d'eau, autrement dit, au meilleur coût d'investissement et d'exploitation. Les résultats ont montré une bonne concordance, de l'ordre de 7 %, entre les résultats du modèle analytique et les points expérimentaux.



Figure II.1: Vu de l'échangeur [12].

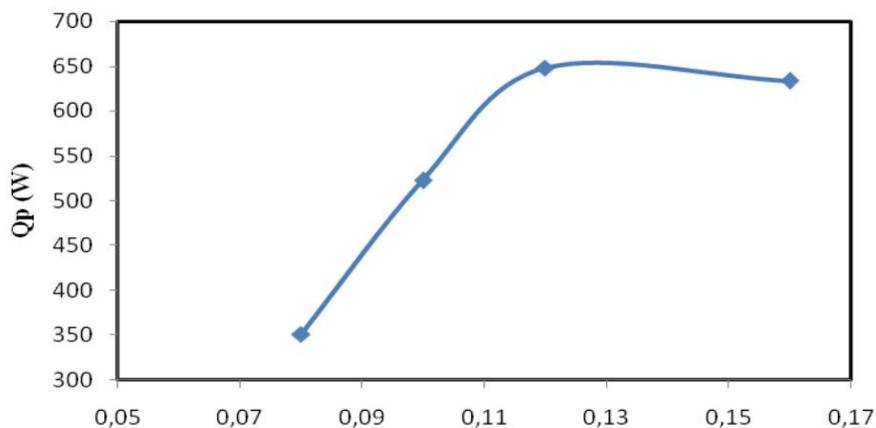


Figure II.2 : Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour $T_e = 35$ [10].

Vaz et al. (2011) [11], Ont présenté une étude expérimentale pour un cycle annuel réalisé au sud du Brésil. Une solution numérique des équations de conservation est effectuée avec un code de calcul 'FLUENT' basé sur la méthode des volumes finis. Cette recherche vise à minimiser la consommation d'énergie conventionnelle dans le processus de renouvellement de l'air dans les environnements bâtis. Tout d'abord, la construction et la surveillance d'un système composé essentiellement de trois conduits enfouis dans le sol (échangeurs de chaleur sol-air) reliés à l'environnement bâti (Casa Ventura). En arrière, une modélisation informatique a été développée pour représenter adéquatement l'expérience.

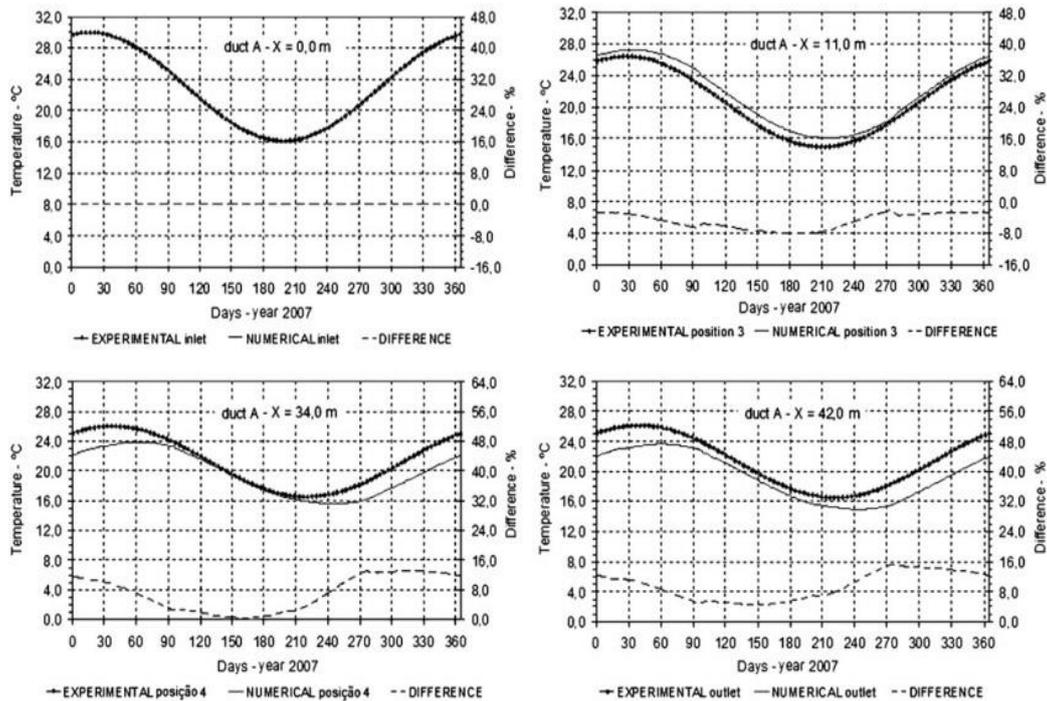


Figure II.3 : Température de l'air pendant l'année [11].

Bansal et al. (2013) [12], Ont préparé une installation expérimentale à Ajmer en Inde. Le système expérimental est désigné et développé comme il est indiqué sur la figure 1. Il est constitué d'un tube en PVC de 0,10 m de diamètre intérieur, de 60 m de longueur totale et enterré dans un sol sec à une profondeur de 3,6 m en sous-sol. Des vannes à écrou sont montées sur la longueur du tube pour contrôler l'écoulement de l'air. Un ventilateur à vitesse variable ayant une vitesse maximale de 2800 tr / min et un débit maximal de 0,093 m³/s est placé à l'entrée du tube pour gérer l'écoulement de l'air dans le tube. Les auteurs ont étudié la température du sol enveloppant le tube, la conductivité thermique du sol et le mode de fonctionnement continu sur la performance thermique. La validation entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation par le solveur CFD a montré une différence mineure de l'ordre de 3,4-8 %. Un écart de 2,9 K est enregistré comme maximum de détérioration de la différence de température en mode de fonctionnement continu durant 24 h avec 0,52 (W/m.K) de conductivité thermique. Ils ont conclu que la longueur initiale du tube enterrée et la conductivité thermique du sol jouent un rôle important dans la performance thermique des échangeurs air sol. L'épaisseur de la couche adiabatique du sol enveloppant l'échangeur est observée égale au diamètre du tube.

Ahmouda et al. (2014) [13], Fait une étude intéressante au rafraîchissement par la géothermie. Cette technique très simple et moins chère n'est pas pratiquée chez nous. Elle réduit la consommation des hydrocarbures en limitant la pollution ; Cette technique renouvelable exploite l'énergie thermique du sol dans un échangeur enterré dit puits canadien ou puits provençal utilisé pour chauffer ou rafraîchir l'eau qui circule dans des tubes enterrés à quelques mètres de profondeur.

Mathur et al. (2015) [14], Ont effectué une étude numérique basée sur l'environnement FLUENT pour étudier la saturation du sol, et ont développé un modèle numérique pour étudier la performance thermique d'un échangeur air sol en régime transitoire pour trois cas de conductivité du sol : 0,52 w/m.k pour le (sol 1), 1,00 w/m.k pour le (sol 2) et 1,28 w/w.k pour le (sol 3). Compte tenu des trois modes de fonctionnement pour un cycle de 12 h, le premier mode fonctionne 12 h sans repos, le deuxième mode fonctionne 60 min et prend une pose de 20 min et le dernier mode fonctionne 60 min et reste éteint pour 40 min. Ils ont comparé le deuxième et le troisième mode avec le premier mode (figs. 4 et 5) pour évaluer l'intérêt du mode intermittent. Ils ont conclu que le sol à une faible conductivité thermique se sature rapidement en comparaison avec le sol à une forte conductivité thermique. L'accumulation de la chaleur dans le sol voisin du tube pendant le fonctionnement continu de l'échangeur air sol peut être minimisée en exploitant l'échangeur en mode intermittent. L'échangeur enterré dans un sol de forte conductivité thermique peut fonctionner en mode continu ; par contre, il est obligé d'exploiter l'échangeur enterré dans un sol de faible conductivité thermique en mode intermittent.

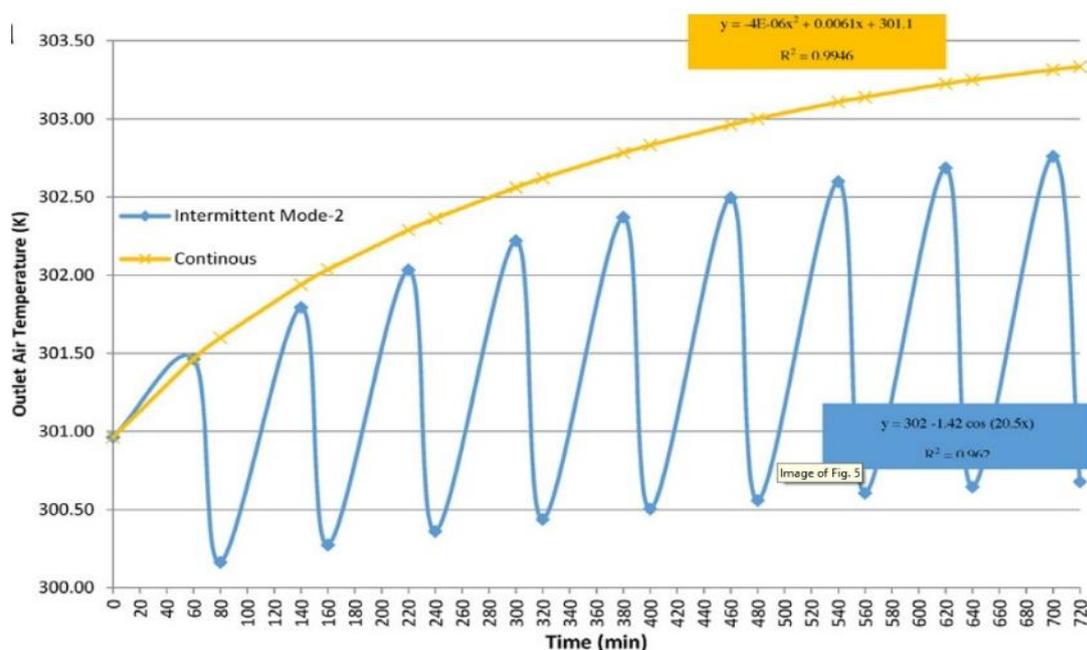


Figure II.4 : Température de sortie de l'air en mode continu et intermittent [14].

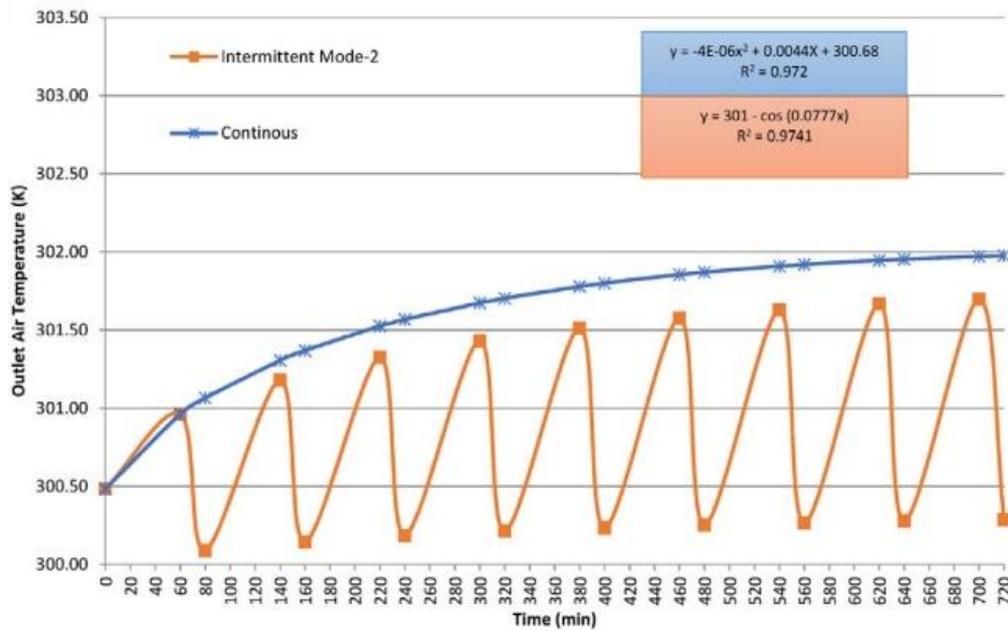


Figure II.5 : (b) Température de sortie de l’air en mode continu et intermittent [14].

Boughnmi et al (2015). [15] ont fait une étude expérimentale sur un système géothermique. Ce système est constitué d’un échangeur en polyéthylène de type corbeille enterré à 3 m de profondeur dans un puits de diamètre 150 cm, d’une serre de type Chapel de superficie 3m² et d’une pompe à chaleur réversible eau/eau de puissance frigorifique 16 kW.

Udhaiyhanan et al (2016). [16] Les GHE (Ground Heat Exchanger) sont utilisés pour échanger de l’énergie thermique entre le sol et le fluide de travail. À un certain niveau du sol, la température reste constante et nous pouvons donc maintenir une température constante au-dessus du niveau du sol. L’objectif du projet est d’analyser séparément les conditions de travail, c’est-à-dire les opérations de chauffage et de refroidissement et de quantifier la performance de deux types de pompes à chaleur au sol. Dans ce cas, il a considéré un échangeur de chaleur au sol à tube en U et multitube. La température d’entrée du fluide de travail est considérée comme 283 K et 333 K pour les opérations de chauffage et de refroidissement respectivement. Le débit est de 2 litres / seconde. L’analyse des deux types d’échangeurs de chaleur au sol montre

- 1 / L’efficacité du tube multiple est supérieure à celle du tube en u dans le taux d’échange de chaleur et également la température de transfert de chaleur dans l’eau ainsi que les paramètres du sol.
- 2 / La température du sol augmente et reste constante en mode de refroidissement continu, et elle diminue et reste constante en mode de chauffage continu. Si l’opération se déroule par intervalles, la température du sol peut être maintenue pour extraire une efficacité maximale.
- 3 / Le taux d’échange de chaleur dans le court laps de temps avec mode discontinu augmente pour les échangeurs de chaleur à tubes en U et multitubes par rapport au fonctionnement continu. Le fonctionnement des GHE en peu de temps en fonctionnement discontinu améliore leurs performances thermiques.

