



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

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Kessai Yacine

Le : mardi 15 septembre 2020

Refroidissement des eaux d'irrigation par la géothermie : échangeur enterré (eau/sol)de forme serpentin

Jury :

Pr.	Mohamed Said CHEBBAH	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Kamel AOUES	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr.	Chawki MAHBOUB	MCB	Université de Biskra	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce mémoire.

Mon père Taher et ces conseils exceptionnels.

Ma mère Henia qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études,

Mon frère Amine et mes sœurs et toute la famille de Kessai.

*Je dédie également ce travail à tous mes amis MOHAMED, KHALED,
MANI, avec qui j'ai partagé beaucoup de souvenirs inoubliables.*

*A tous mes amis, EPTA team et à ceux qui me donnent de l'amour et de la
vivacité.*

Hiba

A tous ce que j'aime.

Merci !

Kessai Yacine

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a donné la force, ainsi que la bonne volonté pour achever le cursus universitaire et ce modeste travail.

Je tiens à remercier chaleureusement, Mon promoteur Monsieur Dr. Kamel AOUES, qui a bien voulu m'encadrer durant ce mémoire de master, et qui a assuré la direction et l'orientation scientifique de ce travail. Je lui exprime mes vifs remerciements et ma sincère gratitude.

Nous remercions beaucoup l'ensemble des enseignants de département de génie mécanique pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus Universitaire.

Nos remerciements s'adressent au Mohamed Aymen KETHIRI pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.

RÉSUMÉ : Ce travail est enregistré dans le cadre du projet PRFU, agréé depuis 01/01/2019 code A11N01UN070120190006, intitulé « Refroidissement des eaux d'irrigation des forêts du palmier-dattier par la géothermie dans la région ouest de la wilaya de Biskra ». Il représente la suite de l'étude débuté par Mr. A. M. Kethiri sous la direction du Dr. K. Aoues. Dans cette partie, nous avons mené une étude numérique visant à déterminer les paramètres qui influencent directement les échangeurs géothermiques. Des échangeurs de chaleur géothermique enterré eau/sol destinés à refroidir l'eau d'irrigation du palmier-dattier. L'échangeur de chaleur traité est de forme serpentin de type horizontal tester pour différents débits, matériaux et le temps de fonctionnement, afin d'évaluer les caractéristiques de ces systèmes dans des installations et dans différentes conditions de travail. Les calculs ont été effectués avec le code CFD Fluent et les simulations ont couvert les conditions climatiques de la saison estivale (la période la plus chaude) dans le sud de l'Algérie (Biskra). Le paramètre le plus important pour le transfert de chaleur de ce système a résulté ; la durée optimale de fonctionnement était de 6 heures dans les cas analysés. Un autre facteur clé était le choix du débit d'écoulement de l'eau (choix sur la demande des plans d'irrigation des palmier dattier) à l'intérieur des tubes. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Mots clés : Géothermie, Énergie, Échangeur de chaleur, Énergie renouvelable, Eau, Irrigation, Refroidissement, Simulation CFD, Biskra.

ملخص: تم تسجيل هذا العمل في إطار مشروع PRFU المعتمد منذ 2019/01/01 برمز A11N01UN070120190006 بعنوان "تبريد مياه الري في غابات النخيل بواسطة الطاقة الحرارية الجوفية في المنطقة الغربية لولاية بسكرة". وهي تمثل استمرارًا للدراسة التي بدأها السيد أيمن محمد كيثيري تحت إشراف د. كمال أواس. في هذا الجزء، أجرينا دراسة عددية تهدف إلى تحديد العوامل التي تؤثر بشكل مباشر على المبادلات الحرارية الأرضية. مبادلات حرارية للمياه الجوفية / تحت الأرض تهدف إلى تبريد مياه الري لنخيل التمر. المبادل الحراري المعالج هو من النوع الأفقي الذي تم اختباره لمعدلات التدفق المختلفة والمواد ووقت التشغيل، من أجل تقييم خصائص هذه الأنظمة في التركيبات وتحت ظروف عمل مختلفة. تم إجراء الحسابات باستخدام كود CFD Fluent ونظمت عمليات المحاكاة الظروف المناخية لموسم الصيف (الفترة الحارة) في جنوب الجزائر (بسكرة). نتج عن الدراسة أن المعامل الأكثر أهمية لانتقال الحرارة لهذا النظام؛ كان مدة التشغيل الأمثل 6 هو ساعات في الحالات التي تم تحليلها. محامل رئيسي آخر هو اختيار معدل تدفق المياه (الاختيار حسب الطلب لخط ري نخيل التمر) داخل الأنابيب. النتائج التي تم الحصول عليها مرضية للغاية.

الكلمات المفتاحية: طاقة حرارية أرضية، طاقة، مبادل حراري، طاقة متجددة، مياه، ري، تبريد، محاكاة CFD، بسكرة.

ABSTRACT: This work is recorded within the framework of the PRFU project, approved since 01/01/2019 code A11N01UN070120190006, entitled "Cooling of irrigation water in date palm forests by geothermal energy in the western region of the wilaya of Biskra". It represents the continuation of the study started by Mr. A. M. Kethiri under the direction of Dr. K. Aoues. In this part, we conducted a numerical study aimed at determining the parameters that directly influence geothermal exchangers. Underground geothermal heat exchangers intended to cool the irrigation water of the date palm. The treated heat exchanger is of horizontal type coil form tested for different flow rates, materials and operating time, in order to evaluate the characteristics of these systems in installations and under different working conditions. The calculations were carried out with the CFD Fluent code and the simulations covered the climatic conditions of the summer season (the hottest period) in the south of Algeria (Biskra). The most important parameter for the heat transfer of this system resulted; the optimal operating time was 6 hours in the cases analyzed. Another key factor was the choice of water flow rate (choice on demand of date palm irrigation plans) inside the tubes. The results obtained are very satisfactory.

Keywords: Geothermal, Energy, Heat Exchanger, renewable energy, Water, Irrigation, Cooling, CFD Simulation, Biskra.

Sommaire

Dédicaces.....	
Remerciements.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	I
Listes des figures.....	V
Listes des tableaux.....	X
Nomenclature	XI
Introduction Générale	1
Chapitre1 : Généralités	
1.1 Introduction	4
1.2 La Géothermie	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Importance de la géothermie	4
1.2.3 Différentes types de géothermie et potentiels d'utilisation	4
1.2.3.1 Géothermie haute énergie	4
1.2.3.2 Géothermie a basse énergie	5
1.2.3.3Géothermie à très basse énergie	6
1.2.4 Applications de l'énergie géothermie	6
1.2.5 Avantages et inconvénients de la géothermie	7
1.2.5.1 Avantages	7
1.2.5.2 Inconvénients	8
1.2.6 Les Procèdes de la géothermie	8
1.2.6.1 Puit canadien ou puit provençal	8
1.2.6.2 Pompe à chaleur géothermique	10
1.3 Température du sol	11
1.4 Échangeur de chaleur souterrain (eau/sol)	14
1.4.1 Classification	14
1.4.1.1 Échangeur vertical	14
1.4.1.2 Échangeur horizontal	15

1.5	Généralité sur l'irrigation	15
1.5.1	Définition de l'irrigation	15
1.5.2	Importance de l'irrigation	16
1.5.3	Périmètre d'irrigation	17
1.5.4	Différents techniques d'irrigation	17
1.5.4.1	L'irrigation de surface	17
1.5.4.2	L'irrigation par aspersion	20
1.5.4.3	L'irrigation localisée	21
1.5.5	Température d'eau d'irrigation	22
1.5.6	Les besoins du Palmier Dattier	22
1.5.6.1	Nécessités climatiques	22
1.5.6.2	Nécessités en eau	23
1.6	Conclusion	23
Chapitre 2: Etude bibliographique		
2.1	Introduction	24
2.2	Analyse des travaux effectués	24
2.3	Conclusion	36
Chapitre3 : Dimensionnement d'un échangeur et modélisation du problème		
3.1	Introduction	37
3.2	Paramètres de dimensionnement	37
3.2.1	Longueur des tubes	37
3.2.2	Température de sortie	37
3.2.3	Débit	37
3.2.3	Diamètre des tubes	38
3.2.4	La distance entre les tubes	38
3.2.6	La profondeur d'enfouissement	39
3.2.7	Les autres paramètres	39
3.3	Introduction au CFD	39
3.3.1	Définition du CFD	39

3.3.2	Fonctionnement d'un code CFD	40
3.3.2.1	Prétraitement	40
3.3.2.2	Calcul	41
3.3.2.3	Post-traitement	41
3.4	Présentation du logiciel de simulation « ANSYS Fluent »	41
3.4.1	Équations générales de l'outil Fluent (ANSYS) (Équations gouvernantes du problème étudié)	42
3.4.2	Méthodes de résolution des équations régissantes	44
3.5	Les pertes de charge	45
3.5.1	Les pertes de charge linéique	46
3.5.2	Les pertes de charge singulière	46
3.6	L'efficacité de l'échangeur	47
3.7	Dessiner la géométrie	48
3.8	Maillage	49
3.8.1	Génération du maillage	49
3.9	Mise en données et simulation	50
3.9.1	Lancer Fluent	50
3.9.2	Réglage des paramètres du solveur	52
3-9-3	Général	52
3-9-3-1	Spécification des modèles physiques	52
3.9.3.2	Matériaux	52
3.9.4	Conditions aux limites (Boundary conditions)	54
3.9.5	Itération et convergence	57
3.9.6	Initialisation et iterations	57
3.9.7	Calcul Exécuter (Run calculation)	58
3.10	Conclusion	58
Chapitre 4 : Simulation. résultats et discussions		
4.1	Introduction	59
4.2	Hypothèse considérées	59
4.3	Descriptions	59
4.4	Résultats et Commentaires	60

4.4.1 Effet de la conductivité du sol sur l'échangeur eau/sol	60
4.4.1.1 Pour conductivité du sol égale 1.25 W/mK	60
4.4.1.2 Pour conductivité du sol égale 3 W/mK	62
4.4.1.3 Comparaisons entre la conductivité du sol	64
4.4.2 Effet du débit et longueur sur l'échangeur eau/sol	71
4.4.3 Effet du temps de fonctionnement	75
4.4.4 Effet de la matière de construction du tube de l'échangeur eau/sol	78
4.4.5 Influence de température du sol sur la température de l'eau	79
4.4.6 Impact de la température sur le sol	79
4.4.7 Les pertes de charge	81
4.4.8 L'efficacité de l'échangeur	82
Conclusion générale	83
Annexe	86
Références bibliographiques	88

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1	Géothermie haute énergie.	5
Figure 1.2	Géothermie a basse énergie	5
Figure 1.3	Géothermie très basse énergie.	6
Figure 1.4	Différents utilisation de la géothermie	7
Figure 1.5	Description d'un puit canadien	8
Figure 1.6	Schéma de fonctionnement été-hiver.	9
Figure 1.7	Schéma d'une pompe à chaleur	10
Figure 1.8	Les Flux de chaleur à la surface du sol.	11
Figure 1.9	Profil de la température du sol en fonction de la profondeur pour les mois janvier, avril, juillet et octobre	12
Figure 1.10	Echangeur vertical	14
Figure 1.11	Echangeur horizontal.	15
Figure 1.12	L'ancienne méthode d'irrigation.	16
Figure 1.13	L'irrigation par planches	18
Figure 1.14	L'irrigation à la raie.	18
Figure 1.15	L'irrigation par bassin	19
Figure 1.16	L'irrigation par aspersion	20
Figure 1.17	L'irrigation localisée.	21

Chapitre 2

Figure2.1	Bâtiment Perret à Satigny.	24
Figure2.2	Schéma de principe du système de ventilation	25
Figure2.3	Cycle de refroidissement des eaux d'irrigation	25
Figure2.4	Système de refroidissement des eaux par cascade.	26
Figure2.5	Vue de l'échangeur enterré.	26
Figure2.6	Variation de la température en fonction de la profondeur	27

Figure2.7	Variation des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur	27
Figure2.8	Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps	28
Figure2.9	Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour $T_e = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.	28
Figure2.10	comparaison les résultats analytiques aux résultats expérimentaux	29
Figure2.11	A) Profondeur de pénétration thermique en fonction de la nature du sol ; B) Température moyenne à la surface du sol suivant la nature du sol.	30
Figure2.12	C) Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol ; D) Variation de Température en fonction de la profondeur du sol.	30
Figure2.13	Exemple de distribution 3D de température [K] simulée pour des échangeurs de chaleur au sol : A) échangeurs de chaleur linéaires au sol, B) échangeurs de chaleur hélicoïdaux au sol, C) échangeurs de chaleur slinky.	31
Figure2.14	Résultats de la simulation avec CFD pour différentes débits	32
Figure2.15	Validation des résultats CFD avec des résultats expérimentaux	33
Figure2.16	Evolution de la température de l'air de sortie prévue à temps pour les modes de fonctionnement (a) refroidissement et (b) chauffage. Débits d'air moyens de $210 \text{ m}^3 / \text{h}$ et $453 \text{ m}^3 / \text{h}$ pour le refroidissement et le chauffage, respectivement (à $1,9 \text{ m}$ de profondeur).	34
Figure2.17	Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique pour $t = 17 \text{ h}$ - mode de fonctionnement en refroidissement - et pour certains cas paramétriques : a) vitesse de l'air de $1 \text{ m} / \text{s}$; b) vitesse de l'air de $3 \text{ m} / \text{s}$; (c) vitesse de l'air de $3 \text{ m} / \text{s}$.	35
Figure2.18	Simulation domain for the EAHE	35
Figure2.19	Températures de l'air à l'entrée et aux sorties simulée	36

Chapitre 3

Figure.3.1	Processus du fonctionnement d'un code CFD.	40
Figure.3.2	Les étapes du prétraitement d'un code CFD.	40
Figure.3.3	ANSYS Fluent.	42
Figure.3.4	Géométrie.	48
Figure.3.5	Les conditions aux limites.	49

Figure.3.6	Un maillage du modèle d'échangeur de chaleur géothermique (entré tube).	50
Figure.3.7	Un maillage du model d'échangeur de chaleur géothermique	50
Figure.3.8	La fenêtre de lancement du fluent.	51
Figure.3.9	Les différents paramètres du solveur.	51
Figure.3.10	Etablir les équations de l'énergie	52
Figure.3.11	Définition des caractéristiques du fluide.	53
Figure.3.12	Définition des caractéristiques du solide PVC	53
Figure.3.13	Définition des caractéristiques du solide sol.	54
Figure.3.14	Valeurs des conditions aux limites d'entrée.	55
Figure.3.15	Valeurs des conditions aux limites sur la paroi en bas (bottem).	55
Figure.3.16	Valeurs des conditions aux limites de sortie.	56
Figure.3.17	Valeurs des conditions aux limites de la paroi du sol.	56
Figure.3.18	Valeurs des conditions aux limites de la paroi du sol (top).	57
Figure.3.19	Initialisation de solution	57
Figure.3.20	Exécuter le calcul	58

Chapitre 4

Figure 4.1	Simulation domaine.	60
Figure 4.2	Les iso-surface de serpentin pendant 6 heures de fonctionnement avec A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s	60
Figure 4.3	Les iso-surface de serpentin pendant 12 heures de fonctionnement avec A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s.	61
Figure 4.4	les iso-surface de serpentin pendant 24heures de fonctionnement avec A)0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s.	62
Figure 4.5	Les iso-surface de serpentin pendant 6 heures de fonctionnement avec : A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s	63
Figure 4.6	Les iso-surface de serpentin pendant 12 heures de fonctionnement avec A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s	63
Figure 4.7	Les iso-surface de serpentin pendant 24heures de fonctionnement avec : A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s.	64

Figure 4.8	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.05 kg /s pour 6 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK	65
Figure 4.9	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.05 kg /s pour 12 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK	65
Figure 4.10	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.05 kg /s pour 24 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK	66
Figure 4.11	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.08 kg /s pour 6 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	66
Figure 4.12	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.08 kg /s pour 12 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	67
Figure 4.13	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.08 kg /s pour 24 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	67
Figure 4.14	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.1 kg /s pour 6 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	68
Figure 4.15	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.1 kg /s pour 12 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	68
Figure 4.16	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.1 kg /s pour 24 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	69
Figure 4.17	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.2 kg /s pour 6 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	69
Figure 4.18	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.2 kg /s pour 12 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	70
Figure 4.19	Les iso-surface de serpentin avec débit 0.2 kg /s pour 24 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.	70
Figure 4.20	Température de sortie en fonction la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 1.25 W/mk.	72
Figure 4.21	Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 1.25 W/mk.	72
Figure 4.22	Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 1.25 W/mk.	73
Figure 4.23	Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 3 W/mk.	74
Figure 4.24	Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits	75

pour une conductivité du sol égale 3 W/mk

Figure 4.25	Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 3 W/mk.	75
Figure 4.26	Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,05 kg / s pour différentes heures de fonctionnement.	77
Figure 4.27	Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,08kg / s pour différentes heures de fonctionnement.	77
Figure 4.28	Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,1kg / s pour différentes heures de fonctionnement.	77
Figure 4.29	Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,2 kg / s pour différentes heures de fonctionnement	77
Figure 4.30	Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différentes conductivités thermiques de tube (0.1kg/s).	78
Figure 4.31	Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différentes températures du sol (0.1kg/s).	79
Figure 4.32	Distribution de la température du sol après 12 h de fonctionnement(0.1kg/s).	80
Figure 4.33	Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique du sol pour un débit 0.2kg/s pour différents heurs de fonctionnement. A)6 heures, B)12 heures, C)24 heures.	80
Figure 4.34	Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique du sol pour différents débits de sol après 12 h de fonctionnement. A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2kg/s	81

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tab. 1.1	Les avantages et les inconvénients pour L'irrigation par ruissellement	Page 16
Tab .1.2	Les avantages et les inconvénients pour L'irrigation par bassin	Page 17
Tab. 1.3	Les avantages et les inconvénients pour L'irrigation par bassin	Page 18
Tab. 1.4	Les avantages et les inconvénients pour L'irrigation localisée	Page 19

Chapitre 3

Tab.3.1	Relation donnant le coefficient de perte de charge	Page 42
Tab.3.2	Le coefficient de perte de charge singulière pour deux types de coude	Page 43
Tab.3.3	Paramètres de l'échangeur de chaleur (eau/sol) utilisé pour l'étude.	Page 44

Chapitre 4

Tab.4.1	Température de sortie du Serpentin en fonction des débits.($\lambda=1.5\text{W/mK}$)	Page 62
Tab.4.2	Température de sortie du Serpentin en fonction des débits.($\lambda=3\text{W/mK}$)	Page 64
Tab.4.3	Température de sortie du Serpentin en fonction des débits. (24heurs de fonctionnement).	Page 71
Tab.4.4	Ecart de Température de sortie du Serpentin en fonction de la conductivité du sol, débits et heurs de de fonctionnement	Page 76
Tab.4.5	La conductivité thermique pour déférents types de conduite .	Page 78
Tab.4.6	Les pertes de charge de l'échangeur Serpentin pour différents débits	Page 81
Tab.4.7	L'efficacité de l'échangeur Serpentin pour différents débits.	Page 82

Nomenclature

Désignation	Unité	Description
T	°C	Température
X	m	Coordonnée de position
t	s	Temps
a	m ² /s	Diffusivité thermique du sol
T _a	°C	Température de l'air
T _s	°C	Température de la surface du sol
T _{am}	°C	Température moyenne annuelle de l'air
T _{sm}	°C	Température moyenne annuelle de la surface du sol
T _{sky}	°C	La température du ciel dépend de la température de l'air
T _{sky, m}	°C	Température moyenne annuelle du ciel
A _s	°K	Amplitude de la température moyenne quotidienne de la surface du sol
A _a	°K	Amplitude de la température de l'air
P _s	rad	Phase angle
P _a	rad	Phase angle
L	m	Profondeur d'amortissement
ω	2π/365 days-1	Fréquence des fluctuations de température
H	W / m ²	Le flux de chaleur convectif
h	W / m ² k	Coefficient de transfert de chaleur par convection
LW	W / m ²	Flux de chaleur par rayonnement
σ	W/m ² k ⁴	La constante de Stefan-Boltzmann
ε	–	L'émissivité de la surface du sol
λ _s	W/m K	La connectivité du sol
ρ	Kg/m ³	La masse volumique

D	m	Diamètre du tube
e	m	Epaisseur du tube
L	m	Longueur du conduit
V	m ³	Volume
S	m ²	Surface
P	Pa	Pression
U	m/s	Composante de la vitesse selon Ox
V	m/s	Composante de la vitesse selon Oy
W	m/s	Composante de la vitesse selon Oz
ν	m ² /s	Viscosité cinématique
μ	Pa.s	Viscosité dynamique
c_p	J/k	Capacité calorifique
ϕ_s	W/m ²	Source de chaleur
Λ	-	Coefficient de perte de charge

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les besoins énergétiques augmentent de jour en jour à travers le monde et les réserves des combustibles fossiles ne seront pas suffisantes pour satisfaire dans l'avenir la sur demande énergétique mondial. Les systèmes renouvelables peuvent réduire la demande donc, les chercheurs travaillent sur le développement de ces énergies pour l'utilisation dans des systèmes à grande échelle. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique et énergie géothermique). L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier. Le nom Géothermie, vient du grec Géo (La terre) et thermie (la chaleur), est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter [1].

Le principe consiste à exploiter l'énergie géothermique contenue dans le sol via un échangeur de chaleur et de profiter de l'écart de température entre celle de l'ambiance et du sol dans une profondeur définie, pour chauffer en hiver ou refroidir en été. Lors de la conception d'un échangeur de chaleur, on cherche souvent à déterminer les dimensions de cet échangeur en fonction des paramètres de fonctionnement (conditions aux limites et débit). Répondant aux conditions imposées, qui est une tâche assez délicate à réaliser, est étroitement lié à la configuration géométrique de l'échangeur (longueur, diamètre et configuration) et aux phénomènes de pertes de charges [2].

Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations telles que, la production de l'électricité, le stockage de la chaleur, le chauffage jusqu'à la climatisation des locaux qui connaît un développement important depuis quelques années.

Autrement, l'énergie géothermique a été utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture tel que le chauffage des serres agricoles utilisant l'eau comme fluide caloporteur.

Dans la zone de Biskra, on exploite pour l'irrigation des palmiers dattiers deux types de sources d'eau qui se diffère selon la région, l'exploitation et la profondeur : la nappe de l'Albien et les nappes phréatiques. Les nappes phréatiques se constituent d'eau de mauvaise qualité et des quantités assez réduites. D'autre part, la nappe de l'Albien peuvent la meilleure solution dans le temps en raison, de la bonne qualité ainsi que la disponibilité d'un gisement immense de réserve de ses eaux. Mais cette dernière se trouve à des températures élevées (qui influent négativement sur cette culture) et représente un coût d'exploitation élevé (des profondeurs de l'ordre de 2000 mètres) [3].

Lors de discussions menées avec des agriculteurs des palmiers dattiers de la région et d'autres témoignages enregistrés, on a pu soulever le problème de la température élevée des eaux d'irrigation de la nappe Albienne (favoriser par ces agriculteurs). D'où on s'est lancé sur la base de la formation théorique acquise et à travers le potentiel énergétique renouvelable disponible dans le secteur, à monter un projet de recherche qui s'appuie sur trois axes : i) une recherche bibliographique approfondie sur la thématique, ii) une étude théorique et simulation du problème, iii) une validation de la solution proposée par les voix expérimentales. [3]

Cette étude représente la suite du travail lancé durant l'année universitaire 2019-2020 par Mr. Mohamed Aymen Kethiri sous la direction du Dr. Kamel AOUES. Donc le but est d'approfondir les deux axes commencés l'année dernière qui sont la recherche de travaux antérieurs et le dimensionnement d'un échangeur enterré eau/sol. L'objectif traité par cette étude était la diminution de la température des eaux d'irrigation du palmier dattier dans la région de Biskra. Par conséquent et en occurrence, l'investissement dans les ressources énergétiques renouvelables que dispose la région. La température de cette eau influe négativement sur la fertilité de la terre, la qualité des récoltes, la consommation d'eau d'irrigation en présence du phénomène d'évaporation, la consommation d'électricité dans les aéro-refroidisseurs, les problèmes de la dissolution des sels minéraux et celui de l'infiltration de l'eau dans le sol.

Lors et durant cette deuxième année d'étude sur ce projet et afin d'aboutir à cet objectif, nous avons décomposé le travail en deux parties. La première partie se distingue par une compréhension élargie des mots clés du sujet étudié (Géothermie, échangeur eau/sol, irrigation, palmier dattier, état de l'art). Par conséquent, nous avons décomposé cette partie en deux chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons donné une vue générale sur le thème (Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation des palmiers dattiers dans la zone Biskra), en faisant exposer des définitions sur l'énergie géothermique et les échangeurs de chaleurs enterrée d'une part, et d'une autre sur les techniques d'irrigation, qualité d'eau et les besoins du palmier dattier dans la zone de Biskra.

Le deuxième chapitre expose la synthèse bibliographique établie sur le sujet, par la présentation de quelques travaux menés dans le domaine de l'échauffement et/ou du refroidissement des eaux par la géothermie, et sur le refroidissement des eaux d'irrigations par d'autres méthodes.

Dans la deuxième partie qui enveloppe deux chapitres, on trouve le troisième chapitre, où nous donnons un exposé de la problématique d'une façon détaillées, ensuite donne une brève

présentation sur la méthode (CFD) choisie pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS « Fluent »).

Dans le quatrième chapitre, on présente le cas étudié, le processus de simulation par Fluent et les résultats obtenus lors du calcul. Dans ce calcul, nous avons testé différents temps de fonctionnement, la conductivité du sol, plusieurs matériaux de construction et débits pour qu'on puisse les comparer et par conséquent, dimensionner la meilleure configuration qui soulève notre problème.

En fin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS

1.1. Introduction

Dans ce premier chapitre notre objectif est de donner une vue générale sur le thème (**refroidissement par la géothermie des eaux d'irrigation échangeur eau/sol forme serpentin**) en faisant d'une part exposer les définitions, les avantages et les inconvénients sur l'énergie géothermique et ses différents types ainsi que les potentiels d'utilisation. D'autre part, nous présentons les différentes techniques d'irrigation, la qualité des eaux et les besoins du palmier dattier dans la zone de Biskra.

1.2. La géothermie

1.2.1. Définition

La Géothermie, du grec Géo (La terre) et thermie (la chaleur), est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [1].

1.2.2. Importance de la géothermie

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].

1.2.3. Différents types de géothermie et potentiels d'utilisation

1.2.3.1. Géothermie haute énergie [6, 7]

- La géothermie a haute énergie : (haute enthalpie, haute température, profonde),
- La profondeur : plus de 1500 mètres.
- La température : entre 80 et 300 °C.
- L'objectif : Production d'électricité et de chaleur à la fois. Le moyen : une turbine à vapeur pour l'électricité et de récupération des condensats de vapeur pour la chaleur.

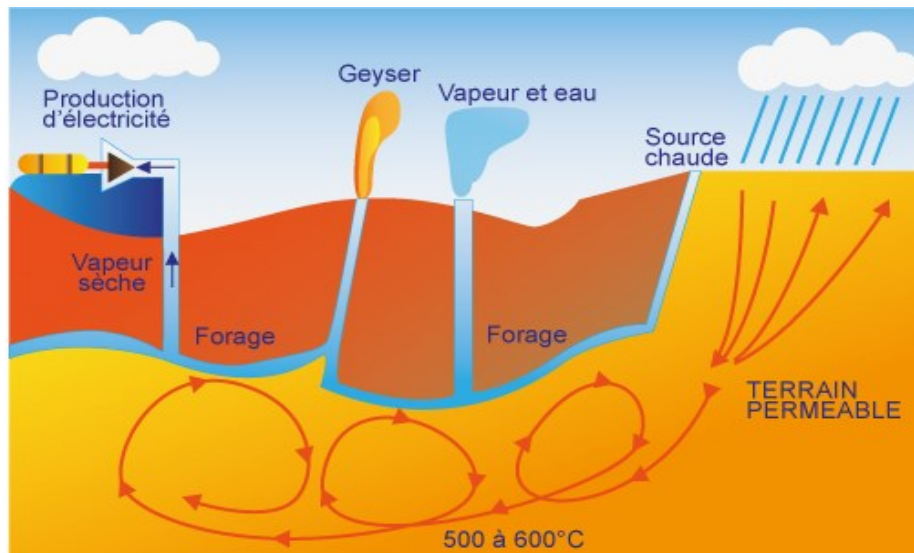


Figure 1.1 – Géothermie haute énergie [6].

1.2.3.2. Géothermie à basse énergie [6, 7]

- La profondeur : 1500 et 2500 mètres.
- La température : entre 30 °C et 100 °C.
- L’objectif : le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur et certaines applications industrielles.
- Le moyen : 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.

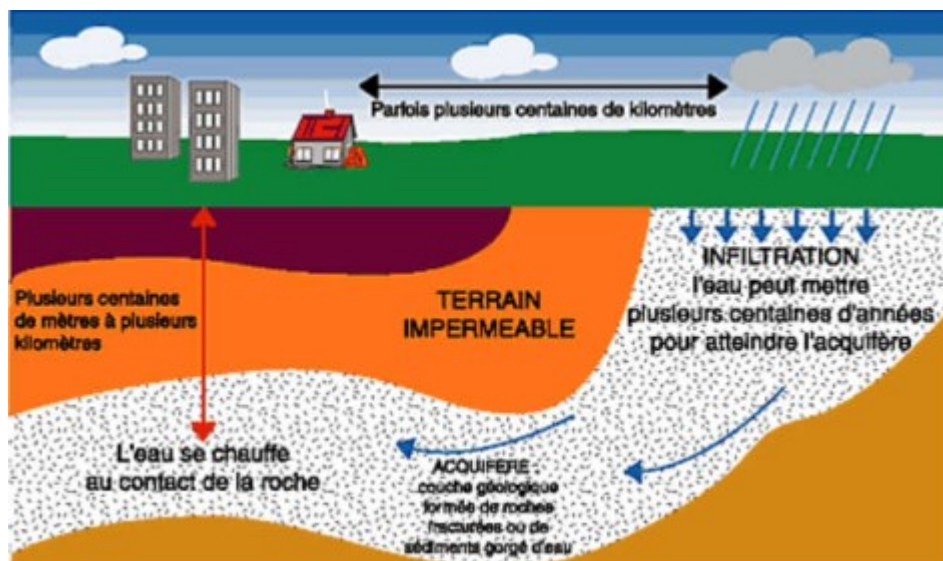


Figure 1.2 – Géothermie a basse énergie [6].

1.2.3.3. Géothermie à très basse énergie [6, 7]

- La profondeur : centaines mètres.
- La température : entre 10 et 30°C.
- L'objectif : la climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal et le chauffage et la climatisation.
- Le moyen : 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.

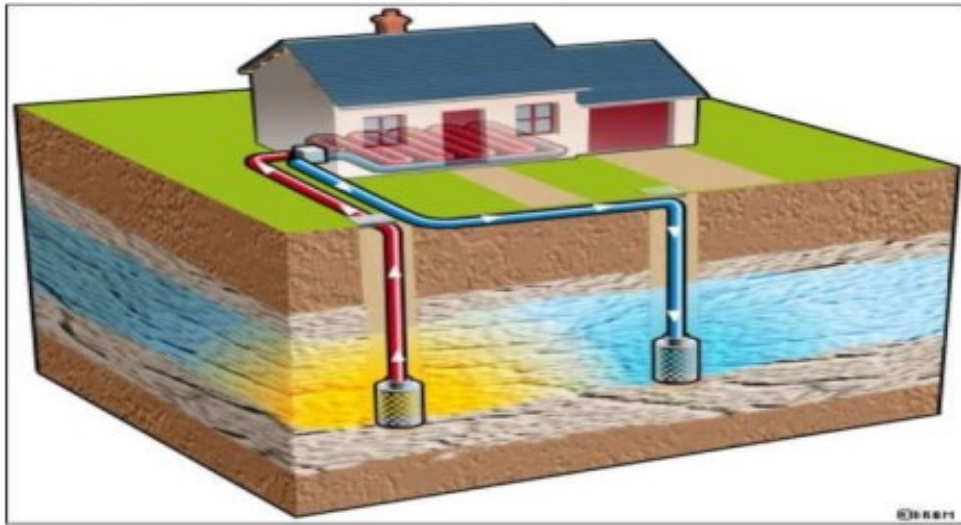


Figure 1.3 – Géothermie très basse énergie [6].

1.2.4. Applications de l'énergie géothermie [3]

- Produire du chauffage.
- Produire de l'eau chaude sanitaire (ECS).
- Produire du chaud et du froid.
- Produire de l'électricité.
- Stocker de la chaleur.