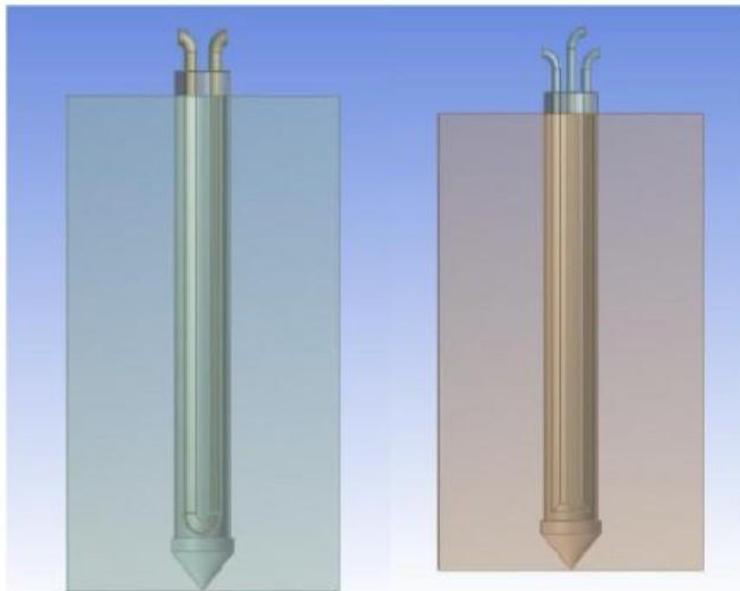


Figure II.6 : Modèle de GHE à tubes en U et multitubes [16].

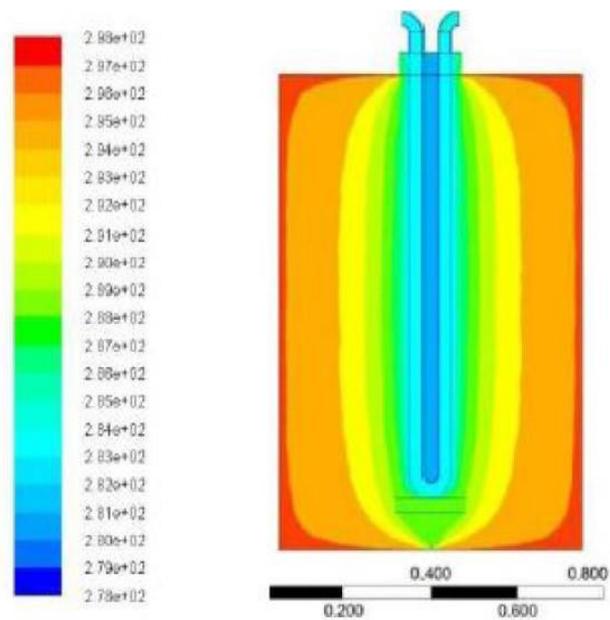


Figure II.7 : Contour de température de l'opération de refroidissement (multitube) [16].

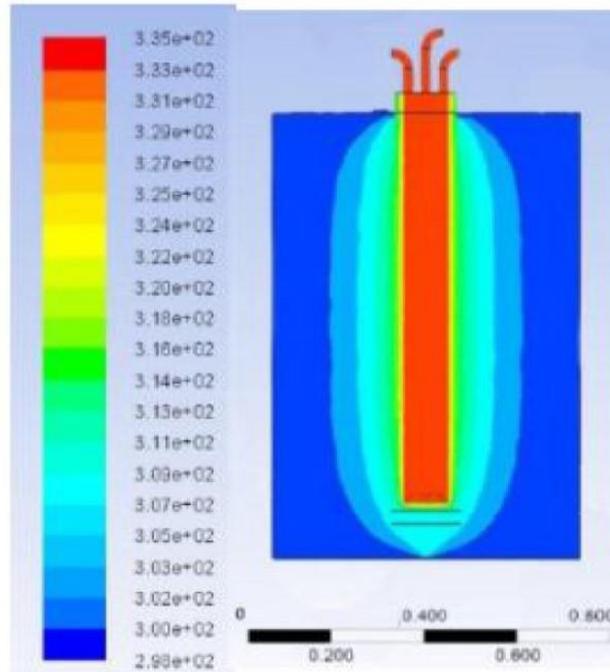


Figure II.8 : Contour de température de l'opération de chauffage (tube en U) [16].

Jakhar et al (2016). [17] Ont fait une étude analytique d'un échangeur eau/sol EWHE (Earth Water Heat Exchanger). Le système est conçu et simulé dans l'outil d'analyse transitoire TRNSYS (v17.0) en faisant varier ses paramètres de fonctionnement, notamment le débit massique, la longueur, les matériaux des tuyaux et le diamètre des tuyaux enfouis. La température du sol en profondeur a également été évaluée à partir de la simulation et il s'avère que la profondeur de 3,5 m est suffisante pour l'enfouissement des tuyaux. Les résultats montrent qu'il existe une corrélation inverse entre la longueur du tuyau et la température de sortie de EWHE. De plus, les performances de l'EWHE diminuent avec une augmentation du débit massique.

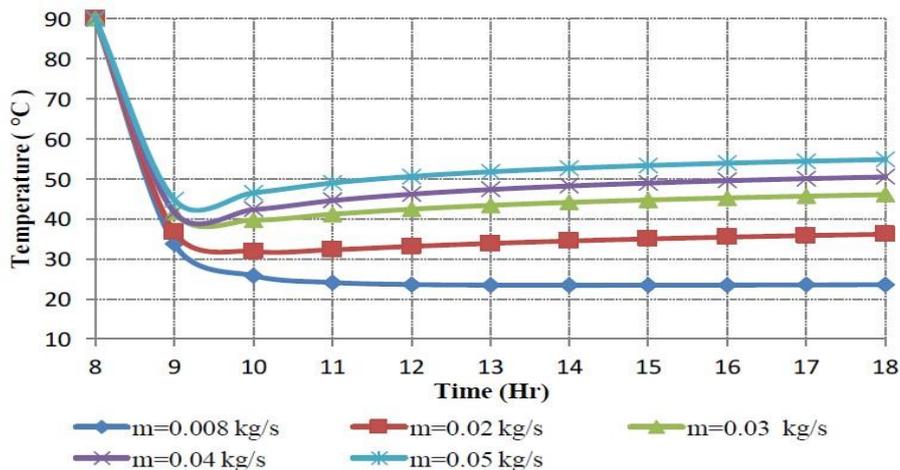


Figure II.9 : EWHE outlet temperature vs mass flow rate (pipe ϕ 25 mm, Length= 90 m, Pipe material= HDPE) [17].

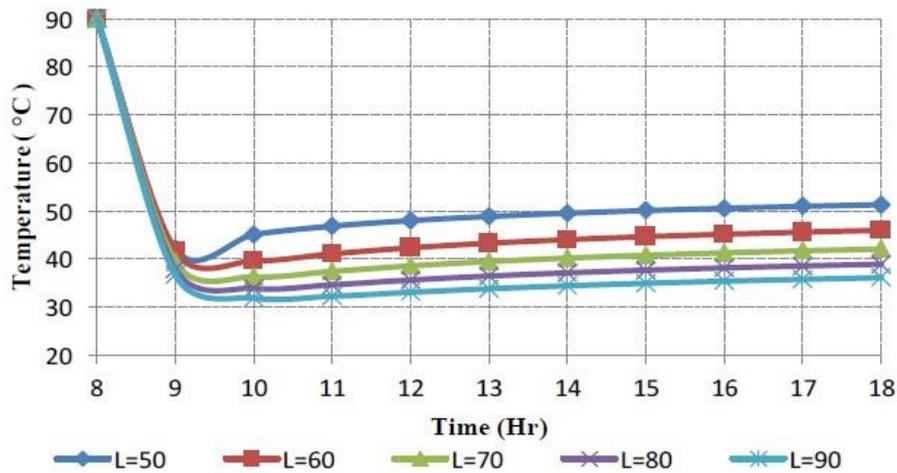


Figure II.10 : EWHE outlet temperature vs pipe length (pipe ϕ 25 mm, flow rate = 0.02 kg/s, Pipe material= HDPE) [17].

Atwany et al (2019). [18] Ont fait une étude analytique d'un échangeur eau/sol horizontal et l'impact de la conductivité thermique du sol, la vitesse de l'eau, la température d'entrée de l'eau et la température de surface ont été évalués. Ils créent à l'aide d'ANSYS Fluent un modèle 2D pour étudier les performances d'un échangeur de chaleur eau-terre horizontal (EWHE). Les résultats ont indiqué une relation directe entre la conductivité thermique du sol et le taux de transfert de chaleur. En revanche, une relation inverse a été observée entre la température de surface du sol et le taux de chaleur échangée. En conclusion, l'effet de la conductivité thermique du sol est significatif et a une plus grande influence par rapport à d'autres paramètres. La profondeur à laquelle le tuyau est enterré est critique car le gradient de température affectera non seulement le taux d'échange de chaleur mais également la conductivité thermique du sol.

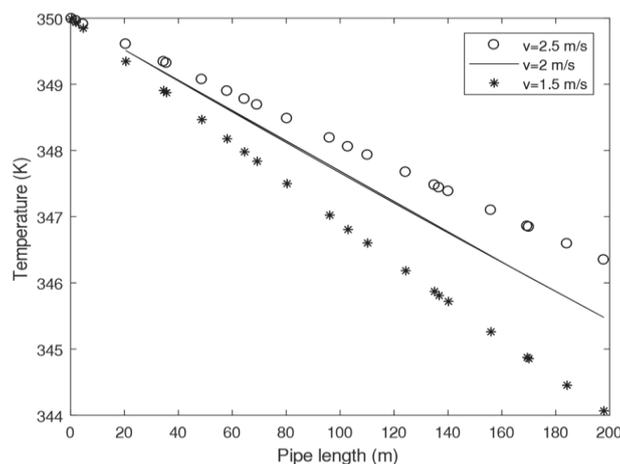


Figure II.11 : Effet de la vitesse du fluide sur la température de sortie de l'eau [18].

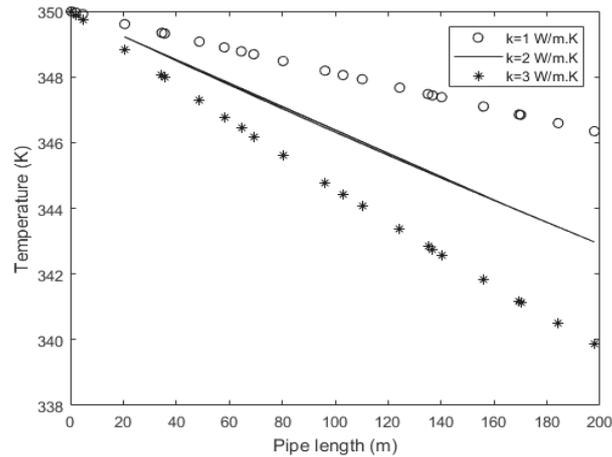


Figure II.12 : Effet de la conductivité thermique du sol sur la température de sortie de l'eau [18].

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mené une synthèse bibliographique antérieurs qui traite du fonctionnement des échangeurs de chaleur géothermiques et du refroidissement de l'eau à travers ces échangeurs de chaleur, puis nous les avons résumés afin d'avoir une vue d'ensemble complète du problème auquel nous sommes confrontés et des moyens de le résoudre en en utilisant ce que les chercheurs ont atteint et comparez leurs résultats avec les résultats qui seront calculés dans les prochaines étapes.

Chapitre III

**Formulation mathématique,
modélisation numérique et
dimensionnement de
l'échangeur**

III.1 Introduction :

Ce chapitre résume la partie de la formulation mathématique et la modélisation numérique de notre étude, comme cité précédemment, nous avons choisi le logiciel commerciale ANSYS Fluent V19.3 pour la résolution du problème.

Le problème est défini par les lois de conservation de masse, quantité de mouvement et d'énergie.

Ces lois sont exprimées en termes d'équations différentielles partielles qui seront discrétisées avec une technique basée sur la méthode des volumes finis.

Les hypothèses adoptées lors de l'analyse numérique sont les suivantes :

- Le sol est considéré homogène,
- Les caractéristiques du sol sont considérées constantes (la conductivité thermique λ_{sol} , la masse volumique ρ_{sol} , La capacité calorifique massique C_{sol}),
- A partir d'une certaine profondeur les températures restent constantes dans le sol,
- En considère que l'écoulement est tridimensionnel (x, y, z) et Incompressible $\rho = \text{cst}$, écoulement turbulent,
- Dans le calcul numérique, la température de l'eau d'entrée est considérée constante.

III.2 Ansys Fluent :

Le logiciel Fluent offre de nombreuses capacités de modélisation physique requises pour modéliser le flux, les turbulences, le transfert de chaleur et les réactions pour les applications industrielles. Celles-ci vont du flux d'air sur une aile d'avion à la combustion dans un four, des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières, du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs et de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées. Fluent couvre une gamme étendue, ceci incluant des modèles spéciaux, avec des capacités de modélisation de la combustion dans les cylindres, de l'aéro-acoustique, des turbomachines et des systèmes multiphasiques [19].

III.3 Définition du CFD :

La mécanique des fluides numérique ou CFD (Computational Fluid Dynamics) est l'analyse des systèmes d'écoulement des fluides, le transfert de la chaleur et tous les phénomènes associés tels que les réactions chimiques en utilisant la simulation par ordinateur. La technique est très puissante et couvre un large champ d'applications industrielles et non industrielles tels que : l'aérodynamique, hydrodynamique, centrale électrique, turbomachines, de l'ingénierie de processus chimique, génie maritime, génie de l'environnement, de la métrologie, de l'ingénierie biomédicale, l'hydrologie et l'océanographie voire l'environnement externe et interne des bâtiments [19].

III.4 Les méthodes numériques :

Il y'a trois méthodes numériques qui sont utilisées généralement pour la résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles régissant les écoulements. Ces méthodes sont :

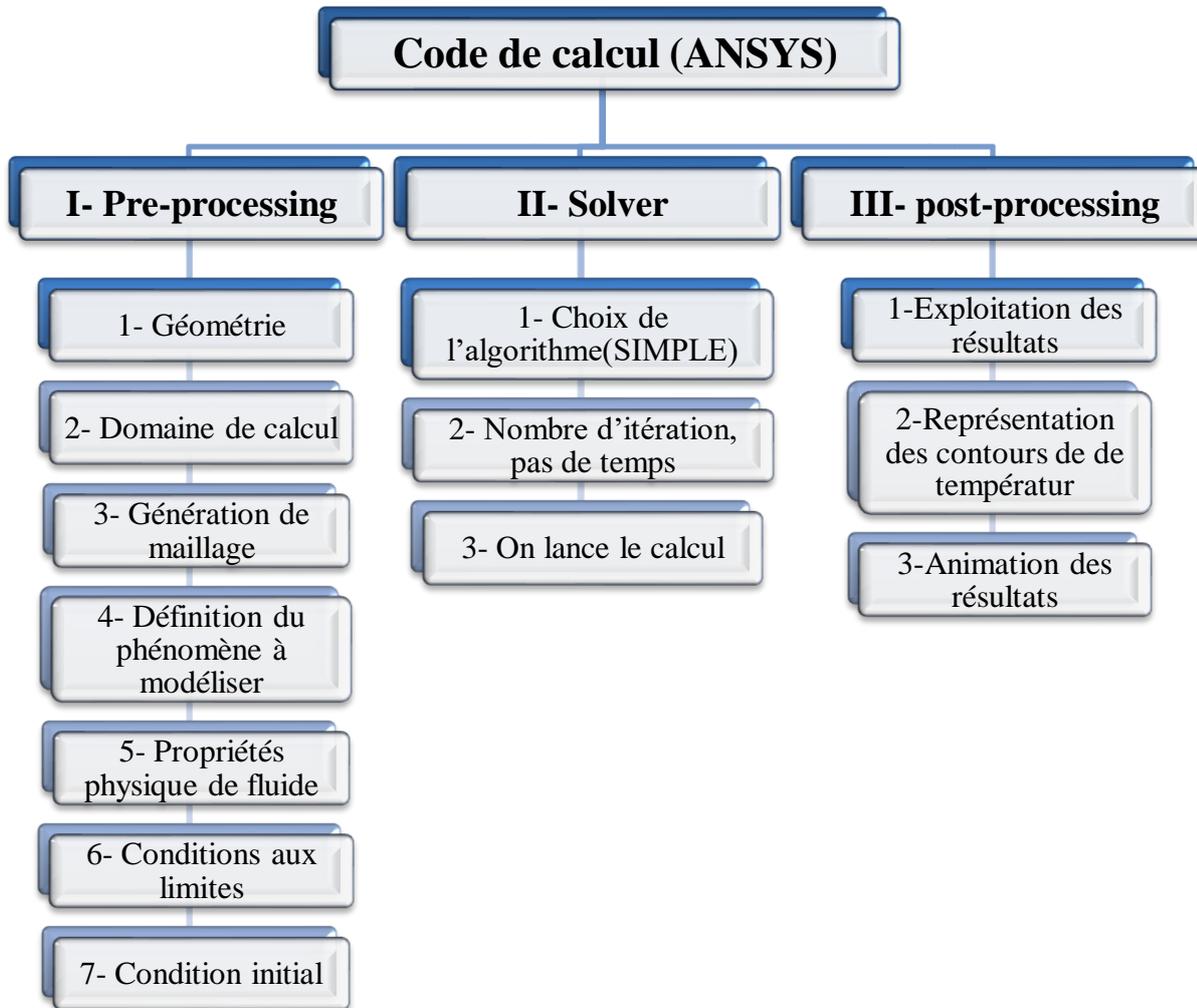
- La méthode des différences finies,

Chapitre III Formulation mathématique, modélisation numérique et dimensionnement de l'échangeur

- La méthode des éléments finis,
- La méthode des volumes finis.

Pour résoudre ce problème « Ansys fluent » utiliser la méthode des volumes finis (MVF) qui elle basé sur l'algorithme SIMPLE « Semi Implicite Méthode For Pressure Linked Equation ».

III.5 Schéma de logiciel ANSYS :



III.6 Modélisation de la température du sol [20] :

L'évolution de la température du sol en fonction de la profondeur, pour les profondeurs qui nous intéressent, se calcule en considérant la réponse dans le temps aux variations de température de surface. Ceci nécessite un calcul en régime transitoire.

La température de la surface du sol s'écrit :

$$T_{\text{air}}(t) = T_m + A \sin (wt - \varphi) \tag{III. 1}$$

Avec :

T_m : Température moyenne sur l'année,

A : Amplitude des variations de température,

w : Pulsation,

φ : Déphasage,

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

L'équation obtenue après le développement théorique pour traduire la variation de la température du sol à une certaine profondeur est :

$$T_{\text{sol}}(x, t) = T_m + A \exp\left(-x \sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \quad (\text{III. 2})$$

III.7 Équations générales (Équations gouvernantes des problèmes étudiés) :

La formulation mathématique d'un écoulement de fluide ; est fondée sur les équations de la conservation qui sont [21]:

- Equation de la continuité,
- Équations de la conservation de la quantité de mouvement ;
- Équation de la conservation d'énergie.

Dans les coordonnées 3D cartésiennes et dans un écoulement incompressible, turbulent et transitoire, donc le système d'équation de ce problème sera alors :

III.7.1 Équation de continuité :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III. 3})$$

III.7.2 Équations de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\bar{d}(\rho \bar{U}_i)}{\bar{d}t} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{P} + \frac{2}{3} \rho k_t \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) \bar{S}_{ij}] \quad (\text{III. 4})$$

III.7.3 Équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\bar{d}(\rho c_p T)}{\bar{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial c_p T}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \bar{P})}{\partial x_j} + \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \rho \epsilon^h \quad (\text{III. 5})$$

Où : $\mu_t = C_\mu \rho k_t^2 / \epsilon^h$

III.7.4 Modèle turbulence k-ε standard :

Pour la turbulence, plusieurs modèles sont proposés. Le modèle k-ε standard (qu'on a adopté pour cette étude) est un modèle semi empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente **k** (eq III.6) et de sa dissipation **ε** (eq III.7). L'équation modélisée de l'énergie turbulente est dérivée de l'équation exacte. Celle de la dissipation est obtenue sur la base d'un raisonnement physique. Dans ce modèle, l'écoulement est supposé complètement turbulent. Sont obtenus à partir des équations suivantes de transport [21] :

L'énergie cinétique de turbulence

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad \text{(III. 6)}$$

Taux de dissipation

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad \text{(III. 7)}$$

Coefficients

$$C_{\epsilon 1} = 1.44 ; C_{\epsilon 2} = 1.92 ; C_\mu = 0.09 ; \sigma_k = 1.0 ; \sigma_\epsilon = 1.3$$

III.8 Descriptions de l'échangeur chaotique :

Pour crée l'échangeur chaotique ont choisi les dimensions suivantes (d = 0.11 m de diamètre intérieur et e = 0.002 m pour l'épaisseur). Et assemblant des tubes, des coudes et des t'es. La longueur totale du tube est 100 m. Répéter plusieurs fois une forme donnée devient un échangeur de chaleur de type chaotique.

Tableau III.1 : les compositions de l'échangeur chaotique longueur de 100 m.

Tubes linéaires verticaux	2
Les t'es	22
Les coudes	90

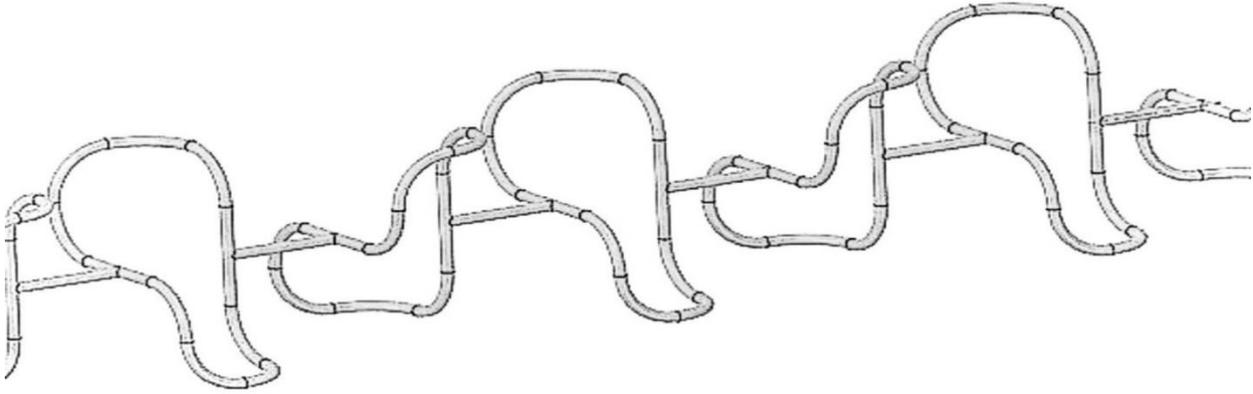


Figure III.1 : Vu de l'échangeur sous forme chaotique.

III.9 Menu principal du logiciel :

L'interface graphique de Workbench ANSYS est montrée sur la (**Figure III.2**) et contient les éléments suivants et on peut choisir le type d'étude ça dépend le cas. Dans notre cas un échangeur de chaleur on choisit fluid flow (fluent) on suivons les étapes de l'étude commençons par dessiner la géométrie jusque a le résultat.

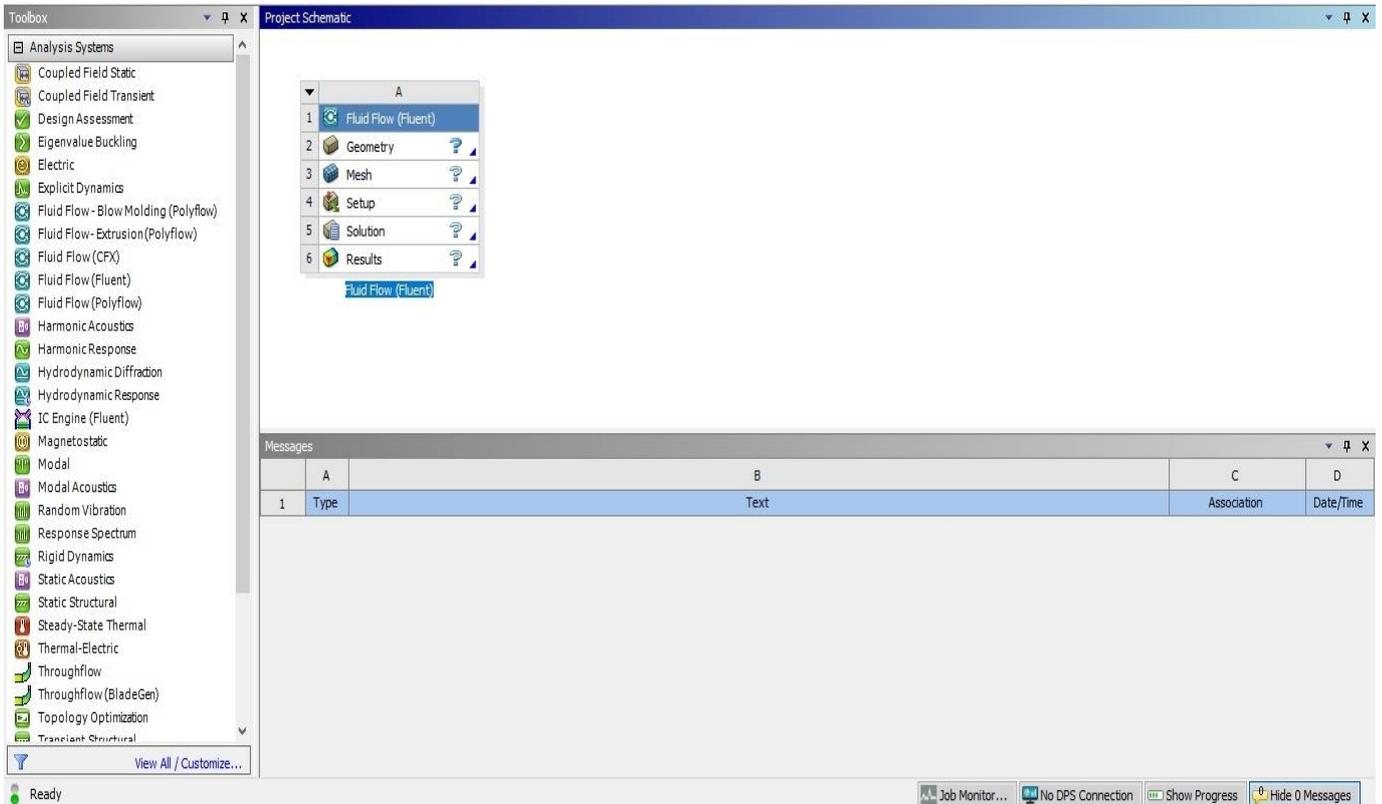


Figure III.2 : La fenêtre principale du logiciel ANSYS Workbench.

III.10 Les différentes étapes de simulation :

III.10.1 Dessin de la géométrie :

Dans ces étapes ont utilisé l'option Géométrie qui se trouve en Fluent. On a réalisé trois géométries ou « pièces » (eau, tube et le sol). Pour créer une géométrie, nous utilisons de nombreux outils tels que : extraction, baillage, révolution, habillage, lissage . . .

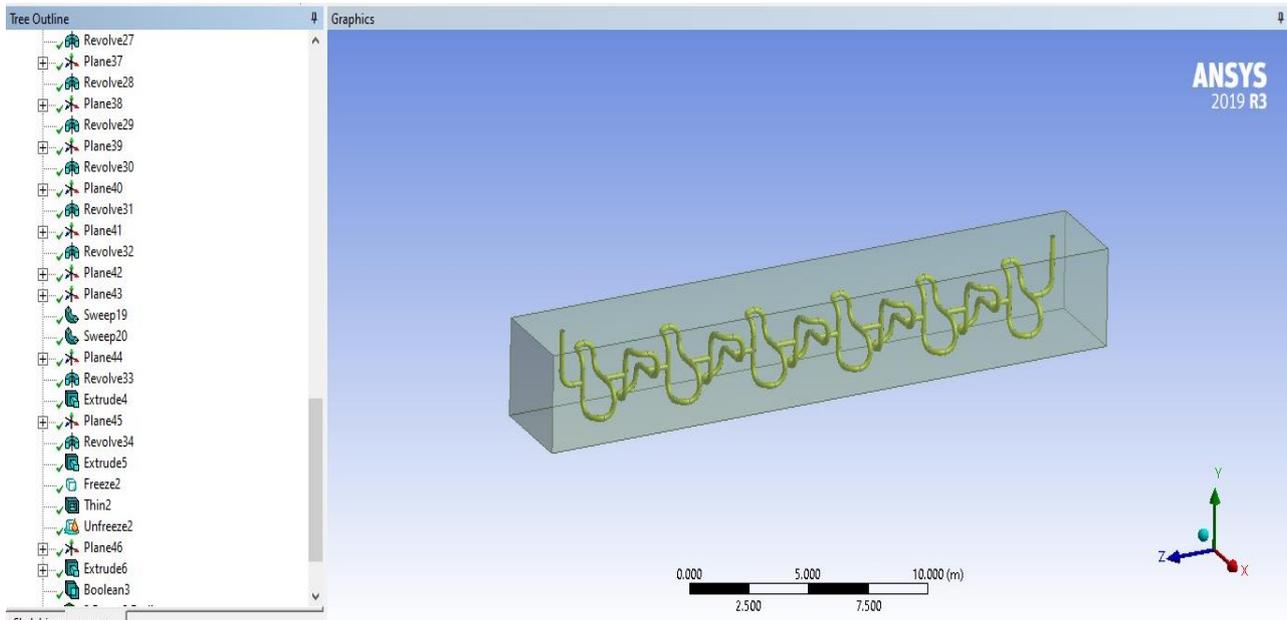


Figure III.3 : la géométrie échangeur eau/sol.