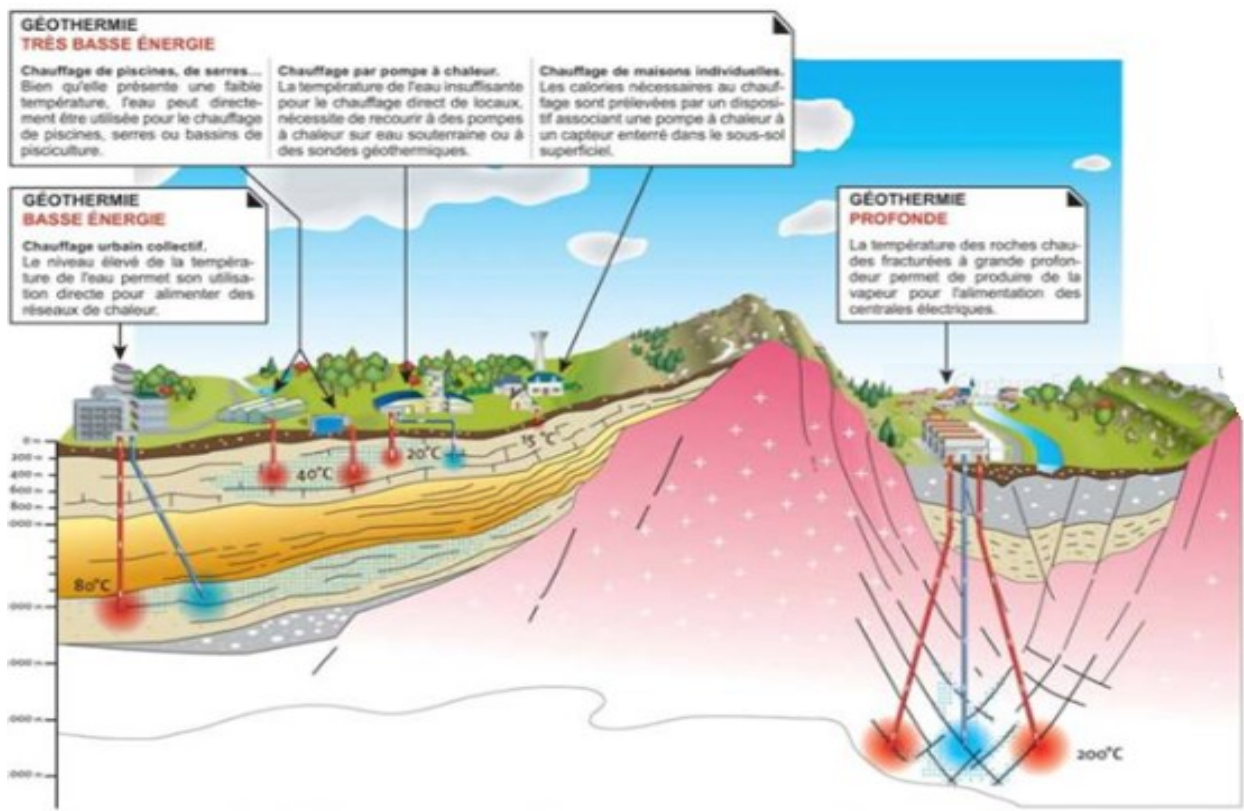


Figure 1.4 – Différents utilisation de la géothermie [6].

1.2.5. Avantages et inconvénients de la géothermie

1.2.5.1. Avantages [3, 9]

- C'est un système économique, le coût d'exploitation est plus faible.
- Le coût de la consommation d'énergie est fortement réduit.
- L'énergie n'est payée qu'après avoir été consommée.
- Entretien réduit.
- Coût d'utilisation réduit -Utilise de l'énergie 100% gratuite.
- Facile d'utilisation.
- L'énergie géothermique n'est pas liée à la politique pétrolière.
- À dimension humaine, l'énergie géothermique est inépuisable.
- Elles n'utilisent pas de combustion pour chauffer,
- Pas de fumée.
- C'est un système confortable et écologique
- Pas de combustion.

1.2.5.2. Inconvénients [3, 9]

- L'investissement de départ est plus élevé.
- C'est une énergie qui se transporte difficilement, elle doit donc être utilisée sur place.
- Assèchements estivaux.
- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.

1.2.6. Les Procèdes de la géothermie

Il existe différents techniques qui sont utilisées pour prélever l'énergie contenue dans le sous-sol.

1.2.6.1. Puit canadien ou puit provençal

- Définition** : C'est un système géothermique de la surface qu'utilise l'inertie de surface du sol pour la ventilation principalement.
- Objectifs** : Le puit canadien sert à préchauffer l'air extérieur l'hiver et climatiser l'été (puits provençal). C'est un échangeur d'air géothermique.

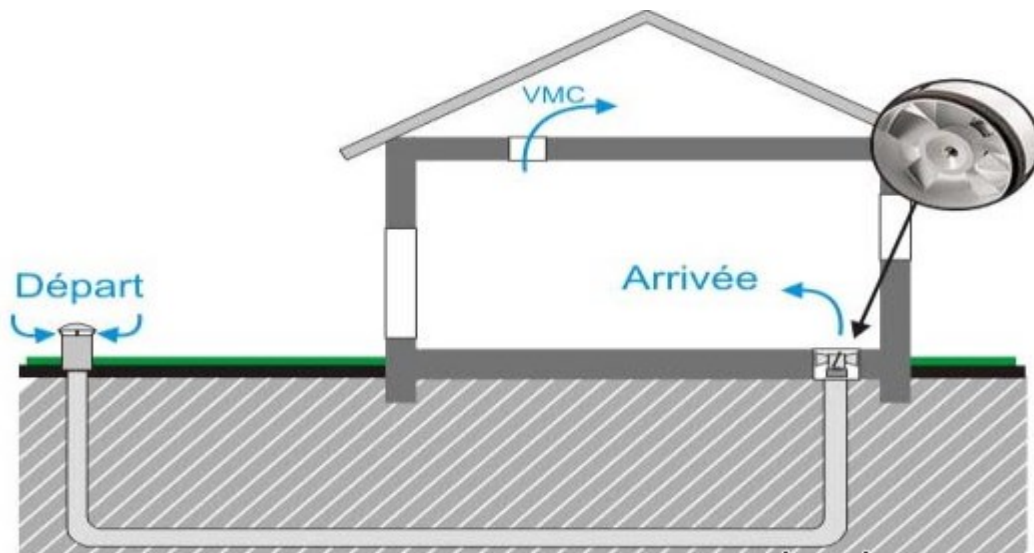


Figure 1.5 - Description d'un puit canadien [10].

c) **Principe** : L'utilisation d'un échangeur air/sol, système appelé communément « puits canadien » et parfois « puits provençal » lorsqu'il sert à rafraîchir l'habitation, connaît un développement important depuis quelques années. Il consiste à utiliser comme entrée pour la ventilation de la maison, de l'air qui a préalablement circulé dans un tube enterré à une certaine profondeur. La température du sous-sol étant moins variable que celle de l'air extérieur cela permet d'avoir une entrée d'air plus tempérée. En hiver, l'air est réchauffé avant de pénétrer dans la maison ; en été il est rafraîchi. Il s'agit ainsi du système de géothermie le plus simple qui soit, avec une consommation électrique réduite à la celle du ventilateur utilisée pour la circulation de l'air.

Ce système est utilisé traditionnellement en Amérique du nord pour maintenir les habitations hors gel sans chauffage pendant l'hiver pourtant très rigoureux (à noter que le terme de « puits canadien » n'est pas employé au Canada) [10].

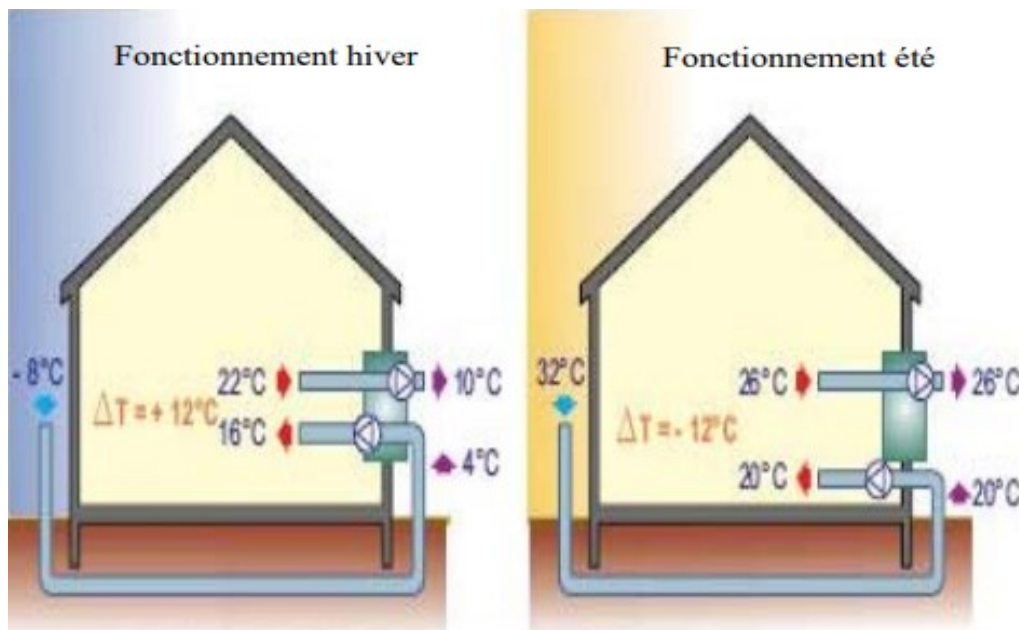


Figure 1.6 - Schéma de fonctionnement été-hiver [11].

1.2.6.2. Pompe à chaleur géothermique

- a) **Définition** : La pompe à chaleur est un appareil capable de transférer de l'énergie d'un milieu « froid » vers un milieu « chaud ». Concrètement, cela consiste à prélever des calories du milieu naturel (air, sol ou eau) pour les injecter à l'intérieur du bâtiment que l'on souhaite chauffer. Même « froids », l'air, le sol et l'eau renferment de la chaleur qu'il est possible d'extraire moyennant une dépense énergétique initiale.

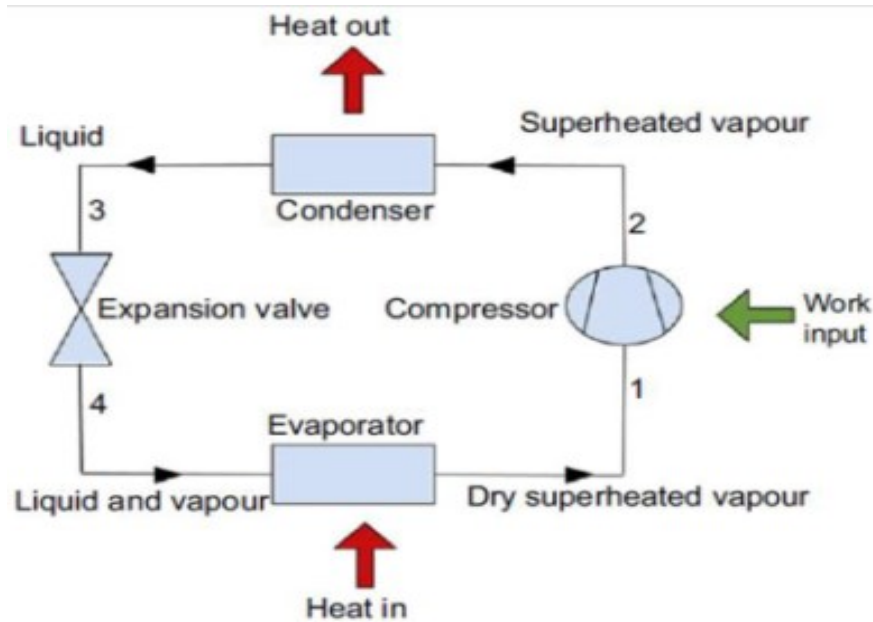


Figure 1.7- Schéma d'une pompe à chaleur [3].

- b) **Principe** : La chaleur prélevée dans le milieu naturel est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. Au niveau du condenseur, la vapeur, en se condensant, transmet sa chaleur au milieu à chauffer. La température du fluide s'abaisse alors dans le détendeur, le rendant prêt pour un nouveau cycle. Le principe est similaire à celui du réfrigérateur : la chaleur est extraite du compartiment interne du réfrigérateur, d'où l'apparition de froid. La chaleur produite est évacuée par la grille derrière l'appareil et chauffe... la cuisine [3].

1.3. Température du sol

Sur la base d'une analyse théorique des flux thermiques se produisant à la surface du sol, la température de la surface du sol peut être liée à la température de l'air. Ces deux quantités sont dépendant du temps et défini par des relations analytiques contenant la fonction cosinus. Les paramètres de ces relations sont les suivantes : températures moyennes annuelles, amplitudes de fluctuation annuelle et phase angles. Ces paramètres sont facilement accessibles pour l'air. Afin de déterminer les paramètres de la surface du sol avec des paramètres connus pour l'air, le bilan thermique à la surface du sol devrait être pris en considération, et la dépendance pour déterminer les flux de chaleur individuels devrait être formulée. Sur la base de ce bilan thermique, un modèle mathématique peut être développé par Barbara Lawra [12].

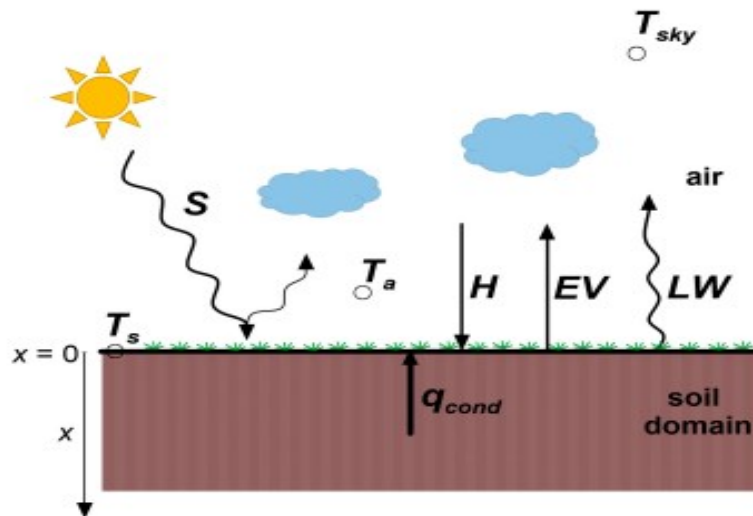


Figure 1.8 - Les Flux de chaleur à la surface du sol [12].

❖ Conduction de chaleur dans le sol :

Le transfert de chaleur dans le sol se produit principalement en raison de la conduction thermique. Conduction thermique l'équation est donnée par :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

T : température du sol ($^{\circ}\text{C}$) ; a : diffusivité thermique du sol (m^2/s) ; x : coordonnée de position (m) ; t : temps (s).

La température moyenne quotidienne du sol T est la fonction suivante de la coordonnée de position x et du temps t :

$$T(x,t) = T_{sm} - A_s \cdot \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot t - P_s - \frac{x}{L}\right) \quad (1.2)$$

T_{sm} - température moyenne annuelle de la surface du sol ($^{\circ}\text{C}$) ;

A_s - amplitude de la température moyenne quotidienne de la surface du sol (K) ;

P_s : phase angle (rad) ; L : profondeur d'amortissement (m) définie comme :

$$L = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (1.3)$$

ω : fréquence des fluctuations de température, la fréquence est égale à $\omega = 2\pi / 365 \text{ jours}^{-1}$.

La profondeur d'amortissement, définie par l'équation (1.3), est une constante caractérisant la diminution de l'amplitude avec une augmentation de la distance de la surface du sol. Le sol peut être traité comme un système composé d'une couche souterraine, dans laquelle il existe des interactions liées à l'évolution des conditions météorologiques, et une couche plus profonde dans laquelle ces impacts ne se produisent pas. L'épaisseur de la couche souterraine dépend de la diffusivité thermique du sol. Pour les faibles valeurs de diffusivité thermique, la couche souterraine a une faible épaisseur, mais lorsque la diffusivité thermique du sol est élevée, la stabilisation du sol la température se produit à de plus grandes profondeurs [13].

Les tracés de la figure (1.9) montrent le profil de pénétration de la température dans le sol en fonction de la profondeur pour les quatre saisons de l'année [14].

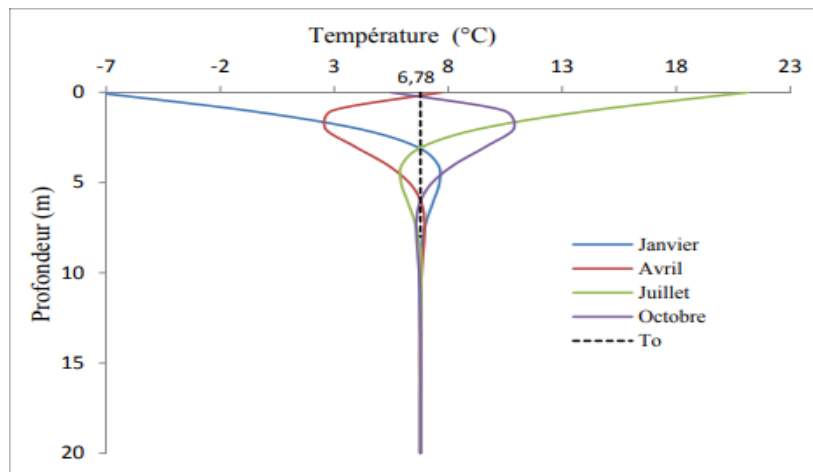


Figure 1.9 – Profil de la température du sol en fonction de la profondeur pour les mois : janvier, avril, juillet et octobre [14].

❖ Le flux de chaleur convectif est déterminé par l'équation de transfert de chaleur :

$$H = (T_a - T_s) \quad (1.4)$$

Où :

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W / m^2K) ;

T_a : température de l'air ($^{\circ}C$)

T_s : température de la surface du sol ($^{\circ}C$).

$$T_a = T_{am} - A_a \cos(\omega.t - P_a) \quad (1.5)$$

Où :

T_{am} : Température moyenne annuelle de la température de l'air ($^{\circ}C$) ;

A_a : amplitude de la température de l'air (K) ;

P_a : angle de phase (rad).

$$T_s = T_{sm} - A_s \cos(\omega.t - P_s) \quad (1.6)$$

Où :

T_{sm} : Température moyenne annuelle de la température de la surface du sol ($^{\circ}C$) ;

A_s amplitude de la température de la surface du sol ;

P_s - angle de phase (rad).

❖ Flux de chaleur par rayonnement :

$$LW = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (1.7)$$

$\sigma=5.67*10^{-8}$ (W/m^2k^4) est la constante de Stefan-Boltzmann ;

ε : l'émissivité de la surface du sol ;

T_{sky} : La température du ciel dépend de la température de l'air $^{\circ}C$.

Avec :

$$T_{sky} = T_{sky,m} - A_{sky} \cos(W.t - P_a) \quad (1.8)$$

Où :

$T_{sky, m}$: température moyenne annuelle du ciel ($^{\circ}C$) ;

A_{sky} : amplitude de la température du ciel (K).

1.4. Échangeur de chaleur souterrain (eau/sol)

1.4.1. Classification

Les circuits souterrains peuvent être classés selon leurs configurations. Une première classification peut être faite en fonction de la nature du circuit ouvert ou fermé. Dans le cas où on utilise directement l'eau souterraine comme source (ou puits) de chaleur on parlera de circuit ouvert. Dans le cas contraire si on utilise un fluide qui circule dans une boucle fermée (sans interaction avec eau souterraine) on parlera de circuit fermé.

Une autre classification existe aussi selon la manière dont on enfouit les tuyaux dans le sol. Il existe deux configurations : verticale ou horizontale. Ces deux types d'échangeurs sont aussi classés comme des systèmes à boucle fermée.

1.4.1.1. Échangeur vertical

L'échangeur de chaleur souterrain de type vertical est le plus utilisé et nécessite une main d'œuvre spécialisée ; en effet il existe des formations dédiées au forage géothermique. C'est un ensemble de forages verticaux qui peuvent aller en profondeur jusqu'à 150 m. Le fluide circule (faisant des allers-retours) dans la tuyauterie, placée dans les forages, souvent sous forme de tube en U ou coaxial comme le montre la figure (1.10) [15].

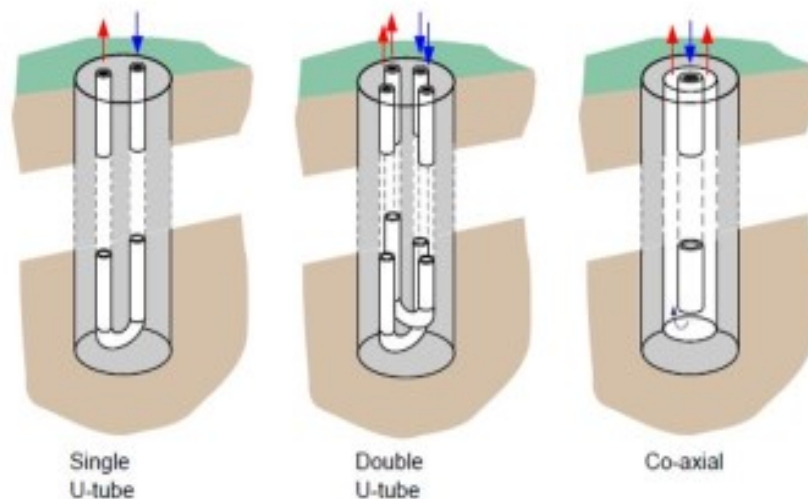


Figure 1.10 – Echangeur vertical [3].

1.4.1.2. Echangeur horizontal

Le second type d'échangeur de chaleur souterrain consiste à enterrer un réseau de tuyauterie de façon horizontale. Cet échangeur nécessite une surface plus grande que le premier type, mais est moins cher . Pour répondre à un besoin donné nous avons deux possibilités, soit augmenter la surface utilisée pour l'échange, soit augmenter la longueur de la tuyauterie . Dans les deux cas, il faut essayer de trouver un compromis avec le côté économique [15].



Figure 1.11 - Echangeur horizontal [11].

1.5. Généralité sur l'irrigation

1.5.1. Définition de l'irrigation

L'irrigation est l'application de l'eau au sol dans le but de rafraîchir le sol et l'atmosphère, par ce moyen réaliser les conditions les plus favorables pour la croissance des plantes. Mais quel que soit l'origine de l'eau (cours d'eau naturel, nappe souterraine, eau de barrage) et son mode de transport (canaux, conduite sous pression), le problème qui se pose est comment répartir cette eau sur le sol de façon que les plantes en tirent le maximum de profit. Cependant le moyen de répartition de l'eau sur le sol ne doit pas toujours répondre à ce critère d'une production maximale, donc on doit essentiellement envisager un choix minutieusement détaillé du mode d'irrigation et de la technique d'arrosage et compatibilité avec les contraintes de la région d'étude [16].



Figure 1.12 – L'ancienne méthode d'irrigation [16].

1.5.2. Importance de l'irrigation

Jusqu'à présent l'irrigation reste le seul moyen d'augmenter les rendements et de les régulariser dans bien des régions du monde. En effet, selon les espèces et variétés cultivées, selon les terres, et selon les techniques utilisées, l'irrigation peut permettre d'obtenir de deux à cinq fois plus de production.

L'irrigation n'est pas uniquement un apport d'eau sur une terre cultivée en vue de compenser l'insuffisance des précipitations et de permettre le plein développement des cultures. Elle est considérée plutôt comme un ensemble d'actions de développement intégré des milieux agricole et rural qui doit se traduire non seulement par l'augmentation de la production et l'amélioration du niveau de vie de l'agriculteur, mais doit se traduire également par la préservation du milieu, notamment des terres agricoles, et par une économie de l'eau d'irrigation qui elle-même se traduit par une économie dans l'utilisation de l'énergie [17].

1.5.3. Périmètre d'irrigation

En irrigation, on appelait périmètre dominé toute la surface, quel que soit sa nature (terres, routes, villages, forêts, etc...), dominée par le canal principal et susceptible, en conséquence, d'en recevoir de l'eau par gravité. En réalité ce terme a perdu son sens précis depuis que le développement du pompage et du pré-pompage mécanique permet d'arroser des zones situées à des cotes plus élevées que le canal principal. Il vaudrait donc mieux parler maintenant de périmètre d'irrigation, quoique les termes périmètre dominé restent d'usage courant même dans leur sens élargi. La partie du périmètre d'irrigation susceptible d'être arrosée avec profit s'appelle le périmètre irrigable ; la fraction qui en est effectivement arrosée est le périmètre irrigué. Les rapports entre les dimensions de ces différents périmètres sont extrêmement variables selon les régions, l'importance et l'évolution des projets [16].

1.5.4. Différents techniques d'irrigation

Les techniques d'irrigation peuvent être rangées en trois (03) classes, sont :

- L'irrigation de surface ;
- L'irrigation par aspersion ;
- L'irrigation localisée ou micro irrigation.

1.5.4.1. L'irrigation de surface

L'irrigation de surface regroupe l'ensemble des techniques d'arrosage dans lesquelles la répartition de l'eau à la parcelle se fait entièrement à l'air libre, par simple écoulement à la surface du sol. La répartition de l'eau est assurée grâce à la topographie du terrain et aux propriétés hydriques du sol (ruissellement, infiltration et capillarité).

En irrigation de surface, la distinction entre les différentes techniques est essentiellement fondée sur la méthode d'application de l'eau : ruissellement, submersion ou techniques mixtes [16].

a. L'irrigation par ruissellement

- L'irrigation par planches

Consiste à faire couler une mince couche d'eau sur un sol inclinée 0,2 à 3%. Le débit à déverser est fonction de la pente, de la largeur et de la longueur de la planche. Cette méthode est de loin la plus difficile car il faut ajuster le débit d'irrigation de chaque planche avec toutes les autres variables [17].



Figure 1.13 - L'irrigation par planches [17].

- **L'irrigation à la raie**

L'irrigation à la raie consiste à aménager des sillons ou petites rigoles de terre dans le sens de la pente du terrain pour transporter l'eau entre les rangées de cultures. L'eau s'infiltré dans le sol, principalement par les côtés du sillon, tout le long de son trajet dans le sens de la pente du terrain. Généralement, les plantes sont cultivées sur des billons séparant les sillons. Cette technique est valable pour l'irrigation de toutes les cultures en lignes et pour toutes les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par les eaux de leurs feuillages ou de leur collet pour une longue durée. Les sillons sont alimentés par des prises d'eau aménagées sur les berges du canal d'amenée [18].



Figure 1.14 - L'irrigation à la raie [18].

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> - Les investissements sont presque nuls. - Il n'y a pas de coût de pompage pour la mise sous pression de l'eau. - L'irrigation elle-même s'effectue avec un matériel très simple. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elle provoque une importante perte d'eau (40 à 50 % par rapport aux techniques modernes). - Elle nécessite un nivellement et un entretien. - Les besoins en main d'œuvre sont très importants.

Tableau 1.1 – Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par ruissellement [19].

b. L'irrigation par bassin

Sa pratique sur un sol nivelé (pente 0,1 à 1%) ainsi que la simplicité de l'opération, qui consiste à remplir le bassin, font que cette technique est fréquemment utilisée. Dans plusieurs régions du Maroc, la taille des bassins est de 40 à 50 m² et cette technique est connue sous le nom "Robta". Cette dernière occasionne une perte importante de superficie, due au nombre important de cloisonnements. Cette méthode est aussi utilisée pour l'irrigation des arbres fruitiers. Dans ce cas un bourrelet est aménagé autour de l'arbre pour le protéger de l'eau à cause des maladies comme la gommose par exemple. Cette méthode ou les canaux d'arrivée d'eau sont très nombreux, ou les pertes par infiltration sont importantes dans les canaux. La prise comprend un tuyau vertical sortant au-dessus du sol, le plus souvent muni d'un à vis permettant de régler le débit [17, 18].



Figure 1.15 - L'irrigation par bassin [18].

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> - Elle nécessite peu de surveillance. - Protège les cultures contre les gelées matinales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tassement du sol. - Système à éviter dans les sols imperméables. - Nécessite des quantités importantes d'eau.

Tableau 1.2 – Les avantages et les inconvénients de l'irrigation par bassin [19].

c. L'irrigation mixte

Il s'agit d'un ruissellement suivi d'une submersion. Les dispositions générales de ce mode d'irrigation sont identiques à celles que nous avons vu, mais lorsque l'eau atteint le niveau voulu dans le bassin, on continue à les alimenter en prenant soin d'évacuer les surplus. A cet effet, les compartiments sont munis d'un déversoir arasé au niveau fixé pour le plan maximal. L'eau en excès est évacuée dans les colatures ou dans un bassin contigu. L'avantages de ce système est que l'eau est plus aérée apport plus de matières nutritives et présente une température plus régulière ce qui peut être intéressant pour les cultures [18].

1.5.4.2. L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est un système d'arrosage qui consiste à distribuer l'eau sous forme de pluie sur le sol. Très employée par les jardiniers, les horticulteurs et les arboriculteurs pour les cultures maraichères, florales, fruitières, les pelouses. L'aspersion se fait soit par des instruments fixes soit par des installations mobiles et parfois mixtes, pour nos surfaces on peut concevoir les derniers qui comprennent des canalisations principales permanentes et des rampes mobiles. L'absorption d'eau par le sol se fait rapidement puisque à celle adoptée au module d'arrosage [16].



Figure 1.16 - L'irrigation par aspersion [12].

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> - Ne nécessite en aucune manière le nivellement préalable des sols. - Peut être employée quelle que soit la nature du sol arrosé. - Elle provoque une forte oxygénation de l'eau projetée en pluie. - Elle assure une bonne homogénéité de la répartition des apports. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elle favoriserait l'évaporation qui est d'autant plus intense que les gouttelettes sont plus fines et l'air plus sec. - Difficultés d'utilisation et efficacité réduite en régions ventées. - Possibilités réduites pour l'arrosage avec des eaux résiduaires (formation d'aérosols).

Tableau 1.3 – Les avantages et les inconvénients pour L'irrigation par bassin [19].

1.5.4.3. L'irrigation localisée

L'irrigation goutte à goutte consiste à apporter régulièrement et de façon localisée au niveau des racines, la juste quantité d'eau dont la plante a besoin. Les plus utilisés sont les goutteurs intégrés, les boutons et de moins en moins les goutteurs en ligne. Ces trois types de goutteurs sont des organes de distribution, dont la conception particulière permet de délivrer l'eau à faible débit, dans des conditions de régime turbulent. Ces différents goutteurs existent sous une forme autorégulant présentant l'avantage de délivrer un débit homogène, même quand la pression varie à l'intérieur d'une gamme [14].



Figure 1.17 - L'irrigation localisée [18].

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> - Economie d'eau. - Réduction des adventices (mauvaises herbes). - Meilleure tolérance des cultures aux eaux salées. - Très faibles besoins de main-d'œuvre. - Raccourcit le cycle végétatif de la culture. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût globalement élevé qui fait réserver cette technique aux cultures à forte valeur ajoutée. - Exige un haut degré de compétence à tous les niveaux : études préliminaires agro pédologique, conception de l'installation, - Nécessite la filtration de l'eau d'irrigation.

Tableau 1.4 – Les avantages et les inconvénients pour L'irrigation localisée [19].

1.5.5. Température d'eau d'irrigation

La température optimale pour que les racines puissent absorber l'eau et les nutriments se situe aux environs de 20 °C. À cette température, l'eau présente dans le substrat contient encore une grande quantité d'oxygène. C'est également la bonne température pour déclencher le mécanisme de pompage des racines. À des températures inférieures, le mécanisme de pompage n'est pas aussi efficace, alors qu'à des températures plus élevées, la plante est moins apte à absorber l'oxygène présent dans l'eau. Par ailleurs, les températures plus élevées et un manque d'oxygène peuvent entraîner une augmentation de la formation de moisissure et des bactéries nuisibles, et tous les problèmes qui y sont liés [8].

1.5.6. Les besoins du Palmier Dattier

D'après les statistiques, l'Algérie est parmi les grands pays en production des dattes avec 20 228 840 de palmiers dattiers. C'est parmi le produit le plus exporté. C'est pour cela, il faut le préserver. Le palmier dattier est une culture comme tous les cultures elle a besoin de :

1.5.6.1. Nécessités climatiques

Les facteurs limitant la culture du palmier dattier sont la température élevée, l'absence presque totale de pluies et le degré hygrométrique faible. La floraison ne débute qu'avec une température assez élevée, elle diffère suivant les régions : 17 °C à Elche en Espagne, 18 °C à Laghouat, 20 °C à Oued Righ et entre 22 et 25 °C dans le sud de Sahara. [20].