III.10.2 Maillage :

Dans cette étape ont faits le maillage et nommés les surfaces du corps. Comme on à un fluide qui circule, on doit choisir CFD comme physique de préférence. Il est nécessaire de nommés les surfaces pour la prochaine.

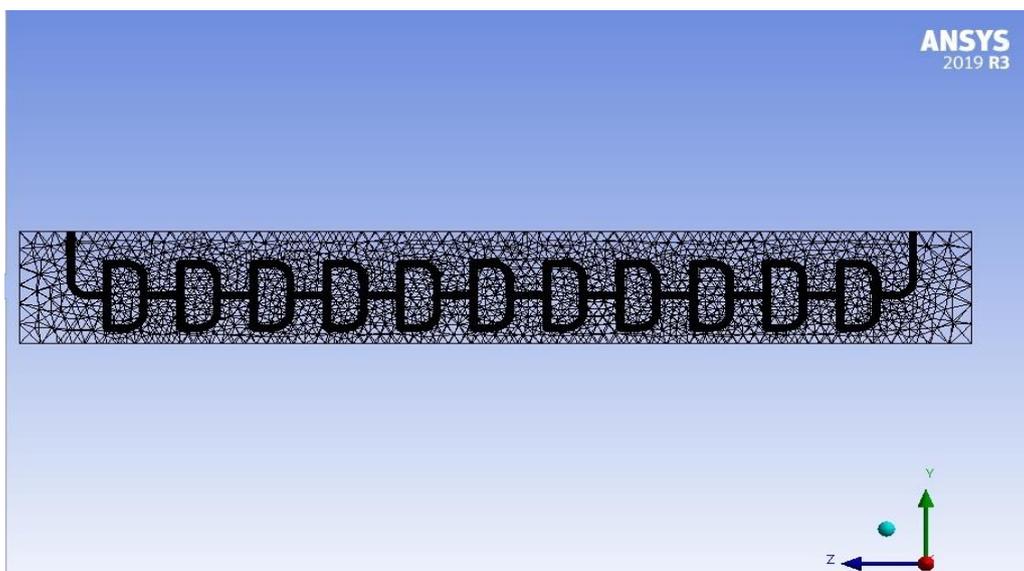


Figure III.4 : Maillage de la géométrie.

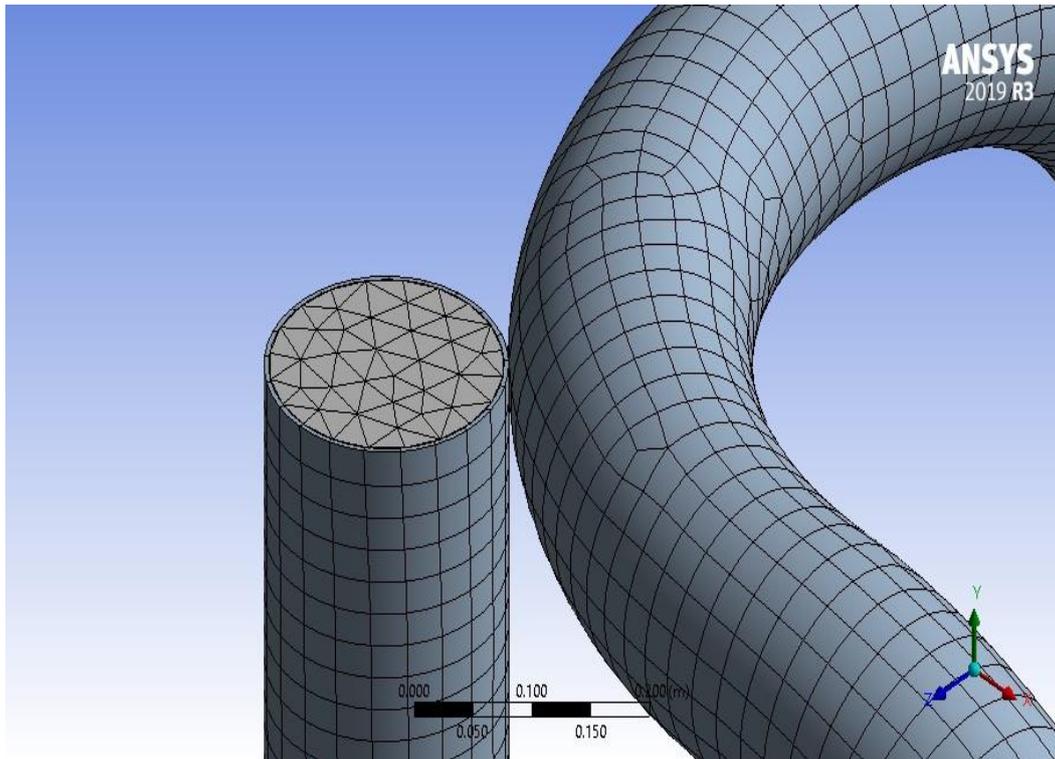


Figure III.5 : Maillage de la zone d'entrée.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	2.5 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
+ Sizing	
+ Quality	
+ Inflation	
+ Assembly Meshing	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1257381
<input type="checkbox"/> Elements	4088333

Figure III.6 : les détails de maillages.

III.10.3 Configurations (Fluent) :

La 3^{ème} étape de la modélisation, c'est l'étape la plus importante, c'est où on doit définir et modéliser notre cas. Dans cette étape le solveur Fluent nous propose plusieurs modèles, selon, notre

Chapitre III Formulation mathématique, modélisation numérique et dimensionnement de l'échangeur

cas on a activé les équations d'énergie, comme on un écoulement est transitoire et la force de gravité est négative sur l'axe y.

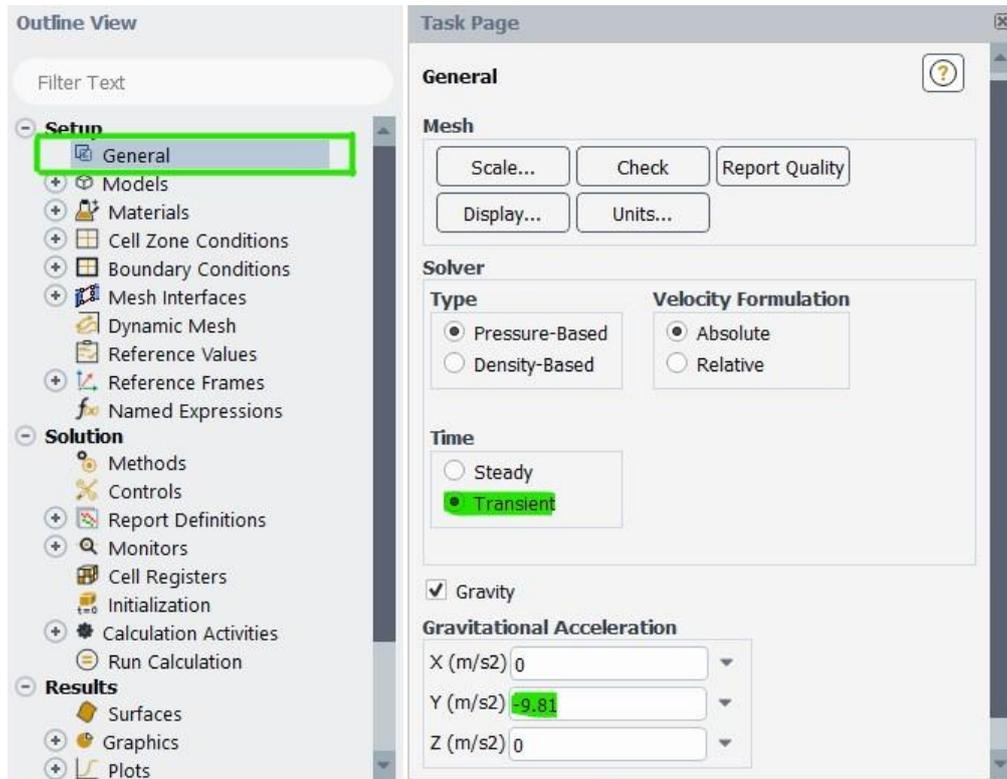


Figure III.7 : choix de gravité et le régime transitoire.

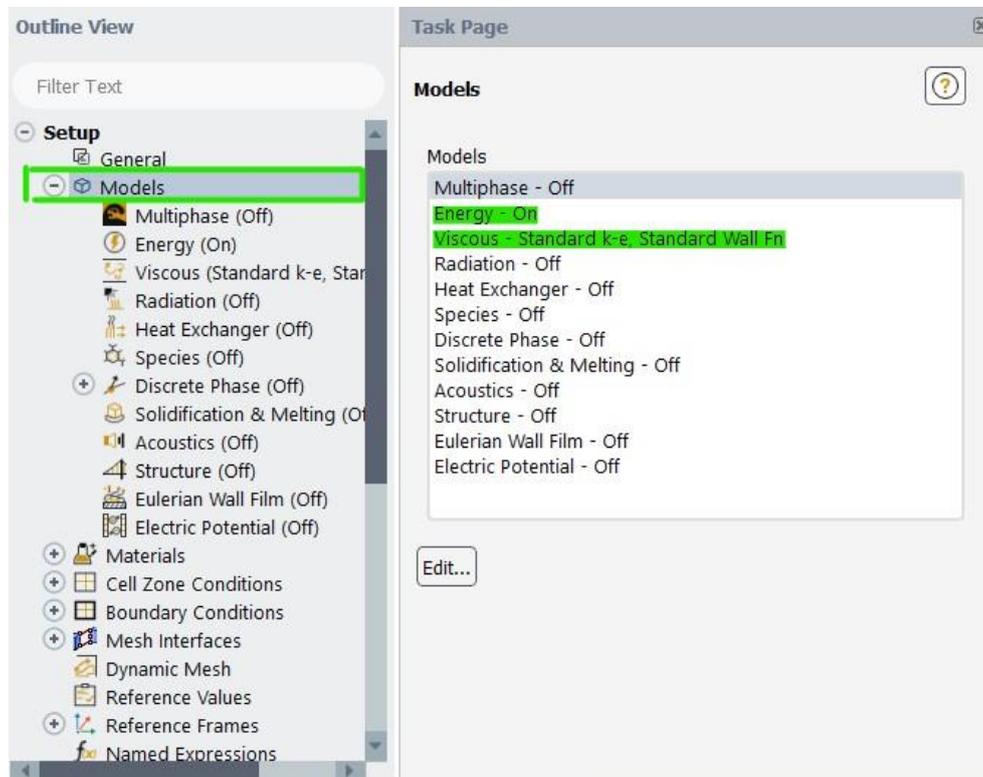


Figure III.8 : activation les équations de l'énergie et la turbulence.

Chapitre III Formulation mathématique, modélisation numérique et dimensionnement de l'échangeur

Ensuite, la phase du choix des matériaux ; ici pour le fluide on a utilisé l'eau, pvc pour le tube et le sol. Avec la saisie des propriétés de chaque matière s'il n'est pas chargé dans la bibliothèque des données de fluent.

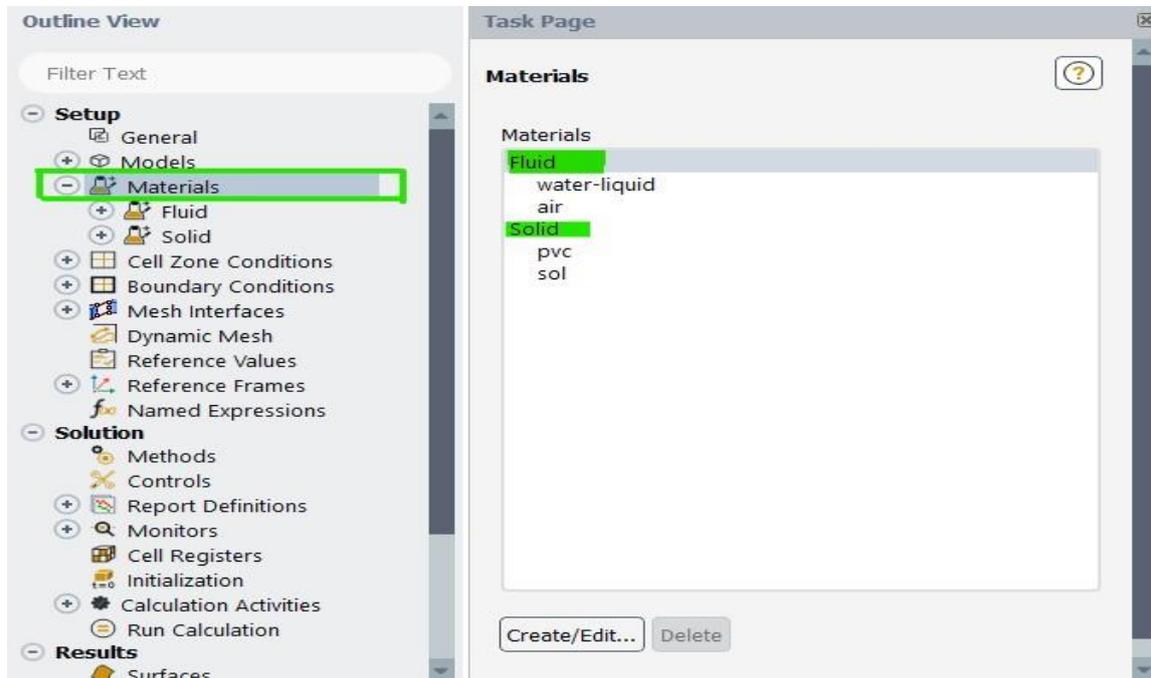


Figure III.9 : choix des matériaux.

Cette étape est très importante d'où les murs doivent être couplé où il est possible de passer à l'étape suivante (condition limites).