Le palmier dattier s'accommode des grands écarts de température des climats du type saharien. Il résiste bien au froid en dehors de la période allant de la floraison à la maturation. A -5 °C, ses palmes jaunissent quelque peu ; à -9°C, certaines variétés ont les folioles gelées mais, la récolte suivante ne semble pas être trop éprouvée. Il tolère durant l'été les maximas les plus élevés (56 °C) pendant plusieurs jours sans paraître en souffrir lorsqu'il est normalement alimenté en eau (irrigation ou nappe phréatique). Son activité végétative atteint son maximum d'intensité vers 32 °C dans l'ensemble, les températures permettant la végétation sont comprises entre 10 et 40 °C [20].

1.5.6.2. Nécessités en eau

a) Consommation en eau du palmier dattier

En Californie (U.S.A.), les doses d'irrigation utilisées en phéniculture sont de l'ordre de 27 000 m³/ha/an (Q = 0,86 litres/sec/ha), à Oued Righ (Algérie) 28000 m³ (Q = 0,90 litres/sec/ha), dans les Ziban (Algérie) 15 000 m³ (Q = 0,50 litres/sec/ha), en fonction de la nature du sol et du climat. De notre connaissance du milieu, nous estimons qu'au Tafilalt (Maroc) un volume annuel de 18 500 m³/ha/an (Q = 0,60 litres/sec/ha) doit suffire ; dans le Bas-Draâ 22000 m³/ha/an (Q = 0,70 litres/sec/ha) seront nécessaires [16].

b) Qualité de l'eau d'irrigation

Dans bien des cas, les eaux d'irrigation en Afrique du Nord sont chargées en sels. Le palmier dattier admet bien les eaux d'irrigation salées. Ainsi, dans la région d'Oued Righ, la plupart des palmeraies sont arrosées avec des eaux tirant de 4 à 7 grs de sel par litre. Au-dessus de 9 grs d'extrait sec par litre, il semble que la grosseur des fruits produits soit plus faible que la normale [20].

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des définitions et des généralités sur les mots clés du sujet étudiés. On s'est basé sur la géothermie, la température du sol, les échangeurs de chaleurs enterrés, les Procèdes de la géothermie.

CHAPITRE 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction :

Dans le but de situer notre travail par rapport aux travaux effectués on essaye dans ce chapitre de présenter les principaux travaux de recherches rencontrés dans la littérature qui sont menés dans le même domaine.

2.2 Analyse des travaux effectués

Hollmuller et al., 2000, [8] ont opté pour un stockage direct de la chaleur dans le sol de la serre. Ils ont mis au point un système de récupération de l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible. Ce système est constitué d'un échangeur eau/air couplé avec des échangeurs en PVC enterrés dans le sol à 30 cm de profondeur. Cette technique permet d'économiser 12 % de l'énergie annuelle destinée au chauffage des serres par des systèmes conventionnels fonctionnant avec le fuel.

En 2003 (Hollmuller et al.) [21] ont présenté une étude expérimentale sur les échangeurs de chaleurs eau /sol sous forme d'un collecteur destiné pour le préchauffage et le rafraîchissement des locaux. Ils ont pris le Bâtiment Perret à Satigny, (GE) comme un cas d'étude site expérimental voire la figure2.1.

En 2005 (Hollmuller et al.) [22] ont appuyé sur l'ancien rapport. Ils résument leur rapport et présentent les résultats les plus essentielles dans leur travail. Ce travail délimite le potentiel de préchauffage et rafraîchissement de bâtiments par échangeur air/eau/sol (collecteur souterrain à eau couplé sur la ventilation). En prenant soin de caractériser les prestations par rapport à l'ensemble du système de ventilation et au bâtiment.



Figurr2.1- Bâtiment Perret à Satigny.

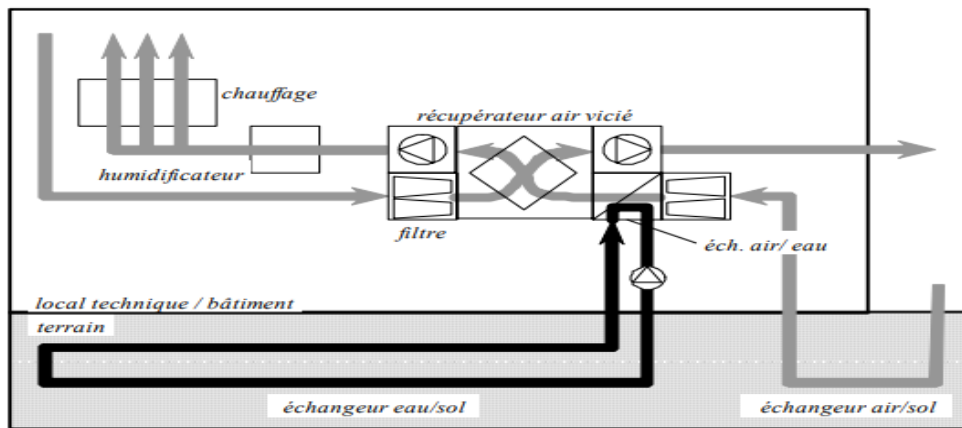


Figure2.2- Schéma de principe du système de ventilation.

En2008 Haddah, M. [4] à utiliser les eaux géothermales pour l'irrigation et le chauffage des serres en Tunisie. Ce travail résume l'exploitation de la géothermie dans le domaine agriculture. Il a profité des sources géothermales pour l'irrigation avec sa qualité d'eau. Pour une bonne irrigation et la chaleur de ses eaux pour chauffer le sol et les serres.

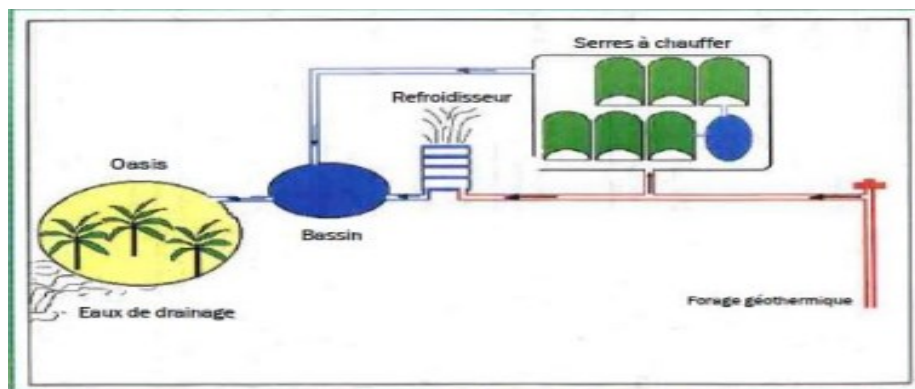


Figure2.3 – Cycle de refroidissement des eaux d'irrigation.

Lors de l'utilisation de ses eaux a trouvé le problème de l'élévation de la température de ses eaux et pour cela a utilisé les réfrigérateurs atmosphériques et les aéro-réfrigérant pour qu'il puisse baisses la température et la rendre adéquate à l'irrigation.



Figure2.4– Système de refroidissement des eaux par cascade.

En 2009 N.Naili et al.,[5] On réalisées une étude expérimentale pour un échangeur eau/sol en polyéthylènes de longueur 10 m et de diamètre interne 0.02 m, est disposé en serpentin (voir la figure1). La distance entre les tubes est de 0.3 m pour éviter au plus le déchargement du sol. Cette étude est pour un but de détermination des différentes températures (Voir figure 2.5), au niveau enfouissement, à l’entrée et à la sortie de l’échangeur.



Figure2.5 - vue de l’échangeur enterré.

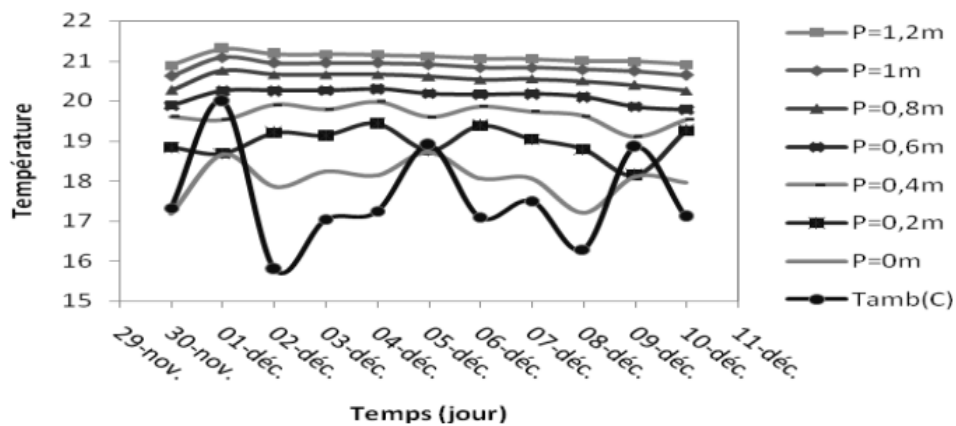


Figure2.6 -Variation de la température en fonction de la profondeur.

La présente étude est une contribution à l'exploitation de la géothermie de surface en Tunisie au moyen d'un échangeur enterré disposé horizontalement. L'étude expérimentale a permis de montrer que : Tunisie présente un potentiel géothermique important, en effet, la température du sol est égale à 21 °C pour une température extérieure moyenne de 16 °C. La quantité de chaleur récupérée du sol est de l'ordre de 270 W (pour une 33 longueur de 10 m). Des longueurs de l'ordre de 100 m permettent une élévation plus importante de température et de la quantité de chaleur récupérée du sol.

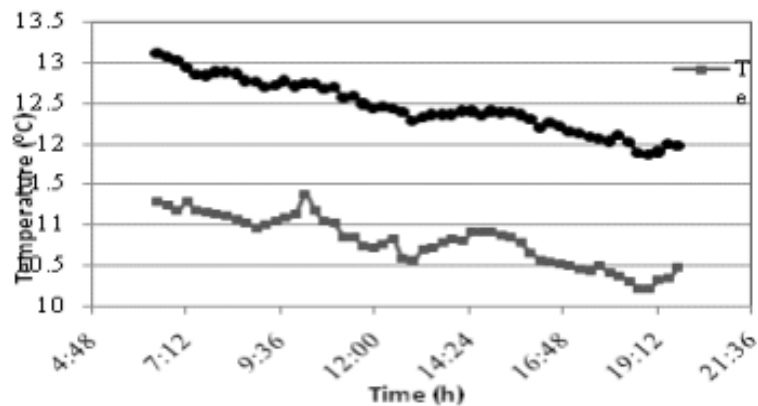


Figure 2.7-Variation des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur.

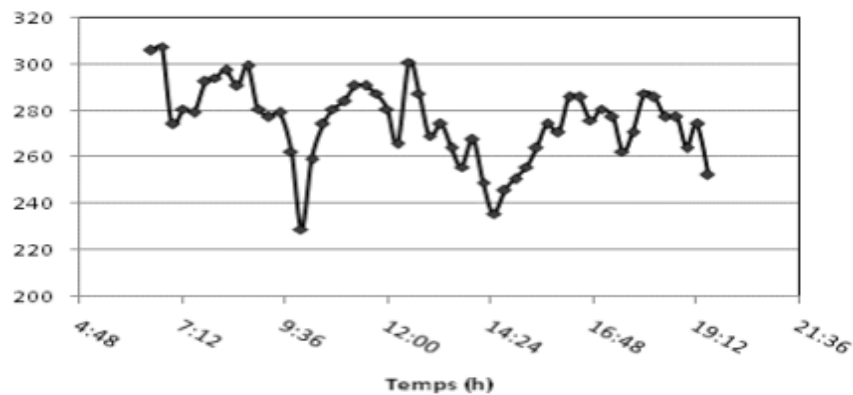


Figure 2.8 -Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps.

En 2010 N. Naili et al., [2] dans le but de dimensionner un échangeur eau/sol, une étude analytique qui consiste à évaluer les performances thermiques et à optimiser les paramètres de fonctionnement de l'échangeur de chaleur. 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.

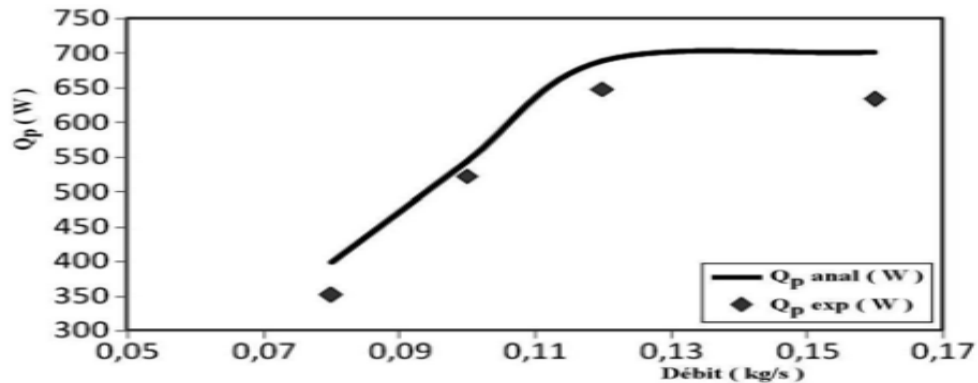


Figure 2.9 Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour $T_e = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

En 2010 N.Moumi et al [1] ; à travers la modélisation et l'expérimentation ,ils ont essayé dans leur projet d'évaluer les performances d'un échangeur air/sol 'puit canadien'. Le modèle thermique analytique comparé aux résultats expérimentaux (voir la figure 2.10) traduit l'influence des prospérités du sol. Les résultats expérimentaux qu'ils ont permis de conclure que le modèle présenté pourra être amélioré. En effet, la température du fluide continue à chuter avec la longueur de l'échangeur et que le régime thermique est loin d'être établi.

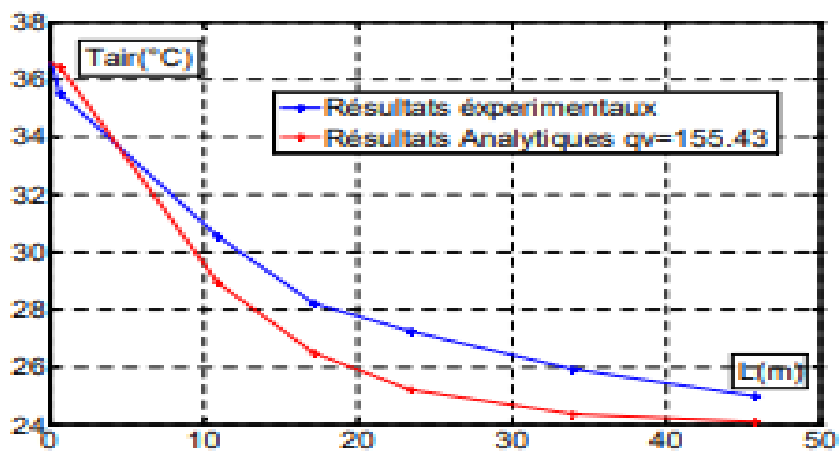


Figure 2.10 comparaison les résultats analytiques aux résultats expérimentaux.

En 2011 M. Benhammou et al, [23]. Ont réalisé cette étude sous les conditions météorologiques de la ville d’Adrar. Ils étudié l’influence de la nature du sol sur la température en profondeur du sol. Ils faits une modélisation de la température du sol (surface et profondeur). Les résultats obtenus indiquent que la profondeur de pénétration annuelle de même que le déphasage sont beaucoup influencés par la nature du sol, alors que la température moyenne de la surface du sol y est insensible.

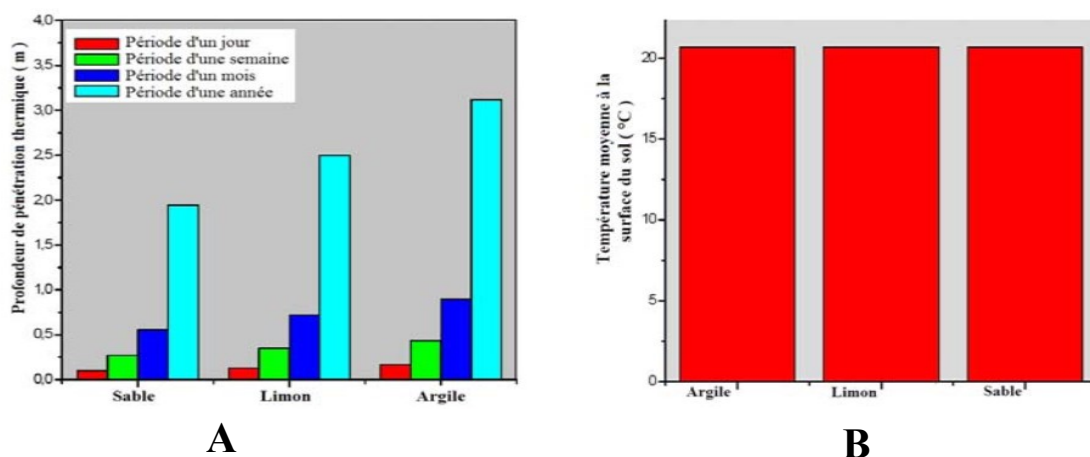


Figure2.11 A) Profondeur de pénétration thermique en fonction de la nature du sol ;
 B) Température moyenne à la surface du sol suivant la nature du sol.

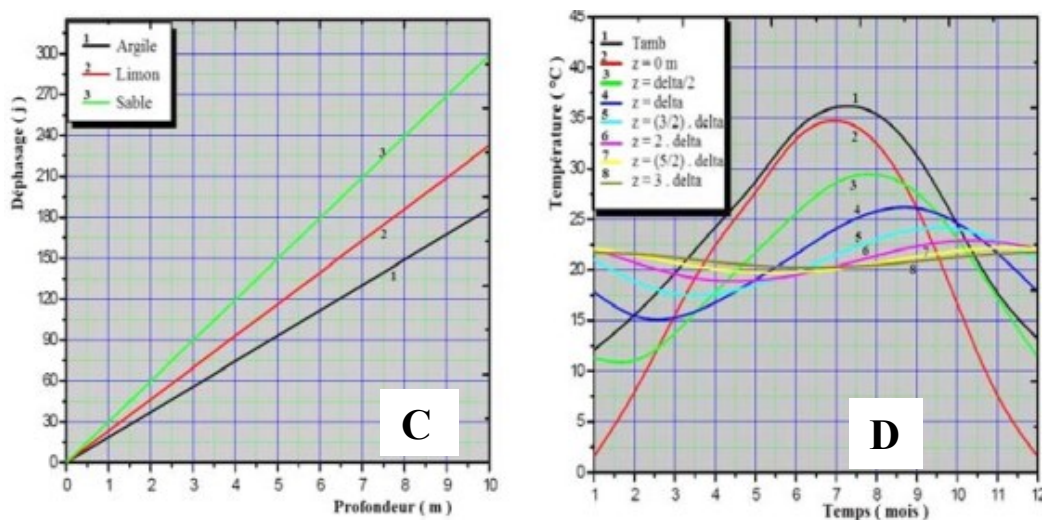


Figure 2.12 C) Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol ;
 D) Variation de Température en fonction de la profondeur du sol.

En 2012 P.M. Congedo et all [24], ont montré, au cours d'une étude de calcul par CFD fluent les performances des échangeurs de chaleur au sol horizontaux ont été analysées par Simulations CFD. En particulier trois configurations géométriques différentes (monotube linéaire, hélicoïdal et slinky) ils ont été analysés pour différentes conditions de travail (hiver et été) et variables : profondeur d'enfouissement de l'échangeur à l'intérieur du sol (de 1,5 à 2,5 m) ; vitesses des fluides caloporteurs (de 0,25 à 1 m / s) ; conductivités thermiques du sol autour des échangeurs de chaleur (de 1 à 3 W / m K).

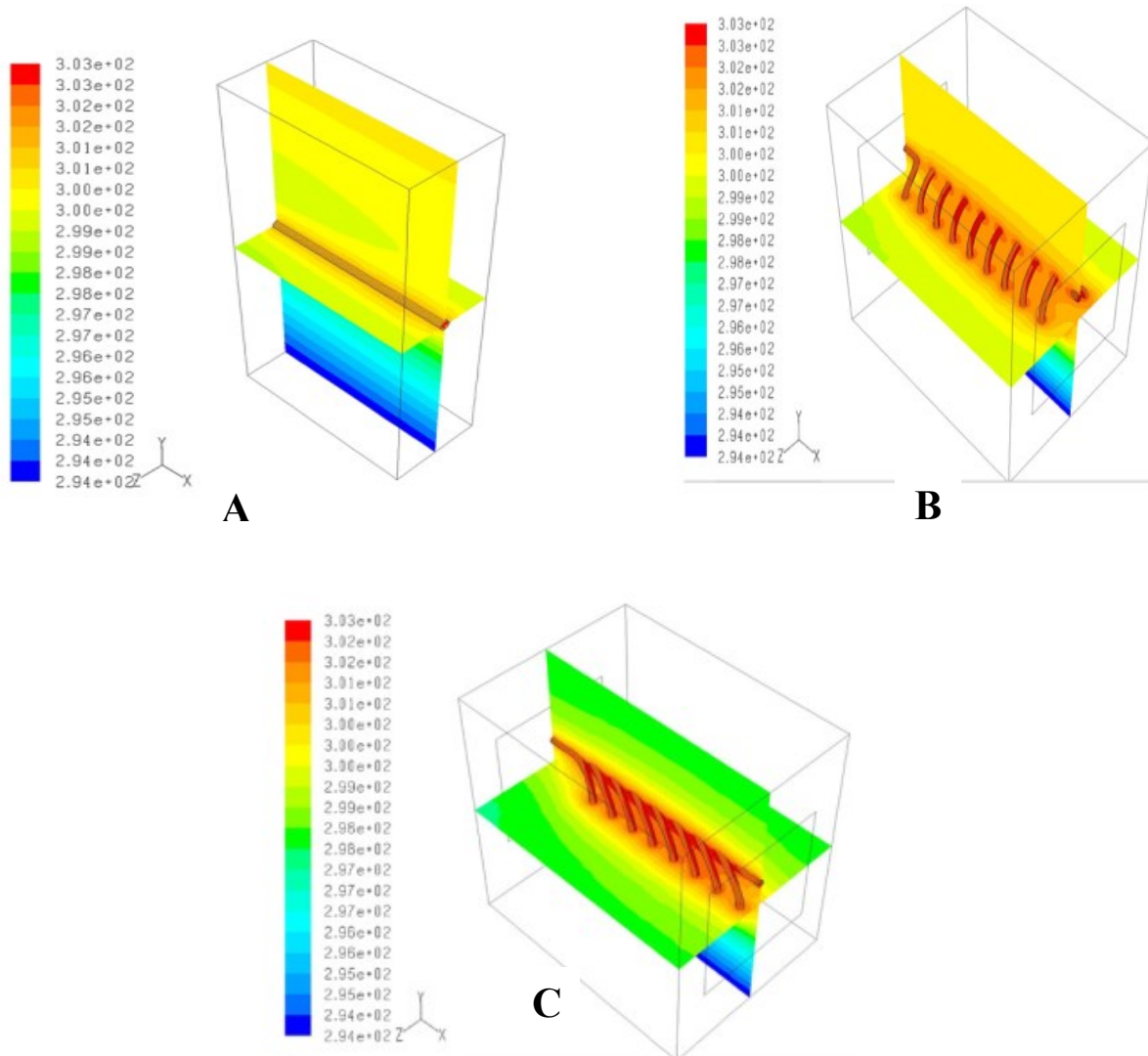


Figure2.13 Exemple de distribution 3D de température [K] simulée pour des échangeurs de chaleur au sol : A) échangeurs de chaleur linéaires au sol,

B) échangeurs de chaleur hélicoïdaux au sol,

C) échangeurs de chaleur slinky.

R. Nebbali en 2013 [25]. Ce travail porte sur l'étude thermique d'un échangeur eau/sol. Ce dernier, contrairement aux échangeurs air/sol, améliore l'efficacité des changes de chaleur et nécessite un espace réduit concomitant à un faible coût d'exploitation.

Parmi les résultats obtenus de cette étude : Afin d'assurer un bon fonctionnement continu de cette installation, Il faut utiliser deux échangeurs eau/sol placé à la même, profondeur de préférence. Cette installation proposée, assez simple à réaliser, permet d'extraire à l'air chaud une puissance importante, de l'ordre de 14kW, moyennant une faible consommation énergétique nécessaire au fonctionnement des pompes à eau et au soufflage de l'air.

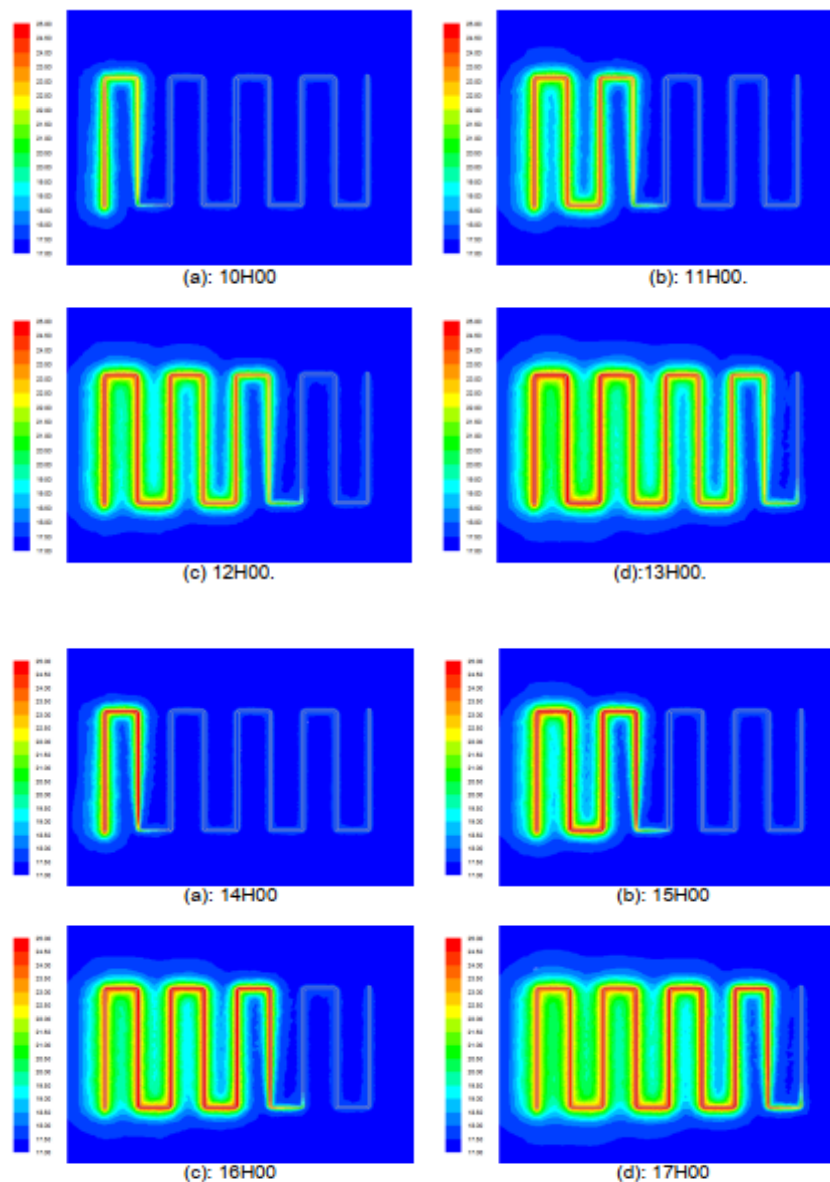


Figure 2.14 Résultats de la simulation avec CFD pour différents débits.

Misra et al. (2013) [26], ont réalisé une modélisation CFD pour étudier l'influence de la durée de fonctionnement et de la conductivité thermique du sol sur performance thermique du système EATHE pour le chauffage hivernal. Il a été observé que les performances thermiques d'EATHE sont significativement affectées par la durée de son fonctionnement continu et la conductivité thermique du sol.

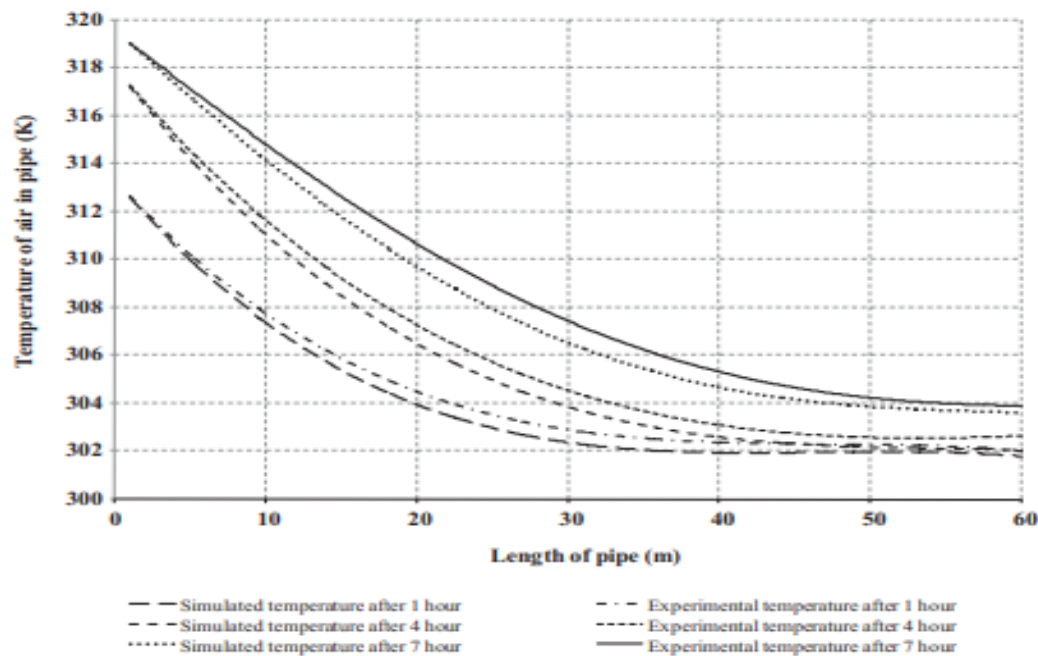


Figure2.15- Validation des résultats CFD avec des résultats expérimentaux.

H. Boughmi et al.,[27] en 2015 ont fait une étude expérimentale sur un système géothermique. Ce système est constitué d'un échangeur en polyéthylène de type corbeille. Les résultats ont montré que l'écart de température entre l'entrée et la sortie de la corbeille en cycle de refroidissement durant 6 heures, peut atteindre 30 °C. Les résultats analytiques ont été comparés aux résultats expérimentaux; Une concordance acceptable a été remarquée. (Une incertitude entre 3% et 5%).

Rouag et al. (2018) [28] ont développé un modèle semi-analytique transitoire pour prévoir la détérioration des performances thermiques du système EAHE due à la durée de l'opération. Ils ont également observé que le rayon du sol (épaisseur de terre autour du tuyau EAHE) ne dépend pas seulement de la durée de fonctionnement, mais cela dépend aussi de la diffusivité thermique du sol, diamètre du tuyau et température de l'air d'admission.

En 2020 N. Rosa et al. ; [29] ont évalué numériquement l'influence de trois paramètres sur la performance thermique globale d'un Système EAHE pour les bâtiments résidentiels dans le climat méditerranéen chaud-été. ANSYS- a été utilisé pour simuler le comportement transitoire EAHE pendant modes de fonctionnement de chauffage et de refroidissement, et d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur la température de l'air de sortie et le taux de transfert de chaleur sol-air. Les résultats numériques ont été validés par rapport aux données expérimentales et par rapport aux résultats analytiques. Cette dernière a également montré que pour une certaine vitesse de l'air et un certain diamètre de tuyau, la distance entre les tuyaux peuvent être réduits de 1,0 m à 0,5 m sans compromettre les performances EAHE, permettant ainsi une réduction de la superficie nécessaire pour les tuyaux EAHE jusqu'à 50%, et pour un certain diamètre de tuyau et distance entre les tuyaux adjacents, plus la vitesse de l'air est élevée, plus les performances thermiques du système sont faibles, principalement pour le refroidissement.