- 1- La paroi d'eau avec parois intérieur de pvc.
- 2- La paroi extérieure de pvc avec parois de sol.

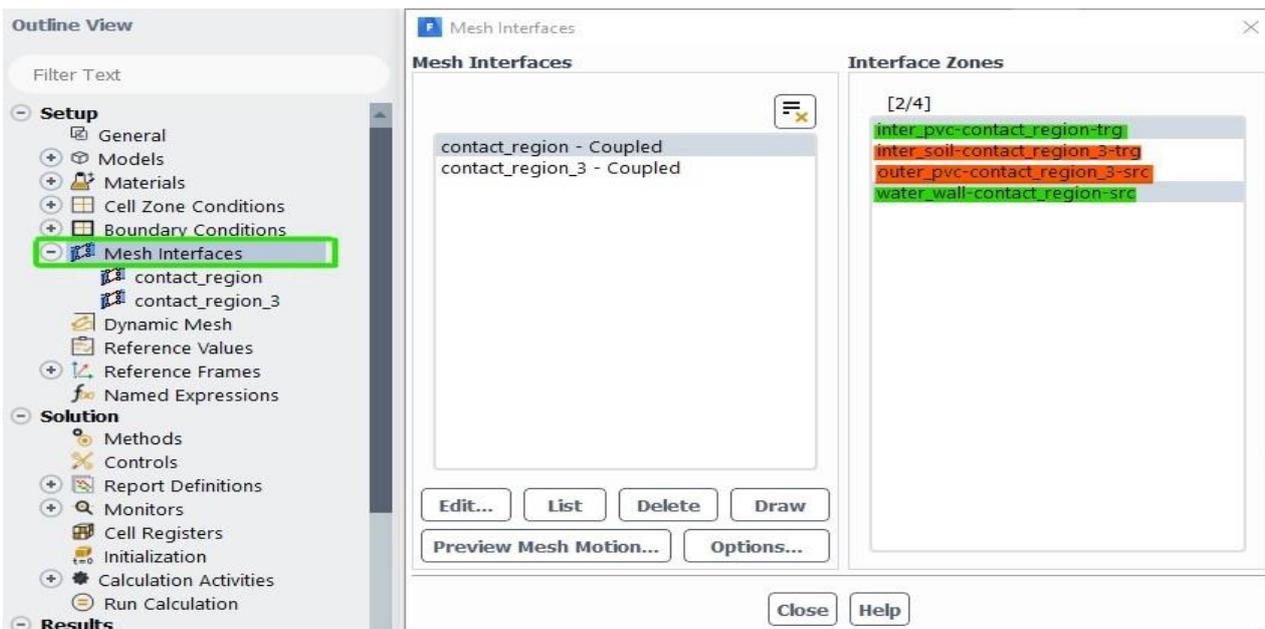


Figure III.10 : activation l'option de couplage des parois.

III.10.4 Les conditions initiales et aux limites :

Tableau III.2 : les conditions initiales et aux limites

	Matériel	Condition thermique	Débit massique
Entré	-	Température (333k)	(0,2. 0,5 et 1 kg/s)
Sortie	-	-	-
Région de contact (eau – tube)	PVC	Coupled	-
Région de contact (tube - sol)	Sol	Coupled	-
La face dessous du sol	Sol	Flux de chaleur	-
La face supérieure du sol	Sol	Flux de chaleur	-
Les faces latérales du sol	Sol	Température (294k)	-
L'intérieur de tube	PVC	Flux de chaleur	-
L'extérieur de tube	PVC	Flux de chaleur	-
L'intérieur de sol	Sol	Flux de chaleur	-

III.10.5 Méthode de calcul :

On utilise la méthode de L'algorithme SIMPLE qu'utilise une relation entre les corrections de vitesse et de pression pour imposer la conservation de la masse et pour obtenir le champ de pression.

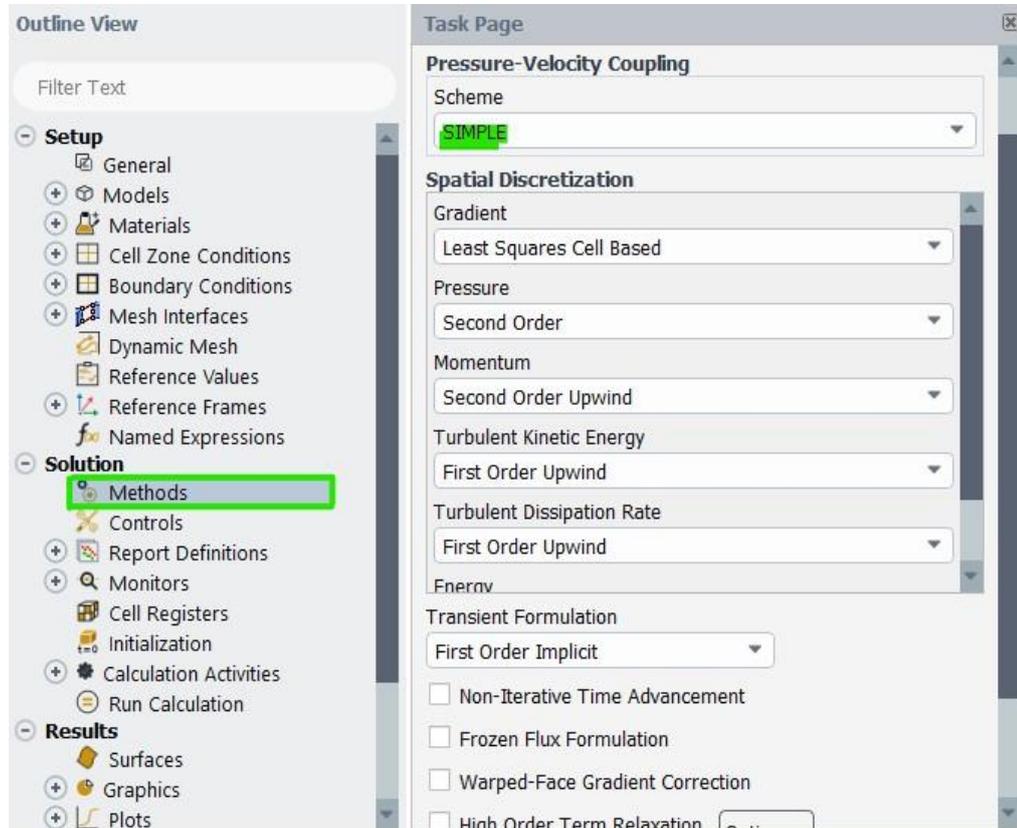


Figure III.11 : choix la méthode de calcul.

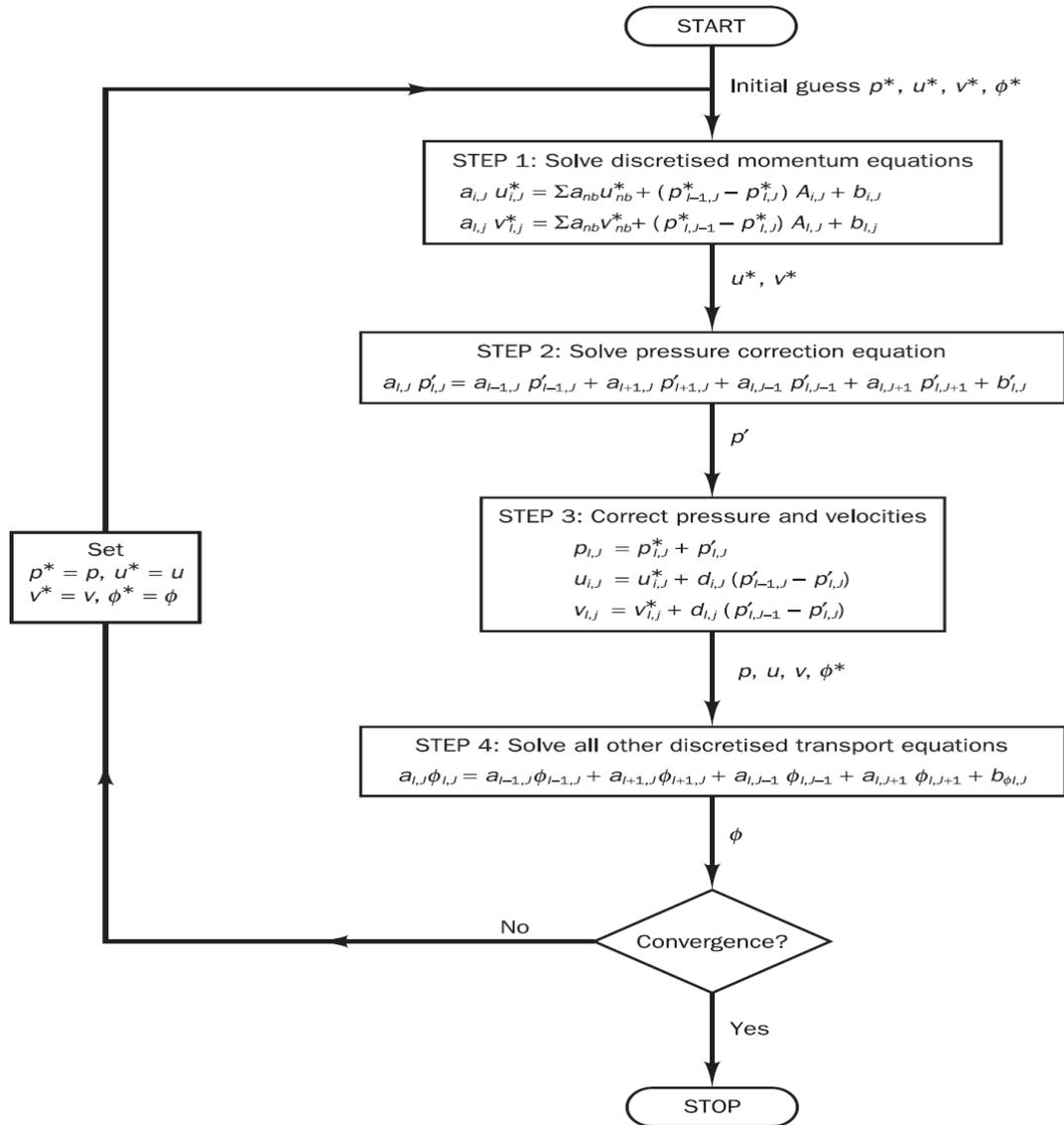


Figure III.12: L'algorithme SIMPLE [21].

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous exposons la problématique d'une façon détaillée, ensuite nous donnons une brève présentation sur la méthode numérique choisie pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS « Fluent »).

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre on a fait une série de simulation numérique ; les résultats obtenus pour les différents dimensionnements et débits, la comparaison dédiée à déterminer la configuration optimale pour ce problème.

Les géométries considérées et les conditions initial et aux limites ont été présentées dans le troisième chapitre. Ainsi que la distribution des points du maillage et la simulation numérique ont été faite respectivement dans le solveur Fluent.

IV.2 L'effet de la longueur des tubes et le débit :

IV.2.1 Visualisation générale comparative pour les trois Longueurs :

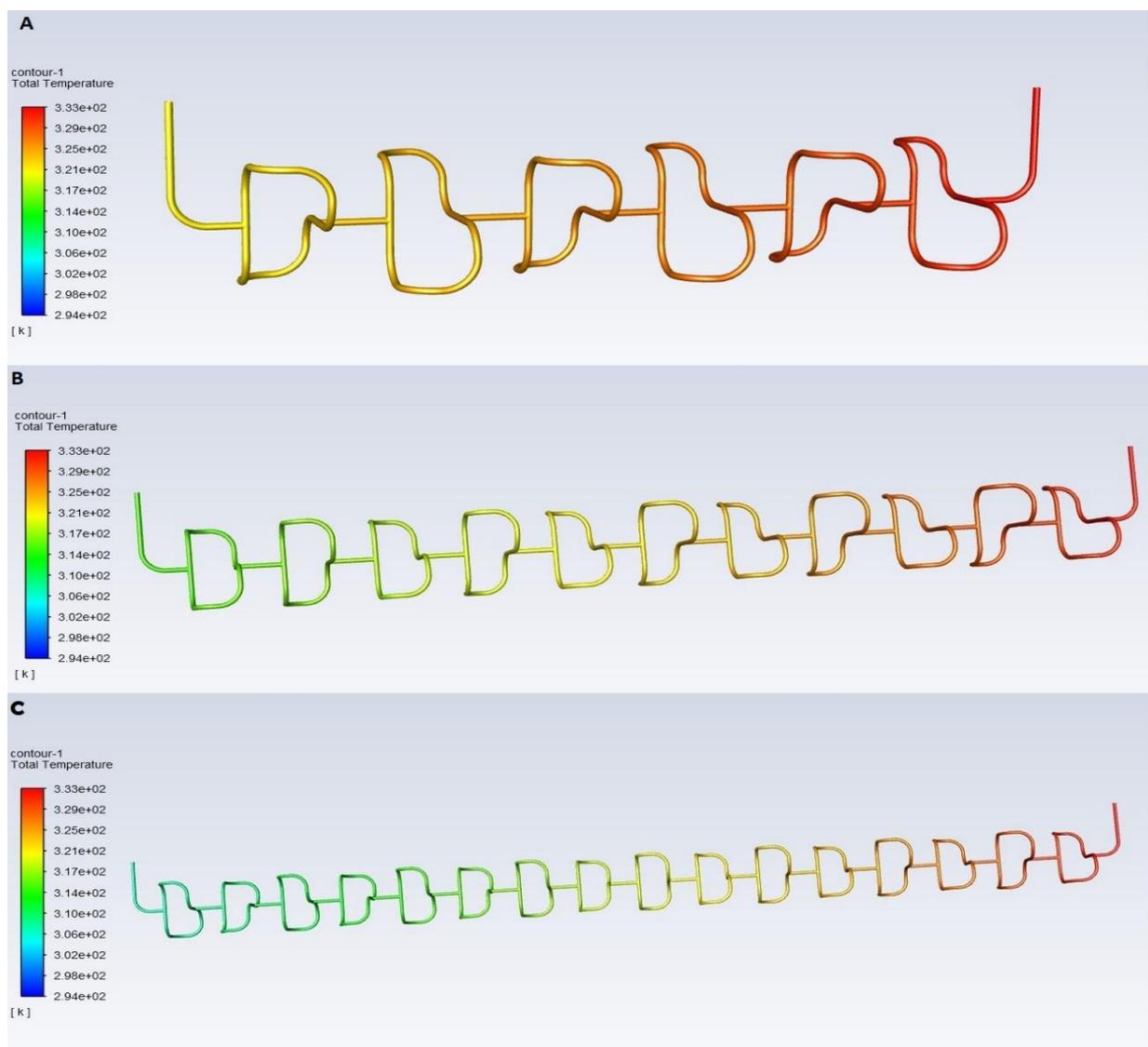


Figure IV.1 : vue 3d de les échangeurs (a= 60 m, b=100 m et c= 150 m) après la simulation.