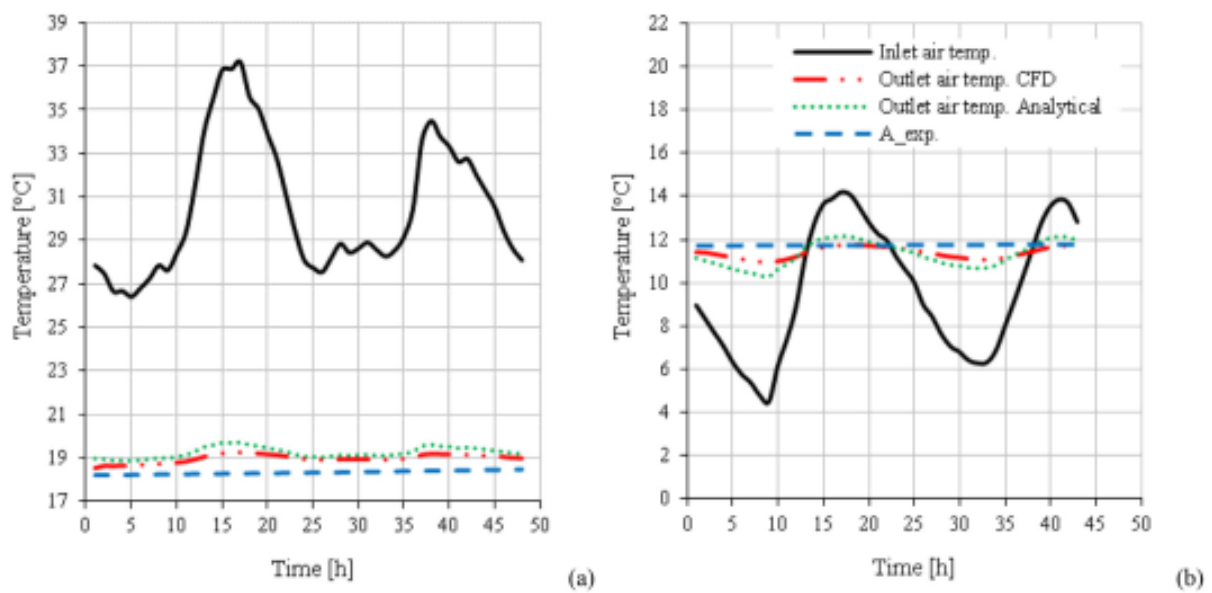


Figure 2.16 évolution de la température de l'air de sortie prévue à temps pour les modes de fonctionnement (a) refroidissement et (b) chauffage. Débits d'air moyens de 210 m³ / h et 453 m³ / h pour le refroidissement et le chauffage, respectivement (à 1,9 m de profondeur).

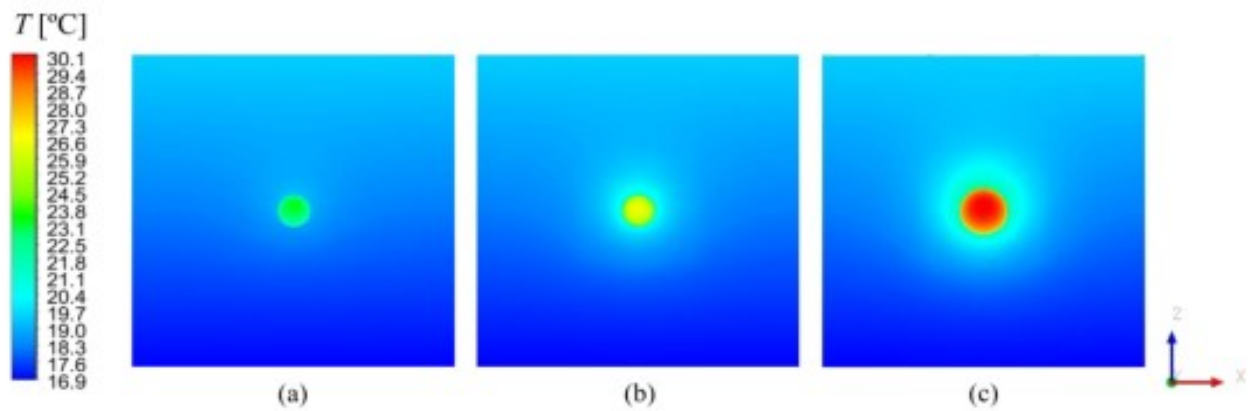


Figure 2.17-Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique pour $t = 17$ h - mode de fonctionnement en refroidissement - et pour certains cas paramétriques : a) vitesse de l'air de 1 m / s ; b) vitesse de l'air de 3 m / s ; (c) vitesse de l'air de 3 m / s.

En 2020 V.F. Hermes et al [30] ; Ont analysé le comportement thermique d'un EAHE en tenant compte de données réalistes relatives à une ville côtière du sud du Brésil, i) les profils géotechniques du sol ont été obtenus in situ grâce à des tests de pénétration standard (SPT), ii) la variation annuelle de la température de la surface du sol et de l'air dans la région. Les simulations ont été effectuées avec un modèle de calcul de volume fini vérifié et validé. Comme le montrent les résultats globaux, 2 m est la profondeur idéale pour placer les conduits localement, ce qui augmente les potentiels thermiques EAHE en été et en hiver.

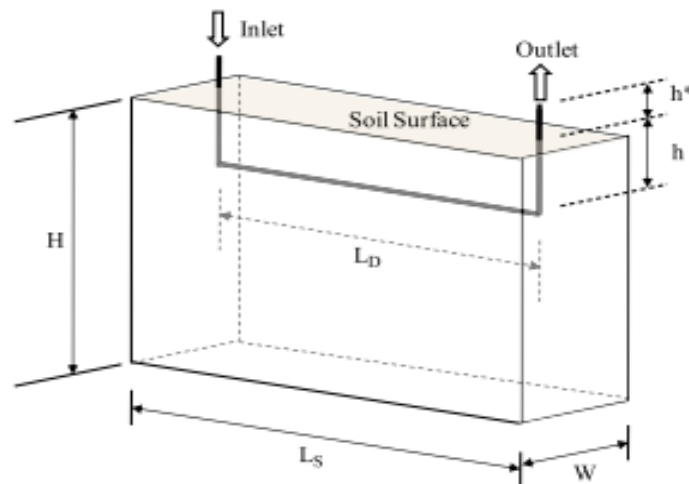


Figure 2.18-Simulation domain for the EAHE.

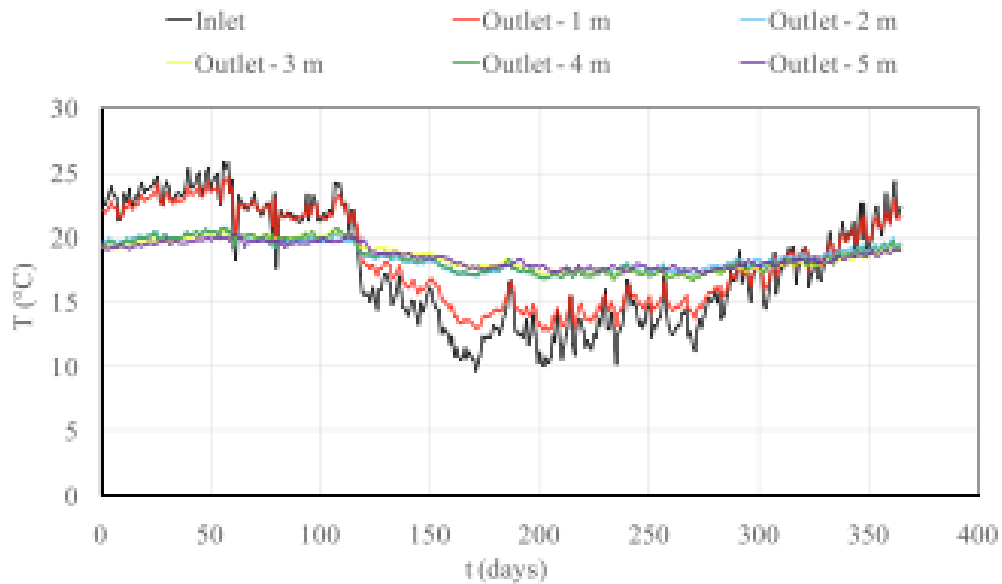


Figure 2.19 -Températures de l'air à l'entrée et aux sorties simulée.

2.3 Conclusion

A travers cette étude bibliographique, il en résulte que l'évaluation de la performance thermique en régime transitoire qui est lié principalement aux paramètres suivants : La conductivité thermique du sol, la vitesse d'écoulement d'eau, la durée de fonctionnement de l'échangeur, le mode de fonctionnement (continu et intermittent) et la géométrie du tube enterré.

CHAPITRE 3

DIMENSIONNEMENT D'UN ÉCHANGEUR ET MODÉLISATION DU PROBLÈME

3.1. Introduction

Après avoir donné une vue générale sur le thème et présenter une synthèse bibliographique. Dans ce chapitre nous exposons la problématique d'une façon détaillée, ensuite nous donnons une présentation sur la méthode (CFD) choisie pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS « Fluent »).

3.2. Paramètres de dimensionnement :

L'analyse des paramètres de dimensionnement d'un puits canadien permet d'évaluer l'influence des différents paramètres sur les performances et le comportement thermique de l'échangeur eau sol et d'en distinguer les plus prépondérants. Ces paramètres sont à considérer pour le dimensionnement d'un échangeur eau-sol, et par conséquent pour sa modélisation [31].

3.2.1. Longueur des tubes

La longueur des tubes du puits canadien détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'eau ou de l'air dans les tubes. Il a été démontré par plusieurs études qu'en dessous de 25 mètres de longueur, le puits canadien ne permet pas d'obtenir une température de sortie proche de celle du sol, car le rendement de l'échange est moyen. En revanche au-delà de 40 mètres le rendement n'augmente plus de manière significative. Il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un tube de longueur importante [31].

3.2.2. Température de sortie

La température de sortie d'un tube enterré est directement liée à la température du sol. Son amplitude diminue fortement avec la profondeur. Le tube doit donc être enterré assez profondément de manière à profiter au mieux de l'inertie du sol. Le type de sol n'influe pas de manière importante sur la température de sortie dans le cas d'un échangeur air-sol constitué d'un seul tube, à condition que, le débit ne soit pas trop élevé [30].

3.2.3. Débit

Le débit du fluide dans les tubes intervient simultanément sur l'échange convectif entre le fluide et la canalisation. Un optimum est à déterminer, le débit global devant surtout correspondre aux besoins de renouvellement d'air de la pièce ou de la zone à ventiler, dans le cas où le fluide est l'air. Lors du rafraîchissement d'été, ou les besoins en eau lors de l'utilisation des échangeurs

eau-sol pour le chauffage d'eau dans les maisons, le débit doit être plus élevé que lors du préchauffage d'hiver où seul le débit hygiénique est nécessaire [31].

3.2.4. Diamètre des tubes

Une augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais d'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au-delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite, où va être échangée la chaleur. La circulation au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol. Cet optimum est indépendant de la longueur de la canalisation. On obtiendra donc une relation directe entre le débit et le diamètre optimal. En général, pour les débits utilisés, cet optimum se situe autour des 20 cm de diamètre [31].

3.2.5. La distance entre les tubes

La distance entre les tubes est aussi très importante, parce qu'elle influe sur la température de la portion du sol située entre ces tubes, ce qui réduit localement la capacité de stockage du sol. D'après (Hollmuller 2002) [18] une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour des variations journalières. Par contre, un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de 3 m, qui n'est généralement pas envisageable en pratique. En tout cas, si plusieurs tubes sont placés à proximité il faut les espacer suffisamment pour que le sol puisse se régénérer [30].

3.2.6. Profondeur d'enfouissement

La profondeur d'enfouissement influe sur la qualité de l'isolation entre l'atmosphère et les tubes enterrés. Le calcul de la profondeur d'enfouissement dépend de la nature du sol (conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité thermique) et de l'échange thermique entre la surface du sol et l'entourage : par radiation avec le soleil et le ciel et par convection avec l'air ambiant. (Hollmuller 2002) [18] montre que les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol que la profondeur est grande [30].

3.2.7. Les autres paramètres

Certains paramètres sont peu ou pas cités par les articles qui ont été consultés. Il s'agit par exemple de la rugosité intérieure des canalisations, les propriétés physiques des canalisations, la géométrie globale du puits canadien, l'impact du rayonnement solaire sur la température du sol, le régime de fonctionnement du puits canadien.

- La rugosité intérieure des canalisations.
- Les propriétés physiques des canalisations.
- La géométrie de l'échangeur.
- Le rayonnement solaire et la surface du sol.
- Le régime de fonctionnement du puits canadien.

Le dimensionnement d'un échangeur est assez délicat du fait du nombre de paramètres à optimiser : longueur, diamètre et nombre de tubes, profondeur d'enfouissement, nature du sol, distance entre les tubes, débit de ventilation et la température d'entrée [5].

3.3. Introduction au CFD

L'analyse des phénomènes complexes tels que le transfert de chaleur, les écoulements d'eau et d'air nécessitent une bonne compréhension du système analytique des mécaniques des fluides, et les champs d'application de ces systèmes, voire les différentes étapes de traitement du code CFD afin d'obtenir les résultats qui expliquent notre phénomène en question. Le choix du logiciel de simulation dépend de nos données d'entrée (inputs) et de la nature de notre expérience et les conditions dans lesquelles elle est inscrite [32].

3.3.1. Définition du CFD

La dynamique des fluides computationnelle 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 [33].

3.3.2 Fonctionnement d'un code CFD

Selon Versteeg et Malalasekera, les codes CDF sont structurés, autour des algorithmes numériques qui peuvent résoudre les problèmes d'écoulement des fluides. Afin de résoudre cette complexité des algorithmes les packages commerciaux CFD proposent des interfaces utilisateur sophistiquées aux paramètres du problème d'entrée (les inputs) afin d'examiner les résultats. Ces codes comme l'illustre la figure 3.1 passent par trois étapes essentielles le prétraitement, le calcul et finalement le post-traitement et la visualisation des résultats.

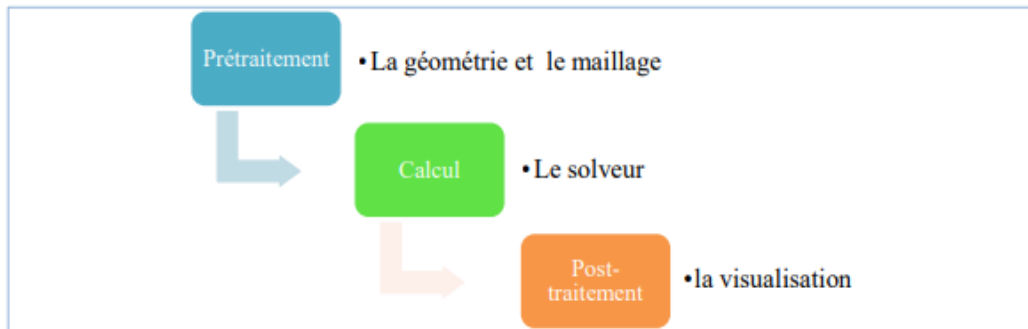


Figure.3.1 - Processus du fonctionnement d'un code CFD.

3.3.2.1. Prétraitement

Le prétraitement permet de transformer les entrées (inputs) en forme appropriée pour une utilisation ultérieure par le solveur, et cela se réalise en plusieurs étapes, comme le montre le diagramme suivant :

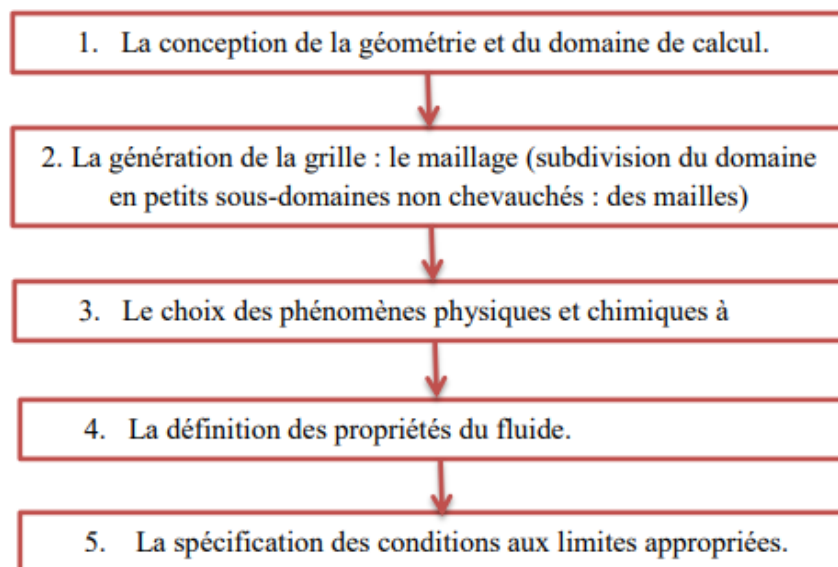


Figure 3.2 - Les étapes du prétraitement d'un code CFD.

3.3.2.2. Calcul

Le solveur utilise trois techniques numériques distinctes : les différences finies, les éléments finis et les méthodes spectrales. Généralement les méthodes numériques qui forment la base du solveur effectuent les étapes suivantes :

- Approximation des variables inconnues découlement à travers des fonctions simples.
- La discrétisation par la substitution des approximations dans les équations d'écoulement avec des manipulations mathématiques
- Résolution des équations algébriques

3.3.2.3. Post-traitement

Le post traitement c'est l'étape de la visualisation de données en utilisant des outils et des extensions intégrées aux logiciels de simulation CFD. Ceux-ci comprennent:

- L'affichage de la géométrie de domaine et la grille de maillage
- Les tracés de vecteurs
- Les lignes et les tracés de contours ombrés
- Le trajet des particules [33]

3.4. 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.



Figure 3.3 – ANSYS Fluent.

3.4.1. Équations générales de l'outil Fluent (ANSYS) (Équations gouvernantes du problème étudié)

La modélisation mathématique d'un écoulement de fluide ; est fondée sur les lois de la conservation de masse, de la quantité de mouvement et d'énergie. Dans les coordonnées 3D cartésiennes et dans un écoulement incompressible et transitoire ; les équations de transfert de la chaleur et de la masse sont données comme suit :

Équation de continuité :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dv + \int_S \rho (\vec{q} \cdot \vec{n}) ds = 0 \quad (3.1)$$

Équations de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{q} dv + \int_S \rho \vec{q} (\vec{q} \cdot \vec{n}) ds = - \int_S P \vec{n} ds + \int_V \rho \vec{f} dv \quad (3.2)$$

Forme différentielle :

→ \vec{ox} :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (3.3)$$

→ \vec{oy} :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y - \rho g \quad (3.4)$$

→ \vec{oz} :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial z} + v \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (3.5)$$

Équation d'énergie

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T + \phi_s \quad (3.6)$$

Donc :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T + \phi_s \quad (3.7)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (3.8)$$

L'échange thermique entre le sol et l'eau circulant dans les tubes dépend de la structure de l'échangeur, de la température d'entrée de l'eau et de la température du sol à proximité des tubes. Nous faisons ici l'hypothèse que la température du sol à une profondeur de 3 mètres est égale à 297 °K. Nous considérons de plus que l'échange thermique se fait en régime transitoire, c'est à dire que les températures varient dans le sol et à la paroi du tube [7].

$$q = \frac{(T_{sol} - T_{eau})}{R_{tot}} \quad (3.9)$$

La résistance thermique totale (R_{totale}) est composée d'une part, de la résistance la conduction du sol (R_{sol}), et celle de la gaine (R_{tube}).

$$R_{Totale} = R_{sol} + R_{tube} + R_{cv} \quad (3.10)$$

La quantité de chaleur absorbée par l'eau est : $m.C_p \frac{DT}{Dt}$

Le bilan d'énergie entre deux sections de tube distante de Δx s'écrit

$$\dot{m} C_{p,eau} \frac{DT}{Dt} = \frac{(T_{sol} - T_{eau}(x))}{R_{Tot}} \quad (3.11)$$

$$\dot{m} C_{p,eau} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{(T_{sol} - T_{eau}(x))}{R_{sol} + R_{tube} + R_{cv}} \quad (3.12)$$

Avec :

- m : Masse d'eau. [Kg]
- $C_{p,eau}$: Chaleur massique de l'eau. [J/kg.K]
- R_{sol} : Résistance thermique entre le tube et le sol [m/W.K]

R_{tube} : Résistance thermique du tube enterré [m/W.K]

R_{CV} : Résistance thermique convective entre l'eau et le tube [m/W.K]

$$R_{\text{sol}} = \frac{1}{\lambda_s \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \frac{r_{\text{sol}}}{r_1} \quad (3.13)$$

$$R_{\text{tube}} = \frac{1}{\lambda_t \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \frac{r_1}{r} \quad (3.14)$$

$$R_{\text{cv}} = \frac{1}{h_{\text{cv}} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \quad (3.15)$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{\lambda_s \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \frac{r_{\text{sol}}}{r_1} + \frac{1}{\lambda_t \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{1}{h_{\text{cv}} \cdot 2\pi \cdot \Delta x} \quad (3.16)$$

Où :

r : Rayon intérieur du tube enterré [m]

r_1 : Rayon extérieur du tube enterré [m]

r_{sol} : Rayon de la couche adiabatique du sol [m]

λ_s : Conductivité thermique du sol [W/m.K]

λ_t : Conductivité thermique du tube enterré [W/m.K]

h_{cv} : Coefficient de convection de l'eau [W/m².K]

R_{tot} : La résistance thermique totale par unité de longueur.

3.4.2 Méthodes de résolution des équations régissantes

Méthodes de résolution des équations régissantes Plusieurs méthodes numériques sont disponibles pour la résolution de ces équations. On peut distinguer les méthodes suivantes :

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des volumes finis (MVF).
- Nous admettons ici les hypothèses suivantes :

En considère que :

- L'écoulement est tridimensionnel (x, y, z).
- L'écoulement transitoire.
- Incompressible $\rho = \text{cste}$.
- Sans source de chaleur.

Système	Valeur
Température du sol en profondeur	24 °C
Profondeur du tuyau enterré	3 m
Langueur du tuyau	76.4 m
Densité de l'eau	1000kg/m ³
Conductivité thermique du sol (λ_{soil})	1.25 W/(m.°C)
Conductivité thermique du tuyau (λ_{pvc})	0.17 W/ (m.°C)
Rayon intérieur du tuyau (r1)	110 mm
Rayon extérieur du tuyau (r2)	114 mm

Tab.3.3 Paramètres de l'échangeur de chaleur (eau/sol) utilisé pour l'étude.

3.5 Les pertes de charge

Les pertes de charge doivent être calculées afin de pouvoir équilibrer les différentes boucles les unes par rapport aux autres. Pour le calcul des pertes de charge, on doit calculer les pertes de charge linéiques et singulières (coudes + collecteur). [35]

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{linéique} + \Delta P_{singulaire} \quad (3.17)$$

3.5.1 Perte de charge linéique

La perte de charge linéique pour un écoulement dans une conduite rectiligne se détermine de la manière suivante :

$$\Delta P = \frac{\Lambda u^2}{D.2} . L \quad (3.18)$$

Le calcul du coefficient de perte de charge (Λ) dépend de la nature de l'écoulement, laminaire ou turbulent. Cette dernière donne lieu à des pertes de charge plus importantes, on suppose comme début qu'on se place dans les conditions d'un écoulement laminaire. Un écoulement se caractérise par son nombre de Reynolds :

$$Re = \rho u D / \mu \quad (3.19)$$

Pour des valeurs de $Re < 2000$, le régime d'écoulement est laminaire et le coefficient (Λ) n'est nullement affecté par la rugosité relative. Il est fonction du débit et est donné par la relation de Hagen-Poiseuille :

$$\Lambda = 64/Re \tag{3.20}$$

Dans les limites $2000 < Re < 4000$, le régime est considéré comme instable et (Λ) est déterminé par la relation de Frenkel.

$$\Lambda = 2.7/Re^{0.53}$$

Pour $4000 < Re < 10000$, le régime est considéré partiellement turbulent et (Λ) est estimé par la relation de Blasius :

$$\Lambda = 0.3164/Re^{0.25}$$

Pour des valeurs élevées de (Re), le régime est complètement turbulent d'où résulte la variation de (Λ) en fonction de Re et de X/D (traduit l'amplitude des défauts de linéarité de la paroi du tube). Von Karman et Prandtl, Nikuradse ou Colebrook et White ont déterminé (Λ) par des relations empiriques (Carlier, 1980)

VON KARMAN et PRANDTL	NIKURADSE	COLEBROOK et WHITE
$\frac{1}{\sqrt{\Lambda}} = -2 \text{Log}_{10} \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\Lambda}} \right]$	$\Lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}$	$\frac{1}{\sqrt{\Lambda}} = -2 \text{Log} \left[\frac{X/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\Lambda}} \right]$


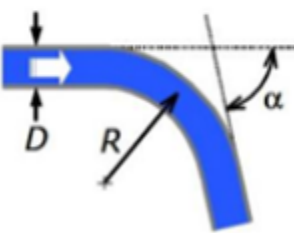
Tab 3.1 : Relation donnant le coefficient de perte de charge

3.5.2. Perte de charge singulière

La perte de charge singulière a pour expression : $\Delta P = \xi \rho (U^2/2)$.

Où ξ est le coefficient de perte de charge singulière (sans dimension) dépendant uniquement de la géométrie locale et de la rugosité de la paroi. Le coefficient de perte de charge, qui dépend

de la géométrie et du nombre de Reynolds, est donné dans des formulaires appelés « dictionnaires de pertes de charge ». Quelques singularités typiques sont reproduites dans le Tableau. [36]

Type de coude	Géométrie	Formule
Coude brusque		$\xi = \sin^2 \alpha + 2 \cdot \sin^4 \frac{\alpha}{2}$
Coude arrondi		$\xi = \frac{\alpha}{\pi} \left[0,131 + 1,847 \left(\frac{D}{R} \right)^{7/2} \right]$

Tab 3.2. Le coefficient de perte de charge singulière pour deux types de coude

3.6. L'efficacité de l'échangeur

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 :

$$\epsilon = \frac{T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}}}{T_{\text{sol}} - T_{\text{entrée}}} \tag{3.20}$$

3.7 Dessiner la géométrie

Cette étape consiste à dessiner la géométrie : le tube de l'échangeur de chaleur eau/sol et le sol avec le logiciel ANSYS Design Modeler. On démarrera ici avec les dimensions suivantes : Longueur tube ($L=76.4$ m) et le diamètre extérieur ($D_{ext} = 110$ mm) avec une épaisseur ($e=.2$ mm), la distance entre les tubes ($x = 3$ m) ; une profondeur de 3 m, il est placé horizontalement.

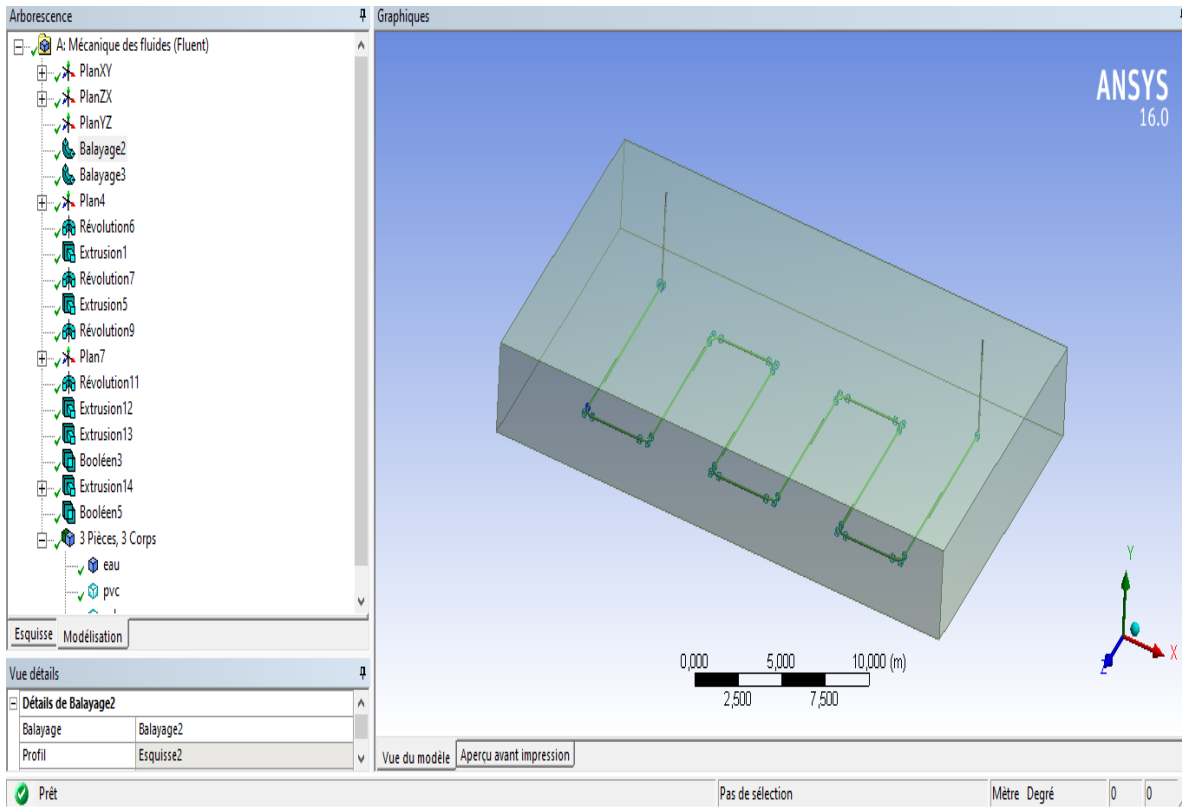


Figure 3.4 – géométrie

3.8 Maillage

Comme l'étape précédente est validée, cela ouvre directement le logiciel de maillage ANSYS Meshing et charge la géométrie créée

-Repérage des conditions aux limites.

-La première étape consiste à identifier et à nommer différentes parties de la géométrie afin de :

- Définir les conditions aux limites du problème (entrées, sortie etc...)
- Définir des conditions sur le maillage au niveau des différentes sélections.

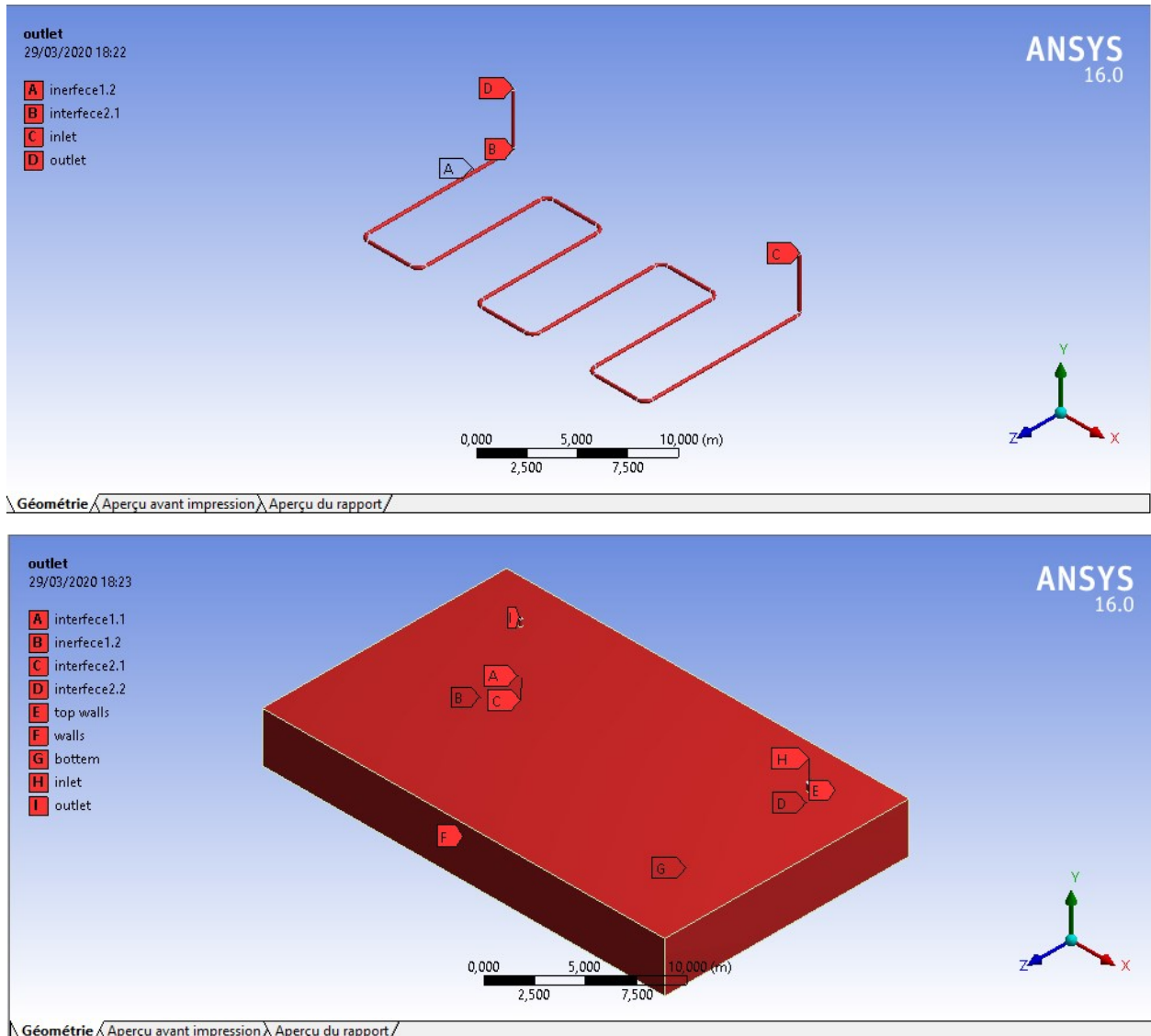


Figure 3.5 Les conditions aux limites

3.8.1 Génération du maillage

Le maillage avec les options par défaut est généré et apparaît dans la fenêtre de visualisation. Dans cette étape nous avons discrétisé la géométrie de l'échangeur de chaleur avec des dimensions réelles (longueur, diamètre...), en utilisant une géométrie tridimensionnelle adaptée à la structure maillée de maillage de précision avec 1376084 nœuds 5558768 et éléments.