IV.2.2 Pour longueur de 60 mètres :

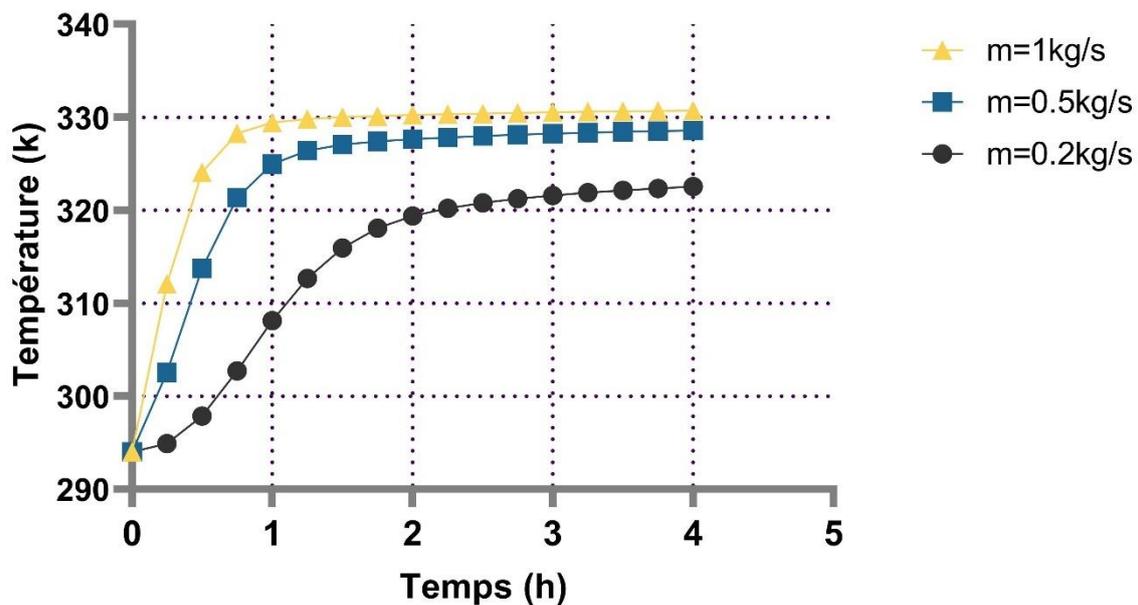


Figure IV.2 : la température d'eau dans la sortie pour échangeur de 60 m en fonction des débits.

La figure **Figure IV.2** illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent pour différents longueur (60, 100 et 150 m) et différents débits (0.2, 0.5 et 1 kg/s) de l'échangeur de forme chaotique. D'où on peut tirer les remarques suivantes :

- a- Pour débit de 0.2 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 322.56k,
- b- Pour débit de 0.5 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 328.60k,
- c- Pour débit de 1 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 330.73k.

IV.2.3 Pour longueur de 100 mètres :

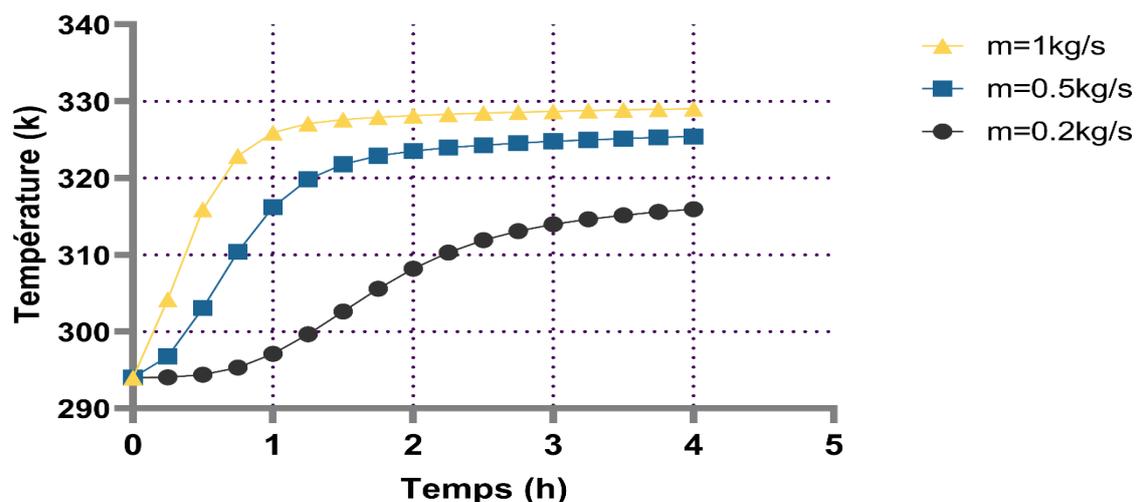


Figure IV.3 : la température d'eau dans la sortie pour échangeur de 100 m en fonction des débits.

- a- Pour débit de 0.2 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 315.96k,
- b- Pour débit de 0.5 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 325.43k,
- c- Pour débit de 1 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 329.03k.

IV.2.4 Pour longueur de 150 mètres :

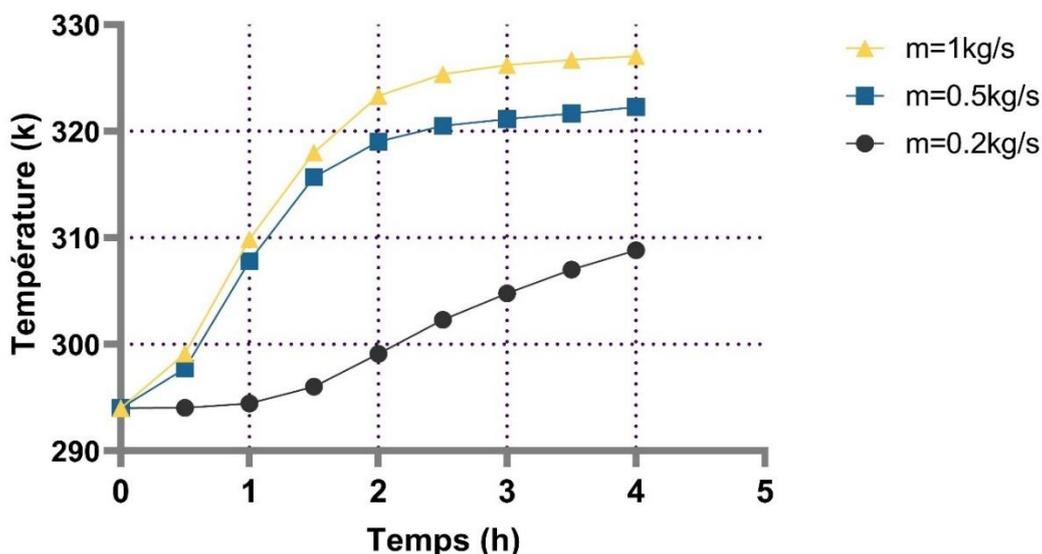


Figure IV.4 : la température d'eau dans la sortie pour échangeur de 150 m en fonction des débits.

- a- Pour débit de 0.2 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 308.83k,
- b- Pour débit de 0.5 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 322.26k,
- c- Pour débit de 1 kg/s la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 327.03k.

La longueur de l'échangeur	Le débit (kg/s)	La température de sortie (k)
60 mètres	0.2	322.56
	0.5	328.60
	1	330.73
100 mètres	0.2	315.96
	0.5	325.43
	1	329.03
150 mètres	0.2	308.83
	0.5	322.26
	1	327.03

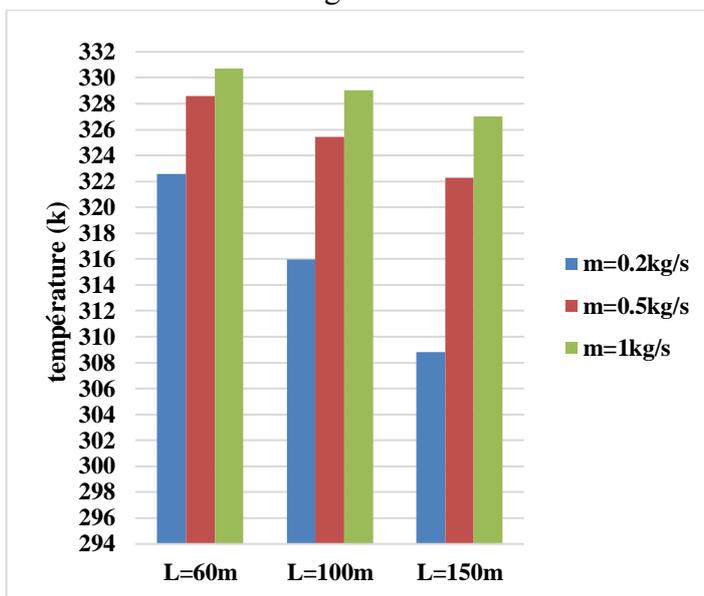


Tableau IV.1 : les résultats comparatifs de calcul

Figure IV.5 : Courbe représentant une comparaison de longueur

Les figures (**Figure IV.2****Figure IV.3** **Figure IV.4**) montrent la Réduction de température au cours du temps Selon les différentes longueurs de l'échangeur Où l'on constate une baisse significative de la température dans l'échangeur la plus grande longueur, tandis que les graphs dans

les figures (Figure IV.2, Figure IV.3, Figure IV.4) illustre l'augmentation de température dans la sortie de l'échangeur le tableau (Tableau IV.1) et les graphes (Figure IV.5) donner une comparaison entre la température de sortie dans les trois échangeurs.

La cause de la réduction de températures dans l'échangeur de 150 m Comparé à d'autres longueurs (60 m et 100 m) C'est parce qu'il possède une surface d'échange plus grande De plus, l'eau prend plus de temps à l'intérieur du l'échangeur, Nous remarquons également que le débit Il joue un rôle important dans cette opération parce que le débit plus faible permet aux molécules d'eau de se débarrasser de la chaleur plus longtemps, alors que l'évolution de température d'eau à la sortie de l'échangeur après quelque heur il revient à la saturation du sol.

IV.3 L'effet de diamètre de tube :

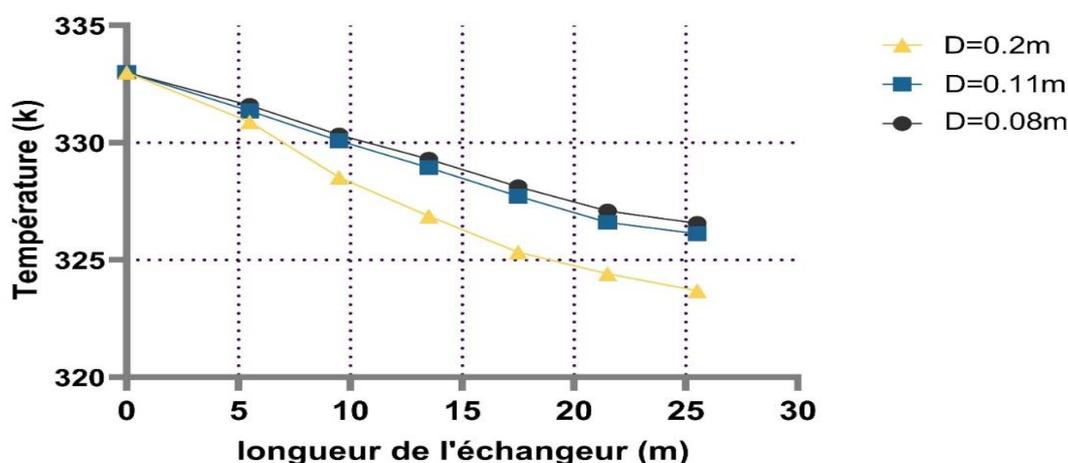


Figure IV.6 : la température d'eau dans la sortie pour des diamètre différents.

La figure Figure IV.6 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent pour différents diamètres (0.08, 0.11 et 0.2 m) de l'échangeur de forme chaotique. D'où on peut tirer les remarques suivantes :

- Pour le diamètre de 0.08 m la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 326.57k,
- Pour le diamètre de 0.11 m la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 326.12k,
- Pour le diamètre de 0.2 m la température de l'eau à la sortie de l'échangeur est de l'ordre de 323.69k.

Donc on note que plus le diamètre est élevé, plus la température diminuera.

L'augmentation du diamètre est compensée par une augmentation de la surface d'échange thermique cela explique la température de sortie de l'eau est plus basse dans l'échangeur de chaleur de plus grand diamètre.

IV.4 L'effet de matériaux de tube :**Tableau IV.2 :** les températures d'eau dans la sortie de l'échangeur ont fonction des matériaux.

Longueur	Débit	Matériaux	Température
100 mètres	0.2kg/s	PVC	322.56 k
		Aluminium	317.45 k
		Cuivre	315.59 k

Nous observons que dans des conditions similaires en termes de longueur et de débit avec changement de type de matériau Il y a une différence de température de l'eau pour différents matériaux.

Le type de matériau joue un rôle important dans le transfert de chaleur, car le coefficient d'échange varie d'un matériau à l'autre, et plus le coefficient d'échange est élevé, l'échange thermique se fait de manière satisfaisante et la température de l'eau diminue.

IV.5 L'effet de la nature du sol :**Tableau IV.3 :** les températures d'eau dans la sortie de l'échangeur ont fonction des natures du sol.

	P (kg/m ³)	Cp (j/k.kg)	Λ (w/k.m)	Température de sortie
Minéraux	2650	800	2.9	309 k
Argile et Limon	1200-1880	1670-2500	1.5	311.5 k
Matière organique	1300	1900	0.25	322.7 k

On observe les changements de température de l'eau en fonction du sol dans lequel l'échangeur de chaleur est enterré Alors que les sols contenant des minéraux ont un meilleur rendement mais que dans un sol organique, la température n'a pas chuté de manière significative.

Le rôle que joue la qualité du sol est très important car il accumule la chaleur perdue de l'eau le choix du sol comporte donc de nombreuses conditions, dont la plus importante est de ne pas stocker de chaleur pour éviter le phénomène de saturation.