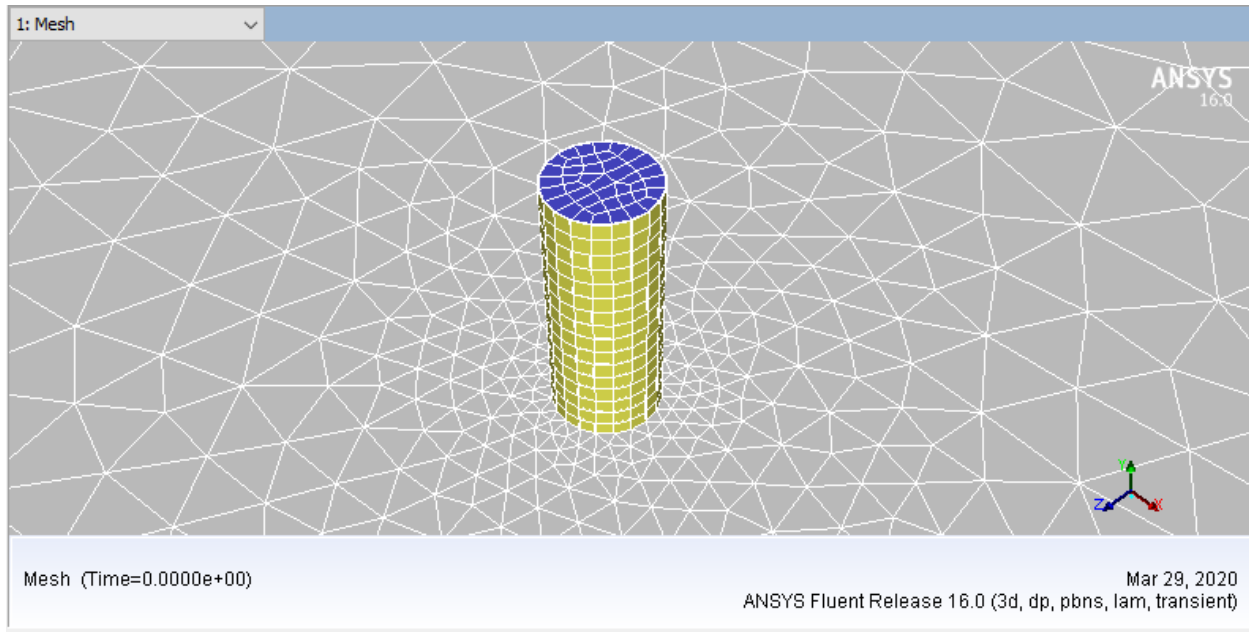


Figure3.6- Un maillage du modèle d'échangeur de chaleur géothermique (entré tube).

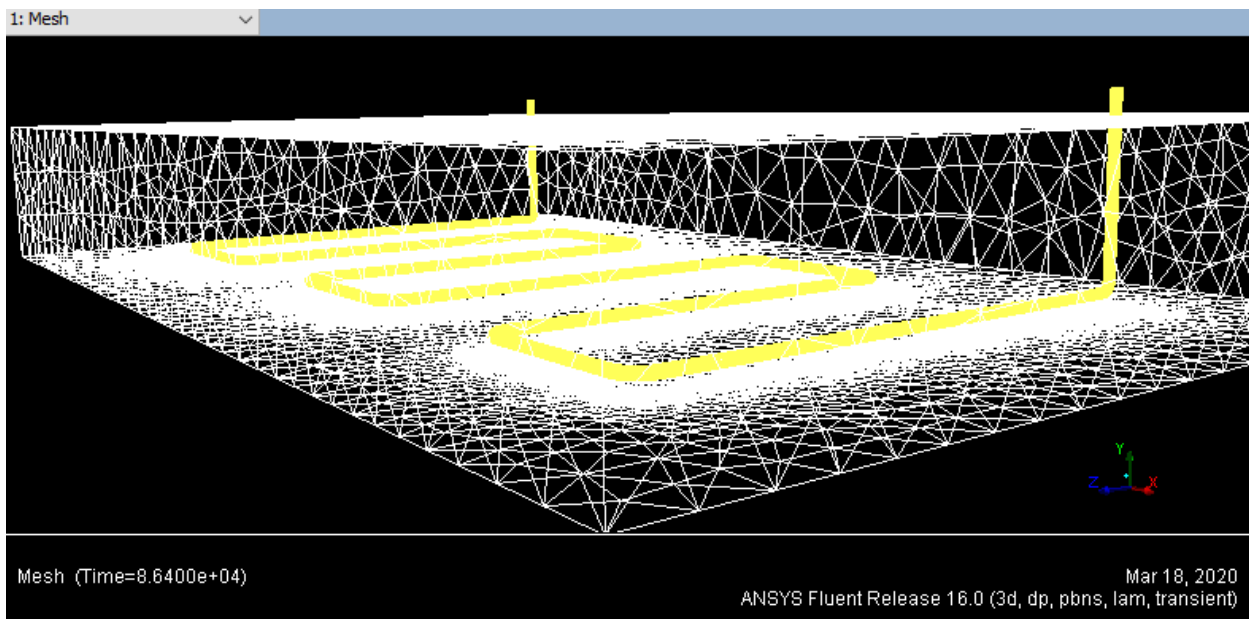


Figure3.7- Un maillage du modèle d'échangeur de chaleur géothermique.

3.9 Mise en données et simulation

3.9.1 Lancer Fluent

Apparaît tout d'abord la fenêtre de lancement, qui sert à indiquer si l'on va travailler en 2d ou en 3d, en mono processeur ou en parallèle et si besoin est, à préciser le répertoire de travail.

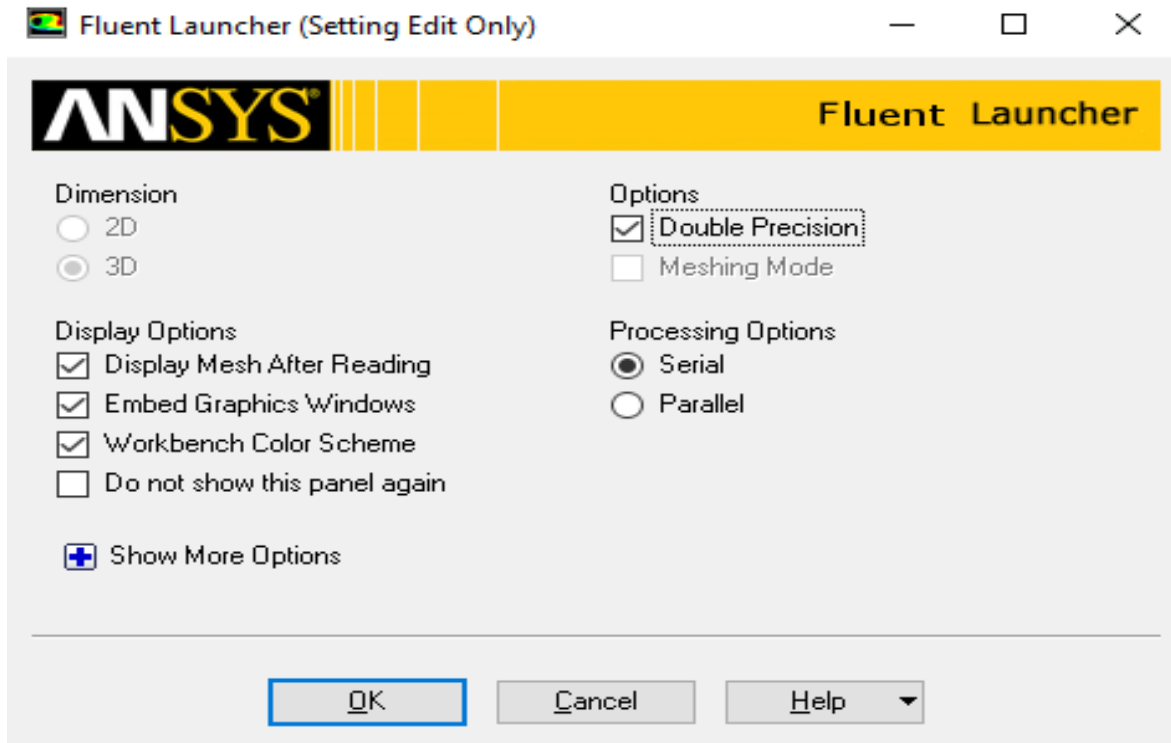


Figure 3.8- La fenêtre de lancement du fluent.

3.9.2 Réglage des paramètres du solveur

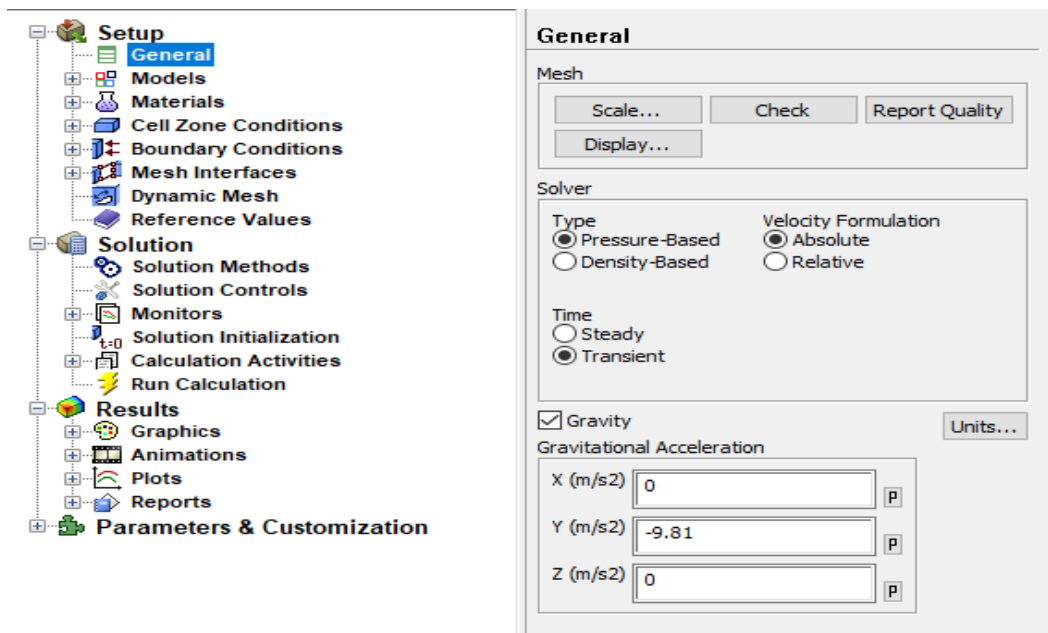


Figure3.9 -Les différents paramètres du solveur

3.9.3 Général

Les paramètres suivants servent à imposer les différents paramètres du solveur, avant de lancer le calcul. Garder les paramètres par défaut

3.9.3.1 Spécification des modèles physiques

Les modèles physiques résolus sont sélectionnés à l'étape suivante :

- Le transfert de la chaleur en activant l'équation d'énergie.

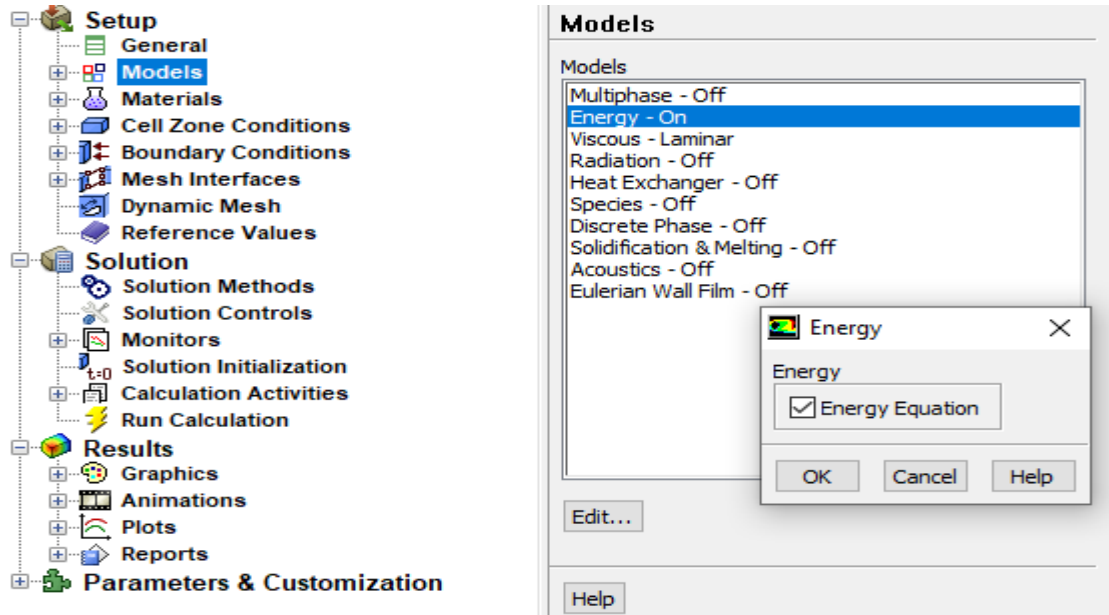


Figure 3.10-Etablir les équations de l'énergie

3.9.3.2 Matériaux

a) Spécification du fluide utilisé :

Dans Fluent, il faut indiquer quel fluide est en jeu et spécifier ses paramètres physiques (densité, viscosité etc...)

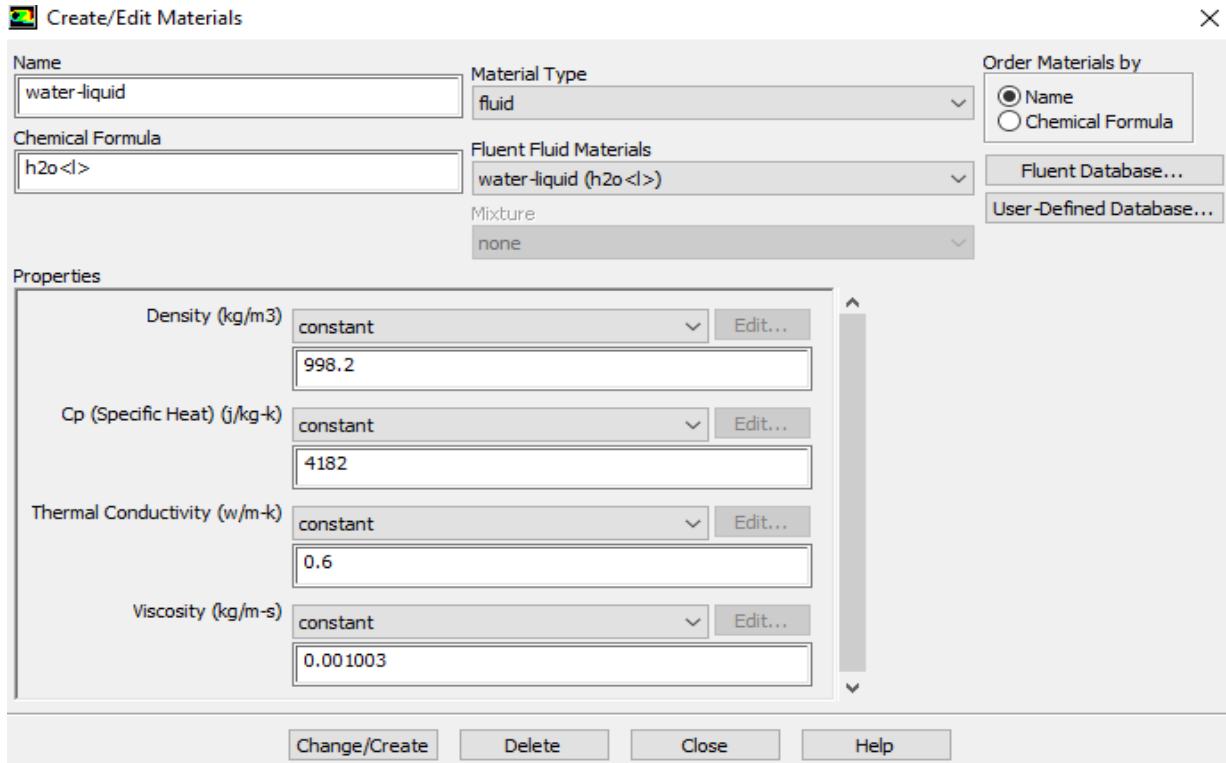


Figure 3.11-Définition des caractéristiques du fluide.

b) Spécification du tube utilisé

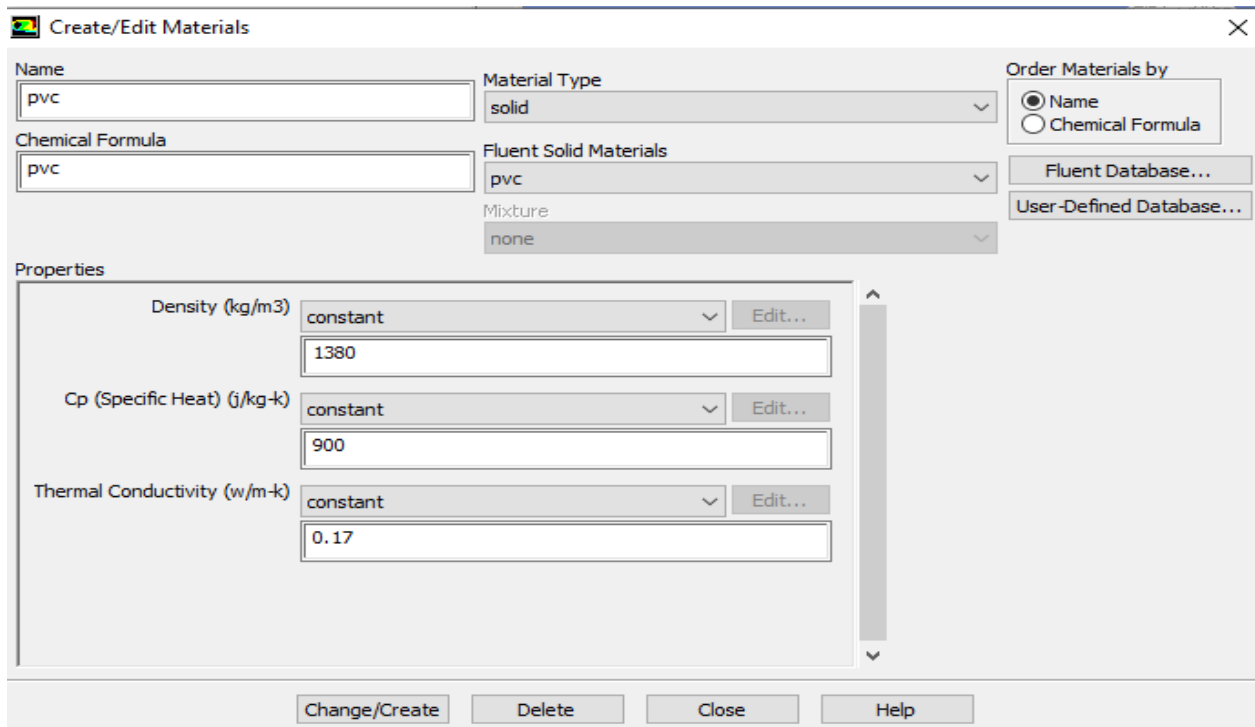


Figure 3.12-Définition des caractéristiques du solide PVC

c) Spécification du sol utilisé

Create/Edit Materials

Name: sol

Material Type: solid

Chemical Formula: |

Fluent Solid Materials: sol

Mixture: none

Order Materials by:
 Name
 Chemical Formula

Fluent Database...
User-Defined Database...

Properties

Density (kg/m³): constant (Edit...)
1450

Cp (Specific Heat) (j/kg-k): constant (Edit...)
880

Thermal Conductivity (w/m-k): constant (Edit...)
1.25

Change/Create Delete Close Help

Figure 3.13-Définition des caractéristiques du solide sol.

3.9.4 Conditions aux limites (Boundary conditions)

Le type de condition a été imposé dans le logiciel de maillage. Il est possible dans ce menu de modifier les conditions aux limites (par ex transformer une entrée en une sortie etc...) et de régler les paramètres (débit d'entrée etc...).

- Sélectionner inlet (débit d'entrée) dans la liste Zone et double-cliquer pour mettre la valeur de débit d'entrée et la température d'entrée du fluide.

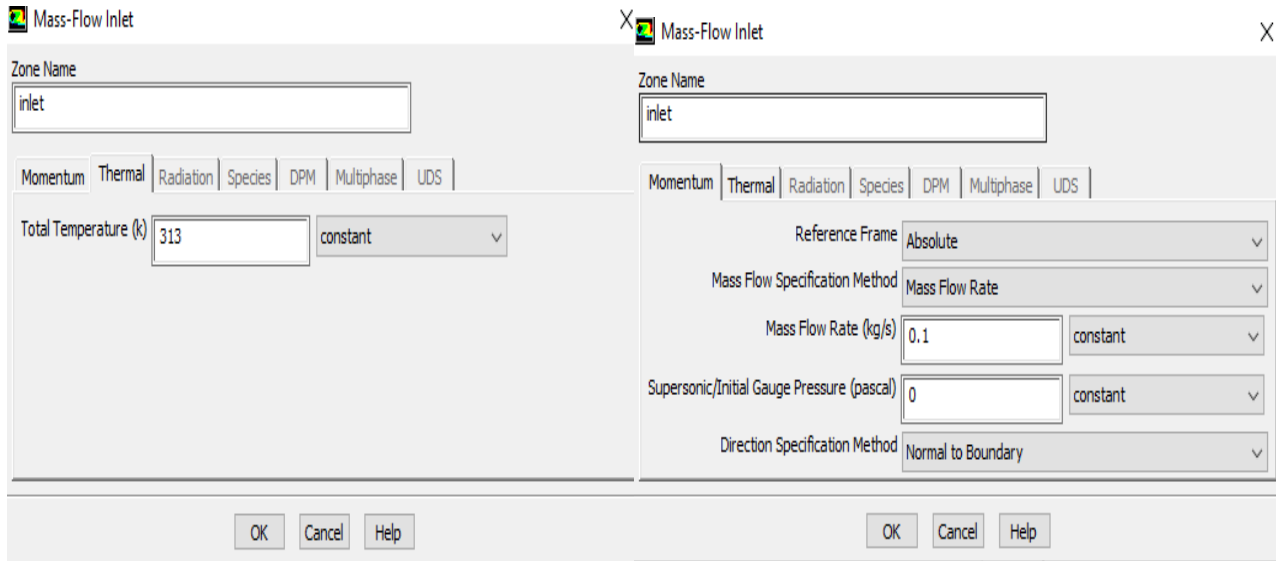


Figure 3.14-Valeurs des conditions aux limites d'entrée.

- Sélectionner paroi en bas pour mettre la valeur de la température de la paroi (température du sol de 3m de profondeur) $T = 297$ k.

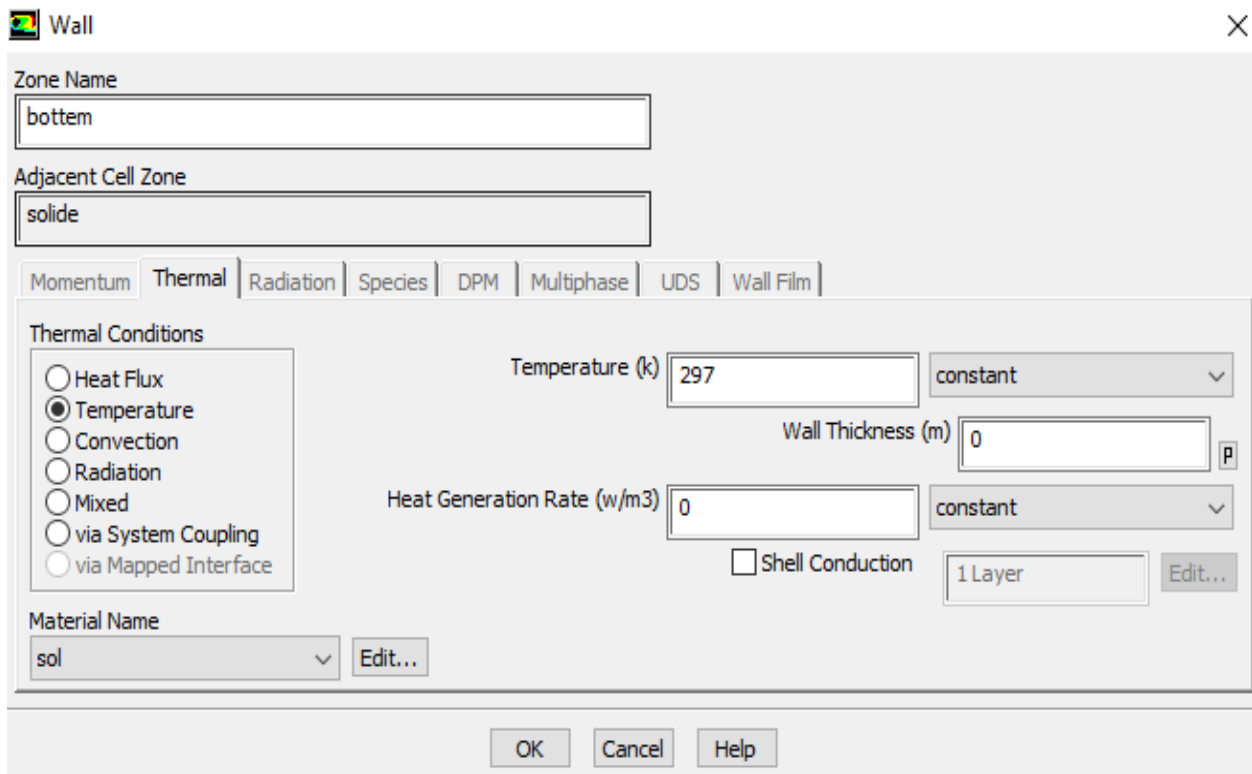


Figure3.15 - Valeurs des conditions aux limites sur la paroi en bas (bottem).

- Sélectionner outlet (outflow) dans la liste Zone et double-cliquer

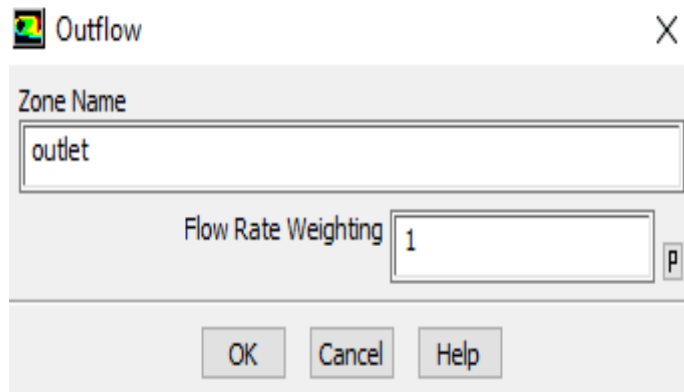


Figure3.16-Valeurs des conditions aux limites de sortie.

- Sélectionner Walls

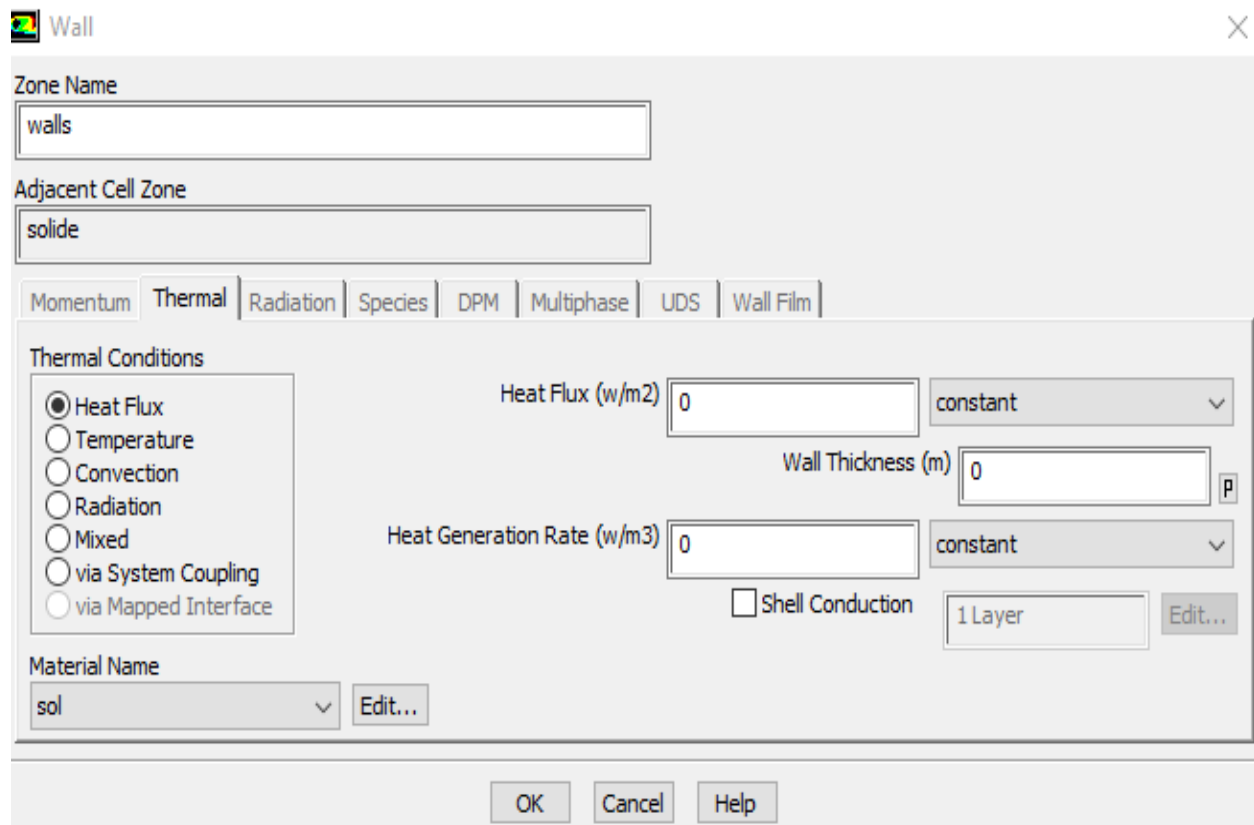


Figure 3.17-Valeurs des conditions aux limites de la paroi du sol

- Sélectionner haut du sol (top)

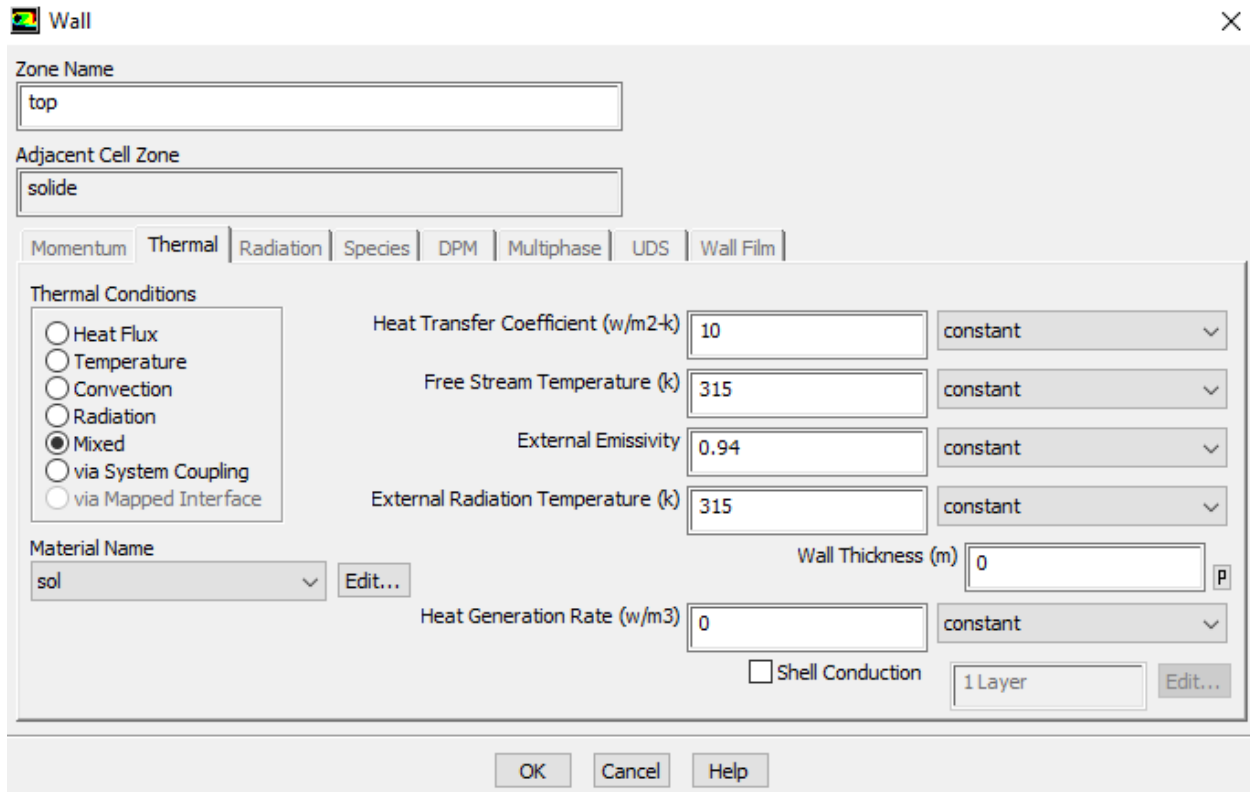


Figure3.18 -Valeurs des conditions aux limites de la paroi du sol (top).

3.9.5 Itération et convergence

Afin de calculer une solution la plus exacte possible, le solveur de Fluent procède par itérations successives pour résoudre le système matriciel obtenu avec discrétisation des équations par une méthode des volumes fins.

3.9.6 Initialisation et itérations

Est un ensemble de méthodes d'interpolation des limites, où des variables, telles que la température, la turbulence, les fractions d'espèces, les fractions de volume, etc.,



Figure 3.19-Initialisation de solution.

3.9.7 Calcul Exécuter (Run calculation)

La page de tâche Exécuter le calcul vous permet de démarrer les itérations du solveur. Voir Exécution de calculs en régime transitoire en fonction du temps.

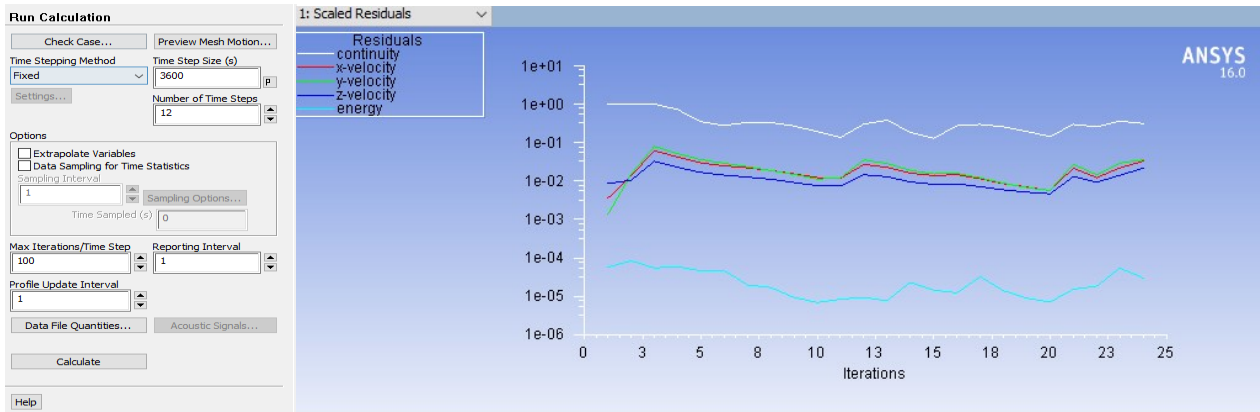


Figure 3.20- Exécuter le calcul.

3.10 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue générale sur la méthode (CFD) pour la résolution du problème et le logiciel de calcul (ANSYS « Fluent »).

CHAPITRE 4

SIMULATION, RÉSULTATS ET

DISCUSSIONS

4.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre on va exposer et présenter le processus de simulation par Fluent. Ensuite, on va vous exposer les résultats obtenus avec des différentes conductivités du sol et débits pour qu'on puisse les comparer et aussi déterminer la configuration qui nous aide à résoudre le problème précité.

4.2. Hypothèses considérées

Nous admettons ici les hypothèses suivantes :

- L'échange thermique se fait en régime transitoire.
- Le sol est considéré comme un milieu homogène et invariant, caractérisé par des propriétés constantes.
- Les caractéristiques de l'eau et du sol (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique...) sont considérées constantes.
- Dans une section du conduit perpendiculaire à l'écoulement, l'eau est considérée homogène.
- Pour des valeurs de $Re \leq 2500$, le régime d'écoulement est laminaire.
- Pour des valeurs de $Re > 4000$, le régime d'écoulement est turbulent.

4.3. Descriptions de la configuration étudiée

- 2 tubes de 3.5 m verticaux.
- 4 tubes de 8 m horizontaux et 2 tubes de 10m horizontaux.
- 5 tubes de 3 m horizontaux.
- Le sol est représenté par un parallélépipède coté $LS = 21$ m, $W = 16$ m et $H = 4$.

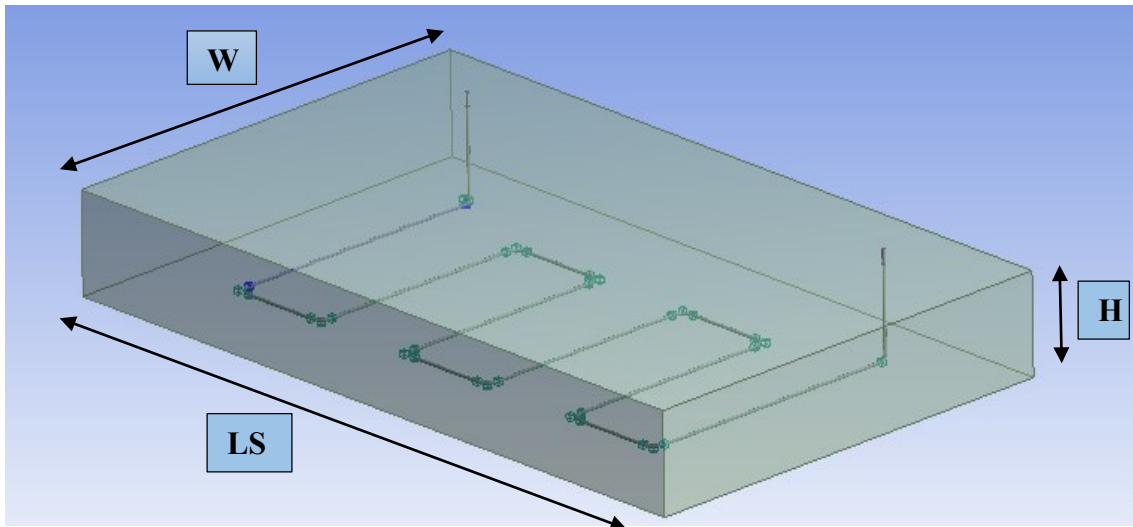


Figure 4.1 - Simulation domaine.

4.4. Résultats et Commentaires

4.4.1. Effet de la conductivité du sol sur l'échangeur eau/sol

4.4.1.1. Pour conductivité du sol égale 1.25 W/mK

La figure 4.2 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC et la conductivité du sol est égale à 1.25 W/m et de 6 heures de fonctionnement.

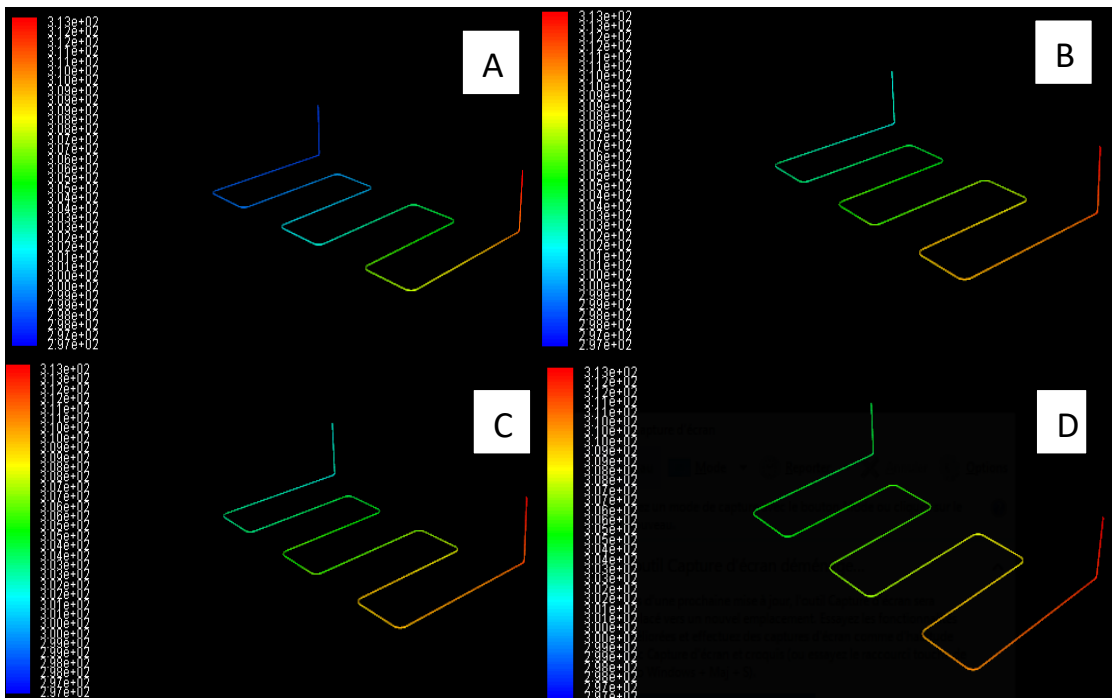


Figure 4.2 – Les iso-surface de serpentin pendant 6 heures de fonctionnement avec A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s

La figure 4.3 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC et la conductivité du sol est égale à 1.25 W/m et de 12 heures de fonctionnement.

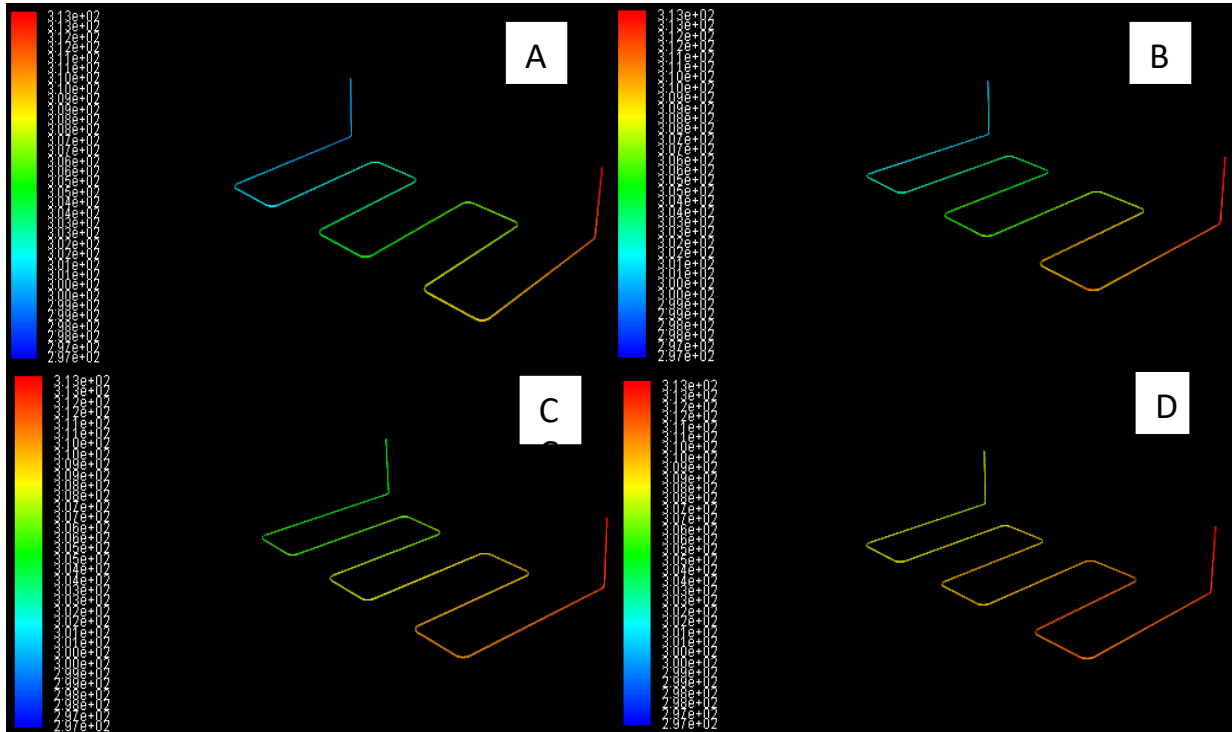


Figure 4.3 – Les iso-surface de serpentin pendant 12 heures de fonctionnement avec A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s.

La figure 4.4 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC et la conductivité du sol est égale à 1.25 W/m et de 24 heures de fonctionnement.

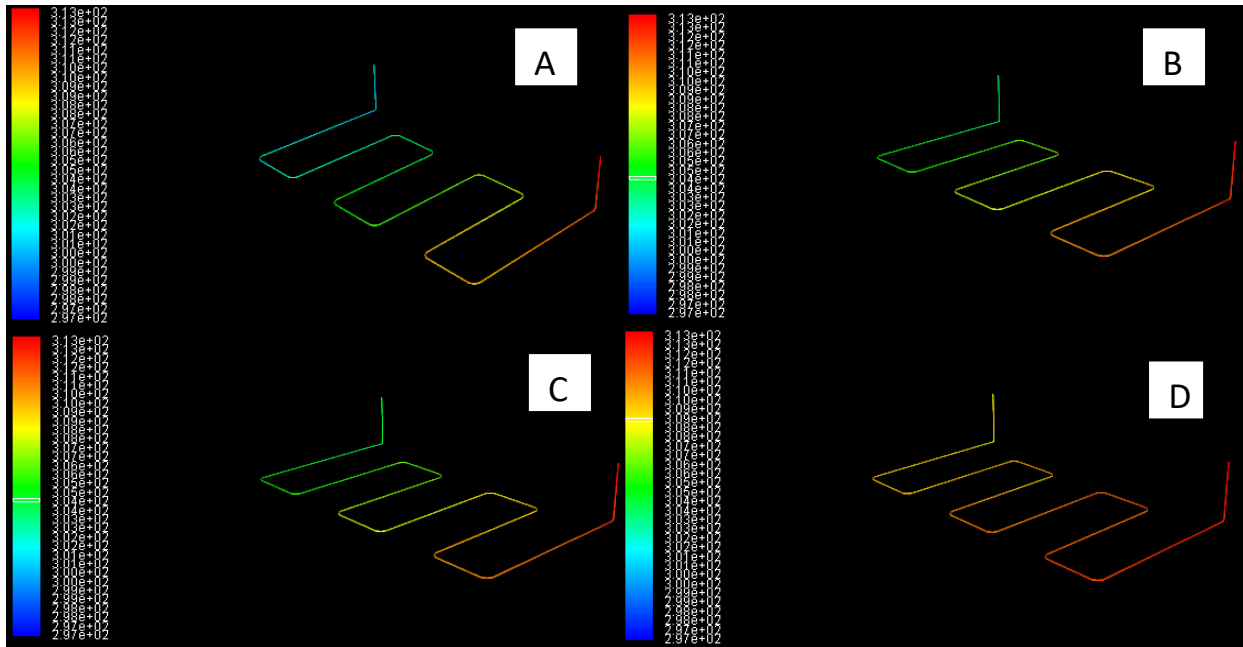


Figure 4.4 – Les iso-surface de serpentin pendant 24 heures de fonctionnement avec A)0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s.

Configuration	Conductivité du sol (W/mK)	Débit (kg/s)	Température de sortie (k)		
			6 heures	12 heures	24 heures
Serpentin	1.25	0.05	298.700	300.526	301.349
		0.08	301.341	302.653	303.305
		0.1	301.843	303.44	303.923
		0.2	305.802	306.449	308.161

Tableau 4.1 – Température de sortie du Serpentin en fonction des débits.

4.4.1.2. Pour conductivité du sol égale 3 W/mK

La figure 4.5 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC et la conductivité du sol est égale à 3 W/m et de 6 heures de fonctionnement.

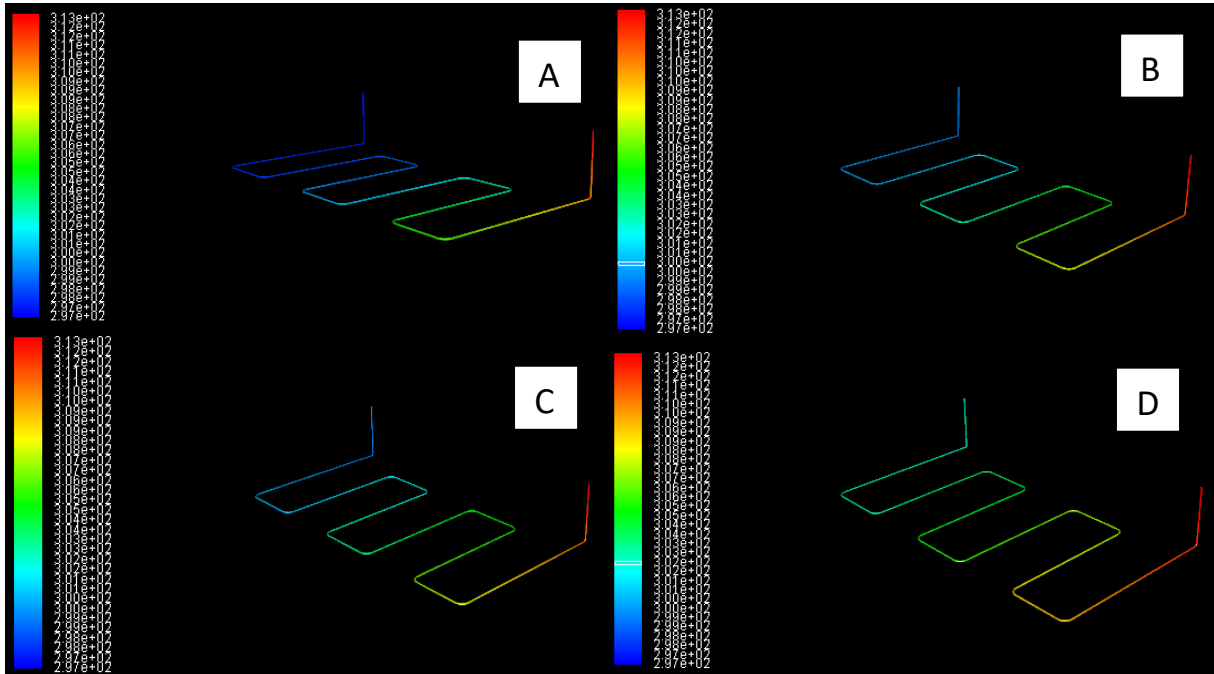


Figure 4.5 – Les iso-surface de serpentin pendant 6 heures de fonctionnement avec : A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s

La figure 4.6 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC et la conductivité du sol est égale à 3 W/m et de 12 heures de fonctionnement.

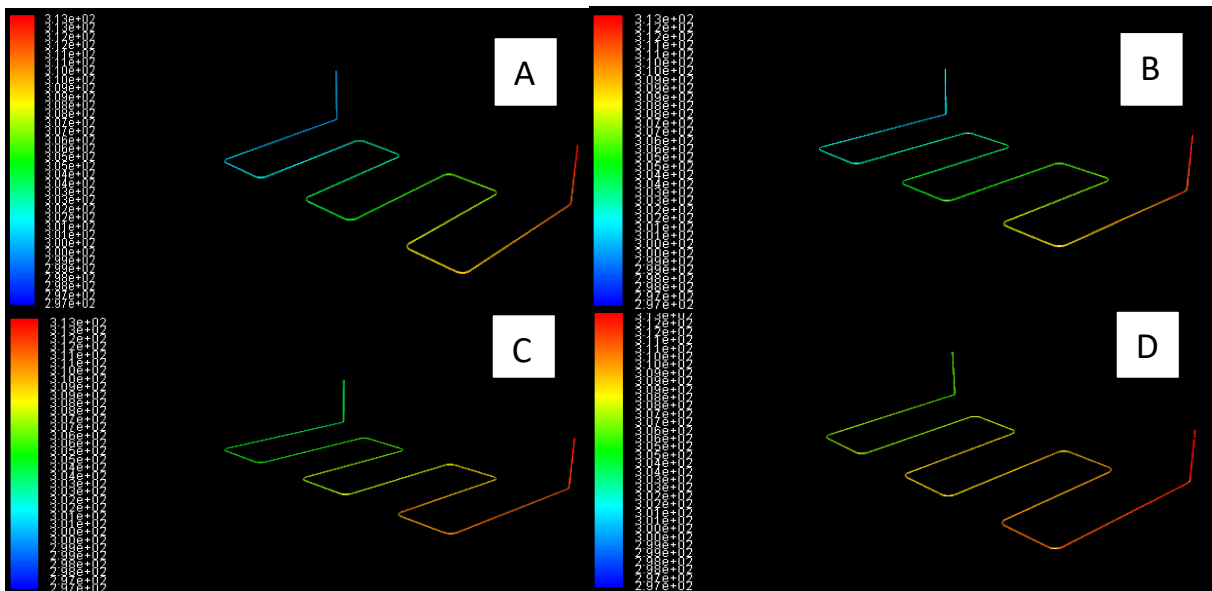


Figure 4.6 – Les iso-surface de serpentin pendant 12 heures de fonctionnement avec A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s

La figure 4.7 illustre les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) de l'échangeur de forme serpentin en PVC et la conductivité du sol est égale à 3 W/m et de 24 heures de fonctionnement.

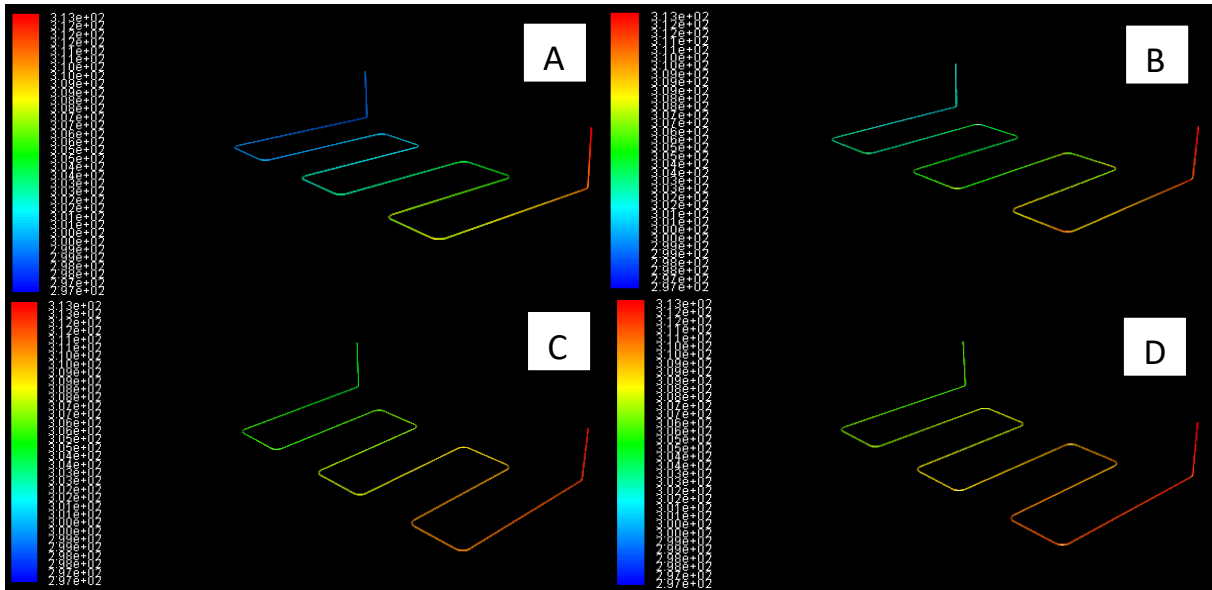


Figure 4.7 – Les iso-surfaces de serpentin pendant 24 heures de fonctionnement avec : A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s.

Configuration	Conductivité du sol (W/mK)	Débit (kg/s)	Température de sortie (k)		
			6 heures	12 heures	24 heures
Serpentin	3	0.05	297.799	298.764	299.401
		0.08	299.915	300.858	301.458
		0.1	300.519	301.845	303.031
		0.2	304.117	305.122	306.129

Table 4.2 – Température de sortie du Serpentin en fonction des débits.

4.4.1.3. Comparaisons entre la conductivité du sol

La figure 4.8 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.05 kg/s et pour 6 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 298.700 (K), 297.799 (K).

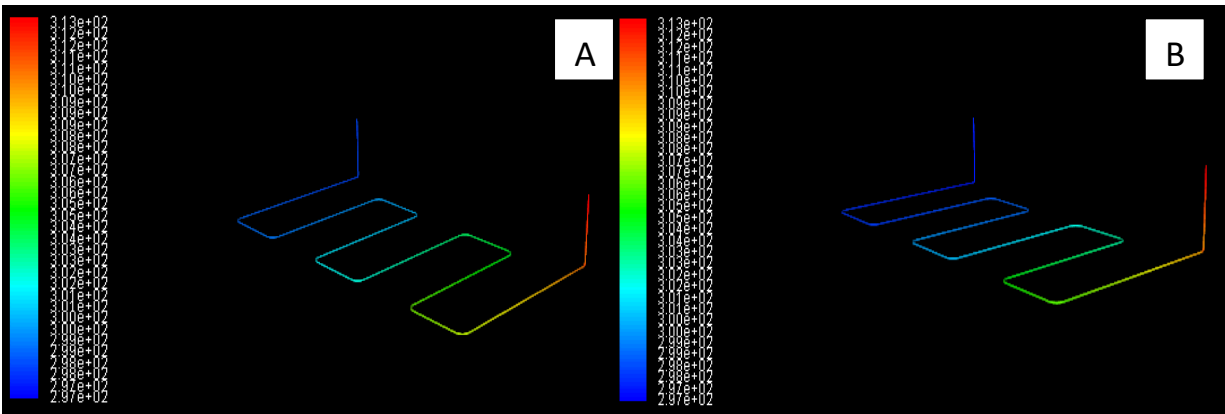


Figure 4.8– Les iso-surface de serpentin avec débit 0.05 kg /s pour 6 heures de fonctionnement
A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.9 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s = 1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.05 kg/s et pour 12 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 300.526 (K) ; 298.764 (K)

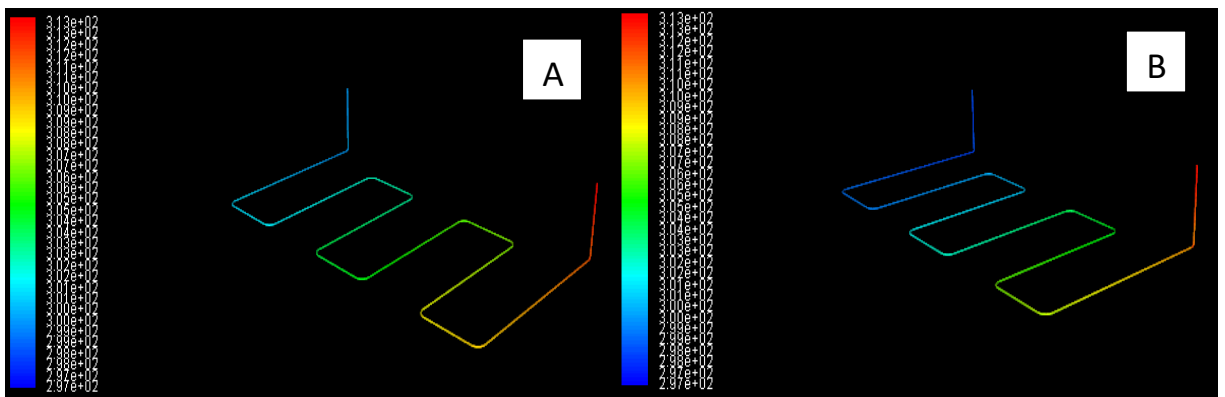


Figure 4.9 – Les iso-surface de serpentin avec débit 0.05 kg /s pour 12 heures de fonctionnement
A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.10 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.05 kg/s et pour 24 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 302.349 (k), 299.401 (k).

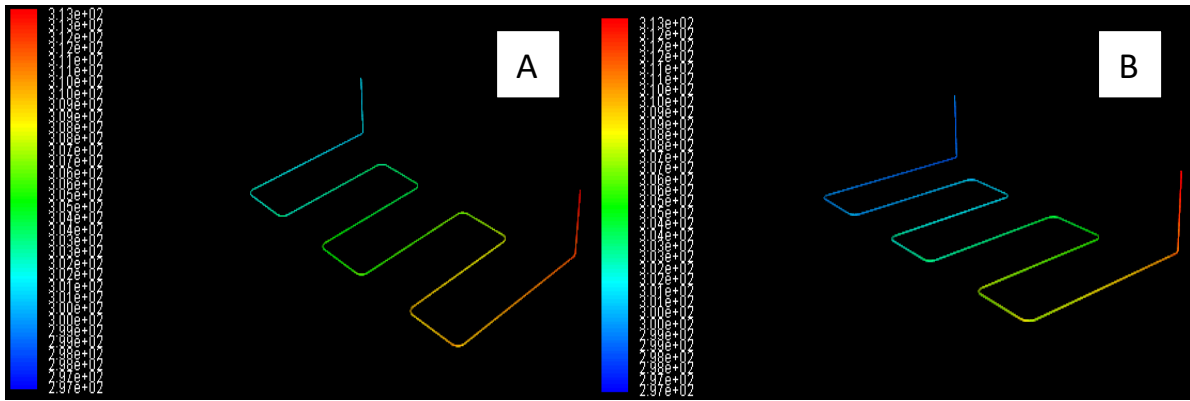


Figure 4.10 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.05 kg/s pour 24 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.11 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.08 kg/s et pour 6 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 301.341 (k) ; 299.915 (k).

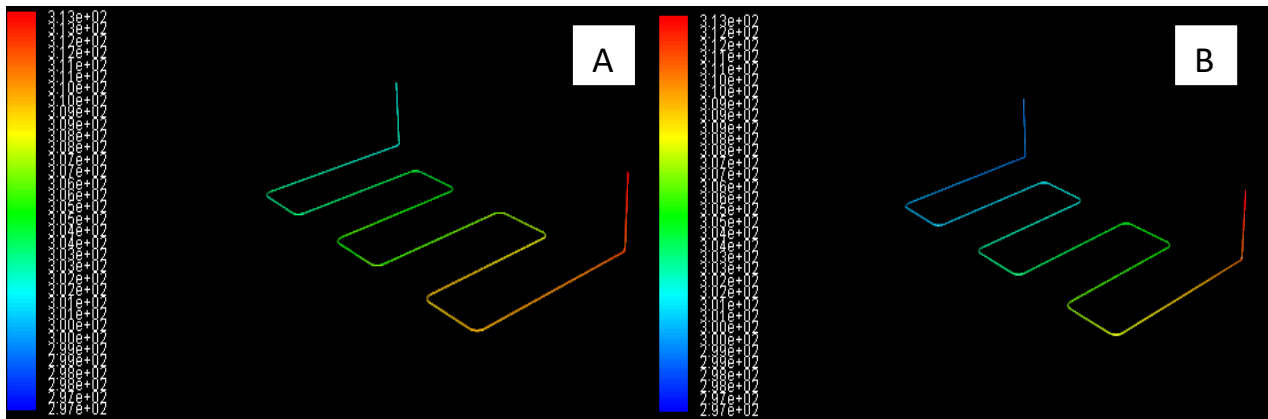


Figure 4.11 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.08 kg/s pour 6 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.12 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.08 kg/s et pour 12 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 302.653 (k) ; 300.858 (k).