IV.6 L'irrigation continu et l'intermittent :

Nous effectuons le processus d'arrosage de deux manières :

- La première méthode : arroser en continu pendant trente heures sans s'arrêter,
- La deuxième méthode : arroser par intermittence pendant six heures, puis s'arrêter pendant six heures, puis continuer ainsi jusqu'à ce que nous atteignons trente heures.

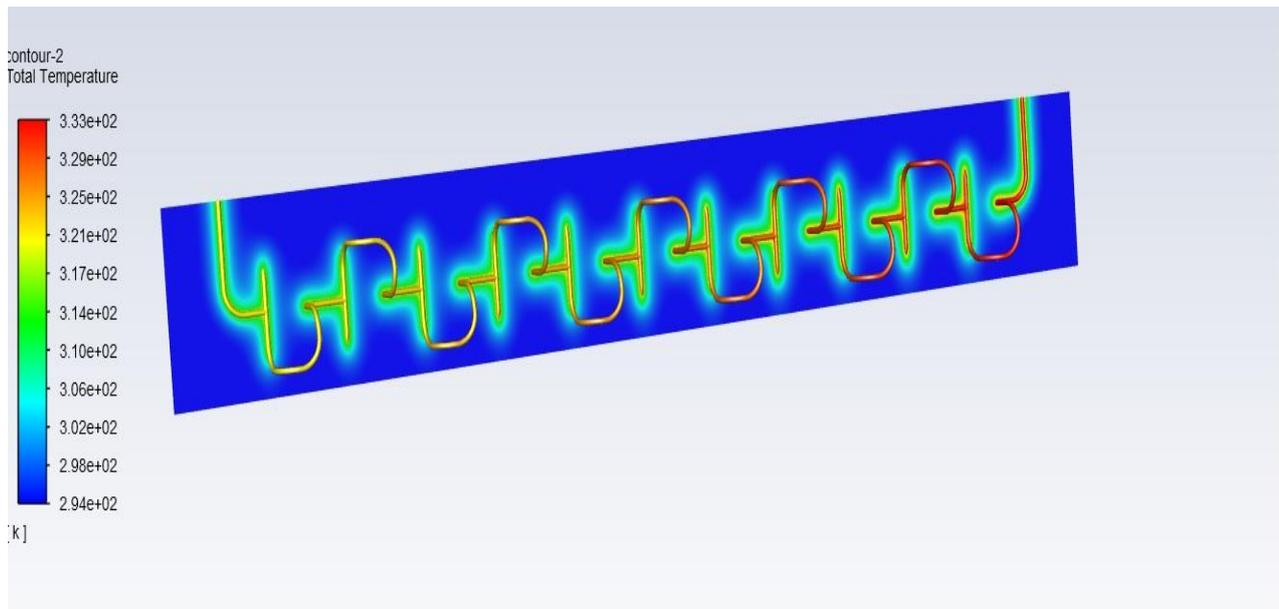


Figure IV.7 : arrosage continu pendant 30 heures.

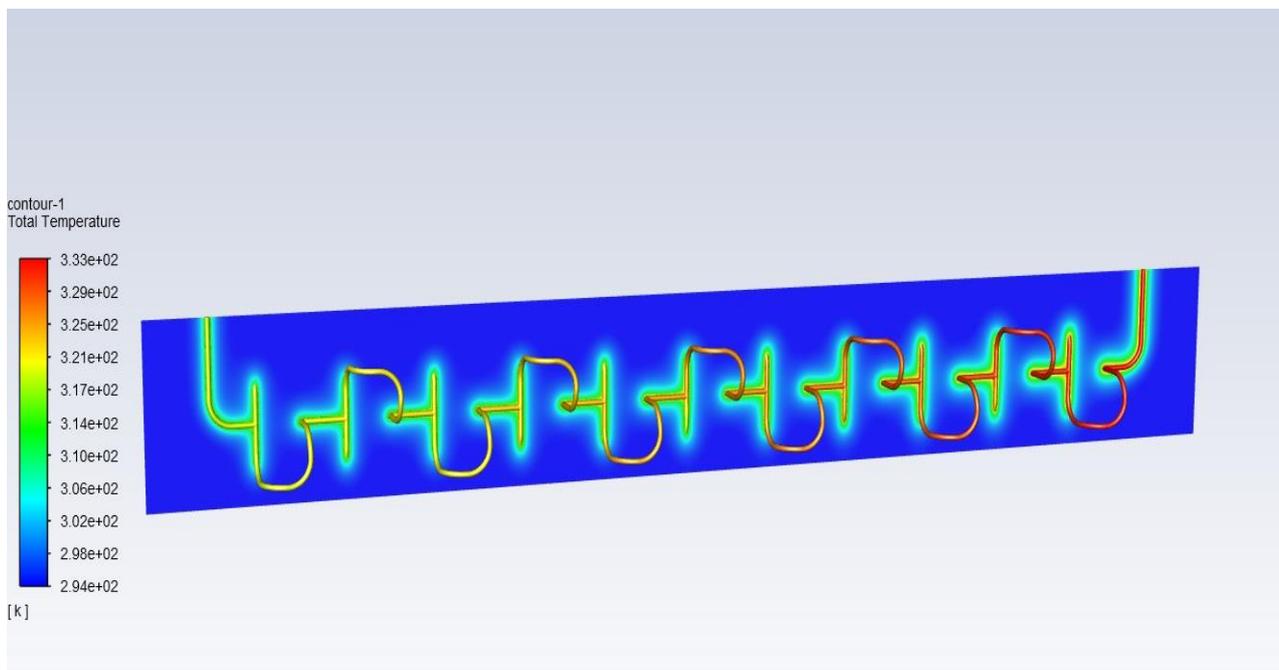


Figure IV.8 : arrosage intermittent pendant 30 heures.

A travers les figures (**Figure IV.7** et **Figure IV.8**), on remarque que le sol entourant l'échangeur dans le cas d'un arrosage continu acquiert plus de chaleur que le sol dans le cas d'un arrosage intermittent.

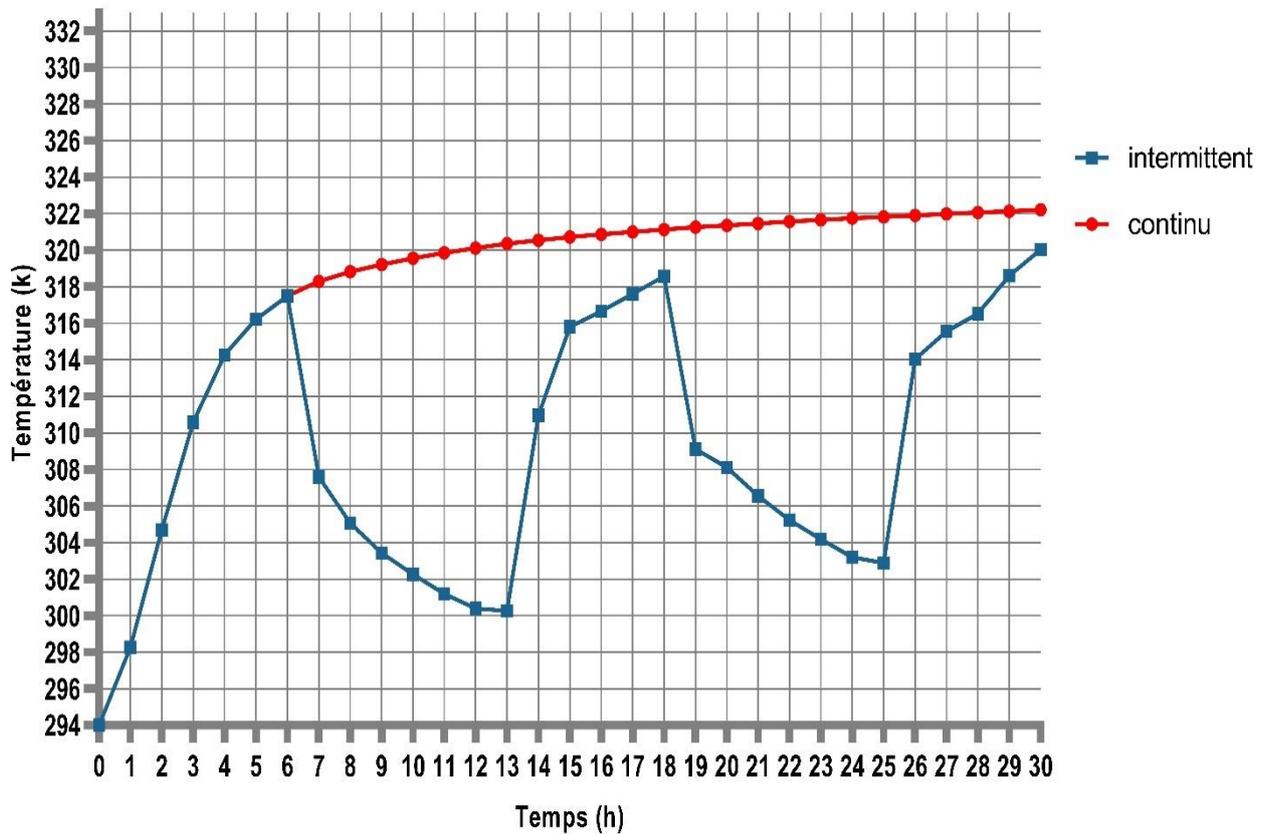


Figure IV.9 : Température de sortie d'eau en mode continu et intermittent.

La Figure (Figure IV.9) montre que l'irrigation intermittente contribue à abaisser la température de l'eau en cas d'irrigation pendant une longue période.

L'arrosage continu amène le sol à acquérir la chaleur de l'eau libérée par le convertisseur thermique, ce qui conduit à la saturation du sol (la température de l'eau est égale à la température du sol), ce qui conduit à l'apparition d'un équilibre thermique.

Pour éviter le phénomène de saturation, la méthode d'arrosage intermittent peut être utilisée en arrêtant l'arrosage jusqu'à ce que le sol se débarrasse de la chaleur gagnée.

IV.7 Expérimenter un échangeur de chaleur en appliquant les résultats précédents :

Après avoir fait les tests précédents, nous concluons que le rendement de l'échangeur de chaleur est lié à plusieurs conditions, dont les plus importantes sont :

- La longueur de l'échangeur de chaleur : elle doit être très longue,
- Diamètre de l'échangeur de chaleur : le plus grand diamètre permet d'obtenir le meilleur rendement,
- Qualité du sol : la conductivité thermique du sol lui permet d'absorber rapidement la chaleur de l'eau.

Nous allons tester un échangeur de chaleur qui répond aux conditions précédentes (la longueur est de 750 mètres, le diamètre est de 0,2 mètre, et le sol est d'un type spécifique qui appelé sol Minéraux). En ce qui concerne le matériau du tube, nous n'utiliserons pas de cuivre car son utilisation est déraisonnable en raison de son coût élevé, nous allons donc continuer l'expérience en utilisant des matériaux en PVC. Dans cette expérience, nous utilisons un débit moyen d'environ 3 kg / s.

Cependant, en raison de la faiblesse de l'ordinateur, la longueur de 750 mètres ne peut pas être simulée, nous utilisons donc cinq échangeurs de 150 mètres.

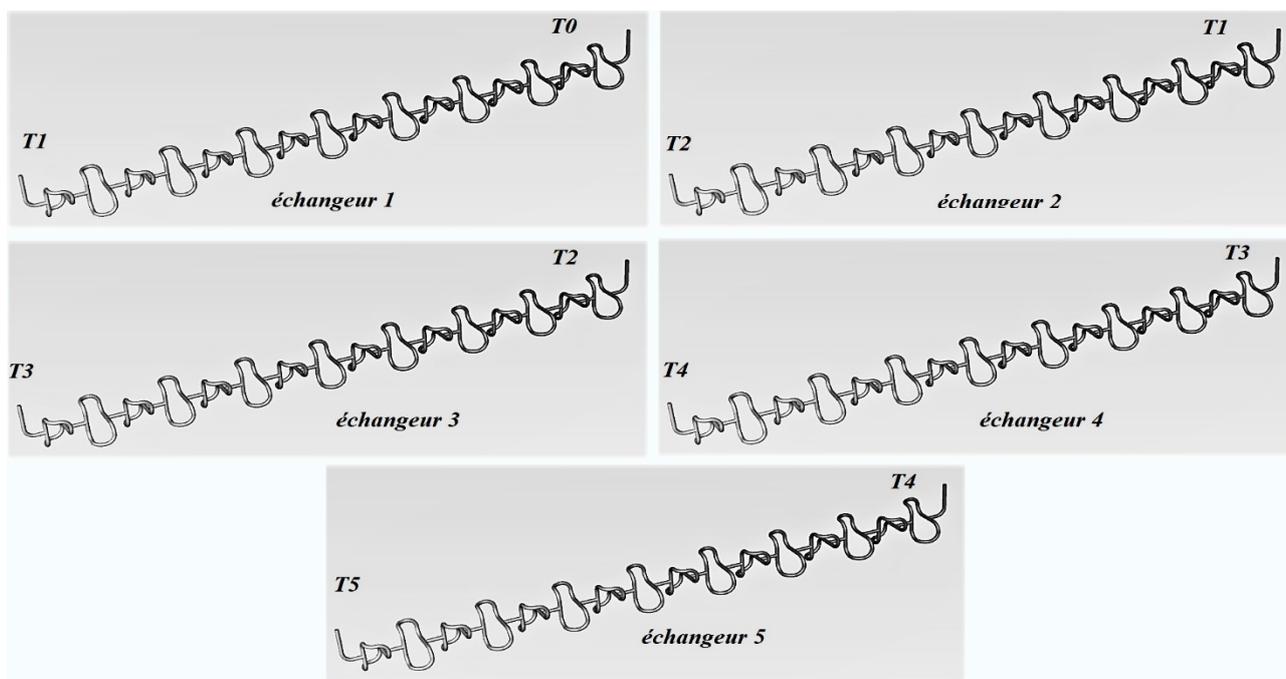


Figure IV.10 : Un échangeur de chaleur de 750 mètres divisé en 5 parties.

Tableau IV.4 : les températures d'entrée et de sortie dans chaque échangeur.

Échangeur de chaleur	Température d'entrée (k)	Température de sortie (k)
Échangeur 1 « 150m »	T0=333	T1=323.5
Échangeur 2 « 300m »	T1=323.5	T2= 319.35
Échangeur 3 « 450m »	T2= 319.35	T3=312.1
Échangeur 4 « 600m »	T3=312.1	T4=307.65
Échangeur 5 « 750m »	T4=307.65	T5=Tfinal=301.05

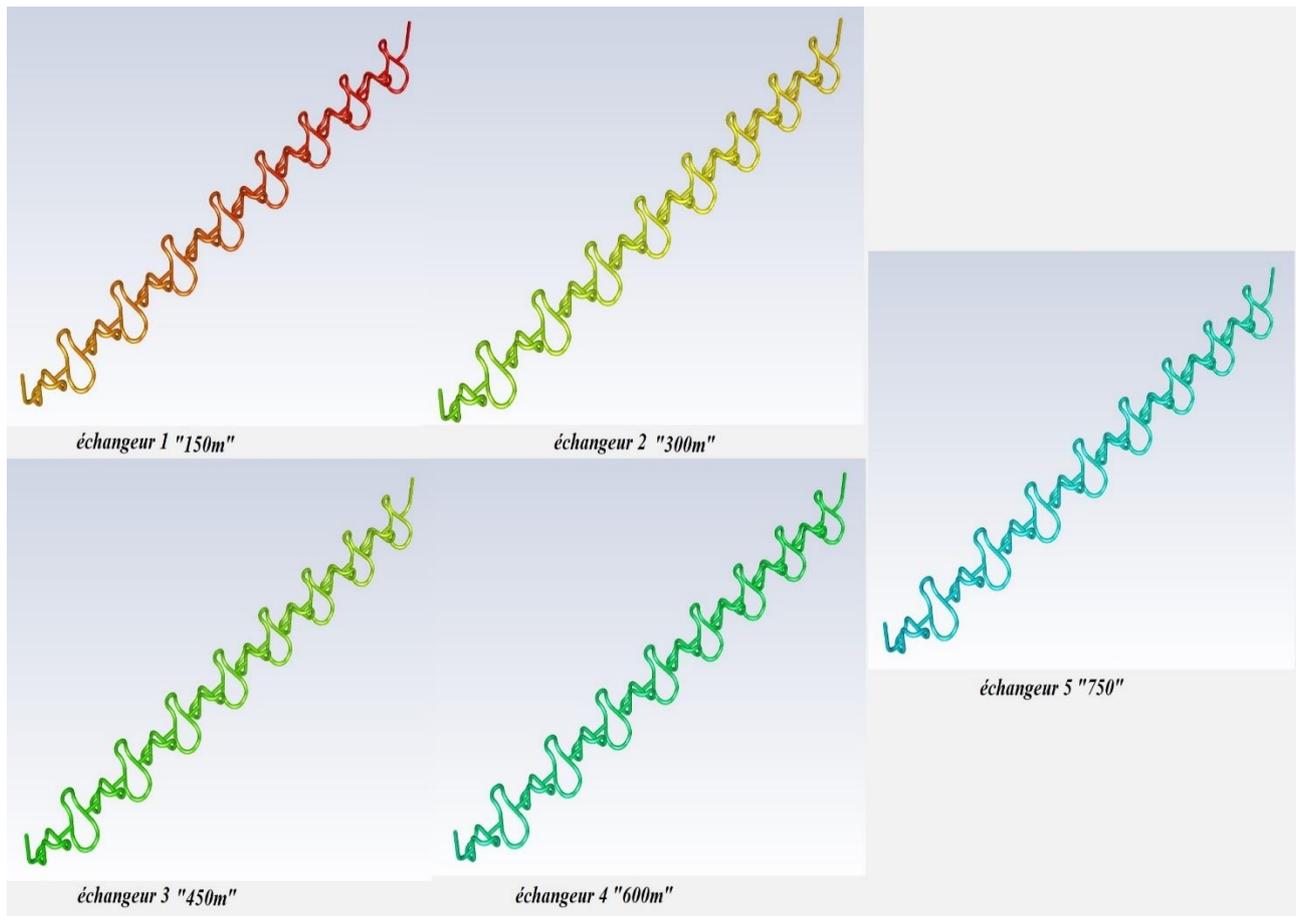


Figure IV.11 : l'évaluation de température dans les cinq échangeurs.

Nous remarquons que l'efficacité de l'échangeur de chaleur s'est améliorée après avoir changé ses dimensions et utilisé un sol avec une grande conductivité, car la température de l'eau a diminué à 301k.

IV.8 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons mené une série d'expériences « Silicon » sur cet échangeur de chaleur et déduit les effets les plus importants sur le refroidissement d'eau, puis nous avons abouti à une conclusion générale sur le problème.

Conclusion générale

Pour accomplir ce travail, des simulations numériques de refroidissement d'eau avec un échangeur de chaleur de forme chaotique ont été réalisées par utilisant un logiciel de simulation « Ansys Fluent V19.3».

Dans une première partie, nous avons exposé la base théorique et les notions d'énergie géothermique, les échangeurs de chaleur et ses types, ensuite on fait une synthèse bibliographique pour avoir quelque solution proposée dans les travaux antérieurs et comparez-le avec les résultats obtenus. La deuxième partie représente la formulation mathématique et les équations générales utilisées, la modélisation numérique du problème avec une brève présentation du logiciel utilisé, puis les résultats obtenus et les discussions.

Il a été suggéré d'utiliser un type d'échangeur de chaleur eau/sol chaotique pour simuler le problème avec différents débits (0.2, 0.5 et 1 kg/s), différentes longueurs (60, 100 et 150m) différents matériaux (PVC, Aluminium et cuivre), différents diamètres (0.2, 0.11 et 0.08) et différents sols. Tout cela afin de comparer les résultats et trouver les normes et conditions appropriées pour utiliser cet échangeur de chaleur et obtenir des bons résultats et moins coûteux.

Après avoir réalisé les expériences mentionnées précédemment, nous avons conclu que le facteur le plus important pour un plus grand bénéfice est la longueur de l'échangeur, son diamètre et la qualité du sol enfoui dans celui-ci. Cependant, les débits utilisés dans l'expérience sont très faibles par rapport à ce que demande l'agriculture (au moins 3 kg/s). Par conséquent, il existe une proportionnalité entre le débit et les dimensions de l'échangeur, c'est-à-dire que plus le débit augmente on augmente les dimensions de l'échangeur, la longueur de l'échangeur et le diamètre doivent être augmentés.

Cependant, en raison du manque de capacités et de l'absence d'un ordinateur avec un processeur puissant pour simuler un échangeur à grandes dimensions (750 mètres de longueur et 0,2 de diamètre), Nous avons divisé l'échangeur de chaleur de 750 mètres de long en cinq parties, chacune de 150 mètres de long, pour obtenir un résultat proche du réel (la machine utilisée : (Acer - processeur i5-6200U 2.3GHz, RAM DDR4 8 GB).

Après avoir effectué ces expériences, nous concluons de ce qui suit :

- 1- A faible débit nécessite un long temps pour l'irrigation des grandes surfaces,
- 2- L'irrigation des grandes surfaces nécessite l'utilisation d'un grand débit,
- 3- L'utilisation d'un grand débit d'eau nécessite un échangeur de chaleur de grandes dimensions pour un meilleur échange thermique avec le sol,
- 4- La qualité du sol est très importante dans ce processus, car un sol avec une grande conductivité thermique et une faible charge thermique doit être fourni pour se débarrasser de la chaleur absorbée,
- 5- Ne pas laisser fonctionner l'échangeur de chaleur pendant de longues périodes, afin d'éviter la saturation du sol, car il doit y avoir alternance entre fonctionnement et repos.

Références bibliographiques

- [1] **H. Benfateh**, «Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (Doctoral dissertation,» Université Mohamed Khider , Biskra, 2009.
- [2] [En ligne]. Available: <https://earthrivergeothermal.com/the-history-of-geothermal-systems/>. [Accès le 29 05 2020].
- [3] **A. Holm, L. Blodgett, D. Jennejohn et K. Gawell**, «Geothermal energy: international market,» *Geothermal energy association*, vol. 7, 2010.
- [4] **I. Benchemsa**, «L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique. (Mémoire de master),» UNIVERSITE BADJI MOKHTAR , ANNABA, 2017.
- [5] **I. BENGHEZALA**, «Contribution à l'étude des Performances Dynamiques et Thermiques d'un Echangeur Enterré,Mémoire de magistère,» 2014.
- [6] [En ligne]. Available: www.energy.gov.dz. [Accès le 01 06 2020].
- [7] **A. Fekraoui et F. Kedaid**, «Geothermal resources and uses in Algeria,» 2005.
- [8] **M. Bouziane et A. Labadi**, «Les eaux profondes de la région de Biskra (Algérie),» *European Journal of Scientific Research*, pp. 526-537, 2009.
- [9] **N. Dhepe et R. Krishna**, «A Review of the Advancements in Geothermal Heating and Cooling System,» *Enterprise Information System*, vol. 9, pp. 105-108, 2017.
- [10] **N. Naili, O. Yejjer, M. Hazami et A. Farhat**, «Etude expérimentale de la performance d'un échangeur enterré,» 2010.
- [11] **J. Vaz et M. Sattler**, «Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger, *Energy and Buildings*,» 2011.
- [12] **V. Bansal, R. Misra, D. Agarwal et j. Mathur**, «Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger,» *Applied Energy*, vol. 103, pp. 1-11, 2013.
- [13] **Y. AHMOUD**, «Etude numérique des phénomènes d'écoulement et d'échanges thermiques dans un échangeur eau/sol enterré de forme U.,» 2014.
- [14] **A. Mathur, G. Srivastava, D. Agrawal, S. Mathur et J. Mathur**, «CFD analysis of EATHE system under transient conditions for intermittent operation,» *Energy and Buildings*, vol. 87, pp. 37-44, 2015.

- [15] **H. Boughanmi, M. Lazaar et A. Farhat**, «Echangeur Géothermique de Type Panier Intégré dans Un Système Energétique Sous Le Climat Tunisien,» 2015.
- [16] **S. Udhaihanan**, «Ground heat exchanger characteristics for different geometry and working parameters (Doctoral dissertation, Instytut Techniki Cieplnej),» 2016.
- [17] **S. Jakhar et N. Gakkhar**, «Performance analysis of earth water heat exchanger,» *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 145-153.
- [18] **H. Atwany, M. Hamdan, M. Attom, A. AbuNabah et A. Alami**, «Performance of earthwater,» p. 2019.
- [19] [En ligne]. Available: <https://www.ansys.com/>.
- [20] **H. Nebbar, O. Hamdi, N. Moumami et A. Brima**, «Etude de comportement thermique d'un échangeur enterré air/sol,» Expérimentation de Biskra (Algérie), 2014.
- [21] **C. Bailly et G. Comte-Bellot**, The dynamics of isotropic turbulence, Cham: Springer, 2015, p. 252.

Résumé :

Titre du mémoire : Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : Echangeur enterré eau/sol de forme chaotique.

Dans ce travail, nous présenterons une étude théorique et numérique ainsi qu'une simulation du problème de la température des eaux souterraines dans la région de Biskra, dont la température atteint 60 degrés Celsius, ce qui affecte négativement la production agricole (affecte le sol et les plantes), ce qui entraîne de lourdes pertes financières pour les agriculteurs, car il faut essayer de le réduire à une température idéale pour l'arrosage des palmiers Et les cultures atteignent environ 25 degrés Celsius, et cela en utilisant un échangeur de chaleur chaotique qui est enterré sous terre à une profondeur mesurée, ce qui permet un échange de chaleur entre l'eau et le sol, nous avons comparé les longueurs, les diamètres, les débits et les types de sols afin de trouver les paramètres nécessaires à cet échange thermique pour donner le résultat souhaité.. Après avoir examiné les conditions suivies par les agriculteurs, nous avons constaté que le débit requis est très important, atteignant 10 kg / seconde, et en fournissant ce débit, la température idéale ne peut être atteinte. Par conséquent, nous allons recourir au choix des dimensions qui nous donnent de meilleurs rendements avec un petit flux mais qui fonctionnent pendant de longues périodes.

Mots Clés : Géothermie, échangeur eau/sol, refroidissement d'eau, irrigation.

Abstract:

Thesis title: Cooling of waters of irrigation by geothermal power: Buried exchanger water/ground of form chaotic.

In this work, we will present a theoretical and numerical study as well as a simulation of the problem of the temperature of groundwater in the Biskra region, the temperature of which reaches 60 degrees Celsius, which negatively affects agricultural production (affects the soil and plants), which leads to heavy financial losses for the farmers, as one has to try to reduce it to an ideal temperature for watering palm trees And the crops reach about 25 degrees Celsius, and this by using a chaotic heat exchanger which is buried underground at a measured depth, which allows a heat exchange between water and soil, we compared the lengths, diameters, flows and types of soil in order to find the parameters necessary for this exchange thermal to give the desired result. After examining the conditions followed by the farmers, we found that the required flow rate is very high, reaching 10 kg / second, and by providing this flow, the ideal temperature cannot be reached. Therefore, we will resort to choosing the dimensions that give us better returns with a small flow but work for long periods.

Keywords: Geothermal, water/ground heat exchanger, water cooling, irrigation.

ملخص :

عنوان المذكرة: تبريد مياه الري بالطاقة الحرارية الأرضية: مبادل حراري مدفون (ماء/تربة) على شكل فوضوي.

في هذا العمل نقدم دراسة نظرية ورقمية ومحاكاة لمشكلة درجة حرارة المياه الجوفية في منطقة بسكرة التي تصل درجة حرارتها إلى 60 درجة مئوية مما يؤثر سلباً على الإنتاج الزراعي (يؤثر على التربة والنباتات). مما يؤدي إلى خسائر مالية فادحة للمزارعين ، حيث يتعين محاولة خفضها إلى درجة حرارة مثالية لري أشجار والنخيل حيث يجب ان تنخفض إلى حوالي 25 درجة مئوية ، وذلك باستخدام مبادل حراري chaotic يتم دفنه تحت الأرض في عمق مدروس ، والذي يسمح بتبادل الحرارة بين الماء والتربة ، قمنا بمقارنة اطوال واقطار المحول والتدفقات المختلفة للماء وأنواع التربة من أجل إيجاد الشروط اللازمة لهذا المبادل الحراري لإعطاء النتيجة المرجوة. بعد فحص الشروط التي يتبعها المزارعون وجدنا أن معدل التدفق المطلوب مرتفع للغاية حيث يصل إلى 10 كجم / ثانية، وتوفير هذا التدفق لا يمكن الوصول إلى درجة الحرارة المثالية. لذلك سنلجأ الى اختيار الابعاد التي تعطينا مردود أحسن مع تدفق صغير ولكن يعمل لفترات طويلة .

الكلمات المفتاحية: الطاقة الحرارية الأرضية، مبادل حراري ماء/أرض، تبريد المياه، الري.