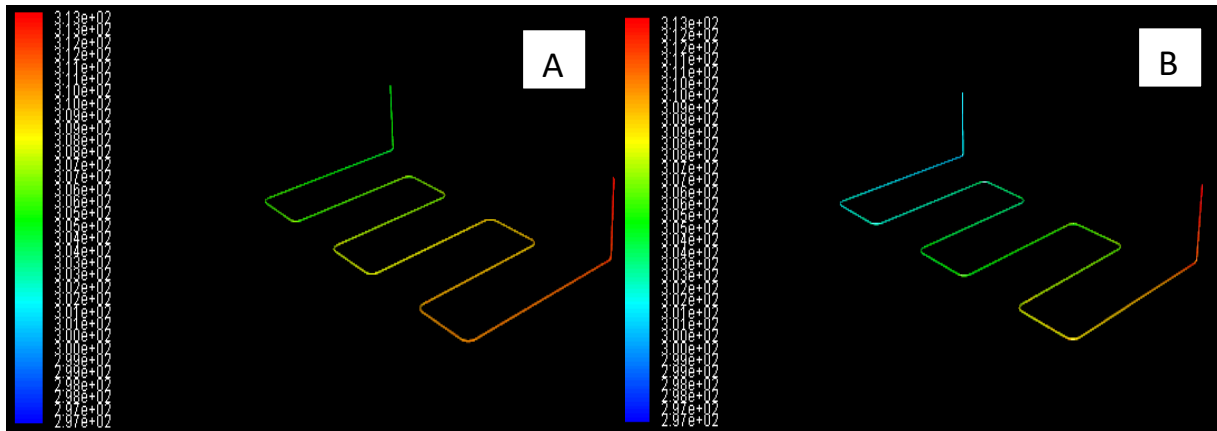


Figure 4.12 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.08 kg /s pour 12 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.13 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.08 kg/s et pour 24 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 303.305 (k) ; 301.485 (k).

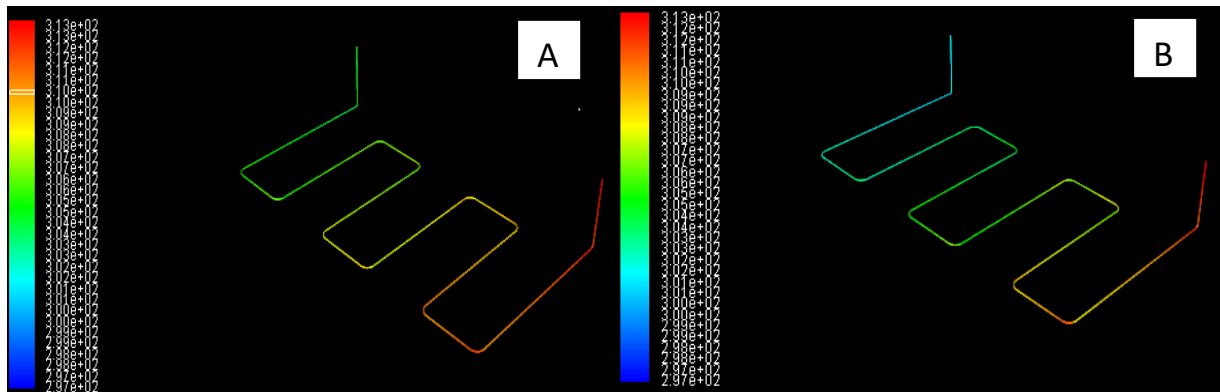


Figure 4.13 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.08 kg /s pour 24 heures de fonctionnement A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.14 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s et pour 6 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 301.843 (k) ; 300.519 (k).

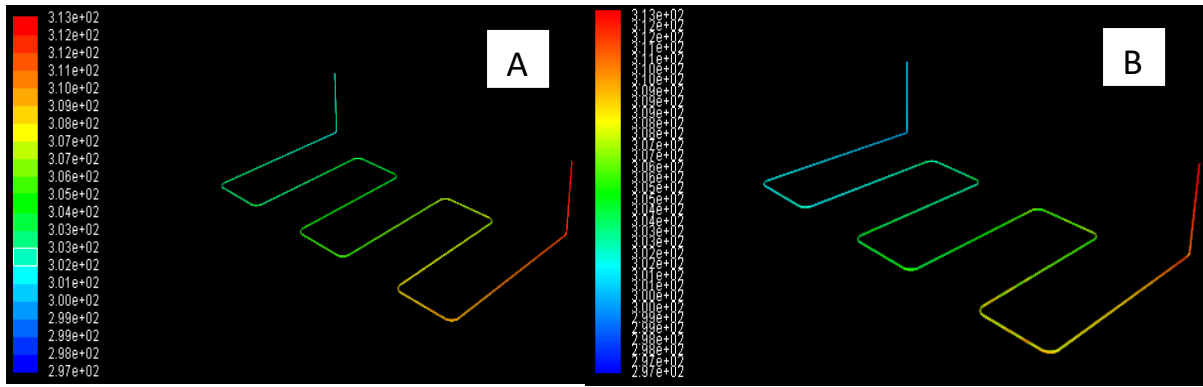


Figure 4.14 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.1 kg /s pour 6 heures de fonctionnement
 A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.15 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s et pour 12 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC sont, respectivement, 303.440 (k) ; 301.845 (k).

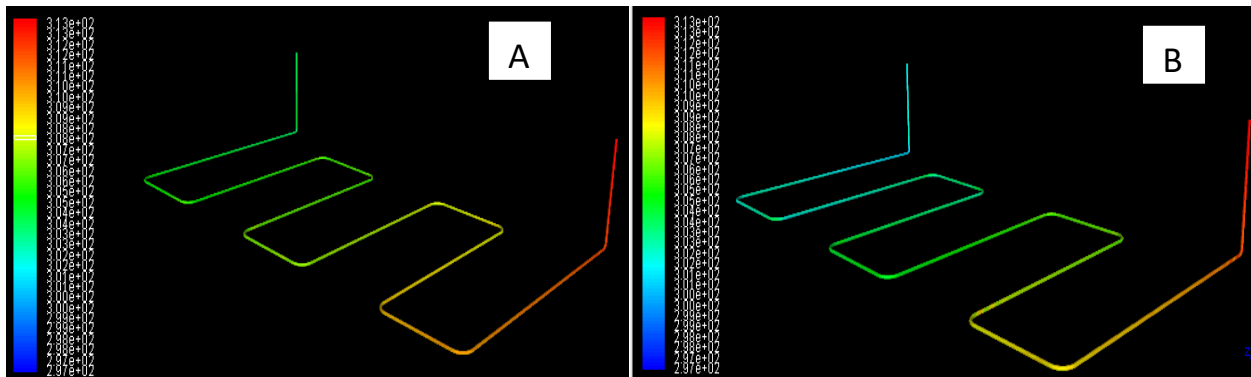


Figure 4.15 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.1 kg /s pour 12 heures de fonctionnement
 A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.16 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.1 kg/s et pour 24 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, sont respectivement, 303.923 (k), 303.031 (k).

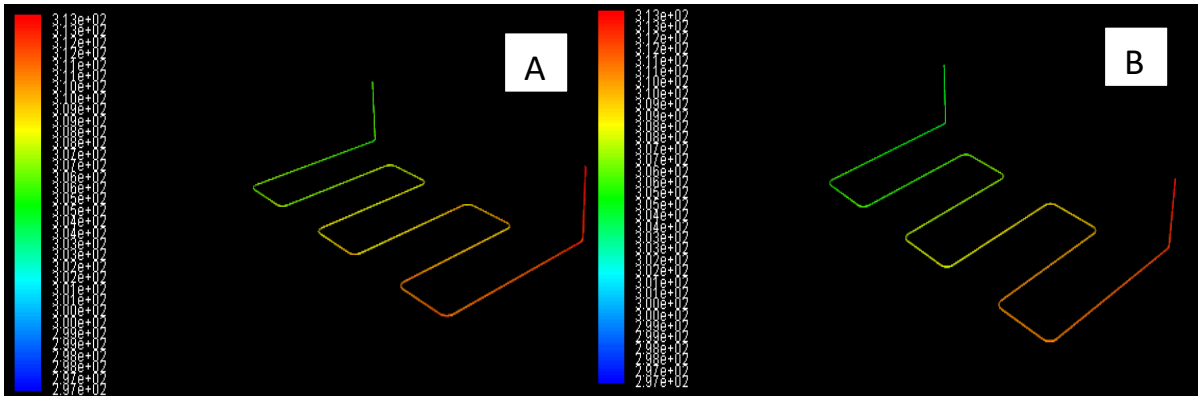


Figure 4.16 – Les iso-surface de serpentin avec débit 0.1 kg /s pour 24 heures de fonctionnement
A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.17 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.2 kg/s et pour 6 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, sont respectivement, 305.802 (k) ; 304.117 (k).

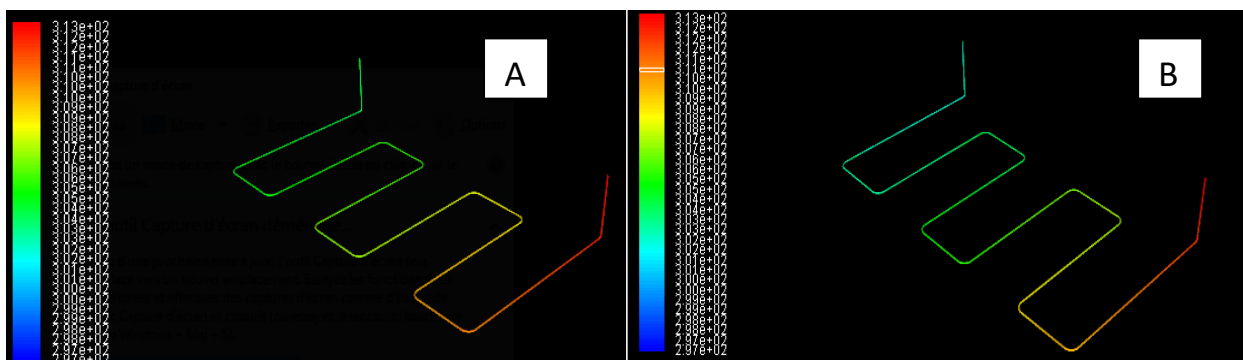


Figure 4.17– Les iso-surface de serpentin avec débit 0.2 kg /s pour 6 heures de fonctionnement
A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.18 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.2 kg/s et pour 12 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, sont respectivement, 306.449 (k) ; 305.122 (k).

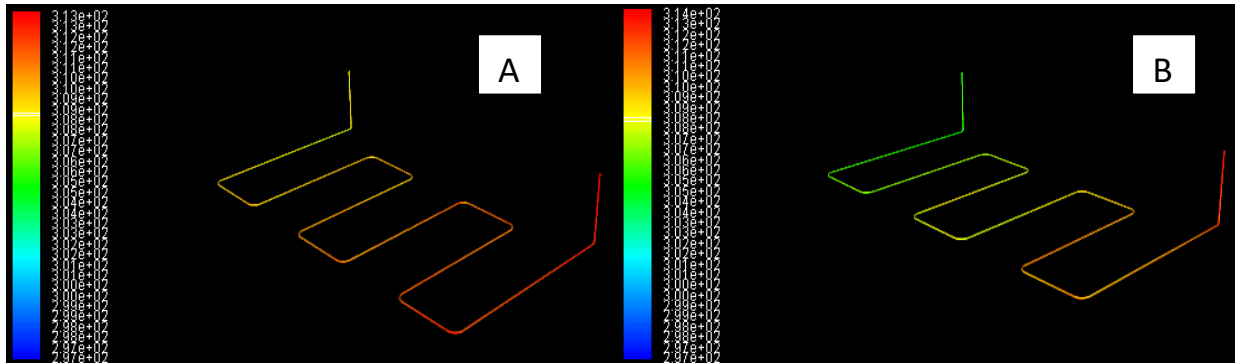


Figure 4.18 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.2 kg /s pour 12 heures de fonctionnement
A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

La figure 4.19 représente les résultats issus des calculs via le logiciel Fluent sous forme d'isotherme de surfaces pour différentes conductivités du sol ($\lambda_s=1.25$ et 3 W/mK), de forme serpentin pour un débit constant égal à 0.2 kg/s et pour 24 heures de fonctionnement. On remarque que les températures de l'eau obtenues à la sortie de l'échangeur en PVC, sont, respectivement, 308.161 (k), 306.129 (k).

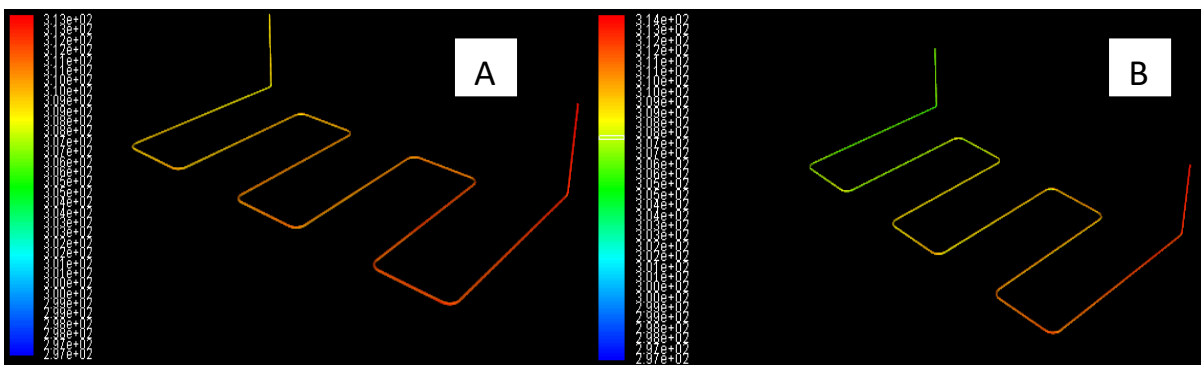


Figure 4.19 – Les iso-surfaces de serpentin avec débit 0.2 kg /s pour 24 heures de fonctionnement
A) $\lambda_s=1.25$ W/mK ; B) $\lambda_s=3$ W/mK.

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.3 et les figures 4.8 à 4.19 en comparaison avec l'intervalle de température de référence, ITR, entre 22 et 25 °C (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Le débit est directement proportionnel avec la température de l'eau à la sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augmente la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente.

Configuration	Débit Kg/s	Conductivité du sol (W/mk)	Température de sortie (k)		
			6 h	12 h	24 h
Serpentin	0.05	1.25	298.700	300.526	302.349
		3	297.799	298.764	299.401
	0.08	1.25	301.341	302.653	303.305
		3	299.915	300.858	301.485
	0.1	1.25	301.843	303.440	303.923
		3	300.519	301.845	303.031
	0.2	1.25	305.802	306.449	308.161
		3	304.117	305.122	306.129

Table 4.3 – Température de sortie du Serpentin en fonction de la conductivité du sol.

4.4.2. Effet du débit et la longueur sur l'échangeur eau/sol

Dans cette partie, nous allons voir l'effet du débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) ainsi que la longueur de la tuyauterie de l'échangeur de chaleur eau/sol. Ces résultats sont réalisés pour différents temps de fonctionnement (6, 12 et 24 heures).

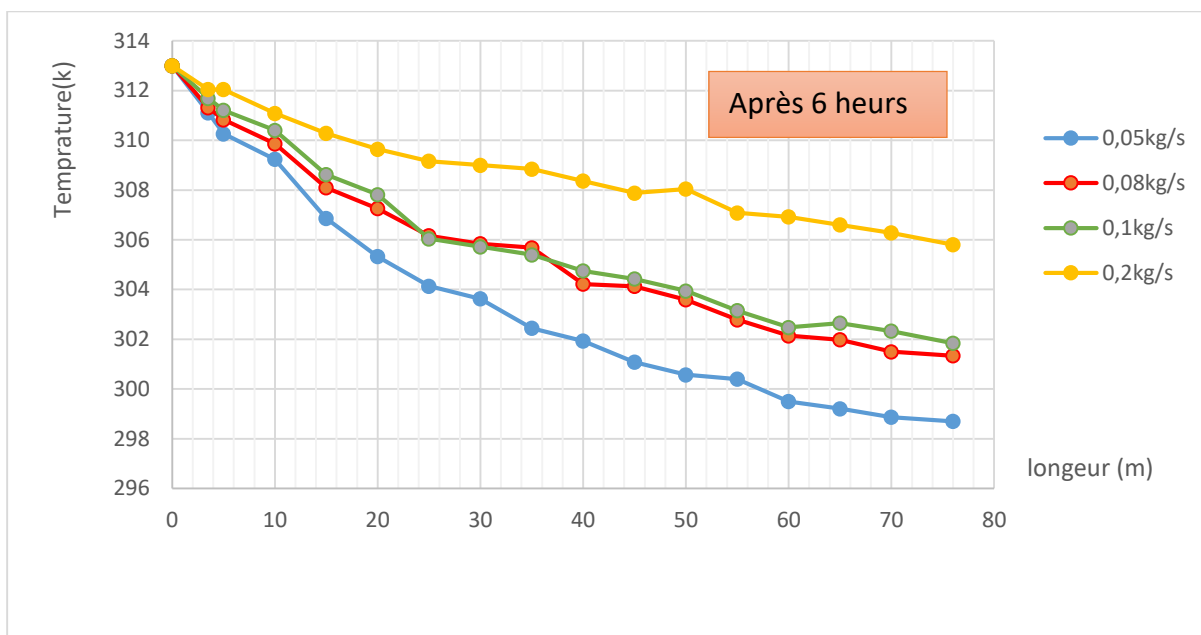


Figure 4.20 - Température de sortie en fonction la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 1.25 W/mk.

La figure 4.20 présente les profils de la température de l'eau le long du tube enterré. Elle nous montre la variation de la température de l'eau dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur d'échangeur et du débit. Ces profils correspondent à une journée du mois de l'été pour une durée de fonctionnement égale 6 heures pour différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) et avec une conductivité du sol égal 1.25 W/mK.

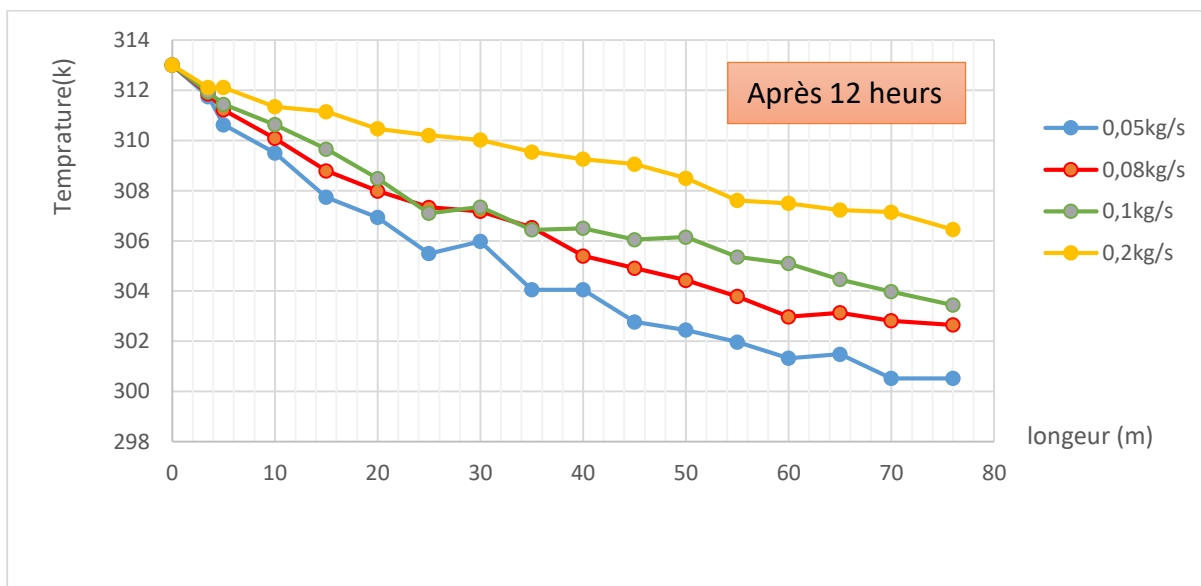


Figure 4.21 – Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 1.25 W/mk.

La figure 4.21 présente les profils de la température de l'eau le long du tube enterré. Elle nous montre la variation de la température de l'eau dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur d'échangeur et du débit. Ces profils correspondent une journée du mois de l'été pour une durée de fonctionnement égale 12 heures durant des différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) avec une conductivité du sol égal à 1.25 W/mK.

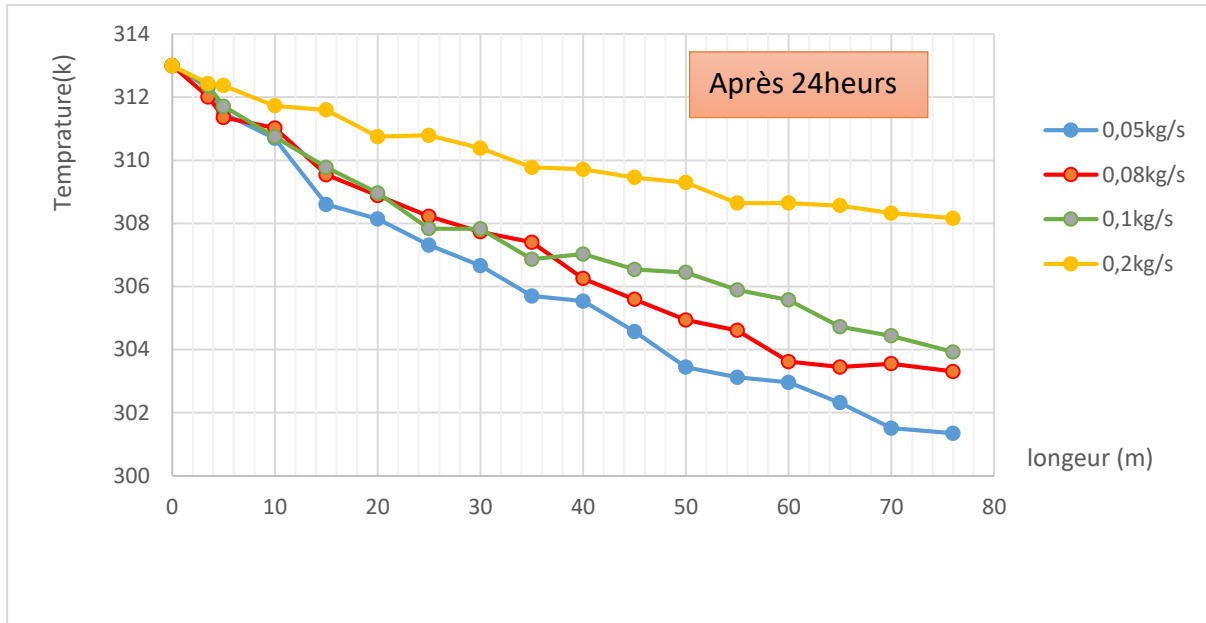


Figure 4.22 – Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 1.25 W/mk.

La figure 4.22 présente les profils de la température de l'eau le long du tube enterré. Elle nous montre la variation de la température de l'eau dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur d'échangeur et du débit. Ces profils correspondent une journée du mois de l'été pour une durée de fonctionnement égale 24 heures durant des différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) avec une conductivité du sol égal à 1.25 W/mK.

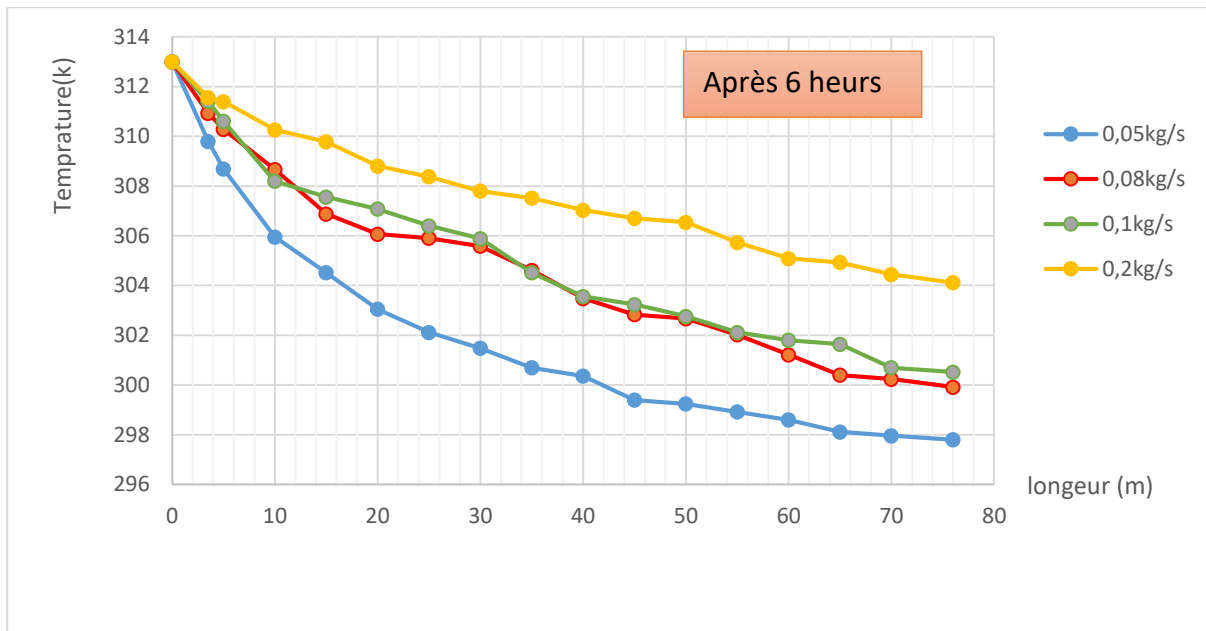


Figure 4.23 – Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 3 W/mk.

La figure 4.23 présente les profils de la température de l'eau le long du tube enterré. Elle nous montre la variation de la température de l'eau dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur d'échangeur et du débit. Ces profils correspondent une journée du mois de l'été pour une durée de fonctionnement égale 6 heures durant des différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) avec une conductivité du sol égal à 3 W/mK.

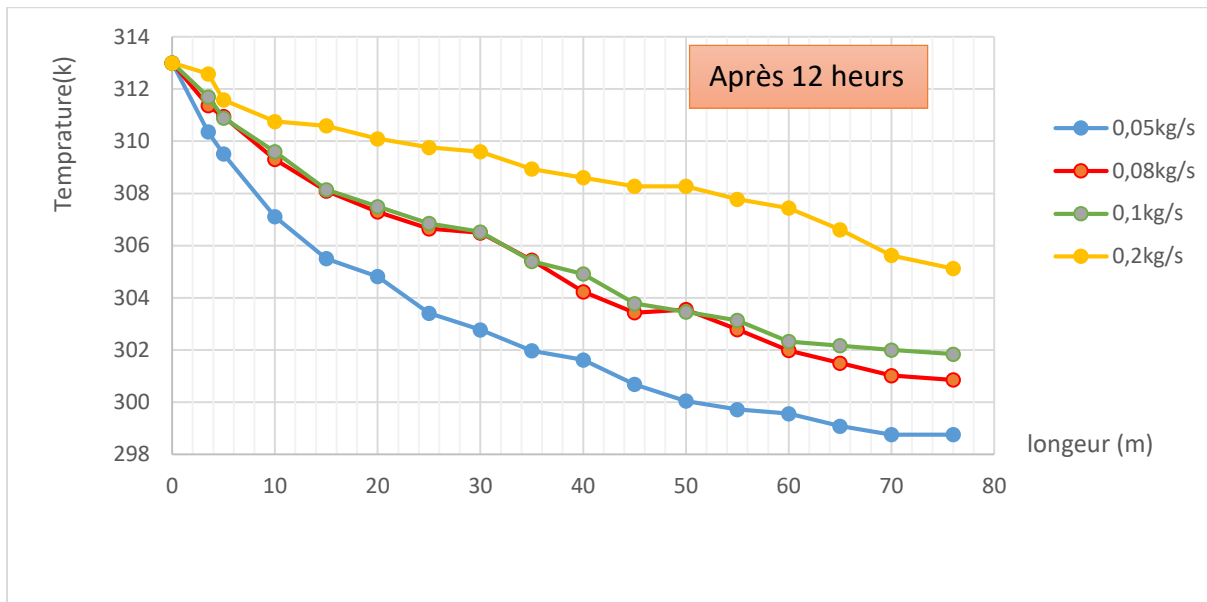


Figure 4.24 – Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 3 W/mk.

La figure 4.24 présente les profils de la température de l’eau le long du tube enterré. Elle nous montre la variation de la température de l’eau dans le tube de l’entrée jusqu’à la sortie en fonction de la longueur d’échangeur et du débit. Ces profils correspondent une journée du mois de l’été pour une durée de fonctionnement égale 12 heures durant des différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) avec une conductivité du sol égal à 3 W/mK.

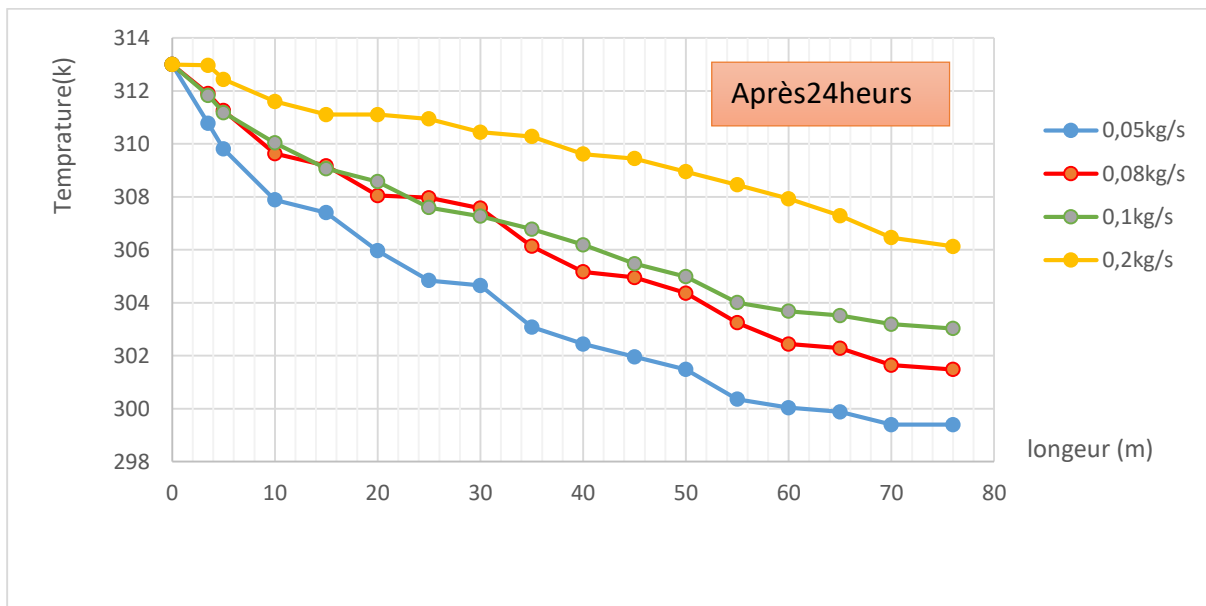


Figure 4.25 – Température de sortie en fonction de la longueur pour différents débits pour une conductivité du sol égale 3 W/mk.

La figure 4.25 présente les profils de la température de l'eau le long du tube enterré. Elle nous montre la variation de la température de l'eau dans le tube de l'entrée jusqu'à la sortie en fonction de la longueur d'échangeur et du débit. Ces profils correspondent une journée du mois de l'été pour une durée de fonctionnement égale 24 heures durant des différents débits (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) avec une conductivité du sol égal à 3 W/mK.

D'après les résultats enregistrés dans le tableau 4.4 et les figures 4.20 à 4.25 en comparaison avec l'intervalle de température de référence, ITR, entre 22 et 25 °C (la température optimale à l'irrigation des palmiers dattiers), on remarque que : Le débit est directement proportionnel avec la température de l'eau à la sortie de l'échangeur, c.-à-d., à chaque fois que le débit augmente la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente.

Configuration	Conductivité du sol (W/mk)	Débit (Kg/s)	Ecart de Température de sortie (°C)		
			6 h	12 h	24 h
Serpentin	1.25	0.05	14.3	12.474	10.651
		0.08	11.659	10.347	9.695
		0.1	11.157	9.56	9.077
		0.2	7.198	6.551	4.839
	3	0.05	15.201	14.236	13.599
		0.08	13.085	12.142	11.515
		0.1	12.481	11.155	9.969
		0.2	8.883	7.878	6.871

Table 4.4 – Ecart de Température de sortie du Serpentin en fonction de la conductivité du sol, débits et heures de de fonctionnement.

4.4.3. Effet du temps de fonctionnement

Les figures,4.26, 4.27, 4.28 et 4.29 montrent les profils de température de l'eau le long du tuyau enterré pour différentes heures de fonctionnement. Ces courbes montrent que la température de sortie augmente avec l'augmentation des heures de fonctionnement pour tous les débits.

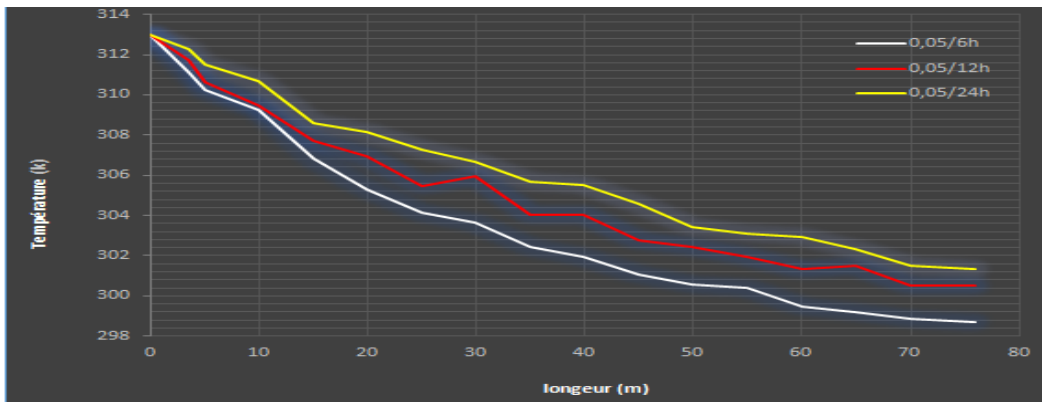


Figure 4.26. Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,05 kg / s pour différentes heures de fonctionnement.

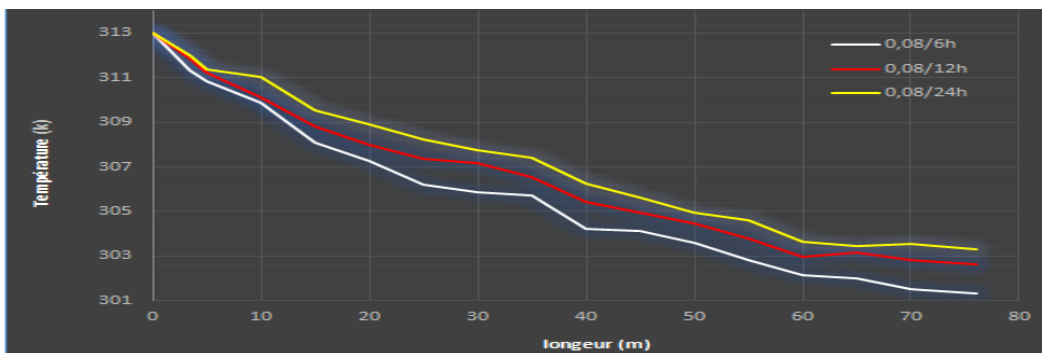


Figure 4.27. Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,08kg / s pour différentes heures de fonctionnement.

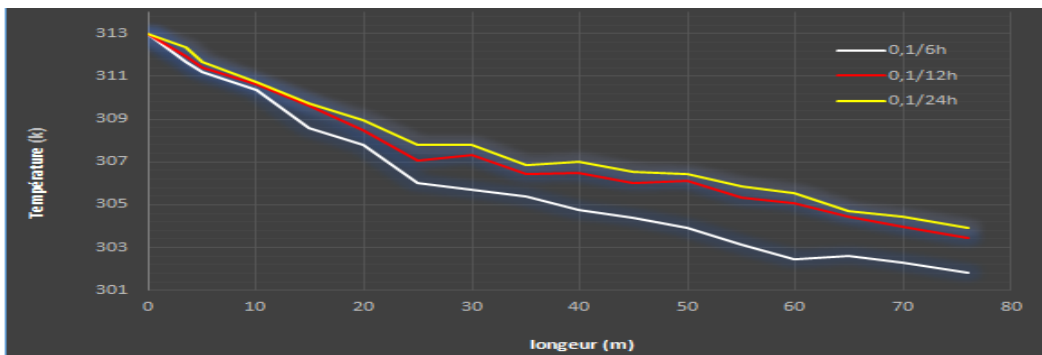


Figure 4.28. Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,1kg / s pour différentes heures de fonctionnement.

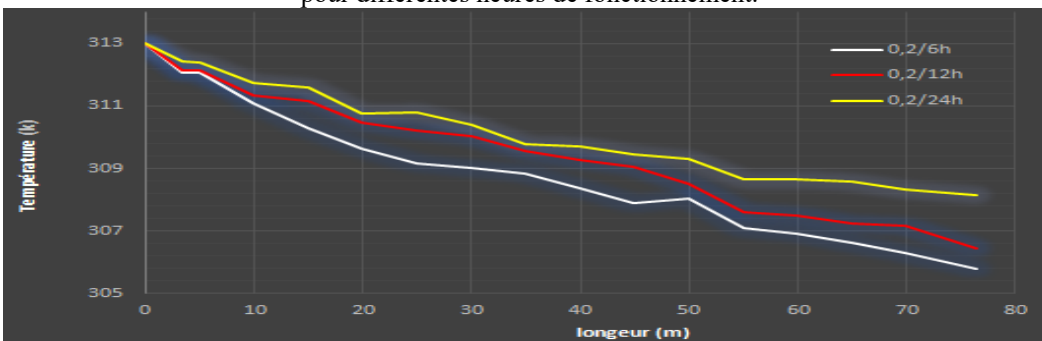


Figure 4.29. Température de sortie du fluide en fonction de la longueur pour un débit de 0,2 kg / s pour différentes heures de fonctionnement.

4.4.4. Effet du matériau de construction du tube de l'échangeur eau/sol

Pour voir l'effet des matériaux de construction les plus fréquemment utilisés dans le rafraîchissement par les échangeurs enterrés. On a essayé de voir le comportement thermique de trois types de matériaux, le PVC, le PHD (polyéthylène haute densité) et le PP. La figure 4.30 montre l'évolution de la température de l'eau en fonction de la longueur, dans le cas d'un sol a une conductivité égale $1.25 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$, en présence d'un échangeur d'une longueur de 76.4 m, enterré à une profondeur de 03 m, dont le débit injecté à l'entrée de l'échangeur est égal à 0.1 kg/s .

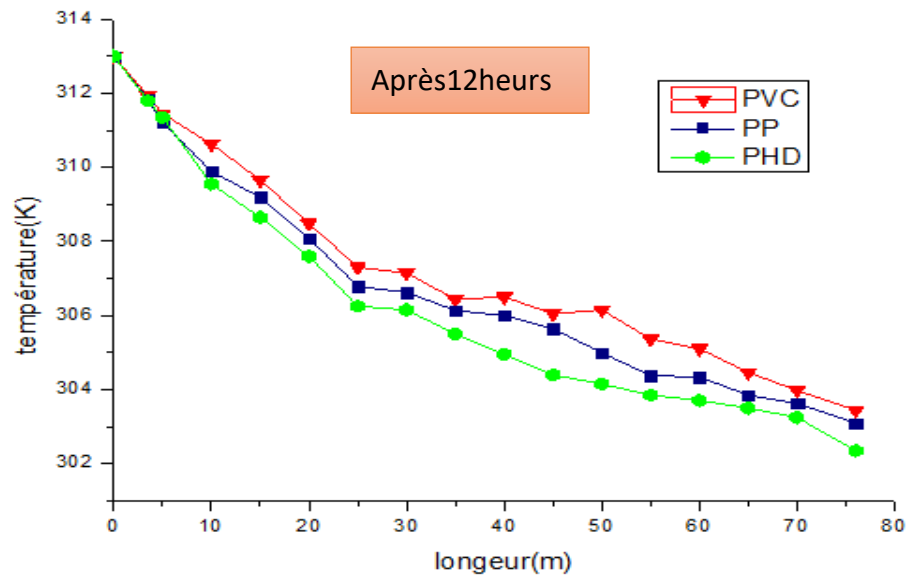


Figure 4.30. Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différentes conductivités thermiques de tube (0.1 kg/s).

L'analyse des courbes de la figure 3.30 montre que la conductivité thermique du matériau est un paramètre important qui affecte la qualité du transfert thermique entre le sol et la paroi du tube enterré.

La conduite	Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Le polychlorure de vinyle (PVC)	0.17
Le polypropylène (PP)	0.21
Le polyéthylène haute densité (PE-HD)	0.43

Table 4.5 - La conductivité thermique pour différents types de conduite.

4.4.5. Influence de température du sol sur la température de l'eau

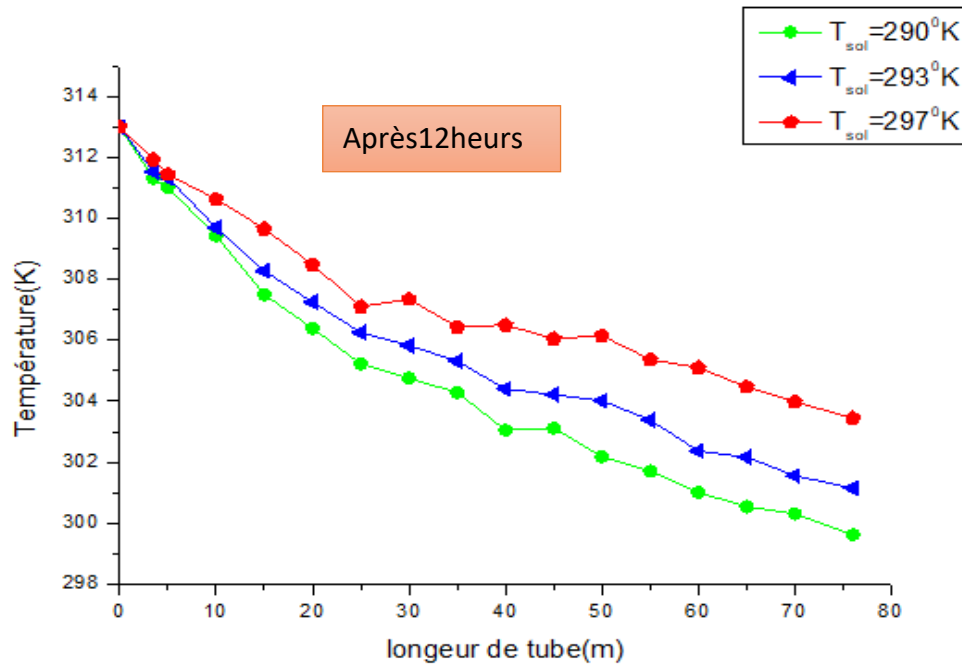


Figure 4.31 -Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différentes températures du sol (0.1kg/s).

La figure 4.31 montre que la température de l'eau est influée par la température du sol, quand la température du sol diminue proportionnellement avec la profondeur, la température de l'eau diminue aussi.

4.4.6. Impact de la température de l'eau sur le sol

Dans cette section, nous verrons l'effet de la température de l'eau refroidi sur celle du sol durant les heures de fonctionnement. L'énergie thermique extraite de l'eau refroidi est absorbée par le sol grâce l'écart de température qui existe. Cet écart diminue en fonction du temps jusqu'à saturation su sol ($\Delta T=0$).

La figure 4.32 montre la distribution de la température su sol autour des tubes verticaux à l'entrée et à la sortie de l'échangeur eau/sol enterré après 12 heures de fonctionnement. On remarque que la température du sol autour de ces tubes à l'entrée et à la sortie est plus élevée.

La figure 4.33 représente les contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique du sol pour un débit 0.2 kg/s pour différentes heures de fonctionnement A) 6 heures, B) 12 heures et C) 24 heures. On remarque que plus le temps de fonctionnement augmente la température du sol augmente.

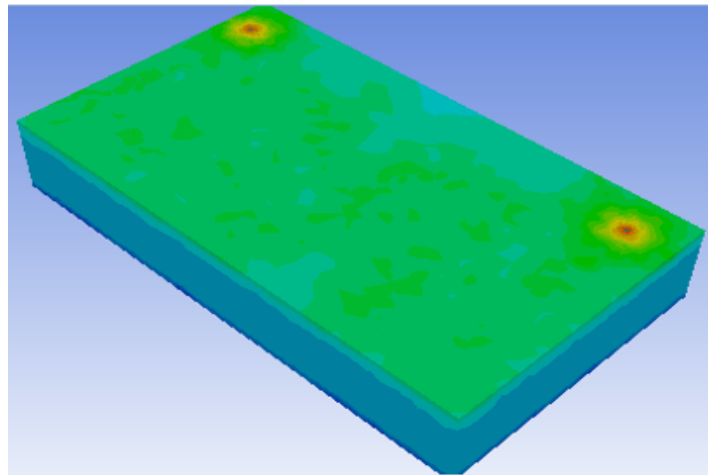


Figure 4.32 - Distribution de la température du sol après 12 h de fonctionnement (0.1kg/s).

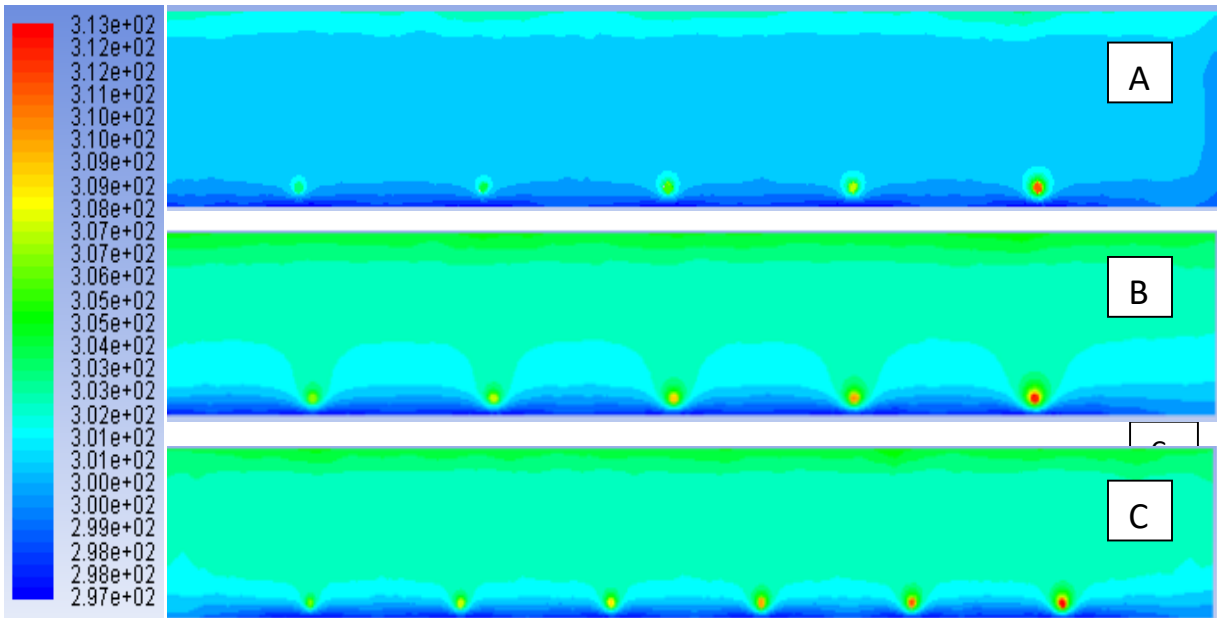


Figure 4.33 - Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique du sol pour un débit 0.2kg/s pour différents heures de fonctionnement. A) 6 heures, B)12 heures, C) 24 heures.

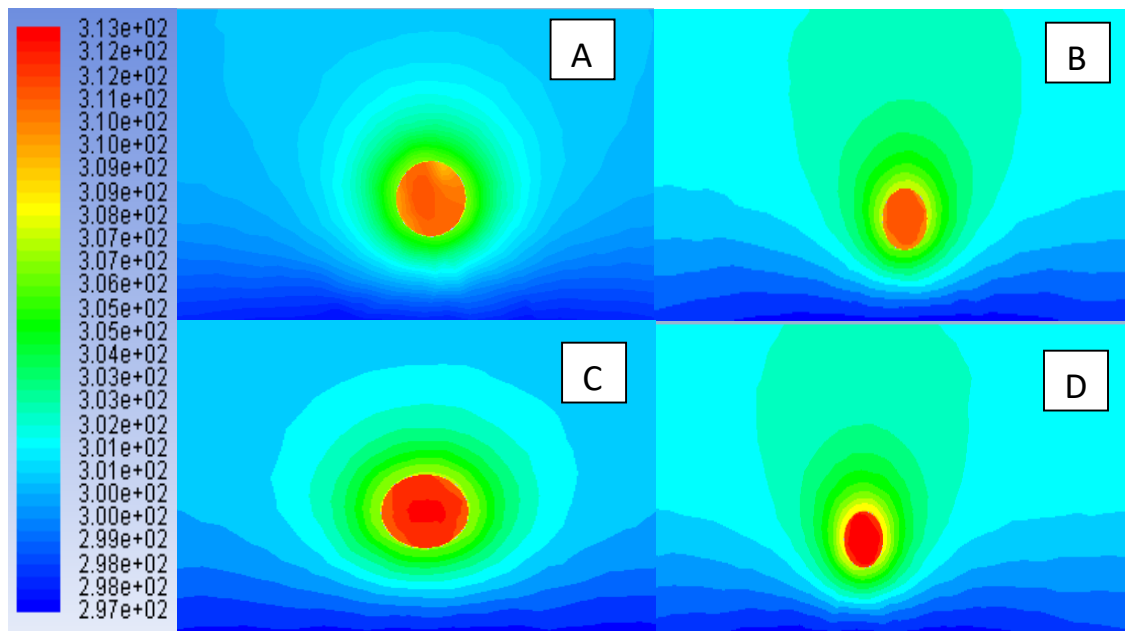


Figure 4.34 - Contours de température dans la section verticale à longueur du domaine numérique du sol pour différents débits de sol après 12 h de fonctionnement. A) 0.05, B) 0.08, C) 0.1, D) 0.2 kg/s

4.4.7. Les pertes de charge

Dans cette section, nous distinguerons des pertes de charges sur la puissance de pompage à travers l'échangeur de forme serpentin. Le tableau 4.6, nous montrent quelques données numériques sur la distribution de la pression exercée par le pompage de l'eau sur les parois de la tuyauterie de l'échangeur. En augmentant le débit d'écoulement la pression augmente et par conséquent, les pertes de charges linéique et singulière augmentent. Cette dernière engendre plus de puissance de pompage.

Débits (kg/s)	Vitesse (m/s)	Reynolds	Perte de charge linéique (Pa)	Singulière (Pa)	ΔP_{tot} (Pa)
0.05	0.0052	721.993	0.000852	0.02904	0.0298
0.08	0.0084	1155.819	0.00136	0.0757	0.077
0.1	0.0105	1443.9	0.001705	0.118	0.119
0.2	0.021	2887.97	0.00609	0.473	0.4736

Table 4.6 – Les pertes de charge de l'échangeur Serpentin pour différents débits.

4.4.8. L'efficacité de l'échangeur

L'efficacité de l'échangeur est le rapport de l'écart de température de l'eau entre l'entrée et la sortie de l'échangeur sur l'écart de de température du sol et celle de l'eau à l'entrée de l'échangeur.

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}}}{T_{\text{sol}} - T_{\text{entrée}}}$$

Le tableau 4.7 nous donne quelques données numériques de l'efficacité de l'échangeur en fonction de différents débits et pour différents temps de fonctionnement. On remarque que plus le débit est faible plus l'efficacité ε est meilleure.

Temps de fonctionnement	Débits (Kg/s)	T _{sol} (°K)	T _{entrée} (°K)	T _{sortie} (°K)	L'efficacité ε
6 h	0.05	297	313	298.7	0.89
	0.08			301.653	0.709
12 h	0.1			303.44	0.597
	0.2			306.449	0.409

Table 4.7 – L'efficacité de l'échangeur Serpentin pour différents débits.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire est une simulation numérique d'un système d'échanges de chaleur géothermique. Il constitue une contribution dans le projet de recherche PRFU agréé le 01/01/2019, intitulé du projet : « **Refroidissement des eaux d'irrigation des forêts du palmier-dattier par la géothermie dans la région ouest de la wilaya de Biskra** ».

L'objectif principale fixé est le dimensionnement d'un échangeur de chaleur géothermale eau/sol pour le refroidissement des eaux d'irrigations des palmiers dattier qui répond aux exigences du cahier de charges établie par le projet.

Cette étude représente une continuité du sujet lancé durant l'année universitaire 2019-2020 par Mr. **Mohamed Aymen Kethiri** sous la direction du Dr. **Kamel AOUES**. Donc le but est d'approfondir les deux axes commencés l'année dernière qui sont la recherche de travaux antérieurs et le dimensionnement d'un échangeur enterré eau/sol.

La résolution du problème de la température de l'eau des sources chaudes destinée à l'irrigation agricole. Ce problème à une grande importance et un impact socio-économique sur la culture des palmiers dattiers dans la région.

La démarche suivie pour aboutir à ces objectifs a divisé ce travail en deux parties. D'une part, la première partie a été consacrée pour une compréhension élargie des axes formant le sujet étudié (Géothermie, échangeur eau/sol, irrigation, palmier dattier, état de l'art). D'autre part, la deuxième partie concrétise la solution proposée à travers une étude théorique, une simulation numérique et une discussion des résultats obtenus.

Nous avons proposé un cas d'étude d'échangeur géothermale eau/sol (forme serpent), varié les matériaux de construction (PVC, PP et PE-HD), les débits d'écoulement (0.05, 0.08, 0.1 et 0.2 kg/s) et le temps de fonctionnement (6, 12 et 24 heures). Les conductivités du sol (1.25 et 3 W/m.°K), Suite aux résultats obtenus et à la comparaison établit des différentes variantes d'étude selon les exigences du cahier de charge (les températures de l'ITR), et à partir des hypothèses considérées dans cette étude et en vue d'obtenir de meilleures dimensions et spécifications (nature du sol, diamètre de tube, nature de tube, la longueur à partir du débit et le temps de fonctionnement), on a conclu que :

Nature du sol : différents types de sol sont testés, le sol a conductivité égale à $3\text{W/m}^\circ\text{K}$ et à profondeur de 3 m a donné les meilleurs résultats.

Matériaux : PE-HD est le meilleur matériau, pour ces avantages (conductivité, résistance...).

Diamètre des tubes : On a remarqué que l'augmentation du diamètre provoque une diminution des pertes de charge.

La longueur : pour un débit choisi de 0.05 Kg/s la longueur optimale est de 76.4m .

La durée de fonctionnement : la meilleure durée de fonctionnement est entre 6 heures jusqu'à 12 heures qui affecte la qualité du transfert thermique de l'échangeur de chaleur enterré.

Pour la configuration de forme Serpentin, on a enregistré pour un débit égal 0.05 kg/s pour une conductivité de :

- $1.25\text{ W/m}^\circ\text{K}$ un écart de température de 14.3°C , c.-à-d., une température de l'eau à la sortie de l'échangeur égale à 25°C (conforme à l'ITR).
- $3\text{ W/m}^\circ\text{K}$ un écart de température de 15.201°C , c.-à-d., une température de l'eau à la sortie de l'échangeur égale à 24.799°C (conforme à l'ITR).

Afin d'approfondir et de valider les propositions et les résultats numériques obtenus, nous pouvons citer quelques perspectives :

- ✓ Travailler sur le troisième axe tracé pour ce projet ; la partie expérimentale pour tester la configuration proposée et valider les résultats obtenus.
- ✓ Faire un prélèvement de la température du sous-sol afin de déterminer sa distribution en fonction de la profondeur.
- ✓ Voir la nature physicochimie du sol de la région de Biskra et son influence sur nos résultats
- ✓ Déterminer la distribution expérimentale de la température de l'eau à l'intérieur de l'échangeur pour valider les dimensions. Et celle du sol qui entoure les tubes de l'échangeur.
- ✓ Déterminer la distribution expérimentale de la température du sous-sol qui entoure les tubes de l'échangeur pour mieux discuter sur le phénomène de saturation thermique.
- ✓ Faire une étude technicoéconomique.

A travers cette étude, nous avons pu élaborer un article dont le titre « **CFD simulations of horizontal ground heat exchangers for cooling irrigation water in the Biskra area** », annexe A.

ANNEXE A



Acceptation

Dear Author M. Yacine Kessai,

I am pleased to inform you that your paper:

Manuscript reference: JSI'2020-52

Title: « CFD simulations of horizontal ground heat exchangers for cooling irrigation water in the Biskra area »

Authors: Yacine Kessai, Kamel Aoues, Mohamed Aymen Kethiri, Khaled Chebah

has been accepted to be presented in the Conference and Forum on Engineering Science JSI'2020 which will be held during the period of September 25-27, 2020 in Sfax, TUNISIA.

On behalf of the Organizing Committee, I would like to thank you for your submission and I invite you to attend the conference in order to present your paper.

We look forward to seeing you in Sfax, Tunisia.

With best regards,

Prof. Zied Driss

Professor at ENIS

General Chair of JSI'2020



<http://www.enis.rnu.tn/fra/articles/1644/9eme-journees-des-sciences-de-ingenieur-jsi2020--25-27-septembre--sfax--tunisia>

CFD simulations of horizontal ground heat exchangers for cooling irrigation water in the Biskra area

Yacine KESSAI¹, Kamel AOUES¹, Mohamed Aymen KETHIRI¹, Khaled CHEBAH¹.

¹ Laboratory of Materials and Energy Engineering, university of mohamed khider Biskra, Algeria.

kessai.yacine@gmail.com¹, aoueskamel@gmail.com¹, aymen.kethiri@univ-biskra.dz¹; khaledchebah@yahoo.com¹,

Abstract. This work is a numerical study aimed at determining the parameters that directly influence the geothermal exchangers, this study focuses on the use of geothermal energy to cool the irrigation water. In particular, horizontal type coil heat exchangers have been studied for different flow rates and materials and number of operating hours, in order to assess the characteristics of these systems in installations and under different working conditions. The calculations were carried out with the CFD Fluent code and the simulations covered the climatic conditions of the summer season in southern Algeria (Biskra). The most important parameter for the heat transfer of this system resulted in the availability of this system; the optimum time was 6 o'clock in the cases analyzed in this book. Another key factor was the choice of fluid velocity inside the tubes. The installation depth of horizontal floor heat exchangers is 3 m according to the literature.

Keywords: Geothermal, Energy, Heat Exchanger, Water, Irrigation, Cooling, CFD Simulation, Biskra.



Fig. Description of the proposed configuration

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] BENFATAH, H., MOUMMI, N., HATRAF, N., MOUMMI, A., & ALI, S. Y. (2010). Etude théorique et expérimentale du rafraichissement par la géothermie, application à l'habitat. Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Énergétique, SIGCLE, Constantine.
- [2] Naili, N., Yejjer, O., Hazami, M., et al. En 2010. (Etude expérimentale de la performance d'un échangeur enterré.)
- [3] Mohamed Aymen KETHIRI (2019). Exploitation de la géothermie pour refroidir l'eau d'irrigation dans la zone de Biskra. (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [4] Haddad, M. (2008). "Utilisation des eaux géothermiques pour la production des légumes de contre saison dans le Sud tunisien." Revue des régions arides(21) : 628-637.
- [5] Naili, N., Hazami, M., Lazaar, M., et al. En 2009 (Valorisation de la géothermie en Tunisie : utilisation d'un échangeur eau/sol)..
- [6] Idriss BENGHEZALA, "Contribution à l'étude des Performances Dynamiques et Thermiques d'un Echangeur Enterré", Mémoire de magistère, 2014.
- [7] Touil Abdelhak., 'Étude Numérique D'un Échangeur Géothermique Eau-Sol.' Mémoire de Master (2018).
- [8] P. Hollmuler, B. Lachal et C. Soutter, 'Serre avec Stockage de Chaleur par Tubes Enterrés: Analyse Energétique', Rapport Interne, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, 2000.
- [9] Semmache, M. (2017). Etude des transferts de chaleur dans un échangeur enterré air/sol (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [10] Benfateh, H. (2009). Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- [11] Belloufi, Y., (2012). Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraichissement des locaux. (Mémoire de master, Université Mohamed Khider).de Biskra.

- [12] Larwa, B. (2018). Heat Transfer Model to Predict Temperature Distribution in the Ground. *Energies*, 12(1), 1-16.
- [13] Gwadera, M., Larwa, B., & Kupiec, K. (2017). Undisturbed ground temperature—Different methods of determination. *Sustainability*, 9(11), 2055.
- [14] Dalhoum, A. (2016). Développement d'une nouvelle solution analytique pour la modélisation d'un échangeur géothermique hélicoïdal à boucle horizontale (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [15] Nahi, K., et al. Application de la simulation numérique dans l'étude technique de la géothermie par nappes horizontale de tuyauterie appliquée à un projet immobilier mixte de commerces, bureaux et hôtel. 2017.
- [16] Chikh, H. A. (2013). Etude de possibilité de création d'un périmètre d'irrigation à AIN EL HOUTZ.
- [17] AOUATA Ibrahim (2015). Étude et développement de l'irrigation souterraine en Algérie. (Mémoire de master, Ecole nationale supérieur d'hydraulique- ARBAOUI ABDALLAH. Blida).
- [18] Bensalem, I. et Bouhenna, N., Étude de faisabilité de l'extension du périmètre irrigué de Maghnia.
- [19] TAIBI .H et KASTALIF (2018). Dimensions d'un réseau d'irrigation périmètre Heissaine wilaya de Mostaganem. (Mémoire de master, Université Djillali Bounaama - Khemis Miliana.
- [20] TourerN, G. “ (1967). "Le palmier dattier culture et production. " Al awamia ".
- [21] Hollmuller, P., Lachal, B. M. (2005). Rafrâchissement par collecteur souterrain à eau, bâtiment Perret à Satigny (Ge).
- [22] Hollmuller, P., Lachal, B. M. (2005). Rafrâchissement par collecteur souterrain à eau, bâtiment Perret à Satigny (Ge).
- [23] Benhamou, M. et Draoui, B., Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar-Effet de la nature du sol. *Revue des Energies Renouvelables*, 2011, vol. 14, no 2, p. 219-228.

- [24] Congedo, P. M., Colangelo, G., & Starace, G. (2012). CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 33, 24-32.
- [25] Nebbali, R. Simulation Numérique Du Comportement Dynamique D'un Echangeur Eau-Sol CCTC 2013 Paper Number 87 (1569695069).
- [26] Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G.D., Mathur, J., Aseri, T., 2013b. Transient analysis based determination of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger in winter. *Energy Build.* 58, 76–85.
- [27] Boughanmi, H., Lazaar, M., et Farhat, A., Echangeur Géothermique de Type Panier Intégré dans Un Système Energétique Sous Le Climat Tunisien. 2015.
- [28] Rouag, A., Benchabane, A., Mehdid, C., 2018. Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I A new transient semi-analytical model for determining soil temperature. *J. Clean. Prod.*
- [29] Rosa, N., Soares, N., Costa, J. J., Santos, P., & Gervásio, H. (2020). Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100649.
- [30] Hermes, V. F., Ramalho, J. V. A., Rocha, L. A. O., dos Santos, E. D., Marques, W. C., Costi, J., ... & Isoldi, L. A. (2020). Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100603.
- [31] Salomon, Thierry, et al. "Dimensionnement du puits climatique." Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits canadiens ou provençaux, Rapport Adème, Région Languedoc Roissillon (2003).
- [32] Khabbaz, M. (2016). Contribution à l'étude d'un échangeur de chaleur air sol (puits canadien) pour le rafraîchissement de l'air sous le climat chaud et semi-aride de Marrakech (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- [33] Ben Ameer, O. K. B. A. (2016). ETUDE DE L'IMPACT DU RAFRAICHISSEMENT DES FONTAINES D'EAU DANS LES MAISONS A PATIO, CAS DES ZONES SAHARIENNES (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).

- [34] Versteeg, H., and Weeratunge M., An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education, 2007.
- [35] N. NAILI, M. Hazami, A. Farhat, (2009)' « étude analytique d'un échangeur eau/sol » Centre de Recherche et des Technologies de l'Energie, BP 95 Hammam Lif 2050, Tunisie. Laboratoire de Maîtrise des Technologies de l'Energie
- [36] K. BELHADJ, (2014)' « Etude d'un refroidisseur d'une installation de réfrigération solaire à adsorption » Mémoire de Master II université de Biskra, Algérie.